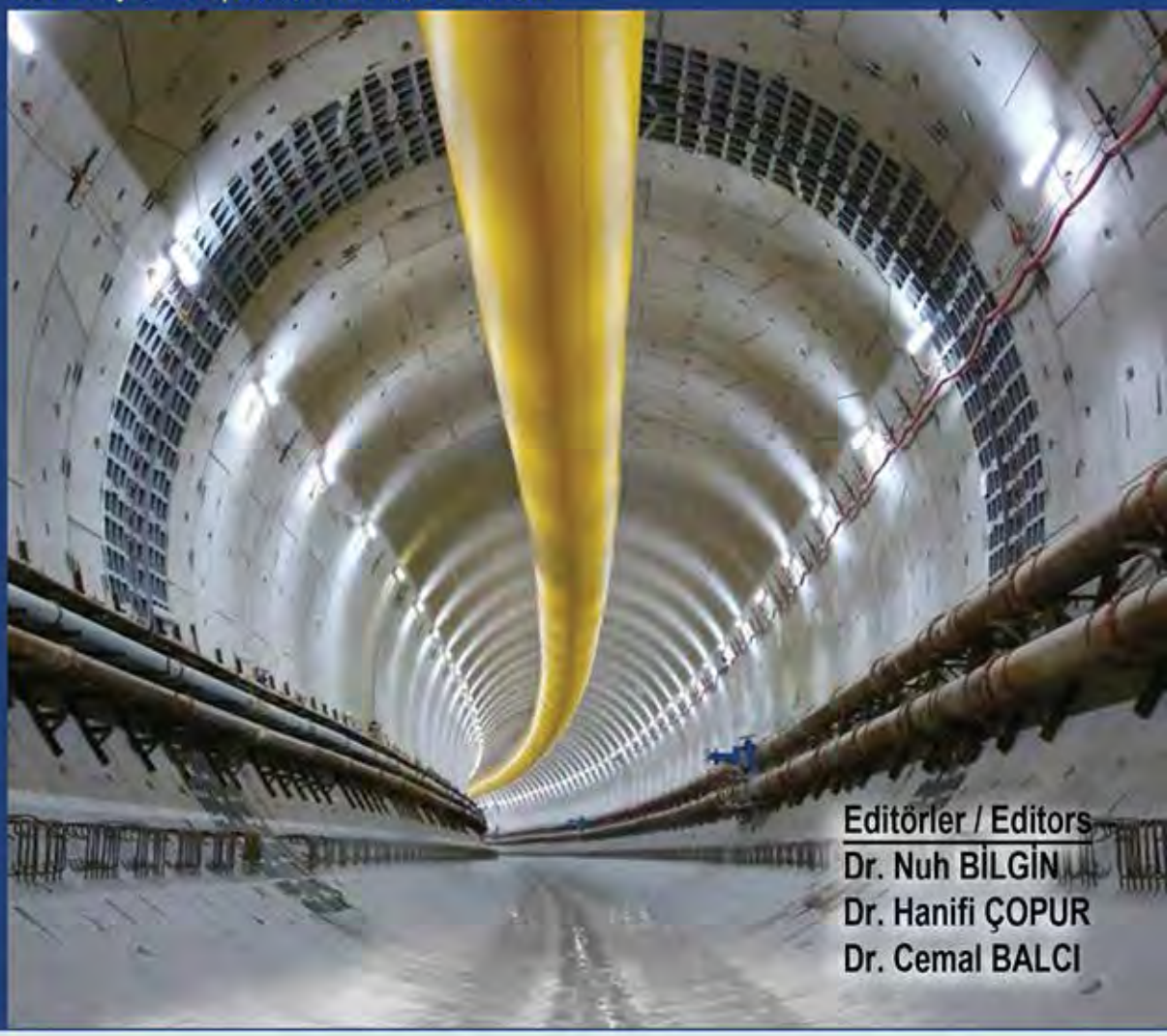
4. ULUSLARARASI YERALTI KAZILARI SEMPOZYUMU BİLDİRİLER KİTABI

PROCEEDINGS OF THE 4TH INTERNATIONAL UNDERGROUND EXCAVATIONS SYMPOSIUM

13-14 Eylül / September 2018, İSTANBUL



Editörler / Editors
Dr. Nuh BİLGİN
Dr. Hanifi ÇOPUR
Dr. Cemal BALCI

TMMOB
MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI
İSTANBUL ŞUBESİ
Chamber of Mining Engineers of Turkey
Istanbul Branch

TÜNELCİLİK DERNEĞİ
Turkish Tunnelling Society

4. ULUSLARARASI YERALTI KAZILARI SEMPOZYUMU
BİLDİRİLER KİTABI

PROCEEDINGS OF THE 4th INTERNATIONAL UNDERGROUND EXCAVATIONS SYMPOSIUM

İSTANBUL / 13-14 Eylül/*September* 2018

Editörler / *Editors*

Dr. Nuh BİLGİN
Dr. Hanifi ÇOPUR
Dr. Cemal BALCI

TMMOB Maden Mühendisleri Odası - Tünelcilik Derneği

TMMOB
Maden Mühendisleri Odası
İstanbul Şubesi

Tünelcilik Derneği

© Eylül-2018; Tüm hakları saklıdır. TMMOB Maden Mühendisleri Odası'nın yazılı izni olmaksızın bu kitap ya da bu kitabın bir kısmı herhangi bir biçimde çoğaltılamaz, yayınlanamaz.

ISBN : 978-605-01-1223-8

Baskı Yeri : Dinç Ofset Mat. Rek. San. ve Tic. Ltd. Şti.
Davutpaşa Cad. Emintaş Matbaacılar Sitesi No:103/580-581 Topkapı
Zeytinburnu – İstanbul (Tel: 0212 493 3300)

Kitap kapak fotoğrafı: Avrasya Tüneli

TMMOB Maden Mühendisleri Odası
Selanik Cad. No: 19/4 Kızılay - Ankara
Tel : +90 (312) 425 1080, Faks: +90 (312) 417 5290
Web : www.maden.org.tr E-posta: maden@maden.org.tr

TMMOB Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi
Büyükdere Cad. Çınar Apt. No:95 K:8 D:31 Mecidiyeköy İstanbul
Tel: +90 (212) 356 7410, Faks: +90 (212) 356 7412
E-posta: istanbul@maden.org.tr

MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI İSTANBUL ŞUBE YÖNETİM KURULU / *EXECUTIVE BOARD OF CHAMBER OF MINING ENGINEERS OF TURKEY*

Başkan	: Mesut ERKAN
II. Başkan	: Aziz Ümit İZİBELLİ
Yazman	: Mehmet MAKAR
Sayman	: Selçuk ŞİMŞEK
Üyeler	: Büşra ERTUĞRUL
	Muharrem TEPE
	Nihat Alpin MÜTEVELLİOĞLU

TÜNELCİLİK DERNEĞİ YÖNETİM KURULU / *EXECUTIVE BOARD OF TURKISH TUNNELLING SOCIETY*

Başkan	: Nuh BİLGİN
Başkan Yrd.	: Hanifi ÇOPUR
Başkan Yrd.	: Mücahit NAMLI
Genel Sekreter	: Fevzi AKSU
Sayman	: Cemal BALCI
Üyeler	: Doğan TALU
	Öner YILMAZ
	Erdinç DEMİR
	Utku GÜMÜŞ
	Ali YÜKSEL
	Özgür Savaş ÖZÜDOĞRU
	Muammer ÇINAR
	Birol AKPINAR

Düzenleme Kurulu / *Organization Committee*

Mesut ERKAN	Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Başkanı
Dr. Nuh BİLGİN	Tünelcilik Derneği Yönetim Kurulu Başkanı

Yürütme Kurulu / *Executive Committee*

Öner YILMAZ	Başkan
Dr. Hanifi ÇOPUR	Başkan Yrd.
Mesut ERKAN	Genel Sekreter
Selçuk ŞİMŞEK	Sayman
Mehmet MAKAR	Yazman
Fevzi AKSU	Yazman
Dr. Cemal BALCI	Üye
Muammer ÇINAR	Üye
Büşra ERTUĞRUL	Üye
Utku GÜMÜŞ	Üye
Mahir Taylan KÖYLÜOĞLU	Üye
Dr. Ümit ÖZER	Üye
Özgür Savaş ÖZÜDOĞRU	Üye
Dr. A. Ekrem YÜCE	Üye
Dr. Ali YÜKSEL	Üye

Danışma Kurulu / *Advisory Board*

Dr. Nuh BİLGİN	Istanbul Technical University
Dr. Nuri Ali AKÇIN	Bulent Ecevit University
Dr. Georgious ANAGNOSTOU	ETH Zurich (Switzerland)
Dr. Ergin ARIOĞLU	Istanbul Technical University
Dr. Ömer AYDAN	Tokai University (Japan)
Dr. Mehmet ÇIĞLA	Curtin University (Australia)
Dr. Ayhan KOÇBAY	State Hydraulic Works (Turkey)
Dr. Michael MOONEY	Colorado School of Mines (USA)
Dr. Priscilla NELSON	Colorado School of Mines (USA)
Dr. Bjorn NILSEN	Norwegian University of Science and Technology
Dr. Turgay ONARGAN	Dokuz Eylul University
Dr. Levent Özdemir	Ozdemir and Associates (USA)

Dr. Danielle PEILA	Torino Polytechnical University (Italy)
Dr. Jamal ROSTAMI	Colorado School of Mines (USA)
Dr. Markus THEWES	Ruhr University Bochum (Germany)
Dr. Reşat ULUSAY	Hacettepe University
Dr. Jian ZHAO	Monash University (Australia)

Bilimsel Kurul / *Scientific Committee*

Dr. Nuri Ali AKÇİN (BEÜ)
Dr. Hürriyet AKDAŞ (OGÜ)
Dr. Raşit ALTINDAĞ (SDÜ)
Dr. Georgios ANAGNOSTOU (ETH)
Dr. Hamit AYDIN (BEÜ)
Dr. Mehmet BELİRGEN (YTÜ)
Dr. Mustafa AYHAN (DÜ)
Dr. M. Erdinç BİLİR (BEÜ)
Dr. Atilla CEYLANOĞLU (CÜ)
Dr. Mehmet ÇIĞLA (Curtin)
Dr. Ahmet DAĞ (ÇÜ)
Dr. Ahmet DEMİRCİ (ÇÜ)
Dr. Vedat DİDARİ (BEÜ)
Dr. Şebnem DÜZGÜN (CSM)
Dr. Şinasi ESKİKAYA (İTÜ)
Dr. Abdullah FİŞNE (İTÜ)
Dr. Melih GENİŞ (BEÜ)
Dr. Hasan GERÇEK (BEÜ)
Dr. M. Kemal GÖKAY (SÜ)
Dr. R. Mete GÖKTAN (OGÜ)
Dr. Baykal HANCIOĞLU (İAÜ)
Dr. Türker HÜDAVERDİ (İTÜ)
Dr. Melih İPHAR (OGÜ)
Dr. Sair KAHRAMAN (HÜ)
Dr. Ali KAHRİMAN (OÜ)
Dr. Abdulkadir KARADOĞAN (İTÜ)
Dr. Doğan KARKUŞ (DEÜ)
Dr. Celal KARPUZ (ODTÜ)
Dr. Erdoğan KAYMAKÇI (BEÜ)
Dr. Ayhan KESİMAL (KTÜ)
Dr. Ahmet Mahmut KILIÇ (ÇÜ)
Dr. Özen KILIÇ (ÇÜ)
Dr. Murat Serdar KIRÇIL (YTÜ)
Dr. Gürcan KONAK (DEÜ)
Dr. Cengiz KUZU (İTÜ)
Dr. Michael MOONEY (CSM)
Dr. Mücahit NAMLI (İMÜ)
Dr. Priscilla NELSON (CSM)
Dr. Bjorn NILSEN (NTNU)
Dr. Ahmet Hakan ONUR (DEÜ)
Dr. Gündüz ÖKTEN (İTÜ)
Dr. Ahmet ÖZARSLAN (BEÜ)
Dr. Yılmaz ÖZÇELİK (HÜ)
Dr. İhsan ÖZKAN (SÜ)
Dr. Atilla ÖZTÜRK (İTÜ)
Dr. Daniele PEILA (TPU)
Dr. Jamal ROSTAMI (RUB)
Dr. Okan SU (BEÜ)
Dr. Cem ŞENSÖĞÜT (DÜ)
Dr. Markus THEWES (RUB)
Dr. Nuray TOKGÖZ (İÜ)
Dr. Deniz TUMAÇ (İTÜ)
Dr. Hakan TUNÇDEMİR (İTÜ)
Dr. Bülent TÜTMEZ (İÜ)
Dr. Ali UÇAR (DÜ)
Dr. Tuğrul ÜNLÜ (BEÜ)
Dr. Bahtiyar ÜNVER (HÜ)
Dr. Mahir VARDAR (İTÜ)
Dr. Olgay YARALI (BEÜ)
Dr. Ali Osman YILMAZ (KTÜ)
Dr. Özgür YILMAZ (BEÜ)
Dr. Jian ZHAO (Monash)

Çalışma Kurulu / *Working Committee*

Mevlana Alaloğlu	Yapı Merkezi İnşaat
Ergün Altıntaş	Tüprag
Cihan Altuğ	Dağcan İnşaat
Muhammer Atasoy	Cengiz-Kolin Kalyon Ortaklığı
İrfan Atik	Soner Temel Mühendislik
Mesut Aygar	B. Ergünler
Celal Barış	Gülermak Ağırsanayi İnşaat
Şaban Başıkara	Bayburt İnşaat
Ali Başpınar	Hitit İnşaat
Köksal Binici	Kalyon İnşaat
N. Kemal Budaklı	Albim Yapı
Cengiz Bulut	Cengiz-Özaltın İnşaat Ortaklığı
Ş. Bülent Baydar	Yertaş İnşaat
Ali Nazım Çatori	Limak İnşaat
Emre Çelik	Gülermak Ağırsanayi İnşaat
Mümin Çelik	
Ali Dağlı	Soner Temel Mühendislik
İsmail Demirtaş	
Hasan Denek	Taş Yapı İnşaat
Hüseyin Düzgün	İnarma
Oğuz Efe	MNG
Ertan Er	Söğüt - YDA
Celalettin Ercan	Geodata
Tayfun Erdoğan	Sargın İnşaat
A. Kürşat Erol	NÖMAYG
Ömer Fettahoğlu	Cengiz İnşaat
Ö. Faruk Gümrükçü	CMA
Ali Hazar	Alarko Alsim
Murat Hızel	Doğuş İnşaat
Yasin Ilıkça	Dağcan İnşaat
Ahmet İşlek	Gülermak- Kolin-Kalyon Ortaklığı
Taner Kalakçı	Şenbay-Kolin-Kalyon Ortaklığı
Erbil Kanlıçay	Sargın İnşaat
Gökhan Kara	Feza İnşaat
Ayhan Kişi	Kalyon İnşaat
Sinan Kuku	Özgün İnşaat
Korkut Möröy	Yüksel Proje
Halil Murat	Soner Temel Mühendislik
Turgay Özat	Soner Temel Mühendislik
Timuçin Özbayır	Yapı Merkezi İnşaat
Tevfik Özdemir	Özgün İnşaat
Gültekin Özkan	Özce İnşaat
Taylan Özkaya	Zorgün İnşaat
Ayhan Sarıöz	Bayburt Yapı
Tarkan Sezgin	E-Berk
Mehmet Sonuç	Sudi Binladin Grup
Eren Soyer	Polyak Eynez
Halil Şahin	
Serdar Şavk	Doğuş İnşaat
Cüneyt Şentürk	NYÖY
Tamer Şir	Tüprag
Süleyman Taşatan	Özgün İnşaat
Muharrem Tezcan	Zorgün İnşaat
Murat Toksöz	Ant Tünelcilik
Ali Ünlü	Özgün İnşaat
Engin Ünver	Soner Temel Mühendislik
Bahriye Yaman	Kolin-Kalyon-Cengiz İnşaat Ortaklığı
Meriç Yetiş	Özka İnşaat
Cehdi Yıldırım	Soner Temel Mühendislik
Okan Yıldız	Ant İnşaat
Yalçın Yılmaz	Çelikler Yapı İnşaat
Mustafa Yurt	Şenbay-Kolin-Kalyon Ortaklığı
Suat Yurtsever	Özkar İnşaat

DESTEK VEREN KURUM VE KURULUŞLAR /*ENDORSED BY*

İTÜ Maden Fakültesi
İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi
Jeoloji Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi
Jeofizik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi
Makine Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi
Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Derneği
Agrega Üreticileri Birliği
Türkiye Hazır Beton Birliği

SPONSORLAR /*SPONSORS*

Ana Sponsor / *Prime Sponsor*
Tüprag

Altın Sponsor / *Gold Sponsor*
Yapı Merkezi

Çanta Sponsoru / *Bag Sponsor*
Soner Temel Mühendislik

Kahve Molası* Sponsoru / Coffee Break *Sponsor
E-Berk

USB Sponsoru / *USB Sponsor*
Özce İnşaat

Not Defteri ve Kalem Sponsorları / *Notebook and Pen Sponsors*
Zitron Havalandırma Sistemleri
Ascendum Makina
Tünel Mühendisliği ve Danışmanlık

Sandalye Başlığı Sponsorluğu / *Symposium Chair Sponsor*
Tünelmak

DESTEK VEREN ŞİRKETLER /*SUPPORTING COMPANIES*

Armosan
Atalay Sondaj Makine
Ayce Zemin Makinaları
Basf
Bekaert Maccaferri
Chryso
Creg TBM Germany GmbH
Çandıroğlu Makine Vinç A.Ş.
Destek Mekanik
E-BERK
Erkom
Euclid Chemical
Herrenknecht
Hidromek
İnan Makina
Kapeks
Labris
Mesa İmalat
NCB SRL
Orica-Nitro
Pena Trade
Polisan Kimya
Putzmeister
Shell
Terratec
Titan Makine
Tünelmak
Üntel Kabloları
Zitron Havalandırma Sistemleri

Ö N S Ö Z

Yeraltı yapıları dikkate alındığında, öncelikle hazırlık ve üretim çalışmalarıyla madencilik faaliyetleri, metro, karayolu, demiryolu ve hatta denizaltı ulaşım tünelleri, hidroelektrik santral tünelleri vb. çalışmalar modern çağın gereksinimleri ile birlikte insan yaşamında her geçen gün artan öneme sahip çalışmalardır.

Ülkemizde ve özellikle İstanbul'da ulaşıma çözüm oluşturmak adına, aslında çok geç kalınmış olan metro çalışmaları, toplu ulaşıma getirdiği rahatlık ile giderek artan yatırım projeleri haline dönüşerek, çalışma hayatının önemli bir parçası olmuştur. Bu nedenle kamuoyunun talebi, teknik personellerin iş olanağı, istihdam ve gerek yüklenici firmalar, gerekse tedarikçi firmalar için önemli bir sektör haline gelmiştir. Bu nedenle, tünelcilik konusunda sektör bileşenleri kendilerini hızla dünyaya entegre ederek uzman hale gelmiş ve dünya genelinde söz sahibi olma noktasına ulaşmışlardır. Bu firmalar yurtdışında da önemli projelere imza atar hale gelmişlerdir.

Yaşanan bu süreçte karşılaşılan sorunlar, üretilen çözümler, teknik gelişmeler ve elde edilen deneyimlerin gerek sektör bileşenleri, gerekse kamuoyuyla paylaşıldığı bir etkinlik amacıyla, günümüzde uluslararası hüviyetle devam eden UYAK Sempozyumunun ilki 1-3 Aralık- 1994 yılında **TMMOB Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi'**nin organizasyonu olarak **1. Ulaşımda Yeraltı Kazıları Sempozyumu** adıyla gerçekleştirilmiştir. O tarihlerde başlanan ilk İstanbul Metrosu inşaatı, sempozyumun ana gündemi olacak şekilde sorunlar ve çözümler tartışılmıştır. İlk metronun inşaat süreci 7 yıl sürmüş olması nedeni ile, bu süreçte ikinci sempozyumu düzenlemek yeni konu ve gelişmeler için yeterli veri oluşmadığı öngörüsü ile, birinci sempozyum kitapçığına ilave edilerek 2002 yılında genişletilmiş baskı yayınlanmıştır.

Uzunca bir aradan sonra, özellikle İstanbul başta olmak üzere ülkemizde giderek artan metro çalışmaları ile birlikte konunun tekrar ele alınması ihtiyacı oluşmuş ve **2. Ulaşımda Yeraltı Kazıları Sempozyumu** *Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi* ve *İstanbul Teknik Üniversitesi*nin iş birliğiyle Kasım 2007'de gerçekleştirilmiştir.

Ardından İstanbul'da 2004 yılında tüp geçit, 2011 yılında ise taşıt geçişi sağlayan ve iki kıtayı deniz altından birleştiren dünyanın iki önemli projesinin hayata geçmesi, sektöre olan ilgiyi daha da artırmıştır. 2013 yılı başında Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi **3. Ulaşımda Yeraltı Kazıları Sempozyumu**' nu düzenlemeye karar verdiğinde, Ağustos-2012 yılında kurulan ihtisas örgütü **Tünelcilik Derneği**'nin de bu organizasyonun bir bileşeni olması gerektiği öngörüsü taraflarca tartışılarak kabul görmüştür. Böylelikle Tünelcilikle ilgili bir meslek örgütü, birde ihtisas örgütü gücünü birleştirerek, Kasım-2013 ayında hafızalarda bıraktığı olumlu izlenimlerle sektörün başarılı bir organizasyonu olarak uluslararası nitelikte **3. Uluslararası Ulaşımda Yeraltı Kazıları Sempozyumu** gerçekleştirilmiştir.

Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi ve Tünelcilik Derneğinin güç birliği ile bir önceki etkinlikte elde edilen başarı nedeniyle, **UYAK2018** - **4. Uluslararası Yeraltı Kazıları Sempozyumu** etkinliğinin, yine her iki kurum tarafından 13 – 14 Eylül 2018 tarihinde gerçekleştirilmesine karar verilerek çalışmalara başlanmıştır.

Sektörün sorunlarını tartışabileceği, birikimlerini paylaşabileceği ve gelişen teknoloji ile yeni çözüm enstrümanlarının sergilendiği **UYAK2018** etkinliğinde, sempozyumu organize eden kuruluşların yönetim kurulları ve sempozyum yürütme kurulu, etkinlikle ilgili bazı değişiklik kararları almışlardır.

a) *Ulaşımda Yeraltı Kazıları* ifadesi *Uluslararası Yeraltı Kazıları* olarak değiştirilmiş ve bundan böyle *Uluslararası* hüviyetle devamı,
b) Madencilikle ilgili yeraltı faaliyetlerinin de sempozyum kapsamına alınmasını ve *Tünelcilik* ile *Madencilik* sektörlerinin benzer faaliyetlerdeki tecrübelerini paylaşarak tartışılması,
c) Yeraltı yapıları faaliyetlerine hizmet eden tedarikçi bileşenlerin, sorunlar ve ihtiyaçlar için ürettikleri çözümleri, sektör uygulamacılarına tanıtabilmek amacı ile sergi ve stant bölümleri oluşturulması fikri benimsenmiştir.

Ayrıca; Madencilik faaliyetleri genelinde; kazı, tahkimat, havalandırma, ulaşım, pasa nakli, su atımı ve diğer faaliyetler ile birlikte tüm yeraltı kazılarında yer almasına ve tünelcilik çalışmalarının da tamamının bu çalışmaları içermesine rağmen, maden mühendisliği disiplini bu çalışmalar içerisinde son yıllara kadar yeterince yer bulamamıştır. Maden Mühendisleri Odası tarafından, bu etkinliklerin başlangıcından beri vurgulanmaya çalışılan bu önemli konu uzun yıllar sonrasında gereken karşılığını bulmaya başlamış ve tünelcilik çalışmalarında görev alan maden mühendisleri sayısında artış gözlenmiştir. Madencilik ve tünel faaliyetleri asli çalışmalar açısından bu kadar iç içe olan iki sektör iken, tünel şartnamelerinde kilit personel statüsünde halen Maden Mühendisine yer verilmiyor olmasını bir eksiklik olarak vurgulayarak, ilgili kurumları bu konuda gerekli düzenlemeleri yapmaya davet ediyoruz.

Bütün bu öngörülerle hazırlanan **4. Uluslararası Yeraltı Kazıları Sempozyumu'**nun sektör bileşenlerinin gelişimine katkı sağlayacağına olan inancımızı belirtmek isterim. Bu tür etkinlikler, sektör bileşenlerinin kafasında sorusu ile gelip cevabı ile çıktığı zaman hedefine ulaşmış olacaktır.

Saygılarımla,

Öner YILMAZ
Maden Mühendisi
UYAK2018 Sempozyum Yürütme Kurulu Başkanı
TMMOB Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi ve
Tünelcilik Derneği Adına

Eylül 2018, İstanbul

İÇİNDEKİLER / *CONTENTS*

Sayfa
Page

Çağrılı Bildiriler / *Keynotes*

Avrasya Tüneli Kazısında Tüketilen Enerji Miktarlarının ve Kimi Kazı Parametrelerinin Değerlendirilmesi 3
Evaluation of Energy Consumption and Some Excavation Parameters in the Eurasia Tunnel
B. Arıoğlu, H.B. Gökçe, E. Arıoğlu

Mühendislik Jeolojisi ve Jeomekaniğin Tünelcilikteki Rolü ve Önemi - Tünel Geotekniği 13
The Role and Importance of Engeneering Geology and Geomechanics in Tunnelling - Tunnel Geotechnics
M. Vardar

On the Concept of Innovative Risk Analysis-Driven Design Approach in Mining Engineering 27
Maden Mühendisliğinde Tasarımda Yenilikçi Risk Analizi
R.R. Osgoui, G. Russo, P. Grasso

Current State of Tunneling and also Future Planning in India: Engineering, Geological and Contractual Risk and Opportunities 47
Hindistanda Tünelcilik Faaliyetleri, İmkanlar, Mühendislik, Jeolojik ve İhale Riskleri
S.P. Sen

Mekanize Kazı, EPB TBM ve Klasik Tünelcilik Vaka Analizleri / *Mechanical Excavation, EPB TBM and Classical Tunneling Case Studies*

Ataköy – İkitelli Metro Projesinde Doğu Sanayi İstasyonu Çıkış Aynasının Alın Kalıbı ve Poliüretan Enjeksiyon Köpüğü İle Sağlamlaştırılması 57
Reinforcement of Dogu Sanayi Station Face with Injection Mold and Polyurethane Injection Foam at Ataköy - İkitelli Metro Project
U. Çalışkan, C. Balcı, H.A. Yazıcı, T. İlkdoğan

Baltalimanı-Ayazağa ve Baltalimanı-Kağıthane Atıksu Tüneli'nde Mühendislik Çözümleri 65
Engineering Solutions in Baltalimanı-Ayazağa and Baltalimanı Kağıthane Waste Water Tunnel
T. Özdemir, O. Eşsizoğlu, S. Kuku, A.E. Bilgili, M. Kaski

Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tünelinde Değişen Litolojide TBM Performansının Değerlendirilmesi 73
Evaluation of TBM Performance in Varying Lithology During Construction of Mahmutbey-Mecidiyekoy Metro
F. Kara, İ.S. Binen, U. Ateş

EPB TBM Tunneling through Challenging Ground Conditions: a Case Study in the Ataköy – İkitelli Subway Tunnel, Turkey 83
Zorlu Zemin Şartlarında EPB TBM Tünelciliği: Ataköy – İkitelli Metro Tünelinde Örnek Bir Çalışma, Türkiye
H.A. Yazıcı, T. İlkdoğan, V. Kuruyer, K. Yavuz, İ. İçöz, B. Özkaya, U. Çalışkan, O. İnal, D. Tumaç

Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesindeki Teknik Hacimlerin Tünel Olarak Yapılmasının Projeye Mali ve Süresel Etkisi 91
Effect of Construction of Technical Rooms by Tunnelling on the Cost and Duration of Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Project
M.Namlı

Kirazlı-İkitelli Arasında İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Yüzey Oturmaları 97
Excavation Induced Surface Settlement between Kirazlı and İkitelli Twin Metro Line
S. Demir, Y. Mahmutoğlu

Zor Şartlarda Kazının TBM Performans Parametreleriyle Değerlendirilmesi, Silvan Tüneli Örneği 105
Evaluation of Tunnel Excavation under Difficult Conditions through Performance Parameters of Tunnel Boring Machine, with an Example of Silvan Tunnel
D. Aydın, M. Ayhan

Bakırköy-Bahçelievler-Kirazlı Metro Hattı, Özgürlük Meydanı İstasyonu, Susuzlaştırma Enjeksiyon İşleri 2018 117
Dewatering Injection Works 2018 in Bakırköy-Bahçelievler-Kirazlı Metro Line Özgürlük Square Station
S.S. Şeref, Ö. Yilmaz, B. Demirci

Amasra Taşkömürü Havzasında Kullanılan AM105 Tipi Kollu Galeri Açma Makinasının Performans İncelemesi 127
Performance Investigation of AM105 Type Roadheader Operating in Amasra Hardcoal Field
O. Yaralı, H. Kıran

Van (Başkale) Tünelinin Yapımında Karşılaşılan Problemler ve Çözüm Önerileri 139
Problem and Solution Suggestions in Construction of the Van (Başkale) Tunnel
O.O. Varol, M. Ayhan

Umbrella Arch (Şemsiye Boruları) Uygulamalarında Ölçme İşleri Yöntemleri 143
Methods of Surveying Works for Umbrella Arch Applications
İ. Dilli, S. Şen

Kadıköy-Kartal Metrosu Ünalan İstasyonu ve Acıbadem Metrobüs Durağı ile Akasya AVM Arası Yaya Bağlantı Tüneli İnşaatında Karayolu Geçişi Yatay Boru İtme Uygulaması 149
Implement of Horizontal Thrust Pipes in the Construction of Kadıköy-Kartal Metro Station, Ünalan Station and Acıbadem Metrobus Station and Akasya Shopping Center Pedestrian Crossing
E. Kanlıçay

Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral Projelerinde Yeraltı Kazı ve Tahkimat Yöntemlerinin İncelenmesi 153
Investigation of Underground Excavation and Support Methods for Pumped Hydropower Storage Projects
A. Özarslan , E. Köken

Mekanize Kazılarda Performans Tahmini / *Performance Prediction for Mechanized Excavations*

PLCM Kaya Kesme Deney Sonuçları İle Kayaçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması 165
Investigation of the relationships between PLCM Rock Cutting Test Results and Physical and Mechanical Properties of Rocks
R. Çomaklı, C. Balcı

On the Development of Robust Performance Risk Indicators for Hard Rock TBMs 173
Sert Kaya TBM'leri için Kapsamlı Performans Risk Göstergelerinin Geliştirilmesi
M. Zare Naghadehi, P. Haghi Topraqlou, H. Copur

Aynı Formasyon-Değişken Litolojide Kazı Yapan İki Farklı EPBM'in Performans Analiz ve Değerlendirmesi 179
Performance Analysis and Evaluation of Two Different EPBMs Excavating the Same Formation-Variable Lithology Conditions
N. Tokgöz, İ.S. Binen

Needle Penetration Index Test to Estimate Performance of Transverse Type Roadheaders 193
Transvers Tip Kollu Galeri Açma Makinelerinin Performans Tahmini için İğne Batırma Deneyleri
S. Kahraman, M. Rostami, E. Saygın

Amasra Taşkömürü Havzası'nda Kullanılan Kollu Galeri Açma Makinesi Performansının Schmidt Çekiciyle Değerlendirilmesi 199
Assessment of Performance of Roadheader used in Amasra Hardcoal Basin by Schmidt Hammer
M. Akkaş, O. Su, S.S. Şenkal

Kayadan Oyma Yapıların Kazısında Kayaç Özeliklerinin Kollu Galeri Açma Makinesi Kesici Uç Tüketimine Etkisi 207
Effects of the Rock Properties on the Cutter Consumption in Rock-cut Structures Excavation
R. Çomaklı, A.R. Mavi

Delme-Patlatma / *Drilling-Blasting*

Kuzey Marmara Otoyolu Cebeci Tüneli Patlatma Tasarımının Bilgisayar Destekli Değerlendirilmesi 217
Computer-aided Evalution of Blast Design Applied in North Marmara Highway Cebeci Tunnel
T. Hüdaverdi, Ö. Akyıldız, D. Duran

AKH Demiryolu Projesi Kapsamında Gerçekleştirilen Patlatmalı Tünel Kazılarında Yelpaze Çekme Metodunun Uygulanması ve Değerlendirilmesi 225
Implementation of Fan-Cut Method in Tunnel Excavations by Drilling and Blasting within the Scope of AKH Railway Project
E. Alan, D. Şimşek, A. Domaç

Tünel Kazılarında "Son Kesme" Uygulamalarının Önemi 241
The Importance of Smooth Blasting in Tunnel Excavations
Ç. Uzun, İ.H. Çelik

Kadıköy-Kartal Metro İnşaası Sırasında Yapılan Kontrollü Tünel Patlatmalarının Yapısal Hasar Riski Açısından Değerlendirilmesi 247
Analysis of the Controlled Blasting Applications Made During Kadıköy-Kartal Metro Construction in terms of Structural Damage Risk
E. Alan

Bir Yeraltı Maden İşletmesinin Galeri Patlatmalarında Elektronik Ateşleme Sistemi Kullanılarak İyileştirilmesi 261
Improving an Underground Mine by Implementing the Electronic Blasting Systems at Development Blasts
Ö.G. İlik, Ö. Düzgün, B. Gençtürk

Kadıköy-Kartal Metro Güzergâhı'nda Patlatmalı Tünel Kazısı Yapılan Formasyonların "k" ve "β" Katsayılarının Tespit Edilmesi, Kapsül Gecikme Aralığının Genliğe Etkisi 269
Determining "k" and "β" Coefficients of the Formation that Excavated by Blasting on Kadıköy-Kartal Metro Route, The Effect of Detonator Delay Time on Amplitude
E. Alan

Delme-Patlatma ile Tünel Kazısı Eğitiminde Artırılmış ve Sanal Gerçeklik Uygulamaları 281
Augmented and Virtual Reality Practices in Tunnel Excavation Training with Drilling-Blasting
İ.S. Büyüksağiş , M. Gürsoy

Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde Fazla Kazının Kontrol Altına Alınması 291
Control of Overbreaks in Efemcukuru Gold Mine
İ.D. Doğan

Kuzey Marmara Otoyolu Cebeci Tünelinde Yapılan Patlatmalı Kazılarda Ateşleme Sistemi ve Şaft Kapak Yapısının Hava Şoku Üzerine Etkisi 299
Effect on Air Blast of Shaft Cover Structure and Initiation System in Blasting Excavations in Cebeci Tunnel at Northern Marmara Highway
Ü. Özer, A. Karadoğan, M.C. Özyurt, Z. Sertabipoğlu, Ü.K. Şahinoğlu, İ. Sefer, B.C. Zaif, A. Durdu, A. Kişi, M.K. Günay, H. Karaoğlan, O. Özkul, O. Bayındır, M. Yurttaş, İ. Çevik, S. Şireci, S. Şahin, E. Kanlıçay

Analysis of the Effect of Delay Time on Particle Size Distribution and Advance of the Northern Marmara Highway, Cebeci Tunnel Excavated by Explosive 307
Analysis of the Effect of Delay Time on Particle Size Distribution and Advance of the Northern Marmara Highway, Cebeci Tunnel Excavated by Explosive
A. Karadoğan, Ü. Özer, K. Yıldırım, M.C. Özyurt, Z. Sertabipoğlu, Ü.K. Şahinoğlu, O. Özkul, O. Bayındır, M. Yurttaş, İ. Sefer, C. B. Zaif, A. Durdu, A. Kişi, M. K. Günay, H. Karaoğlan, İ. Çevik, S. Şireci, S. Şahin, E. Kanlıçay

Kuyu Açma ve Delme / *Shaft Sinking and Raise Boring*

Balya Kurşun-Çinko Madeninde Kullanılan Başyukarı Delme Makinesinin (BDM) Performans Değerlendirmesi 317
Performance Evaluation of Raise Boring Machine (RBM) used in Balya Lead-Zinc Mine
T. Erdoğan, E.Doğan, A. Shaterpour-Mamaghani, H. Çopur

Zigana Tünel Projesi, Mekanize Havalandırma Kuyuları Açılması Kapsamında, Raise Boring Operasyonları 327
Zigana Highway Tunnel Project, Raise Boring Operations in Mechanization of Ventilation Shafts Opening
F. Yazar, O. Şirin, S.Ö. Koç, K. Küçükateş

Efemçukuru Altın Madeni Havalandırma Bacası Kazı ve Desteklenmesi 335
Excavation and Support of Ventilation Gallery in Efemçukuru Gold Mine
Ö. Yılmaz, H. Murat, İ. Atik

Kuyu Kazı Performansının Optimizasyonu ve Kalite Yönetimi 343
Optimising Shaft Sinking Performance and Quality Management
E. Soyer, S. Topcan

Kuyu Kazı Çalışmalarında Acil Durumların Yönetimi 351
Emergency Management for Shaft Sinking
E. Kahraman, Ç. Koçak, E. Soyer

Basınçlı Akifer İçinde Derin Maden Kuyuları İnşaası İçin Yapılmış Susuzlaştırma ve Enjeksiyon Çalışmaları 361
Pregrouting, Grouting and Dewatering during Deep Shaft Sinking in Pressurized Aquifer Zone
E. Soyer, S. Topcan

İş Sağlığı ve Güvenliği / *Occupational Health and Safety*

Yeraltı Kazı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliğine Genel Bir Bakış 371
An Overview of Occupational Health and Safety in Underground Excavation
T. Oral, T. Özer

Yeraltı Hazırlık Çalışmalarında İstenmeyen Olayların Önlenmesinde Detaylı Risk Raporu Hazırlamanın Önemi 379
Importance of Detailed Risk Report Prevention of Understanding Events in Underground Preparation Studies
R. Kocaman, B. Kocaman, C. Doğruöz

Yeraltı Kazı Faaliyetlerinin İş Sağlığı Yönünden Optimizasyonu 389
Optimisation of Underground Excavation Activities in Terms of Occupational Health
H. Yücel, E. Soyer

Madenlerde İş Sağlığı ve İyi Uygulama Örnekleri 397
Health and Safety in Mines and Examples of Appropriate Applications
B. Coşkun

Güvenli Kuyu Açma Çalışmaları: Polyak Eynez Kuyuları Örneği 405
Safe Shaft Sinking Operations: Example of Polyak Eynez Shafts
E. Kahraman, Ç. Koçak, E. Soyer

Tünellerde Araç Yangını Olması Durumunda Jet Fanların Performanslarının İzlenmesi ve Tünel Güvenliğine Etkileri 413
Monitoring Jet Fan Performances in Case of Vehicle Fire in Tunnels and Effects on Tunnel Safety
U. Yaşa, Ö. Mercan, S. Karaçelebi

Kapalı Alanlardan Kuyu-Temel Çalışmalarında İş Sağlığı ve Güvenliği 423
Occupational Health and Safety in Shaft-Foundation Works of Closed Mediums
S. Akyıldız

Madencilik ve Tünelcilikte Son Gelişmeler / *Recent Developments in Mining and Tunneling*

Tünelcilik Eğitiminde Artırılmış ve Sanal Gerçeklik Uygulamaları 433
Augmented and Virtual Reality Practices in the Tunneling Training
İ.S. Büyüksağiş , M. Gürsoy

Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde Jeoteknik Modelleme, Değerlendirme ve Üretim Pano Tasarımı 449
Geotechnical Modelling, Assessment and Stope Design in Tüprag Efemcukuru Gold Mine
M. Berber, İ. İleri

Efemçukuru Altın Madeninde Wi-Fi Kullanımı ve Yeraltı Sinyalizasyon Sistemi ile Nakliye Verimliliğinin Arttırılması 459
Wi-fi Use and Increase of Productivity with Underground Signalization System in Efemcukuru Gold Mine
S. Ercan

Bakım Fonksiyonu Performans Ölçüm Çerçevesi ve Göstergelerinin Geliştirilmesi 465
Development of Maintenance Function Performance Measurement Frame and Indicators
O. Erkuş

Tüprag Efemçukuru Yeraltı Altın Madeninde Havalandırma Takip ve Kontrol Sisteminin Otomasyonu 477
Tuprag Efemcukuru Underground Gold Mine Ventilation Automation of Tracking and Control System
G. Cingöz, İ. İleri

Effect of Microwave Treatment on Strength of Igneous Rocks 485
Mikrodalga ile Isıtmanın Mağmatik Kayaçların Dayanımına Etkisi
S. Kahraman, A.N. Canpolat, A. Çolak, Ş.A. Yurdacan, M. Fener

Püskürtme Betonda Farklı Sentetik Lif Kullanımının Ultrasonik Dalga Hızına Etkisi 493
Effect of Different Synthetic Fiber Using Shotcrete on Ultrasonic Pulse Velocity
G. Külekçi

Assessment of Analytical Solutions for Time-Dependent Behavior of Unlined Tunnels 501
Tahkimatsız Tünellerin Zaamana Bağlı Davranışları için Analitik Çözümlerin Değerlendirilmesi
E. Kabwe, M. Karakus, E.K. Chanda

Demiryolu Menfezlerinin Hat Esnekliği ve Hat Üzerine Uygulanan Tekerlek Kuvvet Değerleri Üzerine Etkisi 509
Effects of Railroad Culverts on Railway Track Stiffness and on Train Wheel Forces
N.Ö. Bezgin

Duble Yol Projesi İnşaatı RN09: Kherrata Boğazları Düzenleme Çalışmaları 517
Construction Project of Road Duplication RN09: Kherrata Gorges Rehabilitation Works
T. Özdemir, C. İlker, S. Taşatan

Tahkimat Tasarımında Yeni Bir Yaklaşım: Deformasyona İzin Vermeyen Tahkimat Sistemi 525
A New Approach in Support Desing: Non-Deformable Support System
C.O. Aksoy

Tünellerde Kaya Sınıflaması ve Tahkimat Uygulamaları, Gümüşhane Çevre Yolu Tünel Örneği 535
Classification of Rock and Support Applications for Tunneling, Sample of Environmental Road in Gümüşhane
G. Külekçi, A.O. Yılmaz

Dizel Araç ve Ekipman Emisyonlarının Tünel Hava Kalitesine Etkileri 541
Effects of Emissions of Diesel Vehicle and Equipment on Tunnel Air Quality
S. Karaçelebi, U. Yaşa, O. Mercan

Effect of Mineralogy on Microwave Heating of Igneous Rocks
Mağmatik Kayaçların Mikrodalga ile Isıtılmasında Mineralojik Yapının Etkisi 553
A.N. Canpolat, S. Kahraman, M. Fener, A. Çolak, Ş.A. Yurdacan

Tam Mekanize Kazı Yapılabilirliğinin Yapay Sinir Ağları ile Değerlendirilmesi 559
Evaluation of the Feasibility of Fully Mechanized Excavation by Artificial Neural Networks
M.C. Özyurt, A. Karadoğan

Yeni Kazı Havesine Geçiş Yöntemlerinin Farklı Ayak Uzunluklarındaki Verimlilik Analizi 569
Efficiency Analysis of New Web Transaction Methods in Different Face Lengths
M.E. Yetkin, M.K. Özfırat

Zeolit İkamesinin Çimentolu Macun Dolgunun Mekanik Özelliklerine Etkisi 575
Effect of Substitution of Zeolite on the Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill
A. Başçetin, H. Eker, S. Tüylü, D. Adıgüzel

Farklı Bağlayıcı Oranlarındaki Macun Dolgunun Dayanım İle Ultrasonik Dalga Hızı Değerleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması 583
Investigation of the Relationship Between Strength and Ultrasonic Wave Velocity Values of Paste Backfill in Different Binder Ratios
S. Tüylü, A. Başçetin, B. Aghatabay, D. Adıgüzel

Yazar Dizini / *Author Index* 595

Çağrılı Bildiriler

Keynotes

Avrasya Tüneli Kazısında Tüketilen Enerji Miktarlarının ve Kimi Kazı Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Evaluation of Energy Consumption and Some Excavation Parameters in the Eurasia Tunnel

B. Arıoğlu

Yapı Merkezi İnşaat Yönetim Kurulu Başkanı

H.B. Gökçe

Yapı Merkezi AR-GE Bölümü Şefi

E. Arıoğlu

Yapı Merkezi AR-GE Bölümü Koordinatörü

ÖZET: 22 Aralık 2016 günü İstanbulluların hizmetine sunulan Avrasya Tüneli, kentin mevcut karayolu ağını tamamlayarak ulaşım sistemi üzerindeki yükü hafifletmektedir. Projenin 3340m'lik en zorlu kısmı 13.7m kazı çapı, deniz seviyesinden 106m aşağıda en gelişmiş teknolojilere sahip bentonit bulamaç takviyeli karışık kalkanlı tünel açma makinesi kullanılarak inşa edilmiştir. Bu çalışmada makinenin tükettiği enerji ve 1 saatte gerçekleştirilen kazı net hacmi değerlerinden hareketle ring bazında *(her 2m ilerleme için)* 1m^3 kazı malzemesi için harcanan enerji miktarı olan spesifik enerji *(kWsa/m^3)* hesaplanmıştır ve elde edilen değerler geçilen formasyon bazında incelenmiştir.

ABSTRACT: Eurasia Tunnel, which was put into service of Istanbul on December 22, 2016; alleviates the burden on the city's existing transportation system as an addition to the road network. The most challenging part of the project was the 3340 m long subsea tunnel 106 m below sea level and this tunnel was constructed by using a state-of-the-art mixed slurry tunnel boring machine with a 13.7 m excavation diameter. In this study, the energy values consumed by the machine and the instantaneous cutting rate *(m^3/h)* were utilized to estimate specific energy *(kWh/m^3)*, which is the amount of energy consumed for 1 m^3 excavation material. Then, obtained results were evaluated on the basis of the excavated formation.

AVRASYA TÜNELİ

1.1 Genel

İki kıtaya bölünmüş durumda olan İstanbul'da yıllardır süregelen hızlı nüfus artışı, göç ve ekonomik gelişme; varolan ulaşım sistemine ciddi bir yük getirmektedir. Kentin trafiğindeki artış, mevcut topografya koşulları ve şehrin yoğun kentsel yapısı ile birleşince, yaşayanlar için ciddi ulaşım problemleri ortaya çıkmaktadır.

İstanbul Ulaşım Master Planı çalışmalarında da belirtildiği üzere nüfusun 2023'de 20 milyonun üzerine çıkacağını ve araç sayısının da 4.2 milyona ulaşacağı öngörülmektedir *(JICA, 2008)*. Bu faktörlerin tamamının sonucunda kent içindeki trafiğin daha çok büyümesi ile beraber Boğazı aşan yolculuk sayısının 1.5 katına çıkması beklenmektedir.

Kıtalar arası karayolu ulaşımında boğaz üzerindeki üç köprü ile gerçekleşmekte iken 22 Aralık 2016 günü İstanbulluların hizmetine sunulan Avrasya Tüneli ile iki kıta arasındaki ulaşıma ciddi bir çözüm getirilmiştir.

Bu proje, İstanbul'un Avrupa ve Asya yakalarını, deniz tabanının altından geçen bir karayolu tüneli ile bağlamaktadır. İstanbul'da araç trafiğinin yoğun olduğu Güney hattında yani Kazlıçeşme-Göztepe istikametinde hizmet veren Proje, toplam 14,6km'lik bir güzergâhı kapsamaktadır. Sadece otomobiller ve minibüslerin geçişine yönelik tasarlanan tünelin kapasitesi 100.000 araç/gün olup, Ağustos-2018 itibariyle ortalama 50.000 araç/gün seviyelerindedir.

1.2 Tünel Açma Makinesi

Projenin 3.4km'lik bölümü, deniz tabanının altına Tünel Açma Makinesi *(TBM)* ile inşa edilen ve en derin noktası deniz yüzeyinden -106.4m'den geçen bir tünelden oluşmaktadır. Bu kısımda, proje için Herrenknecht AG tarafından özel tasarlanmış 13.7m kazı çaplı, 12.0bar *(120t/m^2)* gibi yüksek bir arın basıncını karşılayabilecek ve hem kaya kütlesini hem de zemin birimlerini kazabilecek yeteneklere sahip karışık kalkanlı *-mixshield-* TBM kullanılmıştır *(Şekil 1)*. Ayrıca söz konusu makine 247.3MN itme kuvveti kapasitesine ve 37.3MNm kesici kafa kırılma torkuna sahip olup kesici kafa gücü ve toplam kurulu gücü sırasıyla 4.9MW ve 13.3MW'tır. Anılan TBM'de birim kazı alanı başına kesici kafa gücü 33.3kW/m^2 olmaktadır. Bu karakteristik büyüklük ile çalıştırılan TBM global ölçekte 2013 yılı itibariyle 1.sırada yer almıştır. *"Kazı Çapı^2 x Arın Basıncı"* büyüklüğü -arın basıncından kaynaklanan itme kuvveti- açısından yapılan değerlendirmeye göre aynı yıl itibariyle TBM yine 1. Sırada konumlanmıştır.

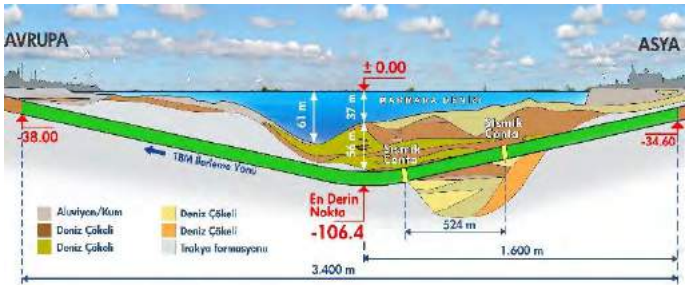
Üretici	Herrenknecht AG
Kazı Çapı, D	13.7 m
Kesici Diskler	35 adet 19inç
Keskiler	192 adet
Uzunluk, L_{TBM}	120 m
Kalkan Uzunluğu, L_{SHIELD}	13.5 m
Ağırlık, W_{TBM}	~3300 t
Tasarım Arın Basıncı, P_t	12 bar
Toplam Kurulu Güç, P_i	10,330 kW
Kesici Kafa Gücü, P_c	4,900 kW
Nominal Tork, TQ_n	23,289 kNm
Kırılma Torku, Tq_o	34,933 kNm
Toplam İtme Kuvveti, T_t	247,300 kN

Şekil 1: Avrasya Tüneli için üretilen karışık kalkanlı TBM

Kazı işleminde arın stabilitesini sağlamak üzere kullanılan *'bentonit'* uygulaması için inşa edilen ayrıştırma tesisinin kapasitesi 2800m^3/saat'tir. TBM'nin kesici kafası üzerinde tamamen atmosferik ortamda değiştirilebilen 35 çift 19 inç'lik *(483 mm)* kesici disk ve %25'i atmosferik ortamda değişebilen 192 adet keski yerleştirilmiştir. Ayrıca TBM'de, dalgıçların çalışması ve ekipmanları için basınç hücreleri ve olası bir riskli durumda vardiya çalışanlarının güvenliği için yaşam odası mevcuttur.

1.3 Mühendislik Jeolojisi ve Geoteknik

3340m'lik TBM tünel güzergahı birbirinden çok farklı iki tip jeolojik birimden geçmektedir *(Şekil 2)*. Güzergahın toplam %70'i kumtaşı, çamurtaşı, silttaşından oluşan 'Trakya Formasyonu'nda *(tek eksenli basınç dayanımı 5 ~ 120 MPa)* kazılmıştır. Bu formasyon, bölgenin tektonik hareketliliği sonucunda çok çatlaklı/kırıklı bir yapıya dönüşmüş; yer yer çok masif ve aşındırıcı *(CAI 4.5'a ulaşan)* volkanik kökenli andezit ve diyabaz dayklar tarafından kesilmiştir Dayklardaki birimler katıldığında basınç dayanım aralığı 5 - 250 MPa olmaktadır *(Yapı Merkezi, 2009)*. Tünel kazısı sırasında toplam 425m uzunluğunda *(toplam TBM tünel uzunluğunun %12.7'si)* 29 adet dayk zonu ile karşılaşılmıştır. Ortalama dayk uzunluğu 15m iken ortalama dayk aralığı 90m'dir. Gözlenen en kalın dayk ise yaklaşık 120m'dir.



Şekil 2: Avrasya Tüneli mühendislik jeolojisi kesiti

Güzergahın %23'ü ise 'Denizel Çökeller' olup; kum, silt, kil ve büyük boyutlu çakıllardan oluşmaktadır. Tünelin en derin bölgesi bu birimdedir. Kalan %7'lik bölüm ise denizel çökel ve kaya birimlerinin birlikte bulunduğu geçiş zonlarından oluşmaktadır. Konu ile ilgili daha detaylı bilgilere Arıoğlu ve diğ. *(2016 ve 2017)* çalışmalarından ulaşılabilir.

1.4 Amaç ve Kapsam

Çalışmanın amacı TBM tünel kazısında sürekli olarak ölçülen kimi kazı parametrelerinden *(kesici kafa gücü, kazı süresi, elektrik enerji tüketimi, saatlik kazı hacmi)* hareketle her bir ring kazısında *(2.0m uzunluk için)* hesaplanan spesifik enerji büyüklüklerinin geçilen formasyon bazında incelenmesidir.

Bu amaca yönelik olarak önce spesifik enerji *(SE)* ve net kazı hacmi *(instantaneous cutting rate, ICR)* gibi kavramlar ilgili bağıntıları ve açıklamalarıyla sunulacaktır. Takip eden bölümlerde ise TBM tünel kazısı sırasında izlenen kazı parametrelerine dayalı olarak yukarıda değinilen kavramların kazı boyunca değişimleri sunulacak ve yapılan değerlendirmeler ile birlikte sonuçlar ortaya konulacaktır.

2 SPESİFİK ENERJİ

2.1 Genel

Birim hacim zemin/kaya kütlesinin kazılması sırasında harcanan enerji miktarına kazı teknolojisi disiplininde spesifik enerji *(SE)* denilmektedir ve birimi kWh/m^3 veya MJ/m^3 olarak verilir. SE iki farklı yöntem yardımıyla belirlenebilir: Laboratuvarda doğrusal kesme deneyinde ölçülen disk yuvarlanma kuvveti *(F_R)*, kesme uzunluğu *(L_K)* ve kesi hacmine *(V_K)* dayandırılan *($SE = F_R \times L_K / V_K$)* hesaplama yöntemi ve TBM kazısı sırasında ölçülen kesici kafa gücü (P) ve net kazı hacmine *(ICR)* dayandırılan SE yöntemi.

İkinci yönteme uygulamada arazi spesifik enerji büyüklüğü denilmektedir. Daha öncede değinildiği üzere, bu çalışma kapsamında TBM kazı parametrelerine *(P ve ICR)* dayalı olarak hesaplanan SE büyüklükleri esas alınmıştır. Bu büyüklük, tıpkı basınç dayanımı *(σ_b)* gibi kazının yapılacağı kaya kütlesine ait temel tasarım parametresini temsil eder. Şöyle ki, bu büyüklük tam cepheli tünel makinelerinin tasarımında izlenen ve aşağıdaki paragraflarda belirtilen hususlardan dolayı önem kazanmaktadır *(Bilgin,1989; Rostami ve diğ. 1994; Bilgin ve diğ. 2014)*.

Laboratuvar ölçeğinde doğrusal kesme deneylerinden elde edilen spesifik enerji = f*(disk kesici aralığı / penetrasyon)* fonksiyonundan yararlanılarak spesifik enerjiyi minimum kılan *"aralık / penetrasyon"* oranı bulunur ve kesici kafa tasarımı için optimal keski aralık geometrisi belirlenir. Böylelikle verilen çalışma koşullarında TBM'in kazı gücü en az enerji tüketimi ile sağlayabilmektedir.

TBM'nin bir saatlik net kazı hacmi *(ICR)*, optimal spesifik enerji *(SE_{opt})* büyüklüğü ve kesici kafanın gücü *(P)* cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\boldsymbol{ICR}\left[\frac{\boldsymbol{m^3}}{\boldsymbol{sa}}\right] = \boldsymbol{k} \times \frac{\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{SE_{opt}}}$$

Burada k = kesici kafada üretilen gücün kazı arınına iletiminin verimliliğidir. Yeni nesil TBM'lerde bu faktör 0.85 – 0.90 değerinde alınmaktadır. Keza, P büyüklüğü ise kesici kafanın tork *(T)* ve bir dakika başına devir sayısı *(RPM)* cinsinden

$$\boldsymbol{P[kW]} = \boldsymbol{2\pi} \times \frac{\boldsymbol{RPM}}{\boldsymbol{60}} \times \boldsymbol{T} = \boldsymbol{0.105} \times \boldsymbol{RPM} \times \boldsymbol{T}$$

olmaktadır.

Yukarıda belirtilen bağıntılar yardımıyla verilen bir zemin/kaya kütlesi için başka bir anlatımla verilen spesifik enerji değeri için bir TBM tünel projesinde makinenin kazacağı hacim veya saatlik ilerleme miktarı kestirilebilir *(Bilgin ve diğ. 2014)*. Buna göre;

$$\boldsymbol{ICR}\left[\frac{\boldsymbol{m^3}}{\boldsymbol{sa}}\right] = \boldsymbol{0.001}\left[\frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{mm}}\right] \times \boldsymbol{60}\left[\frac{\boldsymbol{dk}}{\boldsymbol{sa}}\right] \times \boldsymbol{p}\left[\frac{\boldsymbol{mm}}{\boldsymbol{dk}}\right] \times \boldsymbol{RPM}\left[\frac{\boldsymbol{devir}}{\boldsymbol{dk}}\right] \times \boldsymbol{A}[\boldsymbol{m^2}]$$

$$\boldsymbol{ICR} = \boldsymbol{0.06} \times \boldsymbol{p} \times \boldsymbol{RPM} \times \boldsymbol{A} = \boldsymbol{AR}\left[\frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{sa}}\right] \times \boldsymbol{A}$$

Burada, p = kesici kafanın penetrasyon değeri, RPM = kesici kafanın 1 dakikada gerçekleştirdiği devir sayısı, A = kesici kafanın kazı alanı ve AR = TBM'nin saatlik ilerleme miktarıdır.

2.2 Spesifik Enerjiye Etki Eden Faktörler

Bu büyüklüğü etkileyen temel faktörleri ortaya koymak açısından bir önceki bölümde sunulan ICR bağıntılarından hareketle SE_{opt} yalnız bırakılır ve kazı alanı *"A = 0.785 x D^2"* olarak yazıldığında:

$$\boldsymbol{SE_{opt}\left[\frac{kWsa}{m^3}\right] \approx 2.0 \times \frac{T}{p \times D^2}}$$

elde edilecektir.

Görüldüğü üzere, SE büyüklüğü kesici kafanın torku ile orantılı değişirken, penetrasyon ve kesici kafanın çapının karesiyle ters orantılı değişmektedir. Tork değerinin *(Bilgin ve diğ. 2014)*:

$$\boldsymbol{T[kNm] \approx 0.3 \times F_R \times N \times D}$$

ile ifade edileceği dikkate alındığında spesifik enerji miktarı disk keskinin yuvarlanma kuvveti *(F_R)* cinsinden veya normal disk kuvvetine (F_N) bağlı olarak da

$$\boldsymbol{SE_{opt} \approx \frac{0.6 \times F_R \times N}{p \times D} \approx \frac{0.6 \times CC \times F_N \times N}{p \times D}}$$

yazılabilir. Burada F_R ve F_N sırasıyla bir diske etkiyen ortalama yuvarlanma kuvveti ve normal kuvveti göstermektedir *(kN/disk keski)*. N = kesici kafada toplam disk sayısını, D = kesici kafa çapını ve CC = kesme katsayısı *(F_R / F_N)* temsil eder.

TBM'nin net ilerleme miktarına/hacmine doğrudan etkileyen penetrasyon *(p)* değerine gelince literatürde bu büyüklüğü kestirmek amacıyla birçok teorik/ampirik kökenli bağıntılar verilmiştir. Okuyucuya bir fikir vermek bakımından, sadece Voest-Alpine TBM proje sonuçlarına dayanan

$$\boldsymbol{p[mm/devir] = a \times {\sigma_{lab,b}}^{-b}}$$

bağıntısı ile yetinilecektir *(Gehring, 1995'den alıntılayan Wilfing, 2016)*. Burada a ve b regresyon katsayılarıdır. a ≈ 800 ve b ≈ 1.0, $\sigma_{lab,b}$ ise laboratuvar tek eksenli basınç dayanımı *-sağlam numune- (MPa)*. Bu bağıntının uygulama limitleri şöyledir: Aralığı 80mm olan 17inç *(431mm)* çaplı disk keski, ortalama normal disk kuvveti 200kN ve 50MPa < $\sigma_{lab,b}$ < 300MPa. Örneğin; $\sigma_{lab,b}$ = 70MPa olan bir kaya biriminde beklenen TBM penetrasyonu:

$$\boldsymbol{p \approx 800 \times 70^{-1} \approx 11mm/devir}$$

olarak bulunmaktadır.

Birçok araştırmaya göre CC katsayısı verilen disk keski çapında tedrici şekilde *($p^{0.5}$)* ile değişmektedir. Kimi araştırmacılar ise çok daha farklı değerlendirmeler yapmaktadır. Örneğin; Tarkoy *(1983)* çalışmasında söz konusu büyüklük penetrasyondan *(p)* bağımsız olarak sert kayaçlar için 0.10 ve yumuşak kayaçlar için 0.15 alınmaktadır *(Okubo ve diğ. 2003)*.

Değişik TBM projelerinde gerçekleştirilen yerinde araştırma sonuçlarına dayalı olarak normal disk kuvvetinin büyüklüğü *(McFeat-Smith ve Ichikawa, 1992)*:

$$\boldsymbol{F_N = f(\lambda, ayrışma\ derecesi, d_d)}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada λ = hakim çatlak takımında birim metre uzunluk için ortalama çatlak aralığı ve d_d = TBM kesici kafasında kullanılan kesici diskin çapıdır.

Genelde verilen bir disk keski çapı için azalan çatlak aralığı ile F_N değeri belirgin şekilde azalmaktadır. Eğer disk çapı d_d = 17 inç'ten *(431mm)* d_d = 19 inç'e *(482mm)* çıkarılırsa verilen ortalama çatlak aralığı ve ayrışma derecesinin belirlediği kaya kütlesi sınıfında keskiye etkiyen normal kuvvetin artacağı, diğer bir deyişle penetrasyon değerinin *(p)* göreceli olarak daha büyük elde edileceği, söylenebilir.

Bir diğer örnek olarak güncel literatürden Benato ve Oreste *(2015)* çalışmasındaki ampirik bağıntı verilebilir:

$$\boldsymbol{F_N \approx 1.6p + \left[14 - \left(0.0132 - 0.00009\sigma_{lab,b}\right) \times (100 - GSI)^2\right]}$$

Bu bağıntı toplam 6 km tünel uzunluğunda gerçekleştirilen araştırma sonucunda elde edilmiştir. Uygulama limitleri *40 MPa* < $\sigma_{lab,b}$ < *100 MPa* ve *40* < *GSI* < *90* olarak rapor edilmektedir. Burada; p = penetrasyon değeri *(mm/devir)* $\sigma_{lab,b}$ = tek eksenli laboratuvar basınç dayanımı *-sağlam numune- (MPa)* ve GSI = jeolojik dayanım indisidir *(boyutsuz)*. F_N'nin biriminin metrik ton olduğu hatırlatılmalıdır. Bağıntı nümerik şekilde yakından incelendiğinde verilen $\sigma_{lab,b}$ ve F_N değerlerinde artan GSI değeri ile p belirgin biçimde azalmaktadır *(GSI değerinin artması kaya kütlesinin daha çatlaksız, masif yapı kazanması demektir)*.

TBM kazı performans ölçümünde kullanılan diğer bir ölçüt ise arazi penetrasyon indisi *(FPI)* olmaktadır ve Hassanpour ve diğ. *(2015)* çalışmasında aşağıdaki çoklu regresyon ifadesiyle verilmektedir:

$$\boldsymbol{FPI[kN/disk\ keski/mm/devir]} = \frac{\boldsymbol{F_N}}{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{exp}\left(\boldsymbol{0.008 \times \sigma_{lab,b} + 0.015 \times RQD + 1.384}\right)$$

Bağıntının uygulama limiti 10-30kN/disk keski/mm/devir'dir. Burada RQD = kaya kalite göstergesi *(0 < RQD < %100)* ve $\sigma_{lab,b}$'nin birimi ise MPa alınacaktır. Örneğin, çok zayıf dayanımlı, aşırı çatlaklı bir kaya kütlesinde *($\sigma_{lab,b}$ = 5MPa, RQD = %10)* FPI indisi yaklaşık 5 kN/disk keski/mm/devir hesaplanır. Eğer normal disk kuvveti FN = 50 kN/disk keski ise beklenen penetrasyon miktarı p = 10 mm/devir mertebesindedir. Artan FPI değerlerinde ise normal kuvvetin F_N artması buna karşın penetrasyon miktarının *(p)* azalması beklenmelidir.

Özetlenirse, SE büyüklüğü birçok TBM *(F_N, F_R, d_d, t, s, N, D)* ve kaya ortamına ait faktörler *($\sigma_{lab,b}$, $\sigma_{lab,ç}$, λ, ayrışma derecesi)* tarafından karmaşık bir biçimde denetlenmektedir. Burada açıklanmamış terimlerin anlamları şunlardır: t = disk keski genişliği, $\sigma_{lab,ç}$ = laboratuvar çekme dayanımı *-sağlam numune-*. Yukarıda kısaca belirtilen hususların açık modda çalışan TBM'ler için geçerli olduğu burada vurgulanmalıdır. Daha değişik ifade ile örneğin, F_N = f*(p, $\sigma_{lab,b}$, GSI)* ilişkisi arın stabilite problemi olmayan ***(arın basıncı, $P_{arın}$ = 0 rejimi)*** durumlar için geçerlidir.

Arın stabilizasyonu gereken durumlarda *-TBM arının basınçlandırma rejiminde-* spesifik enerji miktarının kestirimi bugünün kazı mekaniği literatüründe çözüm bekleyen ilginç problemlerden biridir. Eğer, Zemin Dengeleme Basınçlı TBM ile arın stabilizasyonu sağlıyorsa laboratuvar doğrusal kesme deneylerinden bulunan spesifik enerji büyüklüğü bir düzeltme faktörü ile büyütülmesi Namlı ve Bilgin *(2017)* çalışmasında önerilmektedir. Anılan kaynakta 6.75m kazı çapı ve 0.7-1.5 bar *(7.0-15.0t/m²)* arın basıncı için düzeltme faktörünü 1.8 olarak açıklanmaktadır. Örneğin, laboratuvar kesme deneyinden belirlenen SE büyüklüğü 5.0kWsa/m³ olsun. Verilen arın basınç aralığında 1.0 m³ kaya kütlesini kazmak için gereken enerji büyüklüğü SE = 1.8 x 5.0 kWsa/m³ = 9.0 kWsa/m³ mertebesinde kestirilebilir. Kuşkusuz daha büyük arın basınçlarında *($P_{arın}$ > 1.5bar)*, laboratuvar bazlı SE değerlerinden, TBM ölçeğine geçiş için gerçekçi *"düzeltme faktörlerine"* ihtiyaç vardır.

İncelenen konunun bütünselliğini sağlamak bakımından Avrasya Tüneli kazısı için Arıoğlu ve diğ. *(2017)* çalışmasında ring başına harcanan spesifik enerji ile penetrasyon arasında çıkartılan anlamlı bağıntı *(r=0.84)* aşağıda verilmektedir:

$$\boldsymbol{ln(SE) = -1.3 \times ln(p) + 4.9} \quad , [\boldsymbol{kWsa/m^3}] \quad (\boldsymbol{3\ mm/devir} < p < 32\ mm/devir)$$

Açıktır ki; artan penetrasyon değeri ile birlikte spesifik enerji büyüklüğü önemli ölçüde azalmaktadır. Örneğin kaya biriminde p=5mm/devir için SE değeri yaklaşık 17kWsa/m³ mertebesinde iken denizel çökel kesiminde p=20mm/devir penetrasyona karşı gelen spesifik enerji 2.7kWsa/m³'e düşmektedir.

3 TBM TÜNEL KAZISI

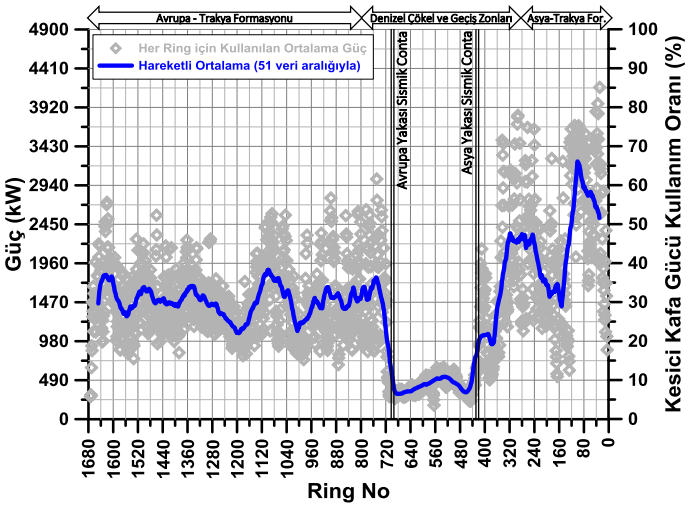
Mayıs-2014'te başlayan TBM tünel inşaat işleri, 3 ekip 7gün/24saatlik çalışma temposuyla 476 takvim gününde, 7m/gün'lük ortalama ilerleme hızı *(sadece çalışma günleri gözetildiğinde 9m/gün)* ile 1670 ring kurulumu ile bitirilmiştir. Maksimum ilerleme hızına 18m/gün değeri ile denizel çökel zonlarında ulaşılmıştır *(Yapı Merkezi, 2016)*.

TBM tünel kazısında ortalama makine kullanım oranı %31'dir. Kazı sırasında, sürekli değişen jeolojik şartlar nedeniyle 4 kez, *'özel eğitimli dalgıçlar'* tarafından hiperbarik koşullar *(arın basıncı > 4.0 bar)* altında bakım-onarım operasyonu yapılması gerekmiş ve tümü başarıyla tamamlanmıştır. Bu çok özel operasyonlar için toplam 47 gün süre kaybı gerçekleşmiştir.

Tünel kazısı ile ilgili parametreler TBM üzerine yerleştirilmiş 300'den fazla sensör ile 0.1 Hz veri toplama hızıyla sürekli olarak toplanmıştır. İzlenen parametreler küresel konumlandırma kayıtları, kazı parametrelerini, arın basınçları, kesici disk aşınması miktarları, gaz ölçümlerini, vb. içerir. Bu veriler içerisinde çalışmanın konusu ile doğrudan ilintili olan parametreler şunlardır: penetrasyon, kesici kafa devir sayısı, tork, kesici kafa gücü ve kazı süresi. İzleyen bölümde bu verilerin ring bazında *(her 2m ilerleme için)* tünel geçkisi boyunca değişimleri grafiksel olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

4 TÜNEL KAZISI BULGULARI

TBM'nin kesici kafasına giden güç miktarı *(P)* kesici kafanın dönüş sayısı *(RPM)* ve torkundan *(T)* hareketle hesaplanmıştır. Şekil 3'te tünel geçkisi boyunca ölçülen kesici kafanın gücü ve kullanım oranının *(sarfedilen güç / 4900kW)* ring bazında değişimleri gösterilmiştir. Özellikle 0 – 282 ring aralığında *(0 – 564m)* Asya tarafında Trakya Formasyonu kazısı sırasında sarfedilen güç değerlerindeki değişkenlik çok dikkat çekicidir *(değişkenlik katsayısı = %38)*. Kimi kesimlerde sarfedilen güç kesici kafanın toplam gücünün %70-%85 mertebelerine kadar ulaşmıştır. Bu durum büyük ölçüde TBM'nin ilk öğrenme aşamasında *"kazılan kaya kütlesi - makine kullanımı – proje yönetimi"* çevriminin tam olarak kurulamamasından kaynaklandığı söylenebilir.

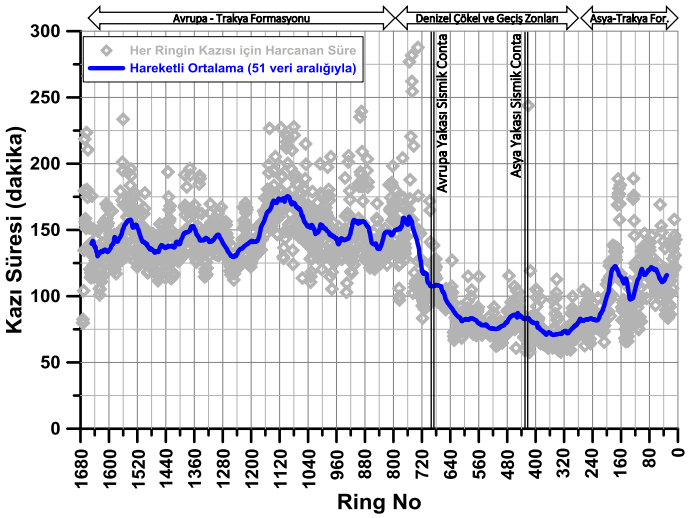


Şekil 3: Avrasya Tüneli'nde ring bazında kullanılan ortalama kesici kafa gücü ve 51 veri aralığı ile hesaplanan hareketli ortalama değerinin değişimi

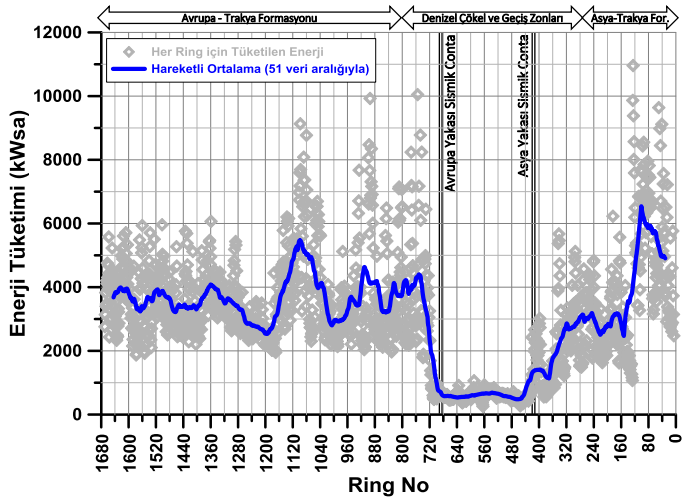
Beklenildiği gibi denizel çökellerin bulunduğu kesimdeki güç miktarlarının büyük ölçüde azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, güç tüketimi modu kaya kütlesine kıyasla daha üniform olarak gerçekleşmiştir *(değişkenlik katsayısı = %24)*. Avrupa yakasında kazılan Trakya Formasyonunda ise incelenen büyüklükler 1000 kW – 3000 kW aralığında değişmektedir ve daha fazla dayk kazılmasına rağmen hesaplanan değişkenlik katsayısı ise %27'dir ve Asya yakasında kazılan Trakya Formasyonuna kıyasla daha düşüktür. Bu farklılık Avrupa yakası kazısı sırasında öğrenme periyodunun tamamlandığını işaret etmektedir.

Her bir ring kazısı için harcanan zaman ve 51 veri aralığı ile hesaplanan hareketli ortalama değişimleri Şekil 4'te yer almaktadır. Daha fazla dayk görülen Avrupa Yakasındaki Trakya Formasyonu için kazı süreleri Asya Yakasında ki kazı sürelerine göre ortalama 1.5 kat daha fazladır.

Şekil 5'te ise Şekil 3 ve Şekil 4'de verilen değişimlerin çarpımları sonucunda belirlenen kesici kafa enerji tüketimlerine ait değişimler sunulmuştur. Penetrasyon *(p)* ve kesici kafanın dönüş sayısından *(RPM)* hesaplanan net kazı hacminin *(ICR)* ring bazında değişimleri Şekil 6'da yer almaktadır.

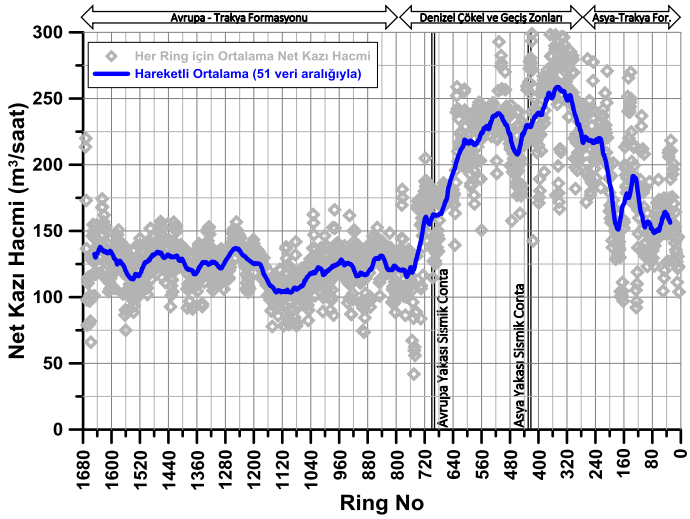


Şekil 4: Avrasya Tüneli'nde her bir ring kazısı için harcanan zaman ve 51 veri aralığı ile hesaplanan hareketli ortalama değerinin değişimi



Şekil 5: Avrasya Tüneli'nde her ring kazısı sırasında tüketilen elektrik enerjisi miktarı ve 51 veri aralığı ile hesaplanan hareketli ortalama değerinin değişimi

Ortalama değer bazında bakıldığında net kazı hacmi artan öğrenme zamanı ile birlikte 150m^3/saat'ten yaklaşık 260m^3/saat'e ulaşmıştır. Denizel çökel ve geçiş zonlarına ulaşıldığında ortalama net kazı hacmi sürekli azalma eğilimi göstererek tekrar 150m^3/saat düzeyine gelmiştir. Avrupa Yakası Trakya Formasyonu kazısında ise Asya yakasına kıyasla daha üniform saatlik net kazı hacmi elde edilmiştir. Söz konusu zonda daha sık ve kalın dayk sistemleri geçildiğinden saatlik net kazı hacmi yaklaşık 125m^3/saat düzeyinde seyretmiştir *(Şekil 6)*.

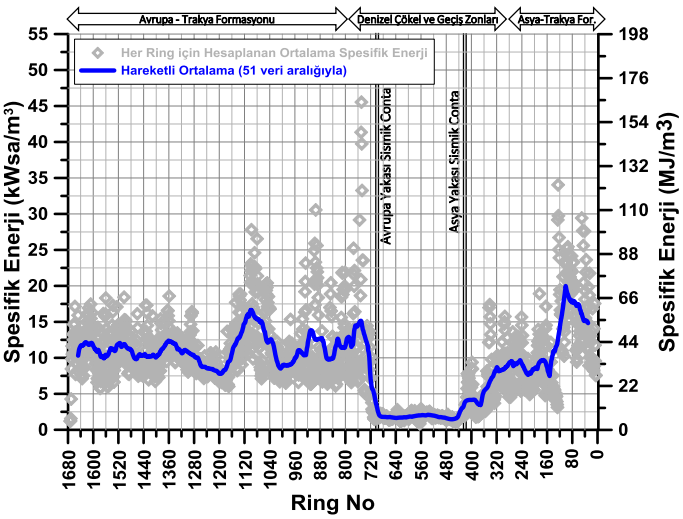


Şekil 6: Avrasya Tüneli'nde her ring için ortalama ner kazı hacmi (ICR) ve 51 veri aralığı ile hesaplanan hareketli ortalama değerinin değişimi

Avrasya Tüneli'nde her ring için Bölüm 2'de verilen güç *(P)* ve net kazı hacmine *(ICR)* bağlı ifadeden hesaplanan spesifik enerji miktarlarının değişimi 51 veri aralığı ile hesaplanan hareketli ortalama eğrisi ile birlikte Şekil 7'de gösterilmiştir. Beklenildiği gibi değişimin ana görünümü Şekil 5'te verilen enerji tüketimi ortalama eğrisine çok benzemektedir.

Asya yakası Trakya Formasyonu *(ring 0 - 282)* ve Avrupa yakası Trakya Formasyonunda *(ring 771 - 1670)* ortalama spesifik enerji sırasıyla 12 kWsa/m^3 ve 11 kWsa/m^3 mertebesinde olup denizel çökellerin yer aldığı *(ring 715 - 770)* kesiminde ise spesifik enerjinin ortalama değeri 2 kWsa/m^3 olarak belirlenmiştir. Ortalama değerler bazında bakıldığında iki farklı yapıya ait spesifik enerjilerin oranı yaklaşık 5.5'tir. Bu sonuç, büyük ölçüde kaya kütlelerinin rijitlik değerlerinin denizel çökellere kıyasla daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Hem kaya kütlesi hem de denizel çökellerin yer aldığı, literatürde karışık arın olarak tanımlanan geçiş zonlarında ise ortalama spesifik enerji büyüklükleri Asya *(ring 283 - 338)* ve Avrupa *(ring 715 - 770)* yakalarında sırasıyla 8 kWsa/m^3 ve 13 kWsa/m^3 mertebelerinde

hesaplanmıştır. Avrupa yakası geçiş zonuna ait ortalama değerin çok yüksek elde edilmesinin ana nedeni olarak anılan kısımda değişik kalınlıklı dayk gibi çok rijit jeolojik yapıların bulunmasıyla açıklanabilir.



Şekil 7: Avrasya Tüneli'nde her ring için belirlenen ortalama spesifik enerji *(SE)* ve 51 veri aralığı ile hesaplanan hareketli ortalama değerinin değişimi

5 SONUÇLAR

Avrasya Tüneli Projesi'nin karışık kalkanlı TBM ile açılan denizaltı tüneli; karmaşık ve değişken jeolojik yapı, bölgesel yüksek depremsellik, büyük kazı çapı ve yüksek arın basınçları gibi zorluklara rağmen günlük ortalama 7.0m/gün gibi bir ilerleme hızıyla ve %31'lik bir makine kullanım oranı ile yaklaşık 16 ay gibi kısa bir sürede tamamlanmıştır.

Tünelin kazısı sırasında enerji tüketimleri ile ilgili parametrelerin formasyon bazında aldığı ortalama değerler ve değişkenlik katsayıları Tablo 1'de özetlenmektedir. Tablo dikkatle incelendiğinde, Avrupa yakası Trakya formasyonundaki kazı süreleri daha fazladır. Bunun nedeni ise kazı sırasında karşılaşılan toplam 425m'lik daykın %93'ü ile Avrupa yakası kazısında yer almasıdır.

Trakya Formasyonu Asya ve Avrupa kesimleri için hesaplanan spesifik enerjinin ortalama değerleri sırasıyla 12 kWsa/m^3 ve 11 kWsa/m^3'dür. Denizel çökeller kesiminde aynı büyüklüğün ortalama değeri ise 2 kWsa/m^3 olarak elde edilmiştir. Buna göre SE_{kaya} / SE_{zemin} ≈ 5.5 çıkmaktadır. Bu sonuç, söz konusu jeolojik birimlere ait rijitlik parametrelerinin çok farklı olması ile yakından ilintilidir.

Tablo 1: Kazı parametrelerinin geçilen jeolojik birime göre ortalama değerleri ve değişkenlik katsayıları

Parametre	Asya Yakası Trakya For. *(Ring 0 - 282)*		Denizel Çökeller *(Ring 339 - 714)*		Avrupa Yakası Trakya For. *(Ring 771 - 1670)*	
	Ortalama	C.O.V (%)	Ortalama	C.O.V (%)	Ortalama	C.O.V (%)
Güç *(kW)*	2236	38	614	24	1488	27
Kazı Süresi *(dakika)*	105	26	81	18	147	16
Enerji Tüketimi *(kWsa)*	3939	51	816	30	3653	35
Net Kazı Hacmi *(m³/saat)*	178	23	206	16	123	14
Spesifik Enerji *(kWsa/m³)*	12	50	2	20	11	34

Not: C.O.V = değişkenlik katsayısıdır *(C.O.V. = S / $\bar{X}$ x 100, %; S = standard sapma ve $\bar{X}$ = ortalama değer)* ve Asya ve Avrupa yakasında bulunan geçiş zonları tabloya dahil edilmemiştir.

Tablo 1'den elde edilen diğer önemli bir sonuç ise değişkenlik katsayılarında gözlemlenmiştir. Asya yakası için hesaplanan parametrelerin değişiklik katsayıları Avrupa yakası için hesaplananlardan yüksek çıkmaktadır. Benzer değerlendirme ortalama değerler bazında enerji tüketim seviyeleri, net kazı hacmi ve spesifik enerji değerleri için yapılabilir. Hatırlanacağı üzere, tünelin kazısına Asya yakasından başlanmıştır ve parametrelerde ki yüksek değişkenlikler TBM'nin ilk öğrenme aşamasında *"kazılan kaya kütlesi - makine kullanımı – proje yönetimi"* çevriminin tam olarak kurulamamasından kaynaklandığı ifade edilebilir.

Son olarak, İstanbul'un ulaşım ağına önemli bir yatırım olan Avrasya Tüneli

Projesi ile Göztepe ile Kazlıçeşme arasındaki yolculuk süreleri 100 dakikadan 15 dakika kadar düşmektedir. Böylelikle kent içi gerçekleşen taşıt-km miktarları da azalmış ve bu da *"emisyon"*, *"yakıt tüketimi"*, *"bakım maliyeti"* ve *"gürültü"* gibi parametreler açısından kent yaşamına pozitif katkı getirmektedir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi verilerinden hareketle yapılan hesaplamalarda projenin 2017 yılı için kazandırdıklarına rakamsal olarak bakılacak olursa; 23 milyon saat tasarrufu, 30,000 ton yakıt tasarrufu, 18,000 ton CO_2 emisyonu azalımı ve 109 milyon araç-km azalması ile sağlanan daha az kaza ve kaza maliyeti tasarrufu elde edilmiştir *(Avrasya Tüneli, 2018)*.

Akıllı sistemler ile donatılmış Avrasya Tüneli Projesi ilk aylarda günde 20,000-25,000 hafif araç tarafından kullanılırken söz konusu değerler günümüzde 50,000 araç/gün seviyelerine ulaşmıştır ve bu hızlı tırmanışını devam ettirerek günlük garanti seviyesine *(~ 68,500 araç/gün)* birkaç yıl içerisinde ulaşması beklenmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmanın yapılmasında gösterdikleri yakın ilgi ve akademik destekleri için Yapı Merkezi Holding A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Dr. Müh. Ersin Arıoğlu'na, Yapı Merkezi İnşaat A.Ş. Yönetim Kuruluna, Yapı Merkezi AR-GE Bölümü'nden Yük. Müh. Pınar Toru Şeker'e ve tasarımda / üretimde / inşaatında emeği geçen tüm çalışanlara teşekkür etmeyi yerine getirilmesi gereken bir görev sayarlar. Çalışmada belirtilen tüm görüş ve değerlendirmeler yazarlarına ait olup; Yapı Merkezi, diğer herhangi kurum ve kuruluşu bağlamaz.

KAYNAKLAR

Arioglu, B., Gokce, H.B., Arioglu, E. 2016. *TBM Tunnel under the Bosphorus for the Istanbul Strait Road Crossing Project*, Geomechanics and Tunnelling, Vol: 9, No: 4, s. 303-309.

Arioglu, B., Gokce, H.B., Arioglu, E. 2017. *Excavation Performance in Eurasia Tunnel Project*, International Tunnelling Symposium in Turkey – Challenges of Tunnelling, Editörler: Bilgin, Çopur, Balci ve Tumaç, Turkish Tunnelling Society, s. 72-84.

Avrasya Tüneli İnternet Sitesi, *www.avrasyatuneli.com*, 31 Temmuz 2018.

Benato, A., Oreste, P. 2015. *Prediction of Penetration in TBM Tunnelling as a function of Intact Rock and Rock Mass Characterisitics*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol: 74, s. 119-127.

Bilgin, N. 1989. *İnşaat ve Maden Mühendisleri için Uygulamalı Kazı Mekaniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul, s. 192.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. 2014. *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*, CRC Press, Taylor and Francis Group, 366 s.

Hassanpour, J., Rostami, J., Zhao, J., Azalli, S.T. 2015. *TBM Performance and Disc Cutter Wear Prediction based on Ten Years Experience of TBM Tunnelling in Iran*, Geomechanics and Tunnelling, Vol: 8, No: 3, s. 239-247.

Japonya Uluslararası İşbirliği Ajansı (JICA), 2008. *Türkiye Cumhuriyeti İstanbul Metropolitan Kenti Bölgesi için Entegre Kent Ulaşımı Master Planı Çalışması*.

McFeat-Smith, I., Ichikawa, H.H. 1992. *Hard rock TBM in Hong Kong*, Tunnels Tunnelling, Vol:24, No: 12, s. 23-25.

Namlı, M., Bilgin, N. 2017. *A model to predict daily advance rates of EPB-TBMs in a complex geology in Istanbul*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol: 62, s. 43-52.

Okubo, S., Fukui, K., Chen, W. 2003. *Expert System for Applicability of Tunnel Boring Machines in Japan*, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol: 36, No: 4, s. 305-322.

Rostami, J., Özdemir, L., Neil, D.M. 1994. *Performance Prediction: a key issue in mechanical hard rock mining*, Mining Engineering 11, s. 1263-1267.

Wilfing, L.S.F. 2016. *The Influence of Geotechnical Parameters On Penetration Prediction in TBM Tunnelling in Hard Rock*, Doktora Tezi, Münih Teknik Üniversitesi, s. 168.

Yapı Merkezi, 2009. *Geotechnical Report of Mixshield TBM Part of Eurasia Tunnel Project - Istanbul*, Yapı Merkezi İç Raporu, s. 586.

Yapı Merkezi, 2016. *Eurasia Tunnel – TBM Log Book*, Yapı Merkezi İç Raporu, s. 232.

Mühendislik Jeolojisi ve Jeomekaniğin Tünelcilikteki Rolü ve Önemi-Tünel Geotekniği

The Role and Importance of Engineering Geology and Geomechanics in Tunnelling-Tunnel Geotechnics

M. Vardar
İTÜ Maden Fakültesi em. Öğretim Üyesi, İstanbul

ÖZET Tünellerin amaca uygun şekilde, kısa sürede, güvenli ve ekonomik olarak gerçekleştirilebilmesi için aşağıdaki bilgiler gereklidir: Tünelin işlevleri, beklenen nitelikleri ve biçimi (Yapı Tasarımı), bulunduğu yerin geometrisi (Geomatik), açılacağı ortamın ve koşullarının anlaşılması (Jeoloji-Jeofizik), bunların alfa numerik tanıtımı (Müh. Jeolojisi ve Müh. Jeofiziği) ve davranışlarının tanımı (Jeomekanik-Jeodinamik), teknik girişim ile doğa etkileşimin araştırılıp değerlendirilmesi ve uygulaması (Geoteknik-Geoteknoloji). Dolayısıyla tüneller çok disiplinli bir mühendislik alanıdır.

İnşaat sahası, alüvyonlar gibi zemin veya granitler gibi kaya niteliğinde olabilir. Gerçekleştirilen çalışmalar sırasında ve sonucunda, genellikle dengede olan bu ortamlar değiştirilmekte ve örselenmektedir. Bu kapsamda doğal (primer) gerilme durumu bozulmakta, bunların yer, yön ve şiddetindeki değişiklikler, ikincil (sekonder) gerilme durumunu oluşturmaktadır. Yerkabuğunun mekanik özelik, nitelik ve parametreleri ile onun sekonder gerilme koşulları altındaki dayanım ve davranışını jeomekanik (kayaç mekaniği) araştırmaktadır. Geoteknik ise yer kabuğu ile teknik girişimin birlikte değerlendirildiği bilimsel ve mesleki birikimlere dayalı bir mühendislik alanı olup tünelciliği de kapsamaktadır. Bildiri tünel geotekniği konusundaki bilimsel ve mesleki birikimleri tartışmaktadır.

ABSTRACT In order to build a tunnel safely, functionally, quickly and economically, the following is essential to know: expected nature and form of the Tunnel (structural design), the geometry of the terrain (geomatics), the geology and the environmental conditions of the subsoil (geology and geophysics) and their alphanumeric identifications (Eng. Geology - Eng. Geophysics) and the behaviors of geological occurrences (Geomechanics-Geodynamics). In addition, there is the determination and evaluation of the mutual effects between the mountains and the technical interventions (geotechnical geo-technology). So the tunnel is a multidisciplinary engineering area.

The subsoil consists of rock masses such as granites and or soils such as alluvium. During the excavation and finishing work generally the existing stability is impaired. This changes the native (primary) stress state. The new changed position, direction and intensity of the stresses form the secondary stress state. Geomechanics investigates and determines the properties and mechanical parameters of the earth's crust and its secondary resistance and mechanical behavior under secondary stresses. In contrast, geotechnics is an area of

engineering that academically and expertly determines and executes the interactions between the subsoil and the technical intervention with the necessary measures. The article discusses the scientific and professional background of tunnel geotechnical engineering.

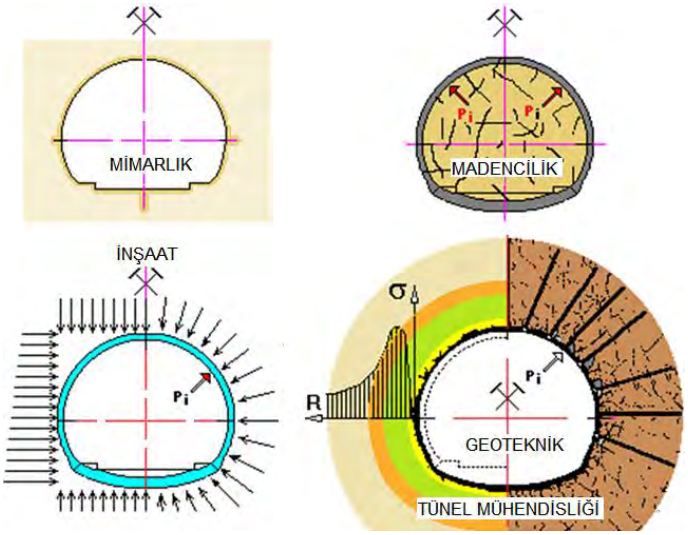
1 GİRİŞ

Mühendislikte, özellikle tünel mühendisliğindeki en temel ilke, sorunları çözmekten çok onları öngörebilmek ve yaratmamaktır.

1.1 Tünel

Tünel iki ucu açık, içinden geçilebilen bir yeraltı yapısıdır. Yer altındaki kalıcı açıklık ile bu açıklığın çevresindeki etkilenen ve etkileyen doğal ortamın, uygun kazı, iyileştirme, sağlamlaştırma ve destekleme önlemleri ve işlemleri ile birlikte oluşturduğu güvenli, kalıcı ve denetlenebilir, "üç boyutlu bir geoteknik system" dir (Şekil 1).

Mimar gözüyle Tünel "boyut ve biçimi ile kullanım ve görsel nitelikleri amaca göre tanımlanmış, içinden geçilebilen oyulmuş bir mekân"dır. Bu yaklaşımda çevre kayaçları, ortam koşulları ve değişkenleri dikkate alınmamakta, çoğu kez taşıyıcı sistemler ve diğer teknik öğeler ile de doğrudan ilgilenilmemektedir.



Şekil 1. Farklı disiplinlerin tünel anlayışı

Madenci gözüyle Tünel "içi boşaltılması (kazılması) gereken bir yeraltı açıklığı"dır. Tünel aynı zamanda, kazı işlemleri sırasındaki desteklemenin (tahkimat), üretim ve imalat için gereken nakliye, havalandırma ve su atımı gibi çalışmaların yapıldığı bir yeraltı geçişidir. Madencilikte çevre kayaçları ve koşullarıyla ilgilenilmekle birlikte, temel hedef kazı-üretim verimliliği ve ilerleme hızı olduğundan, genelde deplasmanların küçük tutulması, konforun ve kalıcı stabilitenin sağlanması gibi beklentilerden uzaklaşılmaktadır. Bazen daha da ileri gidilerek, kazıyı kolaylaştırmak amacıyla gerilmeleri yoğunlaştıran köşeli kazı geometrileri ve oransız açıklık boyutları da seçilebilmektedir.

İnşaatçı gözüyle Tünel "Tanımlanmış olan yüklenme koşullarını karşılayan ve projesine uygun olarak dayanıklı ve nitelikli şekilde oluşturulması gereken bir Taşıyıcı Sistem" dir. Bu yaklaşım tünellerin "içi boşaltılmış bir geçişin taşıyıcı iç ve dış kaplamaları" olarak anlaşılmasına ve statik hesapların doğru olması koşulunun tünelin yapımına yetebileceği anlayışına kadar varabilir.

Geoteknik anlamda tünel "Çevre kayaçlarıyla birlikte çalışan kalıcı nitelikteki bütünleşik bir geoteknolojik sistem, Yer içi Geçiş Yapısı"dır.

1.2 Tünelcilik

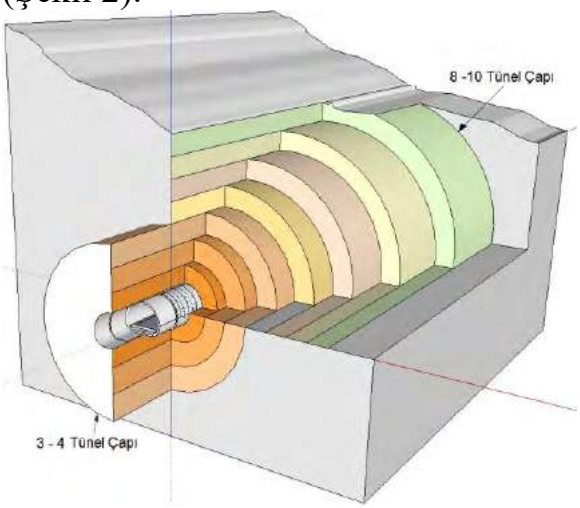
Tünelcilik hem yer kabuğunun hem de insan eliyle gerçekleştirilmekte olan uygulamaların birlikte değerlendirildiği bilimsel, aynı zamanda mesleki birikimlere ve maharete dayalı geoteknik ağırlıklı bir mühendislik alanıdır. Bu alan görgülenme, deneyimlenme ve uygulamalarla gelişen yeni teknolojileri ve yöntemleri bilmeyi gerektirir. Bilimsel altyapısı sağlam olan her yenilik gözlem, izlem ve ölçümlerle denetlendiği ve bunlarla güvenilirliği kanıtlandığı sürece geoteknik gelişmelerin ve tünelciliğin önünü açar. Mühendisliğin her alanında olduğu gibi geoteknik çalışmalara başlamadan önce de yapılması gereken ilk iş o projenin amacının, hedefinin, niteliğinin ve hizmet süresinin yakından bilinmesidir.

Tünel çalışmaları yer bağımlıdır. Bunun anlamı, tünelin belirlenmiş olan yol boyunca

istenilen ve öngörülen niteliklerde ve güvenlikle inşa edilip edilemeyeceği, ya da hangi mühendislik çalışması ve önlemleriyle, hangi işlemler ve yöntemlerle yapılabileceğidir. Bu nedenle tünelcilikteki tüm geoteknik çalışmalar "*Jeolojik/teknik Sistem*"lerin tanı ve belirlenmesine yöneliktir. Bu kapsamda sırasıyla şu çalışmalar yapılır:

a) Veri toplama, jeolojik ortamların analizi ve özellikle doğa malzemesi niteliklerinin bilgi üretici işlemler aracılığıyla tanımı
b) Doğal etmen ve koşulların ölçüm ve deneylerle saptanması
c) Etkileşen teknik cisimlerle birlikte jeolojik cisimlerin modellenmesi
d) Jeomekanik, jeodinamik ve deprem modellerinin kurulması
e) Tepkime-benzetimi ile diğer öngörü ve irdeleme tekniklerinin kullanılarak projelerin yönlendirilmesi

"*Tünel güzergâhının mühendislik jeolojisi modeli*"nin çıkarılması ilk adımdır. Bu model projeyi doğrudan veya dolaylı etkileyebilecek tüm sınır koşullarının tanımlanmış olduğu fiziksel ortamın durum, özellik ve nitelikleriyle koordinat bağımlı tanımı ve doğaya benzetimidir. Burada tünelin geçtiği "*yerleşilen bölge*", onu kuşatan "*etkileşim kuşağı*" ve nihayet tümünü etkileyen daha geniş bir "*etkime bölgesi*" her projenin özelliklerine göre ayrıntılı olarak yeterince incelenmiş, araştırılmış ve somutlaştırılmış olmalıdır (Şekil 2).



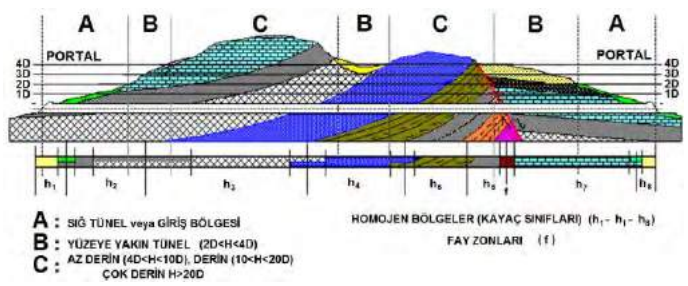
Şekil 2. Tüneli çevreleyen etkileşim kuşağı

Mühendislik jeolojisinin görevi özellikle etkileşim kuşağı ve yerleşim bölgesindeki tüm ortam ve koşullardaki benzerlikleri ve aykırılıkları tanımlamaktır. Proje bölgesini etkileyenlerin başlıcaları; iklim-meteorolojik koşullar, topografya-morfoloji, jeoloji, hidrojeoloji, yüzey hidroliği, doğal gerilme durumu ve depremselliktir. Bu kapsamda bölgedeki kütlesel duraysızlıklar, özellikle giriş-çıkış ağızlarındaki heyelan riski, sel ve taşkın alanları, erozyon ve siltasyon olasılıkları ile karstlaşma, erime, şişme, kabarma, ayrışma ve günlenme davranışları belirlenmiş olmalıdır. Bunların yanı sıra yamaçların kuru-ıslak ve suya doygun koşullardaki stabilitesinin denetimi ve sağlanması da geotekniğin önemli bir uğraşı alanıdır.

Tüneller, özellikle metro tüpleri arazide çok farklı yerlerden, ortam ve koşullardan geçerler. Bu nedenle hiçbir tünelin, yeraltı yapısının geotekniği bir diğerine benzemez (Şekil 3).

Şekil 3. Her tünel geoteknik açıdan farklıdır

Tünellerin geçtiği derinlikler ve jeolojik koşullar, kayaçların beklenen davranışlarına ve ortam koşullarına göre tünel boy kesitinde giriş ağzından itibaren benzerlik bölgeleri halinde gösterilir. Bu bölgeler (homojen bölgeler) yerine göre kayaç sınıfları olarak da anlaşılabilir (Şekil 4).



Şekil 4. Tünellerin topografik duruma göre adlandırılması ve homojen bölgelerin gösterimi

Geoteknik çalışmaların çok büyük bölümü kazı işlerini gerektirir. Bunlar giriş öncesindeki yaklaşım yarması kazıları, şevlendirme kazıları, portal kazıları, tünel açma kazıları, yerine göre galeri ya da kuyu (şaft) kazıları şeklinde olur. Oluşturulan kazı yüzeylerinin bir bölümü geçici olup yaklaşım, temellendirme ve destekleme faaliyetlerine yer açmak içindir. Diğer bir bölümü ise yol şevleri, portaller ve tünel duvarları gibi kalıcı mühendislik yapıları şeklinde olur. Geoteknik geçici ve kalıcı stabilite kavramları ile çalışır. Bu bakımdan ortamın yalnızca özellik, nitelik ve benzerlik bölgeleri ile aykırılıkların bilinmesi yeterli olmaz.

Onun tüm teknik girişimler sırasındaki davranışının bilinmesi ve tünelin yapım sonrasındaki hizmet süresince kalıcı durumunun hesaplanabilmesi ve sağlanması gerekir.

Geoteknik'in konularından bir diğeri de yaklaşım yolu, yerine göre tünel ağzı ya da aç-kapa veya yap ört tünellerinde olduğu gibi dolgulardır. Dolguların farklılığı, malzemesinin mühendis tarafından belirlenerek ona, uygun seçilen biçim, işlem ve yöntemlerle öngörülen özellik ve niteliklerin kazandırılabilmesidir. Dolgular bu şekliyle yapay ortamlardır ve özellikle Orta Avrupa'da uygulama teknik ve teknolojisinin tümüyle yerli yerindeki doğal ortamlardan farklı olması nedeniyle Toprak Yapıları Mekaniği kuram ve yöntemleriyle incelenir ve irdelenirler. Dolguların oturtulduğu ortamın dolgu kütlesiyle olan mekanik ilişkisi ve uyumu ise hem yapay ve hem de yerli yerindeki (in situ) doğal ortamın mekanik davranışının bilinmesini gerektirdiğinden Geoteknik mühendisi bu konularda da yetişmiş olmalıdır. Geoteknik'in tünel mühendisliğindeki uğraşıları arasında "Temellendirme ve kaplama" çalışmaları da vardır. Bunlar tüneli *kalıcı duraylığı sorunsuzca sağlayacak şekilde* yerkabuğu ile birleştiren, bağlayan, kenetleyen yapısal düzenlerdir. Bu fiziksel sistem, doğal ortamı ya olduğu gibi önlemsiz, ya da yapı öğelerinin boyut, biçim ve niteliğini uygunlaştırarak, o da yetersiz kalırsa ortamın niteliklerini ve davranışını değiştirerek, onu iyileştirerek ve/veya sağlamlaştırarak kullanır. Bu vesileyle hatırlanması gereken, geotekniğin etkileşimlerin doğru ve güvenilir şekilde belirlenmesine dayanan bir uygulama alanı olduğudur. Başka bir ifadeyle yapılanların doğaya ne kadar uyumlu olduğunun ve olası doğal etmenlerin yapılanları gerilme ve deformasyonlar açısından ne kadar zorladığının bilinmesi ile tünelin kurgulanması ve kurulmasıdır.

Özetle tünel geotekniği, özellikleri, nitelikleri ve jeomekanik davranışı bilinen doğal ortamların, tünelciliğin gerektirdiği çalışmalar sırasındaki açım ve denetimi için zorunlu olan yöntemi, işlemleri, önlemleri ve gereçlenmeyi belirlemektedir.

Yeraltı kazı çalışmaları sırasında oluşan stabilite bozulmaları, büyük ölçüde kaya ortamın litolojik yapısal, dokusal ve geometrik özellikleri ile mevcut gerilme durumundan kaynaklanmaktadır. Yeraltı suyunun varlığı, ortamın stabilitesini olumsuz yönde etkileyen önemli diğer bir faktördür. Çatlaklı kaya ortamlarındaki suyun, ortamdaki gerilme durumunu değiştirdiği, kil dolgulu birim kaya elemanları arasındaki sürtünme direncini Geoteknik'in tünel mühendisliğindeki uğraşıları arasında "Temellendirme ve kaplama" çalışmaları da vardır. Bunlar tüneli *kalıcı duraylığı sorunsuzca sağlayacak şekilde* yerkabuğu ile birleştiren, bağlayan, kenetleyen yapısal düzenlerdir. Bu fiziksel sistem, doğal ortamı ya olduğu gibi önlemsiz, ya da yapı öğelerinin boyut, biçim ve niteliğini uygunlaştırarak, o da yetersiz kalırsa ortamın niteliklerini ve davranışını değiştirerek, onu iyileştirerek ve/veya sağlamlaştırarak kullanır. Bu vesileyle hatırlanması gereken, geotekniğin etkileşimlerin doğru ve güvenilir şekilde belirlenmesine dayanan bir uygulama alanı olduğudur. Başka bir ifadeyle yapılanların doğaya ne kadar uyumlu olduğunun ve olası doğal etmenlerin yapılanları gerilme ve deformasyonlar açısından ne kadar zorladığının bilinmesi ile tünelin kurgulanması ve kurulmasıdır.

Özetle tünel geotekniği, özellikleri, nitelikleri ve jeomekanik davranışı bilinen

doğal ortamların, tünelciliğin gerektirdiği çalışmalar sırasındaki açım ve denetimi için zorunlu olan yöntemi, işlemleri, önlemleri ve gereçlenmeyi belirlemektedir.

Yeraltı kazı çalışmaları sırasında oluşan stabilite bozulmaları, büyük ölçüde kaya ortamın litolojik yapısal, dokusal ve geometrik özellikleri ile mevcut gerilme durumundan kaynaklanmaktadır. Yeraltı suyunun varlığı, ortamın stabilitesini olumsuz yönde etkileyen önemli diğer bir faktördür. Çatlaklı kaya ortamlarındaki suyun, ortamdaki gerilme durumunu değiştirdiği, kil dolgulu birim kaya elemanları arasındaki sürtünme direncini büyük ölçüde azalttığı, kısa süreli ve etkin stabilite bozulmalarına neden olduğu bilinmektedir. Ancak benzer stabilite problemlerini, kazı ve destekleme sistemleri ile zamanı dikkate almaksızın salt jeolojik unsurlara bağlı açıklamaya çalışmak her zaman doğru olmamaktadır.

Ortamı gereğinden fazla örseleyen kazı yöntemleri, sağlamlaştırma ve iyileştirme önlemlerinin gecikmesi gibi nedenler ile artan deformasyonlar kaya düşmesi, blok kayması, akma veya göçük şeklinde sonuçlanmaktadır. Çatlaklı kayada açılan sığ tünellerde ise daha çok blok düşmesi ve kaya kayması şeklindeki hareketler, mevcut süreksizliklerle denetlenmekte, yönlenmekte ve etkileşim bölgesinin yüzeye ulaşması halinde yeterli önlemlerin alınmaması durumunda ise göçükler, göçme bacaları oluşabilmektedir.

2 TÜNELCİLİKTE G(J)EOMEKANİK

Mühendislik jeolojisinin doğal ve yapay olarak ayırtladığı ortamların geomekanik davranışları birbirinden çok farklıdır. Doğal ortamlar olarak ayrık kayaçları oluşturan kil, silt, kum, çakıl ve bunların karışımı "*Zemin*" adını alırken magmatik, tortul ya da metamorfik oluşumlu yerli yerindeki dane ve mineralleri kaynaşmış katı kütlelere de "*Kaya*" denilmektedir. Bu bakımdan ayrık-daneli kayaçların mekanik davranışı "*Zemin Mekaniği*", dane ve mineralleri bağlanmış kayaçlarınki de "*Kaya Mekaniği*" bilim dallarının konusu olmaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken çok önemli bir husus geoteknikçinin pek çok projede ya ayrışarak kaya niteliğini büyük ölçüde yitirmiş ya da sıkışarak, kaynaşarak ve pekleşerek taşlaşmaya başlamış olan kaya benzeri zeminlerle karşılaşmasıdır. "Geçiş Kayacı" olarak adlandırdığımız bu ortamların tanımı ve mekanik yorumu ise özel bir uğraşı-uzmanlık gerektirmektedir. Sonuçta geniş alana yayılı hemen hemen her uzun tünel projesinde geoteknik sistemin büyüklüğüne bağlı olarak farklı mekanik davranışlı bu üç ortamla da karşılaşılır. "*Geomekanik*" geoteknik mühendisliğinin dayandığı temel bilim olmaktadır. Özetle, geotekniğin başarısı yer bilimlerinden başlayan ve oradan mühendislik jeolojisine, geomekaniğe (kayaç mekaniğine) ve geodinamiğe uzanan yöntemli, titiz ve seçici bir disiplinler arası anlayışın oluşturulmasına bağlıdır.

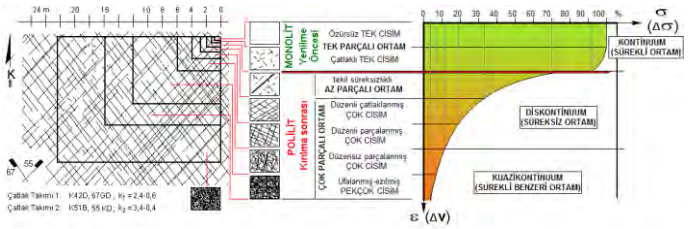
Geoteknik uygulamalar sırasında ve sonucunda, genellikle dengede bulunan jeolojik ortamlar değiştirilmekte ve örselenmektedir. Bu süreçte ortamların doğal (primer-ilkel) gerilme durumu bozulmakta, doğal gerilmelerin yer, yön ve şiddetindeki değişiklikler, ikincil (sekonder) gerilme koşullarının oluşmasıyla sonuçlanmaktadır.

Yerkabuğunun; mekanik özelik, nitelik ve parametrelerinin belirlenmesinin yanı sıra, onun bu yeni, *sekonder gerilme koşulları* altındaki dayanım ve davranışını zemin mekaniği ile kaya mekaniği bilim dalları araştırmaktadır. Homojen olduğu varsayılabilen bir gerilme durumunda bile, parçadan parçaya, daneden daneye geçen kuvvet aktarımları sırasında bu noktaların dolayında gerilme yığılmaları oluşur. Yüzeylerdeki pürüzlülüklerin türü ve bunların parçacık boyutlarına olan oranı da özellikle kesme gerilmelerinin aktarımı sırasında belirleyici olur. Örneğin çatlak cisminin boyutları küçüldükçe pürüzlülüklerin neden olduğu çentik etkisi artmakta ve bu kırık odakları gelişerek, parçacığı zaman içinde kolayca kıracak şekilde ilerlemektedir.

İkincil etmenler arasında ise süreksizlik yüzeylerinin geçmişte geçirdikleri örselenmeler ve buna bağlı olarak gelişen

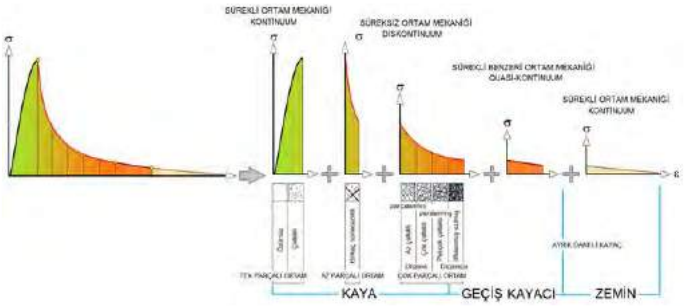
yenilme ve ayrışma olaylarıdır. Süreksizliklere yakın kesimlerin parçacığın iç kesimlerine göre önceden daha fazla zorlanmış ve örselenmiş olması, parçacık küçüldükçe bu zayıf kesimlerin hacım içindeki payını arttırmakta ve sonuçta "çok parçalılık" arttıkça kayanın dayanım parametrelerinde laboratuarda incelenen taş örneklerindekine kıyasla çok belirgin azalmalar oluşmaktadır.

Şekil 5 incelendiğinde, sırasıyla ortamların adları, bunların sistem büyüklüğündeki görünümleri, grafik üzerinde de (üstteki yatay eksen σ (Δσ) ve düşey eksen ε (ΔV) olmak üzere) kayanın, kırılma öncesinden (pre failure) başlayarak, kırılma sırası ve sonrasındaki (post failure) davranışları ve nihayet bu ortamların mekanik değerlendir-melerde kullanılması gereken bilim dalları görülmektedir.



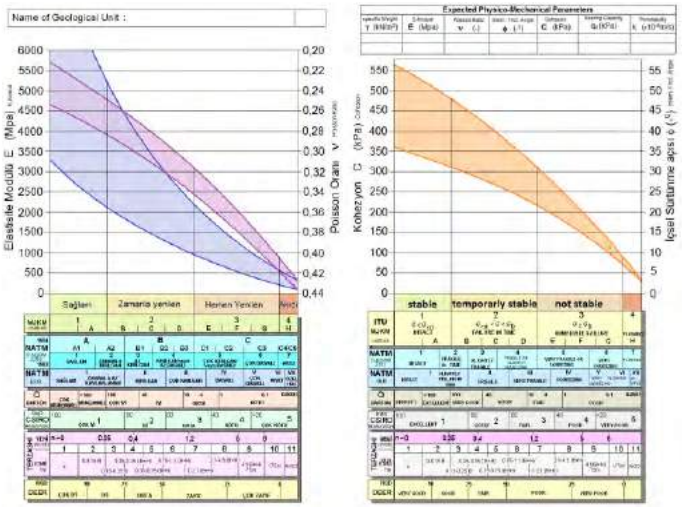
Şekil 5. Geomekanikte ortamların sistem büyüklüğüne ve kırılmalar sonucu artan hacım artışına bağlı dayanım azalması

Mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği geoteknik çalışmalar için tek parça halindeki katılaşmış kayadan başlayarak daneli ayrık kayaca dönüşebilen bu ortamların mekanik davranışını tanımlamaktadır. Bunu daha da belirginleştirmek için Şekil 6'da derlenen grafik gösterimin kırılma öncesindeki kısmıyla kırılma sonrasındaki parçalanma-paralanma ve ufalanma süreçleri sonucunda ortaya çıkabilen değişik mekanik davranışlı kısmı da özellik ve niteliklerine göre yeniden bölgelendirilmiştir.



Şekil 6. Mühendislik jeolojisi-kaya mekaniği anlayışına göre kayanın pre ve post failure davranışı ile sistem büyüklüğünü temel alan "Doğal Ortam" adlandırması

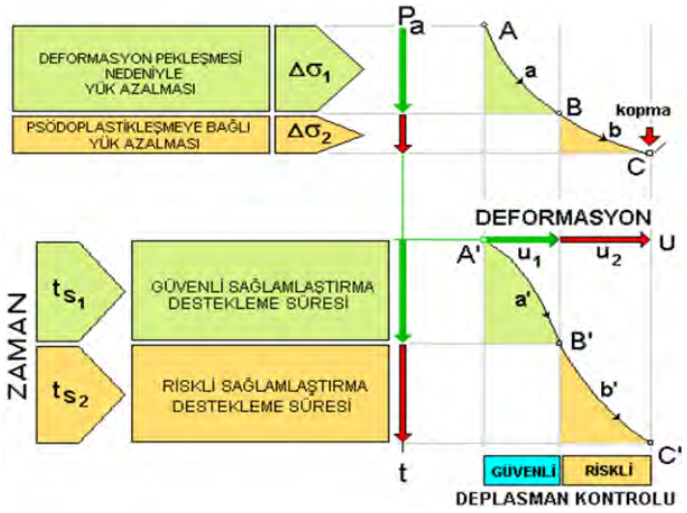
Geoteknik, ortamın geomekanik modeli olmadan çalışamaz. Bu modelde sürekli ortam mekaniğinin kuramlarına göre davrandığı varsayılan zemin, projelerin boyutu büyüdükçe doğal ortamın yalnızca küçük bir kısmını kapsar. Dolayısıyla özellikle ülkemizde yerkabuğunun yüzeye çok yakın örtülerinin çoğun ayrık kayaç niteliğinde olması nedeniyle geçmişte zemin mekaniği ile doğrudan ilişkilendirilmiş olan geoteknik anlayışından biran önce uzaklaşılması gerekir. Tünelcilikte tüm ortamları geoteknik değerlendirmelerde kullanılabilir kılmak için kayaç sınıflamaları yapılmıştır. Şekil 7'de bu sınıflamalar sistem büyüklüğünü dikkate alan geomekanik anlayışla karşılaştırılmış ve buna göre beklenen olası geomekanik parametrelerin ne şekilde belirlenebileceği örneklenmiştir.



Şekil 7. Kaya sınıflarına göre olası geomekanik parametrelerin belirlenmesi

2.1 Tünel Mühendisliğinde Zamana Bağlı Gerilme-Deformasyon İlişkisi

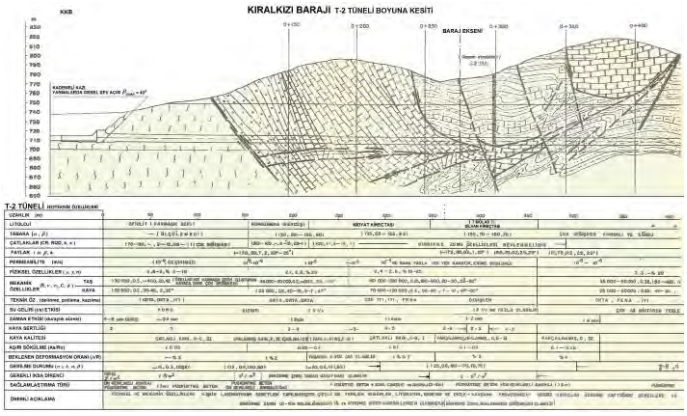
Kaya yapılarının (tünel, metro, kemer baraj, derin temel, kaya şevleri v.b.g.) başarısı etkileşimlerin anlaşılmasına bağlıdır. Bunun için gerilme ve deformasyonların gözlem ve ölçmelerle izlenmesi temel kuraldır. Çünkü ancak bu şekilde çalışmalar denetlenebilmekte, yönlendirilebilmekte ve yapılan imalatın yeterliliği kanıtlanabilmektedir. Şekil 8 grafik üzerinde sağlamlaştırma ve destekleme önlemlerinin uygulanma zamanını belirleyen elastik ve plastik deformasyon süreci ile buna bağlı dayanım azalması ve arazi basıncındaki düşüş gösterilmektedir.



Şekil 8. Dayanım azalmasına (Psödoplastikleşmeye) göre önlemlerin uygulanma zamanının belirlenmesi

2.2 Tünelin Açımı Sırasındaki Mühendislik Jeolojisi ve Geomekanik Çalışmalar

Tünelin, genelde tüm yer içi ve yer altı yapılarının araştırma evresi ve projelendirilme sürecindeki mühendislik jeolojisi çalışmaları arazide mekanik ve gerektiğinde jeofizik sondajlara dayanır. Bu kapsamda geomekanik davranışların belirlenmesi için arazide ve laboratuarlarda deneyler ve hidrojeolojik bilgilerin oluşturulması için basınçlı su testleri, iyileştirmeye yatkınlığın anlaşılmasına yönelik enjeksiyon testleri ve dahası birebir ölçekli deneme-izleme deneyleri yapılır. Buradan elde edilen sonuçlar genelde 1:1000 ölçekli güzergah haritalarında ve tünel boy kesitlerinde öngörü değerlendirmeleri olarak projecilere sunulur. Şekil 9'da bu konuda, bu ayrıntıda ilk kez yapılmış olan Dicle üzerindeki Kıralkızı Barajı derivasyon tünelinin güzergah değerlendirmesi verilmiştir. Tarafımızdan 1982 yılında gerçekleştirilmiş olan bu sunum biçimi, daha sonra DSİ ve EİEİ' standartlarına girmiştir. Benzerleri yine ilk kez İBB Atıksu kolektör tünelleri için hazırlanmıştır. Bunu Ankara, İzmir ve İstanbul Metro güzergahları izlemiştir. Artık bu uluslar arası standartlara uygun gösterim, aceleye getirilmiş ihaleler dışında tüm karayolu, demiryolu tünellerinde de kesin ve uygulama projelerinin ayrılmaz bir parçası olarak bulunmaktadır.



Şekil 9. Dicle üzerindeki Kıralkızı Barajı derivasyon tünelinin güzergah değerlendirmesi

2.2.1 Tünelcilikte ölçüm ve gözlem sistemlerinin kullanış amaçları ve çalışma ilkeleri

Ölçüm ve gözlem sistemlerini, kullanış amaçları ve çalışma ilkeleri açısından açıklayabilmek için, geoteknik projelerinde amaç ve hedeflerin belirlenmesinden sonra izlenen yolun ne olduğunun kısaca hatırlanmasında yarar vardır.

Bilindiği gibi; ilk çalışmalar ortamın durum, evrim, koşul ve niteliklerinin belirlenmesine yöneliktir. Bu çok disiplinli veri toplama sürecinde projenin aşamasına bağlı olarak, farklı ağırlıklarda ve ayrıntıda "veri tabanı" oluşturulmaktadır. Daha sonra; bu verilerden hareketle, yararlanılabilecek/kullanılabilecek olanlarla,

sorun yaratabilecekler ayrı ayrı, önem ve öncelik sırasına göre küme-lendirilmekte, bir başka deyişle verilerden "bilgi" üretilmektedir. Ancak, bu bilgilerin mühendisçe kullanıma açılabilmesi için, bunlardan karar ve sonuçlara ulaşılabilmiş ve nihayet iş, işlem, önlem, yöntem ve yönetimin saptanabilmiş olması gerekmektedir. Bu çalışmalar içinde; verilerin toplanmasından, bilgiye dönüştürülmesine, karar üretimine ve nihayet sonuçların denetlenmesine kadar olan her evrede ölçmek, denetlemek, gözlemek, izlemek ve bunlara bağlı olarak yapılanları yönlendirmek ve denetlemek, çok önemli ve vazgeçilmez bir yer tutmaktadır.

Doğaldır ki, bu inceleme ve araştırmaların içerikleri, ayrıntıları ve duyarlığı her proje aşaması için farklılıklar göstermektedir. Araştırma aşamalarında vazgeçilemez olan "deney"ler, uygulama aşamasında ağırlıklarını kaybetmekte onların yerini yönlendirme "ölçüm ve gözlemleri" almaktadır. Amaç, ortamın kendi koşulları içinde ve özelliklerine göre karmaşık ve çok değişkenli teknik girişim etmenlerine karşı gösterdikleri tepkime ve davranışlardaki değişimlerin izlenmesidir. Böylece uygulama sırasında, yapılan imalatın stabilite ve geçirimsizliğin oluşturulması, sağlanması ve korunmasında ne denli başarılı olduğu izlenebilmektedir. Aynı noktalarda değişik zamanlarda yapılan okumalar (basınç, yer değiştirme, su geliri, sıcaklık, nem v.b.g.) arasındaki değişimlerden hareketle, teknik girişim ile doğal ortam arasındaki etkileşimlerin niteliği ortaya konabilmektedir. Bunlara dayalı olarak da doğru yer ve zamanda, doğru kararlar üretebilmekte, tüneller yönlendirmeli çalışmalarla denetlenebilmektedir.

Örnek olmak üzere; deformasyonların (oturma, deplasman veya konverjansların) izlenmesi sırasında ölçülen "*uzunluk değişimleri*" (Ds), eğer bir sınır değer saptanmışsa, bu değere ulaşıldığında sistemin sakıncalı ve yetersiz olduğunu gösterecektir. Ancak bu basit yaklaşım, olayın gelişimini tümüyle açıklayamadığı için, deformasyonların zaman içindeki artış veya azalışlarına göre hareket etmek gerekecektir. Böylece Ds/Dt şeklindeki, yolun zamana göre türevi olan "*deformasyon hızları*"ndan yararlanılarak, sistemin kinematiği belirlenmiş olacaktır. Ancak, ortamın dinamik açıdan değerlendirilmesi için hızlardaki artış ve azalmanın irdelenmesi zorunludur. Bu kez hızın türevi alınarak "*ivme*" bulunmakta ve dolayısıyla kuvvetlerin değişimi hakkında karar verilebilmektedir. Azalan (-) ivmeler tutucu kuvvetlerin hareketli kütleleri durdurmaya çalıştığını, artan (+) ivmeler geosistemin yenilmekte olduğunu, sabit ivmeler ise bir sünme (kararlı akma-krip) hareketinin bulunduğunu işaret etmekte olduğundan, önlemlerin türünün ve niteliğinin belirlenmesinin yanı sıra bunlar için zaman olup olmadığını da gösterecektir (Şekil 8).

2.2.2 Tünelin açımı sırasında her zaman yapılması gereken çalışmalar

- Aynada ve tünel duvarlarında karşılaşılan litoloji, mineraloji ve yapısal jeoloji bilgileri, jeomekanik birimlerin tanımlanarak ayırtlanması amacıyla haritalanmalıdır.
- Buralardan alınan fotoğraflarla durum belgelenmelidir.
- Su gelişi yer ve miktar belirtilerek ölçümlerle izlenmelidir.
- En fazla 10'ar metre aralıklarla kazının hemen sonrasında tünel profilleri çıkarılarak fazla kazı, aşırı sökülme miktarları belirlenmeli ve daha sonra da düzenli şekilde konverjans ve üç boyutlu ölçümleri yapılmalıdır.
- Bu veriler kullanılarak her ilerleme adımı için "aşırı sökülme-süreksizlikler", "fazla kazı-kazı tekniği ve teknolojisi" ilişkisi ile "zamana bağlı konverjans" belirlenmeli ve değerlendirilmelidir.
- Tüneldeki hava kalitesi, aydınlatma, drenaj ve güvenlik koşulları denetlenmelidir.
- Kullanılan destekleme, sağlamlaştırma ya da iyileştirme önlemleri ve çalışmalarının nitelikleri izlenmeli ve denetlenmelidir.
- Bu amaçla, *istatistiksel güvenilirliğe yetecek sayı ve sıklıkta* püskürtme beton örnekleri alınmalı, bunların uygulama kalınlıkları ölçülmeli,

- İksa – işban kalitesi ve aralıkları belirlenmeli,
- Uygulanan ankrajların kalitesi, yerleştirilme şekli ve süreci izlenerek test edilmelidir.
- Tünel mühendisliğinde, projede gösterilmiş ve tanımlanmış olan her yapım öğesi ve imalat adımının nitelikten ve stabiliteden ödün vermeksizin, değişen jeolojik ortam ve koşullara göre; ilerlemenin hızlandırılması, imalat kolaylığı ve rahatlığının sağlanması ve/veya maliyetlerin düşürülmesi amacıyla değiştirilebilmesine imkân verilmelidir.
- Sızan suların tünel tabanından kesinlikle uzaklaştırılması,
- Taşıma yolunun bakımlı ve toz oluşturmayacak nitelikte tutulması ve
- Geniş kesitli tünellerde yaya ulaşımının yükseltilmiş ayrı bir platform üzerinden yapılması sağlanmalıdır.

2.2.3 Tünelde stabilite sorunlarının belirlenmesi halinde yapılması gerekenler

- Her jeolojik birim için (zemin veya kaya) örselenmemiş kayaç örnekleri alınmalı, bunlar üzerinde fizikomekanik parametrelerin belirlenmesi için standart laboratuvar deneyleri yapılmalıdır.
- Kaya için C, E ve n'nün yanı sıra kuru, ıslak ve suya doygun koşullardaki post failure davranışları bulunmalıdır.
- Ayrıca ayrışma durumları incelenmelidir.
- Killi zeminler için mineralojik bileşimleri, Atterberg limitleri, konsolidasyon davranışları ve şişme potansiyelleri incelenmelidir.
- Ayrıca zemin niteliğindeki kayaçlarda drenajlı ve drenajsız koşullarda kesme deneyleri yapılmalıdır.
- Tektonik gerilmelerin araştırılması için de özel deneyler öngörülmelidir.

2.2.4 Sığ-Yüzeye yakın tünelde yapılması gerekenler

Sığ ve yüzeye yakın tüneller, aç kapa ya da yap-ört türü seçeneklerin bulunmadığı, genelde yerleşim altlarından geçen karayolu, demiryolu tünelleri, metro açıklıkları, atık su kolektör tünelleri ve temiz su taşıma tünelleridir. Burada belirleyici olan tünelin çapı ile onun üzerindeki örselenmemiş ortamın kalınlığıdır. Örneğin 220 cm çaplı bir atık su tüneli üstündeki örtünün 4,5-5m olması halinde sığ tünel, 9 m dolayındaysa yüzeye yakın tünel olabilirken, 11 m açıklıklı bir karayolu tünelinin sığ tünel sayılabilmesi için 20-22 metrelik bir örtü kalınlığı gerekmektedir. Örtünün daha az olması durumunda, çok özel, zaman alıcı ve pahalı yöntemlerin kullanılması gerekecektir. Bu nedenle daha planlama aşamasında tünellerin olabildiğince yüzeye yakın tüneller grubuna girmesine çalışılmalıdır. Sığ ve yüzeye yakın tünellerin yüzeyle olan etkileşimleri dikkate alınarak aşağıdaki çalışmalar yapılmalıdır:

- Etkilenme bölgesi içinde kalan tüm yapılaşmalar ve altyapı bilgileri önceden derlenmiş ve bu bilgiler belgelenmiş olmalıdır.
- Önem ve öncelik durumuna göre binalara kazıya başlamadan önce kalıcı gözlem-ölçüm noktaları yerleştirilmeli, buralarda "0" okuması alındıktan sonra sistematik okumalar yapılmalıdır.
- İlerleme yönünde tünel üzerindeki örtü içinde oluşacak olan deformasyonların yerlerini, miktarlarını, gelişimini ve yaklaşan kazı ile ilişkisini belirlemek için derinliği tünel kazısı üst çeperinden bir metre yukarıda kalacak şekilde ($H_{örtü}$ -1m) çok katlı ekstansometreler yerleştirilmeli ve üst noktasında eşzamanlı hassas koordinat okumaları yapılmalıdır.
- Kritik kesitlerde, kazılar buraya en az $3H_{örtü}$ kadar yaklaşmadan önce sondajlar açılarak, alt uçları etkime alanın dışındaki derinliklere bağlanmış olan inklinometre grupları yerleştirilmeli, böylece tünel çevresinde yer içindeki hareketlerin açım tekniği ile olan ilişkisi denetlenmelidir.
- İlerleme yönündeki oturma vektörlerinin izlenmesi için tünel ekseni **üzerinde genelde her 20 m' ye bir okuma noktası** yerleştirilmelidir.
- Ayrıca her 25 ila en fazla 100 metrede bir eksene dik olarak 100 ila 200 metrelik enine ölçme ve gözlem kesitleri yerleştirilmelidir.

2.2.5 Sığ-Yüzeye yakın tünelde stabilite sorunlarının beklenmesi, ya da bulunması halinde yapılması gereken ek çalışmalar

- Çalışmalar deformasyonları kitleyecek güvenlik önlemleri acilen alınıp, soruna çözüm bulununcaya kadar ilerlemeler durdurulmalıdır.
- Yer altı su durumu ve suyun etkisi yeniden incelenmelidir. Geçirimlilik, kabarma-şişme olasılıkları değerlendirilmelidir.
- Bilinenlerin dışında örtü içinde beklenmeyen altyapı kazılarının, boşlukların ve anomalilerin bulunup bulunmadığı jeofizik yöntemlerle araştırılmalıdır.
- Gerektiğinde ek izleme kesitleri hazırlanmalı ve buralarda ek inklinometreler ve
- Çok katlı ekstansometreler yerleştirilmelidir.
- Geomekanik parametreleri kontrol etmek ve yeniden belirlemek için yüzeyden ya da tünel içinden açılan araştırma deliklerinden örnekler alınmalı,
- Buralarda pressiometre deneyleri yapılmalıdır.

2.2.6 Kazı ve iç kaplama mesafeleri ilişkisi

NATM Yöntemiyle açılan tünellerdeki iç kaplamanın özelliği genelde kendi ağırlığının dışında çevresinden aktarılan hiçbir normal ve kesme yükleri ile zorlanmamasıdır. Klasik tünel yapımında iç kaplama çalışmalarına delme işlemlerinin bitirilmesinden sonra başlanılması en genel ve yaygın uygulama biçimidir. Ancak kazı ve iç kaplama çalışmalarının birlikte yürütülmek zorunda kalındığı durumlar da vardır. Bunların en başta gelen nedeni, tünel yapım süresinin kısaltılmak istenmesidir.

Diğer bir neden ise arazi basınçları ve deplasmanlarıyla baş edebilmek için olabildiğince çabuk, iç kaplamanın da birlikte çalıştırıldığı katı bir statik sistemin kurulmasının zorunlu oluşudur. Bu zorunluluk, erken dönemin NATM anlayışıyla tümüyle uyuşmasa da, yaşanan olumsuz örnekler (ülkemizdeki Ayaş Demiryolu Tüneli, Bolu Otoyol Tüneli, Nefise Akçelik Karayolu Tüneli) bunun gerektiğini göstermiştir.

Yalnızca inşaat süresinin kısaltılmasına yönelik olan durumlarda; tünellerin tek veya iki tüplü olması da belirleyicidir. Açımın eşzamanlı (senkron) ya da asenkron ilerlemesi, sağ ve sol tüp aynaları arasındaki mesafeler, kazının parçalı olup olmaması, dolayısıyla gerilme-deformasyon durumunun denetlenebilirliği ve sönümlenme düzeyi iç kaplamanın uygulanma zamanını belirlemektedir. İlke olarak bu zaman, tüpteki deplasmanların pratikte durmuş, konverjansların 1 mm/ay düzeyine inmiş olması halidir. Genelde iki şeritli karayolu veya çift hatlı demiryolu tünelleri için geçerli olan bu miktar daha küçük ya da büyük açıklıklı tünellere uygulandığında bu kapanım (s) tarafımdan

s (mm/gün) = (0,1 ila 0,15) x D (metre olarak tünel açıklığı)

şeklinde değerlendirilmektedir. Buna göre örneğin 4 şeritli bir otoyol tüneli olan Çamlık Tünelinde 2 mm/gün'lük deplasmanlar iç kaplamanın projesinde öngörülen şekliyle uygulanması açısından yeterli görülmüştür.

Prensip olarak günümüzün tünellerinde iç kaplama membran ve keçe ile tünel çeperinden tümüyle ayrılmış olup temel kirişleri (sömelleri) üzerine oturtulmuş (temellendirilmiş) kendi ağırlığının dışında çevresinden aktarılan hiçbir normal ve kesme yükleri almayan bağımsız bir mimari-teknik yapıdır. Ancak bu durum her zaman gerçekleşmeyebilir. Bu arazi davranışının yeterli düzeyde kontrol edilemediği anlamına gelir. Bu takdirde günlük kapanım değerlerinin hızı ve ivmesi beklenenin dışındaki hareketleri durdurmak için önce özel, sonra acil çalışmaların yapılmasını zorunlu hale getirir. Bunlar da yetersiz kalırsa proje revizyonuna gidilir. Özel durumlar genelde günlük 1s ila 4s'lik hızlar içindir. Bu halde tünel iç kaplamasını bir miktar yük alabilecek şekilde kuvvet-lendirmek gerekir. Bu da donatının arttırılması ve/veya beton kalitesinin iyileştirilmesi kaplama malzemesinin denetimi ile sağlanabilir. Deformasyon hızlarının artması tünel dış kaplamasının güçlendirilmesini, ek

sağlamlaştırma, destekleme ve iyileştirme işlerinin yapılmasını ve hatta betonarme kaplamanın prizini alıncaya kadar oluşan deformas-yonların araya konan bir yastık zonu ile karşılanmasını gerektirebilir (Şekil 10).

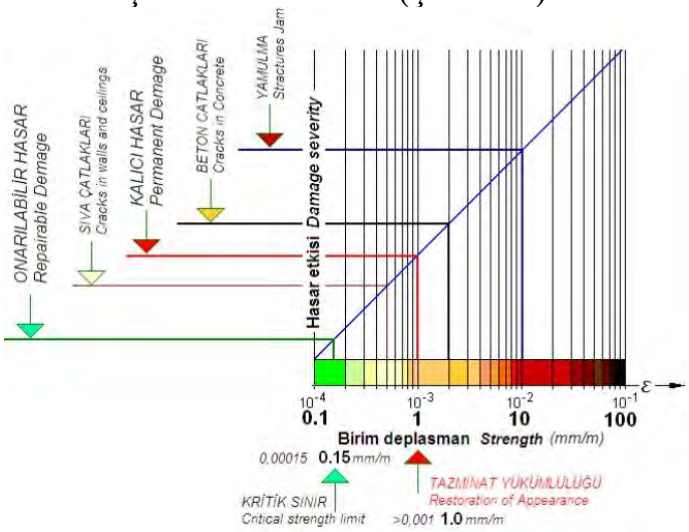
Şekil 10. Günlük kapanım hızlarına göre iç kaplamanın uygulama zamanı ve yapılması gerekenler

3 TÜNELLERDE TİTREŞİM ETKİSİ Hasar Ölçütleri - Titreşim Kriterleri - Patlatma Etkisi

Yeraltı kazılarının neden olabileceği olumsuz etki ve olası hasarları

a. Yerüstündeki mevcut yapılarda (Binalar ve her türlü mühendislik-sanat yapılarında),
b. Yeriçindeki komşu yapılarda (metro tüpleri, altyapı, şaft, derin kazı ve temellerde) ve
c. Yeraltında sürmekte olan imalatlarda olmak üzere üç grupta toplamak konuya teknik açıdan egemen olabilmek için genelde yeterlidir.

Yerüstündeki yapılarda oluşabilecek olumsuz etki ve hasar riskleri statik denge ve yenilme mekanizmalarına dayalı hesaplarla irdelenmekte, fakat pratikte bu yapılardaki oturma ve yamulma miktarları ölçülerek bunların büyüklükleri sınıflama ölçütleriyle karşılaştırılmaktadır. Bu konuda kullanılan en genel ölçüt ve sınıflamalar Kratsch (1983) tarafından bir tabloda derlenmiştir. Bu tablo incelendiğinde yapılardaki birim uzamaya bağlı yenilmelerin hasarın büyüklüğünü, başka bir deyişle, yapı öğelerinin ne ölçüde dayanımını kaybederek işlevinden uzaklaştığını göstermektedir. Bu nedenle ben tüm oturmaya (subsidans) bağlı hasar riski analizlerinde ve değerlendirmelerinde geliştirmiş olduğum birim deplasman-hasar etkisi ilişkisini kullandım (Şekil 11).



Şekil 11. Birim deplasman-Hasar ilişkisi

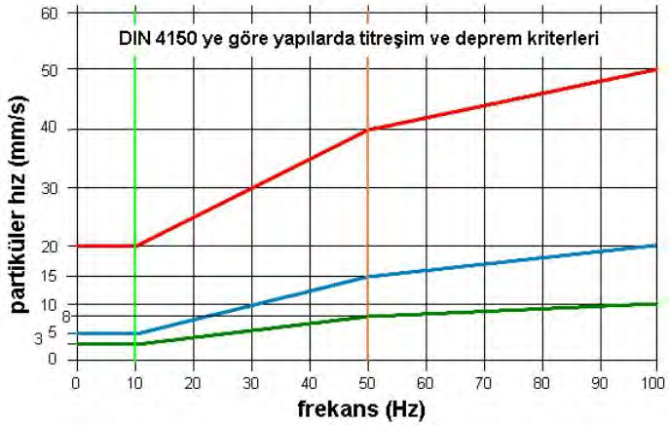
Binalarda gözlemlediğim hasar düzeylerinden hareketle de orada örneğin (deprem sırasında) hangi birim uzamaların meydana gelmiş olabileceği konusunda sonuç çıkarabildim. Metrede 1,5-2 mm ye varan uzamalarda betonun çatlaması ile yapısal yetersizliğin oluştuğunu gördüm. Dolayısıyla ister deprem, ister patlatma, isterse oturma, ya da gerilme-deformasyon gelişmelerine bağlı olsun, sonuçta yerüstü ve yer altı yapılarında muhakkak bu birim deplasmaların altında kalınması zorunlu olduğu sonucuna vardım.

Deprem ya da patlatma etkisi ile oluşan titreşimleri esas alan yaklaşımlar komşu yapılarda ve yeraltında sürmekte olan imalatlarda uyulması gereken normların temelini teşkil etmektedir.

Bu konuda başlıca, aşağıdaki normlar kullanılmaktadır.

- DIN 4150 (Şekil 12).
- USBM/OSMRE (U.S. Bureau of Mines / Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement) normu;
- Çevre ve Orman Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (2002/49/EC), Beşinci Bölüm: Çevresel Titreşim Esas Kriterleri, Yerleşim Alanlarında

Çevresel Kaynaklar için Titreşim Kriterleri, Madde 29



Şekil 12. Yapılarda titreşim ve deprem kriterleri

Bu Norm ve Yönetmeliklerde patlatma nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapının dışında yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri titreşim frekanslarıyla ilişkilendirilmiştir. Düşük frekanslarda düşük titreşim hızlarının, yüksek olanlarla aynı etkiyi oluşturduğu görülmektedir. Hasarsız çalışmak için 1 Hz'de 5 mm/s lik titreşim hızları aşılamazken 30-100 Hz'de on kat daha fazla titreşim hızlarına izin verilebilmektedir (Tablo 1).

Tablo 1. Hasarsız çalışmak için izin verilen titreşim hızları

Titreşim Frekansı (Hz)	İzin Verilen En Yüksek Titreşim Hızı ppv (mm/s)
1	5
4-10	19
30-100	50

(1 Hz - 4 Hz arasında 5 mm/s'den 19 mm/s'ye; 10 Hz – 30 Hz arasında 19 mm/s' den 50 mm/s' ye, logaritmik çizilen grafikte doğrusal olarak yükselmektedir.)

Patlatmalı kazı nedeniyle yeraltı ve yerüstü yapılarında oluşabilecek hasarların tanımı Langefors & Kihlström (1973) tarafından da maksimum parçacık hızı dikkate alınarak yapılmıştır (Tablo 2). Buradaki kabulün titreşim frekansından bağımsız olduğu görülmektedir. Bunda patlatmalarda beklenen titreşim frekansının 30-100 Hz arasında olmasıdır.

Tablo 2. Maksimum parçacık hızı ve yapılarda hasar limiti (Langefors ve Kihlström, 1973)

ppv (Maksimum parçacık hızı) (mm/s)	Hasar
51	Hasar alt sınırı, görünür hasar yok, en eski binalarda bile % 5'den az
127	Hafif hasar, sıva çatlağı, ciddi şikâyetlerin başlangıcı
305	Tahkimatsız galerilerde göçük
635	Kayada kırılma başlangıcı
2540	Kayanın kırılması

NATM Yöntemiyle açılan tünellerdeki iç kaplama kalıcı stabilitesi sağlanmış tünelden bağımsız çalışan bir mimari-teknik yapıdır. Patlayıcı ve deprem titreşimleri ile bu yapı membran+keçe üzerinde kesme gerilmeleri almadan oynayabilmektedir. Dairesel (eğrisel) formu nedeniyle de iç kaplama betonu teorik olarak temel kirişlerine yalnızca normal kuvvetler aktarmakta, yalnızca basınca çalışmakta ve çekme gerilmeleriyle zorlanmamaktadır. Ancak imalatta temel kirişleriyle iç kaplamanın demir donatıyla birbirlerine bağlanması halinde bu mesnetler ankastre mesnetlere dönüşmektedir.

Bu haliyle iç kaplama (iç kabuk) bağımsız bir kemer yapısı olarak düşünülmeli ve patlayıcı ve deprem titreşimlerinin etkisi açısından "üst yapı kriterleri"ne göre sorgulanmalıdır. DIN 4150 patlamalar sırasında oluşan parçacık hızlarının frekansa bağlı olarak **20-50 mm/s**'leri aşmamasını istemektedir. İnşaat mühendisliğindeki genel yaklaşım "**25 mm/s'nin sınır değer** olduğudur (Bugüne kadar hep bu değerlerin altında kalınmasına uğraştım!).

Tünel dış kabuğunun (destekleme, sağlamlaştırma ve iyileştirme öğeleriyle birleştirilmiş) bütünleşik bir kaya yapısı olduğundan hareketle, onun hasar görme düzeyinin, 250-500 mm/s'lerde değiştiğini saptadım. Patlayıcı etkisini sınırlamak için arında teorik kazı çizgisi üzerinde muhakkak boş delikler açtırmaya çalıştım. Böylece aşırı sökülme ve fazla kazı profillerinin oluşması sınırlanmış oldu. Eğer destekleme aynaya

çok yakın tutulmak zorundaysa, ya da üst yarıdan alt yarıya geçildiğinde, ikinci kat püskürtme beton, çelik hasır ve kaya saplamaları ile ankrajların uygulanmasını öngördüm, önerdim. Patlatmalı kazıda bu işlemlerin 30 metreden sonra yapılmasını istedim.

4 TÜNEL GEOTEKNİĞİNİN 5 TEMEL KURAMI

Tünel geotekniği, tünelciliğin en belirleyici çalışma alanıdır. Bu çalışmalar sırasında kayaçların davranışlarını açıklayan aşağıdaki 5 ana kuramın her zaman dikkate alınması gerekir.

4.1 Boyut ve Biçim Etkisi

Kayaçların mekanik davranış parametreleri her teknik girişimin boyut ve biçimine bağlı olarak değişir. Aynı jeolojik özelik ve nitelikteki bir ortamda, değişmeyen gerilme ve çevre etmenleri (su sıcaklık v.b.) altında "mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği" açısından KAYA'nın davranışı sistem büyüklüğüne bağlı olarak değişir.

Sistem büyüklüğü; teknik girişim sırası ve sonrasında etkilenen "fiziksel ve mekanik etkileşimin" olduğu ortamın boyutudur.

Aynı ortam tek parçalı cisimden (monolitten) çok parçalı cisime (polilite) kadar değişik "Kaya Parametreleri" ile çalıştırılabilir. Örneğin parçaları çimento enjeksiyonu ve saplamalarla birbirlerine bağlanmış ortamların dayanımı artar.

4.2 İşlemlerin Sırası, Süresi ve Zaman Etkisi

Kayanın davranış parametreleri her teknik girişimdeki işlemlerin sırasına, süresine ve zaman kullanımına göre değişir. Aynı özelik ve nitelikteki ortamlar aynı çevresel koşullar altında aynı başlangıç (primer) durumuna sahiptir. Ancak; aynı boyut ve biçimdeki (geometrideki) bir yapının aynı yapım öğelerine sahip olması, bu ortamda bir tek ve değişmeyen bir ikincil durumun oluşmasını sonuçlanamaz. Çünkü aynı ortam "zaman etkisi" kontrol edilerek elastikten plastik-viskoz davranışa kadar çok farklı "kaya parametreleri" ile çalıştırılabilir.

4.3 Kayanın Değiştirilebilen İkincil Davranış Özelliği

Kayanın "ikincil davranışı" çok seçeneklidir. Kayanın davranış parametreleri işlem ve önlemlerin uygulanma yönüne ve su durumuna göre değişir. Aynı litoloji, mineraloji ve süreksizliklere sahip bir ortam, teknik girişimin (boyutu ve biçimi) geometrisi ve önlemlerle işlemler aynı olsa da oluşturulan çevresel koşulların etkisiyle farklı ikincil davranış parametrelerine sahip olabilirler. Bir başka değişle; gerilme akılarının yön ve şiddet değişimine neden olabilecek yer ve yönelim (konum) seçimi ile su etkisi – erime - şişme, kabarma, ayrışma sonucunda kayanın "ikincil davranışı" değişebilir. Kayanın anizotropisi ve suya karşı duyarlığı farklı kaya davranışlarını oluşturur.

4.4 Yinelenmeli Zorlamalardan Kaçınma

Aynı ortam yinelenmeli zorlanmalar altında, zorlanmaların sayı ve süresine bağlı olarak farklı dayanım parametreleri kazanır. Kayanın mikro ve/veya makro çatlaklar kazanarak psödoplastikleşmesi, hacimsel artış (gevşeme) ile sonuçlanır. Gevşeme kayada primer dayanımın azaldığının göstergesidir. Yinelenen zorlanmalar sonucu kayada sekonder direnç azalır. Çok galerili sistemler, taramalı tünel açma anlayışları ve aşırı deformasyona izin veren (deformasyon yarıkları gibi) yaklaşımlar bu bakımdan kusurlu tünel açım yöntemleridir.

4.5 Sığ - Yüzeye Yakın Tünellerde Deformasyon Kısıtı

Kent içindeki sığ-yüzeye yakın tünellerde deformasyona izin veren tünel açma anlayışları yanlıştır. Yüzeye yakın tünellerde ve kentiçi kaya yapılarında deformasyona izin verilirse kayacın başlangıçtaki dayanım parametreleri oluşan mikro ve/veya makro çatlaklar nedeniyle azalır. Deformasyonlar hızla yüzeye ulaşarak oturmalara, yamulmalara ve hatta göçüklere neden olabilir. Güzergâh boyunca denetim ve yönlendirme amaçlı aletler yerleştirilerek yüzeydeki deplasmanlar titizlikle izlenmelidir. Bu ölçümler tünel içinde okunan

konverjanslarla karşılaştırılmalıdır. Sağlamlaştırma hızla ve olabildiğince rijit yapılmış olmalıdır. Halka en kısa mesafede (en çok 30 m) kapanmalı ve iç kaplama olabildiğince aynanın hemen gerisinden gelmelidir.

KAYNAKLAR

Langefors, U. (ed.), 1973. *The Modern Technique of* Rock *Blasting,* Halsted Press; John Wiley & Sons, New York.

Kratzch, H. 1983. Mining Subsidence Engineering, *Springer Verlag.*

Vardar, M. 1995. Die Abhängigkeit des Konvergenzverhaltens des Ayaş-Tunnels von der freien Stützweite im druckhaften Gebirge, *Felsmechanik Kolloquium Karlsruhe.*

Vardar, M. (ed.), 1998. Bolu Tünelindeki zamana bağlı deformasyonların kökeni ve gelişimine ilişkin örneklemeler, *4. Ulusal Kaya mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Zonguldak.*

Barla, G. (ed.), 1999. Continuum and discontinuum modelling for design analysis of tunnels. *9th Int. Congr. on Rock. Mech., Paris, France.*

Hoek, E. (ed.), 2002. Hoek-Brown failure criterion. *Proc. 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto (s.267-273).*

Vardar, M. (ed.), 2005. Tunnel Portal Problems in Landslides Areas Black Sea Highway Project – Turkey, *31st ITA-AITES World Tunnel Congress, Istanbul.*

On the Concept of Innovative Risk Analysis-Driven Design Approach in Mining Engineering

R.R. Osgoui, G. Russo, P. Grasso
GEODATA Engineering SPA. Turin, ITALY

ABSTRACT This paper is intended to describe comprehensively an innovative approach of tunnelling design so-called "Risk Analysis-Driven Design", to be integrated as a robust design tool into the mining practice in such a way as to fulfil the mining project in term of both technical and economical benefits. The approach is fully integrated with the ordinary design method, usually used in tunnelling and mining. This innovative approach, originally invented and evolved by GODATA Engineering (GDE), has been successfully used in any type of tunnelling fields since 1990s and ever since approximately more than 2000km of road, energy, sewage, railway, metro, water, hydro tunnels and underground caverns have applied the risk analysis-driven design approach. The main reason of demanding such an approach is to cope with the uncertainty arising from the inability of the designer to form a complete structure of the rock mass before construction as well as the inability to fully comprehend and model interaction between the rock mass and excavation domains. This requirement has successively been ordered with increasing the tunnelling and mining activities in great depth and a certain level of uncertainty. Two cases in South America, El-Teniente Mine İn Chile and Hydro project in other country, in which the risk analysis-driven design has recently been applied, are addressed. In particular, the tunnelling-induced seismicity "rock burst" events resulting from the recent tendency of tunnelling in great depth in hard rock are analyzed.

1 INTRODUCTION

Even though mining and tunnelling are the oldest engineering activities performed by man underground and current engineering technology and design approaches in these fields have many great achievement to their credits, there is still a general lack of interacting between conventional mining and innovative tunnelling method. It is believed that much can be learned by interaction between mining and tunnelling and by an exchange of ideas, innovations, and the experiences which already made the tunnelling projects successful.

Mining Engineering continues to provide strong motivation for the advancement of tunnelling with increasing of depths and stress induced failure mechanism in complex rock mass condition from very poor to very good.

For these reasons, both the knowledge of the strength parameters of rock mass, and the prediction of rock mass behaviour upon excavation, improve as observations are made of in-situ rock behaviour, and as analytical, numerical techniques evolve and are verified by practical application.

The design and construction of long and deep tunnels, recently being common in mining engineering, are often associated with the risks arising from the inadequacy of geotechnical and geomechanical information, a wrong choice of construction methodology, and a potential accident during construction. The risk analysis-driven design approach

aims to identify and to quantify the risk or potential problem, select and implement the measures mitigating or controlling the risk, and indicate if there is a residual risk which would need to be shared among the parties involved in the project and for further decision making.

The risk analysis-driven design is based on rational process combined with probabilistic approach that makes it possible to take into account all uncertainties and variability in various design phases as possibly foreseen scenarios in such a way as to reduce the major risk levels to acceptable range.

2 NEED FOR RISK ANALYSIS-DRIVEN DESIGN

The design of tunnelling has traditionally followed a deterministic approach based on indirect management of the potential risks through a series of predetermined project decisions.

A major problem in tunnelling is that most of design process and above all the decisions must be made under conditions of uncertainty. In reality, both the design and construction phases are always characterized with a certain degree of uncertainty. These conditions involve nature of characteristics and their spatial variation, geological and geomechanical parameters, behaviour of rock mass, limitations of existing methods of analysis, human-equipment material effects on the tunnelling process, and political and economic influences. Application of engineering judgment and experience, usually qualitative, is required to draw practical conclusions which always involve a certain degree of risk.

Although design and decision under uncertainty are routinely addressed in other fields of engineering and science, they are only occasionally dealt with in tunnelling due to the complexity of the problems and a lack of suitable and effective tools. The risk analysis-driven design approach including its auxiliary tools has been developed to respond to this challenge.

Risk analysis driven design is based on probabilistic analysis and thus allows the user to quantify design reliability or risk by mathematically modelling the variability and uncertainty of the key parameters involved, and assessing the time and cost impact of the parameter-value variation.

Risk analysis driven design can be applied, in all project phases, both for project control by the owner and as a decision-support tool by the designer and the contractor.

2.1 State-of-the-Art of Risk Analysis Driven Design

In the filed of tunnelling engineering, the following trends have progressively been developed in the course of last decades:

- The 1980's were characterized by the absence of an approach towards defining and managing risk, above all during the pre-construction phase. The management of uncertainty, specifically geologic, was made through the deterministic use of the classification systems. The geologic profile was prepared during construction. Often, the differences between the foreseen and encountered conditions were not adequately identified and the consequences were exacerbated due to the inadequacy of the support or the construction technique. A combination of these circumstances is often transformed into litigation.
- In the 1990's, the concepts of uncertainty, probability, and evaluation of risk were introduced. The observational method, proposed by Peck in the 1960's, became an alternative process of design, based on the control of construction through monitoring the key parameters, the use of pre-defined counter measures, and the eventual modification of the design. The observational method was, however, integrated only in some limited types of contact. In the late 1990's and in the early 2000's, with the advent of the computer based software, the application of a robust and rigours risk analysis was introduced by GEODATA through a series of risk-analysis-based powerful tools, namely DAT (Decision Aids in Tunnelling), GDMS (GEODATA Management System), PAT (Plan for Advance Tunnel)

as described elsewhere (Einstein et al. 1998, Grasso et al. 2002, Chiriotti et al. 2003).

– In the new millennium, the flexible design and the risk management are two aspects that are integrated in the process of development of design and construction. The evolution described above shows a gradual increase in the awareness that an underground construction project cannot be accomplished without risks: the risks can be managed, minimized, shared, transferred, or simply accepted, but cannot be ignored.

3 KEY ELEMENTS

Figure 1 presents the key-elements of Risk-Analysis Driven Design. Recently, some key concepts of this approach have been also shared in the AFTES Recommendations (AFTES, 2012) and are compatible with ITA guideline (ITA, 2004).

A risk analysis driven design consists of four essential elements: risk identification, risk qualification, risk response development, and risk response monitoring.

In the primary steps of the risk identifications and qualification, the suitable mitigation measures are defined and assigned to the project based on reliability design approach while during risk responses the effective countermeasures are, if necessary, defined.

While the main references of principle of risk analysis, methodology, and applications have been specified elsewhere (ITA 2004, Guglielmetti et al. 2007), in what follows the sequential and logical steps of the risk analysis-driven design is dealt with.

Evidently, the systematic implementation of the probabilistic approach is a key element in each step of this approach.

The important feature of this approach let the design be optimized to meet both cost and time requirements.

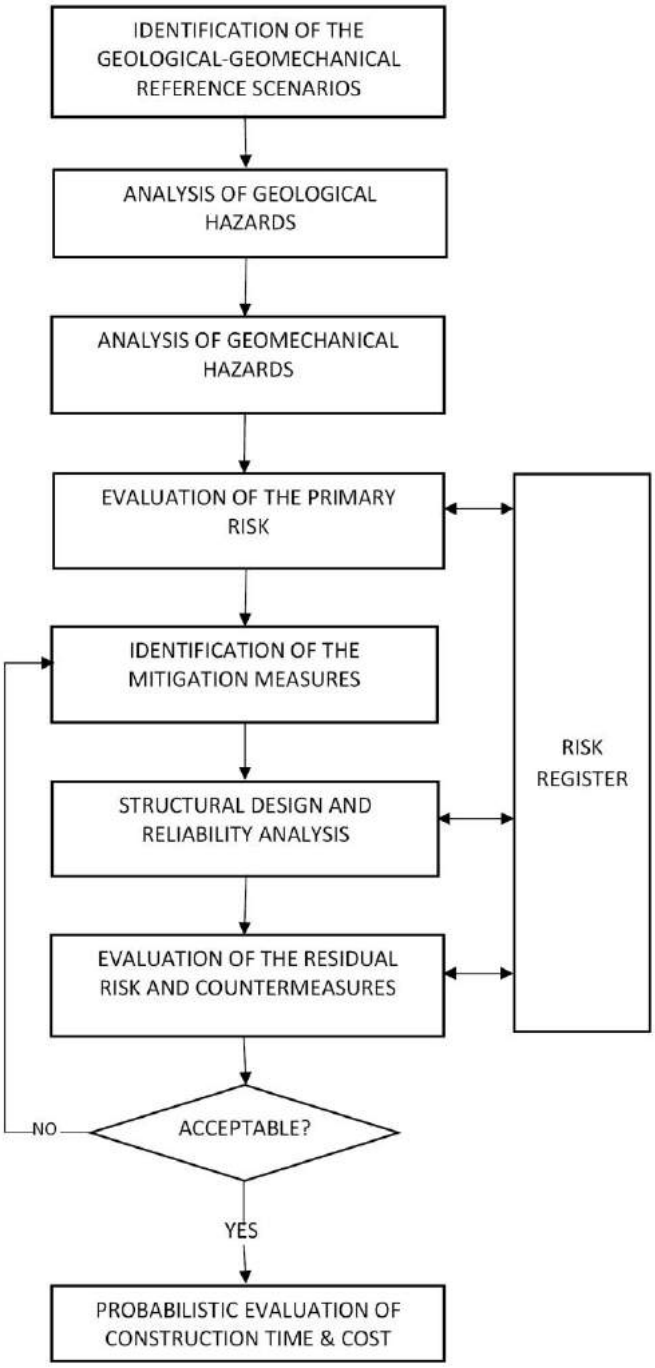
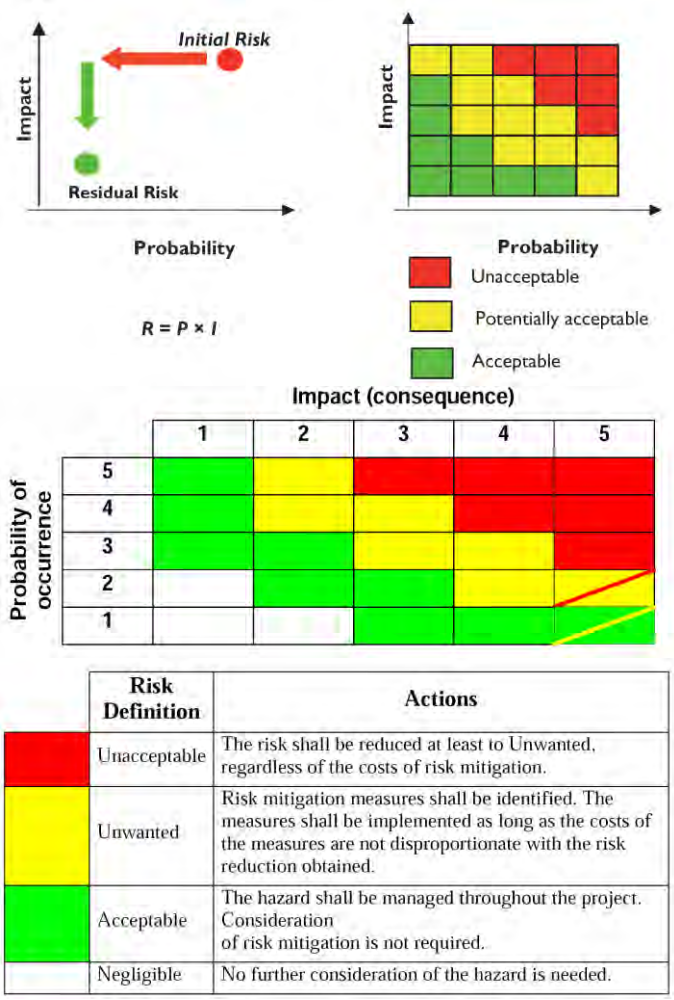


Figure 1. Principle of GDE Risk Analysis-Driven Design

The evaluation of the initial (primary) risk for tunnelling involves the estimate of the potential impact (consequence) deriving from the damages related to the identified hazards. The impact is characterized in term of intensity of relevant hazard consequence. According to ITA (2004), the impact could be characterized in terms of delay in tunnelling activity (Fig. 2).



	Risk Definition	Actions
	Unacceptable	The risk shall be reduced at least to Unwanted, regardless of the costs of risk mitigation.
	Unwanted	Risk mitigation measures shall be identified. The measures shall be implemented as long as the costs of the measures are not disproportionate with the risk reduction obtained.
	Acceptable	The hazard shall be managed throughout the project. Consideration of risk mitigation is not required.
	Negligible	No further consideration of the hazard is needed.

Figure 2. Definition of the Risk (ITA 2004, Guglielmetti et al. 2007)

4 EL TENEINTE MINE

El Teniente Mine, located in the Libertador General Bernardo O'Higgins Region 80 km southeast of Chile's capital Santiago, is the largest underground copper mine in the world, with more than 2400 km of mine drifts and tunnels producing more than 400000 tons per year of fine copper recovered from the ore, either as refined ingots or as copper cathodes. As a result of ore processing, nearly 5000 tons of molybdenum are recovered as a by-product.

The owner of the mine, Codelco (Corporación Nacional del Cobre de Chile, División El Teniente), is currently developing the New Mine Level Project to ensure the continuity of the exploitation and the increase of ore production.

The New Mine Level (NML) project (Fig. 3 and 4), located at 1000m depth, is being planned to extend the life of the mine by 60 years, entering production phase in shortcoming future. New reserves of 2020 million tons at present with 0.86% average copper grade and 220 ppm of molybdenum, will maintain the mine's production at its 137000 tons/day.

A significant component of the NML project is the construction of 24 km of access tunnels, which began in March 2012, consisting of two adits (Ltot=6km), proposed by the Contractor (CTM – Constructora de Túneles Mineros, joint venture between Vinci and Soletanche Bachy), and two main tunnels (Ltot=9+9km): a tunnel for vehicular access of personnel and a twin conveyor tunnel for the transport of the ore. Conventional method by means of D&B is being used for all excavation processes.

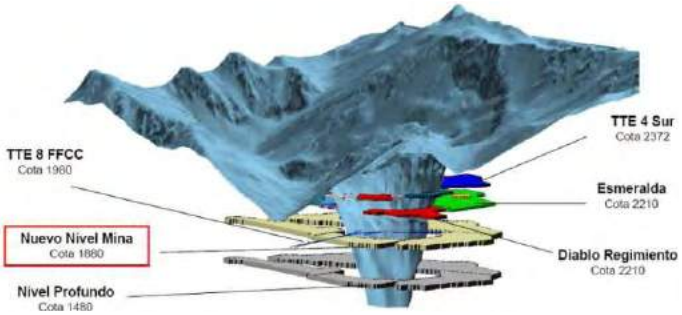


Figure 3. New Mine Level (NML)

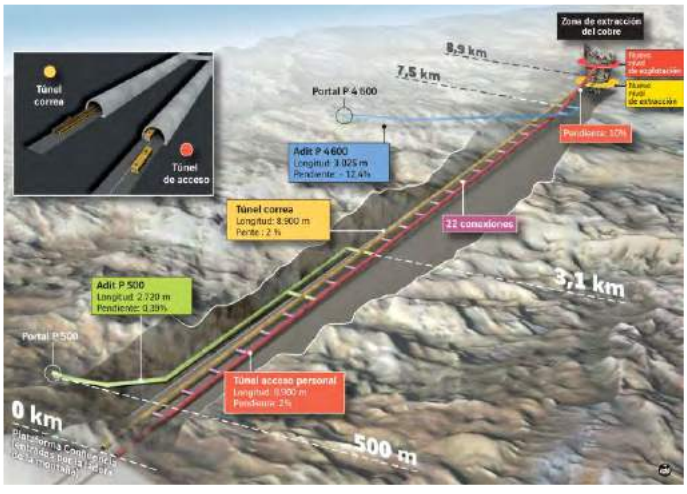


Figure 4. NML access and tunnels presently under construction

4.1 Reference Geological Scenario

Generally speaking, the tunnels design and construction involve a high level of risk mainly due to geological-geomechanical uncertainties.

Uncertainty mainly concerns the inherent variability of the input geo-parameters and the real state of each parameter along the tunnel, conditioning the excavation behaviour.

The two types of uncertainties described can be reasonably related to the Type A and B reported in Figure 5 (Hoffman et al., 1994, Russo et al. 1999).

To manage the different types of uncertainties basically the following procedure are applied:

- Type A: on the basis of the statistical best-fitting of the available data, adequate probabilistic distributions are associated to each geomechanical parameters (Figs. 6 and 7);
- Type B: three geological-geomechanical scenarios are considered to simulate the reference context: 1) Favourable, 2) Most likely and 3) Unfavourable scenario. Evidently, this approach permits to consider different faults extensions, contacts positions, parameter values, classification assessments, etc. In some case, as for the example reported in the present paper, the Most likely scenario is considered coincident with the Basic Design developed by the Owner (here called "H_lik") and the effective position with respect the other scenarios is consequently checked.

Figure 6 shows the reference geological profile called as the "H-lik" scenario including all rock mass units. While Figure 7 depicts the frequency of uniaxial compressive strength and relative density function obtained by statistical best-fit analysis, Figure 8, on the other side, presents the calculation of GSI of all rock mass units expected during excavation of access tunnels by means of statistical distribution of rock mass parameters, the rock mass block volume and the rock mass joint conditions. In this way, the variation of geomechanical parameters was suitably taken into consideration. Furthermore, with reference to Figure 8, the presence of various faults and tectonic/volcanic contacts between the igneous rock masses have been recognized.

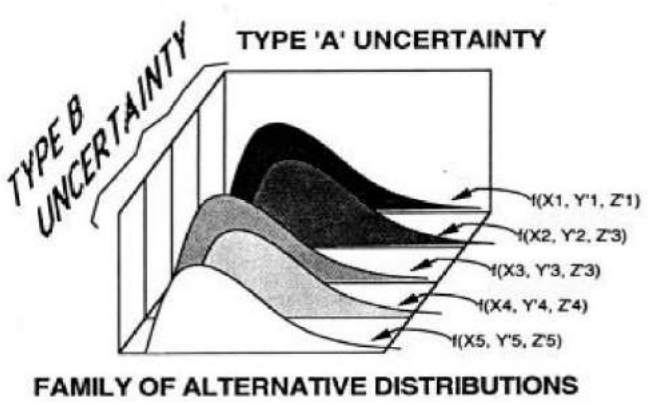


Figure 5. Different type of uncertainties (Hoffman and al. 1994)

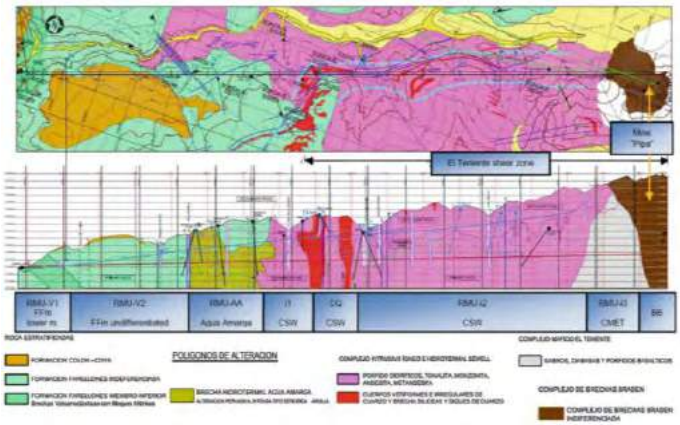
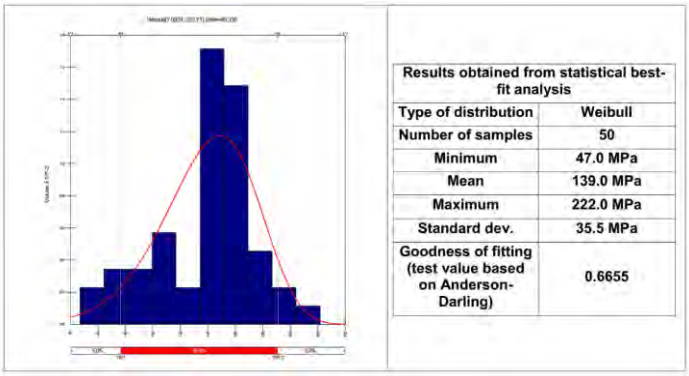


Figure 6. The reference "H-lik" scenario for main tunnels connection to NML



Results obtained from statistical best-fit analysis	
Type of distribution	Weibull
Number of samples	50
Minimum	47.0 MPa
Mean	139.0 MPa
Maximum	222.0 MPa
Standard dev.	35.5 MPa
Goodness of fitting (test value based on Anderson-Darling)	0.6655

Figure 7. Histogram of frequency of uniaxial compressive strength and relative density function obtained by statistical best-fit analysis

4.2 Geological and Geomechanical Hazard Identification and Quantification

Defined the geological setting, the reference context for the designer is completed by the consequent identification of the main hazard for tunnelling and their evaluation in terms of probability of occurrence and the specific intensity.

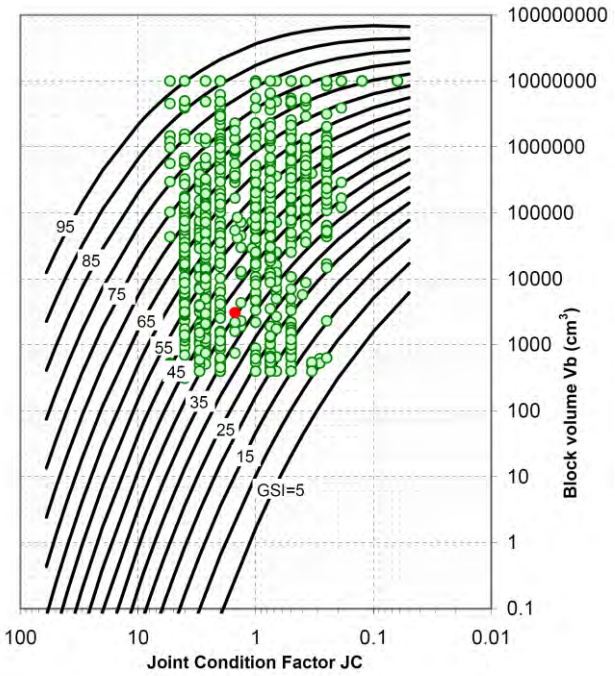


Figure 8. Estimation of GSI variation based on probabilistic approach considering variation of rock mass fabric parameters

Two main categories of hazard events are identified in connection to geological and geomechanical issues (Table 1), namely:

- Hazard phenomena associated with unfavourable geological conditions.
- Geomechanical hazard related to rock mass behaviour upon excavation.

Geomechanical hazards are mainly related to ground behaviour upon excavation, thus taking into account the intrinsic properties of rock masses and the associated stress conditions. The forecast analysis for evaluating the response upon excavation and then the most probable hazard is performed for each rock mass unit by necessarily taking into account both stress and geostructural analyses.

The reference classification of the excavation behaviour is consequently based on both stress and geo-structural type analysis (Fig. 9) as developed by Russo et al. (1998).

The matrix that results from such a double classification approach allows an optimal focalization of the specific design problem.

Furthermore, a rational choice of the type of stabilization measures may be derived as a function of the most probable potential deformation phenomenon that is associated to the different stress and geo-structural combination.

For the quantification of the probability of occurrence of the hazards, the probabilistic analytical method is applied, by implementing the GRC (Ground Reaction Curve) and LDP (Longitudinal Deformation Profile) for each rock mass unit and geo-scenario as exemplary presented in Figure 10.

Table 1. Definition of geological and geomechanical hazards

A) Hazards related to unfavourable environmental and geological conditions

n.	Hazards	Associated factors and boundary conditions	Adopted method to assess the Probability of occurrence and Severity
Tectonics, morphology			
A1	Active fault	Tectonically active areas	Geological study
A2	Asymmetric stress	Complex natural stress field (neotectonic effects; morphologic conditions; rock anisotropy; structural conditions; tectonic erosion)	Geological study
Fluids, temperature			
A3	Noxious/Dangerous gases	Presence of coal seams in mudstones ; release of hydrothermally generated gases ; alteration of minerals ; radioactive decay from uranium bearing materials	Geological study
A4	Aggressive waters	Hydrothermal water circulation; sulphide minerals	Geological study
A5	High temperatures	Thermal waters deep circulation.	Geological study
Ground conditions			
A6	Faults and/or disturbed zones	-	Geological study
A7	Hard rocks	-	Geological study
A8	Abrasive	Quartz content and mineral texture	Geological study
A9	Radioactive rocks	-	-
A10	Sticky ground	-	-
A11	Swelling ground	Clayey rocks, fault affected rocks	Geological study
A12	Heterogeneous ground	-	-
A13	Natural voids	-	-

n.	Hazards	Associated factors and boundary conditions	Adopted method to assess the probability of occurrence and severity
Gravity driven instabilities			
B1	Rock block fall, wedge instability	Fractured rock mass, where the intersection among discontinuities can give rise to potentially unstable blocs	Analytic probabilistic and empirical (Geomechanical Classification) assessment
B2	Caving (Unstable behaviour at the face and/or at tunnel walls)	Fractured/weathered rock masses, with or without water, exhibiting a limited self-supporting time (e.g., fault zones and/or zones of high tectonic disturbance)	Analytic probabilistic and empirical (Geomechanical Classification) assessment
Stress induced instabilities			
B3	Rockburst	Stress conditions on tunnel walls not compatible with stiff rock masses available strength	Analytic probabilistic and empirical (Canadian Rockburst manual) assessment
B4	Squeezing (radial convergences, face extrusion)	Unfavourable relationship between rock mass strength and the surrounding stress field, with possible occurrence of time-dependent deformations	Analytic probabilistic and empirical (GD and Hoek & Marinos classification) assessment
Mainly water influenced			
B5	Flowing behaviour	Incoherent grounds and/or cataclastic rock masses subject to high hydrodynamic forces (e.g., interception of pressurized water bearing cataclastic rocks bounded by relatively impervious fault gauges)	Expert assessment based on geotechnical and hydrogeological conditions
B6	Water inrush	Permeable fractured water bearing rock masses possibly totally or partially confined	Expert assessment based on anticipated hydrogeological conditions
B7	Piping	Collapse of tunnel face and/or cavity caused by water pressure	Expert assessment based on anticipated hydrogeological conditions

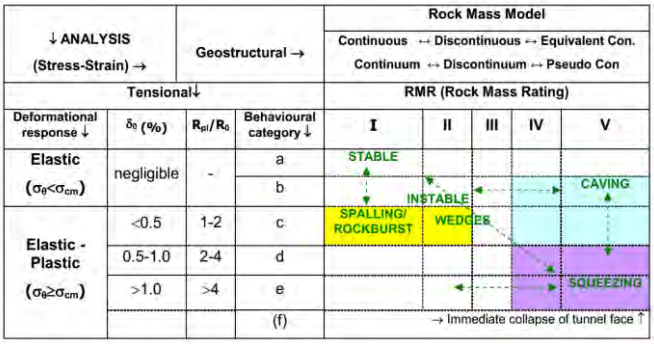


Figure 9. GDE Risk analysis-driven design, classification of the excavation behaviour including type of rock mass response, development of plastic zone, maximum radial deformation, behaviour category and associated geomechanical risk

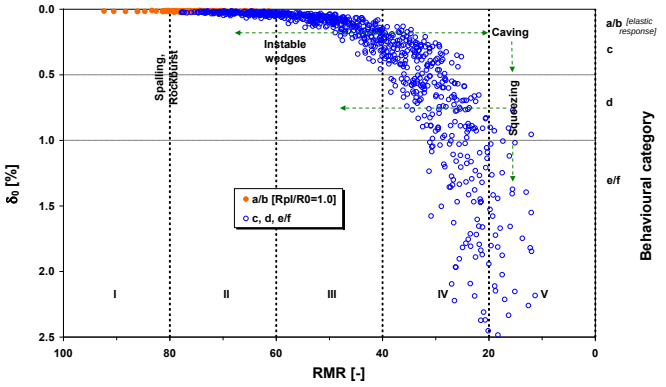


Figure 10. Example of the probabilistic results of the analyses of excavation behaviour and risk, with specific reference to the classification of Figure 9

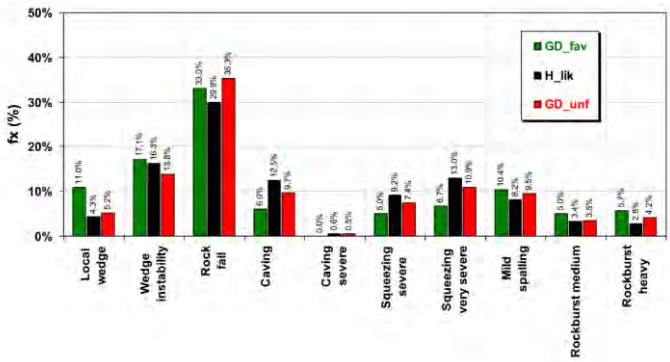


Figure 11. Probability of occurrence of the different geomechanical hazards (H_lik scenario has been derived by interpreting the Basic Design of reference)

4.3 Evaluation of the Initial Risk

The calculation of the probability of occurrence of the hazards and the estimate of the potential impact on tunnelling (D&B and TBM) allow for the initial risk register compilation (Fig.12).

The longitudinal geological profile is combined with representation of the initial risks, geological and geomechanical, along the tunnel, providing the fundamental basis for the design (Fig.13).

4.4 Mitigation Measures and Residual Risk

On the basis of the Hazard and Risk Register, the appropriate mitigation measures (i.e. design solutions) are selected, both for D&B and hard rock TBM excavation. The indicative examples of typical mitigation measures for conventional D&B excavation related to each type of hazards are addressed in Table 2.

Consequently, according to the design logic and criteria given in Table 3, the most suitable and effective mitigation measures are defined to make the desired support system. Depending on hazard type, adequate calculation methods are consequently adopted for the structural design and verification.

As remarked in the flowchart of Fig. 1, an iterative process is implemented to dimensioning the support section type and estimating the residual risk. The latter estimation is based on the evaluated potential damages (Table 4) and allows for updating the risk register (Fig. 14), up to mitigate any unacceptable risk. Moreover, for the residual unwanted risk, adequate counter-measures should be defined.

5 DESIGN OF SUPPORT SYSTEM BASED ON RISK ANALYSIS- DRIVEN DESIGN

Common practice in tunnel design considers a deterministic approach for dimensioning primary support and final lining. Usually, support design is based on some statistical parameters (for example the mean) and a fixed factor of safety is required to take into account different sources of uncertainty. However, this index is not sufficient to quantify the reliability of a support structure, and can be easily shown that to the same factor of safety could be related to the different values of probability of failure.

The single input values are generally representing the "best-estimates" of the parameters and cannot account for either the inherent variability or the uncertainty in the parameters, and the factor of safety, commonly defined as the ratio between the available capacity of the designed support and the demand for support of the excavation, is often found to be inadequate for quantifying the reliability of the system. For the latter case, it can be easily demonstrated that two different tunnel sections having the same factor of safety may have quite different probability of failure as presented in Fig. 15.

The current, unsatisfactory situation can be improved through application of probabilistic approaches to design as it practised in the field of structural design, incorporating explicitly the various sources of uncertainty and variability in design analysis.

Hazard identification CATEGORY Sub-category TYPE Sub-type HAZARD			Primary risk					Mitigation measures	
			Hazard Probab. [P]	D&B		TBM			
				Impact [I]	Risk [R=PxI]	Impact [I]	Risk [R=PxI]	D&B	TBM
GEOMECHANICAL HAZARDS (EXCAVATION BEHAVIOUR AND LOADING CONDITION RELATED)									
Gravity driven instability									
B1	ROCK BLOCK FALL (® OVERBREAKS)		5	2	10	1	5	M01,M02,M23, M24	M01,M22,M23, M24
B2	CAVING (®FACE / CAVITY COLLAPSE)		4	3	12	2	8	M01,M02,M03, M24	M01,M22,M24
Stress induced instability									
B3	ROCKBURST		5	4	20	1	5	M1,M2,M23	M1,M22,M23
B4	SQUEEZING, FACE EXTRUSION		2	3	6	4	8	M01,M02,M07, M21,M24	M1,M22,M25,M 27
Mainly water influenced									
B5	FLOWING GROUND		5	5	25	5	25	M01,M02,M06, M07,M08,M24	M01,M08,M22, M25,M27
B6	WATER INRUSH		5	5	25	5	25	M01,M02,M06, M07,M08,M24	M01,M08,M22, M25,M27
B7	PIPING		5	5	25	5	25	M01,M02,M06	
Load conditions, etc.									
B8	VISCOUS LOADS		4	4	16	4	16	M27	
B9	SWELLING LOADS		3	3	9	3	9	M24,M27	
B10	ASYMMETRIC LOADS		5	3	15	3	15	M24,M27	
B11	DEFECTIVE BEARING CAPACITY		3	3	9	4	12	M08	
.....	.....								

Figure 12. Example of the initial risk estimation as resulting from the probabilistic calculations and the severity of the impact on excavation. For the classification, basic reference is done to ITA (2004, see also Fig.13), according to which: R=P*I, where R=Risk; P=Probability of occurrence; I=Impact. Risk may result: Unacceptable (Red), Unwanted (Yellow) and Negligible/Acceptable (Green). The analysis is performed for both D&B and TBM excavation.

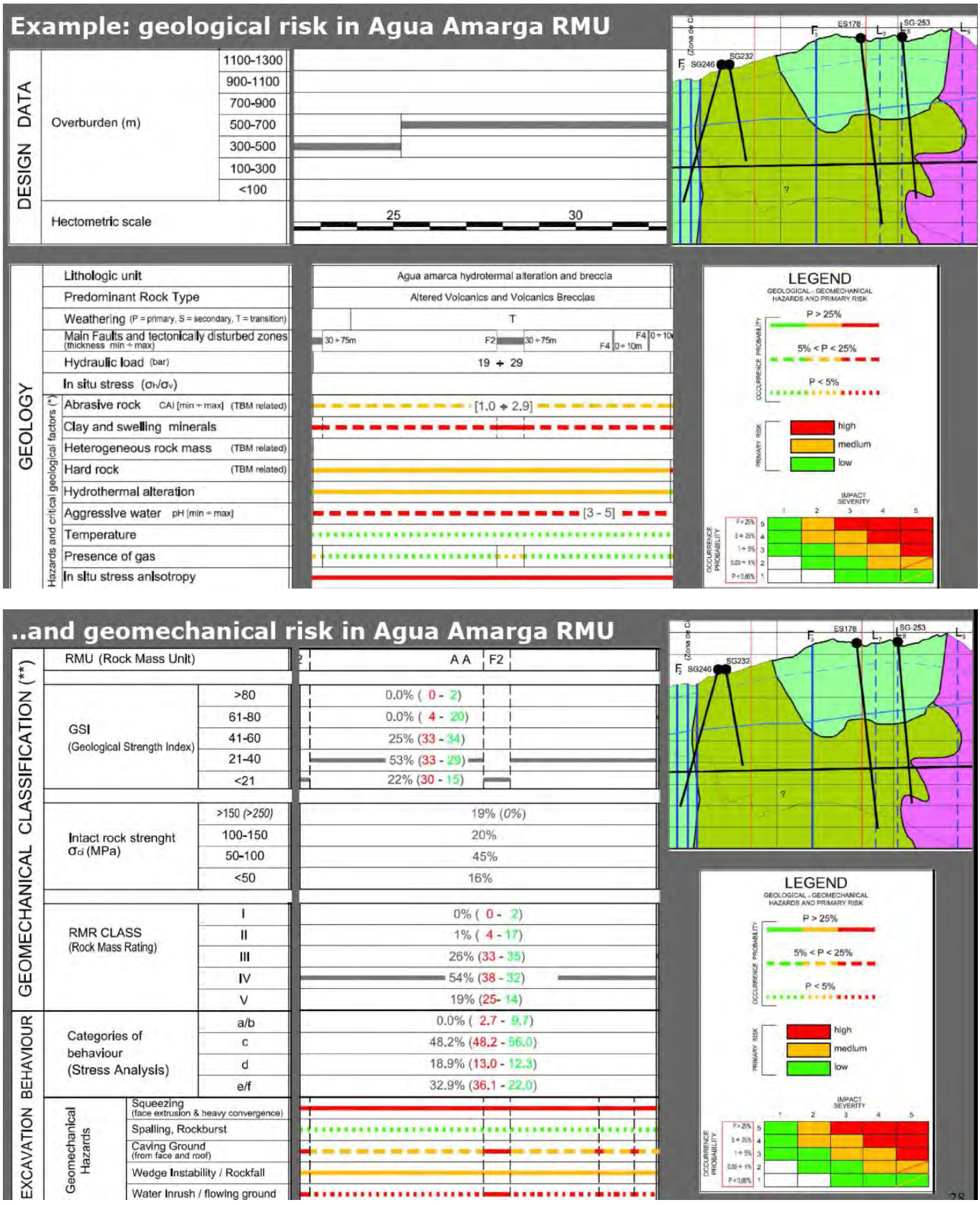


Figure 13. Risk Analysis-Driven Design: tunnel profile resulting from the risk analysis-driven design

Table 2. Mitigation measures defined for both D&B and TBM excavation methods

Code	Risk mitigation measures [M]	
	Conventional Method (D&B)	**Mechanized Method (TBM)**
A. In advancement to the excavation		
M01	Probing in advancement to excavation	
M02	Controlled drainage ahead the tunnel face	
M03	Pre-confinement of instable wedges (inclined bolts, spilling, forepoling,..)	-
M04	Pre-confinement of excavation contour (sub-horizontal jet-grouting canopy,..)	-
M05	Pre-reinforcement of rock mass contour (by fully connected elements)	-
M06	Pre-support of excavation contour (forepoling, umbrella arch,..)	-
M07	Tunnel face/contour pre-reinforcement (injected fiberglass elements, jet-grouting,..)	
M08	Grouting for water-tightness	
M09	De-stressing hole-blasting	
...	...	
B. During excavation		
M21	Over-excavation to allow excavation convergences	
M22	-	Shielded (protection) , McNally System
M23	Radial confinement of instable wedges, mild spalling (bolts and/or shotcrete,..) D&B and Open Gripper TBM	
M24	Support system differently composed by steel ribs,fibre-reinforced shotcrete,bolts,..)	-
M25	Controlled de-confinement to allow high convergences (sliding steel-ribs, shotcrete with joints and/or deformable elements,..)	Special TBM features to allow convergence, as copy cutter, conical shield, and short shield design, shield lubirication , special Torque-RPM design for gearbox, etc.
M26	High energy absorbing system composed by steel mesh+ yielding bolts+fiber-reinforced shotcrete	Special and improved steel typed used for shield for protection of rockburst, Mc Nally system
M27	Final lining by reinforced shotcrete	Final lining by pre-cast concrete segmental lining
M28	Use of special material (in presence of aggressive waters)	
M29	-	Tail void filling/grouting
M30	Radial drainages	
M31	Impermeabilization (partial or full round)	Impermeabilization by means of EPDM Gasket (even anchored types)
M32	Cooling system	
M33	Catching and treatment of water inflows, auxiliary emergency pump ‘at the face’	
M34	Forced ventilation	
M35	Non-deflagrating equipment	
M36	Adequate jumbo power	Adequate TBM power and torque
M37	Adequate drill bit	Adequate cutting tools
M38	-	Cleaning/washing of cutting tools

Table 3. Risk Analysis-Driven Design logic for determination of the most effective support section type /class in relation with the related geomechanical hazard, excavation behaviour, behaviour category, RMR, and type of mitigation measure

Hazard	Excavation Behaviour	Risk Analysis-Driven Design		Mitigation Measures		Support Type /Class	
		B.C	RMR	D&B	TBM	D&B	TBM
Wedge instability / Rockfall	* Stable rock mass, with only possibility of local rock wedge fall controlled by jointing systems * Rock mass of good to very good quality demonstrating elastic response upon excavation	a/ b	I	M01,M02,M22,M23		A	A_{TBM}
		b	II	M01,M02,M22,M23		B	B_{TBM}
	* Tendency to rock fall in rock mass of fair quality, with possible occurence of slight to moderate development of plastic zone around tunnel	c	III	M01, M02, M24	M01,M02, M22,M23	C1	E_{TBM}
Spalling/ Rockburst (bulking)	* Good quality hard rock overstressed * Minor spalling / rock burst due to mild brittle failure even associated with the rock minor enjection	c	I-II	M01,M02,M24, M30	M01, M02, M22, M23,M30		
	* Good quality hard rock moderately overstressed * Moderate spalling / rock burst due to sudden brittle failure even associated with moderate rock enjection	c	I-II	M01, M02, M24	M01, M02, M22, M23	C3	E_{TBM}
	* Good quality hard rock highly overstressed * Severe spalling / heavy Rock burst due to sudden and violent brittle failure associated with moderate rock block enjection with considerable velocity and strain energy	c	I-II	M01,M02,M09,M26	M01,M02, M22,M27, M29,M26	C4	E_{TBM}
Squeezing/ Time dependent plastic deformation	*Development of plastic/viscous deformations as a results of overstresses fair to poor rock mass, resulting in a significant face extrusion and radial deformation (convergence) *Severe squeezing	d	III-IV, V	M01, M02, M05, M07,	M01,M02, M21,M22, M25, M26,M29, M30	D	E_{TBM}
				M21, M24, M25,M30			
	* Intense development of plastic/viscous deformations due to overstressed fair to poor rock mass, resulting in a large extrusion of face and radial deformation (convergence) *Very severe squeezing	e	III-IV, V	M01,M02, M05,M07, M21	M01,M02, M26,M21, M22,M25, M26, M29	E	E_{TBM}
				M24,M25,M27,M30			
Caving/ flowing, ravelling ground	Gravity-driven instability due to significant reduction of self-supporting capacity (very low stand-up-time) in poor rock mass condition like influence shear/fault zones or intrusive dykes, associated with moderate development of plastic zone	c	IV	M01,M02, M03, M24, M30	M01,M02, M22,M27, M30	C2	E_{TBM}
				M01,M02, M06, M07,M24, M27, M30	M01,M02, M06, M07, M22,M27, M30		
	Severe gravity-driven instability due to lack of self-supporting capacity or immediate collapse of tunnel face /excavation countor manifesting flowing and ravelling ground in very poor rock mass condition generally under conditions of high hydrostatic pressure /water inflow like shear/fault zones	f	V	M01, M02, M06, M07, M08, M24,M27, M30	M01,M02, M06, M07, M08, M22, M27,M30	F	F_{TBM}

Table 4. Definition of residual risks and relating potential damage

Code	Potential damages--> Residual risks [R]
R0) Excavation related damages	
R01	Tunnel face/cavity collapse
R02	Rockfall & Overbreaks
R03	Excessive convergence/defective section
R04	High water inflows/flooding of working area
R05	High temperature
R06	Tossicity/explosion (gas related)
R07	Violent ejection of rock block
....	....
R1) Tunnel structure damages	
R10	Tunnel support damages
R11	Tunnel lining damages
R12	Structural weakening
R13	Excessive settlements
....	....
R2) Construction equipment damages	
R20	Damage of D&B equipment
R21	Damage of TBM and back-up
R22	Trapping of TBM
R23	TBM blocking due to face/cavity collapse (chimney, voids, etc.)
R24	Blocking of TBM shield for rockfall
R25	Excessive wear of cutting tools
....	....
R3) Other advancement related problems	
R30	Low advancement rate
R31	TBM driving difficulty
R32	Adverse working condition
....	....
R4) General construction problems (not analyzed)	
R40	Power supply failure/interruption
R41	Tunnel access interruption
R42	Obstruction or ineffectiveness of the preventive drainage system
R43	Water treatment system failure
R44	Ineffectiveness of preventive consolidation treatments
R45	...

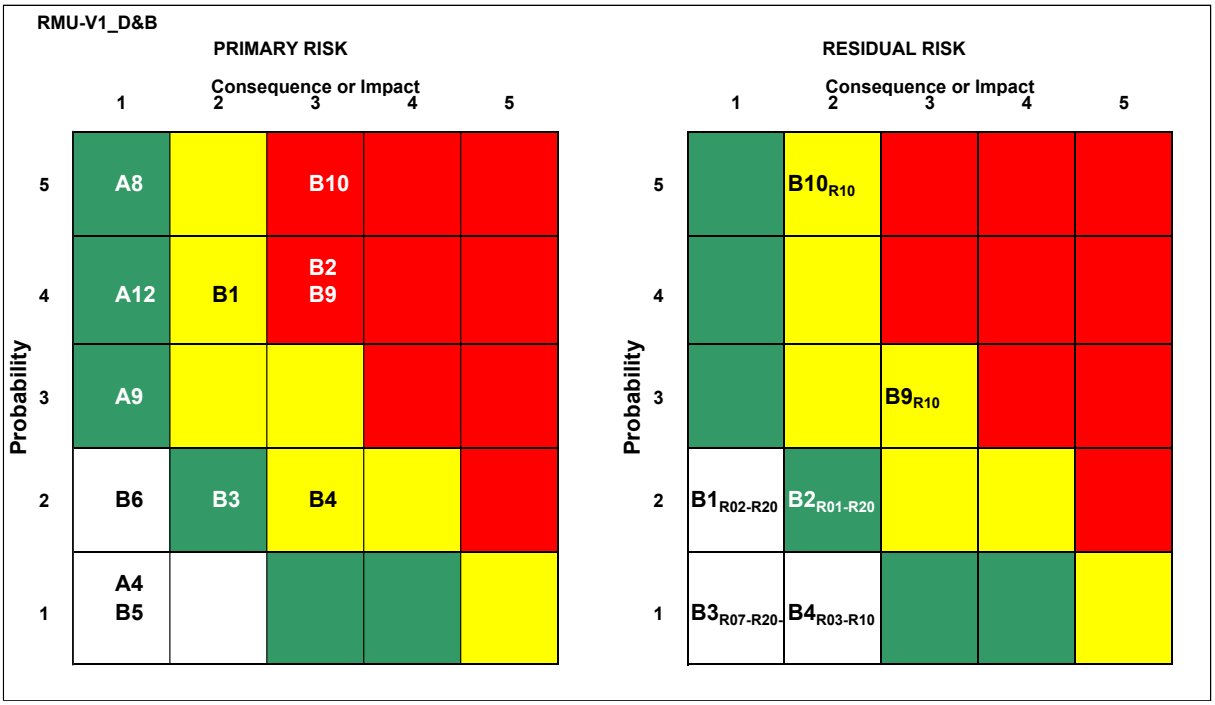


Figure 14. Updating residual risk register

5.1 Reliability Based Design

A probabilistic study allows uncertainty related to a parameter (or a random variable) to be integrated in the analysis through the use of probability density functions (pdf). Various sources of uncertainty can be compared, analyzed and combined using a probabilistic procedure. For a given level of uncertainty in the problem, the implied level of reliability can also be quantified, thus allowing for comparison of the safety (reliability) of alternative designs (Tang, 1993).

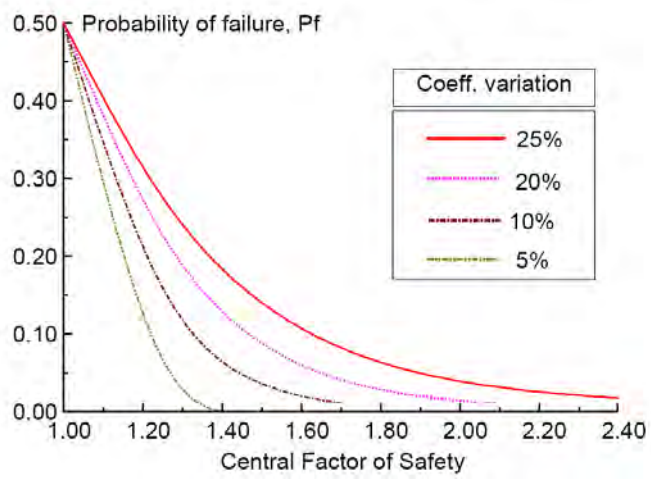


Figure 15. Variation of probability of failure with respect to the central factor of safety, defined as expected capacity over expected demand, for different coefficients of variation (Bieniawski et al., 1994)

A practical way to assess the reliability of a design solution is to consider the safety margin (S), which is defined by the difference between capacity (C) and demand (D). Inadequacy of a design is considered within the negative portion of the safety margin distribution:

$$Pf = P[(C - D) \leq 0] = P[S \leq 0] \quad (1)$$

Another measure of a design adequacy is the reliability index, β, defined as the inverse of the coefficient of variation of S (mean μ(S) over the standard deviation σ(S)):

$$\beta = \mu(S) / \sigma(S) \quad (2)$$

In general, any reliability-based analyses shall consist of the following steps:

1. Definition of the empirical, analytical or numerical model that is suitable for the rock mass conditions - structure interface.
2. Definition of the character of the input variables, deterministic or probabilistic (stochastic).
3. Fitting the appropriate pdf to the collected data and/or assignment of an adequate pdf to the stochastic variables.
4. Incorporation of the different sources of uncertainty in the design analysis methods. There are mainly three approaches for doing so:
   - Monte Carlo simulation (Metropolis and Ulam, 1949) where repeated samples are taken from actual or estimated pdf of the variables which enter in a function f (e.g. support capacity) until the distribution of this function is defined with acceptable precision.
   - Taylor series (First Order Second Moment, FOSM method), where Taylor's formula is used for expanding a function *f* about the average value x up to the quadratic term.
   - The Point Estimate Method, PEM (Rosenblueth, 1975), where only two values for each input variable are used to calculate the basic moments of a function *f*.
5. Reliability analysis of the design solution and investigation of its sensitivity to the input varieties.
6. Optimization of the construction practice to maximize the reliability of the design solution selected.

5.2 Determining Reliability of Support System

The reliability based design can properly incorporated in one of the most common tunnel design methods, namely, empirical, analytical, and numerical.

5.2.1 Description of the applied method

Empirical methods are generally limited to the case of response to excavation in elastic-domain or very limited extension of plastic/damaged zone, where rock block falling is the typical instability. In Figure 16, an example of application of the RMi system is presented.

In empirical methods, a reliable support design is mostly assigned with variability range in the thickness of shotcrete and spacing of the bolting or steel ribs.

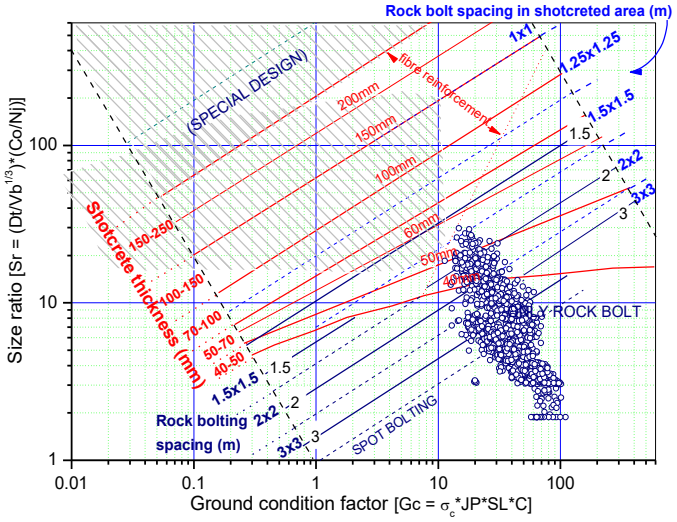


Figure 16. Example of probabilistic application of the RMi system of Palmstrom (2000) to define the support system based on the input variability of geomechanical parameters

On the other hand, as regards analytical methods mostly based on convergence-confinement method (CCM), it is suitable for analysis of the rock mass manifesting elasto-perfectly plastic and elasto-strain softening or hardening with a considerable extension of the plastic zone. Hence, the analytical methods can be used to evaluate most geomechanical risks like slightly, medium, and severe time-independent deformation (only large deformation) or time-dependent squeezing ground condition, fault and shear zone influence zones, incorporation of pore water pressure on support and so on.

Figure 17 shows the distinct logical steps to be followed for the reliability design of support system by means of CCM.

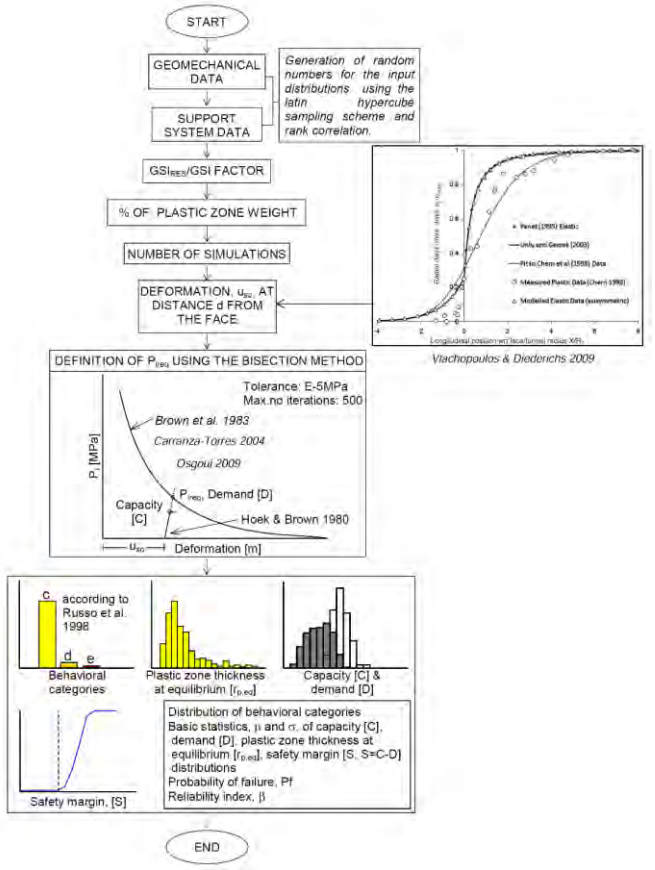


Figure 17. Logical steps of reliability design of support system using the integration of Monte-Carlo simulation and CCM

As observed, the final goal is to work out the reliability of the assigned support in terms of probability of failure "*Pf*" and reliability index "*β*", resulting adequately in optimizing chosen support system.

In terms of decision making and with respect to cost of the support system, one can evaluate different design alternative taking into account the responsibility of the residual risk of support failure. Figure 18 demonstrates the ranges of safety margin "S" of two support solutions envisaged for a tunnel in South America.

Figure 19 are the examples of reliable design method used for verification of support sections in elasto-plastic domain of rock mass behaviour defined properly for time-independent deformation and time-dependent squeezing ground condition in El-Teniente Mine.

Recently the reliable based design approach has been implemented in numerical methods both explicitly and implicitly (Fig.20). The implicit way is to integrate the

Point Estimate Method (PEM) to allow for the uncertainties in design. The example presented in Figure 20, shows the application of reliability based design in limit state verification of a concrete (shotcrete) lining.

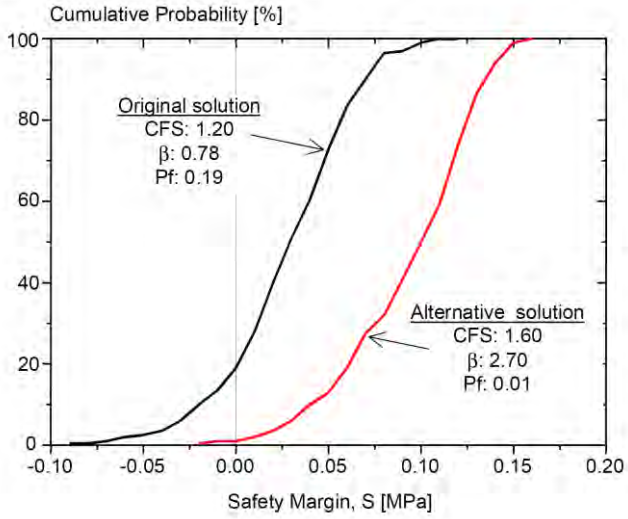


Figure 18. Cumulative distributions of safety margin for original(shotcrete and rockbolts) and alternative (shotcrete and steelsets) primary support solutions for a railway tunnel in South America

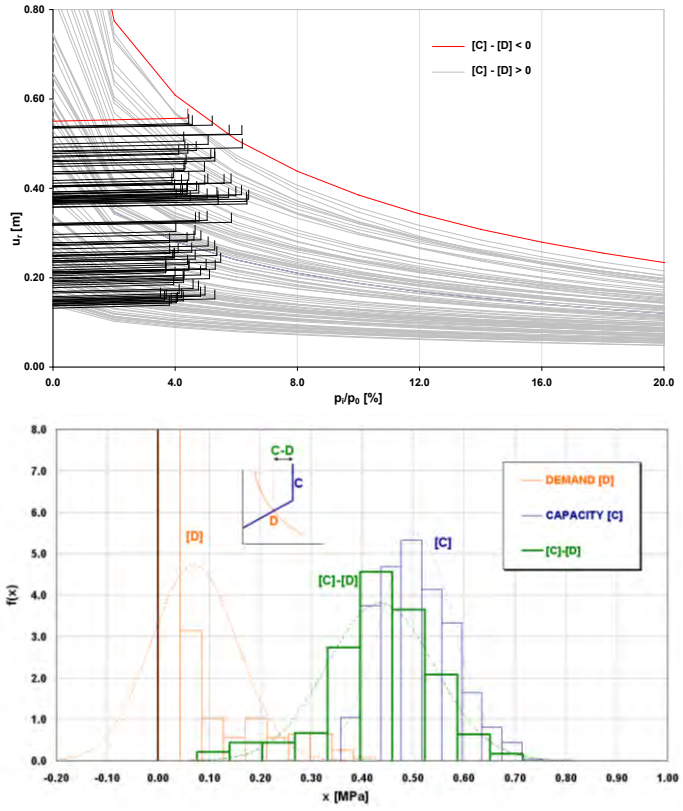


Figure 19. Probabilistic implementation of the Convergence-Confinement method (Top: rock-support interaction with red marked case that not reached to equilibrium), used for the estimation of the Safety Margin by the "Capacity-Demand" analysis (Down).

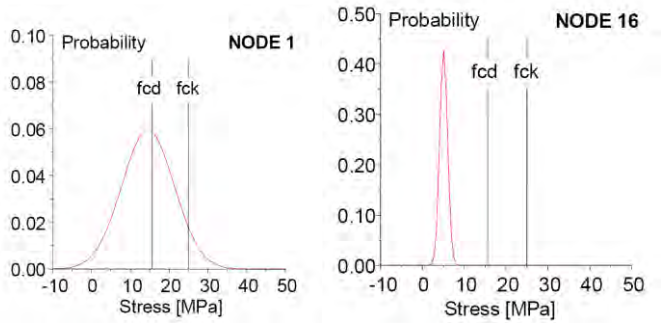


Figure 20. Distribution of numerically obtained stresses in invert and sidewall of a tunnel by means of PEM (Russo et al., 1999). fck and fcd signify the characteristics and design value of compressive strength of concrete in 28 days, respectively

The nodes 1 and 16 stand for measured point of stress in the crown and side wall, respectively, of a tunnel analyzed by numerical method. The distribution of probability was drawn by PEM. As seen, while the invert lining (Node 1) of tunnel is over-stressed (tensile stress (-)) and an unacceptable probability of failure results, the resulting stresses in sidewall of the tunnel are lower than design compressive strength of concrete.

At node 1, more than 50% of probability falls down the capacity of the concrete strength, implying need for either adequate steel reinforcement (steel wire-meshes) or steel fibres at invert to increase the resistance capacity of the lining.

6 NEW CHALLENGE IN HARD ROCK TUNNELLING ASSOCIATED WITH MINING-INDUCED SEISMICITY

Mining-induced seismicity and the related phenomenon of rockbursts (violent type of brittle spalling failure mode) have become more prevalent in hard rock mining. Similarly tunnelling engineering both conventional and mechanized have been suffering from such serious events at long and deep tunnels whole around the world. Recently, many case records have experienced severe rockburts damages. Even though a dozen of research studies on the rockburst have been published more recently and being applied in the field of tunnelling (Kaiser and Cai 2012, Cai 2013,

Diederichs et al. 2010, Diederichs et al. 2013, Perras and Diederichs 2016, Hoek and Marinos 2009), hardly any have detailed the practical solution in terms of effectiveness of the support type for such a risk.

In the event of a rockburst, the support system will be subjected to large, rapid deformations. It must be able to absorb energy rapidly in decelerating and limiting the displacements of blocks of fractured rock.

More recently, South American tunnelling in both mining and civil engineering has faced up with the rockburst events, even with fatal losses.

In Figure 21, the derived approximate relationship between the Damage Index and the estimated energy released by the rockburst events is presented. As can be observed, the main rockburst events occurred indicatively in the range DI=0.8 & 0.9, i.e in the domain of the "serious overbreak" presented in Figure 23 (Diederichs et al. 2010).

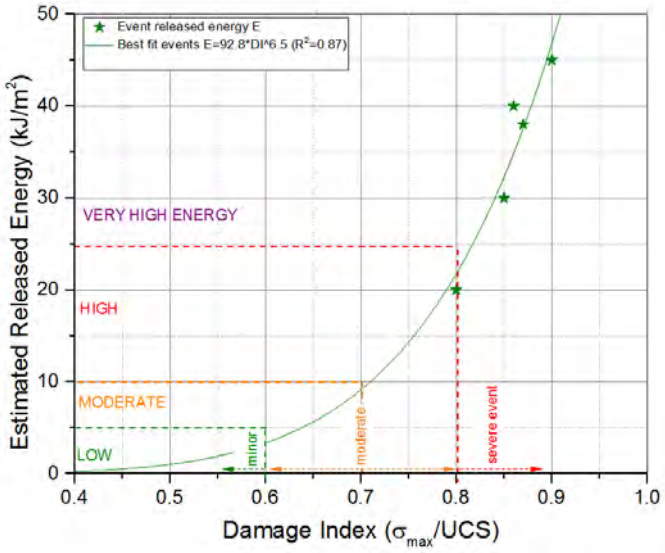


Figure 21. Example of approximate relationship between the calculated Damage Indices and the estimated energy released by the most significant. The data are referred as well to the Energy and Spalling classifications proposed by the CRRH (Canadian Rockburst Research Handbook" CAMIRO", 1996 and Diederichs et al. (2010).

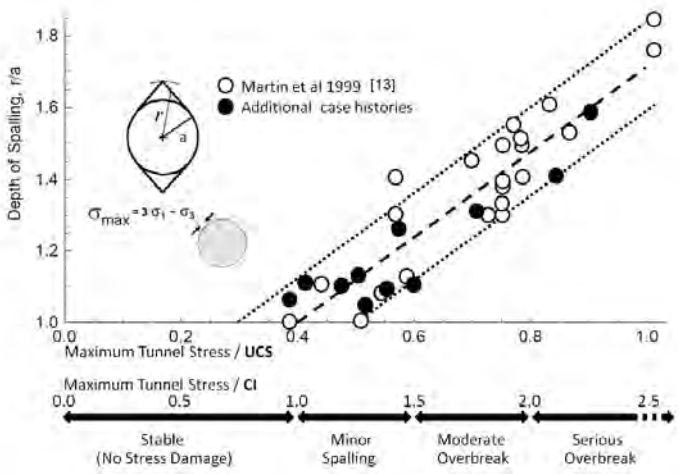


Figure 22. Empirical prediction of spall related overbreak depth (Diederichs et al., 2010)

As can be seen, a rather satisfactory fitting with the estimated released energy was derived. However, the effective occurrence and severity of rockburst events mainly depends also on local conditions affecting the excavation system stiffness. This would be main reason for uncertainty and randomness associated with rockburst event that should properly manage through a pertinent risk analysis approach.

In Figure 22 the empirical prediction of the Depth of brittle failure (Martin et al., 1999) based on the Damage Index DI=σmax/UCS is presented together with the Spalling classification proposed by Diederichs et al., 2010, which introduced the reference to the Crack Initiation Threshold (CI).

The simplified approach used to model the rockburst event might be the so-called DISL (Damage Initiation and Spalling Limit) approach (Diederichs, 2005) to be implemented by RS2 code of Rocscience.

In Figure 24, the simplified calculation of the difference (ΔSED) between the strain energy density before and after brittle failure is as well provided, remarking the relative zero iso-line, which is the limit of the zone in which strain energy density reduced (i.e. it was released) in the change from peak to post-failure condition.

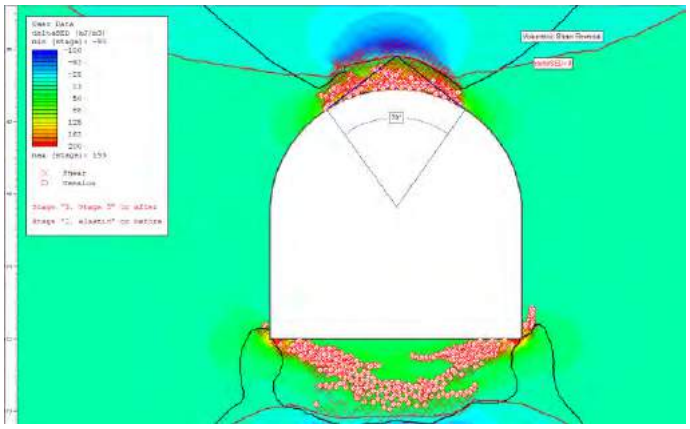


Figure 24. Example of results of ΔSED calculation showing the relative zero iso-line, the Volumetric Strain Reversal and the assumed brittle failure notch according Martin et al.(1999)

According to the approach proposed by Villaescusa et al. (2016), the rockburst ejection velocity is related to the rock strength as indicated in the in graph of Figure 25 and the Energy demand by the support can be consequently calculated on the basis of the involved unstable mass. If the volume of the notch in Figure 18 is taken for reference, the resulting pressure is about 1t/m2 and then Ek=32kJ/m^2.

It should be noted that both induced seismicity and fault/shear band interferences in a complex rock mass may further accentuate the severity of rockburst and relative randomness.

In such a severe environment the importance of seismic monitoring is fundamental and additional effort should be focused in understanding the complex mechanisms of interaction and propagation of the events in relationship to rockburst occurrence.

Figure 26 depicts an effective support system for severe rockburst event that should absorb the released energy of 32kJ/m^2, adopted for the access tunnel of Alto Maipo Project.

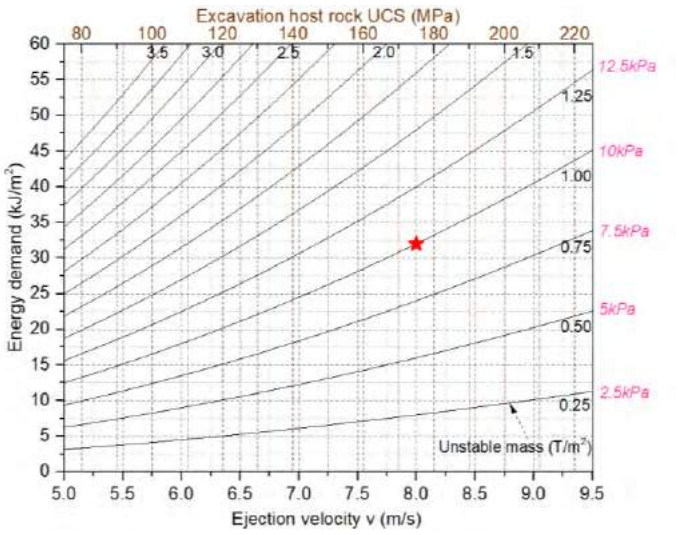


Figure 24. Example of range of energy demand by support system for stress-driven failures in hard rock (derived from Villaescusa et al. 2016)

7 PROBABILISTIC ESTIMATION OF TIME AND COST

On the basis of the expected distribution of Section Types along the tunnels, the probabilistic estimation of the construction time and cost is finally developed, incorporating also the estimated probability and impact of the residual risk.

In particular, the calculation involves the probabilistic assessment of:

- The unitary cost of the Section Types;
- The relative advance rate;
- The time & cost estimation of the residual risk ("accidents" in Fig. 25)
- As observed, mainly on the basis of the geomechanical classification assessments, either the Favourable or Unfavourable scenarios result in the case some better than the basic reference scenario. In particular, by referring to the obtained Expected Values (EV), it is obtained:

•EVFAV ≈ 0.85 EVHLIK

•EVUNFAV ≈ 0.95 EVHLIK

In other words, the reference scenario results about correspondent with the simulated unfavourable scenario and therefore it appears reasonable to expect some more favourable conditions.

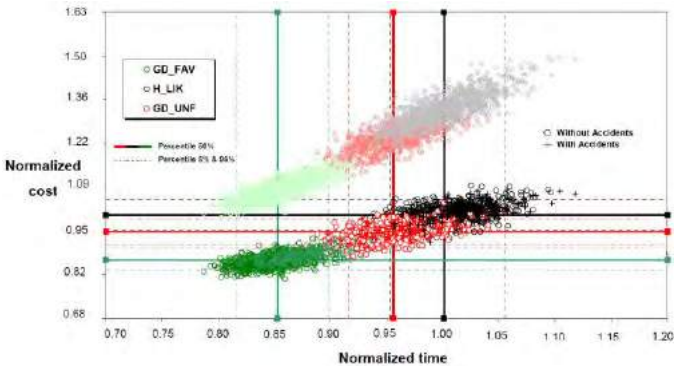


Figure 25. Example of time and cost probabilistic estimation normalized with respect the resulting mean value of the H-lik scenario. Note that the upper shaded clouds incorporate a 5% for year increasing of costs for inflation, etc.

8 CONSTRUCTION STAGE AND THE DETEMINATION OF SUPPORT TYPE

The tunnels and adits of El-Teniente and the other projects are being constructed and GDE provides clients with an experienced team on site collaboration and technical support to Codelco.

Also in this challenging phase, the same basic concepts described in the previous sections are implemented.

For example, the main hazards for the excavation are systematically checked during the advancements of the tunnels, by very detailed face mapping and the concurrent application of the "GDE Multiple graph" (Russo, 2014).

The GDE multiple graph is composed by 4 sectors (Fig. 26), each of them finalized to a user-friendly quantification of the following engineering equations (proceeding clockwise from the bottom-right quadrant to the top-right):

1. Rock block volume (Vb) + Joint Conditions (jC)= Rock mass fabric (GSI);
2. Rock mass fabric (GSI) + Strength of intact rock (σc) = Rock mass strength (cm)
3. Rock mass strength (σcm) + In situ stress = Competency (IC)
4. Competency (IC) + Self-supporting capacity (RMR) = Excavation behaviour (→Potential hazards)

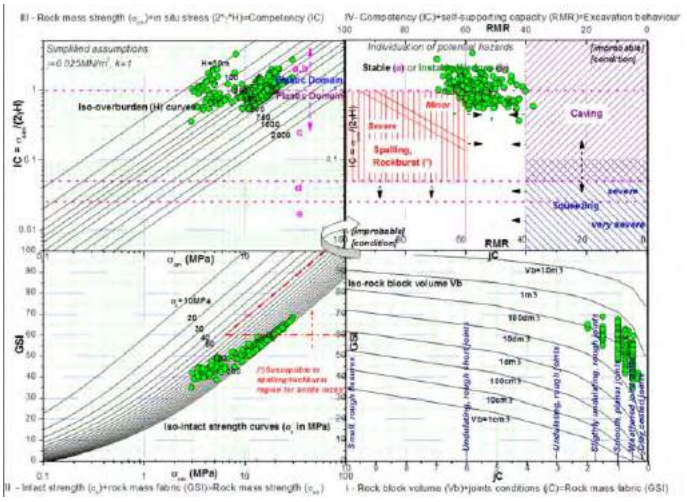


Figure 26. Application of the GDE Multiple graph for one of the main access tunnels

9 CONCLUSIONS

A major problem in tunnelling and mining is that most of design process and above all the decisions must be made under conditions of uncertainty. In reality, both the design and construction phases are always characterized with a certain degree of uncertainty. If not properly recognized and acknowledged, the undesired safety, cost, and time impact would fail the project, causing severe claims among involving parties of the project.

More recently, due to significant rise in tunnelling projects in complex and difficult ground conditions under certain degree of uncertainty and variability, particularly in great depth, the claim issues have become a serious problem.

Many international consulting engineer and insurance companies are in charge of judging and engineering observation to settle the claim and to reach common compromise. However, most of engineering judgment and arbitration, usually qualitative, may result in misleading decision.

The risk analysis-driven design approach presented in this paper aims to identify and to quantify the risk or potential problem, select and implement the measures mitigating or controlling the risk, and indicate if there is a residual risk which would need to be shared among the parties involved in the project and for further decision making. This ability of the approach makes it possible for all parties and joint ventures engaged in the project to recognize and to understand the possibly associated risks and to share the residual risks. Therefore, in case of happening a serious

problem in tunnelling activity, a efficient action may, in common, be agreed and activated.

A risk management plan would help the client to depict the perspective of the project from the bidding phase to construction in terms of possibly inherent risks. The case of El-Teniente mine described in this paper is a successful case in which the client and all engineering firms have already been informed with the potential geological and geomechanical hazards such that almost all construction operation have not been interrupted by reason of unwanted geo-problems.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to acknowledge the contributions and assistance of all their colleagues of GEODATA Engineering since late 1990s, those who have had an important role in originating and developing of risk-analysis-driven design as a part of overall risk management plan. But for them, this invited lecture has not been prepared and presented.

REFERENCES

AFTES, 2012. Recommandation sur la caractéri-sation des incertitudes et des risques géologi-ques, hydrogéologiques et géotechniques. *Tunnels et Espace Souterrain* - n°232.

Bieniawski, Z.T. 1984. *Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling*. 272 p. Rotterdam: Balkema.

Bieniawski, Z.T., Alber, M., Kalamaras, G.S. 1994. Time Dependent Strength of Coal Strata for Long-Term Pillar Stability. *Proc.13th Conference on Ground Control in Mining*, WV: 81-90.

Brown, E.T., Bray, J.W., Ladanyi, B., Hoek, E. 1983. Ground response curves for rock tunnels. *Journal of Geotechnical Enginering*. 109 (1): 15-39.

Cai, M. 2013. Principles of rock support in burst-prone ground. *Tunnelling an Underground Space Technology* n.36. 46-56.

CAMIRO Mining Division, 1996. *Canadian Rockburst Research Handbook.*

Carranza, T.C., Fairhurst. 2000. Application of the Converge-Confinement Methos of Tunnel Design to Rock Masses that Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.15, No.2, pp.187-213.

Carranza-Torres, C. 2004. Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion. *Int J Rock Mech Min Sci*. 4: supplement 1, 629-639.

Chern, J.C., Shiao, F.Y., Yu, C.W. 1998. An empirical safety criterion for tu.nel construction. *Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, Taiwan, pp. 222–227.

Chiriotti, E., Grasso, P., Xu, S. 2003. *Analyses of Tunnelling Risks: State-of-the-art and Examples*. Gallerie, n.69, pp. 33-44.

Decman, A., Stella, F., Verzani, L.P. 2013. Geomechanical follow-up of El Teniente new mine level access tunnels, *ITA symposium*. Croatia, 7-8 May.

Diederichs, M.S. 2005. Design methodology for spalling failure and rockburst hazards. Summary of meeting with GEODATA SPA. Torino.

Diederichs, M.S. 2007. Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. *Can. Geotech. J*., 44, 1082-1116.

Diederichs, M.S., Carter, T., Martin. 2010. Practical Rock Spall Prediction in Tunnel. *Proc. of World Tunnelling Congress*. Vancouver.

Diederichs, M.S., Eberhardt, E., Fisher, B. 2013. Consideration of stress and structural influence on high response in deep tunnelling – the Olmos Tunnel, Peru. *World Tunnel Congress*, Geneva, Switzerland. 6 pgs.

Einstein, H.H., Xu, S., Grasso, P., Mahtab, M.A. 1998. Decision aids in tunnelling. *World Tunnelling, April 1998*: 157-159.

Grasso, P., Mahtab, M.A., Kalamaras, G., Einstein, H.H. 2002. On the development of a Risk Management Plan for Tunnelling. *Proc. World Tunnel Congress*. Sydney.

Guglielmetti , V., Grasso, P., Mahtab, A., Xu, S. 2007. *Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design methodology and construction control.* CRC Pres.Taylor & Francis. 504 p.

Harr, M.E. 1987. *Reliability-Based Design in Civil Engineering*. New York: McGraw-Hill.

Hoek, E., Brown, E.T. 1980. *Underground excavations in Rock.* The Institution of Mining and Metallurgy, London. 527 pp.

Hoek, E., Marinos, P. 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunnelling International*.

Hoek, E., Marinos, P.G. 2009. Tunneling in overstressed rock. *Eurock2009*. Keynote address.

Hoffmann, J.S., Hammonds, F.O., Bartell, S.M. 1994. An Introductory Guide to Uncertainty Analysis in Environmental and Health Risk Assessment - Prepared for OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY Tennessee 37831-6285

ITA/AITES, 2004. Guidelines for tunnelling risk management. International Tunnelling Association, Working Group No. 2. (Søren Degn Eskesen, Per Tengborg, Jørgen Kampmann, Trine

Holst Veicherts). Tunnel. Underground Space Technol n. 19.

Kaiser, P.K., Cai, M. 2013. Critical review of design principles for rock support in burst-prone ground-Time to rethink! Perth - *Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction. Perth.*

Kalamaras, G.S. 1996. A probabilistic approach to rock engineering design in tunneling. In *The Bieniawski jubilee collection - milestones in rock engineering*: 113-135. Rotterdam: A.A. Balkema.

Li, C.C. 2010. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 47. 396–404.

Martin, C.D., Kaiser, P.K., McCreath, D.R. 1999. Hoek–Brown parameters for predicting the depth of brittle failure a round tunnels. *Canadian Geotechnical Journal.* 36: 136–151.

Metropolis, N., Ulam, S. 1949. The Monte Carlo Method.J.Am. *Statistical Assoc.* 44(247):335-341.

Osgoui, R. 2009. Numerical-aided elasto-plastic model for circular tunnel in Hoek-Brown rock masses. *SINOROCK 2009. International Symposium on Rock Mechanics; Rock Characterization, Modelling and Engineering Design Methods*. Honk Kong.

Palmström, A. 2000. Recent developments in rock support estimates by the RMi. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Tecnology*, vol. 6,

Peck, R.B. 1969. Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground. Proc.: *7th International Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, State-of-the-art volume, State-of-the-art Report, pp.225–290.

Perras, M., Diederichs, M.S. 2016. Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 8, pp. 60-74,

Rosenblueth, E. 1975. Point Estimates for Probability Moments. *Proceed.Nat. Acad. Sci*. USA 72 (10): 3812-3814.

Russo, G. 2009. A new rational method for calculating the GSI. *Tunnelling an Underground Space Technology* n.24,

Russo, G. 2014. An update of the "multiple graph" approach for the preliminary assessment of the excavation behaviour in rock tunneling. *Tunnelling an Underground Space Technology* 41.

Russo, G., Grasso, P. 2007. On the classification of the rock mass excavation behaviour tunnelling. *The 11th ISRM Congress*, Lisbon, 9-13 July 2007.

Russo, G., Kalamaras, G.S., Grasso, P. 1998. A discussion on the concepts of geomechanical classes, behavior categories and technical classes for an underground Project. *Gallerie e Grandi Opere in Sotterraneo* (54):40-51.

Russo. G., G.S. Kalamaras, G.S., Xu, S., Grasso, P. 1999. Reliability analysis of tunnel support systems. *Proc. of the 9th ISRM Congress*. Paris.

Tang, W.H. 1993. Recent Developments in Geotechnical Engineering. In Li, K.S., & Lo, S-C.R. (eds). *Proceeding, Conference Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*: pp. 3-27. Rotterdam: A.A. Balkema.

Unlu, T., Gercek, H. 2003. Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18: 547–553.

Villaescusa, E., Kusui, A., Drover, C. 2016. Ground Support Design for Sudden and Violent Failures in Hard Rock Tunnels. *9th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS9)*. Bali, Indonesia.

Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S. 2009. Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.42:131–146.

Current State of Tunneling and also Future Planning in India: Engineering, Geological and Contractual Risk and Opportunities

S.P. Sen
Former Director Tech NHPC Ltd, India

ABSTRACT India is the second most populated country in the world with nearly a fifth of the world's population. According to the 2017 revision of the World Population Prospects, the population stood at 1,324,171,354. Related to fast grow population in India, the need of tunnelling is also growing fast. The paper is on tunneling history of India and its growth. It covers both metro tunnels and tunnels in mountain especially in Himalaya for railway, irrigation and hydropower. ıt also discusses the practice in India for tendering and managing the risk in tunneling. Paper also discusses the limitation of contract in handling of geological and hydrological uncertainties vis-a vis opportunities for successful tunneling in Himalaya. Currently, there are three Turkish Contractors which are active in India: Dogus, Gulermak and Titan. It is believed that this presentation will open new opportunities for Turkish Contractors.

1 INTRODUCTION

Himalayas has a very difficult geology and some hydropower tunnels are located in this area In the northern part of India is Himalaya shown in deep green color, as seen in Figure 1 Nepal an independent country is also located in Himalaya. Same is Bhutan another independent country in the lap of Himalaya. In eastern and western side there are mountains as depicted as Eastern Ghats and Western Ghats in the map.

In March 1930, Calcuta Electricity Supply Company did build the first underwater tunnel below River Hoogly branch of Ganga, which travels through India. Construction of the tunnel of 538.8 m length took 17 months. The tunnel was completed in July 1931. The tunnel for laying cable from one bank to the other was built manually, below 10 m of the river and cast iron rind was used to support the tunnel, the diameter of tunnel was 1.83 m. This tunnel was a breakthrough for Indian Tunnelling activities. Presently, twin tunnels are being constructed for metro line below this river (Fig. 2) by two TBMs.

The tunnel construction industry has witnessed positive breakthroughs in the past few years. A total of 1,900 km of tunnel has been constructed so far, and about 3,000 km is either under construction or is planned to be taken up in the future. Hydro tunnels account for the largest share, followed by railways, irrigation, metro rail, water supply and sewerage, and roads and highways.

Important tunnels such as the Chenani-Nashri road tunnel, the Banihal-Quazigund rail tunnel, the Kashang hydro tunnel and Teesta 3 have been commissioned. A number of tunnels have also been completed for Delhi, Kolkata and Chennai metro projects.

2 TUNNEL SEGMENTS ANALYSIS AND PROJECTIONS TILL 2023-2024

Indian Tunneling Association has estimated the tunnels completed, under construction and planning about 6064 km, costing about 75 billion US Dollars as displayed in Table1.

Figure 1. The map of India, surrounding countries and the location of Himalayas

Figue 2. River Hoogly branch of Ganga

Table 1. A general look at the tunnelling activities in India

Sector	Completed (km)	Under Construction (km)	Planned (km)	Total (km)
Hydro Tunnels	1129	838	1103	3070
Metro Tunnels	115	75	382	570
Railway Tunnels	241	257	490	988
Road and Highway	18	95	292	405
Irrigation, Urban Water Supply and Sewerage Tunnels	207	251	571	1029
Total	1710	1516	2838	6064

Table 2. Past and future metro projects in India

Metro in operation and under extension					
Name	City	State	Commissioning	Operational (km)	Under Construction (km)
Kolkata metro	Kolkata	West Bengal	Oct. 1984	27	113
Delhi metro	Delhi	New Delhi	Dec. 2002	231	140
Namma metro	Bengaluru	Karnataka	Oct. 2011	42	34
Rapid metro	Gurugram	Haryana	Nov 2013	12	nil
Mumbai metro	Mumbai	Maharashtra	June 2014	11	69
Jaipur metro	Jaipur	Rajasthan	June 2015	10	2.5
Chennai metro	Chennai	Tamil Nadu	June 2015	28	18
Kochi metro	Kochi	Kerala	June 2017	19	26
Luchnow metro	Lucknow	Uttar Pradesh	Sept 2017	9	33
Hyderabad metro	Hyderabad	Telangana	Nov 2017	30	42
Under Construction					
Nagpur metro	Nagpur	Maharashtra	Jan 2018	nil	38
Noida metro	Noida	Uttar Pradesh	April 2018	nil	30
Metro link between Gandhinagar and Ahmedabad	Gandhinagar and Ahmedabad	Gujarat	2018	nil	19
Navi Mumbai metro	Navi Mumbai	Maharashtra	May 2019	Nil	11
Pune metro	Pune	Maharashtra	2020	nil	58

3 METRO TUNNELS

First metro in India of 22 km in length was built in the city of Kolkata in the year 1984. Construction started in around 1974. The total metro length was underground except at both ends. But took lot of time and caused large hardship as it was built by open excavation. It took about 10 years as it was built by open excavation along the main avenues. It caused much distress to people and was really inappropriate planning.

Metro Construction in India received a push in 2000 after taking up extensive construction of metro line in Delhi A major portion is above ground except in congested and crowded area. It went underground initially by NATM and then extensively using TBM. Presently about 19 TBM is working in Delhi Metro, mainly EPB machine. Presently all major cities in India have built substantive length of metros and continuing to build them.

A large portion being underground and deployment of all kind of TBM are being done. Out of 419 km built until now, about 30% shall be underground. About 634 km is under construction in different cities. Out of which about 100 km shall be underground, further are under planning. Past and future metro projects in India are summarized in Table 2.

A typical NATM work in Delhi Metro is seen in Figure 3. ATBM entrence from the portal Cuffe Parade Metro Station in Mumbai is seen in Figure 4. Development of metro construction in Bangaluru in South is seen in Figure 5 and a typical view of a metro station in India is seen in Figure 6.

Figure 3. A typical NATM work in Delhi Tunnel

Figure 4. TBM getting lowered at Cuffe Parade Metro Station in Mumbai

Figure 5. Development of metro construction in Bangaluru in South

Figure 6. A typical view of a Metro station in India

4 RAILWAY AND HYDRO POWER PROJECTS

India has long history of tunneling mainly for railway and hydropower project mainly in western hills and in Himalaya.

While conventional methods dominate the railway and hydro segments, mechanized methods such as TBM and NATM are gaining traction in the metro and road segments. In special cases / conditions, techniques / methodologies as appropriate are being used. Besides, contractors are experimenting with new and innovative materials such as geo-synthetics, geo-membrane, steel anchors and self-drilling rock bolt. There is a growing focus on smart/intelligent tunnels, which feature integrated traffic control system, video surveillance, wireless communication, entrance detection control, electrical fire signaling, SOS call boxes, etc. The Chenani-Nashri Tunnel is a case in point. Typical pictures related to hydropower are seen in Figures 7-8-9.

Figure 7. A general view of Chenani Nashri

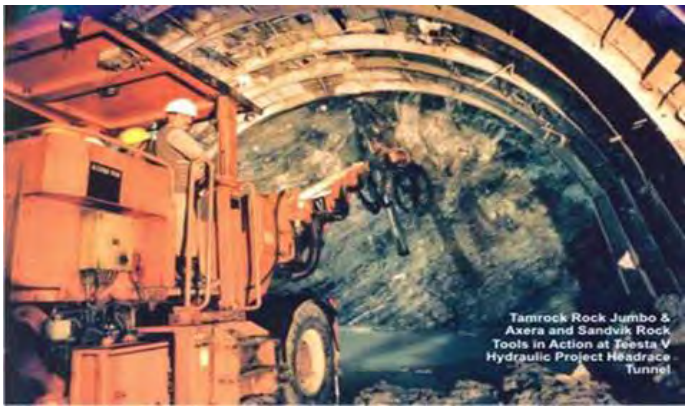


Figure 8. Excavation of Head race Tunnel of Teesta V, in Himalayas for Hydro Electric Project

Figure 9. Excavation in highly fractured rock in hydropower tunnel

Excavation of HRT tunnel of 12 km in length in Kishanganga HE Project in Kashmir Western Himalaya was done by double shield TBM. Depth of overburden was about 800m or so. The tunnel portal is seen in Figure 10.

Bheri Babai Water Diversion project is being built in Nepal Himalaya. Tunnel of 4.5 m diameter is being excavated by double shield TBM. Till date out of 10km long tunnel 5.5 km has been excavated. The portal of tunnel is seen in Figure 11.

Figure 10. HRT tunnel in Kashmir Western Himalaya

Figure 11. The portal of Bheri Babai Tunnel in Nepal-Himalaya

5 CONTRACTUAL RISKS

A generalized flow chart construction risk, owner's risks and project's cost are summarized in Figure 12.

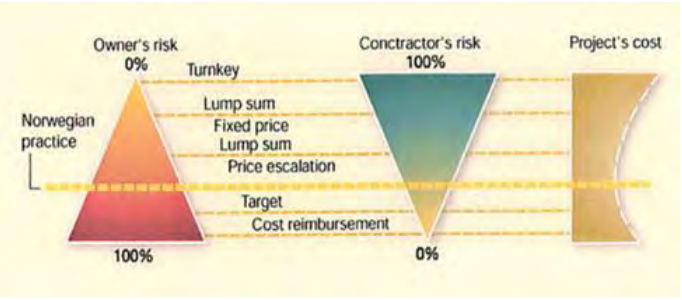


Figure 12. Contractual Risk (Norwegian Tunneling Society Publication, 2012, No. 21)

Majority of contracts where the owners are Government or Government agencies, are unit price contract. Such contracts are characterized by followings:

a) Geological/ Geotechnical Report prepared by owner in house or by consultant.
b) Bill of Quantities and technical specification for the job and also clause for quantity variation.
c) General condition of contract and special condition of contract.
d) General drawing for the project site its infrastructure and engineering drawings for the contract.
e) Planning and completion time.
f) Qualification and experience of contractor and its key personal at site.

5.1 Geological Risk and Appropriate Ground Engineering

Geological risks are the major factors in long tunnels in Himalaya. Skill to handle them by time and cost is the key to success in tunneling in Himalaya.

a) Long tunnel in Himalaya and western and eastern mountain has a wide variation of geological formation and hydrological uncertainties.
b) Detail investigation for both geological and hydrological information have been generally insufficient.
c) Very frequent variation of rock characteristics associated with high ground water table make tunneling a difficult job.
d) A sound command on appropriate ground engineering and meticulous planning to handle such ground uncertainties is required for successful execution.

5.2 Completion Time Provided In Tender Document

Completion time as provided in tender is based upon the previous experience. Many times they are not commensurate to risk handling and geological situation and other limitation.

a) Completion period for the tunnel contract and its progress rate to be achieved is provided in the tender document and contractor has little scope to discuss and ask for modification.
b) Majority of the contracts provide provision for liquidated damage clause, which may cause ambiguity.
c) However on the other side main advantage with this system is that the contractor's incentive to meet the penalty deadline will be maintained, even if ground conditions get worse.

5.3 Deficiencies and Opportunities

Time should be the central focus of any contract. How?

a) Delay and related cost overrun has becoming a burning issue in tunnel construction especially in long and deep tunnels.
b) Time should be the essence of contract in reality it is not.
c) Development of TBM technology has made it possible to build tunnel faster but often with increase of cost and time especially for remote areas and difficult geology.
d) It is time now to revolutionize the technology to make time as the central focus.

e) Technology in all field are changing fast it is being oriented towards ease of doing, reducing risk, time and cost.
f) In the underground space technology, the same is not happening.
g) It is going reverse with advent of technology the risk is increasing in the form of cost and often time also.

In the tunnels with difficult ground condition excavation technology requires a complete change of approach.

6 CONCLUSIONS

India is the second most populated country in the world with nearly a fifth of the world's population and the need of tunnelling is also growing fast. In this paper the past current and future tunnelling activities are summarized, later contractual and geological risks, deficiencies and opportunities are discussed. It is believed that this presentation will open new opportunities for mutual working of Indian and Turkish Contractors.

REFERENCE

Norwegian Tunneling Society, 2012. Publ. No. 21.

Mekanize Kazı, EPB TBM ve Klasik Tünelcilik Vaka Analizleri

Mechanical Excavation, EPB TBM and Classical Tunneling Case Studies

Ataköy – İkitelli Metro Projesinde Doğu Sanayi İstasyonu Çıkış Aynasının Alın Kalıbı ve Poliüretan Enjeksiyon Köpüğü İle Sağlamlaştırılması

Reinforcement of Dogu Sanayi Station Face with Injection Mold and Polyurethane Injection Foam at Ataköy - Ikitelli Metro Project

U. Çalışkan, C. Balcı
İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

H.A. Yazıcı, T. İlkdoğan
Aga Enerji Nak. Mad. İnş. San. ve Tic. A.Ş., İstanbul, Türkiye

ÖZET Şehir içi yolcu taşımacılığında raylı sistemlerin önemi her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda inşa edilmekte olan Ataköy – İkitelli metro hattındaki çalışmalar devam etmektedir. Yaklaşık 13 km uzunluğundaki hat Bakırköy, Bahçelievler, Bağcılar, Küçükçekmece ve Başakşehir ilçelerini birbirine bağlayacaktır. 4 adet ön kalkan çapı 6550 mm olan TBM, Çobançeşme Şaftı'ndan Kuzey ve Güney yönlerinde kazı yapmaktadır. Kuzey aynada kazı yapmakta olan S 1028 numaralı TBM'in dördüncü ve beşinci istasyonları olan İhlas Yuva-Doğu Sanayi arasındaki kazının tamamlanmasının akabininde, Doğu Sanayi çıkış aynası patlatılmış, devamında aynada yapılan kalıp güçlendirme ve poliüretan enjeksiyon ile yapılan sağlamlaştırma işi bildiriye konu edilmiştir. Aynanın patlatılmasının devamında TBM'in ön kalkanının üst kısmındaki zeminde mevsimsel yağış ve yumuşak zeminle beraber risk oluşabileceği görülmüş ve önlem alınmıştır. Zeminin durumu ve su akışı anlık olarak takip edilmiş, sık aralıklarla deformasyon okuması alınıp sonuçlara göre değerlendirme yapılıp aksiyon alınmıştır. Burada problem oluşturabilecek olan noktanın yeraltı suyunun yükselme ihtimalinin olduğu, bundan dolayı zeminin gevşemesinin deformasyon yaratabileceği düşünülmüştür. Bu yüzden suyla birleşince çok hızlı bir şekilde priz alan bir kimyasal kullanılmış ve su akışının önüne geçilmiştir. Ek olarak ring ve pilot tünel arasında zayıf bir zon bırakmamak adına kontak enjeksiyon yapılmıştır.

ABSTRACT The importance of railway systems in urban passenger transportation is increasing day by day. In this respect, the work on the Ataköy - Ikitelli Metro Line continues. This line which is 13 km long, will link Bakırköy, Bahcelievler, Bagcilar, Kucukcekmece and Basakşehir districts. TBMs which are 4 pre-shield diameters of 6550 mm keep going to excavate North and South directions from Cobancesme Shaft. Following the completion of the excavation between Ihlas Yuva-Dogu Sanayi, which are the fourth and fifth station of TBM number is S 1028, which is still digging in the north, after the Dogu Sanayi Station breakthrough and the reinforcement made with iron and polyurethane injection operations was reported. In the ongoing of the breakthrough, it was observed that there could be a risk due to the seasonal rainfall and soft ground in the upper part of the front shield of TBM and measures were taken. The state of the ground and the water flow were monitored instantaneously, the deformation measures were taken at frequent intervals and the results were evaluated according to the results. On this point it is thought that there is a possibility of the ground water to rise, which may cause problems, slack ground can be deformed. Therefore, the chemical were used when combined with the water settles very quickly and the water flow was prevented. In addition, a contact injection is made in order strength a zone between the ring and the pilot tunnel.
Keywords: tbm, injection, polyurethane, deformation

1 GİRİŞ

Metro yapıları yerleşim yerleri içerisinde içerisinde inşa edilen yapılardır. Kazı yöntemi ve çevredeki yapıların durumuna göre evler, devlet binaları, yollar, köprüler inşaatın çevresel etki alanı içerisinde kalabilmekte ve etkilenebilmektedir. Bu etkilerin proje başlamadan tahmin edilip önlem alınması, projenin inşası sırasında ise düzenli olarak kontrol edilmesi ve gerektiğinde müdahale edilmesi önemli bir husustur. En önemli etkilerden biri metro inşaatı sırasında oluşabilen yer değiştirmeler ve deformasyonlardır. İstanbul'da devam eden projeler çağın gereklerine ayak uydurmuş ve bu çevresel etkiler gerektiği şekilde takip edilmektedir.

Tünel açma makinalarının (TBM) her bir istasyona başlangıç ve bitiş noktalarında zeminde olumsuz etkiler oluşabilmektedir. Bu sebeple istasyon başlangıç ve bitiş noktalarında daha nizami bir takip organizasyonu yapılmaktadır. Tünel açma makinasının çıkış yapacağı istasyon üzerindeki ve çevresindeki yapılar önceden incelenir. Ölçüm, jeoteknik ekibi ve diğer ilgili mühendislerin kararı ile gerekli görülen noktalara yatay deplasman ve oturma bulonları yerleştirilip okuma alınmaktadır.

Bunların dışında jeoteknik rapordaki parametreler, hidrojeolojik veriler, mevsimsel yağışların oluşturabileceği etki, çevrede devam eden diğer inşaatların oluşturabileceği muhtemel etki, köprü ve viyadüklerin istasyon çıkışı sırasında yaratabileceği gerilmeler önceden ve anlık olarak değerlendirilip teknolojinin de yardımıyla takip edilmektedir.

1.1 Ataköy-İkitelli Metro Projesi Detayları

Ataköy-İkitelli Metro Hattı, İstanbul'un batı yakasındaki bölgeleri, kuzeyden güneye birbirine bağlayacaktır. Bu hat İstanbul'un Avrupa yakasındaki bölgeleri doğudan batıya bağlayan Metrobüs hızlı transit hattının yanı sıra Marmaray, Başakşehir-Kirazlı ve Aksaray Havalimanı metro hatları arasında bağlantı sağlayacaktır. Projenin güzergahı Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekil 1. Ataköy-İkitelli metro hattı güzergahı (İBB, 2016)

Proje, hattı kullananların Ataköy'den İkitelli'ye 19 dakikada ulaşmalarını sağlayacaktır; mevcut koşullarda özel araçla bu yolculuk yaklaşık 50 dakika sürmektedir. Proje'nin yoğun trafik sıkışıklığını hava ve gürültü kirliliğini ve karbon emisyonlarını büyük ölçüde azaltması ve hatta her gün yolculuk edeceği tahmin edilen 400.000 yolcu için daha emniyetli ve daha güvenilir ulaşım hizmetleri sağlaması beklenmektedir. Ataköy-İkitelli Metro Hattı için on iki yeraltı istasyonu öngörülmektedir. Bu istasyonlar Tablo 1'de gösterilmiştir.

Ataköy-İkitelli Metro Projesi 13,72 kilometre uzunluğunda, en fazla %4 eğimli ve en az 300 metre dönüş yarıçapına sahip olacaktır. Tünel çapı gabari 6,57 m olup iç kaplama çapı 5,70 metre olacak şekilde çift tünel tek hat olacaktır. Tünel inşaatı, sekiz istasyon geçişinde TBM kullanılarak ve kalan dört istasyon geçişinde ise NATM tekniğiyle gerçekleştirilecektir. Projede istasyonlar arasında kullanılan kazı yöntemleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ataköy-İkitelli metro projesi istasyonları (İBB, 2016)

İstasyonlar	Km	Mesafe (m)
İkitelli Sanayi	0-113	0
Masko	0+856	969
Bahariye	1+666	810
Mehmet Akif	2+343	677
Halkalı Caddesi	3+441	1098
Hoca A. Yesevi	4+847	1406
Mimar Sinan	6+210	1363
Doğu Sanayi	7+290	1080
Kuyumcukent	8+293	1003
Çobançeşme	9+117	824
Yenibosna	11+040	1923
Ataköy	13+221	2181

TBM ile delme tünel açma yöntemi, uzun tünel kısımlarının inşasında etkili ve daha ekonomik bir sonuç elde edilmesini sağlamaktadır. TBM yöntemi ayrıca, daha sessiz ve titreşimsiz çalışması ve bu nedenle istenmeyen yeraltı hareketlerini engelleme becerisi dolayısıyla yaygın olarak tercih edilmektedir. TBM tekniğinin kullanımıyla, titreşim seviyesi düşük olduğu ve üst katmanlarda yer alan toprak hacmi yeterince kalın olduğu için tünelin inşası sırasında evler, okullar, hastaneler gibi yapıların altındaki olumsuz etkiler en düşük seviyeye çekilecektir.

Tablo 2. Projedeki kazı yöntemleri

Başl. km	Bitiş km	Yapı ve Aralık	Kazı Yöntemi
0+000	3+595	İkitelli İst. ile Halkalı Cd. İst. Arası	NATM
3+595	12+895	Halkalı Cd. Ataköy Makas Arası	TBM
12+895	13+372	Makaslar, Kuyruk Tüneli vs.	NATM

2 ATAKÖY-İKİTELLİ METRO HATTININ YAPISAL JEOLOJİSİ

Ataköy - İkitelli metro güzergahı, kuzeyde Soğucak Kireçtaşı içinde başlayıp, güney yönde Ceylan Formasyonu, Danişmen Formasyonu'na ait Gürpınar Üyesi, Çekmece Formasyonu'na ait Güngören-Çukurçeşme üyelerini kat ederek en güneyde Çekmece Formasyonu'na ait Bakırköy Kireçtaşı içinde son bulur. Güzergah boyunca yüzeyde yer yer dolgu ve alüvyal çökeller mevcuttur. Güzergah boyunca kat edilmesi beklenen birimler esas ve tali olmak üzere iki şekilde Tablo 3'te özetlenmiştir.

Doğu Sanayi istasyonunda yapılan çalışma yaklaşık olarak 7+220 km sine denk gelmektedir. Bu yüzden özellikle bu bölgedeki jeolojik formasyon irdelenmiştir. Bölgedeki jeolojik kesit Şekil 2'de gösterilmiştir.

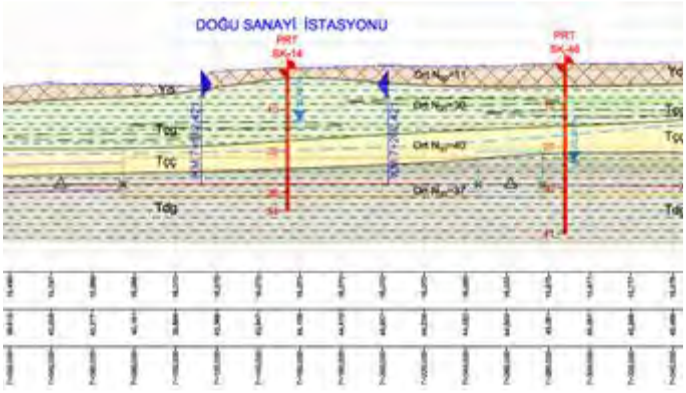
Tablo 3. Güzergah boyunca beklenen birimler (Artson, 2016)

Başl. km	Bitiş km	Esas Formasyon (Üye)	Tali Formasyon (Üye)
0+000	1+500	Soğucak Kireçtaşı (Tsğ)	
1+500	3+620	Soğucak Kireçtaşı ve Ceylan Formasyonu (Tc)	Km 2+030 ile 2+390 arasında kil ve kum (Tçç ve Tdg) cebi geçilmesi beklenmektedir
3+620	4+220	Gürpınar (Tdg) Kum	Kumlu seviyeler
4+220	6+000	Ceylan Formasyonu	Km 4+550 – 4+680 arasında Tdg-kum, km 5+900-6+100 arasında Tçç-kum geçilmesi beklenmektedir
6+000	9+600	Çukurçeşme(Tçç) ve Gürpınar (Tdg)	Güngören (Tçg), Kıraç (Tik) ve Ceylan (Tc)
9+600	11+670	Güngören (Tçg) Üyesi	Çukurçeşme(Tçç) ve Bakırköy (Tçb)
11+670	13+372	Bakırköy Kireçtaşı ve Güngören	Alüvyon (Qal)

Çukurçeşme Üyesi (Kum) - Tçç: Sarı, bazen boz renkli, alt seviyelerde orta – kaba taneli, çakıl katkılı, taneler kuvars ağırlıklı, yer yer iyi derecelenmiş, çapraz tabakalı, üst seviyelerde ise ince – orta taneli, bol siltli ve mika pullu, kil ara seviyeli, tutturulmamış kumdan oluşur. Birim tabanda genellikle bol

çakıl katkılı kumlu bir seviye ile başlar, üste doğru kil ara seviyeli kumlara geçer. Kil seviyelerinin artması ile Güngören Üyesi'ne geçilmiş olur(Artson, 2016).

Gürpınar Üyesi (Kil, Tdg): Gürpınar Kili esas olarak kil ve killi siltler ile tüf, tüffit, ince kum, çakıllı kum, nadiren de organik ve kömürlü ara seviyelerden kuruludur. Silt, tüf ve kum ara seviyeler genel olarak kötü boylanmış ve gevşek şekilde tutturulmuştur. Ancak bazen taşlaşmış ince seviyeler halinde de bulunurlar. Tüf-tüffit seviyeleri diğer kum ve çakıllı kumlara oranla nispeten daha iyi tutturulmuştur. Özellikle kum, çakıllı kum ve tüf - tüffit seviyeleri yanal ve düşey yönde sıkça kesintiye uğrar. Benzerlikleri dolayısı ile Gürpınar çoğu zaman, Güngören seviyeleri ile karıştırılır. Gürpınar killerinin başlıca ayrıt edici özelliği, alaca mor renkli kil ve yaygın tüf-tüffit seviyeleri bulundurmaları, yaygın fissürlü yapı ve topaklı bir dokuya sahip olmaları olarak sıralanabilir. Gürpınar Üyesi yüzeyde sınırlı yayılımda yer almakla birlikte, tünel kazı kotlarında daha yaygın karşılaşılması beklenir(Artson, 2016).



Şekil 2. İlgili bölgedeki jeolojik kesit

2.1 Doğu Sanayi İstasyonu ve Çevresinin Jeohidrolik Durumu

Metro güzergâhının orta kesiminde önemli bir yer kaplayan Güngören Üyesi'nin üst seviyelerini oluşturan killi kısımları teorik ve pratik olarak geçirimsizdir. Alt seviyelerini oluşturan siltli ince kum ve killi kumların ise geçirimsiz veya çok zayıf bir geçirimliliğe sahip olması beklenir.

Güngören killerinin altında düzensiz şekilde yer alması beklenen Çukurçeşme Üyesi'nin kumları inceden – kabaya değin, değişik dane boyuna sahip kum karışımlarından kurulu (bazen çakıl katkılı) olup düşük – orta düzeyde bir geçirimliliğe sahip olması beklenir. Bu seviyenin üstten Güngören killeriyle, alttan ise Gürpınar killeriyle sınırlanmış olması nedeniyle yer yer basınçlı akifer koşullarına sahip olması ihtimal dâhilindedir(Artson, 2016).

2.2 Doğu Sanayi ve Çevresindeki Birimlerin Su Taşıma Potansiyelleri

Güzergahın orta kesiminde önemli bir yer kaplayan Güngören ve Gürpınar killer geçirimsiz özellikleri dolayısı ile genel olarak yer altı suyu depolama ve iletme potansiyeline sahip değildir. Ancak bu birimlerin içinde ara seviyeler veya mercekler halinde bulunan kumlu kısımlar düşük olmakla birlikte yer altı suyu depolama ve iletme potansiyeline sahiptir. Güngören killeri ile alttaki Gürpınar killeri arasında kalan Çukurçeşme kumları ve sınırı olarak karşılaşılması beklenen Kıraç Üyesi'ne ait kaba çakıllı kumlar su taşıma ve iletme potansiyeline sahiptir(Artson, 2016).

3 ÇALIŞMA BÖLGESİNDEN ALINAN DEFORMASYON OKUMALARI

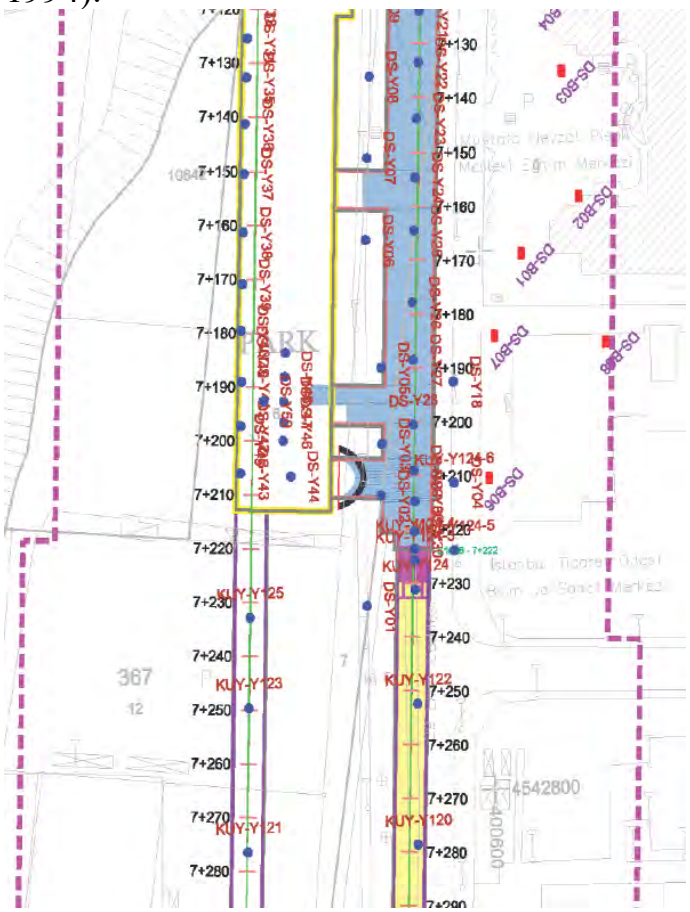
Çoğunlukla metro kazılarında karşılaşılan stabilizasyon sorunlarının önemli nedenleri arasında ortamdaki kayacın niteliği, gerilmelerin durumu ve yeraltı suyuna odaklanmak yerinde olur(Vardar ve Eriş, 1994). Kazı yöntemi fark etmeksizin jeoteknik rapordaki verilerden yola çıkarak hem proje başlangıcında hem de anlık olarak deformasyona meyilli noktaları belirlemek önemlidir.

Bir tünelin inşası tünelin etrafındaki bir bölgedeki gerilmeler ve yer değiştirmelerin durumunu değiştirir. Bu etki alanının boyutu, zemin tipine, yerinde gerilmelere, ortamın özelliklerine, tünel derinliği ve çapına ve destek sisteminin özelliklerine bağlıdır (Ghaboussi ve Ranken, 1977).

TBM'in aynadan çıkışından önce ve çıkışı sürecinde jeoteknik ekip tarafından belirlenen

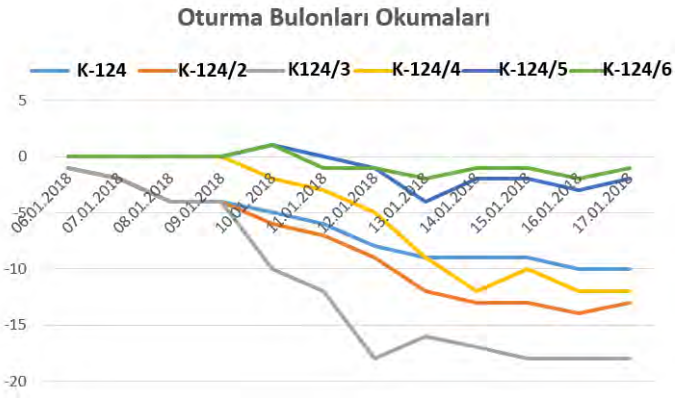
noktalara zemin oturma bulonları yerleştirilmiştir. Bu işlemin mantığı zeminde dikey yönde oluşan yer değiştirmeleri tespit edebilmektir. Oturma bulonlarının proje üzerindeki konumu haritada ifade edilmiştir. Birçok okuma arasından çalışma yapılan bölgeye en yakın bulonlar baz alınmıştır.

Yeraltı kazılarında meydana gelen deformasyonlar hakkında üzerinde durulması gereken bir başka konu ise özellikle metro gibi yüzeye yakın kazılarda görülen blok kayması veya düşmesi gibi kaya boşalma hareketlerinde ortamdaki gerilmelerin fazla bir etkisinin olmayışıdır. Bu tür kazılarda ortamdaki süreksizliklerin konumu ve yoğunluğu, kayaçların ayrışma derecesi, kazının geometrisi ve boyutları hareketlere yön vermektedir. Kazı bölgesinde sızıntı şeklinde dahi yeraltı suyunun varlığı benzer kaya hareketlerini hızlandırmakta ve artmasına neden olmaktadır(Vardar ve Eriş, 1994).



Şekil 3. Oturma bulonlarının konumu

Şekil 3'te de görülebileceği gibi TBM S1028'in yürüdüğü hattın tam üzerinde 29 Ekim Caddesi bulunmakta olup Doğu Sanayi bölgesinde trafiğin yoğun olduğu bir noktadır. Ek olarak hattın batısında yerleşim olmamakla beraber doğusunda lise, belediye eğitim merkezi gibi yapılar bulunmaktadır. Bu sebeplerden ötürü deformasyon okumalarının nizami bir şekilde kaydedilmesi ve değerlendirilip aksiyon alınması konusuna ayrı bir önem verilmiştir. Kuyulardan alınan okumalar Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Deformasyon okumaları

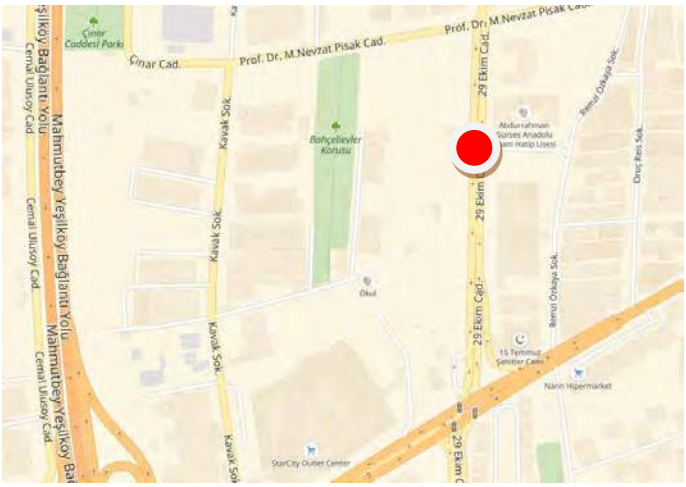
Kesici kafa ile şildin tam üzerinde ve çevresinde konumlandırılan 6 tane kuyudan alınan okumalardan anlaşılacağı üzere bir süre artan deformasyon daha sonra yatay bir seyir izlemiştir.

4 SAHADA YAPILAN UYGULAMA

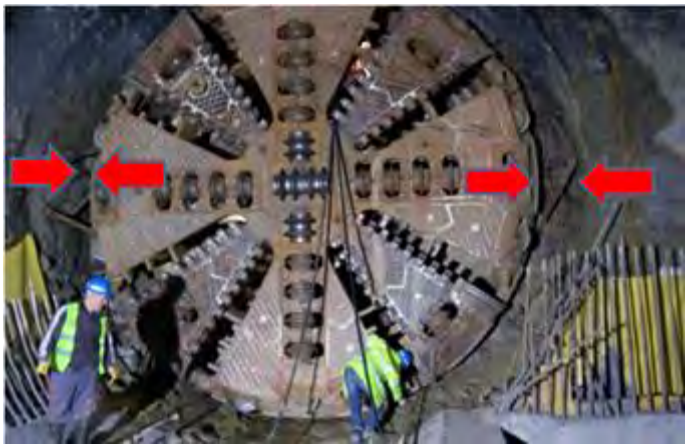
S-1028 numaralı TBM'in aynadan çıkışı sonrasında istasyondaki hazırlık işleri sebebiyle bir bekleme yapmak durumunda kalacak olması aynanın stabilitesi konusunda bir plan yapma gerekliliği ortaya çıkarmıştır. TBM'in varlığı zeminin altında bir destek görevi görecek olsa da zeminin jeolojik durumu göz önüne alındığında zemin oturması yaşanma ihtimalini nötralize etmek için belirli önlemler alınmasına karar verilmiştir. Yerbulduru haritası Şekil 5'te gösterilmiştir.

Öncelikli olarak TBM'in şiltinin üst çeperinden gelebilecek kaya ve toprak kütlelerine karşı fiziksel bir önlem alınmıştır. Şilt çeperi boyunca 0,5 mm lik sac levhalardan kalıp pilot tünelin iç kısmına örülmüştür ve yarım metre aralıklarla destekler konularak pilot tünele sabitlenmesi sağlanmıştır. Bu uygulama TBM yürüme pozisyonuna geçtiğinde şilde sürtünüp engel oluşturmaması için sac kalıp TBM şildine kaynaklanmamış,

şilt ve kalıp arasında 4-5 cm lik boşluk bırakılmıştır. Kalıp kesici kafa ile temas etmemekte olup, şildin sabit kısmı üzerinde imal edilmiştir. Şilt çevresine yapılan kalıp Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. Çalışma bölgesinin haritada gösterimi



Şekil 6. TBM şildi boyunca sac kalıp

TBM'in istasyon çıkışı sırasında oluşabilecek bir başka problem ise su geliridir. Jeoteknik rapor göz önünde bulundurup zeminde de inceleme yapılarak yer yer kum içeriği olduğu ve bu faktörün dökülmeleri arttırabileceği öngörülmüştür. Bunların dışında iklim faktörü bir başka etkendir. TBM aynadan çıkış yapmadan önceki gün yağan yağmurun zemindeki kayacın içsel sürtünmesini düşüreceği bir gerçektir. Zeminden sızıntı şeklinde akan suyun devamında nasıl bir seyir göstereceğini kestirmek güç olduğundan ikincil olarak buradaki su gelirini kesmek konusunda görüş birliğine varılmıştır.

Su gelirini önlemek için poliüretan bazlı suyla çok hızlı şekilde reaksiyona giren bir çeşit enjeksiyon köpüğü kullanılmıştır. Bu kimyasalın özelliği içerisindeki hızlandırıcı ve kimyasalın sıcaklığıyla değişmekle beraber, ortalama 1 dakika içerisinde suyla birleşip şişmesi ve tüm boşlukları doldurmasıdır. Suyla teması halinde rijit bir yapıya bürünen bu kimyasal içeriği sayesinde suyun ortamda bulunmadığı durumlarda bile prizlenebilmektedir. Bu kimyasalın uygulamasında iki farklı kimyasal ve hızlandırıcı zemine, su akışına göre farklı oranlarda bir araya getirilip ortama enjeksiyon yapılmaktadır. Doğu Sanayi İstasyonu'nda örülen sac kalıbın belirli noktalarına paker borusunun geçebileceği çapta delikler açılmış ve şildin çevresine bu karışım enjekte edilmiştir. Kullanılan köpüğün bazı şartlar altındaki davranışı Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Köpüğün farklı şartlar altındaki davranışı (Basf, 2015)

Farklı Kombinasyonlarda	Köpükleşme Başlangıcı (s)	Köpükleşme Sonu (s)	Şişme Faktörü
A+B Bileşeni+su	60 s (10°C)	80 s (10°C)	8
A+B Bileşeni+su	40 s (20°C)	60 s (20°C)	15
A+B Bileşeni+su	20 s (30°C)	40 s (30°C)	20

Şekil 7. Kalıbın arkasına poliüretan uygulaması

Enjekte edilen kimyasalın şişmesi görsel olarak takip edilmiş, paker basınçlarının da hızla arttığı durumlarda köpüğün boşlukları doldurduğu anlaşılıp uygulamaya son verilmiştir. Toplamda 10 set A ve B kimyasalından kullanılıp enjeksiyon yapılmıştır. Bu uygulamanın sonunda su akışının tamamen durduğu tespit edilmiştir. İşlem sırasında çekilen bir görüntü Şekil 6'da gösterilmiştir.

Ayna tahkimatının iyi yapılması ve düzgün imalat zemin hareketlerini en aza indirmede çok etkilidir (Chou ve Bobet, 2002). TBM'in yürüme pozisyonuna geçmesinden sonra diğer bir sağlamlaştırma işlemi yapılması uygun görülmüştür. Ayna çıkışında her ne kadar önlem alınsa da zemindeki kum da göz önüne alındığında dökülme yaşanma ihtimalinin diğer kısımlara göre yüksek olduğunu söylemek mümkündür. Bu yüzden imalatı yapılan 1028 numaralı ringten geriye doğru son 8 ringin arkasına enjeksiyon yapılması uygun görülmüştür. Zemin oturmadan yapılan bu uygulama projenin devamında tünelde yaşanabilecek su sızmaları ve aşınmaların önüne geçecektir. Belirlenen ringlerin üst ve çapraz kısımlarına hilti ile delikler açılıp paker yardımı ile priz hızlandırıcılı enjeksiyon uygulaması yapılmıştır. Enjeksiyon pompasının basınçlarının yükseldiği veya tıkanmaların yaşandığı noktada ringin arkasının dolduğu öngörülüp uygulama sonlandırılmıştır.

5 SONUÇLAR

Yapımı devam etmekte olan Ataköy-İkitelli Metro Hattı'nın kazısı devam eden S1028 numaralı TBM'in kazısı sırasında yapılan uygulama bildiriye konu edilmiştir.

İstasyon geçişleri TBM kazılarının kritik bölgelerinden biridir. Aynaya giriş, aynadan çıkış ve takip eden belirli mesafeler boyunca zemindeki oturmalar ve yatay yer değiştirmeler TBM ve ilgili jeoteknik, topografya ekibi ile koordineli olarak takip edilmeli, gerek duyulursa TBM ve tünel ekibi duruma göre pozisyon almalıdır. Zemin teknolojik ekipmanların dışında zaman zaman göz koordinasyonuyla da incelenmelidir. Nitekim bu vakada TBM ekibinin gözle görülen bir su sızıntısını fark etmesi sonucunda diğer unsurların harekete geçirilmesi sonucu sonuç alınmıştır.

TBM'in bekleme süresi boyunca aynadan dökülebilecek irili ufaklı kayaç parçalarının hem çalışanların güvenliğini tehlikeye atmaması hem de zeminde yer değiştirme oluşturmaması için öncelikli olarak TBM şildinin çevresine profil destekli kalıp imal edilmiştir. Akabinde TBM ekibi tarafından mevsimsel yağışın etkisiyle TBM'in sol kısmından başlayan su akışı fark edilmiş olup bu akışın önüne geçilmesi konusunda fikir birliğine varılmıştır. İlk önce kalıbın arkasına direk olarak çimento enjeksiyon yapılması fikri ortaya atılmış ancak betonun priz alması sonucunda TBM'e ciddi zararlar verebileceği ve sökülmesinin oldukça güç olacağından dolayı bu fikir kabul görmemiştir. Su akışını durdurmanın en hızlı ve doğru yolunun poliüretan köpük kullanımı olacağı öngörülmüş ve bu uygulamanın yapılması konusunda karar kılınmıştır.

Burada kombine bir sağlamlaştırma işlemi yapılmıştır. Kombine yöntemler genellikle bol su veya zayıf jeolojik formasyon olan alanları güçlendirmek için kullanılır. Oturmayı kontrol etmek için kullanılan sıradan yöntemler, ileri güçlendirme, destekleme, enjeksiyon işlemlerini içerir. Bunlar arasında, enjeksiyonun etkisini garanti etmek çok önemlidir (Ding ve Liu, 2011).

S1028 numaralı TBM'in Doğu Sanayi istasyonu aynasından çıkış yaptığı tarih olan 6 Ocak 2018 gününden itibaren oturma bulonlarının okumaları bildiride gösterilmiştir. Tablodan anlaşılacağı üzere makinanın çıkış yapması ile birlikte bulonlarda bir miktar oturma olmuştur. Bu süreç aynı zamanda zeminde su gelirinin olduğu zaman ile örtüşmektedir. devamında kalıp ve poliüretan uygulamasının yapıldığı tarih olan 12 Ocak 2018 tarihine kadar zemindeki hareket bir süre devam etmiş sağlamlaştırma yapıldıktan sonra ise bulon okumaları durmuştur. Buradan varılmak istenen sonuç aynada yapılan sağlamlaştırma işleminin başarıya ulaştığı, deformasyon okumalarının da bu sonucu destekleyen bir eğilim gösterdiğidir.

KAYNAKLAR

Aga Enerji Jeoteknik Ekibi, 2018. *Ataköy-İkitelli Metro Hattı Deformasyon Okumaları,* İstanbul.

Artson Geoteknik, 2016. *Ataköy-İkitelli Metro Hattı Güzergahı Kesin Proje Jeolojik-Jeoteknik Etüd Raporu. Proje* Jeoteknik Etüd Raporu.

Basf, 2015. *Çok Yüksek Hacimdeki Su Girişlerini Durdurmaya Yönelik Çift Bileşenli Poliüretan Bazlı Çok Hızlı Reaksiyona Giren Enjeksiyon Reçinesi/Köpüğü.* Ürün Kataloğu*,* s. 1.

Chou, W.I., Bobet, A. 2002*. Predictions of ground deformations in shallow tunnels in clay,* Tunnel Underground Space Technology s. 3-19.

Ding, W., Liu, T. 2011. *The Impact Analysis of Grouting Effects to the Settlement of Subway Tunnel Construction.* College of Environmental Secience and Engineering, Ocean University of China, pp. 1769-1773.

Ghaboussi, J., Ranken, R.E. 1977. *Interaction between two parallel tunnels,* International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechenics, vol. 1. pp. 75-103.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2016. *Paydaş Katılım Planı Raporu.* İstanbul

Vardar, M., Eriş, İ. 1994. *İstanbul Metrosu Taksim-4.Levent Güzergahı Temel Kayaçların Jeomekanik Özellikleri ve Duraylılık Sorunları,* Ulaşımda Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu, İstanbul: ss. 181-197.

Baltalimanı-Ayazağa ve Baltalimanı-Kağıthane Atıksu Tüneli'nde Mühendislik Çözümleri

Engineering Solutions in Baltalimanı-Ayazağa and Baltalimanı Kağıthane Waste Water Tunnel

T. Özdemir
Özgün İnşaat Taahhüt Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, İstanbul

A.E. Bilgili
İlci İnşaat Sanayi Ve Ticaret Anonim Şirketi, İstanbul

S. Kuku, O. Eşsizoğlu, M. Kaski
Özgün İnşaat Taahhüt Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, İstanbul

ÖZET İstanbul da atıksuların denize verilmesiyle oluşan kirliliği ortadan kaldırmak için İSKİ önemli projelere adım atmıştır. Bunlardan biride Haliç'i kurtarma projesinin en önemli ayaklarından biri olan Baltalimanı-Ayazağa ve Baltalimanı-Kağıthane tünelleriyle atıksuyun Baltalimanı Atıksu Arıtma Tesisi'ne aktarılmasını sağlamaktır. Bu proje ile Kemerburgaz, Sarıyer, Eyüp, Kağıthane ve Şişli ilçelerindeki yaklaşık 4 milyon nüfusun oluşturduğu atıksu Baltalimanı Atıksu Arıtma Tesisine aktarılmış olacaktır.

Bu bildiride Avrupa 1. Bölge 2. Kısım Baltalimanı-Ayazağa (4260 m) ve Baltalimanı-Kağıthane (5245 m) Atıksu TBM Tünel imalatı aşamasında karşılaşılan sorun ve bu sorunlar için üretilmiş mühendislik çözümleri irdelenmektedir.

ABSTRACT ISKI has taken significant projects in order to eliminate the contamination caused by the waste water drains into the sea in Istanbul. One of the important steps of the Haliç Rescue Project is to transfer the wastewater to the Baltalimanı Wastewater Plant with the Baltalimanı - Ayazağa and the Baltalimanı-Kağıthane tunnels. With this project, the wastewater from Kemerburgaz, Sarıyer, Eyüp, Kağıthane and Şişli districts, where live approximately four million population, will be transferred to Wastewater Treatment Plant.

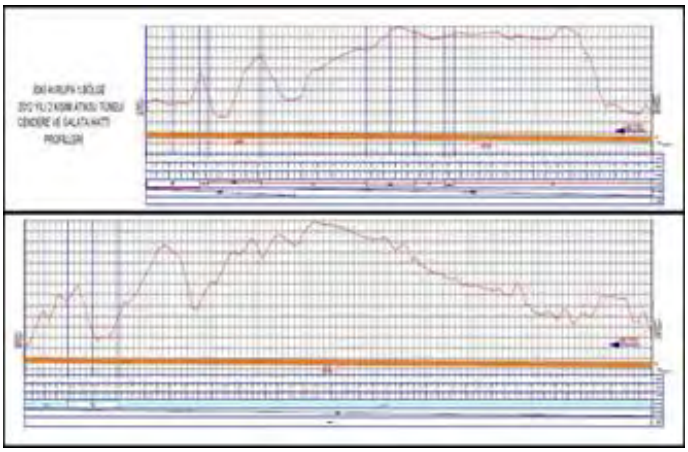
In this paper, problems encountered during construction of Europe 1th District 2nd Zone Baltalimanı-Ayazağa and Baltalimanı-Kağıthane Wastewater TBM tunnel and engineering solutions created for these problems are mentioned.

1 PROJE

İstanbul ili, Şişli, Sarıyer, Kağıthane ilçeleri sınırları içerisinde bulunan tünel inşaatı TBM (tünel açma makinası) ile açılacak olup, Baltalimanı - Cendere - Galata tünelleri olmak üzere iki adet tünel ve şaftları ile atık suyun toplanıp Baltalimanı Atıksu Arıtma Tesisi'ne aktarılmak suretiyle, Haliç'i kurtarma projesinin önemli bir ayağını oluşturacaktır. Tünel inşaatının ana kalemleri; T1, T3 ve T5 olmak üzere toplam 3 adet şaft, cendere tüneli (L = 4260 m) ve Galata tüneli (L = 5245 m) olmak üzere iki adet tünelden oluşmaktadır.

Baltalimanı - Ayazağa ve Baltalimanı - Kağithane atıksu tüneli plan ve profili Şekil 1 ve 2'de görülmektedir. Tünellerin kazısında kullanılan 4,5 m çaplı EPB TBM'in bir fotoğrafı Şekil 3'de görülmektedir. Proje'nin güncel ve ortalama ilerleme durumu Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Şekil 1. Güzergâh plani



Şekil 2. Profil kesiti

Şekil 3. Kullanılan EPB TBM

2 TBM KAZISINDA KARŞILAŞILAN ZEMİN KAYNAKLI SORUNLAR VE ÇÖZÜMLERİ

Baltalimanı-Ayazağa TBM tüneli güzergah değişiklik gerekçesi; Avrupa 2. Bölge 2012 yılı 2. Kısım tünel inşaatı kapsamında devam eden (4260 m) Baltalimanı-Cendere tünel inşaatı hattında Km: 3+500 - 3+700 aralığında jeolojik formosyon Kil-Kum-Çakıl-siltli seriler içermekte olup litolojik olarak alüvyon ve yamaç molozu özelliği göstermektedir. Bu lokasyonda ortalama tünel örtü kalınlığı 16-17 m arasında değişmektedir.

Çizelge 1. Aylık bazda TBM ortalama günlük ilerlemeleri

AYLAR	Kazı (m)	Fiili Çalışılan Gün	Fiili Çalışılan Günlük Ort. (m)	Günlük Ortalama (m)	Aylık Ortalama (m)
Haz.14	269	18	15	15	
Tem.14	391	25	16	13	
Ağu.14	584	29	20	19	
Eyl.14	532	28	19	18	
Ekl.14	435	24	18	14	
Kas.14	555	28	20	19	
Ara.14	552	29	19	18	
Oca.15	362	30	12	12	
Şub.15	300	24	13	11	
Mar.15	170	17	10	5	
Nis.15	100	1	100	3	
Tem.15	620	25	25	20	472
Ağu.15	702	28	25	23	
Eyl.15	541	23	24	18	
Ekl.15	225	11	20	7	
Kas.15	602	23	26	20	
Mar.16	562	20	28	18	
Nis.16	424	23	18	14	
May.16	551	28	20	18	
Haz.16	387	28	14	13	
Tem.16	361	27	13	12	
Ağu.16	261	22	12	9	
TOPLAM	9485	511	19	12	

Aynı zamanda bölgenin topoğrafik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda kazı çalışmamız esnasında, alüvyon ve yamaç molozu geçişinde yüzeyde bulunan yapılara, olumsuz jeolojik koşullarında etkisiyle zarar vermemek amacıyla Baltalimanı-Cendere hattı güzergahında bu riski ortadan kaldıracak değişiklik yapılması uygun olacaktır. Tüm tünel hattında bu değişikliklerden dolayı 13 m hat uzunluğu artarak 4244 m olmaktadır (Şekil 4).

Baltalimanı-Galata Atıksu Tünel İnşaatı güzergahında İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve Kağıthane Belediyesi'nden aldığımız jeolojik rapor sondaj logları ve jeolojik profil bilgisi incelemesi ve sahada yaptığımız jeolojik incelemelerden Km 0+550-0+750 aralığında;

1-) Jeolojik formasyon Kil-Kum-Çakıl-Siltli seriler içermekte olup Litolojik olarak alüvyon, yamaç molozu ve dolgu özelliği göstermektedir.

Şekil 4. Baltalimanı-Ayazağa TBM tüneli revize edilen güzergâh değişikliği

2-) Bölge topoğrafik olarak vadi yatağı karakteristik özelliğine sahip olup su akışı ve suya doygun jeolojik formasyon özelliği göstermektedir.

3-) Vadi geçişi ve suya doygunluktan dolayı, zeminin sıvılaşmaya uygun özellik gösterebileceğinden tünel kazısı esnasında su geliri ihtimali yüksektir.

4-) Tünel örtü kalınlığı 17-20 m aralığında değişmektedir.

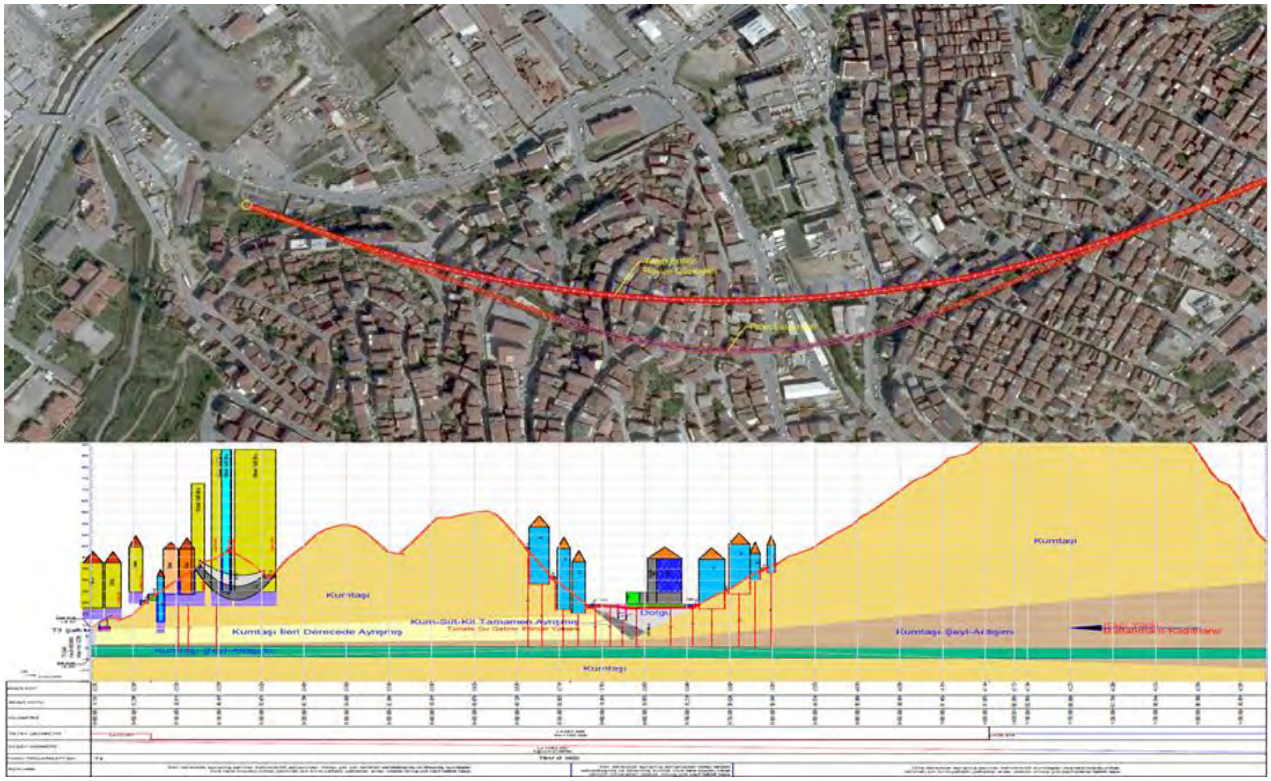
5-) Tünel vadi geçişi hattı boyunca çok sayıda fabrika, konut vs. gibi ve muhtemelen ilgili deprem yönetmeliğinden önce yapılmış eski yapılar mevcuttur.

6-) Tünel kazısı esnasında olası su geliri durumunda, yüzeydeki binalarda oturma ve önlenemeyen deformasyonlar olma ihtimali bulunmaktadır.

7-) Ayrıca alüvyon, yamaç molozu ve dolgu geçişlerinde zeminin sıvılaşmaya yönelik hareket edebilme özelliği gösterebileceğinden, tünel kazısı esnasında yapılara hasar verme ihtimali yüksektir.

Bu durumları göz önüne alındığında kazı çalışmamız esnasında vadi geçişinde bulunan yapılara, olumsuz jeolojik koşullarında etkisi ile zarar vermemek amacıyla, Baltalimanı-Galata hattı güzergahını; üzerinde yapı bulunmayan ve tüm riskleri minimum seviyeye indirerek mevcut güzergahta değişiklik yapılarak revize yapılması uygun olmuştur.

Revize güzergahımızda tüm tünel hattında bu değişikliklerden dolayı 36,61 m hat uzunluğu kısalarak 5239,18 m olmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. Güzergahta vadi içindeki dere yatağı geçişi

Örtü kalınlığının 7-8 m düştüğü bu vadi yatağında yapılan kazı sırasında birimdeki tamamen ayrışmış kum- silt-kil, alüvyon ve dolgu malzemesinden geçilirken TBM kazı ilerlemesi çok kontrollü bir biçimde yapılmıştır. Ring boyunca zeminin duraysızlığından kaynaklı alınabilecek fazla hafriyat miktarı kazı ilerlemesine göre kazı süresince birebir kontrol edilerek fazla hafriyat alınma durumunda yüzeye deformasyon olarak etki etmemesi için kazı çalışmaları bu bölgelerde durdurularak zemine yönelik kimyasal enjeksiyon uygulaması yapılmıştır. Kimyasal enjeksiyon TBM kafa kısmından yerinde tespitler yapılarak delik delinmesi ve zemine boru sürülmesi vasıtası ile basınçlı bir şekilde kimyasal enjeksiyon yapılarak zemin duyarlılığı sağlanmıştır. Gerektiğinde bu uygulama makine ilerlemesine göre yüzeye deformasyon yaptırabilecek bölgelerinde tekrar yapılarak gerek üstyapı gerekse üstyapı olmayan kısımlarda yüzey deformasyonuna izin verilmeyerek bu bölge kontrollü bir şekilde geçilmiştir (Şekil 6).

Şekil 6. TBM güzergahının 15-20 m üstündeki yüksek katlı binalar

3 TBM KESİCİ KAFA ÜZERİNDEN ZEMİNE KİMYASAL ENJEKSİYON HAZIRLIĞI

Kesici kafa açıklıklarından yapılan kimyasal enjeksiyon ile TBM kazı ekseni tavan kısmında stabil bir zemin oluşturulmuştur ve kazı çalışmaları bu şekil devam ettirilmiştir. Enjeksiyon delikleri yaklaşık 10° eğim ile TBM kafa kısmından zemine delik delinmesi sureti ile zemin yapısına göre 2 ile 3 m derinliğe ulaşacak şekilde birer metrelik boruların manşonla birleştirilmesi sonucu zemine sürülmüştür ve TBM'in önündeki 5-6 m'lik kısım basınçlı kimyasal enjeksiyon ile TBM kafa kısmının üzerinden zemin stabilitesi artırılarak güvenli kazı çalışması yapılmıştır. Bu bölgede TBM kazı hızı düşmek ile birlikte üstyapıda bir hasar vermeden ve yüzeyde deformasyon yapılmadan kazı güvenli bir şekilde gerçekleşmiştir (Şekil 7).

Şekil 7. TBM tüneli çimento ve kimyasal enjeksiyon bölgesi

4 ZEMİNDE TÜFLEŞME SEBEBİ İLE KAYNAKLANAN TBM SIKIŞMASI VE GALERİ AÇILMASI

Makinanın tekrar ilerleme yapabilmesi için kuyruk şild arkasındaki ringlerden pencere açılarak sağ ve sol iki taraftan birden TBM kafa kısmına kadar galeri açılarak TBM'in tekrar kazı ilerlemesine başlatılması gerekmiştir. Açılan galerilerdeki kazı aynaları 2,5-3,5 m² alana sahiptir (Şekil 8).

Şekil 8. Sıkışan TBM ile kazı durması sonucu kuyruk şildinin gerisinden galeri penceresi açılması hazırlık aşaması

Galeri kazısında ağaç desteklemelerle, TBM şildi boyunca kesici kafaya kadar sağ ve sol çift taraflı galeriler açıldı. Destekleme aralıkları 40 cm olup, bazı bölgelerde deformasyondan dolayı aralara ilave tahkimat yapılarak galeri güvenliği sağlanmıştır (Şekil 9).

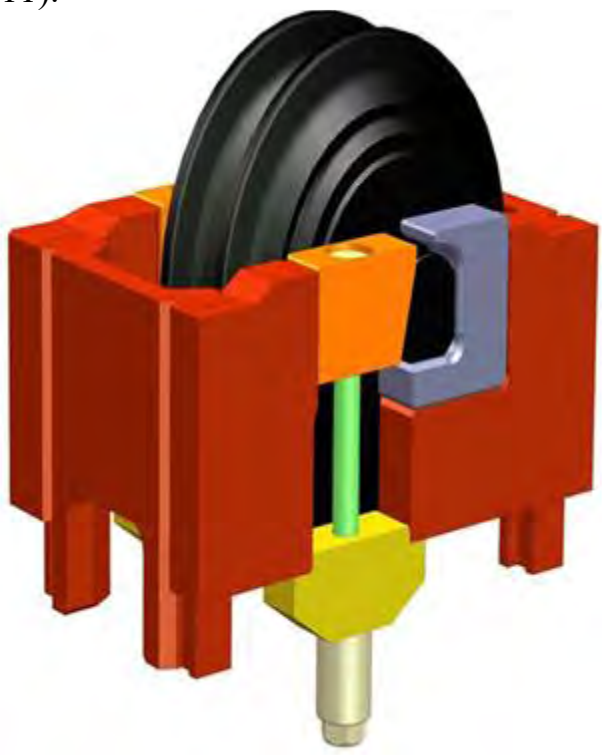
Şekil 9. TBM Kesici kafaya ulaşım kazısı galeri ağaç destekleme

Kazı yönünde fazla hafriyat almadan, zemini sıkıştırarak ilerlemek için TBM kesici kafada hafriyat alım boşlukları daraltıldı (Şekil 10).

Şekil 10. TBM Kesici kafada hafriyat gözlerinin daraltılması

Galeri kazılarında şildi sıkıştıran zemin temizlenip TBM' in üst yarısının sürtünmesiz şekilde hareket etmesi sağlandı.

Özellikle tüfleşmiş formasyon karakteristiği gösteren bölgelerde makinedeki sıkışma kazı süresi boyunca zeminin yaptığı hızlı deformasyona bağlı olarak ve oluşabilecek arıza vs. beklemelerden dolayı orta ve kuyruk şildinde olduğundan kesici kafadaki çevre disk keskilerde dizayn değişikliği yaparak 4 cm'ye kadar yükseltme sonucunda yapılan kazı genişlemesi ile kazı süresi boyunca orta ve kuyruk şildinde oluşabilecek hızlı deformasyon nedeniyle makine sıkışmasının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Fakat oluşabilecek 3-4 saatlik arızalardan dolayı durmalarda bu durum avantajlı olmamış ve tekrar sıkışmayı giderme amaçlı galeri açılmıştır. Bu tip ekstra arızaların olmadığı zamanlarda çevre disk keskiler yükseltilerek kazı çapının genişletilmesi yüksek itme basınçları olmasına rağmen kazı ilerlemesinde başarılı sonuç vermiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Disk dizayn değişikliği

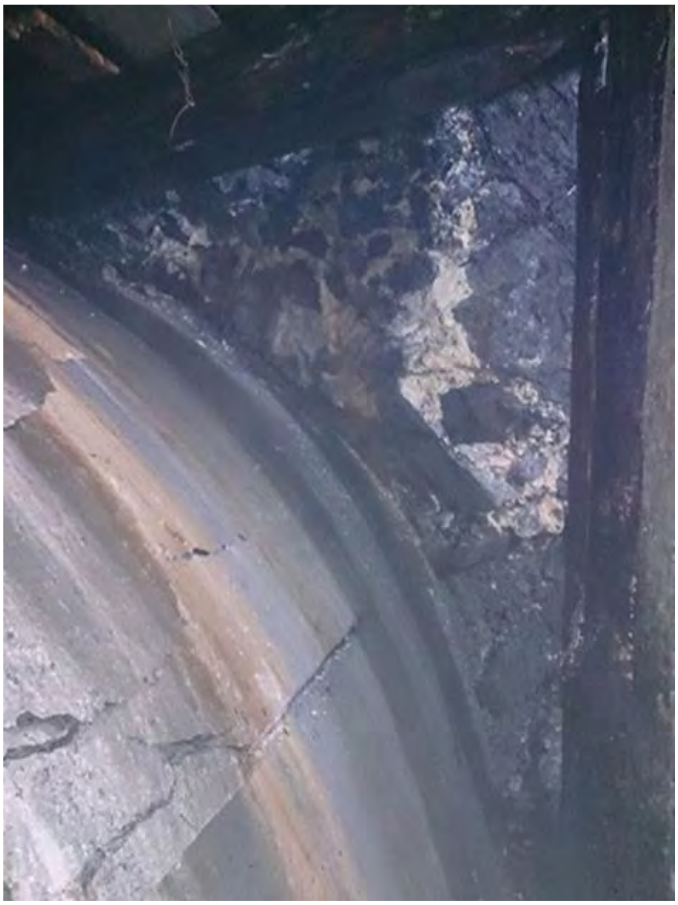
Galeriler açılmadan önce orta ve kuyruk şildlerindeki gözlerden bentonit basılarak TBM kalkanının zeminle sürtünmesini azaltmak hedeflenmiştir (Şekil 12).

Ayrıca TBM kazı ilerlemesine geçtiği sürece sürtünmeyi azaltmak amacıyla şildlerden zemine devamlı olarak bentonit ve kimyasal kayganlaştırıcı enjeksiyon karışımı yapılmıştır. Bu bölgede kesici kafada kazı ilerlemesinde kullanılan kimyasal katkı sürtünmeyi azaltıcı ve kayganlaştırıcı özelliklere sahip tipte seçilmiştir.

Yer yer galeri kazılarında da kesici kafadaki gibi kimyasal enjeksiyon uygulanmıştır (Şekil 13-14).

Şekil 12. TBM orta şildindeki gözlerden bentonit basılması

Şekil 13. Galeriye kimyasal enjeksiyon uygulaması



Şekil 14. Zemindeki boşluk ve çatlakları dolduran kimyasal enjeksiyon

Galeri tamamlandıktan sonra, kazıya başlayıp ringleri döşedikçe, itme basınçlarından dolayı galeri boşluklarına gelen ringlerde kayma ve herhangi bir hareket olmaması için galeri açılan kısımlarda içten ve galerinin boş kalan kısımlarından U profiller ile gerekli görülen karelajda birbirlerine ankraj ederek dividak benzeri bir uygulamayla makinanın ilk hareketinde ringlerde bir deformasyon olmadan kazı ilerlemesi başlatılmıştır (Şekil 15).

Tamamlanan galerilerin pencereleri öncelikle ağaç kütüklerle kapatıldı (Şekil 16).

Böylelikle TBM'in ilk hareketi sırasında piston ayaklarının segment taşları üzerinde yarattığı baskıyı emip, ringlere zarar vermesini engellendi.

Son aşamada ise açtığımız galerileri beton ile doldurarak kapatıldı (Şekil 17).

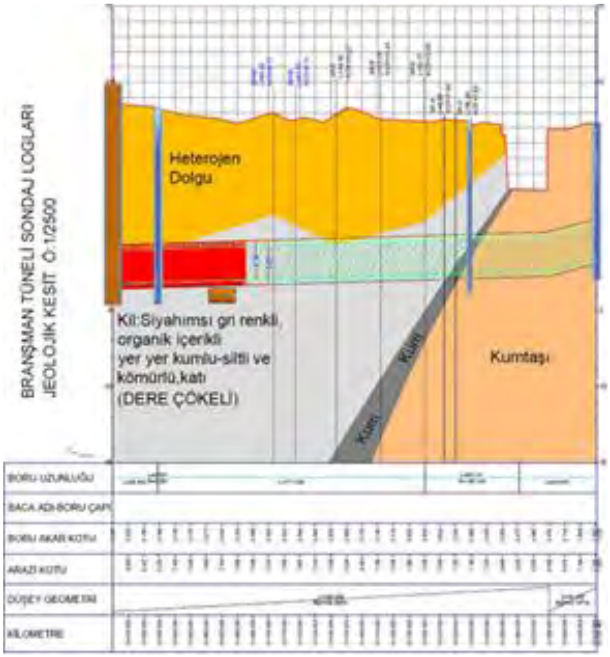
Şekil 15. TBM kesici kafaya ulaşım galerisi tünel içi segment taşını iksa destekleme

Şekil 16. TBM ilk hareketinde piston baskısı için pencere desteklenmesi

Şekil 17. Galerilerin beton ile doldurarak kapatılması

5 KAĞITHANE BRANŞMAN TÜNELİ

Tünel sağ alt bölgesinden metan gazı geliri olduğu gözlenmiştir. Oluşan gazın muhtemel kaynakları %7'ye varan organik madde bozuşması, belirli bir katman olarak belirlenmeyen oluşum sürecindeki kömürlü yapı, üst kısma doldurulan heterojen yapay dolgu malzemesi içeriğindeki organiklerdir (Şekil 18).



Şekil 18. Branşman tüneli jeolojik kesit

Branşman tünelinden çıkan gazın diğer hat ve çalışma bölgelerine yayılmaması için tünel giriş ağzı baca şeklinde kapatılarak gazın şafttan dışarı çıkması yönlendirildi (Şekil 19).

Şekil 19. Tünel giriş ağzının kapatılarak gazın şafttan dışarı ayılması

Bütün tünelde emici ve destek olarak üfleyici havalandırma kullanılmaktadır. Havalandırma sisteminde ortam durumuna göre ayarlama yapılabilmektedir. Tünele 400 m^3/dak hava sağlanmaktadır (Şekil 20).

Şekil 20. Branşman tüneli havalandırma sistemi

Gaz konsantrasyonları vardiya süresince (başında ve sonunda), 1-3 saat aralıklarla ve her önemli çalışma öncesi izlenmektedir. Tünel içerisinde mobil şekilde çalışanların üzerinde sürekli olarak metan dedektörü yer almaktadır. Vardiya süresince iş sağlığı ve güvenliği mühendisi ile vardiya mühendisi çalışmaları gözetlemektedir (Şekil 21).

Şekil 21. Branşman tüneli anlık gaz ölçümü

Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tünelinde Değişen Litolojide TBM Performansının Değerlendirilmesi

Evaluation of TBM Performance in Varying Lithology During Construction of Mahmutbey-Mecidiyekoy Metro

F. Kara, İ.S. Binen
Gülermak – Nurol – Makyol Metro Yapım Ortaklığı

U. Ateş
İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

ÖZET 15 milyonun üzerindeki hızla artan nüfusuyla İstanbul devamlı olarak altyapı yatırımlarına ihtiyaç duymaktadır. Buna bağlı olarak mevcuttaki 145 km'lik metro ağının 2020 sonunda 980 km'ye çıkması için gerekli çalışmalar yürütülmekte fakat yoğun şehirleşme ve karmaşık jeolojik yapı bu yatırımları zorlu hale getirmektedir. Tünel delme makineleri (TBM) karmaşık litolojiye sahip olan bölgelerde kazı yapmanın en hızlı ve güvenli yollarından biri olduğundan, yüklenici firmalar kazılarında TBM tercih etmektedir. Metro ağının genişletilmesi çalışmaları kapsamında TBM kullanılan ve geçtiğimiz yıl tünellerinin kazısı başarı ile tamamlanan projelerden biri de Mecidiyeköy-Mahmutbey Metrosu'dur.

Bu bildiride, proje kapsamında 6,8 km'lik bölümün kazısında kullanılan Terratec marka EPB TBM'in değişen litolojilerdeki kazı performansı analiz edilmiş ve kazı sırasında karşılaşılan problemlerden bahsedilmiştir. Yapılan analizlerde TBM veri kayıt sisteminden elde edilen sayısal veriler, kazı öncesinde yapılan jeolojik/jeoteknik çalışmalar, kazı sırasında alınan kaya ve zemin numuneleri ile TBM vardiya raporları kullanılmıştır.

Pasa basınçlı (EPB) TBM'ler özellikle İstanbul jeolojisine uygun olarak kazı yapmaya elverişlidir. Projede kullanılan TBM'in de pasa basınçlı olarak tercih edilmesi kazılarda kolaylık sağlamış ve daha da önemlisi güvenli çalışma ortamı oluşturarak zemin deformasyonları en düşük düzeyde tutmaya yardımcı olmuştur.

ABSTRACT Istanbul, with its rapidly growing population is in constant need for infrastructure investments. For this reason, the current metro net of 145 km is going to be extended to 980 km by the end of 2020. However, heavy urbanization and complex geological conditions make such investments difficult. Since tunnel boring machines (TBM) are one of the fastest and safest methods in areas where complex lithological conditions are present, contractors usually prefer TBMs for tunnel excavations. Mahmutbey-Mecidiyekoy Metro where tunnel excavations were successfully completed in the last year with the help of TBMs is another project in the scope of metro net extension plans.

In this study, excavation performance of Terratec EPB TBM in varying lithological conditions during the 6.8 km of tunnel excavation were analyzed and problems encountered during the excavations were presented. Records from the TBM data logging system, geological/geotechnical surveys, rock and soil samples taken during the excavations, and shift reports were used in the analyses.

EPB TBMs are especially useful in geological conditions of Istanbul. The EPB TBM selected for the project proved to be useful during the excavations and more importantly helped achieving a safe working environment and keeping surface deformations as small as possible.

1 GİRİŞ

Teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte inşaat ve madencilik sektörlerinde yeraltı yapılarının önemi her geçen gün artmaktadır. Özellikle büyük yerleşim yerlerinde nüfus yoğunluğuna bağlı olarak artan ihtiyaçların karşılanabilmesi için yer altı çalışmaları ayrı bir önem kazanmıştır. Açılan yeraltı boşluklarının çevreye ve yer üstü yapılarına zararlarının azaltılması ise ancak doğru kazı yönteminin seçimi ile mümkündür.

Tünellerde mekanik kazı yöntemleri son yıllarda hızlı bir gelişim göstermektedir. Bunun nedeni, mekanik kazı da kullanılan makinelerden biri olan tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) ile tünel açmanın ve uygun jeolojik koşullarda uzun tünellerin açılmasında en ekonomik yöntem olmasının açıkça görülmesidir. TBM performansını etkileyen en önemli etken olan kayaç ve zeminlerin durumu, özellikleri, kazı sırasında ve sonrasındaki davranışları genellikle ihmal edilmekte ve performans düşüşleri kaçınılmaz olmaktadır. Özellikle yumuşak zeminlerde kazı yapan Pasa Basınçlı (EPB) TBM'lerin performansları zemin koşullandırma sistemleri ve uygulamalarının optimizasyonu ile doğrudan ilintilidir.

Son dönemlerde yaygın bir şekilde mekanik sistemlerle yapılan bu kazı işlerinde, ekonomiklik ön plana çıkmaktadır. Bu çerçevede değerlendirildiğinde kullanılan kazı makinalarının performansları ayrıca önem kazanmaktadır. Farklı formasyon, makina ve çalışma parametrelerine karşı kazı makinalarının tepkilerinin önceden tahmin edilmesi, oldukça maliyetli olan bu kazı işlerinde yol gösterici olabilmektedir. Bu yönde yapılacak çalışmalar, ülkemizde yaygın şekilde gerçekleştirilen metro kazı çalışmalarına ışık tutacaktır.

Gürkan (2011) performans parametrelerinden, zemin koşullandırmasıyla ilgili parametrelerin diğer parametreler ile en çok etkileşim gösterdiğini gözlemiştir. Kuşdili formasyonu, Güngören formasyonu, geçiş zonları ve tüm tünel güzergâh jeolojisinde yapılan gözlemlerde köpük enjeksiyon oranı (FIR) ile penetrasyon oranı değerleri arasında her bir jeolojik formasyonda mükemmel dereceli ilişkiler bulunduğunu ortaya koymuştur. Aynı şekilde, her formasyon için ve tüm tünel güzergâh jeolojisi için yapılan gözlemlerde köpük enjeksiyon oranı (FIR) ile 1 mm'lik penetrasyon için gerekli olan baskı kuvveti arasında her bir jeolojik formasyonda mükemmel dereceli ilişkiler görüldüğünü ortaya koymuştur. Yine buna benzer bir başka çalışmada, Öz (2012) Kadıköy Kartal Metro Tüneli güzergâhında hat boyunca belirli aralıklarla alınan kayaç numuneleri üzerinde yapılmış tek eksenli basma dayanımı ve zemin numuneleri deney sonuçlarının, makine itme kuvveti, tork, penetrasyon indeksi değerleri, ilerleme miktarı, kesici kafa dönme sayısı parametrelerine etkileri araştırmış, belirli bir aralık ile kazı ilerleme ve makine kayıtlarına ait nihai parametreler arasındaki ilişkileri incelemiştir. Buna ek olarak, tam boyutlu kesme deneyleri ile bazı tasarım parametrelerinin ve performans tahminlerinin yapılabilirliği incelenmiş, bu incelemelerin tamamlanan kazı ilerlemeleri ile bağlantıları araştırılmış ve yorumlanmıştır. Avunduk (2011) yaptığı çalışmada zor zemin şartlarının pasa basınçlı (EPB) TBM'in performansına etkilerini araştırmıştır. Stabilite problemleri yaşanabilecek bölgeler için TBM karşı ayna basıncı hesaplamaları yapılmıştır. Güzergâhtan geçiş sırasında karşılaşılan problemler kaydedilmiştir ve TBM veri toplama sisteminde kaydedilen raporlar incelenip her bir ring için ölçülen tork, baskı (itme) kuvveti, net kazı hızı ve tünel aynasına gelen arazi basınçları irdelenmiştir. Tokgöz vd. (2015), TBM ilerleme hızı ile TBM parametreleri ve zemine ait parametrelerin değişimini çoklu regresyon analizi kullanarak modellemiştir. Kil kazılarında kilin kıvam limitlerinin ve özellikle Plastisite İndisinin (PI) ilerleme hızları üzerinde etkili olduğunu raporlamıştır.

2 PROJE ÖZELLİKLERİ

Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Projesi Şişli ilçesine bağlı Mecidiyeköy semti ile Bağcılar ilçesine bağlı Mahmutbey semti arasında planlanmıştır. Şişli, Kağıthane, Eyüp, Gaziosmanpaşa, Esenler ve Bağcılar ilçelerini kat edecek olan metro hattı, çift tüp halinde

olmak üzere yaklaşık 17 km tünel (toplam 34 km) ve 15 adet istasyondan oluşmaktadır (Şek. 1). Metro hattının önemli kısmı, yeraltı tünelleri, Kağıthane ve Alibeyköy dere geçişleri ise viyadük şeklinde planlanmıştır.

Şekil 1. Proje haritası

Öte yandan, delme tünellerin yaklaşık olarak yarısı (Veysel Karani ile Mahmutbey İstasyonları arası) tünel açma makinalarıyla (EPB TBM), diğer kısmının (Mecidiyeköy ile Veysel Karani İstasyonları arası) ise Yeni Avusturya Metodu (NATM) ile açılması planlanmıştır. Projede 3 farklı marka EPB tip TBM kullanılmaktadır. Bunlardan Lovat ve Herrenknecht marka TBM'ler (Şek. 2) Yenimahalle İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu arasında tek hat, Terratec marka TBM (Şek. 3) ise Yenimahalle İstasyonu ile Veysel Karani istasyonu arasında çift hat halinde kazı yapmıştır. Terratec marka TBM daha sonra diğer hatların kazısında yaşanan sorunlar nedeniyle Mahmutbey – Yenimahalle arasında da kazı yapmıştır.

Şekil 2. Lovat S2 (Sol) ve Herrenknecht S325 (Sağ)

Şekil 3. Terratec S42

Bu çalışma kapsamında yalnızca Terratec marka EPB TBM'in Yenimahalle-Veysel Karani İstasyonları arasında yaptığı kazılar incelenmiştir.

Projede kullanılan TBM'lerin hepsi aynı çapta ve benzer özelliklerde olsalar da belli başlı farklılıklar söz konusudur. Çizelge 1'de üç TBM'in başlıca teknik özellikleri verilmiştir.

3 BÖLGENİN JEOLOJİSİ

İstanbul kenti ve yakın çevresi; çok faylı, kıvrımlı ve bindirmeli Paleozoyik, Mesozoyik kaya birimleri ile bunlar üzerinde yer alan düzensiz Tersiyer çökellerinden oluşur.

Mahmutbey-Mecidiyeköy metro tünelleri güzergahının Yenimahalle-Veysel Karani arası kesimi, yüksek dayanımlı kumtaşı içeren Trakya Formasyonu (Ct_1) ile başlamakta ve daha düşük dayanıma sahip Trakya Formasyonu (Ct_2) ile devam etmektedir.

Bu formasyonları takiben yüksek kum içeriğine sahip Çekmece formasyonunun Çukurçeşme üyesi (Tçç) ile devam ederek ardından tekrar kısa mesafeli Trakya (Ct_3) formasyonundan geçtikten sonra silt ve kil içeren Çekmece formasyonunun Güngören üyesi (Tçg) ile devam edip Trakya (Ct_3) formasyonu ile sonlanmaktadır.

Hat 1 ve hat 2 jeolojik olarak birbirine çok benzer olmakla birlikte, hat 2'nin başlangıç bölümündeki Trakya formasyonunun (Ct_1) dayanımı hat 1'dekine oranla daha düşüktür ve bu bölüm daha kısadır.

Güzergâh boyunca tünel kazı kotunda yer alan kaya ve zemin birimleri Çizelge 2'de verilmiştir. Analizlerin ve hesaplamaların daha kolay yapılabilmesi amacıyla benzer özellikteki formasyonlar gruplandırılmıştır.

Çizelge 1. TBM'lerin genel özellikleri

TBM Markası	Terratec	Lovat	Herrenknecht
Çap	6,56 m	6,57 m	6,55 m
İtme Kuvveti	40000 kN	55000 kN	32000 kN
Tork	5440 kNm	4500 kNm	4400 kNm
Disk Sayısı Ve Çapı	43 x 17"	35 x 15,5", 7 x 16,5"	41 x 17"
Kesici Kafa Motorları	6 x VFD (Elektrikli)	8 x Hidrolik	8 x Hidrolik
Kesici Kafa Hızı	0-3 RPM	0-4 RPM	0-3,8 RPM
Elektrik Gerilimi	10000 V	6000 V	11000 V

Çizelge 2. Hat üzerinde yer alan formasyonlar

Yaklaşık Başlangıç Km.	Yaklaşık Bitiş Km.	Formasyon (Üye)	Sembol	Litoloji
10+540	12+500	Trakya	Ct_3	Kumtaşı- Şeyl (Silttaşı, Kiltaşı, Kumtaşı Ardalanması), Yer yer kumtaşı Baskın
12+500	13+500	Çekmece, (Güngören)	Tçg	Ağırlıklı olarak kil, siltli kil ve killi silt, üst seviyeleri yer yer kumlu. Kiltaşı, Silttaşı ve kumtaşı ara seviyeli
13+500	13+760	Trakya	Ct_3	Kumtaşı – şeyl (Silttaşı, Kiltaşı, Kumtaşı Ardalanması)
13+760	14+150	Çekmece, (Çukurçeşme)	Tçç	Kum, siltli kum, yer yer kil katkılı. Yer yer çakıl ara seviyeli. Kısmen pekişmiş.
14+800	14+150	Trakya	Ct_2	Silttaşı, kiltaşı, kumtaşı ardalanması
15+150	14+800	Trakya	Ct_1	Kumtaşı

Trakya formasyonu, esas olarak silttaşı (çamurtaşı), kumtaşı ve kiltaşı tabakalarının ardalanmasından oluşmaktadır. Bazı araştırmacılar tarafından kumtaşı – şeyl ardalanması olarak isimlendirir. Yine bazı araştırmacılar "silttaşı" terimi yerine, "çamurtaşı" terimini kullanmayı tercih etmişlerdir.

Birimin ilksel rengi açık – koyu gri arasında değişim gösterir. Çok ayrışmış kesimlerde hakim renk sarı, kahverengi; orta derecede ayrışmış kesimlerde sarımsı gri, zeytin yeşili, boz; az ayrışmış kesimlerde ise gri, açık gri ve koyu gri renklidir. Ayrışma genel olarak derinlik yönünde azalır. Ancak birimi kesen fay ve makaslama (paralanma) zonları ile volkanik dayk sınırlarında derinliğe bağlı olmaksızın ileri derecede ayrışmış seviyeler ile nadir de olsa karşılaşılmıştır.

Kumtaşı seviyeleri orta – kalın tabakalı, sert, orta sert, genellikle orta-ince taneli, kötü boylanmış, bol mika, kuvars ve kayaç kırıntılarından oluşur. Taneler demirli ve silisli çimento ile bağlanmıştır. Çok ayrışmış kesimleri sarı, orta ayrışmış kesimleri boz, sarımsı boz ve ayrışmamış kesimlerde açık gri, mavimsi gri renklidir. Silttaşı seviyeleri genellikle ince – orta tabakalı, ayrışmamış halde gri – koyu gri renkli, orta derecede ayrışmış kesimlerde zeytin yeşili, grimsi sarı veya sarımsı gri, çok ayrışmış kesimlerde ise sarı, kahve renklidir. Kiltaşı seviyeleri, genellikle ince tabakalı, ayrışmamış halde koyu gri, orta düzeyde ayrıştığı kesimlerde

zeytin yeşili-sarımsı gri, çok ayrıştığı kesimlerde ise sarı – kahve renklidir.

Çekmece formasyonu kil – kiltaşı seviyeleri (Güngören üyesi, Tçg) ve kum – kumtaşı seviyeleri (Çukurçeşme üyesi, Tçç) olmak üzere iki kısım halindedir. Bu birimler dışında yüzeyde önemsiz kalınlıkta alüvyal çökeller ve yapay dolgular bulunur.

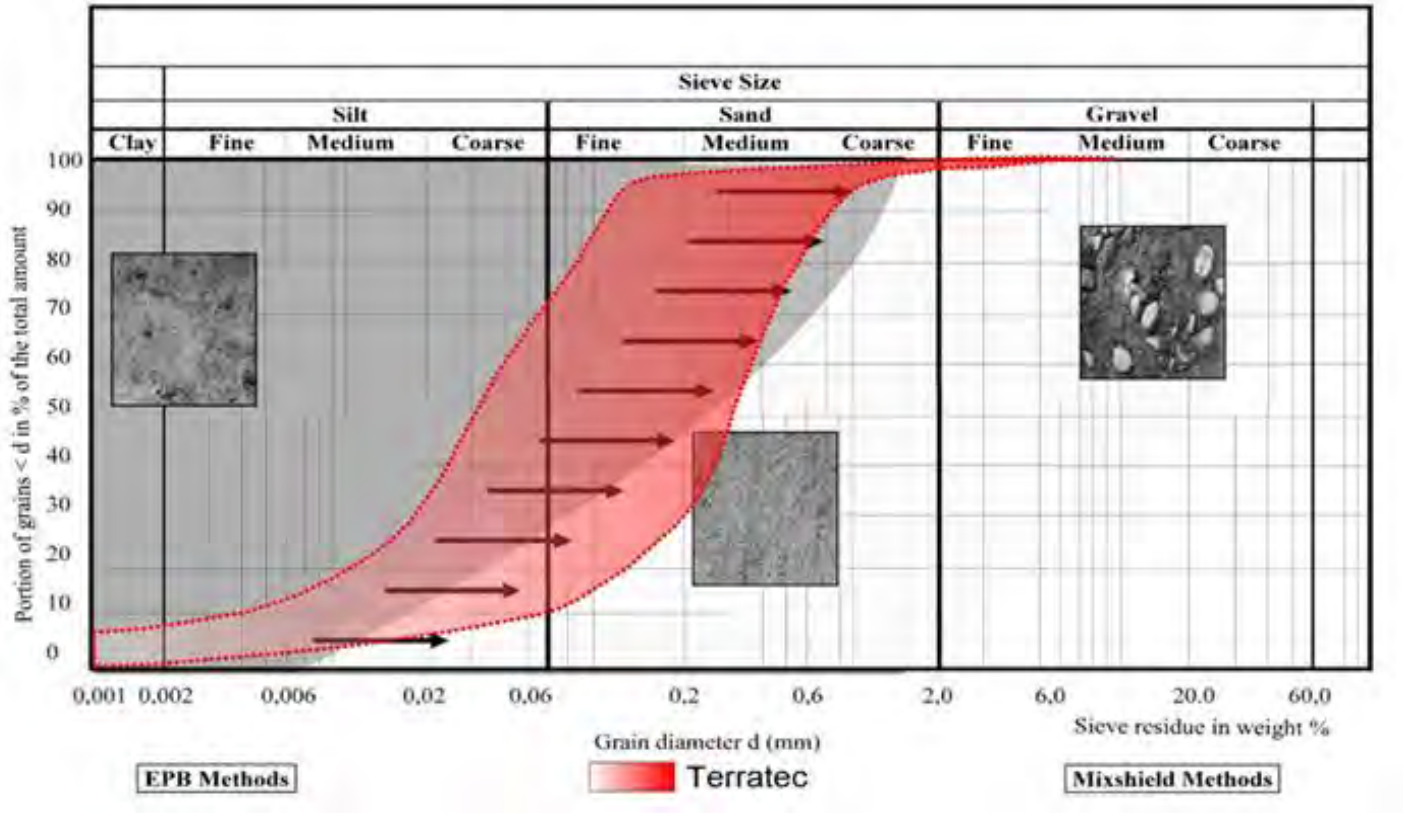
Güngören üyesi, üstte sarı, sarımsı açık kahve, bazen bej, yeşilimsi sarı renkli, kil, siltli kil, kum ve bunların pekişmiş (kiltaşı, siltli kiltaşı) hallerinden oluşmaktadır.

Orta kesimde organik malzeme bakımından zengin, gri – koyu gri renkli, bitki kalıntıları ve turba katkıları ihtiva eden kil ve siltli killer (bazen kum katkılı killi siltler), alt kesimde ise yeşilimsi, sarımsı kahve, grimsi sarı renkli kil ve siltli killerden oluşur. Genel olarak sert kil veya yumuşak kaya (kiltaşı – siltaşı) niteliğindedir. Güngören üyesi, yanal (tünel ilerleme yönünde) ve düşey yönde tedrici olarak Çukurçeşme üyesine geçer.

Bu birim, bazı kısımlarının yaygın şekilde bitkisel gereç ve ince turba seviyeleri içermesi dolayısı ile bazı araştırmacılar tarafından Gürpınar üyesine dahil edilmektedir. Bu nedenle bazı sondaj loglarında formasyon ismi olarak Gürpınar kullanılmıştır. Ancak birimin tümü ile Güngören veya eşdeğeri bir çökel olduğu düşünülmektedir.

Çukurçeşme üyesi ise sarı renkli, sıkı yerleşmiş, ince – orta taneli, mika pullu kum ve siltli kumlar ile bunlarla ardalanan pekişmiş haldeki kumtaşı, silttaşı seviyelerinden oluşur. Yer yer çakıl ve çakıllı kum ara seviyeler bulundurur. Tabanında yaygın olarak, Trakya formasyonuna ait orta taneli çakıl boyutunda tamamen köşeli grovak katkıları bulunur. Bu formasyon içerdiği yüksek kum miktarı ile EPB TBM'ler için zorlayıcı olabilmektedir ve EBP TBM'ler için kazı yapılabilir limitlerin sınırında yer almaktadır. Şekil 4'de Çukurçeşme formasyonunun elek analizi ile tane boyutuna göre tavsiye edilen TBM türleri gösterilmektedir.

Yukarıda belirtildiği üzere kaya birimi genel olarak kiltaşı-silttaşı-kumtaşı ardalanması şeklindedir. Bununla birlikte yer yer bu litolojilerden herhangi birinin baskın litolojiyi oluşturduğu kesimler vardır. Formasyonların güzergâh üzerindeki yüzdelik dağılımı Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Zemin tane boyut dağılımına göre tavsiye edilen TBM türü

Şekil 5. Formasyonların yüzde dağılımları

4 TBM PERFORMANS ANALİZİ

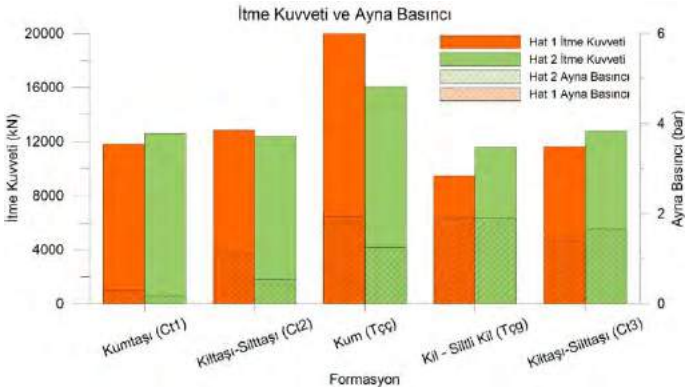
Bu çalışmada kazı parametrelerinden itme kuvveti, tork, penetrasyon, köpük tüketim miktarı, kesici kafa hızı, ayna basıncı ve spesifik enerji değişen litoloji ile değerlendirilerek grafiklerle açıklanmıştır. Değerlendirmeler, iki hat kazıları için de yapılmıştır.

Bu bildiride incelenmekte olan TBM, proje süresince en uzun mesafeyi kat eden TBM olmuş ve 6877 metre kazı yapmıştır. TBM'in aylık ortalama ilerleme hızı 220.4m, en iyi aylık kazı performansı ise 532 metredir (Binen vd., 2018).

4.1 İtme Kuvveti

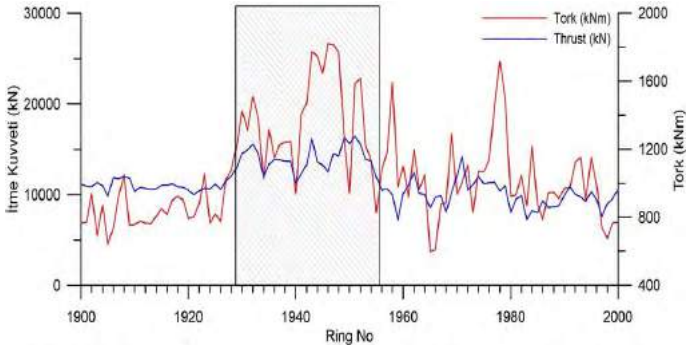
TBM'in itme kuvvetinin değişimleri her bir formasyon için ayrı ayrı incelenmiş ve ortalama itme kuvvetinin formasyona bağlı değişimi Şekil 6'da verilmiştir.

Trakya formasyonundaki (Ct) itme kuvveti değerleri birbirine yakın görünse de uygulanan ayna basınçları farklıdır ve kaya kesme amacıyla harcanılan itme kuvvetinin hesabında ayna basınçları dikkate alınmalıdır. Ct_2 ve Ct_3 birimlerindeki ayna basıncı ortalama 1.15 bar, ayna basıncının yenme amacıyla gereken itme kuvveti miktarı yaklaşık olarak 3800 kN, Ct_1 biriminde ise ortalama ayna basıncı 0.23 bar, ayna basıncını yenmek için gereken itme kuvveti miktarı yaklaşık olarak 750 kN'dur. Bu sonuçlar dikkate alındığında beklendiği gibi kumtaşı formasyonunda kaya kesme amacıyla harcanılan itme kuvveti yüksek iken, kiltaşı-silttaşı ağırlıklı birimlerde, kaya kesme amacıyla harcanılan itme kuvveti daha düşüktür.



Şekil 6. İtme kuvvetinin formasyona göre değişimi

İtme kuvveti en yüksek değerine, yüksek miktarda kum içeren Çukurçeşme formasyonunda çıktığı görülmektedir. Kum gibi kohezyonsuz ve geçirimli bir litolojide hava ve köpük kum taneleri arasından kolaylıkla sızabildiğinden ayna basıncını stabil hale getirmek ve korumak zordur. EPB makinelerin suya doygun kum ortamında kazıya çok elverişli olmadığı gerçeği dikkate alındığında, yüksek ayna basınçlarıyla kazı yapma gereksinimi doğmaktadır. Hattın bu bölümü pasa ve çamur basınçlı TBM'ler arasındaki geçiş bölgesinde yer almaktadır (Şekil 4). Aynı zamanda Ramoni (2010), kumun sürtünme katsayısının kile ve silte oranla daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Kohezyonsuz yapısından ötürü stabil olmayan zeminlerin özellikle uzun duruşlardan sonra sıkışmalara sebep olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Tüm bu faktörler TBM'in itme kuvveti ve tork kapasitesi gereksinimlerini artıran faktörlerdir (Ateş vd., 2016). Ayrıca hat 1 ile hat 2 arasında, itme kuvveti değerlerinde belirgin fark olan tek yer bu formasyondur, bunun nedeni hat 2'de kum miktarı yüksek olan bölgenin daha kısa oluşudur. İkinci hatta bu formasyonun silt içeriği daha fazla olarak gözlenmiştir.



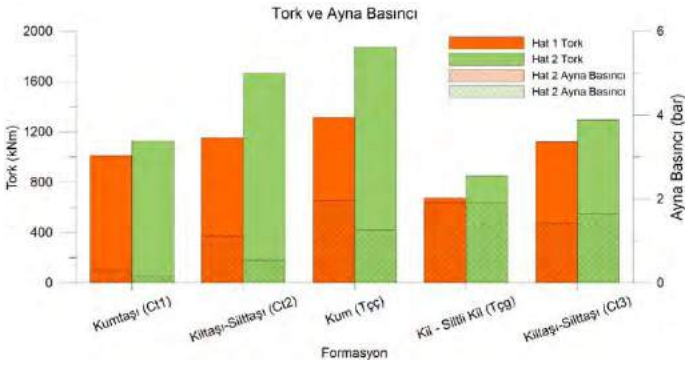
Şekil 7. 1920-1960 No'lu ringler arasında itme kuvveti ve tork trendleri

Hat 1'de 1930-1950. ringler arasında geçilen (Şekil 7), geçilen formasyon değişimi ve fay zonundaki itme değeri incelendiğinde yakın zonlarda ortalama 10000-12000 kN arasında değişen itme kuvveti değerlerinin bu bölgede 13000-15000 kN'a çıktığı gözlenmiştir, benzer şekilde kesici kafa tork değerlerinde artış olmuştur. Bu da fay zonlarında tünel açma makinaları üzerindeki etkisi ve kazı esnasında daha dikkatli kullanılması gerektiğini göstermektedir. Fay zonu gibi tünel açma makinasını etkileyecek bölgelerde sıkışmayı önlemek için gerekli tedbirler önceden alınmalı, kazı esnasında TBM'in tepkilerine göre hareket edilmelidir. Bilgin ve Ateş (2016) vaka çalışmalarından yola çıkarak faylı bölgelerde sıkışmaların önüne geçmek için şemsiye kemer uygulamasının önemini belirtmiştir.

Çekmece-Güngören (Tçg) formasyonunda ise itme kuvveti değerleri zemindeki kilin sertliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu bölgede sert kilde tünel açma makinasının itme kuvveti değerinin daha yüksek, ilerleme hızının nispeten daha yavaş yumuşak kile oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. TBM kaydedilen en yüksek itme kuvveti değeri olan 30MN'a hat 1'de kum içeren Güngören formasyonundan geçerken ulaşmıştır ve bu değer toplam itme kuvveti kapasitesinin %75'idir.

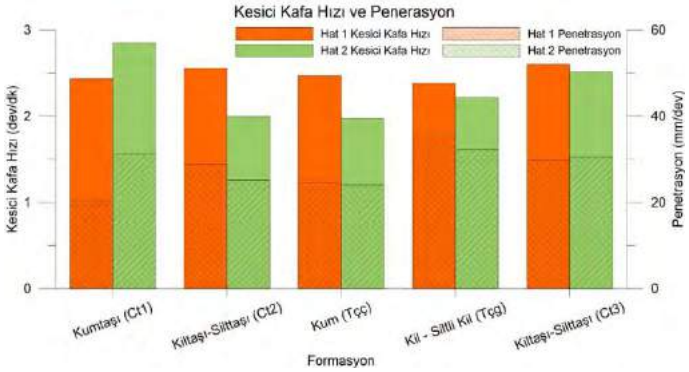
4.2 Kesici Kafa Hızı ve Penetrasyon

Formasyonlara göre ortalama tork, kesici kafa hızı ve penetrasyon değerlerindeki değişimler Şekil 8-9'da görülebilmektedir. Kesici kafa torku en yüksek değerlere beklendiği gibi kumlu brimlerden oluşan Çukurçeşme (Tçç) formasyonunn kazısı sırasında ulaşmıştır. Torkun en düşük, penetrasyonun ise en yüksek olduğu bölüm ise kil ve siltli kilden oluşan Güngören (Tçg) formasyonudur. Penetrasyonun en düşük değere sahip olduğu birim hat 1'de bulunan Trakya formasyonunun dayanımı oldukça yüksek, 150 MPa'a kadar, kumtaşı içeren (Ct_1) bölümü olmuştur.



Şekil 8. Formasyonlara göre tork ve ayna basıncının değişimi

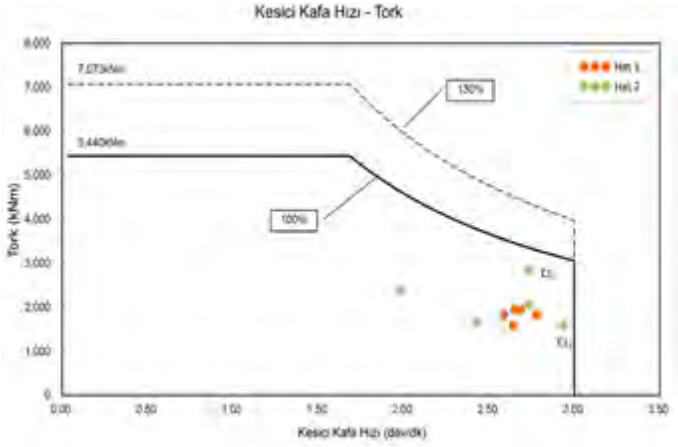
Şekil 8'de dikkat çeken ikinci hattaki yüksek tork değerlerinin en önemli nedeni ikinci hattın kazısında kiltaşı-silttaşı (Ct_2) ve Çukurçeşme (Tçç) formasyonlarının kazısı sırasında, makinede oluşan mekanik arızadır. Belirtilen iki birim haricinde tork miktarları genellikle birbirine yakın olmakla birlikte ikinci hatta %10-15 oranında daha yüksektir. Bunun nedeni ilk hattın kazısı sırasında zeminin ve kayanın örselenmesi olarak gösterilebilir (Bilgin vd., 2018).



Şekil 9. Formasyonlara göre kesici kafa hızı ve penetrasyonun değişimi

Hat 1 ve hat 2 incelendiğinde penetrasyon miktarlarının Trakya formasyonu hariç birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu bölgede tork değerlerinin farklı olmasının nedeni iki hat arasında kaya dayanımlarının

farklı oluşudur. Şekil 10 TBM'in kesici kafa hızı ve torku arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Proje boyunca ihtiyaç duyulan tork miktarı limitlerin altında kaldığı görülmektedir. En yüksek tork ihtiyacı ikinci hattın Trakya formasyonunun kazısı sırasında görülmüş, kazı yapılan kesici kafa hızında makine kapasitesinin %90'ına ulaşmıştır. Kesici kafa hızı ise proje boyunca izin verilen üst limitlerde kalmıştır.



Şekil 10. Kesici kafa hızı – tork grafiği

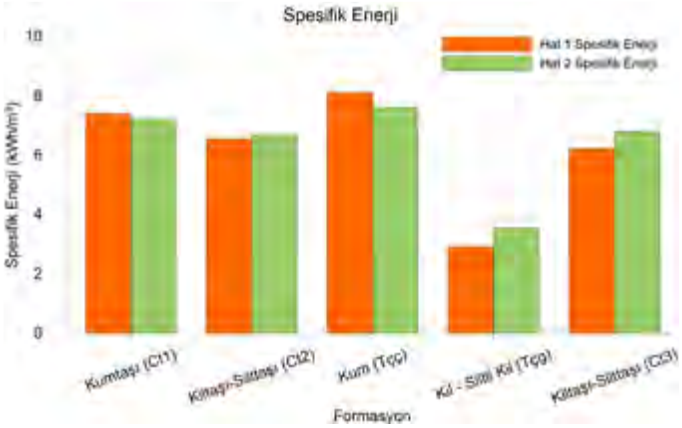
4.3 Ayna Basıncı EPB

İki hattın ayna basınç değerlerinin ortalaması alındığında, ayna basınçlarının en yüksek değerleri olan 2 bara, Güngören (Tçg) formasyonunun kazısı sırasında çıktığı görülmektedir. Bu formasyonu ise Çukurçeşme (Tçç) formasyonu izlemektedir. Kumlu formasyonlarda EPB TBM'ler ile kazı sırasında yüzey deformasyonları ile ilgili daha büyük problemler yaşanabilse de, bu tür geçirgen formasyonlarda ayna basıncının stabil şekilde tutulması oldukça zor olmaktadır.

Trakya formasyonunun yüksek dayanıma sahip olan kumtaşı içeren bölümünde ise ayna stabilitesi ile ilgili sorun yaşanmadığından ayna basıncı oldukça düşük tutulmuştur.

4.4 Enerji Tüketimi

Şekil 11'de görüldüğü gibi birim hacim kazı yapılması için en yüksek enerji beklenildiği gibi EPB TBM'lerin kazı yapmasına uygun olmayan Çukurçeşme (Tçç) formasyonunda harcanmış, en düşük enerji ise Güngören (Tçg) formasyonunda harcanmıştır.

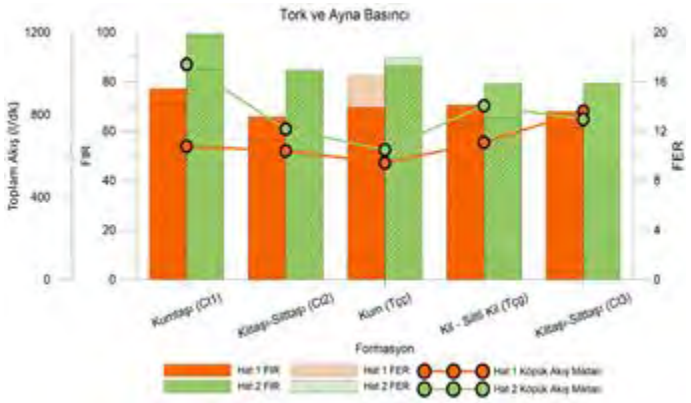


Şekil 11. Formasyonlara göre spesifik enerjinin değişimi

4.5 Köpük Tüketimi

Killi zeminde ilerleyen TBM'lerde kilin şişerek yapışkan hale gelmesi, topaklanarak blokajlara neden olması, kesici kafanın açıklıklarını ve helezon konveyörden geçişi zorlaştırması nedeniyle problemler oluşmaktadır. Bu tür sorunlar makinenin durdurulmasına ve temizlik bakım onarım gibi nedenlerle projenin de durmasına neden olmaktadır. Bir başka sorun ise pasa basınçlı TBM'ler için ideal kıvam olan plastik kıvam özelliğine pasanın her zaman sahip olamamasıdır. Bu durumda basınç değişimlerine, pasanın rahat ilerletilememesine ve yine topaklanma ve yapışma problemlerine yol açılacaktır (Aksu, 2010).

Özellikle kil zeminlerde zemin şartlandırılmasının doğru şekilde yapılması bu tür zaman ve iş kaybını önlemede yardımcı olacaktır. Kil'in geçirgenliği kumtaşına ya da silttaşına göre çok daha az olduğunu düşünürsek köpük sarfiyatı da doğru orantılı olarak kil zeminlerde daha fazla olacaktır. Şekil 12'de formasyonlara göre ortalama toplam köpük tüketimi değerleri görülmekte ve yukarıda bahsedilen önermelerle örtüşmektedir.



Şekil 12. Formasyonlara göre zemin koşullandırma parametrelerinin değişimi

5 SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, Terratec TBM'in yapmış olduğu Yenimahalle-Veysel Karani istasyonları arasında TBM parametreleri formasyona bağlı olarak analiz edilmiştir. Trakya, Güngören, Çukurçeşme formasyonlarından geçen Terratec TBM için itme kuvveti, tork, penetrasyon, köpük tüketim miktarı, kesici kafa hızı, ayna basıncı ve spesifik enerji parametreleri analiz edilmiştir. Kil, kum, silttaşı, kumtaşı gibi birimlerin kazısı sırasında elde edilen veriler ayrı ayrı incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Projede kullanılan TBM tünellerin kazısını başarıyla tamamlamış olsa da geçilen formasyonlar arasında bulunan ve yüksek miktarda kum içeren Çukurçeşme formasyonu EPB TBM'ler için oldukça zorlayıcı bir formasyon olmuştur. TBM en yüksek ortalama tork ve itme kuvveti değerlerine bu formasyondan geçerken ulaşmıştır. Bu tür TBM'ler için en uygun formasyon ise kil ve silt içeren Güngören formasyonu olmakla birlikte ortalama olarak en düşük tork ve itme kuvveti değerlerine bu formasyonun kazısı sırasında ulaşılmıştır. Ayrıca spesifik enerji de Güngören formasyonunda en düşük seviyededir.

TBM'in tork ve itme kuvveti kapasitesinin ihtiyaç duyulanın üzerinde olduğu görülmüştür, yapılan kazılarda maksimum tork kapasitesi olan 5,4 MNm'nin %60'ına, maksimum itme kuvveti kapasitesi olan 40 MN'un ise %75'ine ulaşılmıştır. Bunlara ek olarak TBM'in maksimum kesici kafa hızı olan 3 devir/dk'ya oldukça yakın kullanıldığı görülmüştür. Yüksek kesici kafa hızındaki maksimum torkun ise %90'ına yapılan kazılar sırasında ulaşılmıştır. Bu veriler, kazı sırasında geçilen formasyonlara ait veriler ile birlikte yorumlandığında TBM seçiminin doğru yapıldığı, kazılar sırasında limitleyici faktörün kesici kafa hızı olduğu görülmektedir.

İstanbul ve özellikle Avrupa Yakası gibi karmaşık ve değişken bir jeoloji içeren şehirlerde TBM ile tünel kazılarının sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi, proje maliyetlerinin düşürülmesi, imalat hızlarının artırılabilmesi için TBM performansı ile jeolojik koşullar arasındaki ilişkinin anlaşılması önem arz etmektedir. Böylelikle makine seçim ve tasarım aşamasından tünel kazılarının tamamlanmasına kadar geçecek olan süreçte doğruluğu yüksek kestirimlerin yapılabilmesi mümkün olmaktadır. Bunlara ek olarak TBM'lerin birden fazla projede kullanımı ile proje ilk yatırım maliyetleri azaltılabilmektedir. Hat güzergahında yer alan jeolojik koşullar ve makine-zemin uyumluluğunun sağlanması bu tip karar alma mekanizmalarında da önemli birer faktördür. Makine performansının jeolojiye bağlı olarak değerlendirilmesi ve bu çalışmada da yer alan benzer geri analiz yöntemlerinin kullanılması yukarıda bahsedilen karar alma süreçlerine ışık tutmaktadır.

KAYNAKLAR

Aksu, F. 2010. Zemin şartlandırmanın pasa basınçlı (EPB) TBM'in performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2010.

Ates, U., Binen, I.S., Acun, S., Murteza, M., Celik, Y. 2016. EPB tunneling challenges in sandy ground. 2nd International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds, Istanbul, 16–18 November.

Avunduk, E. 2011. Kadıköy-Kartal metrosunda zor jeolojik koşullarda kullanılan EPB-TBM'in performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2011.

Bilgin, N., Ates, U. 2016. Probe drilling ahead of two TBMs in difficult ground conditions in Turkey, Rock Mechanics and Rock Engineering 49 (7), 2763-2772.

Bilgin, N., Acun, S., Korkmaz, O., Murteza, M., Celik, Y. 2018. The effects of TBM operational parameters on excavation performances in complex geology when driving twin tunnels in Istanbul. World Tunnel Congress, Dubai, pp. 3235-3248.

Binen, I.S., Ates, U., Acun, S., Copur, H., Celik, Y. 2018. Effects of cutter types on cutter consumption and TBM Performance in different and complex geological conditions. World Tunnel Congress, Dubai, pp. 3235-3248.

Gürkan, B. 2011. İSKİ Avrupa 2. Kısım Yenikapı Atıksu Tünelinde Kullanılan EPB TBM'in S6-S7 kuyuları arasındaki performansının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul teknik Üniversitesi, İstanbul, 2011.

Ramoni, M. 2010. On the feasibility of TBM drives in squeezing ground and the risk of shield jamming. (Doctoral dissertation), ETH, Zürich, Switzerland, pp. 212.

Tokgoz, N., Binen, I.S., Avunduk, E. 2015. An evaluation of fine grained sedimentary materials in terms of geotechnical parameters which define and control excavation performance of EPB TBM's. Tunneling and Underground Space Technology 47: 211–221.

Öz, A. 2012. İstanbul-Kadıköy Kartal metro tünelinde kullanılan tünel açma makinesinde (TBM) kazı performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2012.

EPB TBM Tunneling through Challenging Ground Conditions: a Case Study in the Ataköy – İkitelli Subway Tunnel, Turkey

Zorlu Zemin Şartlarında EPB TBM Tünelciliği: Ataköy – İkitelli Metro Tünelinde Örnek Bir Çalışma, Türkiye

H.A. Yazıcı, T. İlkdoğan, V. Kuruyer, K. Yavuz, İ. İçöz, B. Özkaya, U. Çalışkan
Aga Enerji Corp., Istanbul

O. İnal, D. Tumaç
Istanbul Technical University, Faculty of Mines, Istanbul

ÖZET Bu çalışmada, Aga Enerji firmasının Ataköy-İkitelli metro tüneli projesinde ters istikametlere doğru kazı yapan iki tane EPB TBM'in karşılaştığı jeolojik zorluklara ve makine performansı üzerindeki etkilerine değinilmiştir. Bir numaralı TBM'in Güngören kili kazısı sırasında zorlu zemin koşullarıyla karşılaşılmıştır. Suyun etkisiyle kil disk kesicileri tıkamış ve bu durumun TBM performans parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna ek olarak, iki nolu TBM'in kazısı sırasında karşılaşılan kireçtaşı ve kuvarsça zengin kaya numuneleri üzerinde nokta yükleme ve Cerchar aşındırıcılık deneyleri yapılmıştır. Böylece, toplam disk keski aşınma miktarları değişen jeolojik koşullar dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

ABSTRACT In this study, encountered geological challenges in the Ataköy-İkitelli subway tunnel project of Aga Enerji company and their effects on the performance of two EPB TBMs excavating in opposite directions are addressed. Unfavorable ground conditions were faced during the excavation of TBM-1 in Güngören clay. Clayey ground causes clogging of disc cutters with the effect of water, and this results in a dramatic decrease of advance speed. In addition, point-load and cerchar abrasivity tests were carried out on limestone and quartz-rich rock samples, which were taken from the TBM-2 alignment. Thus, the total number of disc cutter consumption is evaluated by taking various geological conditions into consideration.

1 INTRODUCTION

There is a rapid increase in the number of tunnel constructions in Istanbul. The current length of metro lines is around 150 km, and local authorities aim to increase it up to 480 km until 2019, and 1100 km thereafter.

The "Ataköy – İkitelli Metro Tunnel Project" is a twin tube subway tunnel project being built in the European part of Istanbul. The project was tendered to Aga Enerji Construction co.ltd. in October 2015 and the construction works began in February 2016. It is expected to finish in March 2019.

The 9,910 m of double tube tunnels are being excavated with four earth pressure machines (EPB-TBMs). As a usual application for this kind of constructions, entire data of the TBMs regarding thrust, torque, penetration, RPM, advance speed, etc. were recorded and stored during the excavation.

In this paper, geological difficulties through the excavation of two EPB TBMs are mentioned. The reaction of performance parameters, which was occurred due to the clogging issue during the excavation of Güngören formation in clayey ground condition, is analyzed.

In addition to that, the number of disc cutter consumption in each replacement is compared. Rock samples were taken from the tunnel alignment and used in the laboratory experiments. Thus, the effects of geology on cutter tool consumption has been analyzed.

2 PROJECT OVERVIEW

2.1 The Tunnel Alignment

Ataköy – İkitelli subway tunnel project is a significant underground construction project being constructed in the European part of Istanbul. The project was planned to be constructed between Ataköy district of Bakırköy Municipality and İkitelli district of Başakşehir Municipality. The line, which is located within the borders of Bakırköy and Küçükçekmece Municipalities and partly within the borders of Bahçelievler and Başakşehir districts, consists of 13,390 m of tunnels and 11 stations as twin tube tunnels. The 9,910 m length of the project alignment was planned to be bored with Tunnel Boring Machines (TBM) so-called mechanized tunneling method, which is located between Halkalı Caddesi Station and Ataköy Station. The average overburden above the tunnel varies between 10-15 m except for the first six kilometers of the tunnel alignment. Therefore, the earth pressure should be sensitively applied to keep settlements below the calculated limit values. The project alignment is seen in Figure 1.

Figure 1. General layout of Ataköy – İkitelli tunnel alignment (Polat, 2016)

2.2 The Geology and Geotechnical Parameters of the Formations

The Ataköy – Kirazlı subway line alignment begins in Sogucak limestone in the north and ends with Bakirköy limestone belonging to Çekmece formation in the south by passing through the Ceylan formation, Güngören and Çukurçeşme members of Çekmece formation and Gürpınar member of Danışment formation.

Çukurçeşme, Güngören, Gürpınar and Ceylan formations are the main geological units along the studied area. A geological cross-section profile of the tunnel alignment including these different main formations is given in Figure 2.

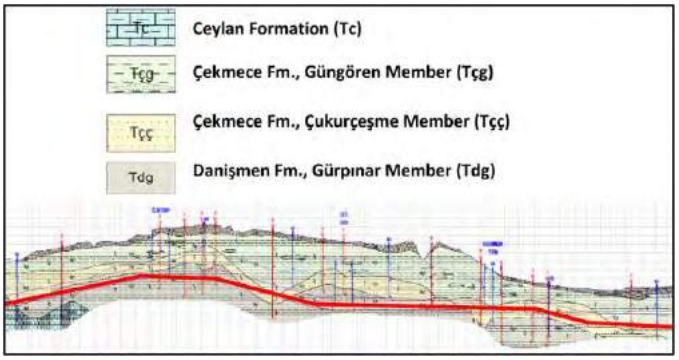


Figure 2. Geological layout of tunnel alignment (Polat, 2016)

Çukurçeşme and Güngören members of upper Miocene and Pliocene aged Çekmece formation mainly consist of sand, sandy clay, silty clay and stiff clay. The Çukurçeşme member comprises of sand, with coarse graded quartz grains in the lower level and laminated clay layers containing mica and silt in the upper level. Güngören member is composed of stiff clay and interbedded with fine grained limestone bands in the upper level. In most cases, these members of Çekmece formation have liquid limit values between 35-60, a plastic limit value of 15-20 and plasticity index of 21 and 40, respectively (Polat, 2016).

Ceylan formation is mainly composed of marn and silty claystones. In Ceylan formation, low-medium strength limestones can be faced and sometimes, although rare, it leads to an increase in cutter wear. The RQD values of this formation vary between 0-100% (Polat, 2016). The geotechnical properties of the main units in the studied area is presented in Table 1, with specific weight (kN/m^3), cohesion (kPa), friction angle (^{o}), E-Modulus (MPa), RQD, Q and RMR values for rock formation and N_{30} values for sand and stiff clay.

Table 1. Geotechnical parameters of the main units in the studied area

Formations	Çukurçeşme	Güngören	Ceylan
Specific weight [kN/m^3]	19	20	24
Cohesion (c) [kPa]	3	10	55-70
Friction angle [º]	32	22	34
E-Modulus [MPa]	35	22	35
Penetration Resistance (N_{30})	40	30	-
RQD, Q, RMR	-	-	39;0.29;35

2.3 EPB TBMs used in the Project

The selection of EPB TBM for the Ataköy – İkitelli subway tunnel was approved after considering geological and geotechnical reports. The metro tunnel is being built by four refurbished identical EPB TBMs having 6.57 m diameter. However, outputs of the two EPB TBMs (TBM-1 & TBM-2) are evaluated in the scope of this study. The total length of the shield is 8,985 mm and the total length of the machine shield + gantries being 97 m when it is fully assembled. Besides, each TBM is equipped with 32 single disc cutters and four double center disc cutters. The cutterhead has additional 72 cutting knives and eight buckets, these would facilitate the dragging of materials in soft ground conditions through the excavation. The assembly works launched in March 2017 on the Çobançeşme portal. Reinforced concrete segment lining (5+1) was erected inside the tailskin. The outer diameter of segmental tunnel lining is 6.30 m. The gap between diameters (270 mm) is filled with grout injection during the excavation. Filling this gap would require roughly 4m^3 of grout injection for each ring advance of 1.5 m. The technical specifications of an EPB TBM are given in Table 2. Figure 3 illustrates a general view of the EPB TBM during its assembly.

Table 2. Technical specifications of the EPB TBMs

Specifications	Value
Cutterhead Diameter (m)	6.57
Number of Disc Cutters	32 single face and gage discs – 4 center double discs in a row
Disc Cutter Diameter	432 mm
Number of Cutting Knives	72
Number of Buckets	8
Nominal Torque	2,829 kNm
Nominal Max. Torque	5,527 kNm
Break-out Torque	6,633 kNm
Nominal Thrust Force	42,575 kN at 350 bar

Figure 3. General view of the EPB TBM

3 PERFORMANCE OF THE TBMs

General performance values of the TBM-1 and TBM-2 are given in Table 3 until 20th March 2018. Table 3 shows the best daily and best monthly advance rates as well as including the mean daily advance rate with and without standstills. The obtained performance values were better for TBM-1. This can be explained by the fact that TBM-1 was driven towards Ataköy station through more favorable ground conditions in the opposite direction of TBM-2.

Table 3. Advance records of the TBMs

Records	TBM-1	TBM-2
Mean Advance Rate (with Standstills m/day)	9.41	8.76
Mean Advance Rate (without Standstills m/day)	15.44	12.63
Best Daily Advance (m/day)	33	33
Best Monthly Advance (m/month)	651	601.5

4 CHALLENGING GROUND CONDITIONS OF ATAKÖY – İKİTELLİ SUBWAY TUNNEL

4.1 Effect of Clogging on EPB TBM-1 Performance in Güngören Formation

The Güngören clay is medium – highly plastic and shows strongly swelling behavior because of clay mineral content. The soil along the tunnel route is classified as stiff – very stiff clay in the upper and lower levels (Polat, 2016). Clogging tendency of excavated clay formation highly depends on consistency and plasticity (Thewes, 1999). The clogging potential of clayey soils could change not only because of soil mechanical properties but also because of mineralogical parameters (Zumsteg and Puzring, 2012; Thewes and Hollman, 2016). Soils that have a consistency more than 0.75 are too stiff in terms of applying counter pressure (Hollmann and Thewes, 2013). In order to overcome this problem, adding water to the soil is necessary. Thus, the clay material, which is in the form of lumps, may become stickier and leads to clogging problems. Figure 4 shows the occurrence of clogging along the tunnel alignment in Güngören formation.

Figure 4. The occurrence of clogging issue in Güngören formation

The TBM-1 faced with adverse ground conditions in Güngören clay. The water was overused to facilitate excavation but then clogging issue arose. The clogging issue caused a dramatic decrease in performance of TBM-1 in Güngören clay. In the studied area, a significant increase in the torque value, thrust force, and specific energy occurred, together with a dramatic decrease in advance speed, penetration and instantaneous cutting rate (ICR). Figures 5-9 illustrate the variation of Torque, Thrust, T/p, ICR, Specific Energy, advance speed and penetration during the clogging issue. The torque value increased up to 1570 kNm and the average specific energy of 1-2 kWh/m^3 increased to 4-5 kWh/m^3. However, ICR decreased to 61 m^3/h while it was over 100 m^3/h before adverse ground conditions. In the meantime, penetration decreased down to 11.20 mm/rev and this circumstance led to a considerable reduction in advance speed.

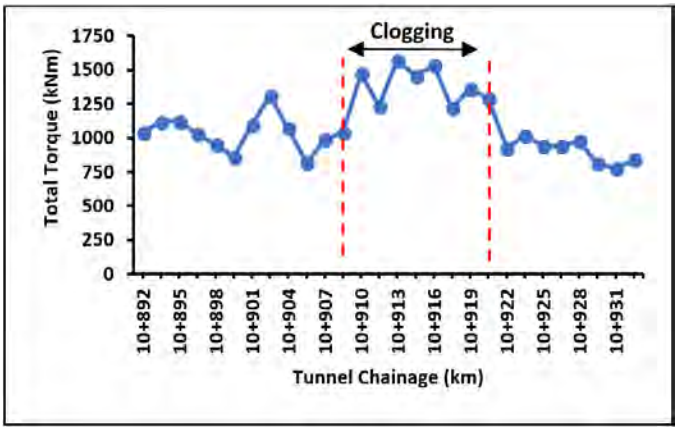


Figure 5. The variation of TBM-1 torque value during the clogging issue

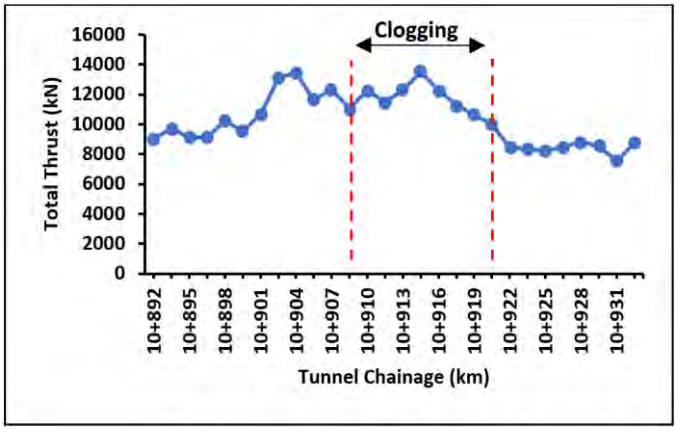


Figure 6. The variation of TBM-1 thrust force during the clogging issue

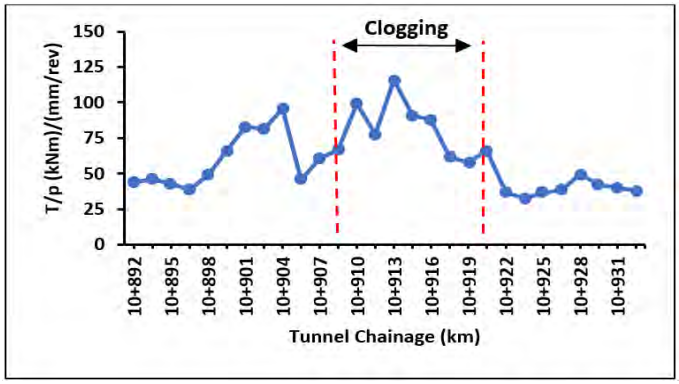


Figure 7. The variation of TBM-1 torque/penetration ratio during the clogging issue

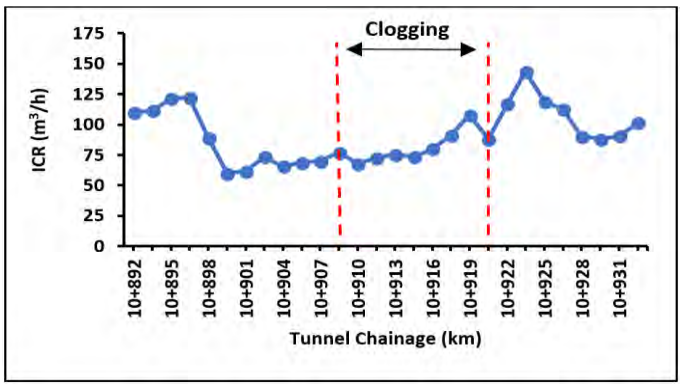


Figure 8. The variation of TBM-1 ICR during the clogging issue

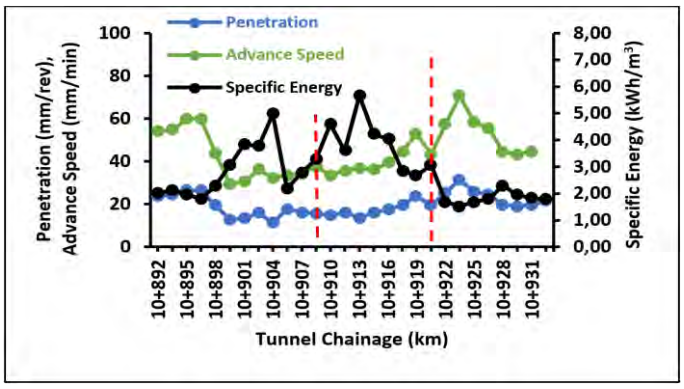


Figure 9. The variation of TBM-1 penetration, advance speed and specific energy during the clogging issue

4.2 Evaluation of Cutter Consumption for the TBM-2

Cutter tool consumption is one of the decisive factors in the efficient and economical application of mechanized tunneling projects. There are several factors which directly influence the cutter consumption. These factors are geological conditions, the operating parameters of the machine and machine features (Thuro and Käsling, 2009). Highly abrasive rocks with high strength mechanical properties may be faced during the excavation of EPB TBMs in mixed ground conditions, and this situation leads to a significant decrease in penetration and advance rates as a result of excessive cutter wear (Guclucan et al., 2007).

The majority of the tunnel alignment consists of sand and sandy-clay ground. However, limestone and quartz-rich rocks were encountered after the chainage 6+486 km in the direction of İkitelli station. Point-load and cerchar abrasivity tests were carried out on the samples taken from this part of the tunnel alignment. The failure load is used to predict the compressive strength of the rock samples. The tests were performed according to ASTM D5731-16 and D7625-10. The results of the experiments are summarized in Table 4 and the pictures are given in Figure 10.

Table 4. Point-Load and CAI Tests results of the taken samples

RING NO	$I_{s(50)}$ (kg/cm^2)	Estimated UCS (MPa)	CAI Value	Classification
1469	3,35	69	1,06	Medium
1470	7,54	154	2,19	High
1546	0,31	6	0,81	Low
1547	0,84	18	0,88	Low
1548	0,72	16	1,19	Medium

Figure 10. Encountered limestone layer along the tunnel alignment

In general, friction coefficient and quartz content of the fine grained ground possessed a higher level of threat for the wearing of disc cutters in the early stages of the excavation. In most cases, it has been seen that flat spots occurred on the one side of disc cutters in soft ground. From the beginning to the Doğu Sanayi station a total of 1524 m has been excavated, when the length of stations is excluded. Until this point, a total number of 79 CCS disc cutters has been replaced and the disc cutter consumption of TBM-2 was 654 m^3 (19.29 m) per disc. Besides, encountered limestone and quartz-rich rocks caused cracks and abrasion of the disc cutter ring in the progressive stages. After Doğu Sanayi station, a total length of 854 m has been bored out and constructed until 20th March 2018. A total number of CCS 23 disc cutters has been replaced and the disc cutter consumption of TBM-2 was 1259 m^3 (37.14 m) per disc. The number of disc cutter replacement in each inspection along the tunnel alignment is indicated in Figure 11.

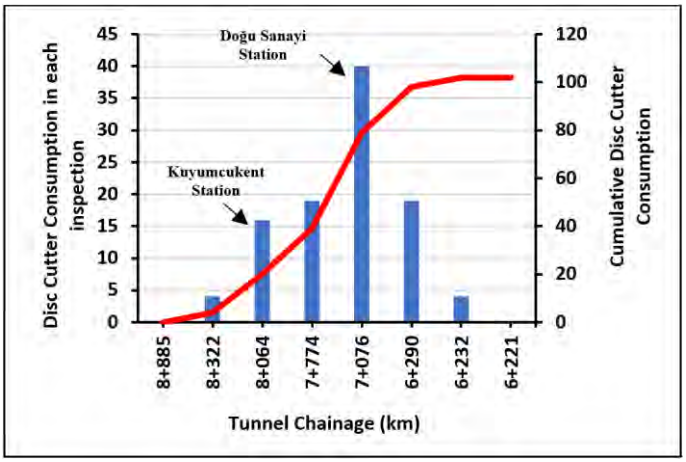


Figure 11. The number of replaced disc cutters in each inspection

5 CONCLUSION

The most significant, challenging and time consuming geological difficulties and their negative influences are discussed for the two EPB TBMs used in Ataköy-İkitelli subway tunnel project. The difficulties that TBMs encountered are one of the most common issues during mechanized activities in mixed ground conditions.

It is noteworthy that the water is used to improve the advance speed of TBM-1 in unfavorable ground condition. However, the clogging tendency of excavated clay material increased in combination with redundant water supply and the excavated material stuck to disc cutters. Therefore, the advance speed and penetration were profoundly decreased owing to the increase in torque, thrust, and specific energy. In such cases, the amount of water should be properly adjusted and also anti clay agent addition is highly recommended.

Disc cutter consumption is another essential criterion for the evaluation of geological challenges in mixed ground conditions. In total, 102 CCS disc cutters were consumed during the excavation of around 2.4 km tunnel with TBM-2. Limestone and quartz-rich rocks can cause adverse conditions regarding cutter consumption, but the effect of fine grains and quartz content in soft ground conditions was the dominant reason in this case study. When the disc cutters fail to roll in soft formations, unilateral flat wear was experienced and cracks or fractures appeared on the worn disc cutter rings during the rock excavation.

In conclusion, most issues concerning the challenging ground conditions during mechanized tunneling in the mixed ground are the consequences of insufficient site investigations in the preliminary stages. Therefore, a comprehensive geological investigation should be considered to predict possible issues that may emerge during the construction.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper summarizes some of the results of MSc. thesis written by Onur INAL. The authors are grateful to the support of Ataköy – İkitelli subway tunnel project and Aga Enerji Construction Industry and Trade Inc.; this work would not be possible without their support. The authors would like to thank the geotechnical department manager Berzan Solduk for his valuable contribution.

REFERENCES

ASTM. 2010. Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the cerchar method. American Society for Testing and Materials.

ASTM. 2016. Standard test method for determination of the point load strength ındex of rock and application to rock strength classifications. American society for testing and materials.

Polat, F. 2016. Geological and geotechnical works report of Ataköy - İkitelli metro tunnel alignment, Vol. 1. Istanbul, Turkey. (Unpublished)

Güçlücan, Z., Meriç, S., Gürsoy, C., Algan, M., Bilgin, N., Balcı, C., Tumaç, D. 2007. The use of a tbm in difficult ground conditions in Beykoz - Kavacık sewerage tunnel. *Proceedings of the 2nd Symposium on Underground Excavations for Transportation,* pp. 83-91. Istanbul, Turkey

Hollmann, F.S., Thewes, M. 2013. Assessment method for clay clogging and disintegration of fines. *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 37, pp. 96–106.

Thewes, M. (1999). Adhäsion von tonböden beim tunnelvortrieb mit flüssigkeitsschilden. *PhD Dissertation* Bericht aus Bodenmechanik und Grundbau,. (p.190). Bergische Universität Wuppertal, Germany.

Thewes, M., Hollmann, F.S. 2016. Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs. *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 57, pp. 122-128.

Thuro, K., Käsling, H. 2009. Classification of the abrasiveness of soil and rock. *Geomechanic and Tunneling*, pp. 179-188.

Zumsteg, R., Puzrin, A.M. 2012. Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes. *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 31, pp. 86-96.

Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesindeki Teknik Hacimlerin Tünel Olarak Yapılmasının Projeye Mali ve Süresel Etkisi

Effect of Construction of Technical Rooms by Tunnelling on the Cost and Duration of Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Project

M. Namli
Istanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Hattı, 17 km uzunluğundaki çift tüp ana hat tünelleri, 16 adet metro istasyonu, 2,8 km'lik depo sahası bağlantı tüneli, depo sahası ve bakım alanı bulunan, 563.899.995,32 € bütçeli bir raylı toplu taşıma sistemidir. Bu metro projesindeki ana hat tünelleri zemin dengeleme basıncıyla çalışan tünel delme makineleriyle (EPB-TBM), diğer tüneller ise Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile açılmıştır.

Bu bildiride, uygulama aşamasında yapılmış olan önemli bir proje değişikliğinin projeye mali ve süresel etkileri incelenmiştir. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro projesi kapsamında yapılacak tünel havalandırma fan odaları için gerekli hacimler proje başlangıcında yüzeyden aç-kapa şeklinde yapılması planlanmışken, uygulama aşamasında aç-kapa yapılmak yerine peron tünelleri uzatılarak peron tüneli seviyesinde tünel olarak yapılmıştır. Bu sayede, yaklaşık bir yıl daha kısa sürede, zamandan kazanılan mali tasarruf hariç, 31.872.596 € daha az maliyetle proje tamamlanmış olup toplam proje bedelinin %5,7 oranında bir tasarruf sağlanmıştır.

ABSTRACT Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Project is the second metro line of Istanbul in Anatolian side, which has 17 km twin tube main route tunnels, 16 metro stations, and 2.8 km long connection tunnel between the depo area and main metro line, costing 563,899,995.32 €. The main metro line tunnels are planned to be built by earth pressure balanced tunnel boring machines (EPB-TBM) and the rest of the tunnels are planned to be built by New Austrian Tunneling Method (NATM).

The effect of one application methodology changes on the duration and the cost of the project is summarized in this paper. At the beginning, technical spaces for tunnel ventilation fans are planned to be built by cut and cover method in a shallow position from the surface level. However, it was preferred to be built the technical spaces for tunnel ventilation fans at the platform tunnels level by building extra tunnels instead of using cut and cover technique. With this project change, the project duration was decreased approximately one year. At the end of the project without taking into consideration of the incomes due to time decrease, there had been a financial saving, which is related to the direct construction costs such as 31,872,596 € means a saving of %5,7 in the total project budget.

1 GİRİŞ

Metro Projelerindeki yapım işleri inşaat işleri ve elektromekanik işler olmak üzere iki ana kısma ayrılmaktadır. İnşaat işleri tamamlandıktan sonra elektromekanik işlerin imalatına başlanabildiğinden inşaat işlerinin yapım süresi projenin tamamının bitirilerek işletmeye alınabilmesi için elzemdir. Metro projelerinin planlanan sürelerde tamamlanabilmesi için inşaat işlerinin

yapımının önceden doğru şekilde planlanması büyük önem arz etmektedir.

İnşaat işleri ise tünel imalatları ve istasyon imalatları olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Bir metro projesi, istasyon işlerinin geç kalmasından veya tünel işlerinin uzun sürmesinden dolayı planlanan sürelerde işletmeye alınamayabilmektedir.

Günümüzde tünel imalatları, tünel delme makinelerinin kullanımının artmasıyla daha kısa sürelerde yapılabilmektedir. Zira klasik tünel açma yöntemleriyle günde ortalama 1 metre tünel imalatı yapılabilirken, tünel delme makineleriyle ortalama 10 metre tünel imalatı yapılabilmektedir. Tünel delme makinelerinin kazı performansının tahmini ile ilgili birçok akademik çalışma yapılmış olup bu çalışmalar sonucunda İstanbul'daki jeolojik formasyonlar için bir kazı ilerleme tahmin modeli de geliştirilmiştir (Namlı vd. 2013, 2014, Bilgin vd. 2016). Bu model ile karşılaşılacak jeolojik formasyonun tipine göre tünel delme makinesiyle yapılacak tünellerin ne kadar sürede yapılabileceği önceden tahmin edilebilmektedir (Namlı ve Bilgin, 2017).

Metro istasyonu yapım işlerinin süreleri ise istasyonun konumuna, zemin şartlarına, bulunduğu mevkideki altyapı yoğunluğuna ve kamulaştırma işlemi gerekliliğine göre oldukça değişkenlik arz etmektedir. Metro istasyon inşaatları temel olarak tamamen aç-kapa, kısmen aç-kapa kısmen tünel veya tamamen tünel şeklinde yapılabilmektedir. Aç-kapa yapılması durumunda ilk inşaat yapım maliyetleri, tünel şeklinde istasyon yapımına göre daha düşük gözükse de yüzeye yakın altyapı hatlarının deplasesi, metro istasyonu ile çakışan yüzeydeki parsellerinin kamulaştırması gibi endirekt maliyetler ortaya çıkmakta ve istasyonun yapım süresi inşai unsurlar dışında pek de kontrol edilemeyen bürokratik işlem sürelerinin esaretinde kalmaktadır. Zira en ufak bir parselin kamulaştırması bile bir yıldan az sürmemekte, kamulaştırma işlemi tamamlanmadan da aç-kapa istasyon inşaat imalatlarına başlanamamaktadır. Dünyadaki raylı sistem metro projeleri incelendiğinde raylı sistem projelerinin yapımının kamulaştırma süreleri hariç, asgari 5 yıl sürdüğü rapor edilmiştir. (Dünya Bankası Raporu, 2002).

İstanbul da yapılan metro projelerinin bazılarında, aç-kapa yapılan istasyonların havalandırma fan odaları benzeri teknik hacimlerinin planlanan sürede tamamlanamadığı için, metro ana hat tünel imalatları bir yıl evvelden tamamlanmasına rağmen, tünel havalandırma fanları vb. elektromekanik işlerin imalatına başlanamamıştır. Bu durum metro projesinin işletmeye alınmasının bir yıl daha geç gerçekleşmesine sebep olmuştur. Diğer yandan bazı metro projelerinde de metro tünel imalatlarını geç tamamlanması sebebiyle istasyon inşaatlarının tamamlanmış olmasına rağmen metro hattının tamamı bir seferde işletmeye alınamayarak, kısmi olarak işletmeye alınma durumu söz konusu olmuştur. Bu bağlamda metro istasyonlarının ve metro hattı tünellerinin yapım tekniğinin projenin başında çok iyi bir şekilde planlanmasının gerekliliği ön plana çıkmaktadır.

Metro projeleri, üstyapı inşaatı projeleri gibi bütün detayların önceden belirli olduğu uygulama projesine dayalı anahtar teslim götürü bedel işler olarak ihale edilemeyen, çalışılacak zemin ve ortamın tam olarak belirli olamaması gibi sebeplerden ötürü kesin projeye dayalı olarak ihale edilen altyapı projelerindendir. İstanbul'daki metro işlerinin ihaleleri birim teklif alma usulüyle yapılmaktadır. Bu sebeple inşaat işlerinin iş kalemlerinin bedelleri yüklenicinin teklifine ve imkânlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple ihale sonrası en uygun teklifi veren yüklenici ile sözleşme imzalandıktan sonra yapılacak tünel işleri vb. imalatların daha kısa sürede ve daha uygun fiyata aç-kapa yöntemiyle veya tünel yöntemiyle yapılıp yapılamayacağı mutlaka irdelenmelidir. Zira, metro projelerin başlangıcında alınacak kararlar gerek işin süresi ve gerekse de maliyeti üzerinde çok büyük etkiler yapmaktadır.

Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Hattı, Üsküdar-Çekmeköy istasyonları arasında yer alan 17 km uzunluğundaki ana hat tünelleri çift tüp delme tünel ve aç-kapa tipinde toplam 16 adet istasyonu, yaklaşık 2,8

km'lik depo sahası bağlantı tüneli, depo sahası ve bakım alanı ve binaları bulunan bir raylı toplu taşıma sistemidir. Ana hat, Üsküdar Meydanı'ndaki Üsküdar İstasyonu'ndan başlayarak 17 km'lik güzergah tünel makinesi (TBM/EPB) ve Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ile yapılan tüneller ile Çekmeköy İstasyonu'na ulaşmaktadır. Ana hat, Üsküdar Meydanı'ndaki Üsküdar İstasyonu'ndan başlayarak 17 km'lik güzergah tünel makinesi (TBM/EPB) ve konvansiyonel (NATM) yapım tekniğiyle yapılan tüneller ile Çekmeköy İstasyonu'na ulaşmaktadır. Buna ilave olarak ana hattan Dudullu mevkiinde sapılarak, 2,8 km'lik tünel bağlantı hattı ile Depo sahasına ulaşılmaktadır (Şek. 1). İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından ihale edilmiş olan metro hattının inşaat ve elektromekanik işlerine ait toplam bütçesi metro araçları hariç 563.899.995,32 €'dur.

Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Hattı, projesi birim fiyat teklif alma usulüyle ihale edilmiş bir iş olup metro istasyonu ve klasik tünel açmada kullanılan iş kalemlerinin her biri için ayrı ayrı teklif alınmıştır. Tünel delme makinesiyle (TBM) açılması planlanan tüneller için ise her bir metre başına tek bir fiyat teklifi alınmıştır.

Bu makalede, Üsküdar - Ümraniye-Çekmeköy Metro projesi kapsamında yapılmış olan bir uygulamanın projeye mali ve süresel olarak etkisi özetlenmiştir. Proje kapsamında yapılması planlanan tünel havalandırma fan odaları için gerekli hacimler yüzeyden açık kazı yöntemiyle yapılmak yerine peron tünelleri seviyesinde açılan tünellere, peron katına indirilmiştir.

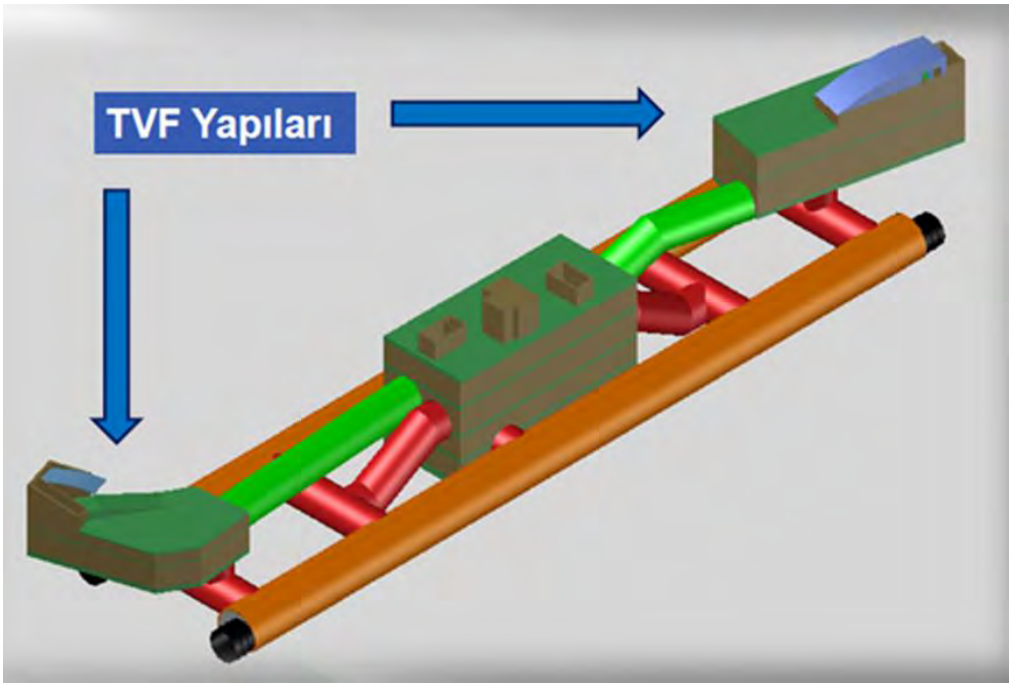
2 ÜSKÜDAR-ÜMRANİYE-ÇEKMEKÖY METRO PROJESİNDE YAPILAN PROJE DEĞİŞİKLİKLERİNİN İŞE ETKİSİ

Bu proje kapsamında öngörülmüş olan istasyonlardan arazinin müsait olduğu istasyonlar tamamen aç-kapa yöntemiyle yapılırken, arazinin müsait olmadığı istasyonlar ise tamamen delme tünel yöntemiyle yapılmıştır. Ayrıca, arazinin kısmen müsait olduğu meskûn alanlardaki bazı istasyonların, inşaat süresince ve sonrasında yüzeyde işgal edilen alanın ve kamulaştırma ve altyapı deplase maliyetlerinin asgariye indirilmesi için yolcu toplanma alanları kısmen aç-kapa yöntemiyle yapılırken geriye kalan teknik hacimler tünel olarak yapılmıştır.

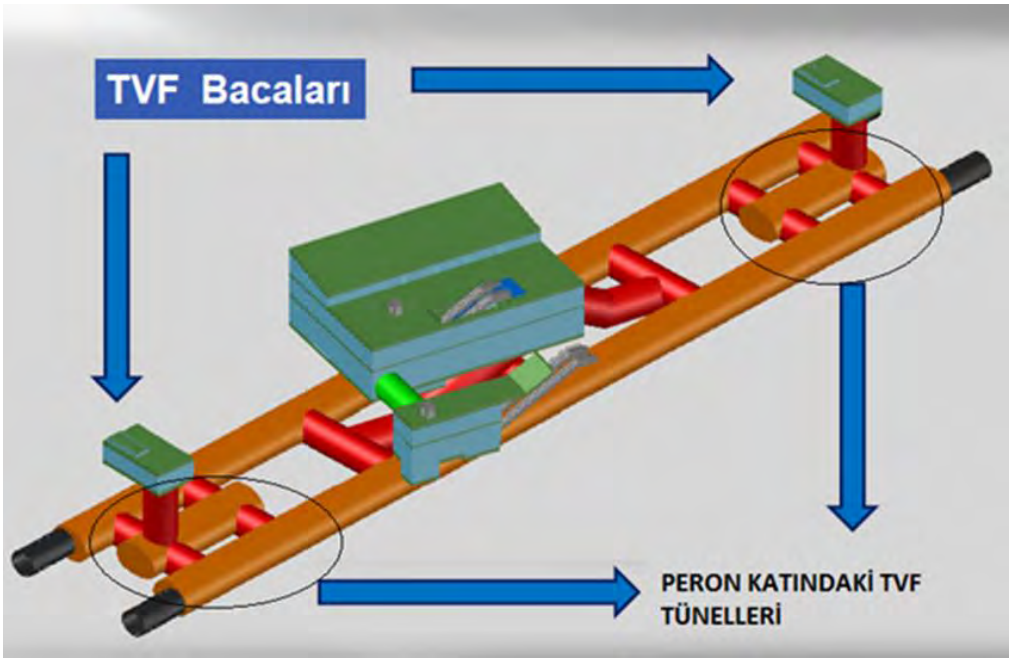
Bunun için peron tünelleri uzatılarak peron tünellerinin sonuna yapılan ilave tüneller ile normalde aç-kapa kesim içinde yüzeye yakın olan (Şek. 2), tünel havalandırma fanları (TVF) gibi büyük hacim işgal eden elektromekanik ekipmanları içeren tünel havalandırma fan odaları peron tünel katına alınmıştır (Şek. 3).

Bu sayede, her ne kadar peron katındaki tünel imalatları ve maliyetleri artmış olsa da tünel havalandırma fan odaları için yüzeyden açık kazı ile yapılması durumunda kazılacak ve işgal edilecek alanın azalması sebebiyle yapılması gereken altyapı deplasesi ve kamulaştırma maliyetinin yanı sıra bu işler için gerekecek ilave süreden ve olumsuz çevresel etkiden de kurtulunmuştur.

Şekil 1. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy metro hattı projesi güzergahı



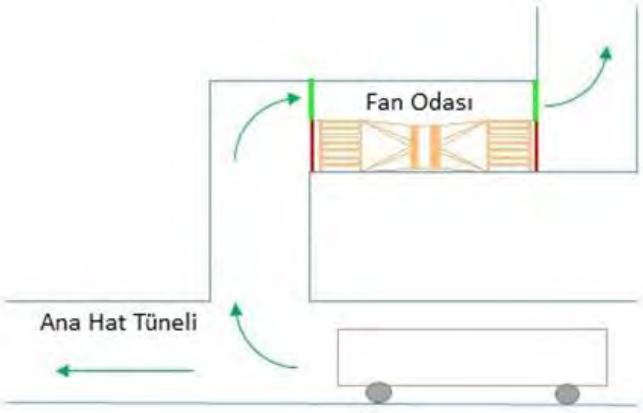
Şekil 2. Tünel havalandırma fan odalarının (TVF) yüzeyden açık kazı ile konkors katında yapılması durumu



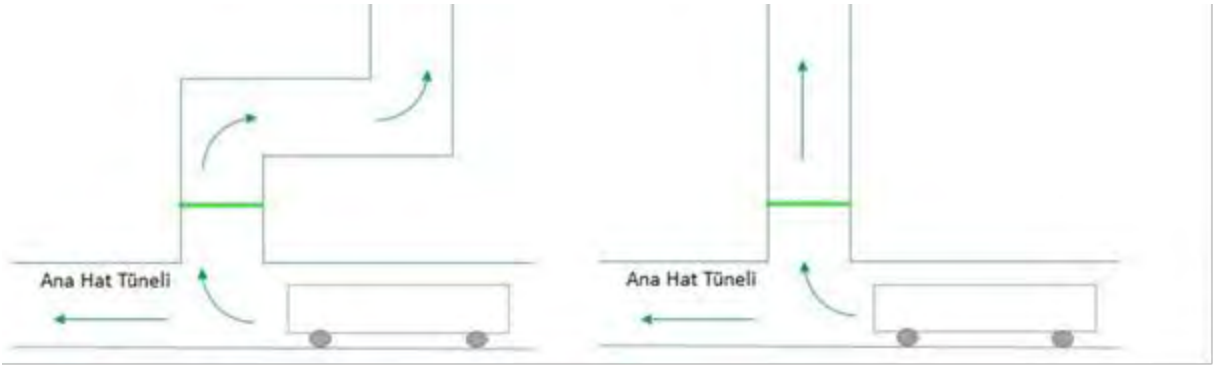
Şekil 3. Tünel havalandırma fan odalarının (TVF) peron katına alınması durumu

Tren alt ekipmanları ve istasyondaki tesislerde oluşan sıcak hava ve tünelde biriken kirli hava, trenin önünde oluşturmuş olduğu piston etkisi ve peron öncesinde yer alan şaftlar vasıtası ile doğal (cebri olmayan) bir şekilde dışarıya atılmaktadır. Doğal havalandırma yeterli olmadığı takdirde fanlar vasıtasıyla tüneller soğutulmakta, kirli hava egzoz edilmektedir. Haliyle şaftlar mümkün olabildiğince yüzeye mesafesi kısa ve hava direncinin az olması, doğal havalandırmadan maksimum yararlanılması açısından önemlidir.

Tünel Havalandırma Odası, aç-kapa yapı içinde imal edildiğinde; piston etkisi ile gelen havanın yüzeye erişim yolu uzamakta, fan odası giriş ve çıkışında kesit daralması nedeniyle direnç ile karşılaştığından doğal havalandırmadan minimum seviyede yararlanılmaktadır (Şek. 4).



Şekil-4 Tünel havalandırma fan odasının konkors katında imalatı ve piston etkisinin şematik gösterimi (Pakiş, 2017)



Şekil-5 Tünel havalandırma fan odasının peron katında imalatı ve piston etkisinin şematik gösterimi (Pakiş, 2017)

Tünel Havalandırma Fan Odası, peron katı tünel yapısı içinde imal edildiğinde (Şek. 5); piston etkisi ile gelen hava tünel havalandırma fanından bağımsız olarak doğrudan yüzeye kısa yoldan erişmekte, daha az dönüş ve alansal daralmalara maruz kaldığından Şekil 4'e nazaran daha yüksek oranda doğal havalandırmadan yararlanılmaktadır.

Tünel Havalandırma Fan Odalarının (TVF yapılarının) ön projedeki haliyle yapılması durumundaki inşaat maliyeti ile peron katına alınması durumundaki ilave tünel açılması durumundaki maliyet Tablo 1'de mukayese edilmiştir.

İstasyon mevkileri bazında tespit edilmiş olan kamulaştırma bedelleri ile TVF yapıları için gerekli inşaat alanı çarpıldığında ise TVF yapılarının açık kazı ile yapılması durumunda gereken 26.612.850,00 € kamulaştırma maliyetine ve bu parsellerin kamulaştırılabilmesi için gereken asgari 1 yıllık kamulaştırma süresine de gerek kalmamıştır.

Tablo 1. Tünel Havalandırma Fan Odalarının (TVF yapılarının) Aç-kapa Konkors Katında veya tünel olarak peron katında yapılması durumundaki inşaat maliyetlerinin mukayesesi

İstasyon Adı	Eski Durum (Aç-kapa)	Yeni Durum (Tünel)
Fıstıkağacı	1.117.137,72 €	859.051,43 €
Bağlarbaşı	1.487.947,72 €	594.848,52 €
Kısıklı	1.172.731,72 €	779.382,73 €
Bulgurlu	1.343.275,72 €	816.000,73 €
Ümraniye	1.256.133,72 €	855.088,02 €
Çarşı	1.191.629,72 €	827.421,87 €
Yamanevler	1.127.697,72 €	768.388,40 €
Çakmak	1.434.883,72 €	1.299.323,44 €
Ihlamurkuyu	1.132.141,72 €	345.445,87 €
Altınşehir	1.140.017,72 €	932.946,16 €
İ:H. Lisesi	1.171.785,72 €	237.740,13 €
TOPLAM	**13.575.382,92 €**	**8.315.637,33 €**

3 SONUÇ

Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Hattı projesi kapsamında tünel havalandırma fan odalarının peron katına alınması ile inşaat maliyetlerinde 5.259.746 € azalma olmuştur. Buna ilave olarak tünel havalandırma fan odalarının aç-kapa yapılması durumunda gerekecek olan 26.612.850 € kamulaştırma bedeli ve işlemlerinin tamamlanması için öngörülen yaklaşık bir yıllık bekleme süresi de ortadan kalkmıştır.

Netice olarak, toplam 563.899.995,32 € keşifli Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Hattı projesinde, tünel havalandırma fanları için gerekli hacimler peron katında tünel olarak yapılarak toplam 31.872.596 € daha az maliyetle ve yaklaşık bir yıl daha kısa sürede toplam proje bedelinin %5,7 oranında bir tasarruf sağlanmıştır.

Bu örnekten çıkarılacak sonuç, metro benzeri zemin şartlarının önceden kesin olarak öngörülemediği büyük maliyetli projelerde, zemin bilgisi ve araştırmalar neticesinde elde edilen veriler ışığında projenin başlangıç aşamasında alınacak dinamik ve analitik kararlar projelerin daha düşük maliyetle daha kısa sürede gerçekleştirilebilmesini sağlayabilmektedir. Bunun için işveren, yüklenici ve üniversitelerin birlikte çalışarak sorunlara, yaşanmış tecrübeler göz önünde bulundurularak, reel ihtiyaçlar ve bilimsel gerçekler birlikte değerlendirilerek çözümler aranmalı ve elde edilen tecrübeler kayıt altına alınarak teknik camiayla paylaşılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu makalenin yazarı, göstermiş oldukları anlayış ve destekten ötürü İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sitem Daire Başkanlığı ve özellikle İbrahim Halil Pakiş'e teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKLAR

Namli, M., Cakmak, O., Pakis, I.H., Tuysuz, L., Talu, T., Dumlu, M., Balci, C., Copur, H., Bilgin, N. 2013. A methodology of using past experiences in the performance prediction of a TBM in a complex geology and risk analysis. In: World Tunnel Congress, Geneva, Switzerland.

Namli, M., Cakmak, O., Pakis, I.H., Tuysuz, L., Talu, T., Dumlu, M., Savk, S., Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. 2014. The performance prediction of a TBM in a complex geology in Istanbul and the comparisons with actual values. In: Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life. Foz do Iguacu, Brazil.

Namli, M., Bilgin, N. 2017. A model to predict daily advance rates of EPB-TBMs in a complex geology in Istanbul. Tunneling and Underground Space Technology, 62 (2017), 43-52., Doi:10.1016/j.tust.2016.11.008.

Bilgin, N., Namli, M., Copur, H., Balci, C. Mamaghani, A. 2016. A model to predict the performance of EPB-TBMs in a complex geology in Istanbul. In: World Tunnel Congress, San Francisco, USA.

Pakiş, İ.H. 2017. Metro Teknik Bilgi Notları.

Kirazlı-İkitelli Arasında İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Yüzey Oturmaları

Excavation Induced Surface Settlement between Kirazlı and İkitelli Twin Metro Line

S. Demir
DS-Mersa Proje Uluslararası Mühendislik Müşavirlik Ltd. Şti, İstanbul

Y. Mahmutoğlu
İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET Bu çalışmada Kirazlı-İkitelli arasındaki paralel ve asenkron sürülen ikiz tünel kazıları sırasında zeminde oluşan örselenmenin yüzey oturmalarına etkisi değerlendirilmiştir. İkiz tüneller biri diğerinin önünde ilerleyen 6,50 m çapındaki EPB-TBM'ler ile Miyosen yaşlı Güngören Formasyonu içerisinde açılmıştır. Hat üzerinde tesis edilmiş izleme noktalarında periyodik olarak okunan düşey yerdeğiştirmeler Gaus fonksiyonu yardımıyla değerlendirilmiş, aynı kesitler için sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan nümerik analizlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Modellenen kritik kesitte birinci tüpün geçişi sırasında maksimum oturma 13 mm ve arkadan gelen ikinci tüpün aynı noktadan geçişi sırasında ise örselenmeden dolayı maksimum oturma 30 mm'ye ulaşmıştır. Zemin İçsel sürtünme açısı ile oturma teknesinin genişliğini veren k parametresi arasında iyi bir ilgileşim (R^2= 0,99) belirlenmiş olup mekanize tünel kazısının yapıldığı Güngören Formasyonu için k parametresinin 1-tanø ile ilişkilendirilebileceği görülmüştür.

ABSTRACT In this study, the effect of soil disturbance on the surface settlement formed during the excavation of parallel and asynchronous twin tunnels between Kirazlı and İkitelli was evaluated. The twin tunnels were opened in Miocene aged Güngören Formation with EPB-TBMs of 6.50 m diameter running in front of one another. Vertical displacements periodically read at the monitoring points established on the line were evaluated with the help of Gauss function and compared with the results obtained from the numerical analyzes made by the finite element method for the same sections. In the modeled critical section driving of the first tube resulted in a settlement of 13 mm and due to the soil disturbance during driving first tube, this value reached 30 mm after the second tube had passed through the same point. A good correlation (R^2 = 0,99) was determined between the internal friction angle and the k parameter which gave the width of the settlement. It was seen that the k parameter for the Güngören Formation, where the tunnel excavation was performed, could be associated with 1-tanø.

1 GİRİŞ

Kent içinde sığ yeraltı yapılarının kazılarına bağlı oluşan yüzey oturmalarının üst yapılara etkileri büyük önem arz etmektedir. Sığ derinlikte ve zayıf zeminlerde sürülen kentiçi metro tünellerinde deformasyonlar hızla yüzeye ulaşarak oturma-göçüklere sebep olabilmektedir. (Vardar 2016, Mair ve Taylor 1997, Mahmutoğlu 2011). Tünel kazılarına bağlı meydana gelen oturmalar tünelin sürüldüğü zemin koşulları, yeraltı suyu, tünel üzerindeki örtü kalınlığı, kazı kesitinin boyutu ve yapım metodu gibi birçok faktörün denetimindedir.

Ocak ve Bilgin (2009), İstanbul Metrosu Esenler-Kirazlı hattında EPB/TBM ile açılan ikiz metro tünellerinin kazısı sırasında meydana gelen yüzey oturmalarından birçok yapının etkilendiğini ve 35,6 milyon dolar projeye ek maliyet getirdiğini belirtmişlerdir. Bildiride, Kirazlı-İkitelli arasındaki (Şek.1) birbirine yakın, aynı kotta, paralel asenkron tünel kazıları sırasında oluşan örselenmenin oturmalara etkisi değerlendirilmiştir.

Şekil 1. İnceleme alanı bulduru haritası

1.1 Tünel Açım Yöntemi

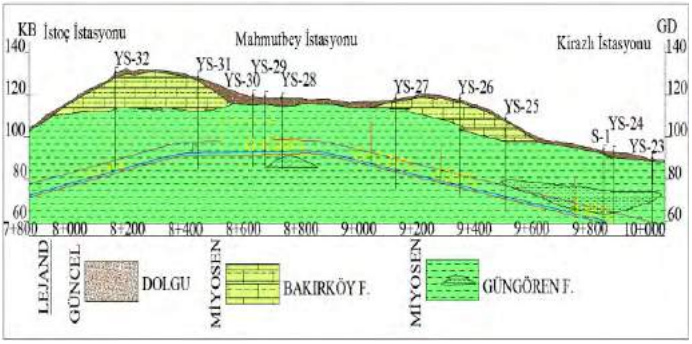
Tüneller 4 adet EPB-TBM ile 6,5 m çapında biri diğerini belirli mesafede, zaman farkı ile takip eden asenkron açılmıştır. Kirazlı-İkitelli metro hattının incelenen kısmında sağ tüpte Herrenknecht ve sol tüpte Lovat TBM marka makinalar kullanılmıştır. Projede, sağ tüp, sol tüpün önünde 50-70 m arasında değişen mesafede ilerletilmesi planlanmış, minimum 50 metre mesafenin korunmasına gayret gösterilmiştir. Tünel merkezleri arası mesafe hat boyunca 14-15 m' dir (Şek. 2).

Şekil 2. İkitelli istasyonu görünümü

1.2 Tünellerin Sürüldüğü Jeolojik Ortam

İncelenen hattın fizibilite etüdü sürecinde araştırma verilerine göre üstte Miyosen yaşlı Bakırköy Formasyonu (Arıç, 1951) ve altta tünel alt kotuna kadar grimsi yeşil renkli, kum mercekli, kum ve silt ara seviyeli ve üste doğru marn arakatkılı sert kilden oluşan Miyosen yaşlı Güngören Formasyonu'na ait birimler bulunmaktadır.

Kazılar 25 ile 41 m arasında değişen derinliklerde olup, yeraltı su seviyesinin altında sürülmüştür. İkiz tünel güzergâhının araştırılan kesimin mühendislik jeolojisi boy kesiti Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. İncelenen hattın mühendislik jeolojisi boy kesiti

Araştırma aşamasında yerinde yapılan kuyu içi deneyleri sonuçlarına göre, Miyosen yaşlı kil-kum birimlerinin SPT-N değerleri 30-45 arasında ve presiyometre Menard modülleri ise 30-40 MPa arasında değişmektedir.

Tünel hattında yer alan birimlerin jeomekanik özellikleri araştırma raporunda sunulan (Bakılar 2006) laboratuvar deney sonuçları göre, incelenen kesimin litolojisi kum içeriklerine göre yüksek plastisiteli sert kil (CH), düşük plastisiteli sert kil (CL) ve killi sıkı kumdan (SC) oluştuğu anlaşılmaktadır. SPT-N, presiyometre ve likidite indisi özelliklerine göre aşırı konsolide kil sınıfına giren CH tipi killerde serbest basınç direnci 269-449 kPa aralığında iken kum içerikli CL killerde 105-165 kPa arasındadır. Çok sayıda örnek üzerinde tekrarlanan kesme deneylerinden, drenajsız kohezyon (cu) 162-224 kPa olarak belirlenmiştir. Killi kumların (SC) ise drenajsız kesme dayanımı parametreleri cu ve ø sırasıyla 9 kPa ve 28º olarak elde edilmiştir (Çiz. 1).

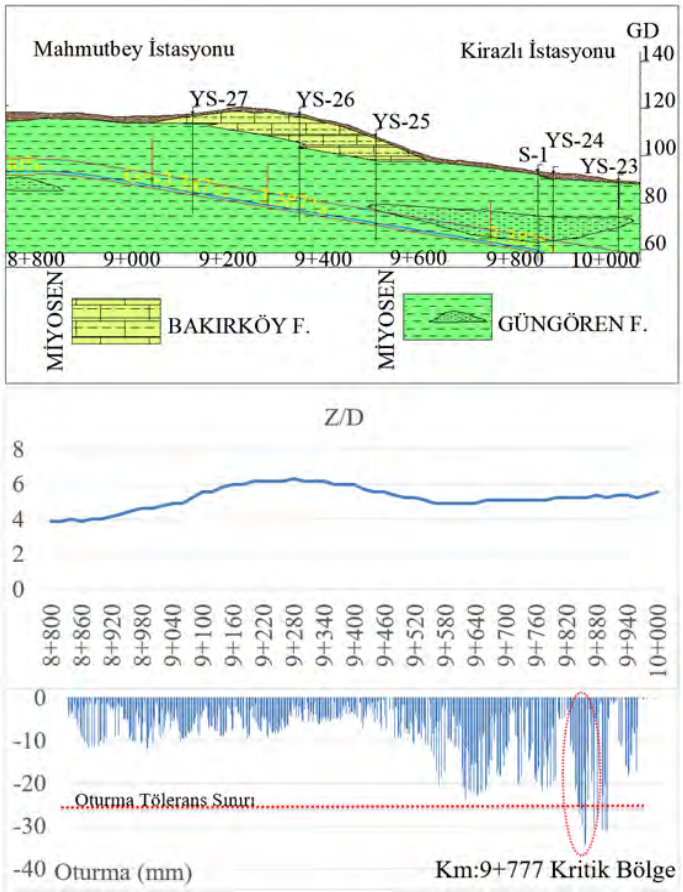
Çizelge 1.Deney Sonuçları (Bakılar, 2006)

Z (m)	- 200	PI (%)	SPT -N	Epu (MPa)	cu (kPa)	ϕ (°)	USCS
18	80	23	33	36	162	7	CL
30	22	11	56	45	9	28	SC
50	94	27	50	43	224	1	CH

2 YÜZEY OTURMALARI

İncelenen hat üzerine tesis edilmiş 513 adet bina izleme noktasında ölçülen oturmalar, örtü kalınlığı ve jeolojik model Şekil 4'de ilişkilendirilmiştir.

Bu şekilden de anlaşılacağı üzere, örtü kalınlığının tünel çapına oranı (Z/D) 4-6 arasındadır. Güzergâhta yüzey oturmalarının örtü kalınlığının arttığı ve üstte Bakırköy Formasyonu'nun bulunduğu kesimde 5 mm'yi geçmediği, kumlu seviye içerisinde oturmaların artarak 35 mm'ye ulaştığı görülmüştür (Şek. 4).



Şekil 4. Oturma, Z/D ve jeolojik model arasındaki ilişki

2.1 Gauss Fonksiyonu ile Değerlendirme

Martos (1958), maden kazıların bağlı cevher yatakları üzerindeki oturmaları istatiksel yöntemlerle değerlendirerek Eşitlik 1'de verilen Gauss fonksiyonu eğrisi ile elde edebileceğini belirtmiştir.

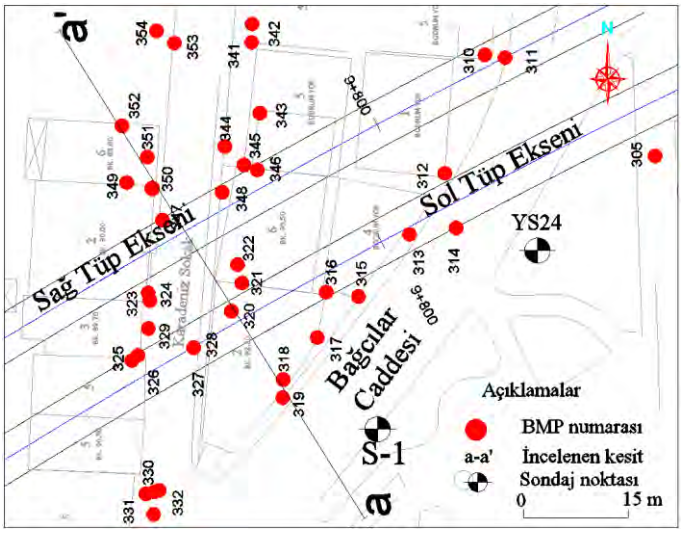
$$S = S_{max} \cdot \exp \frac{-x^2}{2i^2} \quad (1)$$

Burada; S, tünel eksenine *x* (m) mesafesindeki yüzey oturmasını, S_{max} tünel merkezindeki maksimum oturmayı (mm), *i* oturma eğrisinin dönme noktasının tünel eksenine yatay mesafesini göstermektedir.

O'Reilly ve New (1982), Eşitlik 2'de k değerini kil için 0,43 ve kum için ise 0,28 olarak önermiştir.

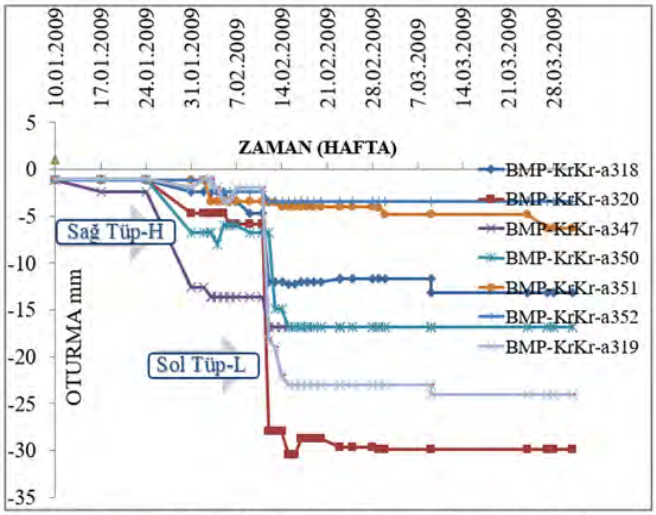
$$i = k.Z_0 \quad (2)$$

İncelenen en kesitte yüzey deformasyonu izleme noktalarının tünel eksenlerine göre konumları Şekil 5'de, modellenen en kesitten TBM'lerin geçiş tarihlerine göre hazırlanan zaman-oturma grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir.



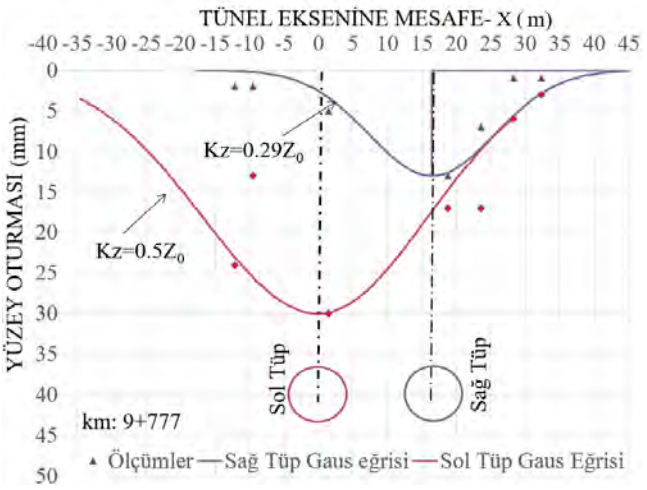
Şekil 5. İncelenen en kesitte izleme noktalarının konumları

En kesit üzerinde bulunan ölçüm noktaları dikkate alınarak çizilen oturma teknesinin enine kesiti Şekil 7'de gösterilmiştir. Oturma-tünel eksenine yatay mesafe ilişkisini gösteren ve normal dağılım eğrisini en iyi tanımlayan eşitlik aynı şeklin üzerinde verilmiştir.



BMP	10.01.2009	17.01.2009	24.01.2009	31.01.2009	2.02.2009	3.02.2009	4.02.2009	5.02.2009	9.02.2009	11.02.2009	12.02.2009	13.02.2009	14.02.2009	17.02.2009	25.02.2009	28.02.2009	2.03.2009	9.03.2009
a318	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-5	-5	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-13
a319	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-2	-3	-2	-2	-18	-19	-22	-23	-23	-23	-23	-24
a320	-1	-1	-1	-5	-5	-5	-5	-5	-6	-6	-28	-28	-28	-29	-30	-30	-30	-30
a347	-1	-2	-2	-13	-13	-14	-14	-14	-14	-14	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17
a350	-1	-1	-1	-7	-7	-7	-8	-6	-7	-7	-7	-15	-15	-17	-17	-17	-17	-17
a351	-1	-1	-1	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-5
a352	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

Şekil 6. İzleme noktalarında ölçülen oturmaların zamanla değişimi



Şekil 7. Tüpler üzerinde gelişen oturma teknesinin en kesitte Gauss eğrisine tanımlanması

Buradan da izleneceği gibi aynı kotta yan yana bulunan tüplerden birincisinin kazısı sırasında 13 mm'lik ve arkadan gelen ikinci makinanın 12 gün sonra aynı noktadan geçişi sırasında ise 30 mm'lik maksimum oturmalar gerçekleşmiştir.

Tasman dönüm noktasını tanımlamakta kullanılan jeomekanik parametre (k) kum ve kumlu kil birimleri içerisinde sürülen birinci tüp için 0,29 olarak belirlenmiş olup, bu değer O'Reilly ve New (1982) tarafından kum için önerilen değerle örtüşmektedir. Aynı birim içerisinde sürülen ve arkadan gelen ikinci tüpün aynı noktadan geçişi sırasında bu değerin yükselerek 0,50 mertebesine ulaştığı belirlenmiştir.

Belirlenen bu durum, ikiz tünellerin kazılması sırasında ortamın birinci tüpün geçişi sırasında örselenmiş olduğunu göstermektedir (Mahmutoğlu 2011, Peck 1976).

Mahmutoğlu (2011), ikiz tünel kazılarının örselenmeden dolayı etkileşim alanının arttığını, k (zemin parametresi) değerinin de kumlu katı killerde 0,82-0,86 mertebelerine ulaştığını vurgulamıştır. Aynı ortam yinelenmeli zorlanmalar altında zorlanmanın sayı ve süresine bağlı olarak farklı dayanım parametreleri kazanır (Vardar, 2016). Ayrıca, kumlu birimler içerisinde sürülen tünellerde drenajlı koşulların oluşmasının da etkili olabileceği bilinmektedir.

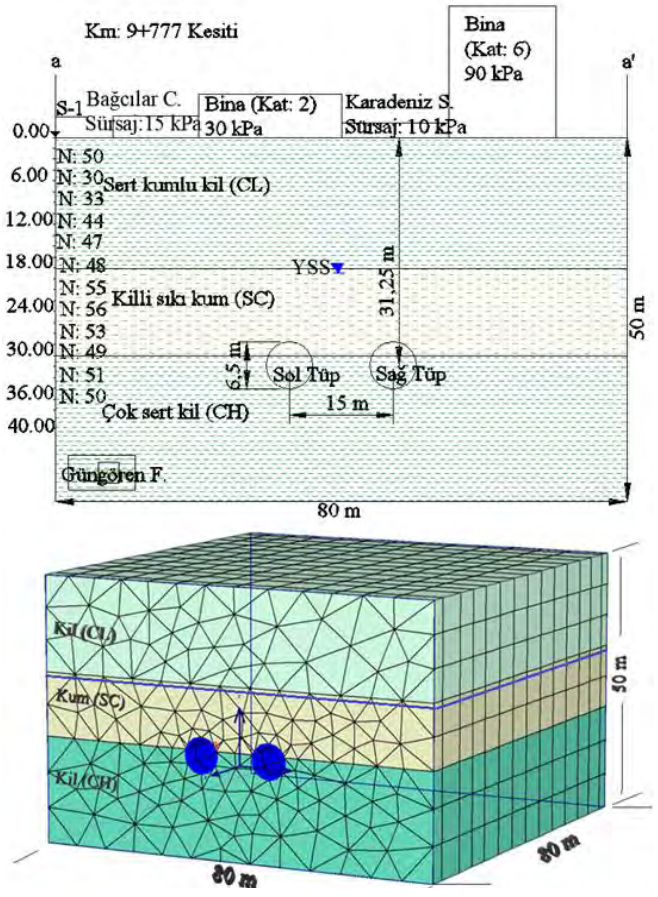
2.2 Nümerik Analizler

Seçilen analiz kesitinde (Km: 9+777), İkiz tünel kazısına bağlı yüzey oturmaları Plaxis sonlu elamanlar programı kullanılarak değerlendirilmiştir. EPB-TBM parametreleri, (hız, EPB basıncı, enjeksiyon basıncı) zeminin drenaj koşullu parametreleri (Çiz. 2), örtü kalınlığı, kazı boyutu, tüplerin ofset mesafesi dikkate alınarak oluşturulan simülasyonda kazı ve imalat aşamaları analiz öncesi başlangıç gerilme durumu, yüzeyde yer alan binaların yükleri ve yolların sürsaj yükleri saha ile bire bir olacak şekilde oluşturulan modele girilmiş ve analiz öncesi deplasmanlar sıfırlanmıştır. Tünel kaplaması elastisite modülü 30 GPa, Poisson oranı 0,15 ve birim hacim ağırlığı 24 kN/m^3 alınmıştır. TBM'in konikliğinden kaynaklanan kuyruk yarıçapı ile olan farkın etkisi % 0,5'lik bir kasılma kullanılarak modellenmiştir. Analizlerde EPB basıncının kazı kesitinin en üst noktasında 200 kPa, en alt noktasında ise 291 kPa, enjeksiyon basıncının ise 300 kPa olduğu kabul edilmiştir. Hesap kesit 50x80 boyutunda seçilmiş ve z yönünde 80 metre uzatılmıştır (Şek. 8).

İki boyutlu analizlerde kesit 50x150 m boyutunda alınmıştır. Oluşturulan geometrik modelde tünellerin kazı çapı 6,5 m ve tünel merkezleri arası mesafe uygulamadaki ile aynı (15 m) olacak şekilde seçilmiştir. Örtü kalınlığı incelenen kesitte 31,25 m olup, tünel kazıları bu derinlikte modellenmiştir. Modelde sağ tüp, sol tüpün önünde 66 m mesafede (12 gün) ilerletilmiştir. TBM'lerin bekleme süreleri dahil ortalama hızları 5,5 m/gün alınmıştır (Ocak ve Bilgin 2009).

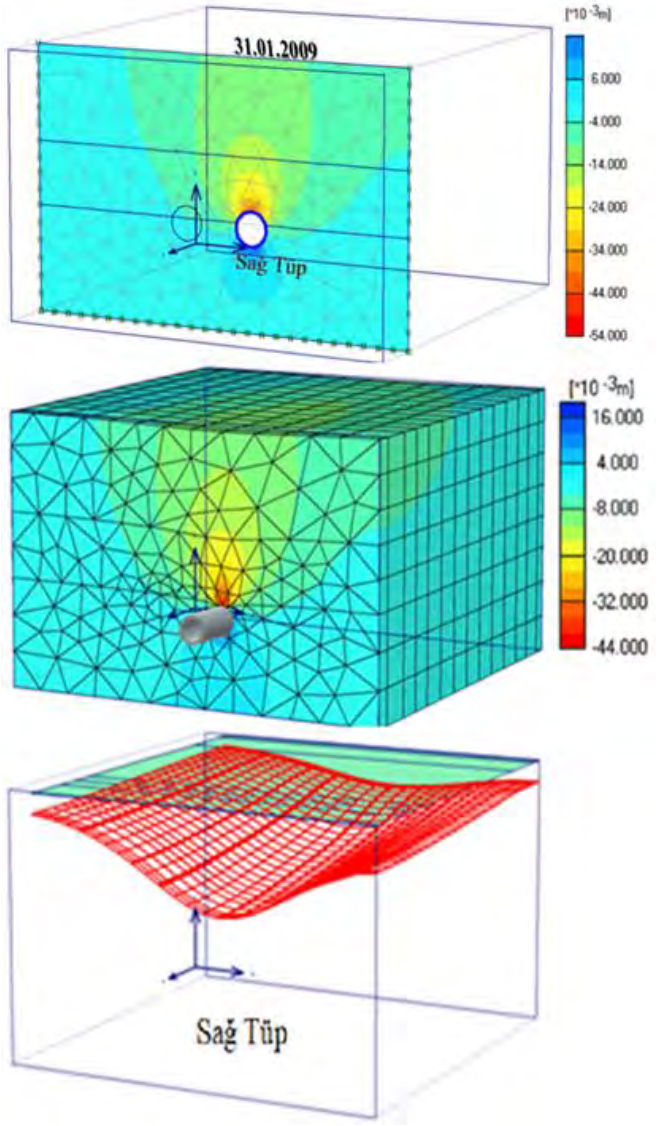
Çizelge 2. Seçilen zemin parametreleri

Litoloji	Derinlik [m]	E [MPa]	c [kPa]	ϕ [°]	κ [m/s]
Kumlu kil (CL)	0-18	24	16	26	10^{-5}
Killi kum (SC)	18-30	35	1	35	10^{-3}
Sert kil (CH)	30-50	43	220	1	10^{-7}



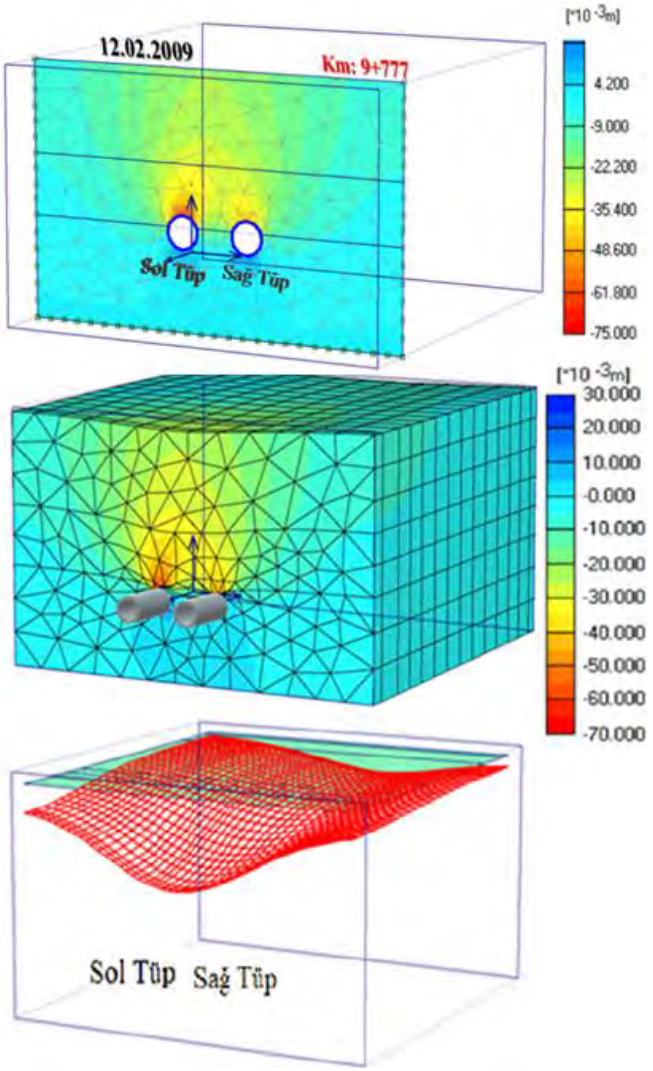
Şekil 8. Analiz zemin modeli (Demir, 2018)

İncelenen kesitte (Km: 9+777) 3 boyutlu analiz sonucunda önde ilerletilen sağ tüp üzerinde oturma 11,35 mm ve arkadan gelen 12 gün sonra aynı noktadan geçen ikinci tüpün neden olduğu oturma miktarı 24,83 mm olarak hesaplanmıştır. İkinci tüpün geçişi sırasında oturma çanağının genişlediği ve maksimum oturmanın ikinci tüp üzerinde gerçekleştiği görülmüştür (Şek. 9 ve 10).



Şekil 9. Sol tüpün neden olduğu deplasman

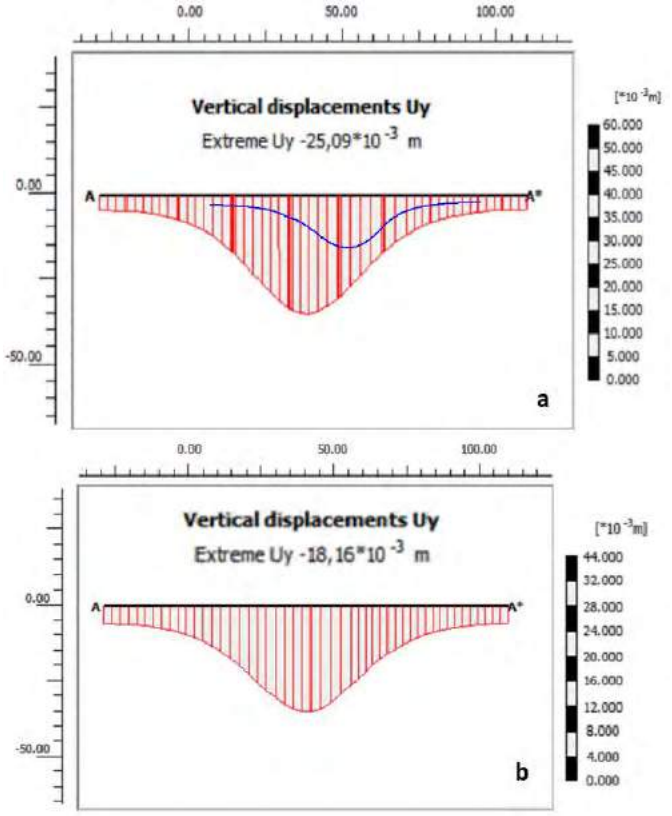
Hesaplanan oturma miktarları ile ölçülen oturma miktarları birbirine yakın olup, benzer projelerin fikir ve planlama aşamalarında oturmaların öngörülmesi ve proje önlemlerine yön verilmesi açısından önemlidir.



Şekil 10. Sağ tüpün neden olduğu deplasman

Tünel tasarımında genel olarak uzun dönem (long-term) analizlerde drenajlı koşulların geçerli olduğu varsayılmaktadır. Ancak permabilitesi yüksek ortamlar içerisinde açılan tünellerde kazı hızına bağlı olarak kısa dönemde bile kazı ile eşzamanlı su boşalımı olabileceği, drenajlı koşulların oluşabileceği ve uzun vadede ise suyun yükselerek ilksel halini alıp drenajsız koşula dönebileceği teorik açıdan mümkündür.

Mair ve Taylor (1997), zemin permeabilitesinin $1x10^{-6}$ m/s'den büyük olduğu ve kazı hızının 1m/sa'ten az olduğu durumlarda drenajlı koşulların geçerli olduğunu vurgulamıştır. İki boyutlu sonlu elmanlar yöntemi ile tüplerin eş zamanlı (senkron) olarak sürülmesi durumunda oturmanın 18,16 mm olacağı (Şek. 11) ve maksimum oturmanın iki tüpün ortasında oluşacağı hesaplanmıştır.



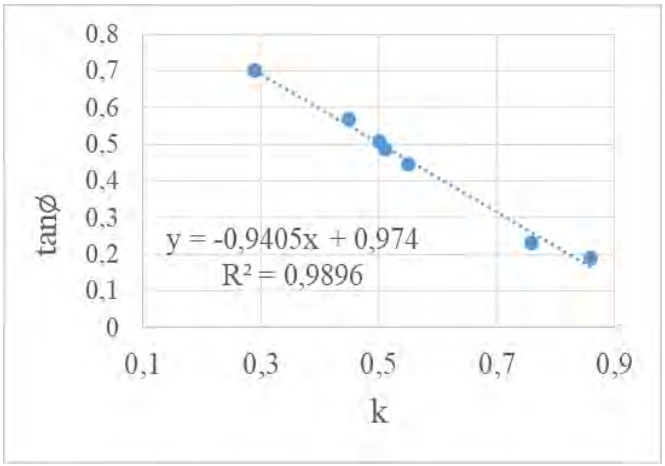
Şekil 11. a- asenkron ilerleme b- senkron ilerleme durumunda gelişen oturmalar (Demir 2018)

Çalışmada elde edilen k parametresi ile bölgede daha önce sürdürülen çalışmalarla (Erçelebi ve diğ. 2011, Mahmutoğlu 2011) belirlenen k değerleri Çizelge 3'de sunulmuştur. Ayrıca, k parametresi içsel sürtünme açısı ile ilişkilendirilmiştir (Şek. 12). Bu değerlendirme sonucunda, mekanize tünel kazısının yapıldığı Güngören Formasyonu için k parametresinin içsel sürtünme açısı ile ilişkilendirilebileceği görülmüştür. Burada birinci tüp bakir bir ortamda sürüldüğü için ortamın içsel sürtünme açısı pik mertebede alınmıştır. İkici tüp birinci tüpün sürülmesi ile örselenen ortamdan geçeceği bilindiğinden, ikinci tüp için ortamın jeomekanik anlamda kalıntı (rezidüel) içsel sürtünme açısı ile tanımlanabileceği göz önüne alınarak rezidüel parametre kullanılmıştır.

O'Reilly ve New (1982), k değerini kum için 0,28 olarak önermiştir. Standartlara göre kum için ortalama içsel sürtünme açısı 35^0 alındığında 1-tanø korelasyonu ile k değeri kum için 0.29 olarak elde edilmektedir.

Çizelge 3. Güngören Formasyonunda elde edilen k değerleri

Bölge	Km	Sağ Tüp k	Sol Tüp k	$\emptyset_{pik}$ Sağ Tüp	$\emptyset_{rez}$ Sol Tüp	PI (%)	
Tavukçu Dere	4+425	0,51	0,86	26	11	23-44	(Mahmutoğlu 2011)
Tavukçu Dere	4+460	0,55	0,76	24	13	-	(Mahmutoğlu 2011)
Esenler	0+850	0,45	-	35-24	-	33	(Erçelebi ve diğ 2011)
Karadeniz Sokak	9+777	0,29	0,5	35	27	11-23	(Bu çalışma)

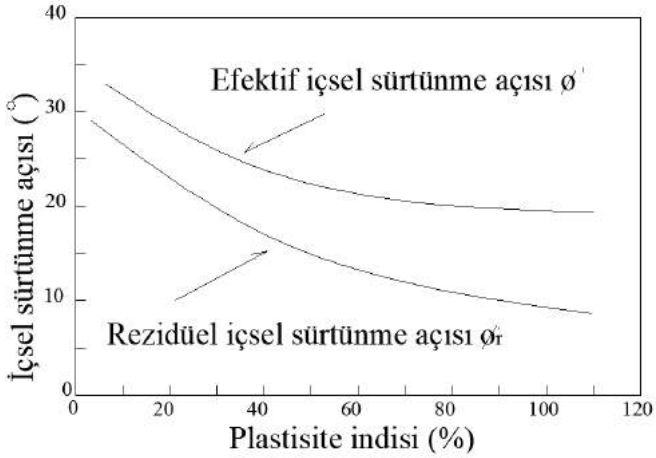


Şekil 12. İçsel Sürtünme açısı ile k parametresi korelasyonu

Rezidüel ve pik içsel sürtünme açıları Sorensen ve Okkels (2013) tarafından önerilen içsel sürtünme açısı ile plastisite indisi korelasyonu Eşitlik 3'e göre seçilmiş, aynı zamanda Gibson (1953) tarafından verilen korelasyon abağı ile kontrol edilmiştir (Şek. 13).

$$\phi' = 45 - 14.\mathrm{Log}(PI) \quad (3)$$

Burada, PI zeminin plastisite indisini (%) ve ϕ' zeminin içsel sürtünme açısını göstermektedir.



Şekil 13. Plastisite indisi - içsel sürtünme açısı ilişkisi (Gibson 1953

3 SONUÇLAR

İstanbul Metrosu Kirazlı-İkitelli arasında, tünel eksenine dik olarak tesis edilen izleme kesiti (Km:9+777) üzerinde birinci tüpün geçişi sırasında maksimum oturma 13 mm ve arkadan gelen 12 gün sonra aynı noktadan geçen ikinci tüpün oluşturduğu maksimum oturma 30 mm olarak ölçülmüştür.

Tasman dönüm noktasını tanımlamakta kullanılan jeomekanik parametre (k) kum birimi içerisinde sürülen birinci tüp için 0,29 olarak belirlenmiştir. Aynı birim içerisinde sürülen ve arkadan gelen ikinci tüp aynı noktadan geçtikten sonra bu değerin yükselerek 0,50 mertebesine ulaştığı belirlenmiştir. İkinci tüp üzerinde daha yüksek oturma ile karşılaşılması ve oturma etki alanının artması, ortamın birinci tüpün geçişi sırasında örselenmiş olduğu ve Güngören Formasyonu'nun kumlu seviyelerini de içeren bölge içerisinde sürülen bu tünellerde yeraltı suyunun tünel içerisine drene olması ile birlikte ortamın drenajlı duruma geçmesinin de etkili olabileceği anlaşılmaktadır.

İkiz tünellerin yüzeyde oluşturduğu oturmaların kum seviyelerinin olduğu bölgede iki kat arttığı tespit edilmiş olup, Miyosen çökellerinin su içeren kum-killi kum ortamları tünel kazıları sırasında su geliri nedeni ile kritik kesimler olduğu anlaşılmıştır.

Zemin içsel sürtünme açısı ile oturma çanağının genişliğini veren jeomekanik parametre (k) arasındaki ilişkiyi belirlemek için yapılan değerlendirmede ise, içsel

sürtünme açısı ile k parametresi arasında iyi bir korelasyonun (R^2= 0,99) olduğu belirlenmiş, benzer şekildeki mekanize tünel kazılarında, Güngören Formasyonu için k parametresinin 1-tanø ile belirlenebileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

Arıç, C. 1955. Haliç ve Küçükçekmece Gölü Bölgesinin Jeolojisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü Maden Fakültesi, İstanbul.

Bakılar, G.S. 2006. Bağcılar-İstoç İstasyonu Arası Jeolojik-Jeoteknik Araştırma Raporu. İstanbul: ELC Group.

Brinkgreve, R.B.J. & Vermeer, P.A. 2001. PLAXIS-Finite Element Code for Soil and Rock Analysis. Plaxis 3D-Tunnel Manuals, PLAXIS B.V., Balkema, Rotterdam.

Demir, S. 2018. İstanbul Metrosu Kirazlı-İlitelli Arasındaki İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Yüzey Oturmalarının Değerlendirilmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Ercelebi, S.G., Copur, H., Ocak, I. 2011. Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM. *Environmental Earth Sciences*, Springer-Verlag.

Gibson, R.E. 1953. Experimental determination of the true cohesion and true angle of internal friction in clays, Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Volume 1, pp. 126-130.

Mahmutoğlu, Y. 2011. Surface subsidence induced by twin subway tunneling in soft ground conditions in Istanbul. *Bull Eng Geol Environ,* Springer.

Mair, R.J. & Taylor, R.N. 1997. Theme lecture: Bored tunnelling in the urban environment. *Proceedings of the 14th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng*, Hamburg, pp.2353–2385.

Martos, F. (1958). Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors. *International Strata Control Congress*, Leipzig, pp. 191-205.

Ocak, I., Bilgin, N. 2009. The Performance of Two EPB Machines in Istanbul Metro Tunnel Drivages In Soft And Shallow Ground, 35th *ITA-AITES World Tunnel Congress.*

O'Reilly, M.P. & New, B.M. 1982. Settlements above tunnels in the United Kingdom their magnitude and prediction, *Proc. of Tunnelling"82 Symposium*, London, pp. 173-181.

Peck, R.B. 1969. Deep excavations and tunnelling in soft ground. In Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art Volume, Mexico, pp. 225–290.

Sorensen, K.K. & Okkels, N. 2013. Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, pp 1-6.

Vardar, M. 2016. Türkiye'de dünden bugüne tünelcilik ve yeraltı yapıları. *1. Ulusal tünelcilik ve yeraltı yapıları kongresi*, Ankara.

Zor Şartlarda Kazının TBM Performans Parametreleriyle Değerlendirilmesi, Silvan Tüneli Örneği

Evaluation of Tunnel Excavation under Difficult Conditions through Performance Parameters of Tunnel Boring Machine, with an Example of Silvan Tunnel

D. Aydın, M. Ayhan
Dicle Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

ÖZET Mekanize kazı makinalarının kazılacak formasyona uygun seçilmesi, tasarımlandırılması hatta kazı sırasında performans verilerinin analiz edilmesi kazının hızlı ve başarılı bir şekilde tamamlanması açısından önemlidir. Verilerinin doğru analiz edilmesi yetersiz verinin söz konusu olduğu projelerde geçilen formasyon hakkında bilgi elde etmek, makinaları daha verimli kullanmak hatta riskli durumları önceden belirlemek açısından önemlidir. Bu çalışmada iki karstik boşluğun geçildiği, yüksek su gelirinin yaşandığı dolayısıyla uzun süre kazının durduğu, kısa uzunluğa rağmen (4668 m) farklı formasyonların geçildiği Silvan tünelinde kullanılan sert kaya çift kalkanlı TBM'in performans verileri analiz edilerek geçilen formasyonların özellikleri değerlendirilmiştir.

ABSTRACT It is important to choose and design mechanical excavation machines in accordance with formation properties and to analyze performance data of machines during the excavation, in order to complete the excavation in a fast and successful way. Otherwise loss of time and property even life are inevitable. Especially it is important to analyze the performance data accurately in projects with insufficient data to use the machine more efficiently and to get information about the formations and risky situations before encountering. These data help us to understand of excavation condition via machine forces. In this study, properties of the formations to being excavated and risky environments were assessed by analyzing the performance parameters data of double shield hard rock tunnel boring machine used in Silvan Tunnel where different formations and even two karstic regions with a big amount of water inflows were passed, in spite of short duration (4668 m) of excavation.

1 GİRİŞ

Silvan Barajı iletim kanalı ikinci kısmını oluşturan Silvan tüneli, Diyarbakır ili Silvan ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 1).

Serbest akımla çalışacak Silvan Tünelinin; iç çapı 7.00 m, dış çapı 7.60 m ve kazı çapı 7.90 m olup, 10210 m uzunluğa sahiptir. Tünel kazısında, Herrenknecht marka S-794 model çift kalkanlı sert kaya Tünel Açma Makinesi (TBM) kullanılmaktadır. Silvan tüneli zor şartlarda kazılan bir tünel olup, iki büyük karstik boşluk geçilmiş, büyük bir su problemi yaşanmış ve bu kısımlarda makina uzun süre yavaş ilerlemiş, 4668.70 m'de yaşanan metan parlaması sonucunda kazı faaliyetleri durmuştur.

TBM'ler günümüzde mekanize tünel açma makinaları arasında en yaygın kullanılan makinalar olmaya başlanmış olup, her türlü kayaç ve zemin ortamında kullanılabilecek çeşitleri vardır (Acaroğlu vd. 2008, Acaroğlu

vd. 2011). Özellikle su, ulaşım, kanalizasyon amaçlı şehir içinde açılan tünellerde neredeyse alternatifsiz kalmışlardır. Fakat ilk yatırım maliyeti oldukça yüksek, işe başlama süresi ise uzundur bu nedenle ancak hızlı kazı yapılması durumunda karlı olmaktadırlar (Ateş vd. 2014, Paltrinieri vd. 2016). Kayaç ortamına uygun seçilip, tasarlandıklarında çok yüksek performansa ulaşmakla birlikte, yüksek su geliri, çok yapışkan zemin, faylanma ve gazlı ortam gibi çok yüksek riskli ortamlarda uzun süre kazı yapılamaması hatta makinanın yeraltında bırakılması gibi sonuçlar söz konusu olabilmektedir (Price 2009, İlci vd. 2014).

Şekil 1. Projenin alanını gösterir yer bulduru haritası

Makina seçimi, tasarımı, performans tahminleri genellikle seyrek aralıklarla yapılan sondaj verileriyle gerçekleştirilmektedir. Jeoteknik araştırmaların iyi yapılmaması, önceden tespit edilememiş riskli ortam ihtimalini artırmaktadır (Bilgin vd. 1999, Yağız 2007, Gertsch vd. 2007, Balcı 2009, Hassanpour vd. 2011, Toth vd. 2013, Yağız vd. 2015, Ma vd. 2016, Rostami 2016, Hassanpour vd. 2016). Ayrıca kazı sırasında arının, kalkanlı makinalarda yan duvarların kapalı olması nedeniyle kazı sırasında formasyonun durumunun tespiti de zor olmaktadır (Yamamoto vd. 2003). Bu tünel formasyonunun gözlenip kayaç sınıflandırma sistemlerinin uygulanamamasına, ayrıca makinadan çıkan numunelerin boyutlarının küçük olması nedeniyle standart dayanım deneylerinin yapılamamasına neden olmaktadır. Bu nedenle makinaların performans parametrelerini belirlemek için tutulan verilerin formasyonun durumunu belirlemek için de bir fırsat olduğunun bilincinde olunmalı ve bu veriler en iyi şekilde değerlendirilmelidir. Bu değerlendirmeler formasyon hakkında bilgi alınması yanında riskli durumların önceden tespiti ve buna göre tedbirlerin alınması açısından da önemlidir.

Bu amaçla, bu çalışmada Silvan tünelinin TBM makinası ile kazılması sırasında tutulmuş verilerin analizlerinin nasıl yapılacağı belirlenerek, karşılaşılan formasyonların kazılabilirlik özellikleri ve riskli durumlarda makina performansının nasıl etkilendiği belirlenmiştir.

Tünellere su geliri ve karstik boşluklar çatlaklı yapıya sahip kayalarda yapılan yeraltı kazılarında karşılaşılabilecek ve kazı süresi ile maliyetleri olumsuz etkileyecek önemli problemlerdendir (Fernandez ve Moon 2010). Aşırı su geliri, faylanma, yüksek aşındırıcı kayaç veya yapışkan zemin gibi zor kazı şartlarında ve riskli ortamlarda bu hızların değerleri çok düşmekte hatta makinanın uzun süre durmasına sebep olabilmektedir.

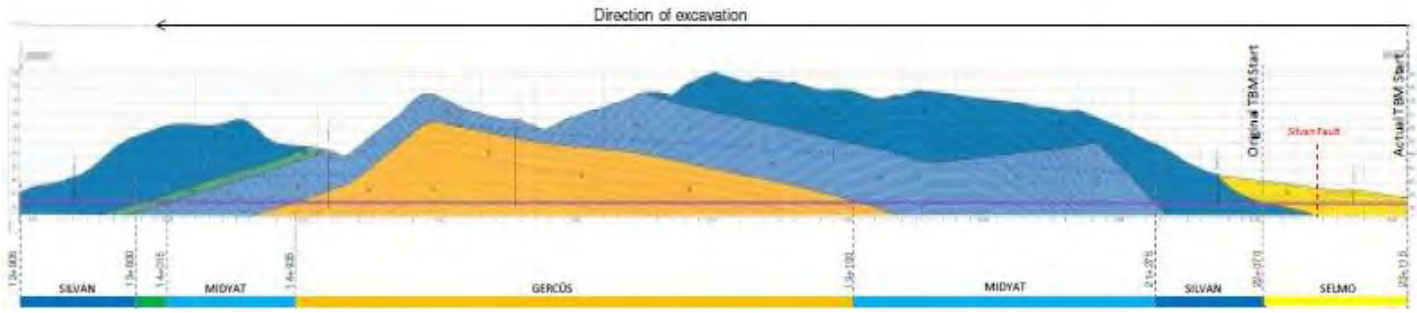
Literatürde bu konuda çok sayıda örnek söz konusudur (Buergi vd. 1999, Barton 2000, Mare'chal ve Etcheverrya 2003, Khave 2014).

2 JEOLOJİ

Silvan Tüneli güzergahı, Güneydoğu Anadolu bindirme kuşağının kıvrımlı kuşak üzerinde bulunan Hazro Antiklinalinde yer almaktadır. Bölgede, asimetrik kıvrımlar, ters faylar ile bunları belli bir açı ile kesen doğrultu atımlı faylar bulunmaktadır. Silvan Formasyonu ve Midyat Formasyonu, kırıklı ve karstik bir yapı sunduklarından yeraltı suyu yönünden önemli akiferlerdir. Tünele komşu havzalar ve antiklinal kanatlarında bulunan senklinallerden beslenen kaynaklar boşalmaktadır. Mühendislik Jeolojisi raporundaki 5 adet temel sondajı verilerine

göre tünel güzergahı boyunca geçilmesi öngörülen formasyonlar ve uzunlukları Şekil 2'de verilmiştir.

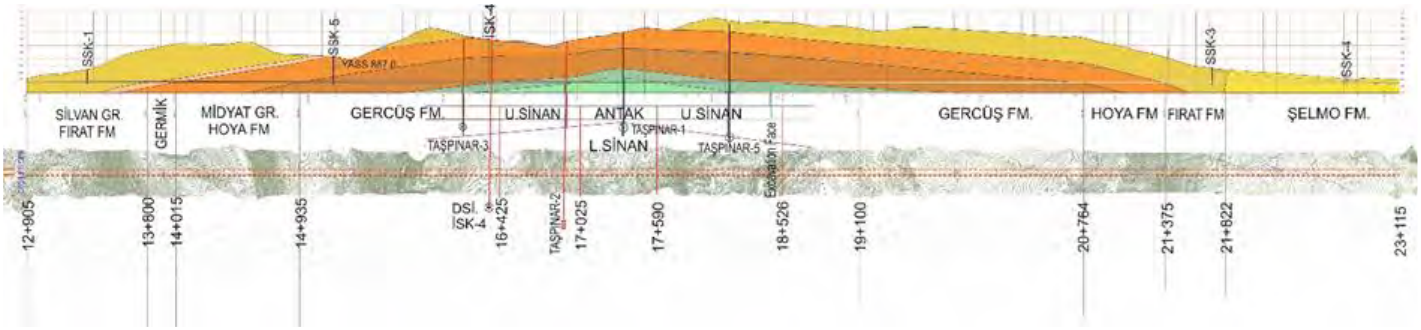
Ancak tünelin kazı ve desteklemesi sırasında, beklenenin çok üzerinde su geliri ve ön görülmeyen parlayıcı patlayıcı gaz sorunlarıyla karşılaşılmıştır. Metan parlamasının olduğu noktaya kadar, Tünel inşaatının (bir tüp) yaklaşık %45'i tamamlanmış, geçilen formasyonlar ve devamlılıklarının mühendislik jeolojisi raporundan farklı olduğu görülmüştür (Çiz. 1). Bölgede TPAO'nun yaptığı petrol ve doğal gaz sondajlarından da yararlanılarak çizilen jeolojik kesit Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2. Tünel güzergahı boyunca geçilmesi öngörülen jeolojik formasyonlar

Çizelge 1. Tünel ekseni boyunca öngörülen ve geçilen formasyon uzunlukları

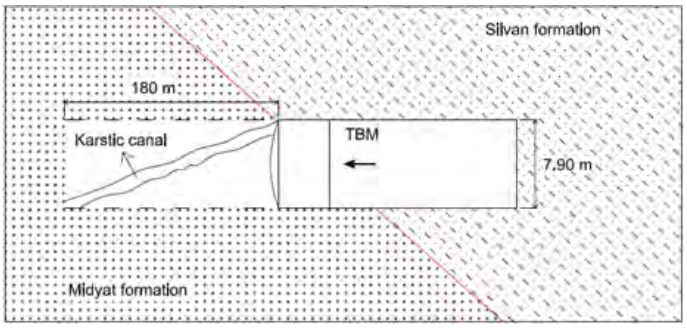
Formasyon	Öngörülen Uzunluk (m)	Geçilen Uzunluk (m)
Şelmo	1050	1293
Silvan	805	447
Midyat	2175	661
Gercüş	4200	2187
Üst Sinan	---------	80



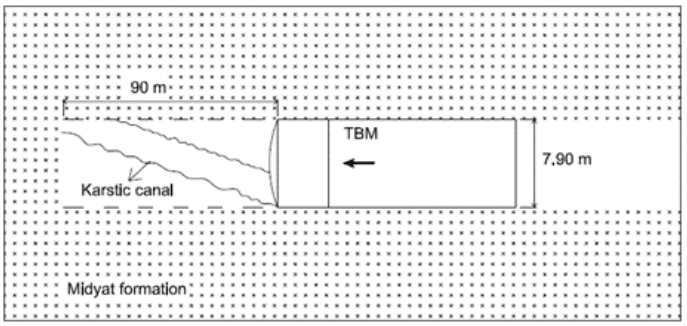
Şekil 3. Tünel açımı ve yeni sondajlarla elde edilen verilerle çizilen yeni kesit

3 SİLVAN TÜNELLERİNDE KARŞILAŞILAN SU PROBLEMİ VE TBM PERFORMANSINA ETKİSİ

Bölge yeraltı suyu bakımında geniş bir havzaya sahiptir. Yörede bulunan yeraltı suyunun çoğu Silvan ve Midyat formasyonlarından alınmaktadır. Silvan formasyonu geçilirken bir miktar (200 lt/sn) su geliri ile karşılaşılsa da aşırı su geliri problemi Midyat formasyonunda yaşanmıştır. Özellikle karstik boşluklar içeren karbonat kaya kökenli Midyat formasyonu içerisinde bulunan tünelin 1730. metresindeki karstik boşluktan 1663 lt/sn ve 2059. metresindeki karstik boşluktan ise yaklaşık 500 lt/sn'lik olmak üzere toplam 2200 lt/sn su geliri olmuştur. I. Karstik boşluk 180 m, ikinci karstik boşluk ise yaklaşık 90 m uzunluğunda olup, bu karstik boşlukların genel yapısı ve özellikleri Şekil 4a ve Şekil 4b'de verilmiştir.



Şekil 4a. I. Karstik boşluk



Şekil 4b. II. Karstik boşluk

Tünele boşalan bu yeraltı suyundan dolayı güzergah çevresinde 450 lt/sn kapasiteye sahip su kaynaklarında kuruma sorunu yaşanmıştır. Bunun neticesinde 80000 nüfuslu Silvan ilçesi ve çevredeki yerleşim birimlerinde önemli düzeyde su sorunu ortaya çıkmıştır.

Su gelirini önlemek için, karstik boşlukların olduğu bölgelere kimyasal enjeksiyon uygulanmıştır.

Kimyasal enjeksiyon işlemi ile birlikte tünelde yaklaşık 2200 lt/sn'ye ye ulaşan su geliri göreceli olarak önce 1300 l/sn, sonra 1100 lt/sn seviyelerine inmiş, enjeksiyon işlemi bitiminde ise 300 lt/sn seviyesine düşürülmüştür.

Tünele su gelirinin olduğu kesimlerde TBM'den faydalanma oranında azalma, gecikme ve bekleme sürelerinde artış gözlenmiş, TBM performansı ve ilerleme hızı düşmüştür. Günlük ortalama ilerleme hızı; Şelmo formasyonunda 14,98 m, Silvan formasyonunda 30,53 m, Midyat formasyonunun karstik içermeyen kısımlarında 12,60 m, 1. Karstik bölgenin ilk 85 m'sinde 8,50 m, kalan son 95 m'sinde 2,96 m ve ikinci karstik boşlukta 22,50 m olmuştur. Birinci karstik boşluğun son 95 metresinde 18 gün boyunca ilerleme söz konusu olmamıştır.

4 KAZILAN FORMASYONLARIN TBM PERFORMANS VERİLERİ İLE ANALİZ EDİLMESİ

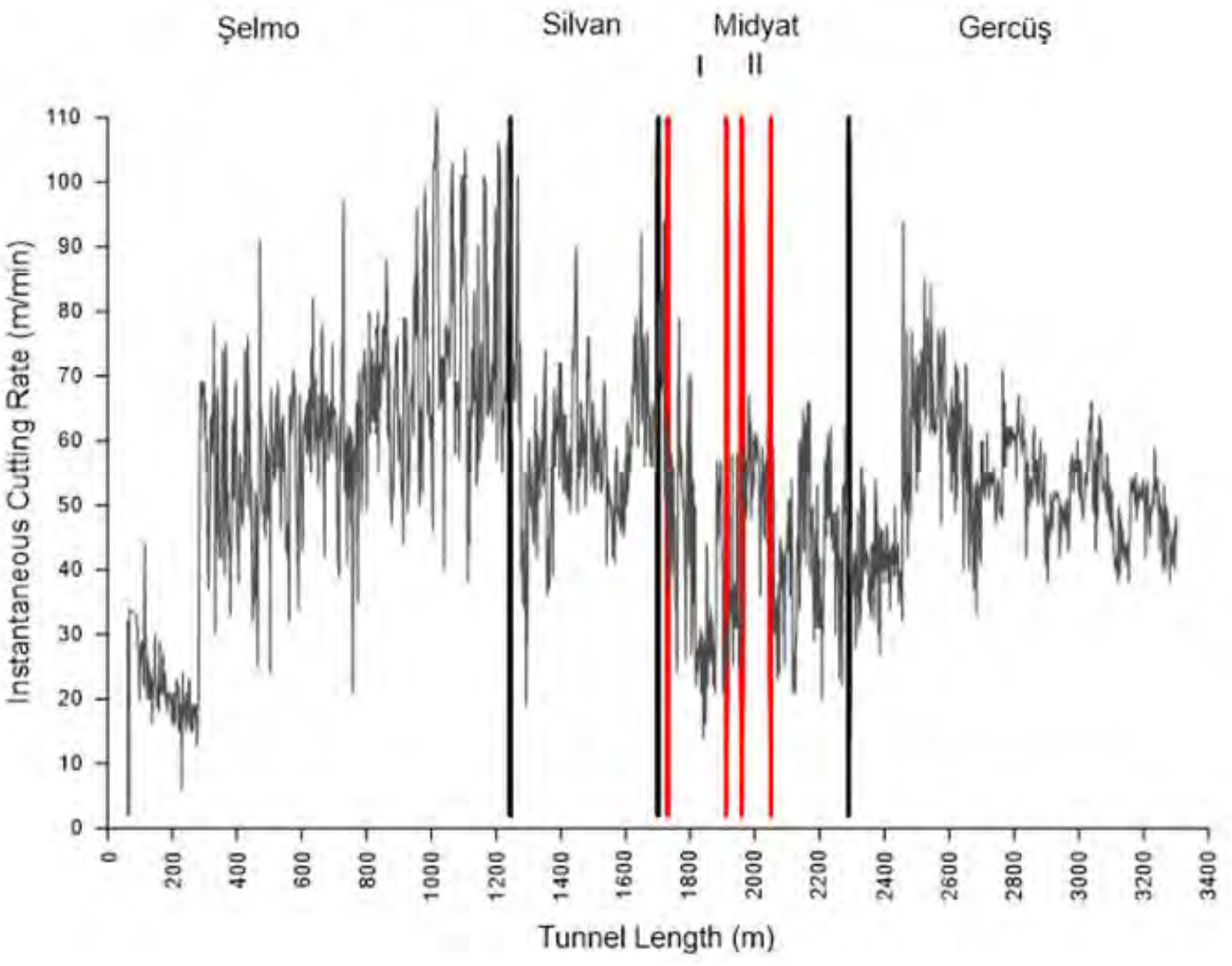
Kazı makinaları performans parametreleri kazı sırasında ölçülüp anlık olarak gözlenebilmekte olup, son yıllarda bunları kayıt eden sistemler de makinalara eklenebilmektedir. TBM performans verileri genel olarak ilerleme verileri ve kuvvet dataları şeklinde sınıflandırılabilir. İlerleme verileri; makinanın bir dakikadaki devir sayısı, bir dakikadaki ilerleme hızı ve bunların oranından elde edilen kesme derinliği veya penetrasyon miktarı yani bir dönüşteki ilerleme miktarıdır. Kuvvet değerlerinin kayıtları ise genel olarak keskilerin kayaca saplanmasına yardımcı olan itme kuvveti ve keskilerin kayaç içerisinde ilerlemesine yardımcı olan kafayı döndüren kuvvet olarak tanımlanan tork kuvveti şeklindedir. Bu verilerin iyi değerlendirilmesi, makinanın kazdığı formasyon hakkında bilgi edinilmesi ve makina performansının artırılması için neler yapılması gerektiği ve ileride karşılaşılabilecek riskli durumları tespit etmek açısından önemlidir.

Silvan tünellerinde kullanılan TBM'in anlık ilerleme verisine Şekil 5'ten baktığımızda karstik bölgelerde özellikle II. Karstik bölge ve I. Karstik bölgenin ilk 130 metresinde ortalama ilerleme hızlarında Midyat formasyonun diğer bölgelerine göre yüksek değerler gözlenmiştir. Bu bölgelerde günlük ilerleme hızlarının çok düşük olmasına rağmen anlık ilerleme hızları yüksektir (Şek. 6). Çünkü bu bölgeler içerdikleri boşluktan dolayı daha kolay kazılabilir kısımlardır fakat su gelirin yükselmesi birlikte yer yer killi siltli sedimanla dolu olan boşluklardan ani sediman boşalımı yığılmaları söz konusu olmuş olup anlık ilerleme değerlerini de düşürmüştür. I. Karstik boşluğun son 50 metresindeki düşüş bu nedenden dolayıdır.

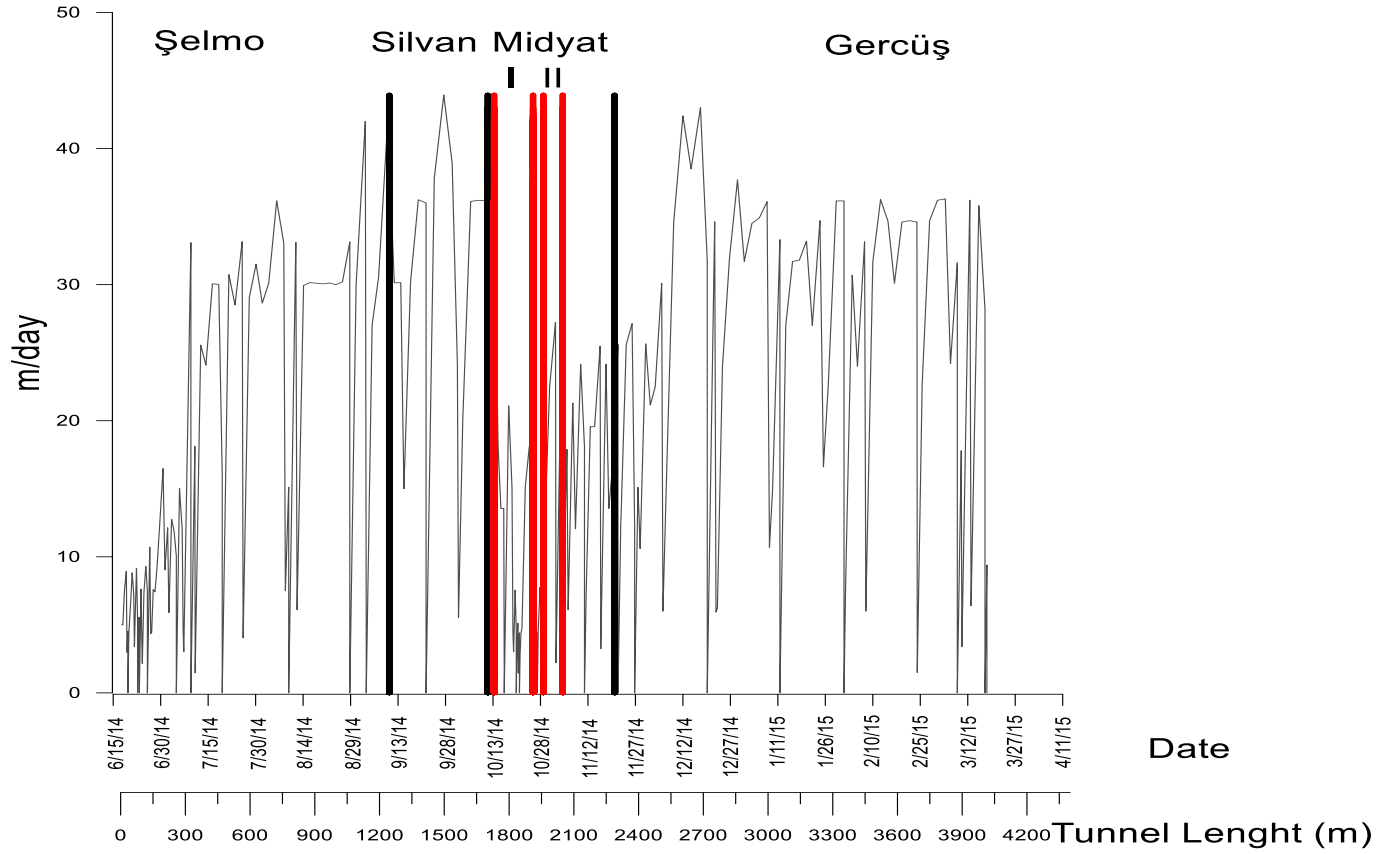
Bu kısımdaki hız değerleri Midyat formasyonunun diğer kısımlarına benzer çıkmıştır. Genel olarak diğer formasyonlara göre Midyat formasyonundaki anlık ilerleme hızındaki düşüklük ise RMR değeri yüksek, dayanımı görece daha iyi kireçtaşı

formasyonu olmasından dolayıdır. Silvan formasyonu da Midyat formasyonu ile benzer özellik göstermektedir. Şelmo formasyonu ise RMR ve RQD değerleri oldukça düşük kazılabilirliği kolay bir formasyon olmasına rağmen tünelin ilk 250 metresine kadarki bölgede hız değerleri çok düşük çıkmıştır. Bunun nedeni bu formasyonda yer yer çimento dolgulu konglomera merceklerinin varlığıdır.

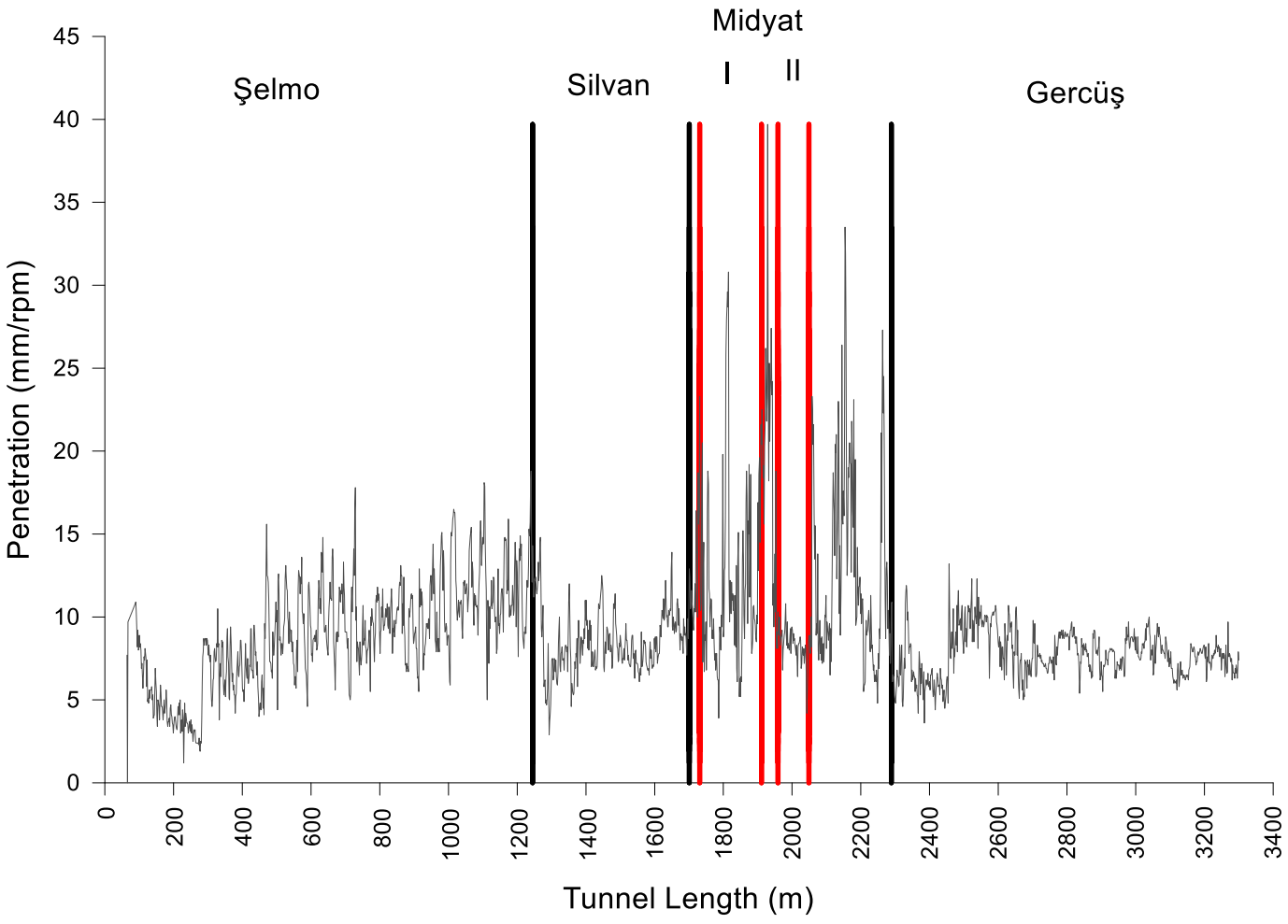
Geçilen formasyonlarda elde edilen penetrasyon değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Penetrasyon oranının yüksek değerlerde olması verimli kazı anlamına gelmemektedir. Çünkü her formasyon için harcanan enerjinin minimum olduğu bir optimum keskiler arası mesafe/kesme derinliği oranı vardır. Kesici kafada keskiler arası mesafe sabit olduğuna göre penetrasyon değeri değiştikçe bu optimum değere yakınlaşma ve uzaklaşma söz konusu olacaktır. Bu durumda kazılabilirliği kolay olan formasyonlarda devir sayısı daha yüksek tutulup, sert formasyonlarda daha düşük tutularak genel olarak optimum bir penetrasyon değerinin elde edilmeye çalışılması verimli kesmeyi ifade etmektedir. Silvan tünellerinde de Şekil 8'den gözlendiği gibi RPM değerleri genel olarak kolay kazılabilir formasyonlar için yüksek, zor kazılabilen formasyonlar için düşük tutularak penetrasyon değerleri daha stabil elde edilmeye çalışılmıştır. Fakat karstik bölgelerin olduğu formasyonun dramatik değişimler gösterdiği Midyat formasyonunda çok düşük (2-3) ve çok yüksek değerler (7-8) değerler söz konusudur bu da penetrasyon değişim aralığını artırmıştır. Bu bize formasyonun ani değişkenlik göstermesi ve belirsiz bir ortamda kazı yapılması nedeniyle RPM değerlerinin bu kadar değişken aralıklarda kullanıldığını göstermektedir.



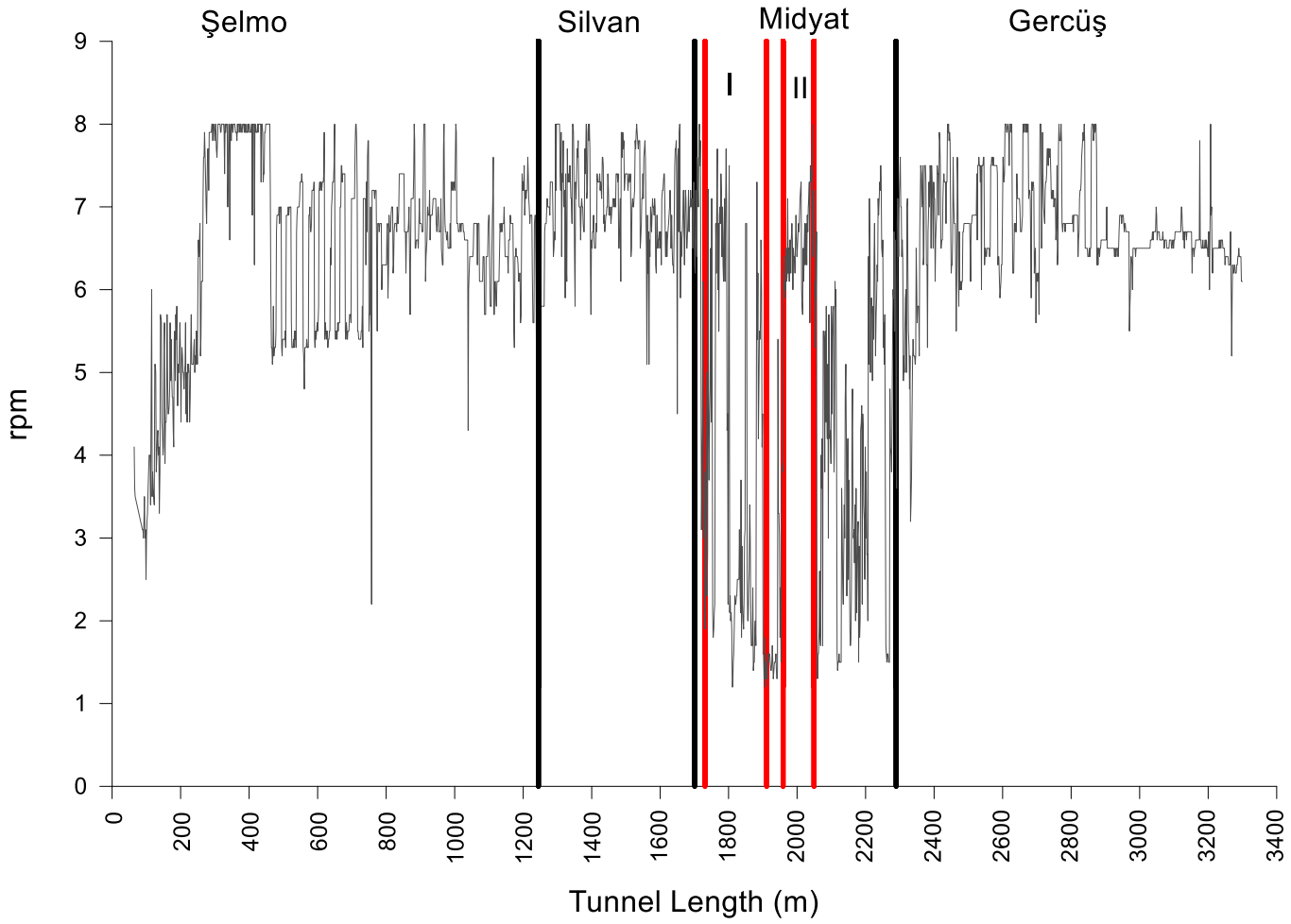
Şekil 5. Silvan tünellerinde kullanılan TBM'in anlık ilerleme verisi



Şekil 6. Silvan tünellerinde kullanılan TBM'in günlük ilerleme verileri



Şekil 7. Geçilen formasyonlarda elde edilen penetrasyon değerleri

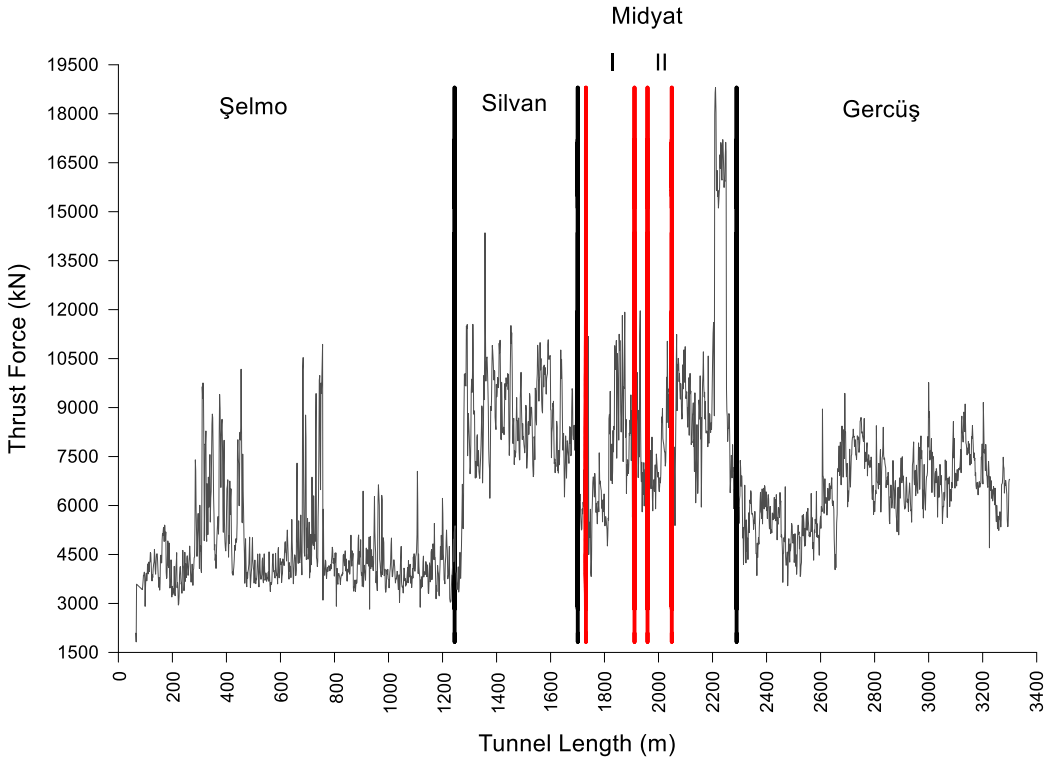


Şekil 8. Geçilen formasyonlarda elde edilen RPM değerleri

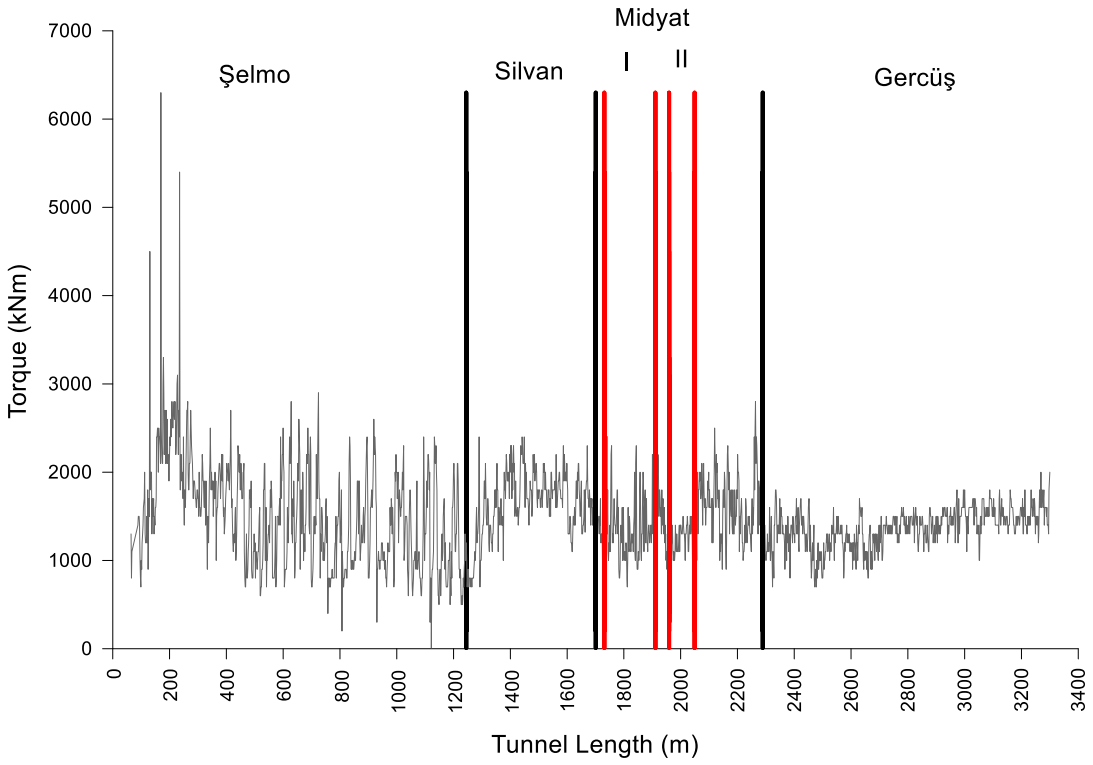
Bir kazı makinasının ilerleme hızı değerlerinin yanı sıra kuvvet değerleri de formasyonun durumu ve kazılabilirliği hakkında bilgi verir ve riskli durumlarda iyi değerlendirilmesi gerekir. Bu doğrultuda Silvan tünelinin kazısında kullanılan TBM'in Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilen itme kuvveti ve tork değerlerine baktığımızda genel olarak itme kuvveti değerlerinin, görece dayanımı ve kayaç sınıflandırma değerleri RMR ve RQD değerlerinin yüksek olduğu formasyonlarda daha yüksek olduğu görülmektedir. Tork değeri için bu çok açık değildir, çünkü zemin karakteri gösteren formasyonlarda da bu değer yüksek olabilmektedir. Şelmo formasyonunun çimento dolgulu konglomera merceği içeren ilk 250 metresindeki tork değeri diğer bölgelere göre daha yüksek çıkmıştır. Silvan ve Midyat formasyonlarında ise itme kuvveti değeri yukarıdaki bahsettiğimiz nedenden dolayı yüksek olmakla birlikte yine karstik boşlukların olduğu kesimlerde itme kuvvetinde düşüş gözlenerek Şelmo ve Gerçüş formasyonlarına yakın değerler elde edilmiştir.

Her ne kadar tork ve itme kuvveti değerleri formasyonların kazılabilirlikleri hakkında bilgi verse de makinanın hızlı veya yavaş kullanımına göre değişimler söz konusu olacağından her zaman net sonuçlar vermeyebilir. Bu nedenle bu değerlerin anlık ilerleme hızına bölünerek elde edilen değerleri kayaçların kazılabilirlikleri hakkında daha net sonuç vermektedir. Gerçekten Şekil 11'deki itme kuvveti/ilerleme hızı grafiği kayacın batmaya karşı gösterdiği direnci vermekte olup bu anlamda kazabilmek için en yüksek itme kuvvetinin gerektiği formasyon Midyat formasyonu ve Şelmo formasyonunun ilk 250 metresi olarak görülmektedir. Ancak yine karstik bölgelerin kazılabilmesi için, I. Karstik bölgenin son 50 metresi hariç düşük itme kuvvetine ihtiyaç duyulmuştur. Bu formasyonun değerleri daha detaylı Şekil 12' de gözlenebilir.

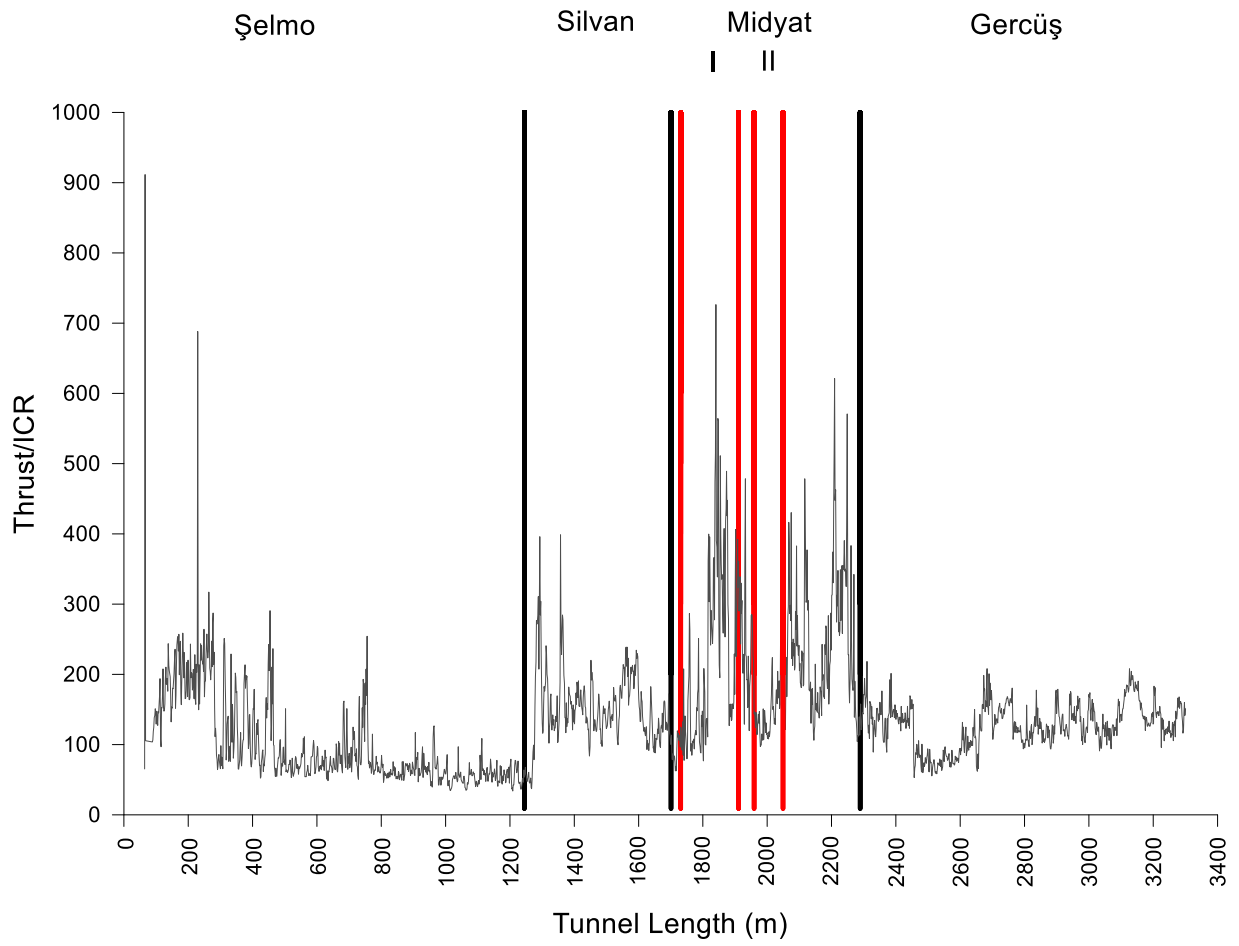
Aynı Şekilde tork değerlerinin anlık ilerleme hızına bölünmüş hali Şekil 13'te gösterilmiş olup, en yüksek tork ihtiyacı Şelmo formasyonunun ilk 250 metresi için olmuştur. Şelmo formasyonunun diğer kısımları ve Midyat formasyonu içinde, diğer formasyonlara göre tork ihtiyaçları yüksek çıkmış, ama yine karstik bölgelerin tork ihtiyaçları bulundukları formasyona göre daha düşük çıkmıştır. Karstik bölgelerdeki durumu daha iyi gözlemleyebilmek için sadece Midyat formasyonuna ait tork/ilerleme hızı değerleri Şekil 14'te gösterilmiştir.



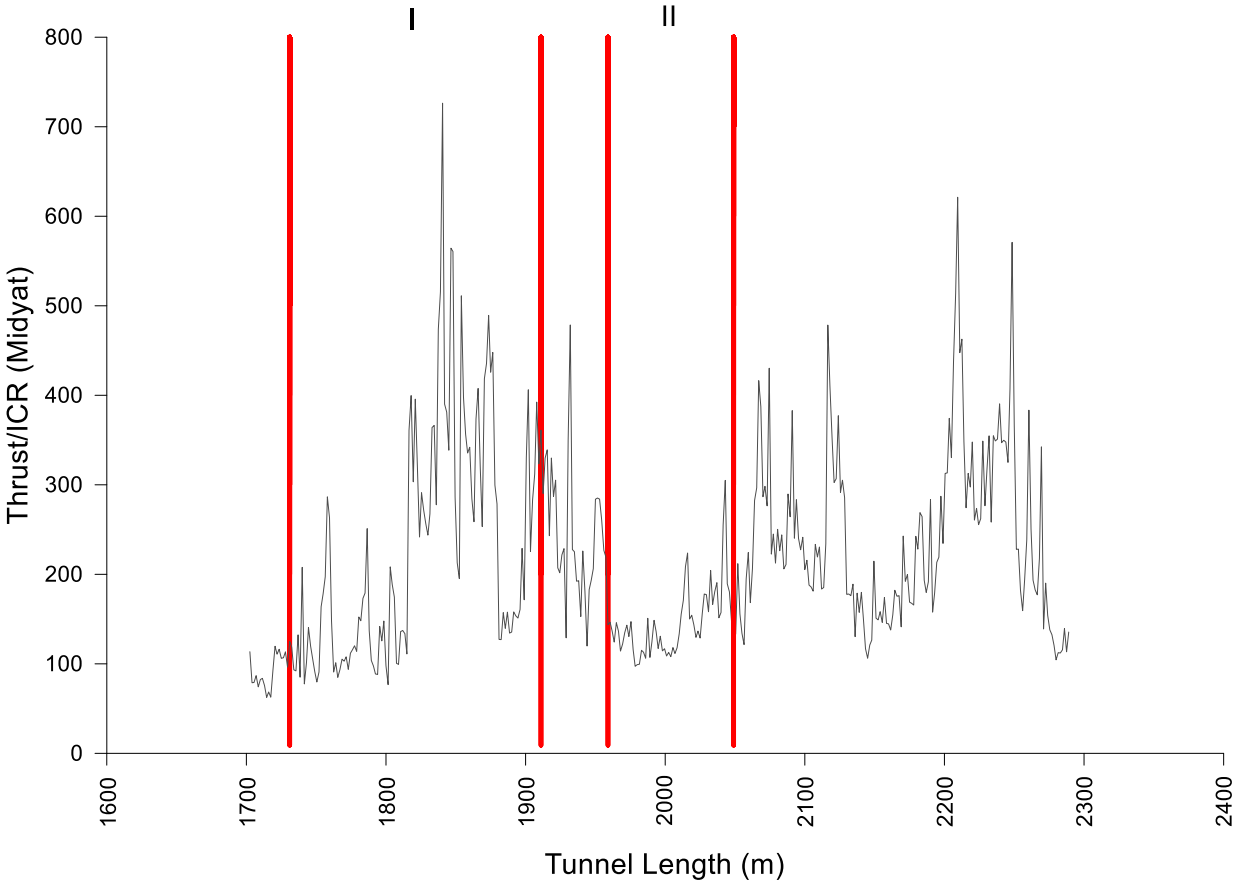
Şekil 9. Geçilen formasyonlarda elde edilen itme kuvveti değerleri



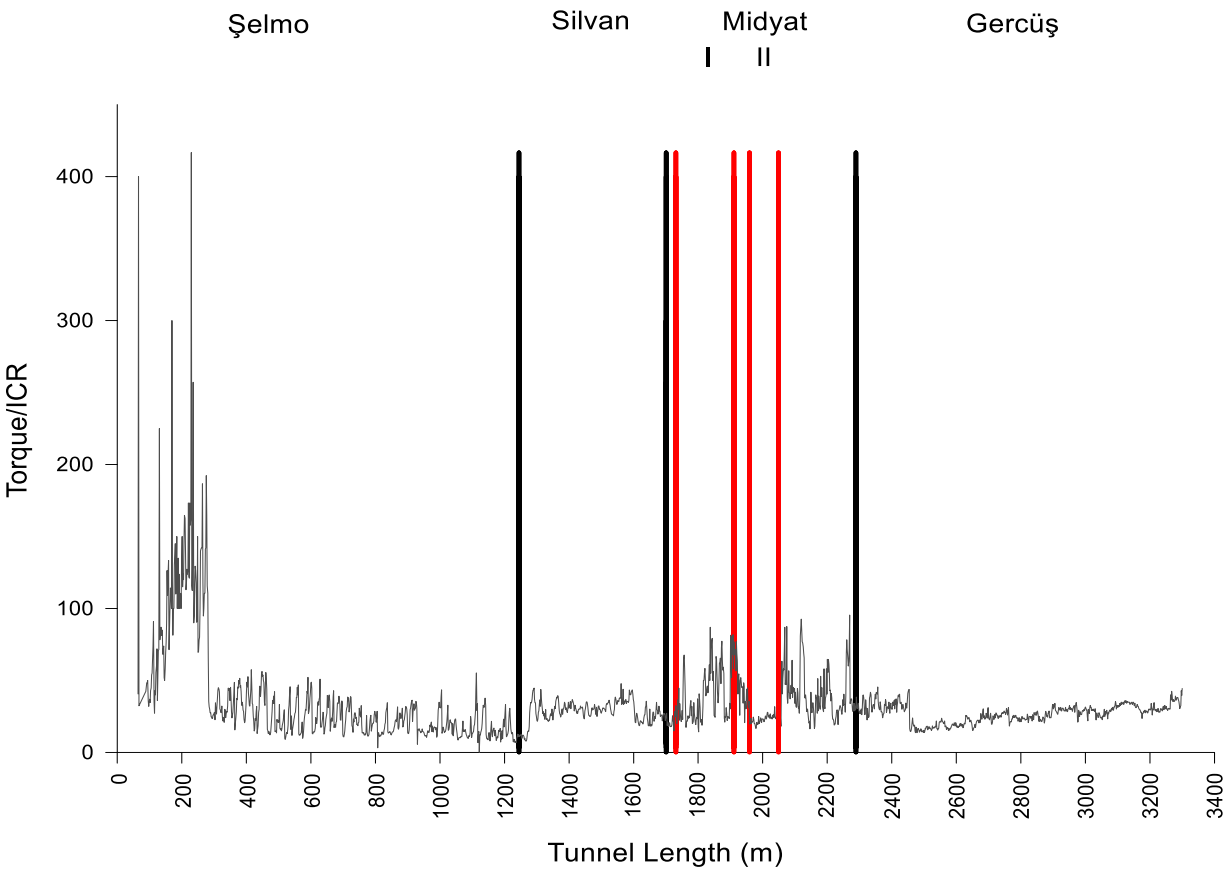
Şekil 10. Geçilen formasyonlarda elde edilen tork değerleri



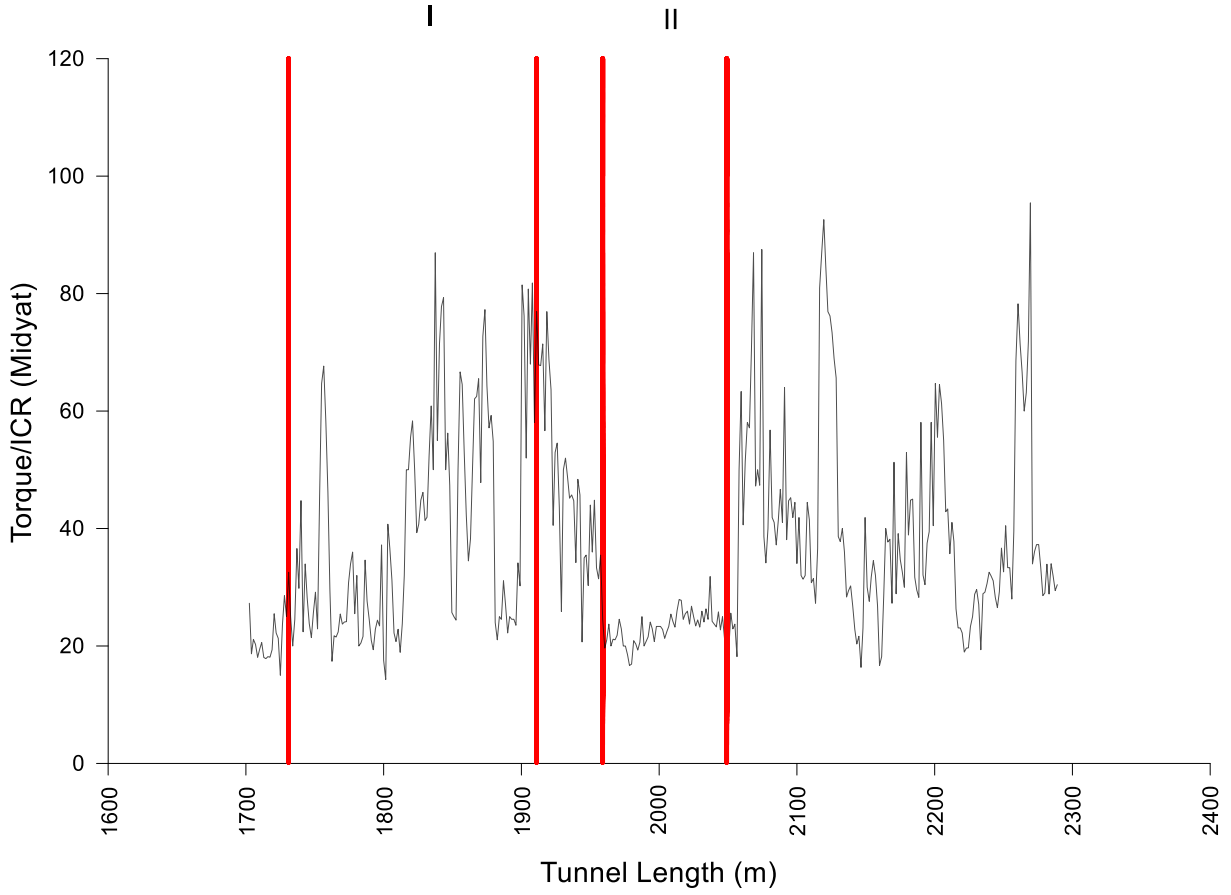
Şekil 11. Geçilen formasyonlarda elde edilen itme kuvveti/anlık ilerleme hızı değerleri



Şekil 12. Midyat formasyonuna ait itme kuvveti/anlık ilerleme hızı değerleri



Şekil 13. Geçilen formasyonlarda elde edilen tork/anlık ilerleme hızı değerleri



Şekil 14. Midyat formasyonuna ait tork/anlık ilerleme hızı değerleri

5 SONUÇ

Günümüzde pahalı ve kurulum süreleri uzun olmasına rağmen TBM'ler en yaygın kullanılan kazı makinaları olup, formasyon için uygun seçilmeleri ve tasarımlandırılmaları koşulunda bir projenin çok hızlı tamamlanabilmesini sağlamaktadırlar. Aksi takdirde kazının uzun süre durması, tamamlanamaması hatta TBM'in yeraltında bırakılmaları gibi büyük kayıplara neden olmaktadırlar. Bu nedenle kullanılacak makine seçilmeden önce tünel güzergahında detaylı jeoteknik çalışmaların yapılması; kazı esnasında ise makine performans verilerinin toplanması ve iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada uzun süre kazının durmasına neden olan 2200 lt/sn gibi çok yüksek değerlere çıkan su probleminin yaşandığı Silvan tüneline ait makine performans verileri analiz edilmiştir. Su geliri özellikle Midyat formasyonunda yer alan sırasıyla 180 ile 90 m uzunluktaki iki adet karstik boşluk geçilirken artmış, kazı hızı düşmüş hatta haftalarca kazı yapılamamıştır. En düşük anlık ilerleme hızı değerleri Midyat formasyonunda elde edilmiştir. Bunun nedeni bu formasyonun kayaç sınıflama değerlerinin yüksek olması ve dayanımı diğer formasyonlardaki kayaçlara göre yüksek olan kireçtaşını içermesidir. Fakat bu formasyonlarda I. Karstik boşluğun son 50 metresi hariç yer alan karstik boşluklarda anlık ilerleme hızı yüksek çıkmıştır. I. Karstik boşluğun son metrelerindeki düşmenin nedeni su gelirinin artması ile birlikte killi siltli sedimanın kesici kafa önünde yığılması olarak açıklamak mümkün olmuştur. Aynı şekilde Midyat formasyonundaki dramatik değişikliklerden dolayı kesici kafa dönme hızı değişken aralıklarda kullanılmış bu da genellikle verimli kazı için belirli bir değerde tutulmaya çalışılan penetrasyon değerlerinin fazla değişmesine neden olmuştur.

Kayaçların kazılabilirliği hakkında kuvvet değerleri de genel bir bilgi vermekle birlikte bunların anlık ilerleme hızlarına oranlanmış değerleri daha net sonuç vermektedir. Silvan tünelinde bu değerlerin en yüksek olduğu yerler yine RMR ve RQD değerlerinin yüksek olduğu ve dayanımının iyi olduğu Midyat formasyonu ve Şelmo formasyonu içinde yer alan çimento dolgulu Konglomera merceklerinde olmuştur. Sediman yığılmasının söz konusu olduğu I. Karstik boşluğun son 50 metresi hariç karstik boşluklarda ise bu değerler de düşüşler olmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma DÜBAP birimi Mühendislik 17.003 nolu "Zor Koşullarda TBM İle Açılan Tünellerin Kazı Performansının incelenmesi ve Optimizasyonu" isimli proje desteği ile yapılmıştır.

KAYNAKLAR

Acaroglu, O., Ozdemir, L., Asbury, B. 2008. A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, 600-608.

Acaroglu, O. 2011. Prediction of thrust and torque requirements of TBMs with fuzzy logic models. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, 267–275.

Ateş, U., Bilgin, N., Copur, H. 2014. Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects. *Tunnelling and Underground Space Technology* 40, 46-63.

Balci, C. 2009. Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: A case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24, 423-435.

BAR-SU Engineering & Consultancy Inc 2011. Engineering geology report. General Directorate of State Hydraulic Works, the 10th Regional Directorate, 06/04/2011, 1-124.

Barton, N. 2000. *TBM tunneling jointed and faulted rocks*, Balkema, Rotterdam Chapter 18, 63-64.

Bilgin, N., Balci, C., Acaroglu, O., Tuncdemir, H., Eskikaya, S. 1999. The performance prediction of a TBM in Tuzla-Dragos sewerage tunnel. *World Tunnel Congress,* Balkema, Rotterdam, pp. 817-822.

Buergi, C., Parriaux, A., Franciosi, G., Rey, JPh. 1999. Cataclastic rocks in underground structures- terminology and impact on the feasibility of projects (initial results*). Engineering Geology* 51, 225–253.

Fernandez, G., Moon, J. 2010. Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel

– Part 1: Guideline for estimate of ground water inflow rate. *Tunnelling and Underground Space Technology* 25, 560-566.

Gertsch, R., Gertsch, L., Rostami, J. 2007. Disc cutter tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction. *International Journal of rock Mechanics & Mining Sciences* 44, 238-246.

Goel, R.K. 2016. Experiences and lessons from the use of TBM in Himalaya- A review. *Tunnelling and Underground Space Technology* 57, 277-283.

Hassanpour, J., Rostami, J. Zhao, J. 2011. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, 595-603.

Hassanpour, J., Vanani Ghaedi, A.A., Rostami, J., Cheshomi, A. 2016. Evaluation of common TBM performance prediction models based on field data from the second lot of Zagros water conveyance tunnel (ZWCT2). Tunnelling and Underground Space Technology 52, 147-156.

İlci, N., Temel, M., Sezgin, S., Polat, C., Bilgin, N. 2014. Effect of cutter clogging on performance of tunnel boring machine (TBM). *Turkish Tunneling and Underground Technologies Magazine*, ISSN 2148-1768, nr:6, 84-86.

Khave, G.J. 2014. Delineating subterranean water conduits using hydraulic testing and machine performance parameters in TBM tunnel post-grouting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 70, 308–317.

Ma, H., Gong, Q., Wang, J., Yin, L., Zhao, X. 2016. Study on the influence of confining stress on TBM performance in granite rock by linear cutting test. *Tunnelling and Underground Space Technology* 57, 145-150.

Mare´chal, J.C., Etcheverrya, D. 2003. The use of 3H and 18O tracers to characterize water inflows in Alpine tunnels. *Applied Geochemistry* 18, 339–351.

Paltrinieri, E., Sandrone, F., Zhao, J. 2016. Analysis and estimation of gripper TBM performances in highly fractured and faulted rocks. *Tunnelling and Underground Space Technology* 52, 44-61.

Price, D.G. 2009. *Engineering geology, principles and practice,* Chapter 10, 311.

Rostami, J. 2016. Performance prediction of hard rock Tunnel Boring Machine (TBM). *Tunnelling and Underground Space Technology* 57, 173-182.

Toth, A., Gong, Q., Zhao, J. 2013. Case studies of TBM performance in rock-soil interface mixed ground. *Tunnelling and Underground Space Technology* 38, 140-150.

Yağız, S. 2007. Utilization rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23 (3), 326-339.

Yağız, S., Karahan, H. 2015. Application of various optimization techniques and comparison of their performances for predicting TBM penetration rate in rock mass. *International Journal of rock Mechanics & Mining Sciences* 80, 308-315.

Yamamoto, T, Sh.irasagi, S., Yamamoto, S., Mito, Y., Aoki, K. 2003. Evaluation of the geological condition ahead of the face by geostatistical techniques using TBM driving data. *Tunnelling and Underground Space Technology* 18, 213-221.

Bakırköy-Bahçelievler-Kirazlı Metro Hattı, Özgürlük Meydanı İstasyonu, Susuzlaştırma Enjeksiyon İşleri 2018

Dewatering Injection Works 2018 in Bakırköy-Bahçelievler-Kirazlı Metro Line Özgürlük Square Station

S.S. Şeref, Ö. Yilmaz, B. Demirci
Krk Holding, Soner Temel Mühendislik İnş. ve Tic. A.Ş., İstanbul

ÖZET Bu bildiri yeraltı su seviyesinin altında, su gelirinin normalin çok üzerinde olduğu, su ile mücadeleye ihtiyaç duyulan projelere ışık tutması amacıyla hazırlanmıştır.

İstanbul Bakırköy-Bahçelievler-Kirazlı metrosu yaklaşık 8,6 km uzunluğunda toplam 7 istasyondan oluşmaktadır. Özgürlük Meydanı İstasyon tünellerinde kazı çalışmalarını yürütmek adına iki şantiye kurulmuştur. Kuzey ve Güney şantiyelerinden birer şaft yardımıyla peron katına ulaşılıp buradan susuzlaştırma enjeksiyonu desteği ile karşılıklı aynalardan yapılan kazı ve destekleme sonucunda istasyon tünelleri tamamlanmıştır.

ABSTRACT This paper was prepared to enlighten the projects constructed under the underground water table with high amount of water ingress and requiring prevention.

Bakırköy-Bahçelievler-Kirazlı Metro Line in Istanbul with a total length of 7 km consists of 7 stations. Two sites were prepared to construct the tunnels of Özgürlük Square Station. These tunnels were completed by excavation, support and injection through the opposite faces in the north and south sites.

1 TANITIM VE AMAÇ

Bu bildiri, yeraltı su seviyesinin altında, su gelirinin normalin çok üzerinde olduğu, su ile mücadeleye ihtiyaç duyulan projelere ışık tutması amacıyla hazırlanmıştır.

Bu çalışmada öncelikli olarak proje hakkında genel bilgilere yer verilmiş olup jeolojik formasyondan ve neden susuzlaştırma enjeksiyonu yapmaya ihtiyaç duyulduğu konularına değinilmiştir.

Susuzlaştırma enjeksiyonu için uygun yöntemin belirlenmesi ile beraber enjeksiyon kuyularının yerleri, çapı ve uzunlukları, enjeksiyon karışım oranları, çimentonun seçimi için yapılan çalışmalara değinilmiştir.

Suyun tünelcilik faaliyetleri üzerindeki olumsuz etkileri değerlendirilmiş olup bu olumsuzluk susuzlaştırma enjeksiyonu ile olumlu hale dönüştürülerek, sağlıklı bir ortamda tünelcilik yapılmasına olanak tanımıştır.

2 GÜZERGAH VE PROJE BİLGİLERİ

İstanbul Bakırköy- Bahçelievler- Kirazlı metrosu Şekil 1'de görüldüğü gibi yaklaşık 8,6 km uzunluğunda toplam 7 istasyondan oluşmaktadır. Yüksek taşıma kapasitesine sahip metro hattı günde 1 milyon yolcu taşımayı hedeflemektedir.

Proje ile Bakırköy İstasyonundan Marmaray'a, İncirli İstasyonundan Otogar-Havalimanı hattına ve Kirazlı İstasyonundan ise Kirazlı-Metrokent ve Kirazlı- Otogar-Yenikapı hatlarına bağlanacaktır. İstanbul'un kalabalık ilçelerinden olan Bağcılar, Başakşehir ve Bahçelievler; E5'e (metrobüse), Havalimanına giden metroya, Bakırköy meydanında Marmaray'a ve sahilde İdo'ya bağlanacaktır.

Bakırköy Özgürlük Meydanında İstasyon tünelleri kazı çalışmalarını yürütmek adına iki ayrı şantiye kurulmuştur. Kuzey ve Güney şantiyelerinde birer şaft yardımıyla peron

katına ulaşılıp buradan karşılıklı yapılan kazılarla iki şaft birbirine bağlanmıştır. İstasyon içinde 2 adet peron tüneli ve bu tünelleri birbirine bağlayan 6 adet bağlantı tüneli ve yolcuların istasyonu ulaşmasını sağlayan iki adet merdiven tünelleri de bulunmaktadır.

Şekil 1. Bakırköy- Bahçelievler- Kirazlı Metro Güzergahı (Yeşilyurt, 2018)

Bakırköy Özgürlük Meydanı istasyon tünellerine, kuzey ve güney şantiyelerinden iki şaft yardımıyla ulaşılmaktadır. Sonradan kapatılması planlanan ulaşım tünelleri üzerinden peron tünellerine bağlanarak, iki şaft arasından karşılıklı yapılan kazılarla peron tünelleri birleştirilmiştir. Eş zamanlı olarak da bağlantı tünellerinin kazıları yapılarak peron tünellerinin birleşmesi sağlanmıştır. Tünel uzunlukları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Tünel Uzunlukları (Şeref, 2017)

Çalışma Alanı	*Uzunluk (m)*	*Kesit Alanı (m^2)*	*Derinlik (m)*	*Çap (m)*
Şaft	-	196,00	66,76	15,8
Peron Tünelleri	444,00	82,00	-	-
Bağlantı Tünelleri	150,00	64,00	-	-
Merdiven Tünelleri	64,00	62,00	-	-

3 JEOLOJİK FORMASYON

Bakırköy – Bahçelievler – Kirazlı Metro Hattındaki Özgürlük Meydanı İstasyon kazı-destek çalışmalarına dair zemin mekaniği ve temel mühendisliği değerlendirmelerinin yapılması ve zemin parametre tayini için istasyona ait her iki şafttan birer sondaj yapılmıştır.

Kuzey şaftından yapılan PS-01 ve güney şaftın yapılan ISK-6 adlı sondajlara ait özet bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Sondaj bilgileri (Soner Temel Mühendislik, 2017)

Sondaj Kuyusu (no)	*Kot (m)*	*Derinlik (m)*	*Yss Kot (m)*	*Yss Derinlik (m)*
PS-01	+24,45	40,00	-0,94	25,40
ISK-6	+18,75150	35,00	-0,02	18,75

3.1 Genel ve Yerel Jeoloji

İncelenen Bakırköy-Bahçelievler-Kirazlı güzergahı boyunca Güngören ve Bakırköy formasyonları hâkimdir.

3.1.1 Bakırköy Formasyonu

Tabaka araları yeşil killi, genelde değişik kalınlıkta beyaz ve kirli beyaz renkli mactralı kireç taşlarından oluşur. İnce tabakalı mactralı kalkerler arasından Melanopsisli ve Helixli kalker seviyeleri görülür.

Bakırköy Formasyonu İstanbul'un tarihsel gelişim çağlarından beri taş gereksinimini karşılamıştır. Formasyon tabanda kil ve seyrek kirli beyaz killi kireç taşı ardalanması ile başlayan tatlı su Fasiyesli; düzensiz tabakalanmalı beyaz mikritik bir kireçtaşıdır. Aralarda yer yer yeşil ve mavi renkli killi marnlı düzeyler bulunur. Kireç taşı yer yer olitik ve tebeşirimsidir. İnceden kalına doğru değişen tabakalı, boşluklu ve bol kırıklıdır. Bol bol fosil iç kalıplıdır.

Bakırköy Formasyonunun alt dokanağı, ayrıldığı kesimlerde Güngören Formasyonu ile yanal ve düşey geçişlidir. Genelde 25-30 m kalınlık gösteren Bakırköy Formasyonunun kuzeye doğru kalınlığı azalır. Bu kalınlık 10-15 m'ye kadar düşer.

3.2 İnceleme Alanının Jeolojisi

Söz konusu istasyon şaftlarında yapılan sondajlara göre formasyon, yüzeyden itibaren 40 m'lere kadar genelde kil ara tabakalı kireçtaşları ile ayrışmış kireç taşı – kil ardışımından oluşmaktadır.

İstasyon şaftlarından ISK-6 sondajında 10,80 m, PS-01 sondajında 2,30 m kalınlığında yapay dolgu malzemesi

kesilmiştir. PS-01 sondajında dolgu zemin altında, 10,50 m'ye kadar ayrışmış kireçtaşları yer almaktadır.

Her iki sondajda da,

- Yaklaşık olarak 11 m'den sonda 16,50 – 17,00 m'lere kadar, Bakırköy Formasyonunun ince kireçtaşı ara tabakalı killeri,
- Bu kil tabakası altında da kuyu sonu 35,00 – 40,00 m'lere kadar, Bakırköy Formasyonunun yer yer kil ara tabakalı, fosilli, lokal karstik boşlukları kil dolgulu ayrışmış killi kireç taşı kesilmiştir.
- Her iki sondajda da yaklaşık sıfır kotunda suyla karşılaşılmıştır.

Arazi çalışmaları sırasında basınçlı su testi yapılmış olup PS1 kuyusunda kireç taşlarının yoğun kil ara tabakalı ve çok ayrışmış olduğunu ve kireç taşının geçirimli olduğu gözlenmiştir.

4 KAZI DESTEK ÇALIŞMALARI VE SU İLİŞKİİSİ

4.1 Kazı Uygulamaları

4.1.1 Şaft kazısı

Bakırköy Özgürlük Meydanı İstasyonu Kuzey şaftında -7,00 m kotunda kazı işlemlerine başlanmıştır.

Şaft kazısında -2,40 kotundan sonra zeminden su geliri olmuştur. Biriken su kalıcı bir drenaj hattı yardımıyla tahliye edilmiştir. Devam eden kazılarda şaft derinliği arttıkça zeminden gelen su miktarında gözle görülür bir şekilde artış olmuştur.

+22,25 m ve -2,40 m kotları arasında zeminden gelen sular, yapılan çalışmalara herhangi bir engel oluşturmamış olup, bu kotlar arasında yalnızca kazı ve kuşak kirişi için donatı montajı ve beton döküm işlemleri yapılmıştır.

-2,40 m ve -11,80 m kotları arasında yapılan kazı çalışmaları ise çelik hasırın – püskürtme beton ve zemin çivileri ile desteklenmiştir.

Şaft kazısının başlangıç kotu itibari ile her kazı aşamasında derinliğin artması ve kireç taşı formasyonunda kazılan yerlerden su geliri artmış ve özellikle çelik hasırın püskürtme beton ile desteklenmesi sırasında büyük zorluklarla karşılaşılmıştır. Su gelen kısımlar kontrol altına alınamadığı için püskürtme beton uygulamalarında zorluklar yaşanmıştır.

4.1.2 Tünel kazısı

Bakırköy Özgürlük Meydanı istasyonunda yapılan ilk tünel kazısı, şaft ile peron tünellerini birbirine bağlayan ulaşım tünellerinde -3,45 / -11,00 kotları arasında yani deniz seviyesi ve yeraltı su seviyesinin altında yapılmıştır.

Kazı uygulamaları ekskavatörler yardımıyla yapılmakta olup ortaya çıkan hafriyat ise yükleyiciler vasıtası ile uzaklaştırılmaktadır.

-3,45 / -11,00 kotları arası kazı yüzeyi (ayna), ayrışmış kireç taşı ve kil tabakalarından oluşmakta olup kireç taşı, bünyesinde barındırmış olduğu suyu serbest bırakmaktadır. Yani kazı sırasında aynadan gelen su sebebiyle sağlıksız bir çalışma ortamı oluşmaktadır. Bu durum, beraberinde bir takım ciddi problemler oluşturmaktadır. Oluşan problemleri şöyle ifade edebiliriz.

- Kazı ile birlikte üretilen pasa su ile birleşerek çamur ve mırık haline gelmektedir.
- Şekil 2'de gösterilen çelik hasır ve çelik iksa montajı yoğun su altında yapılmak zorunda kalınıp uygunsuz ortam oluşmaktadır. Kaynak işleri yapılamamaktadır.
- Püskürtme betonun uygulanacağı yüzeyden gelen su nedeniyle ribaunt aşırı fazla olmaktadır. Hatta yer yer hiç püskürtme beton uygulanamamaktadır.

Şekil 2. Çelik hasır montajı

4.2 Delgi Uygulamaları

4.2.1 Zemin çivisi delgisi (şaft kazısında)

Zemin çivisi çalışmalarına ilk olarak kuzey şaftı -3,35 m kotunda başlanmıştır. Çelik hasır – püskürtme beton tahkimatını zemin çivileri ile güçlendirmek amacıyla yapılan ilk delgi uygulaması, proje için büyük bir sürprizle başlamıştır.

Zemin çivişleri için açılacak olan kuyular 125 mm çapında ve 6 m uzunluğundadır. Şekil 3'de görüldüğü gibi yapılan ilk delginin, fore kazıklardan geçip ana zeminin henüz ilk metrelerinde, kuyudan yoğun su gelişi olduğu gözlenmiş olup ikinci kuyuda ise 1-2 m delemeden kuyu çapında ve basınçlı bir şekilde su geliri olmuştur. Şekil 4'de görüldüğü gibi 196 m2 taban alanı olan şaft kısa sürede suyla dolmaya başladığından, çalışma sahası tahliye edilmiştir.

Şekil 3. Zemin çivisi delgisi

Şekil 4. Zemin çivisi delgisi

Şaft altında bulunan 1 adet 11 kW gününde su tahliye pompası, 15 kW gücündeki pompayla değiştirilip yanına ikinci bir 15 kW gücünde pompa ile desteklenmiştir. Pompalardan her biri saatte 60 m^3 su tahliyesi kapasitesine sahiptir.

Normal bir delgi imalatında, kuyuda su geliri mevcut ise boru yardımıyla su kontrol altına alınabilmekte ve basit bir alçılama işiyle sızdırmazlık sağlanabilmektedir. Ancak açılan kuyudan gelen su boru yardımıyla kontrol edilemeyecek seviyede (yüksek debili ve yüksek basınçlı) olmasından dolayı bu durum karşısında ya kazı destek sistemi değiştirilecek ya da mevcut şartlarda uygun bir yöntem belirlenip çalışmalara devam edilmesi kararı alınmıştır.

Bahsedilen imalatlar tünel içinde yapılan ayna ve yan zemin çivisi delgileri için de geçerlidir.

4.2.2 Umbrella arch ve süren delgisi (şafttan başlatılacak ayna kazıları için)

Düşey yönlü kuvvetler karşısında güvenli kazı yapabilmek için yapılan umbrella arch ve süren delgileri, ortaya çıkan şiddetli su sebebiyle neredeyse yapılamaz hale gelmiştir.

Delgi işlemi yapılan bir umbrella arch ve zemin çivisi için normal şartlarda pvc boru ve alçı yardımıyla sızdırmazlık sağlanıp enjeksiyon yapılmaktadır. Suyun şiddetli bir şekilde gelmesi karşısında ortaya birçok zorluk çıkmıştır ve maks. 30 dakikalık bir sürede açılması gereken bir umbrella arch delgisi 150 dakikalara kadar uzamıştır. Çünkü Şekil 5'de görüldüğü gibi delgi işlemi yapılan kuyudan şiddetli bir şekilde fışkıran su, delici makinanın ve personelin çalışmasına müsaade etmemiştir.

4.3 Yeraltı Suyunun Tünelcilik Üzerindeki Olumsuz Etkileri

Geçmişten günümüze gelişen makine, ekipmani teknoloji ve teknikler yardımı ile tünelcilik faaliyetlerini yürütmek oldukça kolay bir hale gelmiştir. Şöyle ki; iş makinalarındaki teknolojik gelişimler, uygun zemin koşulları ve geçmiş deneyimler bu durum üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

Şekil 5. Umbrella arch delgisi

Ancak Bakırköy Özgürlük Meydanı İstasyon şantiyesinde su gelirinin fazla olmasından dolayı, tünelcilik faaliyetleri olumsuz yönde etkilenmiştir. Bu olumsuzluklar,

- Su tahliye problemi, su baskını ve enerji sarfiyatı, pompa bakım maliyetleri gibi olumsuzluklara,
- Uygulamada zorluk yaşanmasına, ıslanmaya, isteksiz çalışmaya, işe ön yargılı bakmalarına,
- İsg açısından, elektrik çarpması probleminin riskinin artmasına,
- İş makinalarında meydana gelen özellikle elektrik arızalarının artmasına ve kohezyona,
- Zemin stabilite problemlerinin artmasına,
- Püskürtme beton miktarında aşırı zayiatın oluşmasına,
- Delgi süresinde artışlara, enjeksiyon süresinde artışlara, bunlara bağlı olarak iş programının 3 katı fazla zamana ihtiyaç duyması.

5 SUSUZLAŞTIRMA ENJEKSİYONU

Bakırköy Özgürlük Meydanı İstasyon Peron Tünelleri, konum olarak yeraltı su seviyesinden düşük kottadır. Yeraltı suyunun olumsuz etkisi, kazı ve destekleme çalışmalarının başlamasıyla birlikte, imalatın her aşamasında aksaklıklara yol açmıştır. Hatta tünelcilik faaliyetlerini durma aşamasına getirmiştir.

Bu durum karşısında, uygun bir yöntem belirlenip tünelcilik faaliyetlerinin devam edebilmesi adına harekete geçilmiştir.

5.1 Susuzlaştırma Enjeksiyonu Yöntemi

Enjeksiyon işlemi, amacına yönelik farklı şekillerde yapılabilir. Yapılan her kazı ve delgi uygulamalarının neredeyse tamamında su geliri mevcut olmasından dolayı enjeksiyon yönteminin belirlenmesinde amacımız, yeraltı suyunu faaliyet alanımızdan uzak tutarak daha az sulu bir ortamda çalışabilmek olmuştur. Bu bağlamda proje özelliklerine göre bir uygulama yöntemi belirlenmiştir.

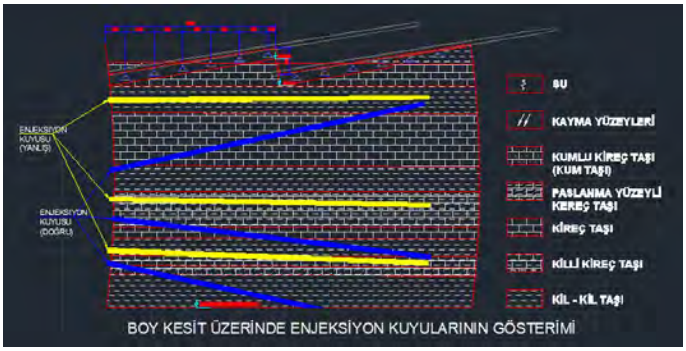
Yapılan ölçümlerle yeraltı suyunun basıncı 1-1,5 bar olarak belirlenmiştir. Enjeksiyon uygulaması ile çatlak içerisindeki suyun basıncından daha yüksek bir karşı basınçla enjeksiyon yapılarak suyun ötelenmesi ön görülmüştür. İlk bakışta konsolidasyon enjeksiyonu gibi algılanmaktadır ancak konsolidasyon enjeksiyonu, dayanımı düşük olan formasyonlarda ya da rezidüel zeminlerde uygulanarak zeminin mekanik ve jeolojik özelliklerini değiştirip dayanımını artırmaktadır. Susuzlaştırma enjeksiyonunun amacı ise Bakırköy formasyonunda aşırı stabilite problemi olmadığı için yalnızca zeminindeki geçirgenliğini azaltarak daha az sulu bir formasyonda tünelcilik yapmaktır.

5.2 Delgi Yöntemi

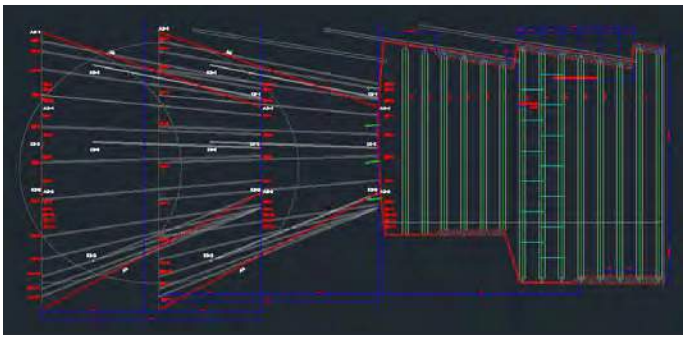
Projeye göre kazı adımı 4,80 m, umbrella arch uzunluğu 9,0 m ve ayna zemin çivisi uzunlukları da 12,0 m olarak belirlenmiştir.

Delgi uygulamasında rock olarak isimlendirilen delici makinalar kullanılmıştır. Proje değerlerine bağlı kalarak delgi çapı 125 mm ve delgi boyu 9,0 – 12,0 m olarak uygulanmıştır.

Enjeksiyon uygulaması için delgi işlemi yapılamadan önce umbrella arc ve ayna zemin çivileri için açılan kuyulardan yararlanılmıştır. Böylece zamandan ve işçilikten tasarruf edilmiştir.

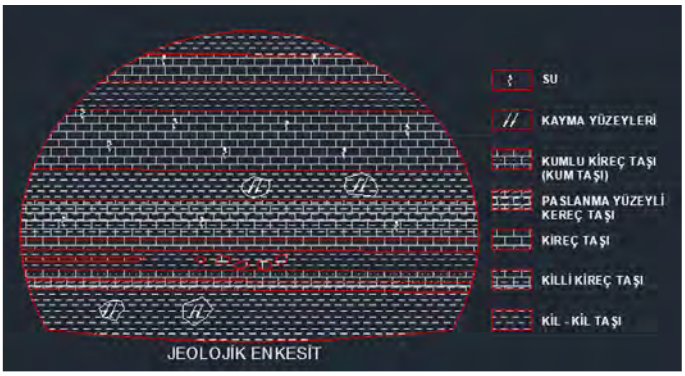


Şekil 6. Boy kesit üzerinde enjeksiyon kuyularının gösterimi



Şekil 7. Enjeksiyon kuyularının gösterimi

Delgi açıları için jeolojik yapı göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 8'de ayna haritasında görmüş olduğunuz gibi tabakalanma yatay yönlü olup araları kil dolguludur. Bu sebeple delgi yönü ve seçimi önem arz etmektedir. Killi birimden kuyu açılırsa ya da ince ve sık tabakalı birimden kuyu açılırsa enjeksiyon gerekli yerlere nüfus edemeyecek ya da az nüfus ederek uygulamanın başarısız olmasına sebep olacaktır.



Şekil 8. Jeolojik enkesit

5.3 Enjeksiyonda Kullanılan Malzemeler

5.3.1 Çimento

Yapmış olduğumuz araştırmalar neticesinde blaine değeri yüksek olan çimento tercih edilmiştir. Blaine değeri, 1 g ağırlığındaki çimento tanelerinin adeti olarak tanımlanır. Çatlak yapısının ince ve kil dolgulu olmasından dolayı yüksek blaine değerine sahip çimento tercih edilmiştir.

5.3.2 Su

Enjeksiyonda kullanılan su, içerisinde atık malzeme, istenmeyen sakıncalı ve zararlı malzeme olmayıp temiz ve berrak olan sudur.

5.3.3 Bentonit

Çimento enjeksiyonunun hazırlanması ile başlayan süreçte, çimento tanelerinin karışım içerisinde askıda kalmasını sağlar. Enjeksiyon süresince suyun çimentodan ayrışmasını engelleyerek, kuyunun refü edilinceye kadar su kanallarının tıkanma süresini uzatarak daha fazla çimento miktarının zemine nüfus etmesine yardımcı olmaktadır.

5.3.4 Akışkanlaştırıcı

Akışkanlaştırıcı özelliğe sahip kimyasal bir ürünüdür. Viskozitesi yüksek olan bir enjeksiyon karışımına belirli bir oranda katıldığında karışımın viskozitesini azaltmaktadır. Bu sayede birim zamanda zemine nüfus eden çimento miktarı artmıştır. Bu iş için Basf Firmasına ait Master Rhebouilt 1000 T (Akışkanlaştırıcı) ürünü kullanılmıştır.

5.3.5 Piriz hızlandırıcı

Priz alma süresini artıran kimyasal bir üründür. Refü şartı için sürecin başladığı andan itibaren, enjeksiyon karışımına belirli bir oranda katıldığında sürecin sonuna kadar olan süreçte, çimentonun çatlak içinde donmasını sağlayarak verimi artırmıştır.

5.3.6 Hidrolik ve mekanik paker (tıkaç)

Verimli bir enjeksiyon için kuyu içine yerleştirilen pakerlerin tam sızdırmazlığı sağlayacak şekilde deliği tıkaması gerekmektedir. Bu sayede kuyu, istenilen miktarda basınç altında tutularak düzenli bir enjeksiyon uygulamasına tabi tutulur. Eğer sızdırmazlık sağlanamazsa kuyu yeterli basınç altıda tutulamayacağı için refü şartı sağlanmamış olur ve enjeksiyon başarısız olur. Şekil 9 sızdırmazlık sağlanmış bir paker görülmektedir.

Şekil 9. Hidrolik paker (tıkaç)

5.3.7 Enjeksiyon seti

Enjeksiyon yapılacak olan zemin, su ihtiva etmesi ve 1,0-1,5 bar'lık karşı basınç sağlamasından dolayı, yapılacak olan enjeksiyonun sürekli olması gerekmektedir. Bu sebeple tünel enjeksiyon işlerinde kullanılan geleneksel enjeksiyon makinalarının yerine, Şekil 10'da gösterilen, iki yönlü enjeksiyon yapabilen ve gücünü hidrolik sistemden alan makinalar tercih edilmiştir.

Kullanılan enjeksiyon setine ait teknik bilgiler,

Hazırlayıcı Kazan,

- Kazan Hacmi 500 lt
- Karıştırıcı Motor 3 kW

Dinlendirici Kazan,

- Kazan Hacmi 1000 lt
- Karıştırıcı Motor 1,5 kW

Pompa,

- Kapasite 170 lt/dk
- Pompa Gücü 100 bar
- Pompa Motoru 11 kW
- Piston 10 ton, tek piston çift yönlü

Enjeksiyon pompası, enjeksiyon uygulaması sırasında basınç değişimlerinden etkilenmemek adına güce duyarlı ve su soğutmalı tipte kullanılmıştır. Yapılan enjeksyon uygulamasında zemine verilen çimento miktarı fazla olduğu için zamandan tasarruf etmek edna iki adet enjeksiyon pompası beraber kullanılmıştır.

Şekil 10. Enjeksiyon seti

5.3.8 Enjeksiyon santrali

2000 kg tartım kapasitesine sahip karıştırıcı ve dinlendirici kazan kapasiteleri ise 500 ve 1000 litredir. Aktarım santrifüj pompa ile yapılmaktadır.

Santralin beslemesi, 50 ton çimentoyu muhafaza edebilecek büyüklükte bir silo ile yapılmaktadır.

5.3.9 Enjeksiyon karışım oranları

Susuzlaştırma enjeksiyon uygulamasında kullanılacak olan enjeksiyon karışım oranları Çizelge 3'de belirtildiği gibidir.

Çizelge 3. Enjeksiyon karışım oranları (Yılmaz, 2018)

Karışım Oranı (Çim/Su)	*Çimento Miktarı (kg)*	*Su Miktar (kg)*	*Birim Hacim (lt)*	*Çalışma Basıncı(bar)*
(1/3)	100	300	332,252	6-7
(2/3)	200	300	364,504	6-7
(1/1)	250	250	330,63	6-7
(7/5)	350	250	362,882	6-7
(2/1)	400	200	329,008	6-7

5.4 Enjeksiyon Uygulaması

Kazı destek çalışmalarının uygun bir şekilde yapılabilmesi adına susuzlaştırma enjeksiyon uygulamasına başvurulmuştur.

Enjeksiyon uygulamasında hedefimiz, çalışma yapılacak olan 4,80 m uzunluğundaki kısımda (işçilerin çalışacağı kısım) öncelikle çevreden gelen suları azaltmak veya kesmek ve ileriden gelen suları (kazılmamış kısım) ise çalışma alanının dışına itmek olmuştur.

Bu amaca ulaşmak için;

- Şekil 7'de gösterildiği gibi tünel kazı çevresine 1 m aralıklarla 12 m uzunluğunda 12o dışa açılı Ø125 mm delikleri delinmiş ve kademeli enjeksiyon yapılması denenmiştir. Ancak kireç taşı formasyonu çok çatlaklı olduğu için kuyu kendi içinde irtibat yaparak basılan şerbetin delikten dışarı kaçtığı gözlenmiştir. Bunu önlemek için paker kuyu ağzına bağlanarak tek kademede enjeksiyon yapılmıştır. Bu safhada çevreden gelen suların tünel kazı alanına girişlerinin sınırlandırılması amaçlanmıştır.
- Tünel aynasının ilerisinden gelen suların kazı aşamasında aynadan gelmesini önlemek için de tünel aynasına 2 m ye 1 delik olacak şekilde oluşturulan paterne göre 12 m delikler delinerek susuzlaştırma enjeksiyonu yapılmıştır.
- Bu işlemlerde mükerrer delgi yapılmaması amacı ile çevrede umbrella arch delikleri ve aynada zemin çivisi delikleri ile örtüşen deliklere umbrella arch ve zemin çivisi boru ve donatısı konarak enjeksiyon işlemi yapılmıştır.
- Çevredeki destekleme kabuğuna uygulanan zemin çivisi veya bulondan gelen sular için koyu karışım ile kuyu doldurularak su gelişi durdurularak zemin çivisi veya bulonun işlevselliği sağlanmıştır.

Enjeksiyon kuyusunun ağız kısmına bir hidrolik paker tutturulur. Hava vermek suretiyle paker şişirilir ve kuyu sızdırmaz hale getirilir. Yani enjeksiyon verildiğinde kuyunun hiçbir noktasından çimentonun kaçmasına müsaade edilmeyecek hale getirilir.

- Çim/Su=1/3 oranında karışımla enjeksiyon uygulamasına başlanılır.
- 400 lt enjeksiyon verildikten sonra basınç yükselmiyorsa 2/3 oranındaki karışıma geçilir.
- 400 lt enjeksiyon verildikten sonra basınç yükselmiyorsa 1/1 oranındaki karışıma geçilir.
- 400 lt enjeksiyon verildikten sonra basınç yükselmiyorsa 7/5 oranındaki karışıma geçilir.
- 400 lt enjeksiyon verildikten sonra basınç yükselmiyorsa 2/1 oranındaki karışıma geçilir. Bu oranda basınç 6-7 barın üzerine çıkana kadar enjeksiyona devam edilir. Basınç 6-7 barı geçerse yeniden başlangıç karışımına dönülür.
- 1/3 oranında enjeksiyon verilmeye başlanır ve alış devam ediyorsa aynı sırada uygulamaya devam edilir. Hangi oranda olursa olsun alış miktarı, dakikada 2 lt' den az ya da 10 dakikalık sürede 50 lt' den az alış yaparsa, kuyu refü (enjeksiyonla doyurulmuş) edilmiş sayılır. Uygulamanın refü aşamasında çimento miktarının %1-3 oranında priz hızlandırıcı katkı ilave edilerek çimentonun donma süresi hızlandırılır.

Uygulama yukarıda yazıldığı gibi her enjeksiyon kuyusu için tekrarlanarak devam eder. Alışın çok olduğu yerlerde birim zamanda yüklenen çimento miktarını artırmak adına çimento miktarının %1 kadar akışkanlaştırıcı katkı eklenerek aynanın kazıya hazırlanma süresi kısaltılmaktadır.

Enjeksiyon uygulaması bittikten sonra aynanın farklı kısımlarından kuyu açmak suretiyle kontrolü sağlanarak kazıya hazır hale gelip gelmediği belirlenir. Ayna kazıya hazır değilse gerek duyulan yerlerden enjeksiyon kuyuları açılarak aynı işlemler tekrarlanır. Ayna kazıya hazır ise kazı-destek işlemleri tamamlanarak ayna kapatılır ve yeniden enjeksiyon uygulamasına geçilir.

Ayna kapama işlemine başlamadan önce ayna haritası çıkarılarak suyun geldiği yerler tespit edilir. Delici makine yardımıyla bu yerlere delgiler yapılarak drenaj boruları monte edilir. Çelik hasır montajı yapılıp püskürtme beton ile ayna kapatılır. İkinci kez çelik hasır montajı yapılarak (2.kat çelik hasır) bir kez daha püskürtme beton (2.kat p. beton) ile kapatılıp tam sızdırmazlık sağlanır.

Enjeksiyon uygulamasına ilk başlanıldığı günlerde, aynada enjeksiyon sızıntıları olmasından dolayı basınç kayıpları yaşanmış olup enjeksiyon kalitesinin düştüğü gözlenmiştir. Bu sebeple ikinci kat çelik hasır ve püskürtme betona ihtiyaç duyulmuştur.

6 SONUÇ

Bakırköy Özgürlük Meydanı İstasyon Tünellilerinde aşırı su geliri olması sebebiyle susuzlaştırma enjeksiyonu uygulamasına başvurulmuştur. Yapmış olduğumuz gözlemler değerlendirilerek formasyon için en uygun uygulama sıralaması belirlenmiştir.

Buna göre,

- Susuzlaştırma enjeksiyonu uygulanarak kazı ve desteklemenin susuz veya yönetilebilir miktarlardaki su eşliğinde yapılması sağlanmalıdır.
- Susuzlaştırma enjeksiyonu sonrası yapılan kazı çevresinden gelen sızıntıların mutlaka pvc hortumlarla tahliyesi sağlanarak tüm kazı çevresinin sağlıklı püskürtme beton uygulamasına tabi tutulması elzemdir. Su gelen bir çatlağa bir hortum yerleştirilerek çatlak üzerine püskürtme beton uygulanınca, kapanan çatlaktaki su çatlağın herhangi bir noktasında, barbakan gibi çalışan hortuma gelecek ve püskürtme beton basınç uygulayarak dökülmesine / yıkanmasına neden olamayacaktır. Püskürtme beton uygulaması sonucunda, çevredeki tüm sular hortumlardan geliyor olmalı, püskürtme betonun ise sızdırmaz bir kabuk olarak tüm çevreyi kaplamış olması sağlıklı uygulamanın olmazsa olmazıdır.
- Kazı raundu bitirilip, yeni enjeksiyon aşamasına geçildiğinde tünel aynasının çift kat çelik hasır ve çevreye atılan kalınlıktaki püskürtme beton ile kapatılarak, tünel çevresi ile birlikte sızdırmazlık kabuğu tesis edilmelidir. Aksi halde enjeksiyon kaçaklarına engel olunamayarak, sağlıklı susuzlaştırma yapılamaz.
- Bu şartlardaki bir tünel imalatında mutlaka geçici radye uygulaması yapılmalıdır. Bu imalat hem stabiliteyi sağlayacak hem de yürüyüş yolu olarak sağlıklı çalışma ortamı oluşmasına destek olacaktır.

1 m tünel açabilmek için yaklaşık 11 ton çimento enjeksiyonu yapılmıştır. Bu sebeple tünel kazısının tamamlanması uzun sürmüştür.

Tünel kazısı süresince su tahliyesi (yalnızca şafttan) için kullanılan enerji miktarı 500000 kW'tır.

Drenaj yapılan su miktarı toplam 1.805.555 ton' dur. Toplam 6 adet 18 kW gücünde pompa kullanılmıştır.

KAYNAKLAR

Yeşilyurt, F. 2018. Güzergah Projesi, Özgürlük Meydanı İstasyonu, B-B-K Metro Hattı, 2017.

Soner Temel Mühendislik İnş. ve Tic. A.Ş. 2017. Sondaj Raporu, Özgürlük Meydanı İstasyonu, B-B-K Metro Hattı, 2017.

Yılmaz, Ö. 2017. Enjeksiyon Yapım Yöntemi, Özgürlük Meydanı İstasyonu, B-B-K Metro Hattı, 2017.

Şeref, S.S. 2017. Kazı Profili, Özgürlük Meydanı İstasyonu, B-B-K Metro Hattı, 2017.

AYGM, 2016. www.aygm.gov.tr

Amasra Taşkömürü Havzasında Kullanılan AM105 Tipi Kollu Galeri Açma Makinasının Performans İncelemesi

Performance Investigation of AM105 Type Roadheader Operating in Amasra Hardcoal Field

O. Yaralı
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

H. Kıran
Ersamak Mak. Ve Mad. A.Ş. Amasra, Bartın

ÖZET Kollu galeri açma makinaları madencilik ve inşaat uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kollu galeri açma makinaları performansının doğru bir tahmini, tünel projelerinin daha verimli ve uygun maliyetli bir şekilde planlanmasını sağlar. Bu çalışmada, ilk olarak, Amasra, Türkiye'de Hattat Enerji ve Maden Ticaret A.Ş.'nin yeraltı madeninde galeri açmada kullanılan AM105 tip kollu galeri açma makinasının performans ve keski tüketimleri izlenmiştir. Bu makine ile 2017 yılı içinde dört aylık ilerleme kayıtları tutulmuş, buna göre iş-zaman çizelgeleri oluşturulmuştur. Her bir gözlem noktasından getirilen kayaç örnekleri üzerinde laboratuarda dayanım (tek eksenli basınç ve Brezilyan çekme) ve aşındırıcılık (Cerchar aşınma indeksi) deneyleri yapılmıştır. Laboratuar ve saha gözlemlerine bağlı olarak, travers kafalı kollu galeri açma makinaları için geliştirilmiş ampirik modellerle yapılan performans tahminleri ve AM105 kollu galeri açma makinasının gerçek performans değerleri karşılaştırılmıştır. Bazı tahmin modellerinin sahada gerçekleşen performans değerlerine yakın olduğu görülmüştür.

ABSTRACT Roadheaders have been widely used in mining and civil applications. An accurate prediction of roadheader performance helps for more efficient and cost effective planning of tunneling projects. In this study, firstly the performance and cutter consumptions of AM105 type roadheader monitored during roadway construction in an underground mine of Hattat Enerji ve Maden Ticaret A.Ş. located in Amasra, Turkey were determined. The work-time charts were created by the field performance data of AM105 roadheader for four months in 2017. The strength (uniaxial compressive and Brazilian tensile) and abrasiveness (Cerchar abrasivity index) tests were carried out on the rock samples collected from each observation location at laboratories. Based on experiments and field observations, comparison of performance prediction methods, which is developed for travers type roadheader and actual performance of AM105 type roadheader, which is currently being operating in mine, were discussed. It is also indicated that some of the models predict close to the realized performance rate in the field.

1 GİRİŞ

Kazı yapılacak kayaca ilişkin parametreler kollu galeri açma makinası (KGAM) seçilirken göz önüne alınması gereken en önemli kriterlerden birisi hiç şüphesi kazısı yapılacak kayacın özellikleridir. Kayaca ait mekanik özellikler, temel olarak tek eksenli basınç (UCS) ve çekme dayanımları (BTS) kayacın kesilebilirliklerine dolayısıyla da makinenin performansına ilişkin fikir verebilmekte olup tek başına yeterli bir kriter olmadığı da bilinmektedir (Fowell ve Pycroft, 1980). Kesilebilirlik konusu ile ilgili olarak en etkin parametre kayacın spesifik/özgül enerjisinin (SE) hesaba katıldığı yöntemlerdir. Kesme deneyleri

vasıtasıyla kayacın spesifik enerjisi belirlenip bu bilgi yerinde yapılan çalışmalar ile desteklenerek kayaç için bir kesilebilirlik sınıflandırılması oluşturulur. Buradan yola çıkarak en uygun kollu galeri açma makinesi seçilmesinin yanısıra kesici uçlarla ilgili sarfiyat tahminleri de yapılmaktadır (McFeat-Smith ve Fowell, 1979). Makineye ait parametreler Kollu galeri açma makinelerinin seçiminde göz önüne alınması gereken kriterlerden birisi de makineye ait karakteristik niteliklerdir. Başta makinenin kesici kafa gücü olmak üzere toplam kurulu güç ve makine ağırlığı makinenin sınıflandırmasında önemlidir (Hekimoğlu ve Fowell, 1988).

Kesilebilirliklerin yanısıra kayacın aşındırıcılık değeri makine seçimine etki eden önemli faktörlerdendir. Kayaçların aşındırıcılık değerini belirleyen en önemli deneylerden biri de Cerchar aşınma indeks (CAI) deneyidir (Plinninger vd. 2003, Yaralı 2018). Galeri açma makinesinin işletme maliyetlerine olan en büyük etkisi kesici uç sarfiyatından oluşmaktadır. Buna ek olarak çalışma sırasında oluşan titreşimlerden vb. nedenlerden ötürü hidrolik sistemlerde, hortum, piston ve bağlantı elemanlarında ve ayrıca yükleme ünitesinde meydana gelen aşınmalar nedeniyle de parça değişimleri gerçekleşmektedir. Bu da işletme maliyetine dolayısıyla ekonomik bir makine seçimine etki eden parametrelerden birisidir (Bilgin vd., 2014).

Seçilen kollu galeri açma makinesiyle yapılan kazının verimli olması için makine özelliklerine bağlı olmayan birtakım parametreler de mevcuttur. Örneğin, kazı yapılacak galeri kesiti havalandırmayı, nakliyatı, ekipman ve malzemenin taşınmasını etkilemektedir. Bu da kazı veriminin değişmesine neden olabilmektedir. Bu parametrelerin değiştirilememesi durumunda ise KGAM nin boyutlarında veya modelinde değişikliğe gitme durumu ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, Hattat Enerji ve Maden Ticaret A.Ş. alt işvereni Ersamak Makine ve Madencilik Şirketi tarafından Tarlaağzı 2202 Galerisi Güneydoğu Üretim Desandresi'nde sürülen 14° eğimli galeride çalışmakta olan AM105 model kollu galeri açma makinesinin dört aylık yerindeki performansı ve keski tüketimi belirlenmiştir. Daha sonra literatürde kabul görmüş performans tahmin modelleriyle karşılaştırılmıştır.

2 AMASRA HAVZASININ TANITIMI VE KGAM İÇİN YAPILAN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Türkiye'nin en büyük taşkömürü rezervlerini içeren Amasra'da üretim çalışmaları 1848 yılında özel kişilerce başlatılmıştır. 50 km^2 alana sahip olan saha (Şek. 1), 1953 yılında EKİ Müessesesine devredilmiştir. TTK ATİ Müessesesi tüzel kimliği ile üretim ise 1984 yılından bu yana devam etmektedir. Amasra Sahası A (14,4 km^2) ve B (35,6 km^2) sahaları olmak üzere ikiye ayrılmış olup B sahası kömürlerinin ve A sahası -400 kotu altında kalan kömürlerin işletmecilik hakkı 15 Nisan 2005 tarihinde rödevans usulü ile TTK tarafından HEMA Dış Ticaret A.Ş.'ye (HEMA) verilmiştir (Hema, 2009).

HEMA'nın yaptığı sondajların ortalama derinliği 1000 metre olup, toplam sondaj derinliği 60000 metreyi aşmaktadır. Bu bölge için yapılan ilk işletme projesi İTÜ Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü tarafından 1984 yılında yapılmıştır. Bu çalışmaya göre sahanın görünür kömür rezervi 331 milyon ton olarak hesaplanmıştır (Birön, 1984). En son yaptırılan çalışmaya göre bölgenin kömür kaynağı 573 milyon ton olup bunun 268 milyon tonu işletilebilir rezerv olarak sınıflandırılmaktadır. Hala sürdürülmekte olan sondaj çalışmaları ile bu miktarın artacağı tahmin edilmektedir (Hema, 2009).

Hazırlık çalışmaları kapsamında 3 adet kuyu açma çalışması tamamlanmıştır. Kuyu derinlikleri 700, 730 ve 579 metredir. 3 kuyunun da net çapı 8 metredir. Kuyuların mevcut teçhizatları ile ana kat galeri açma çalışmaları başlatılmıştır. Proje kapsamında açılacak olan ana katların 24 m^2 net kesitte olması planlanmıştır (Hema, 2009).

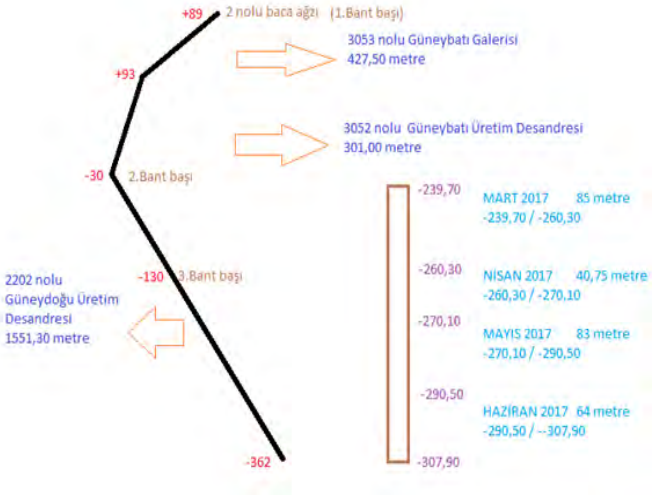
Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

Amasra'da Hattat Enerji ve Maden Ticaret A.Ş. tarafından yapılan tam mekanize yeraltı taşkömürü işletmesi yatırımında ana kat galerileri ve üretim panoları tabanyolları hazırlıklarında kollu tip galeri açma makineleri kullanılmaktadır. İşletmede 1 adet R60T model, 2 adet de R75T model olmak üzere toplam 3 adet Deilmann-Haniel marka travers kafalı kollu galeri açma makinesi ile 1 adet AM105 tip galeri açma makinesi çalışmaktadır. Havza'da daha önce denenmemiş olan mekanize kazıda bu makinelerle başarılı sonuçlar alınmaya başlanmıştır (Ersoy vd., 2016).

Amasra Havzası için yapılan en son çalışma Ersoy (2014) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, işletmede çalışmakta olan R60T model galeri açma makinesinin performansı ile Amasra bölgesi için daha önce yapılmış performans tahminlerinin (Bilgin vd., 2006, Gehring 1989, Thuro ve Rlinninger 1999, Balcı vd., 2004) karşılaştırması ve makine performansını iyileştirmeye yönelik önerilerden bahsedilmiştir. Amasra Havzası'nda galeri açma makinesi ile gerçekleştirilen ilerleme miktarları, yapılan performans tahminleri ile paralellik göstertiği ve kazı sırasında harcanan ortalama spesifik enerji değerleri de laboratuvar deneylerinde elde edilen değerlerle uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Ersoy vd., 2016). Ayrıca bu çalışmada bazı kesilebilirlik, fiziksel, aşındırıcılık ve mekanik özellik deneyleri yapılmıştır. Deney sonucunda, Cerchar aşındırıcılık indeks değerlerinin 1.5 ile 2.3 arasında, tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin ise 22.5 ile 88.1 MPa arasında değiştiği saptanmıştır.

3 AM105 KGAM'NIN PERFORMANS TAHMİNİ

Bu bildiride, Hattat Enerji ve Maden Şirketi alt işvereni Ersamak Makina ve Madencilik Şirketi tarafından Tarlaağzı Yüzey Kömürleri 2202 Galerisi 14° eğimli Desandresi'nde kullanılan (Şekil 2) Voest Alpine AM105 KGAM'sının 2017 yılı Mart, Nisan, Mayıs ve Haziran aylarına ait arın ilerleme çalışmalarına bağlı olarak performans verileri incelenmiştir.

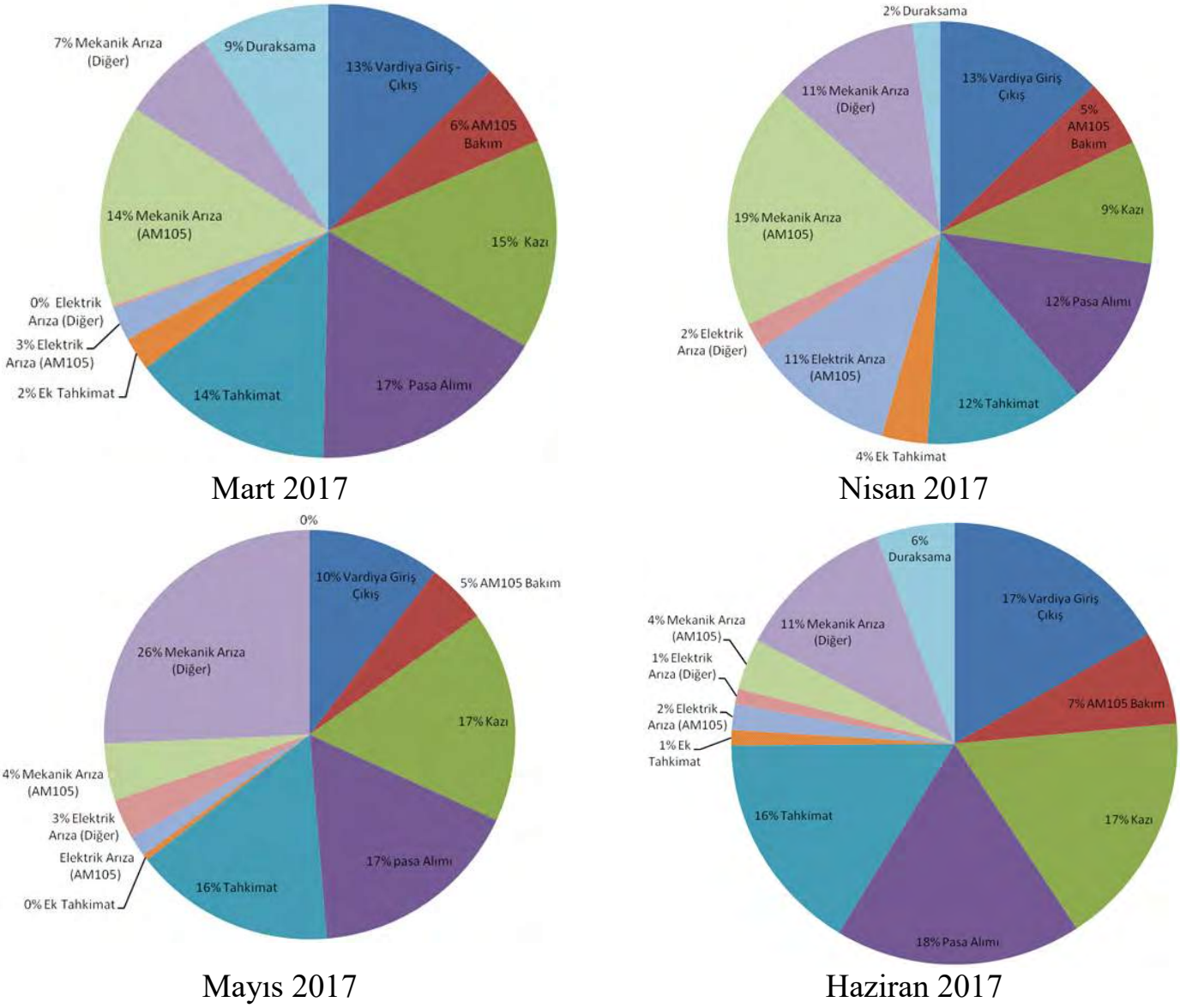


Şekil 2. AM105 KGAM'sının Çalışma alanı ve kot bilgileri

Kazı kesiti ortalama 26 m^2 olarak sağlandığı galeride geçilen formasyonların %85'inden fazla kumtaşı oluşturmakta olup silttaşı, kömür bandlı kumtaşı ve konglomera birimleri de kesilmiştir. Çalışmalar 22 kişilik bir ekiple gerçekleşmiştir. Amasra Havzasında kullanılmakta olan Voest Alpine AM105 model kollu galeri açma makinesinin temel özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. 4 aylık iş-zaman etüdü Şekil 3'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. AM105 KGAM'sının teknik özellikleri

Makine Toplam Ağırlığı (ton)	128
Kesme Hızı (m/s)	1,4
Kaldırma Kuvveti (kN)	150
Yükseklik (m)	1,9
Uzunluk (m)	11,2
Genişlik (yükleme ünitesi dahil) (m)	3,05
Kesici Kafa Gücü (kW)	300
Konveyör Motor Gücü (kW)	2X36
Hidrolik Motor Gücü (kW)	132
Kesici Kafa RPM (dev/dak)	51
Konveyör Hızı (m/dak)	0,8



Şekil 3. AM105 KGAM'sının dört aylık iş-zaman etüdü

Şekil 3 incelendiğinde; 4 aylık çalışmada vardiya süresinin ortalama %12-16'sının tahkimata, %9-17'sinin net kazıya, %12-18'inin pasa alımına, %5-7'sinin makine bakımına, yaklaşık %35'inin ise arızalar için bir kayıp zaman söz konusu olduğu görülmektedir. 4 aylık toplanan performans verisi Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. AM105 KGAM'sının 4 aylık performans verisi

Veri	Birim	1. Ay	2. Ay	3. Ay	4. Ay
Fiili Çalışma	(gün)	23	20	22	22
İlerleme	(m)	85	41	83	64
Kazılan Hacim	(m^3)	2210	1066	2158	1664
Ort. Net Kazı Randımanı	(%)	15	9	17	17
Ort. Günlük İlerleme	(m/gün)	4.00	2.22	4.09	3.15
Fiili Kazı Miktarı (ICR)	(m^3/h)	4.00	2.22	4.09	3.15
Fiili Keski Tüketimi	(adet)	284	147	314	252
Fiili Keski Tüketimi	(adet/m)	3.34	3.59	3.78	3.94
Fiili Keski Tüketimi	(adet/m^3)	0.13	0.14	0.15	0.15

3.1 Laboratuar Çalışmaları

AM105 KGAM kullanıldığı desandreden çatlaksız, kömür izi olmayan homojen yapıdaki kumtaşı örnekleri blok numuneler şeklinde alınarak Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kazı ve Mekanizasyon Laboratuvarları'nda dayanım (tek eksenli basınç (UCS) ve Brazilian çekme (BTS)), fiziksel ve Cerchar aşınma indeks (CAI) deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 3'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, kumtaşı örneklerinin dayanımlarının ISRM (1980)'e göre yüksek dayanım sınıfında yer aldığı görülmektedir. Cerchar aşınma indeks değerine göre kayaçların aşındırıcılıkları ISRM (2015)'e göre orta aşındırıcı sınıfında yer almaktadırlar.

3.2 Performans Tahminleri

Literatürde travers tipi kollu galeri açma makineleri için geliştirilmiş ve yaygın Literatürde travers tipi kollu galeri açma makineleri için geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılan ampirik performans tahmin yöntemleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Laboratuarda sadece masif kumtaşları ile yapılan tek eksenli basınç ve Cerchar aşınma deney sonuçlarına göre Çizelge 4'de verilen ampirik bağıntıların bir kısmı (Referans 1,2,3,4,6,7,11) kullanılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır. Bu ampririk bağıntılardan bulunan performans tahmin değerleri fiili net kazı randımanı değerleriyle çarpılarak, edilen teorik performans sonuçları 4 aylık fiili olarak gerçekleşen ilerleme miktarları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4, Çizelge 5). Çizelge 5'e göre fiili olarak gerçekleşen net kazı miktarı ile incelenen ampirik performans sonuçları karşılaştırıldığında en uygun sonucu Gehring (1994), Balcı vd. (2004) ve Sandvik (2015) yaklaşımlarının verdiği görülmektedir. Cerchar aşınma indeks deneyi tam cephe ve KGAM için kullanılan performans tahmin modellerinde ve mekanize kazı makinalarının keski tüketiminin tahmin edilmesinde de yaygın

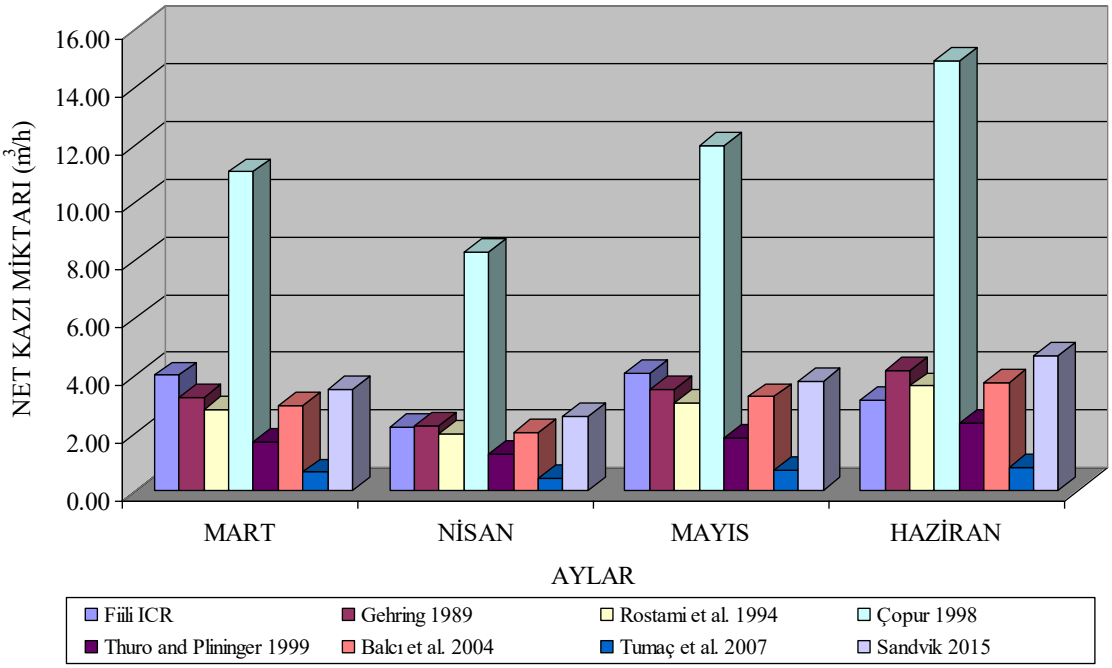
Çizelge 3. Deney sonuçları

AY	ALIM YERİ	UCS (MPa)	BTS (MPa)	CAI
MART	-242	89.62±8.12	7.32±0.82	2.05
NİSAN	-266	73.27±6.86	6.34±0.91	1.90
MAYIS	-282	94.13±9.26	8.46±1.76	2.55
HAZİRAN	-296	76.18±7.29	5.18±1.20	2.57

Çizelge 4. Travers tip kollu galeri açma makinaları için ampirik performans tahmin yöntemleri

No	Referans	Performans Tahmin Eşitliği	Açıklama
1	Gehring (1989)	$ICR = \frac{719}{UCS^{0.78}}$	250 kW - Travers Tip
2	Rostami vd. (1994)	$ICR = kx\frac{P}{SE_{opt}}$ $SE_{opt} = 0.0826xUCS + 1.424$	k katsayısı 0.55
3	Copur vd. (1997, 1998)	$ICR = 27.511xe^{0.0023PRI}$ $PRI = \frac{PxW}{UCS}$	Travers Tip
4	Thuro ve Plinninger (1999)	$ICR = 75.7 - 14.3x\ln UCS$	132 kW - Travers Tip
5	Bilgin vd. (2000); Balci ve Bilgin (2001)	$ICR = kx\frac{P}{SExk_1xk_2}$	k_1: tabaka gerilmeleri için ilişki katsayısı ($\approx$ 1.3 yüksek gerilmeler için) k_2: jeolojik süreksizlikler için ilişki katsayısı (RQD=%20-30 için 0,5, RQD= %30-50 için 0,7)
6	Balci vd. (2004)	$ICR = Kx\frac{P}{0.411xUCS^{0.67}}$	Travers Tip (K= 0.55)
7	Tumaç vd. (2007)	$ICR = 109.25xUCS^{-0.72}$ $ICR = 81.211xSH^{-0.78}$	
8	Ocak ve Bilgin (2010)	$ICR = 510588xUCS^{-2.1779}$	Travers Tip (Kadıköy-Kartal Metro Hattı)
9	Ebrahimabadi vd. (2011)	$ICR = 30.75xRMBI^{0.23}$ $RMBI = e^{\left(\frac{UCS}{BTS}\right)}x(\frac{RQD}{100})^3$	
10	Abdolreza ve Yakhchali (2013)	$ICR = 1.79xUCS + 0.501x\alpha + 0.636xRQD - 4.839xBTS - 22.127$	
11	Sandvik (2015)	$NCR_{Basic} = \frac{7}{UCS}xP$	Travers Tip (MR/MT720, 300 kW kesme kafası gücü olan)

ICR, NCR: Net kazı miktarı (m^3/h), UCS: Tek eksenli basınç dayanımı (MPa), BTS: Brezilyan dolaylı çekme dayanımı (MPa), P: Kesici kafa gücü (kW veya HP), RQD: Kaya kalitesi değeri (%), PRI: KGAM ilerleme indeksi (kW ton/MPa), W: KGAM ağırlığı (ton), k, K: Enerji transfer katsayısı, SH: Shore sertlik indeksi, RMBI: Kaya kütlesi kırılganlık indeksi, α: Tünel ekseniyle zayıflık düzlemi arasındaki açı



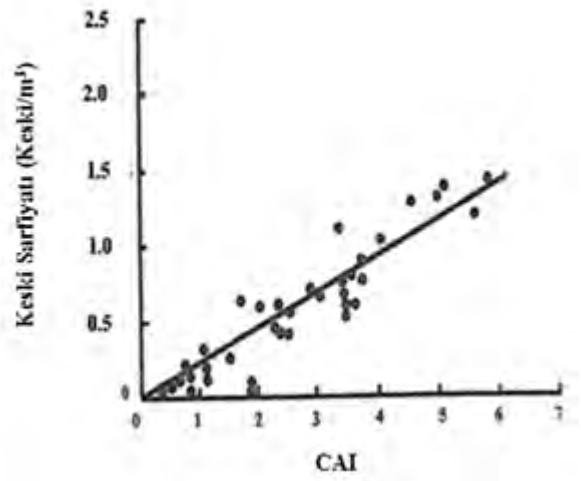
Şekil 4. Gerçekleşen ve farklı araştırmacılara göre performanslardaki değişim

Çizelge 5. Gerçekleşen ve farklı modellere göre performans değerlendirme sonuçları

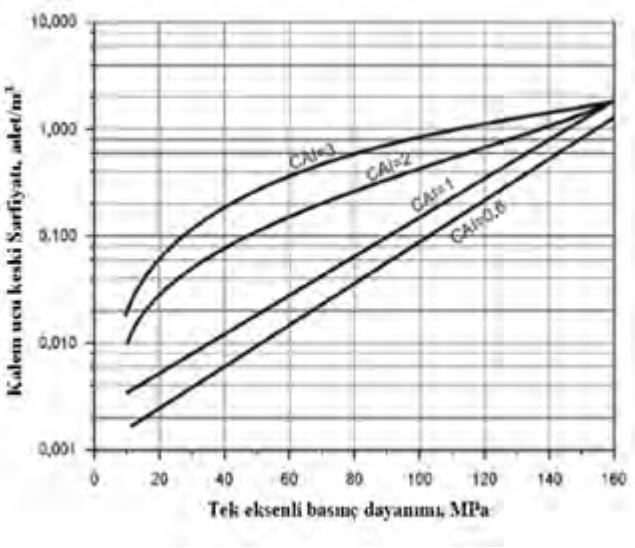
AY	Fiili ICR (m^3/h)	Gehring (1989) ICR (m^3/h)	Rostami vd. (1994) ICR (m^3/h)	Copur vd. (1998) ICR (m^3/h)	Thuro ve Plinn. (1999) ICR (m^3/h)	Balci vd. (2004) ICR (m^3/h)	Tumac vd. (2007) ICR (m^3/h)	Sandvik (2015) ICR (m^3/h)
MART	4.00	3.24	2.80	11.06	1.71	2.97	0.64	3.51
NİSAN	2.22	2.27	1.99	8.27	1.29	2.04	0.45	2.58
MAYIS	4.09	3.53	3.05	11.95	1.82	3.26	0.70	3.79
HAZİRAN	3.15	4.16	3.64	14.91	2.34	3.75	0.82	4.69

olarak kullanılmaktadır (Plinninger vd. 2003, Rostami vd. 2005, Bilgin vd. 2005, Kasling ve Thuro, 2010, Yaralı ve Duru, 2016). Sadece CAI değerine göre keski tüketimini belirlemek yanlış olacaktır. Kayacın çimentolanma derecesi, aşındırıcı mineral içeriği ve kuvars tane boyu gibi petrografik özelliklerle birlikte değerlendirilmesi daha uygundur (Yaralı 2004, Yaralı ve Akçın 2005). Pratikte 0,5 keski/m^3'ün üzerinde kazının gerçekleşemeyeceği (keskiler formasyona penetre edemez) ve 0,2 ile 0,5 keski/m^3 arasındaki tüketimlerin çok kısa mesafeler için mümkün olabileceği literatürde çok sayıda vaka analizine dayanarak ortaya konulmuştur (Bilgin vd., 2014). Bu çalışmada keski tüketimlerini belirlemek için 3 farklı tahmin yöntemi kullanılmış ve fiili keski tüketim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Çiz. 6 ve Şek. 8). Bu tahmin yöntemler; birincisi Johnson ve Fowell (1986) (Şek. 5), ikincisi Plinninger vd. (2004) (Şek. 6) ve üçüncüsü de Sandvik (2007)'dir (Şek. 7).

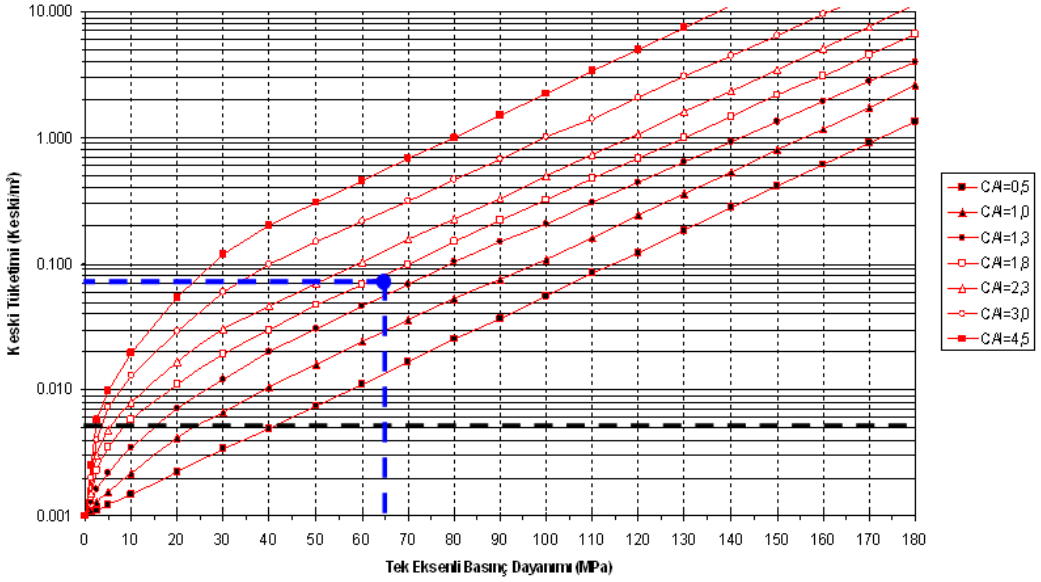
Çizelge 6 ve Şekil 8 incelendiğinde, fiili/gerçekleşen keski tüketimleri ile incelenen 3 farklı tahmin yöntemine göre tüketilen keski tüketimleri arasında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır.



Şekil 5. CAI ile keski sarfiyatı arasındaki ilişki (Johnson ve Fowell, 1986)



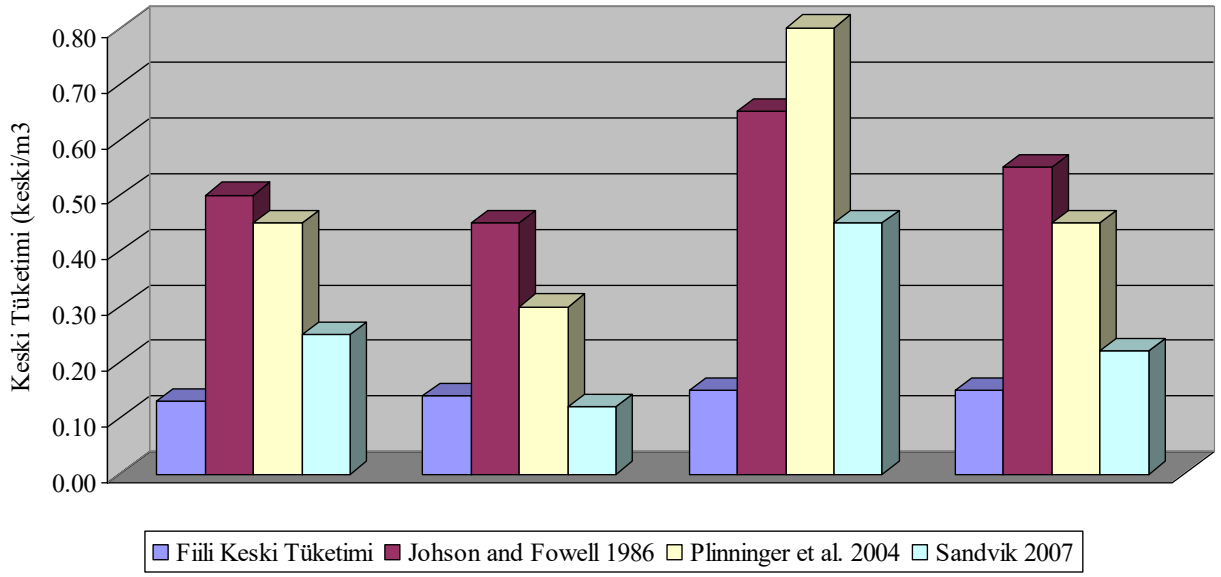
Şekil 6. Kalem ucu keski tüketimi (KGAM için) ve Cerchar aşınma indeksi (CAI) arasındaki ilişki (Voest Alpine; Plinninger vd.'den 2004)



Şekil 7. Düşük hızlı travers tip KGAM ve 22 mm çaplı yüksek kaliteli keskiler için keski tüketim abağı (Sandvik 2007; Restner ve Pichler'den 2007)

Çizelge 6. Gerçekleşen ve farklı tahmin yöntemlerine göre keski tüketim sonuçları

Ay	Fiili Keski Tüketimi (keski/m^3)	Johnson ve Fowell (1986) (keski/m^3)	Plinninger vd. (2004) (keski/m^3)	Sandvik (2007) (keski/m^3)
Mart	0,130	0,500	0,350	0,250
Nisan	0,140	0,450	0,180	0,120
Mayıs	0,150	0,650	0,550	0,450
Haziran	0,150	0,550	0,350	0,220



Şekil 8. Gerçekleşen ve farklı araştırmacılara göre tahmini keski tüketim miktarlarındaki değişim

4 SONUÇ

Bu çalışmada Hattat Enerji ve Maden Şirketi Amasra Taşkömürü İşletmesi'nde 2202 Galerisi 14° eğimli Desandresi'nde kullanılan Voest Alpine AM105 KGAM'sının 2017 yılı Mart, Nisan, Mayıs ve Haziran aylarına ait arın ilerleme çalışmalarına bağlı olarak performans verileri ile keski tüketimleri incelenmiştir. Dört aylık iş-zaman etüdü sonrasında net kazı randımanlarının %9 ile %17 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Kazı kesiti ortalama 26 m^2 olarak sağlandığı galeride geçilen formasyonların %85'inden fazla kumtaşı oluşturmakta olup silttaşı, kömür bandlı kumtaşı ve konglomera birimleri de kesilmiştir. Çalışmada sadece masif kumtaşlarının laboratuarda dayanım (tek eksenli basınç ve çekme) ile aşındırıcılık (CAI) deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar ve saha gözlemlerinden elde edilen bilgiler, literatürde travers kafalı KGAM makinaları için geliştirilmiş ampirik bağıntılarla tahmin edilen performans ve geliştirilen keski tüketimini belirleyen abaklarla karşılaştırılmıştır. Fiili olarak gerçekleşen net kazı miktarı ile incelenen ampirik performans sonuçları karşılaştırıldığında en uygun sonucu Gehring (1989), Balcı vd. (2004) ve Sandvik (2015) yaklaşımlarının verdiği saptanmıştır. Ayrıca, 3 farklı keski tüketim tahmin yöntemi (Johson ve Fowell (1986), Plinninger vd. (2004) ve Sandvik (2007)) ile fiili keski tüketim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Uygulamadaki keski tüketim miktarına en yakın sonuç Sandvik (2007) ile elde edilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar Ersoy vd. (2016)'nın aynı havzada R60t model KGAM makinası için yapılan performans değerlendirmesiyle karşılaştırıldığında paralellik göstermektedir. Her iki çalışma sonucuna göre, sedimanter kayaçlar içinde KGAM ile kazı yapılması durumunda performans tahmininde Gehring (1989) ve Balcı vd. (2004) modellerinin kullanılması tasarımcıya yardımcı olacaktır.

Zonguldak Taşkömür Havzası'nda kollu tip galeri açma makinelerinin kullanılmasından önce yapılması gereken, üniversite ve sektörün birlikte çalışarak geniş kapsamlı bir laboratuvar ve saha çalışması yapılması ve bu çalışmaların sonuçları doğrultusunda ekonomiklik ve verimlilik açısından tüm kriterler değerlendirilerek en uygun makinenin seçiminin yapılmasıdır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmaya yardımcı olan Hattat Enerji ve Maden Ticaret A.Ş. Amasra Taşkömürü İşletmesi yöneticilerine ve Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP)'ne (Proje No: 2014-98150330-01 ve 201598150330-03) teşekkürü borç bilirler.

KAYNAKLAR

Abdolreza, Y.C., Yakhchali, S.H. 2013. A new model to predict roadheader performance using rock mass properties. J. Coal Sci. Eng., 19(1), pp. 51–56.

Balci, C., Bilgin, N. 2001. Estimating the specific energy from rock properties for selection of rapid excavation system. In: Proceedings 10th international Symposium Mine Planning Equipment Selection, November 19–21, pp. 393–400, New Delhi, India.

Balci, C. Demircin, M.A., Copur, H., Tuncdemir, H. 2004. Estimation of optimum specific energy based on rock properties for assessment of roadheader performance. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, v.104, pp. 633-641.

Bilgin, N., Akgün, S.I., Shahriar, K. 1988. Amasra karbonifer havzasındaki damarların mekanik dayanımları açısından sınıflandırılması. Türkiye 6. Kömür Kongresi, 23-27 Mayıs, s.411-425, Zonguldak.

Bilgin, N., Tuncdemir, H., Balci, C., Copur, H., Eskikaya, S. 2000. A model to predict the performance of tunnelling machines under stressed condition. World Tunnel Congress, South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 47–53, Durban.

Bilgin, N., Tumac, D., Feridunoglu, C., Karakaş, A.R., Akgül, M. 2005. The performance of a roadheader in high strength rock formations in Küçüksu tunnel. In: Erdem, Y., Solak, T. (eds) Proc. The 20th Int. Mining Congress, pp. 815-820, İstanbul.

Bilgin, N., Temizyürek, İ., Çopur, H., Balcı, C., Tumaç, D. 2010. TTK Amasra bölgesi kalın damarın kesilebilirlik özellikleri ve mekanize kazısı üzerine bazı görüşler. Çolak, K, Aydın, H, (eds), Türkiye 17. Kömür Kongresi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 2-4 Haziran, s.217-229, Zonguldak.

Bilgin, N., Balcı, C., Tumaç, D., Avunduk, E., Çomaklı, R. 2013. PLT Madencilik San. ve Tic. A.Ş. Amasya Suluova kömür sahası linyit ve yan kayaçların kazılabilirlikleri ve kollu galeri açma makinası seçimi. PLT Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'ye Sunulan Rapor, İTÜ Döner Sermaye Projesi.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. 2014. Mechanical excavation in mining and Civil Industries. CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13:978-1466584747, 388 p.

Birön, C. 1984. TTK Amasra B Ana Hazırlık Ön Projesi. İTÜ Maden Fakültesi, Proje No 12/84, 123 s.

Copur, H., Rostami, J., Ozdemir, L., Bilgin, N. 1997. Studies on performance prediction of roadheaders. Proceedings of the 4th International Symposium on Mine Mechanization and Automation, Brisbane, pp. A4-1–A4-7, Australia.

Copur, H., Ozdemir, L., Rostami, J. 1998. Roadheader applications in mining and tunneling. Mining Engineering, 50, s.38–42.

Ebrahimabadi, K, Goshtasbi, K, Shahriar, M, Cheraghi, S. 2011. Predictive models for roadheaders' cutting performance in coal measure rocks. Yerbilimleri, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 32 (2), s.89-104.

Ersoy, C. 2014. Kollu galeri açma makinelerinin seçim kriterleri ve Amasra Havzasına uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 116s.

Ersoy, C., Balcı, C., Şenkal, S.S. 2016. Amasra Taşkömürü Havzasında çalışan kollu galeri açma makinesinin performans değerlendirmesi. Türkiye 20. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, s. 37-47, Zonguldak.

Fowell, R.J., Pycroft, A.S. 1980. Rock machineability studios for the assessment of selective tunnelling machine performance. 21st. National Rock Mech. Symposium, USA, Miss., pp. 116-121.

Gehring, K.H. 1989. A cutting comparison. Tunnels and Tunnelling, Nov., pp. 27-30.

Hekimoğlu, O.Z., Fowell, R.J. 1988. Bomlu kazı makinalarının temel özellikleri ve seçimleri. Türkiye 6. Kömür Kongresi, s. 29-52, Zonguldak.

ISRM 2015. Suggested Method For Determining The Abrasivity of Rock By The Cerchar Abrasivity Test, The ISRM Suggested Method for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. Ulusay, R. (ed.), Springer, DOI:10.1007-978-3-319-07713-0, pp. 101-106.

Johnson, S.T., Fowell, R.J. 1986. Comprehensive strength is not enough: Assessing pick wear rates for drag tool equipped machines. Proc. 27th US Rock Mech. Symp, AIME, pp. 286-292, Tuscaloosa.

McFeat-Smith, I., Fowell, R.J. 1979. The selection and application of roadheaders for rock tunnelling. In: A.C. Maevis & W.A. Hustrulid (eds), Proceedings of the Rapid Excavation and Tunnelling Conference; pp. 261–279, Atlanta.

Ocak, I., Bilgin, N. 2010. Comparative studies on the performance of a roadheader, impact hammer

and drilling and blasting method in the excavation of metro station tunnels in Istanbul. Tunn Undergr Space Technol, 25, pp. 181–187.

Plinninger, R.J., Kasling, H., Thuro, K. 2004. Wear prediction in hard rock excavation using the CERCHAR abrasiveness index (CAI). EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, Schubert (ed.), pp. 599-604.

Restner, U., Pichler, J. 2007. Mont Cenis Tunnel modification project-lowering of tunnel invert with SANDVIK tunnel miner MT620. 2. Ulaşımda Yeraltı Kazıları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 15-17 Kasım, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayın No: 138, pp. 191-198, İstanbul.

Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D.M. 1994. Performance prediction: a key issue in mechanical hard rock mining. Min Eng, 46(11), pp. 1263–1267.

Sandvik Mining and Construction GmbH, 2008. Preliminary Geotechnical Report for Hema, Schubert (ed.). pp. 599-604.

Thuro, K., Plinninger, R. 1999. Roadheader excavation performance- geological and geotechnical influences. In: 9th ISRM Congress, August, pp. 1241-1244, Paris.

Tumac, D, Bilgin, N., Feridunoglu, C., Ergin, H. 2007. Estimation of rock cuttability from shore hardness and compressive strength properties. Rock Mech Rock Eng, 40(5), pp. 477–490 .

Yaralı, O., Akçın, N. 2005. Zonguldak Taşkömür Havzası kömür çevre kayaçlarının aşındırıcılık özelliklerinin araştırılması. Türkiye Uluslararası 19. Madencilik Kongresi Kitabı, TMMOB Maden Müh. Odası Yayını, s. 243-251, İzmir.

Yaralı, O. 2004. Kömür çevre kayaçlarının petrografik özellikleri ile aşındırıcılık özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi. ZKÜ Araştırma Fonu Final Raporu, Zonguldak, 44 s.

Yaralı, O. 2008. Türkiye Taşkömürü Kurumu galeri ilerlemelerinde kollu galeri açma makinalarının kullanımının araştırılması. Türkiye 16. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, s.77-93, Zonguldak.

Yarali, O., Duru, H. 2016. Investigation into effect of scratch length and surface condition on Cerchar abrasivity index. Tunn Undergr Space Technol, 60, pp. 111-120.

Yaralı, O., Sakız, U., Duru, H., Aydın, H., Su, O., Geniş, M. 2018. Türkiye Taşkömürü Kurumu'nda galeri ilerlemelerinde kollu galeri açma makinası kullanımının analizi. Türkiye 21. Uluslararası Kömür Kongresi Kitabı, TMMOB Maden Müh. Odası Yayını, s. 69-84, Zonguldak.

Van (Başkale) Tünelinin Yapımında Karşılaşılan Problemler ve Çözüm Önerileri

Problem and Solution Suggestions in Construction of the Van (Başkale) Tunnel

O.O. Varol
Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Van

M. Ayhan
Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

ÖZET Bu çalışma kapsamında, Van (Başkale) mevkiinde NATM yöntemiyle açılan tünel incelenmiştir. Yapılan tünel, sağ tüp 3.116 m ve sol tüp 3.107,25 m olarak projelendirilmiş olup toplam uzunluğu 6223,25 m'dir. Çalışmada, tünel açımı sırasında yaşanan sorunlar ve elde edilen verilere dayanarak bu sorunların aşılmasında kullanılan yöntemler irdelenmiştir.

ABSTRACT In this study, the tunnel opened by the NATM method in Van (Başkale) was investigated. The constructed tunnel is projected 3116 m in the right tube and 3107.25 m in the left tube and the total tunnel length is 6223.25 m. In this study, the methods used to overcome these problems were investigated based on the problems experienced during the tunnel opening and the obtained data.

1 GİRİŞ

Van – Hakkari karayolunda 2730 rakımlı "32 viraj" olarak bilinen Güzeldere geçidinde yapımına devam edilen tünel ile beraber 45 dakika süren yolculuğun 5 dakikaya düşürülmesi planlanmaktadır. Hakkari'yi Van'a bağlayan karayolunun 80. kilometresinde bulunan ve özellikle kış aylarında sürücülere zor anlar yaşatan, birçok trafik kazasına neden olan yolda Başkale Tüneli'nin inşası ile birlikte bu problemlerin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 25.07.2013 tarihinde ihale edilen Van – (Hakkari – Yüksekova) Ayr. Yolu Km: 61+250 – 109+110 ve Başkale Geçişi Km: 0+000 – 7+300 kesimlerinin yapım işi Mapa İnşaat ve Ticaret A.Ş. tarafından üstlenilmiştir. Tünel yapım işine ise 2014 Temmuz ayında başlanmıştır. Başkale Tüneli yapım işinde bugüne kadar 3 alt yüklenici değişmiştir. Başkale Tüneli; çift tüp, her bir tüpte tek yönlü trafiğin işleyeceği çift şeritli ve şerit genişliği 4 m olacak şekilde tasarlanmıştır

Van ili Başkale ilçesi Güzeldere mevkiinde NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) ile açılan Başkale Tüneli; sağ tüp (3116 m) ve sol tüp (3107,25 m) olarak projelendirilmiş olup toplam uzunluğu 6223,25 m'dir. Bu çalışmada, tünel açımı sırasında yaşanan sorunlar ve elde edilen verilere dayanarak bu sorunların aşılmasında kullanılan yöntemler irdelenmiştir.

Yer altı kazılarında bölgenin jeolojisinin detaylı olarak bilinmemesinden kaynaklanan sorunlar, tünel yapım aşamasında maliyeti arttıran temel unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Tünel inşası esnasında karşılaşılan en genel sorun, tünelin jeolojik etütlerinin detaylı bir şekilde yapılmaması, sondaj kuyularının açılmaması ve haritalamanın yapılmaması gibi ön fizibilite raporlarının yetersizliği konularıdır (Erdal ve diğ., 2017).

2 TÜNEL AÇIMINDA KARŞILAŞILAN JEOLOJİK SORUNLAR

Tünel açımında karşılaşılan sorunların genel olarak, zeminin veya kayanın genel yapısı, ana zayıflık düzlemlerinin yönelimi, kayanın ayrışması, yer altı su durumu ve litoloji olarak sıralamak mümkündür (Vardar ve Koçak, 2013).

Kaya kütlesinin düşük dayanımı ve heterojenliği tünel performansının tahminini zorlaştırmaktadır. Tünelin içerisinde açıldığı kaya kütlelerindeki yersel özellikler, gerilmeler ve deformasyonlar tünel duraylılığını etkileyecektir (Özbek, 2005).

Tabakalanmalar, faylar, eklemler gibi tünelin açılacağı bölgedeki yapısal koşullar dikkate alınıp doğru bir şekilde değerlendirildiğinde, açılacak tünel veya yeraltı yapısında yaşanması muhtemel olan aşırı sökülme, zeminde batma ve tahkimat gibi işlemlerde meydana gelebilecek sorunlar önceden öngörülebilir ve sağlıklı çözümler yapılabilir (Erdal ve diğ., 2017).

Yapılan bu çalışma kapsamında incelenen Van (Başkale) Tünelinin açılmasında meydana gelen sorunlar incelenmiş ve bu kapsamda sorunların çözümü için uygulanan yöntemler incelenmiştir.

Proje kapsamında tünel güzergahı boyunca 2 lokasyonda 86,00 metre temel sondaj yapılmıştır. Başkale Tüneli güzergahının tamamı Kırkgeçit formasyonunun (Tk) içinde yer almaktadır. Kırkgeçit Formasyonu; alt kısımda gri-kırmızı renkte taban konglomerası ile başlamakta olup, konglomera kalınlığı 5-50 m arasında değişmektedir. Bu tabaka üste kotlara doğru kumtaşı, marn ve şeyl ardalanması şeklinde görülmektedir. Kırkgeçit formasyonuna ait kumtaşı, konglomera, kiltaşı ve silttaşı türü kayaçlar yeraltı suyu açısından geçirimsiz-az geçirimli özelliğe sahiptirler. Ancak bu kaya grupları, içermiş olduğu çatlak sistemlerinin nitelik ve niceliğine bağlı olarak yer altı suyu iletimi (hareketliliği) söz konusudur. Van (Başkale) Tüneli'nin zemin özelliklerini oluşturan farklı jeomekanik özelliklere sahip kaya kütlelerinin Q ve RMR kaya sınıflandırılma sistemlerine göre yapılan değerlendirmesi (Tablo 1 – Tablo 2) verilmiştir.

Tablo 1. Van (Başkale) Tüneli Q Kaya Sınıflaması

Km	Litoloji	RQD		Jn		Jr		Ja		Jw		SRF		Q	Kaya Sınıfı
		Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan		
78+336.642-79+040 (Sol) 78+336.642-79+020 (Sağ)	Tk	60 (Orta) (1C)	60	İki eklem takımı + gelişi güzel eklemler (2E)	6	Pürüzlü ve düzlemsel (3E)	1.50	Siltli kumlu yumuşamayan (4D)	3	Kısmi kazı ve düşük su geliri (5A)	1	Tekil zayıflık Zonu (Kazı > 50metre) (6C)	2.50	2.000	Zayıf
79+040-79+100 (Sol) 79+020-79+090 (Sağ)	Tk	45 (Zayıf) (1B)	45	İki eklem takımı + gelişi güzel eklemler (2E)	6	Pürüzlü ve düzlemsel (3E)	1.50	Siltli kumlu yumuşamayan (4D)	3	Orta derecede su geliri (5B)	0.66	Tekil zayıflık Zonu (Kazı < 50metre) (6B)	5.00	0.495	Çok Zayıf
79+100-79+12 (Sol) 79+090-79+123 (Sağ)	Tk	40 (Zayıf) (1B)	40	İki eklem takımı + gelişi güzel eklemler (2x2E)	12	Pürüzlü ve düzlemsel (3E)	1.50	Siltli kumlu yumuşamayan (4D)	3	Orta derecede su geliri (5B)	0.66	Tekil zayıflık Zonu (Kazı < 50metre) (6B)	5.00	0.220	Çok Zayıf

Tablo 2. Van (Başkale) Tüneli RMR Kaya Sınıflaması

Km	Birim	Kaya Mukavemeti		RQD		Eklem Sıklığı		Eklem Durumu		YASS		Düzeltme		RMR	Kaya Sınıfı
		Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan	Tanımlama	Puan		
78+336.642-79+040 (Sol) 78+336.642-79+020 (Sağ)	Tk	25-50 MPa	4	% 60	13	200-600mm	10	Az pürüzlü, sert dolgulu, az bozunmuş	17	Nemli	10	Orta	-5	49	Orta
79+040-79+100(Sol) 79+020-79+090 (Sağ)	Tk	25-50 MPa	4	% 45	8	60-200 mm	8	Az pürüzlü, sert dolgulu, orta derecede bozunmuş	13	Nemli	10	Orta	-5	38	Zayıf
79+100-79+123(Sol) 79+090-79+123 (Sağ)	Tk	5-25 MPa	2	% 40	8	60-200 mm	8	Az pürüzlü, sert dolgulu, orta derecede bozunmuş	13	Nemli	10	Uygun değil	-10	31	Zayıf

Tünelin açıldığı bölgede topografyanın zor koşullar sunması, uygun ulaşım ve çalışma şartlarına sahip olmaması nedeni ile faylar ile ilgili yeterli araştırma yapılamamıştır. Bu sebeple çalışma esnasında farklı fay veya eklem takımları ile karşılaşılması muhtemel sorunlar arasında görülmektedir. Bu sebepten dolayı tünel açımı esnasında belirli lokasyonlarda yatay sondajlar yapılması çalışmanın sağlıklı bir şekilde yürütülmesi için önemli görülmektedir.

Fay zonlarında yapılacak olan kazı çalışmalarında ani yer altı suyu boşalmalarına karşı dikkatli çalışması gerekmektedir.

Şekil 1. Tünel tabanına biriken su

Göçük ve tavan akmalarının önüne geçmek için ise kazıdan hemen sonra, desteksiz tabakaların gevşeyip kendini bırakmasını engellemek için kazı yüzeyine ve duvarlara püskürtme beton uygulaması gerçekleştirerek tavanda olması muhtemel boşalmalar önlenmelidir.

Şekil 2. Sulu ortamda çalışan iş makinesi

Su gelirinin meydana getirdiği bir diğer sorun ise; kazı sırasında yeraltı suyunun tabakalardaki çatlaklara girerek, çatlak yüzeyindeki malzemenin kohezyon, kayma mukavemeti ve içsel sürtünme açısını düşürerek çatlaklarla sınırlanmış olan blokların kayarak düşmesine, boşalmalara yol açarak iş sağlığı ve güvenliği açısından çalışma ortamını olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla birlikte, tünel aynasına biriken su aynada var olan pasanın yumuşamasına ve iş makinelerinin manevra kabiliyetlerinin azalmasına neden olmaktadır. Yaşanan bu problem aşmak için tabanda iri kaya bloklar ile dolgu yapılmalı ve daha sonra biriken suyun kanallar vasıtası ile tünel dışına drene edilmesi gerekmektedir.

3 TÜNEL DESTEK TASARIMI

Van (Başkale) Tüneli güzergahı boyunca hakim olan Kırkgeçit formasyonuna (Tk) ait konglomera, kumtaşı, kiltaşı, ve silttaşı türü kayaçlar içerisinde inşa edilmektedir. Bu bağlamda, tünel güzergahında gözlenen formasyon için yapılan laboratuvar deneyleri neticesinde elde edilen veriler ile kaya kütle puanlaması (RMR) yapılmış, RMR sonuçlarına göre ise jeolojik dayanım indeksi (GSI) değerleri elde edilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. RMR ve GSI değerleri

Jeolojik Birim	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Kayaç Malzeme Sabiti	Elastisite Modülü (MPa)	RMR	GSI
Kırkgeçit Formasyonu (Tk_1)	20	14	2200	44	39
Kırkgeçit Formasyonu (Tk_2)	30	19	9000	59	54

Çift tüp olarak projelendirilen Van (Başkale) Tünelinin zemin profilini oluşturan farklı jeomekanik özelliklere sahip kaya kütleleri RMR kaya sınıflamasına dayalı olarak değerlendirilmiştir. Tünel kaya koşulları NATM Kaya Sınıflaması ÖNORM B 2203 bazında iki sınıfa ayrılmıştır. B2 ve B3 olarak tanımlanan kaya sınıfları sırası ile çalışma alanının yaklaşık %88 ve %12'sini temsil etmektedirler.

4 SONUÇLAR

Başkale Tünelinin projelendirme aşamasında toplam 86 m uzunluğunda, tünelin giriş ve çıkış ağzına yakın 2 adet sondaj yapılmıştır. Dolayısıyla tünel uzunluğunun çok sınırlı bir kısmı hakkında jeoteknik bilgi edinimi söz konusu olup, tünel uzunluğunun büyük bir kısmı hakkında bilgi bulunmamaktadır. Dolayısıyla Sondaj Yoğunluğu değeri oldukça yetersiz 0,01 seviyededir. Genelde projelerin özelliklerine ve risk durumuna bağlı olarak sondaj yoğunluğu 0,2-1,5 arasında değişmektedir. Büyük kapsamlı projelerde sondaj yoğunluğu değerinin en az 1 bir olması önerilmektedir. Sadece belirli lokasyonlarda yapılan yetersiz sayıdaki sondaj verilerine bağlı kalınmaması için tünel kazısı sırasında, ayna arkasındaki jeolojik koşulların, kayaçların jeomekanik özelliklerinin ve su durumunun tespitine yönelik gerektiği yerlerde aynadan yatay sondaj uygulamaları yapılmalıdır. Birçok projede olduğu gibi bu projede de jeoteknik etüdün yetersizliği imalat süresinin uzaması ve proje maliyetinin yükselmesine neden olmaktadır.

KAYNAKLAR

Erdal, G., Ayhan, M., Aydın, D. 2017. Kralkızı-Dicle Sulama Tünellerinin Yapımında Karşılaşılan Sorunlar ve Uygulanan Çözümler. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 9:1, 301-302.

Özbek, A. 2005. Yeraltı Kazılarında (Tünellerde) Yerdeğiştirme Vektörünün İzlenmesi ve Ayna İlerisindeki Ortamların Tahmini. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, Cilt 18, Sayı 2, ss. 171-181.

Vardar, M., Koçak, C. 2013. İnşaat Teknolojisi Ders Notları. Maden Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Umbrella Arch (Şemsiye Boruları) Uygulamalarında Ölçme İşleri Yöntemleri

Methods of Surveying Works for Umbrella Arch Applications

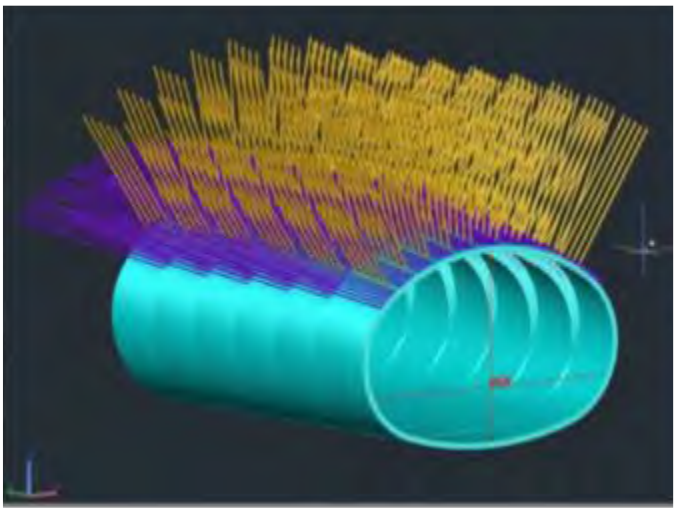
İ. Dilli, S. Şen
KRK Holding – Soner Temel Mühendislik İnşaat ve Ticaret A.Ş., İstanbul

ÖZET Umbrella Arch (Şemsiye Boruları) metodu, zemin karakterli ortamlarda ve/veya jeolojik ortam içsel parametrelerinin gerektirdiği ortamlarda; tünel üzeri yükler ve bu etkilerin ortaya çıkarabileceği muhtemel deformasyonları önleyebilmek, tünel kazı aynası önü emniyeti sağlayabilmek amaçlarıyla ön desteklemeye ihtiyaç duyulan tünel kazı destekleme imalatlarında gün geçtikçe daha yoğun kullanılan bir uygulamadır. Metodun kendinden beklenen tüm gereksinimleri tam anlamıyla karşılayabilmesi için tasarımdan uygulamaya kadar geniş bir zaman aralığında tüm detayların hassasiyetle irdelenmesi, sonuç olarak boru delgisi ve montajının tünel kazı geometrisine uygun yapılması gerekmektedir. Edinilen tecrübeler ışığında; bu zorunluluğun gerçekleştirilebilmesi makina, teçhizat, ölçme bilgisi ve donanımı ile uygulayıcı personel bilgi birikimine bağlıdır.

Bu bildiride, uygulamada farklı ölçme metotları kullanılarak alınan sonuçlardan yola çıkılarak umbrella arch metodu ile imalat yapılan tünel kazı-destekleme işlerinde ölçme işleri olumsuzlukların imalat sürecine etkisi, bu etkinin en aza indirilmesi için gerekli makine, ölçme, tasarım, insan kaynağı bilgi ve becerisi iyileştirme önerileri aktarılmıştır. Metodun uygulamasında kritik öneme sahip "ölçme işleri" baz alınarak yapılan bu değerlendirme ve iyileştirme önerilerinde metot ile ilgili tasarım esnasında dikkate alınması gerekenler, makineye bağlı çözüm önerileri, ölçme işleri kaynaklı çözüm önerilerinin uygulamada başarısı ile avantaj ve dezavantajları üzerinde durulmuştur.

1 UMBRELLA ARCH

Umbrella Arch (Şemsiye Boruları) sisteminin uygulanmaya başlandığı günden bu yana tünel güzergâh plan ve profili, tünel geometrisindeki tasarım çözümleri ile bu çözümlerin imalata dönüştürülmesinde ölçme işleri ilgi alanına giren çeşitli sorunlarla karşılaşılmaktadır. Özellikle metro tünellerinde yapılan gözlem ve uygulamaların dikkate alındığı bu bildiride de değinildiği üzere, yöntemin doğası (Şek. 1) gereği ortaya çıkan geometrik değişimlerin 3 boyutlu olarak ele alınmaması gibi eksiklikler neticesinde tünel kazı geometrisini birinci dereceden ilgilendiren bu sorunlar, nihayetinde kazı yüzey bozuklukları, fazla kazı yapılması, birincil desteklemede kullanılan püskürtme beton, çelik hasır vb. tahkimat elemanlarının kabul sınırları dışında fazla kullanımı gibi sonuçlara yol açmaktadır. Ayrıca, yapılan uygulamalar yukarıda da iletildiği gibi tünel ayna emniyeti, yüzey ve tünel deformasyonlarının sınırlandırılması gibi kritik öneme sahip amaçlara hizmet ettiğinden uygulamanın geometrik hassasiyeti teknik olarak önem kazanmaktadır.



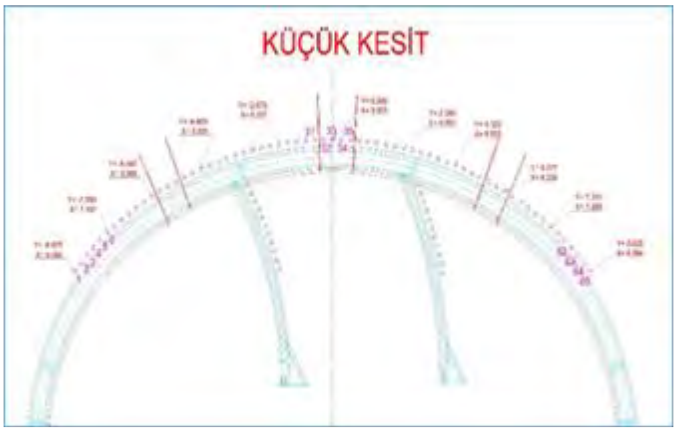
Şekil 1. 3B umbrella arch çizimi

Umbrella arch imalatında delgi noktalarının tünel aynası yüzeyine işaretlenmesi sonrasında her bir deliğin tasarım doğrultusuna uygunluğu çoğunlukla delgi makinası operatörlerinin beceri ve kabiliyeti ölçüsünde gerçekleşmektedir. Uygulamada delgi makinası operatörünün uygun doğrultuyu tespit etmesini sağlayacak değişik metotlar, ekipmanlar denenmiş ama verimli sonuca ulaşmada bazı problemler yaşanmıştır. Ortaya çıkan problemler yalnızca personel kaynaklı olmamış, metodun başarısının ve uygulama yollarının kaçınılmaz olarak makine seçimi ve makine fiziki özelliklerine birinci dereceden bağlı olması nedeniyle makine teçhizat seçimine ilişkin uyumsuzluklarla da karşılaşıldığı tecrübe edilmiştir. Halen sektörün gelişim aşamasının içinde bulunulduğu düşünülen bu dönemde uygulamada delgi esnasında çoğunlukla herhangi bir ölçme aleti veya yazılımı kullanılmamaktadır. Bunun sonucunda iş gücü, zaman ve maddi kayıplar olmaktadır.

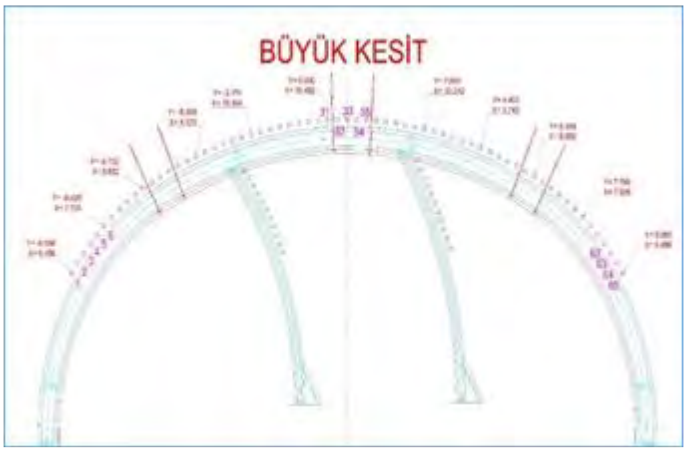
Sektör tarafından da aşılması gereken bu durum karşısında umbrella arch boruları delgi ve montaj olarak imalat süreci geliştirilebilir. Ölçme uygulama konusunda *"Klasik yöntem", "Ölçme aleti destekli yöntem" ve "Ölçme teknolojisi yazılım destekli yöntem"* olmak üzere üç yöntemi de ofis ve sahada uygulamalı olarak değerlendirmeye aldık. Bu bildiride sırası ile bu süreç ve sonuçları birlikte ele alınacaktır.

2 KLASİK YÖNTEM

Umbrella Arch boruları uygulaması yapılacak tünellerde umbrella boruları delgisi işlemi yapılabilmesi için tünel kesitinde yeteri kadar genişleme yapılır. Tünel gabarisi için kazılacak kesite küçük kesit (Şek. 2), umbrella boruları uygulaması yapılacak geniş kesite ise büyük kesit (Şek. 3) denir. Küçük kesitten büyük kesite geçiş yapılan tünel boyuna da kademe denir.



Şekil 2. Küçük kesit



Şekil 3. Büyük kesit

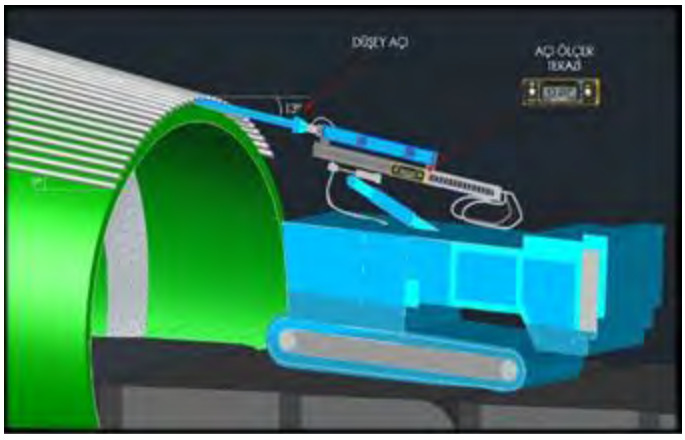
Umbrella Arch uygulaması yapılacak tünel aynasında küçük kesite göre umbrella borularının proje üzerindeki yerleşim noktaları, tünel uygulama referans noktasına göre mesafe ve kot fark değerleri hesaplanır. Düşey açılar ise küçük ve büyük kesit birlikte kullanılarak ayrıca hesaplanır.

Bu yöntemde; ölçme aleti operatörü, tünel içinde dengelemesi yapılmış koordinatlı sabit noktaları, proje esaslarında güzergâh ve tünel kesiti geometrik verilerini ve küçük kesit

üzerindeki umbrella boru yerlerinin mesafe, kot fark değerlerini de kullanarak ölçme aleti yardımıyla boru yerlerini ayna yüzeyine işaretler (Şek. 2).

Şekil 4. Delgi noktalarının düşey açıları

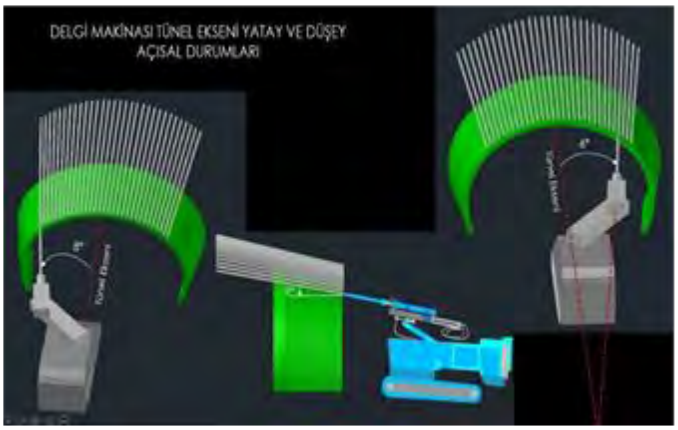
Delgi makinesi tünel aynasına işaretli delgi noktalarına göre uygun yere konuşlandırılır. Şekil-4 deki gibi belirtilen değerlere göre, kızak üzerine konulan düşey açıölçer (Şek. 5) yardımıyla boru delgisini yapar. Bu yöntemde yatay açı bir önce yapılmış olan kademe ki tünel yüzeyine paralel referans alınarak delgi makinası operatörü tarafından tecrübesine ve becerisine bağlı, el terazi, göz mizan olarak yapılmaktadır.



Şekil 5. Şemsiye boruları düşey açı ölçer

2.1 Klasik Yöntem ile Umbrella Arch Uygulaması

Ayna üzerinde önceden yerleri işaretlenmiş umbrella boruları delgi noktalarına delgi ucu sabitlenir (Şek. 6). Delgi operatörünün deneyim ve becerisine bağlı olarak delgi makinası doğrultuya getirilir. Delgi makinası kızak üzerine elektronik düşey açıölçer yerleştirilir. Bu elektronik düşey açıölçer yardımıyla kızak umbrella açısına getirilerek ayarları yapılır ve delme işlemine başlanır.



Şekil 6. Delgi ucu sabitleme

Umbrella arch proje verilerinin sahaya uygulanmasında gerekli titizlik gösterildiğinde düzgün imalat elde edilebileceği gibi, aksi durumda hatalı imalatlar kaçınılmazdır ve önemli işgücü, zaman ve maddi kayıplara neden olacaktır.

Uygulamanın en önemli avantajı "*daha hızlı imalat*" yapmaktır. Dezavantajları ise;

- Doğrultu hatası yapma olasılığı,
- Shotcrete taraması çıkma olasılığı,
- Kazı fazlası çıkma olasılığı,
- Fazla shotcrete atma olasılığı,
- Fazladan beton dökme olasılığı yüksektir.

3 ÖLÇME ALETİ DESTEKLİ YÖNTEM

Umbrella uygulaması yapılan tünellerde umbrella arch boruları aynı zamanda kazı sınırlarını da belirler. Dolayısı ile umbrella arch borularının hatalı imalatı yapılacak olan tünel kazısının hatalı olmasına atılacak shotcrete miktarının gereğinden fazla olmasına sebep olacaktır. Bu durumdan ve sair sebeplerden dolayı çakılacak umbrella arch boruları hassas bir şekilde çakılmalıdır.

Bir diğer husus ise tünelde Şekil 1'de görüldüğü gibi umbrella arch boruları aralarına çakılacak yüzey zemin çivisi veya zımba bulonu var ise bu durumda umbrella

arch montajının hassas bir şekilde çakılması daha da önem arz etmektedir.

Şöyle ki; umbrella arch boruları bir önceki kademe boruları ile bindirmeli olacağından aralara çakılacak yüzey zemin çivisi veya zımba bulonu delgisinin hassas çakılmayan boruya rastlama olasılığı yüksektir. Bu hassasiyeti sağlamak için çeşitli ölçme destekli çalışmalar yapılmıştır. Zaman içerisinde ölçme cihazları elektronik ve jeodezik yazılımları yönünden gelişmelidir.

Umbrella arch boru uygulamasında elektronik ölçme cihazının (Total Station) baz hattı modülü uygulamasından yararlanılır. Burada İstanbul metro projelerinde uyguladığımız ölçme cihazı (Total Station) yardımıyla yapılan umbrella arch boruları doğrultu uygulaması çalışmalarından söz edilecektir.

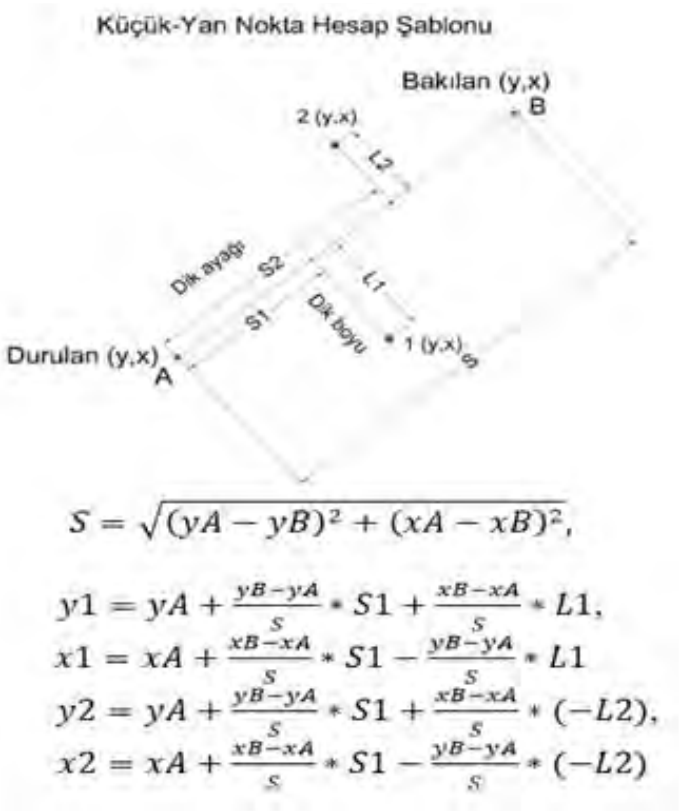
3.1 Ölçme Aleti Destekli Yöntem Ön Hazırlıkları ve Delme İşlemi Yapılması

Başlarken küçük kesit üzerinde her bir umbrella arch boruları numaralandırılır. (Şekil-8) Küçük kesit uygulama referans noktası ve eksenlerine göre her bir boru merkezlerinin mesafe, kot farkı (y,x) tablosu çıkarılır.

Yine büyük kesit üzerinde her bir umbrella borusu numaralandırılır. Büyük kesit uygulama referans noktası ve eksenlerine göre her bir boru merkezinin mesafe, kot farkı (y,x,z) değerleri tablosu oluşturulur.

Daha sonra, "küçük nokta – yan nokta" hesap şablonu ve verilen formüller yardımıyla her bir umbrella borusunun her iki kesitteki boru merkezlerinin üç boyutlu koordinatları hesaplanır (Şek. 7).

Umbrella arch boruları uygulaması yapılacak tünel aynasının proje km'sine göre üç boyutlu (y,x,z) boru merkezi koordinatları hesaplanan boruların ölçme cihazı yardımıyla işaretlenmesini yapmak için baz hattı programı çalıştırılır. İlgi no'lu borunun küçük ve büyük kesit üzerinde hesaplanan üç boyutlu koordinat değerleri seçilerek vektörel bir doğru oluşturulur. Bu doğrunun sapma değerleri sıfıra gelene kadar cihazın lazer ışığı tünel aynası yüzeyinde hareket ettirilerek ilgili umbrella borusunun çakılacağı nokta işaretlenir. Her bir umbrella borusu delgi yeri için bu işlem tekrarlanır.



$$S = \sqrt{(yA - yB)^2 + (xA - xB)^2},$$

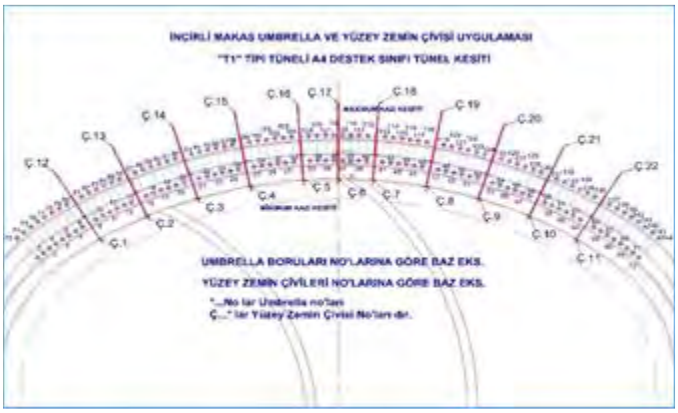
$$y1 = yA + \frac{yB-yA}{S} * S1 + \frac{xB-xA}{S} * L1,$$
$$x1 = xA + \frac{xB-xA}{S} * S1 - \frac{yB-yA}{S} * L1$$
$$y2 = yA + \frac{yB-yA}{S} * S1 + \frac{xB-xA}{S} * (-L2),$$
$$x2 = xA + \frac{xB-xA}{S} * S1 - \frac{yB-yA}{S} * (-L2)$$

Şekil 7. "Küçük nokta – yan nokta" hesap şablonu ve verilen formüller yardımıyla her bir umbrella borusunun her iki kesitteki boru merkezlerinin üç boyutlu koordinatlarının hesaplanması

Boru delgi yerlerinin tamamı işaretlenmesi bittikten sonra delgi makinası operatörü shotcretli ayna yüzeyinde bit ve tabanca kullanılarak delgi yerlerini zemine kadar açar. Delgi makinası kızak arkasına, auger tiji, rotary merkezi doğrultusunu tam ortalayacak şekilde üzerine dairesel prizma veya hedef levhası montajı yapılacak bir düzenek yapılır. Ölçmeye başlamadan önce bu düzenek üzerine prizma veya hedef levhası montaj edilir. Üç boyutlu koordinat (y,x,z) dosyası yüklü ölçme cihazında baz hattı programı çalıştırılır. İlgili umbrella arch noktasına göre boru yerinin başlangıç ve bitiş koordinatları seçilerek vektörel bir doğru oluşturulur.

Delgi makinasının tiji ilgili umbrella arch boru noktasında shotcretli yüzeyde açılan delikte olmak üzere kızak arkasına montajını yaptığımız hedef levhası ise ölçme cihazı yardımıyla doğrultuya gelene kadar hareket ettirilerek rotary, auger tiji doğrultuya getirilir. Baz hattı sapma değerleri sıfırlanınca delgi işlemi başlatılır. Delgi esnasında kızak arkasındaki hedef levhası veya prizma sürekli ölçülerek sapmalar kontrol edilir. Sapma olursa kızak arkası tekrar doğrultuya getirilir. Delgi bitene kadar bu işlem devam eder. Böylece proje geometrisi doğrultusunda umbrella arch boru delgisi yapılması sağlanmış olur.

Umbrella borularının ve yüzey zemin çivilerinin hem hesap hem de sahada kullanımı için Şekil 8'da görüldüğü üzere numaralandırılması ve karşılığı gösterilmiştir.



Şekil 8. Umbrella arch borularının numaralandırılması ve karşılığı

Umbrella arch uygulaması yapılacak tünel tipinde klasik yöntemde olduğu gibi öncelikle umbrella boruları noktalarının küçük ve büyük kesit üzerinde referans noktalarına göre mesafe ve kot farkları hesaplanır. Şekil 9'da gösterildiği üzere proje geometrik değerlerine göre kademe boyunda küçük ve büyük kesit km'leri ayrı ayrı olarak boru delgi noktalarının koordinat değerleri hesaplanarak ölçme aletine yüklenir. Bu değerlerle yukarıda anlatıldığı gibi delgi işlemi gerçekleştirilir.

Şekil 9. Küçük ve büyük kesit km'leri ayrı ayrı olarak boru delgi noktalarının koordinat değerleri hesaplanarak ölçme aletine yüklenmesi

3.1.1 Ölçme cihazı destekli umbrella arch uygulaması özeti ve sonuçları

Ayna üzerinde önceden yerleri işaretlenmiş umbrella arch boru noktalarına delgi ucu sabitlenir. Kızak arkasına montajlanmış hedef levhası (Şek. 10) sayesinde ölçme aleti ile ölçümler yapılır, yatay ve düşey sapmalar delgi operatörüne iletilir.

Şekil 10. Kızak arkasına montajlanmış hedef levhası ve ölçme aleti ile ölçümler yapılması

Delgi operatörü verilere göre kızak gerisini yönlendirerek doğru konuma getirir ve delme işlemine başlar. Delme işlemi tamamlanana kadar ölçümler tekrarlanarak gerekli düzeltmeler yapılır.

Uygulamanın avantajları;

- Gerçek doğrultuda imalat yapılması,
- Shotcrete taramasının minimum olması,
- Kazı fazlasının az olması,

- Shotcrete zayiatının azalması,
- Beton zayiatının azalması.

Uygulamanın dezavantajları ise;

- İşlem süresinin uzaması,
- Personel sayısının artması

4 ÖLÇME TEKNOLOJİSİ VE YAZILIM DESTEKLİ YÖNTEM

Bu teknoloji ile sunum çalışması yapıldı (Şek. 11), fakat üretim yapmadığımızdan kısaca konu hakkında bilgi verilecektir.

Tünel imalatında kullanılan delgi makinalarının hemen hemen tamamına yakını direct control sistemli delgi makinalarıdır. Zeminin zayıf olduğu bölgelerde umbrella arch yöntemiyle tüneller açılmaktadır.

Bu yöntemle tünel açmada en düşük maliyetle ilerlemenin gerçekleşmesi; umbrella borularının proje esaslarına göre montajının yapılması, kazının hassas bir şekilde sürdürülmesi, delgi makinasının pozisyonu ve delgi açısının hassas bir şekilde konumlandırılması ile mümkündür.

Şekil 11. Yazılım destekli ölçme teknolojisi

Tünel inşaatı sektöründe kullanılan klasik kontrollü delgi makinalarının tam otomasyonlu bilgisayarlı sisteme geçişi eldeki makinaların amortismanlarının kurumlara büyük külfet getirdiği bir gerçektir. Buradan hareketle klasik direct control (doğrudan kontrol) sistemli delgi makinaları için, ölçme teknolojisi kabiliyetli Total Station cihazları ile entegre olarak çalışan tablet bilgisayar ve bağlantılı yazılımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yazılımlar ölçme teknolojisi ile bütünleşmiş çalışarak doğrudan kontrollü delgi makinasını açı ve pozisyon olarak hassas bir şekilde konumlandırabilmektedir.

Ön hazırlık çalışmaları tablet bilgisayara ve ölçme aletine proje bilgileri yüklenerek sahada imalata hazır hale getirilir.

Uygulamanın temel amacı; umbrella arch proje verilerinin sahaya aplikasyonunda hata payını azaltarak maliyetlerin düşürülmesidir.

Bunun için gerekli donanımlar;

- Delgi operatörü için Tablet bilgisayar ve yazılımı,
- Ölçme cihazı ve yazılımı,
- Delgi makinası kızak arkasına montajlı prizma

Uygulamanın diğerlerine göre avantajları;

- Gelen veriler doğrudan delgi operatörünün tablet bilgisayarında görünür anında müdahale yapabilir, zaman kaybı olmaz,
- Gerçek doğrultuda delgi yapılması,
- Uygun imalat süresi,
- Shotcrete taraması olmaması,
- Kazı fazlasının minimum olması,
- Shotcrete zayiatının az olması,
- Beton zayiatının az olması,
- Bu uygulama ile umbrella arch, zemin çivisi, zımba bulonu, kesit alımları ile üç boyutlu tünel gözlemleri de yapılabilmektedir.

5 SONUÇ

Bu bildiride, farklı ölçme metotları uygulamaları irdelenmiştir. Bu duruma göre teknoloji ve yazılım geliştikçe; delgi makinası boyutları proje tasarımı uygunluğu artıyor, delgi makinası operatörü profili eğitim düzeyi bilgi ve becerisi iyileşiyor. Proje kazı geometrisine uygun imalat yapılıyor. Sonuç olarak; iş gücü, kazı, beton zayiatları, zaman ve maddi kayıplar en aza inmektedir.

KAYNAKLAR

Bektaş, S. 2009. Pratik Jeodezi. Samsun, 408 s.

Kadıköy-Kartal Metrosu Ünalan İstasyonu ve Acıbadem Metrobüs Durağı ile Akasya AVM Arası Yaya Bağlantı Tüneli İnşaatında Karayolu Geçişi Yatay Boru İtme Uygulaması

Implement of Horizontal Thrust Pipes in the Construction of Kadıköy-Kartal Metro Station, Ünalan Station and Acıbadem Metrobus Station and Akasya Shopping Center Pedestrian Crossing

E. Kanlıçay
Jeoloji Mühendisi, Sargın İnşaat ve Mak.San.Tic.A.Ş, Ankara

ÖZET Bu proje İstanbul ili, Üsküdar ilçesi, Acıbadem semtinde, yapımı özel bir firma tarafından tamamlanmış olan Akasya Alışveriş Merkezinin Kadıköy-Kartal metrosuna, Ünalan istasyonu ve Uzunçayır metrobüs durağı ile bağlanması amaçlı yapılmıştır.

Ülkemizde yapılan altyapı çalışmalarında belli bir standardın olmaması, altyapı harita ölçümlerinin yapılmaması, buna bağlı olarak bilgi sistemlerinin yeterli olmaması şehir içi tünelciliğinde, kazı ve tahkimat aşamalarında, farklı kazı yöntemleri ve maliyeti yüksek çözümler doğurmaktadır. Bu duruma en iyi örnek İstanbul Üsküdar ilçesi sınırları içerisinde bulunan, Akasya Alışveriş Merkezinin Kadıköy-Kartal metrosu ve Uzunçayır metrobüs durağına bağlanan yaya tünelinde karşılaşılan altyapı ve üstyapı sorunlarıdır.

Bu yazımızda altyapı haritalarının ve buna bağlı olarak altyapı bilgi sisteminin neden önemli olduğu ve karşılaşılan sorunun ne şekilde çözüldüğü anlatılmıştır.

ABSTRACT This project was carried out for the purpose of connecting Akasya Shopping Center with Kadıköy-Kartal metros, Ünalan station and Uzuncayır metrobus station in the Istanbul province, Üsküdar district, Acıbadem district, which was completed by a private company.

Due to the lack of a certain standard in infrastructure studies in our country, the lack of infrastructure map measurements and accordingly the inadequacy of information systems, different excavation methods and costly solutions arise in urban tunnels, excavation and support phases. The best example of this is the infrastructure and superstructure problems encountered in the pedestrian tunnel connected to the Kadıköy-Kartal metro and Uzuncayır metrobus station of the Akasya Shopping Center located in the borders of Üsküdar district of Istanbul.

In this article, it is explained why infrastructure maps and infrastructure information system are important and how the problem is solved.

1 GİRİŞ

Projede Kadıköy-Kartal metrosu Ünalan istasyonuna 430 metre uzunluğunda 56 m² kesitli bir yaya tüneli ve Uzunçayır metrobüs durağına bağlantı için, istasyon yapısı olarak planlanmıştı. Özellikle yaya tünelinin ve metrobüs bağlantı istasyonunun Uzunçayır ismi ile anılan bölgedeki kısımlarının, dolgu zemin içinde olması, yapım sırasında tünelcilik açısından işleri oldukça güçleştirmiştir. Tünel güzergahında, Uzunçayır bölgesinin zemin profili dolgu olması nedeniyle bu güzergâh ve istasyon bölgesinde jet-grout yöntemiyle zemin iyileştirilmesi düşünülmüştür.

Şekil 1. Kadıköy-Kartal Metrosu Ünalan İstasyonu ve Acıbadem Metrobüs Durağı İle Akasya AVM Arası Yaya Bağlantı Tüneli Planı

Şekil 2. Jet-Grout uygulaması

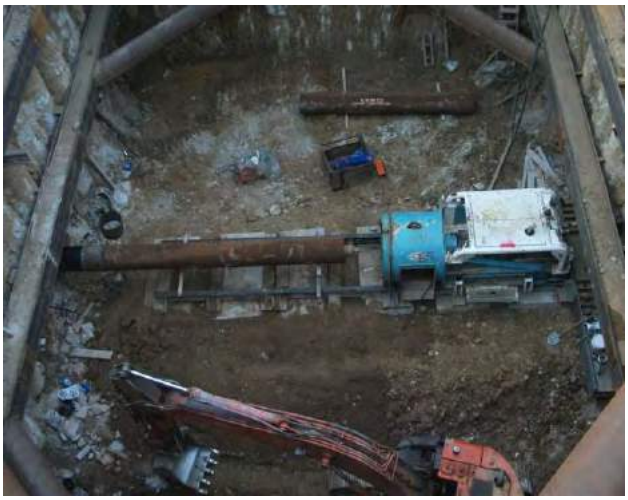
Ancak güzergâh üzerinde bulunan karayolu ve metrobüs hattının olduğu kısımlarda, zemin iyileştirmesi için yapılacak olan jet-grout kolonları sebebiyle yukarı yönde yükselme olabileceği düşünülerek, bu bölgelerde bu yöntemle bir uygulama yapma düşüncesinden vazgeçilmiştir. Karayolu ve Metrobüs Hattı geçişinin olmadığı bölgelerde Jet-grout yöntemi ile zemin iyileştirmesi uygulamasına geçilmiştir.

Proje kapsamında, Sargın İnşaat ve Mak.San.Tic. A.Ş. olarak Kadıköy-Kartal metrosu Ünalan istasyonu ve Acıbadem metrobüs durağı ile Akasya AVM arası yaya bağlantı tüneli inşaatı firmamız tarafından yapılmıştır. Bu yayında şehir içi tünel kazılarında karşılaşılan sorunlar ve imalat aşamasında uygulanan yöntemler anlatılacaktır.

2 PROJEDE KARŞILAŞILAN DOLGU ZEMİN PROBLEMİ

Tünel güzergahında uygulanmak istenen jet-grout yönteminin karayolu ve metrobüs hattının geçtiği kısımlarda zeminde yukarı yönde kabarma yapması ve mevcut yol güzergahını deforme edeceği düşünülmesi nedeniyle yatay boru itme uygulamasına geçilmiştir.

İmalat Aşamasında karşılaşılan sorunların çözümünde ilk olarak karayolu ve metrobüs hattının bulunduğu kesimlerde 9 metre boyunda, Ø114 mm çapında süren boruları yardımıyla umbrella arch yöntemi uygulamasına geçilmiştir. Özellikle bu yöntemle tünel kazısı ilerlerken, yine bu bölgeden geçen isale hattı borularından sızan sular tünel kazısı sırasında ciddi tehditler oluşturmuştur. Çünkü yaklaşık 20 lt/sn gibi bir debiyle gelen yoğun su baskısı dolgu zeminde tünel aynası ve tavanını tutmada, mevcut tahkimatla mümkün olmamıştır. Öncelikle İSKİ ile görüşmeler yapılarak, hat üzerindeki problemler tespit edilip, o hattın su geçişi, geçici bir süreliğine durdurulmuştur. Daha sonra tünel güzergahı üstünden geçen karayolu ve metrobüs hattında, oturmalara sebebiyet vermemek için, 800 mm çapında yatay boru itme yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 3. Yatay boru sürme makinesi

Bunun içinde önce karayolu ve metrobüs hattını karşıdan karşıya geçecek, yatay boru itmenin yapıla bilmesi için, Uzunçayır kavşağında bulunan ada'ya bir kenarı 12 metre, diğer kenarı 17 metre ve derinliği 12 metre olan dikdörtgen bir şaft açılmıştır.

Açılan bu şaft yardımıyla, tünel tavanını çevreleyen 13 adet 800 mm çapında ve her biri 86 m boyunda borular sürülerek içleri C30 beton ile doldurulmuştur.

Şekil 4. Dikdörtgen şaft

Şekil 5. Tünel tavanını çevreleyen borular

Bu şekilde karayolunun üzerindeki hareketli yüklerin ve karayolu ile tünel tavanı arasında kalan zemin yükünün oluşturacağı deformasyonlar önlenmiştir.

Şekil 6. Tünel imalatı

3 SONUÇ

Sonuç olarak, şehir içi tünelciliğinde, özellikle sığ tünellerde karşılaşılan sorunlar, çözümü zor ve şehir hayatını etkileyen daha farklı problemleri de beraberinde getirmiştir. Bu projede de görüldüğü üzere, tünel güzergahı üzerinde bulunan karayolu ve metrobüs yolunda oluşabilecek deformasyonlar, bu güzergâh üzerinde bulunan trafik ulaşım ağını etkileyecek, yine bu güzergahta bulunan sinyalizasyon alt yapısına zarar vereceği gibi, ayrıca zaman ve maddi kayıplara da sebep olacaktır. Yatay boru itme yöntemi ile daha kısa sürede, tünel üzerindeki zemini de deforme etmeden tünel kazısı tamamlanarak, proje hayata geçirilmiştir.

Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral Projelerinde Yeraltı Kazı ve Tahkimat Yöntemlerinin İncelenmesi

Investigation of Underground Excavation and Support Methods for Pumped Hydropower Storage Projects

A. Özarslan, E. Köken
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

ÖZET Rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, sabit ve sürekli enerji üretme olanaklarına sahip olmayıp, mevsimsel ve günlük meteorolojik koşullardan etkilenmektedir. Özellikle MW kapasiteli rüzgar ve güneş enerjisi santrallerinde, talebe uygun elektrik enerji üretiminin güvence altına alınabilmesi için, büyük ölçekli enerji depolama tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dünyada uygulanmakta olan büyük ölçekli enerji depolama tesisleri ağırlıklı olarak pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerden (PHES) oluşmaktadır.

Hidroelektrik santral projelerinde yeraltı kazı yöntemi ve tünel destekleme yöntemlerinin seçimini başlıca; yerel jeoloji, topografya, kaya özellikleri, birincil gerilmeler, derinlik ve su basıncı seviyeleri, etkilemektedir. Koşulların uygun olması durumunda santral, su iletme ve enerji tünellerinin tamamı yeraltında oluşturulabilmektedir. Ülkemizdeki yüksek kapasiteli PHES potansiyelinin değerlendirilebilmesi için ağırlıklı olarak uzun mesafeli (> 5 km) su iletme yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda tünellerde tam mekanize yeraltı kazı ve tahkimat yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, PHES projelerinde uygulanabilen yeraltı kazı ve tahkimat yöntemleri incelenmektedir.

ABSTRACT Renewable energy sources, such as wind and solar energy, are influenced by seasonal and daily meteorological conditions and are not suitable for constant and continuous energy production. Therefore, large-scale energy storage facilities are needed especially for MW-capacity wind and solar power plants in order to secure electricity production. Large-scale energy storage facilities currently used in the world are mainly composed of pumped storage hydroelectric power plants (PHES).

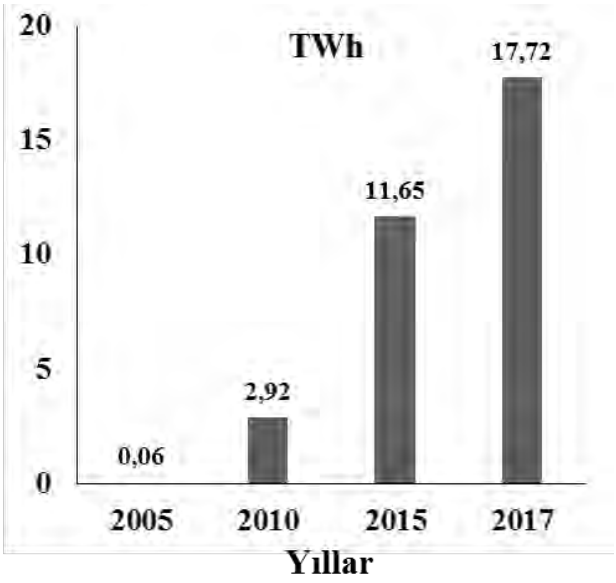
The selection of underground excavation and tunnel support methods in hydroelectric power plant projects are mainly affected by; local geology, topography, rock properties, primary stresses, depth and water pressure levels. If the conditions are suitable, the entire power cavern, water conveying and energy tunnels can be constructed underground. Mechanized underground excavation and support methods have to be considered because of the long distance necessity (> 5 km) for water conveying tunnels to make use of the high capacity PHES potential in Turkey. In this study, underground excavation and support methods that can be applied in PHES projects are examined.

1 GİRİŞ

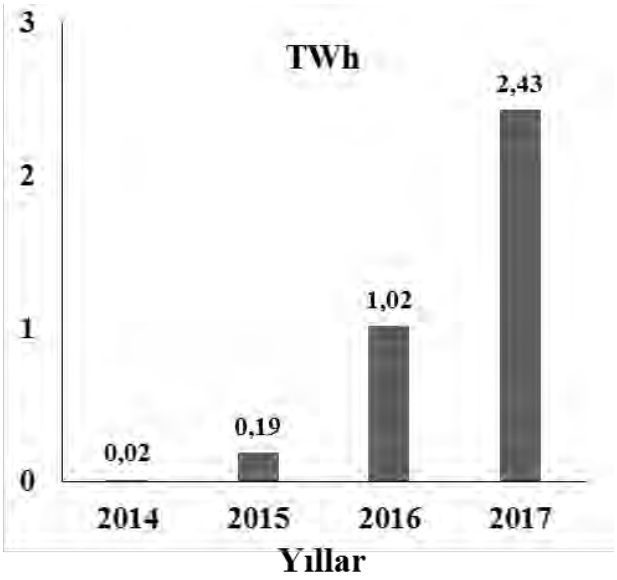
Enerji toplumsal refahın sağlanması için gerekli araçlardan ve üretim faaliyetlerinin ana girdilerinden biri olarak, ekonomik ve sosyal kalkınmanın vazgeçilmez temel taslarından biridir. Bu nedenle, endüstrideki gelişmelerin, yaşam standartlarındaki yükselişin ve artan nüfusun ihtiyaç duyduğu enerjinin yeterli, güvenilir bir şekilde ve düşük maliyetle sağlanması büyük önem arz etmektedir. Arz güvenilirliği için sürdürülebilir enerji politikalarının oluşturulması ve enerji kaynaklarında dışa bağımlılığın azaltılması gerekmektedir. Ülkemizde enerji gereksinimi ve elektrik üretimi büyük oranda fosil (kömür, doğal gaz vb.) kaynaklardan karşılanmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminde kullanılan en yaygın yöntemler ise hidroelektrik, rüzgar ve güneş enerjisi sistemleridir. Ülkemizde son yıllarda özellikle rüzgar ve güneş enerjisi santrallerinin elektrik üretimindeki payında önemli artışlar gerçekleşmiştir (Şek. 1).

Genel olarak termik (kömür, doğal gaz) ve nükleer santraller talep değişimlerine kolayca uyum sağlayamamaları nedeniyle baz yükte, hidroelektrik santraller (HES) ise kolayca işletilip durdurulabilen ve aynı zamanda kısa bir sürede tam kapasite yüke çıkışa uyum sağlayabilmeleri nedeni ile pik talebin karşılanmasında kullanılmaktadır. Pik talebin karşılanmasında göletli HES'lerin yetersiz kalması durumunda pompaj depolamalı hidroelektrik santrallere (PHES) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu santraller güç talebinin düşük olduğu zamanlarda suyu yüksekte bir gölette depolamak ve bu şekilde biriktirilen sudan puant zamanlarda hidroelektrik enerji elde etmek amacıyla kullanılmaktadır (Saraç 2012, Özarslan 2013).

Rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, sabit ve sürekli enerji üretme olanaklarına sahip olmayıp, mevsimsel ve günlük meteorolojik koşullardan etkilenmektedir. Rüzgar ve güneş enerjisi sistemlerinde üretilen enerji süreç açısından kesikli ve yoğunluk açısından değişkenlik gösterdiğinden elektrik enerjinin depolanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrik enerjisini depolama ihtiyacı sadece yenilenebilir kaynaklar için var olan bir sorun olmayıp, aynı zamanda enerji kalitesi, gücü destekleme ve enerji yönetimini sağlamaya yönelik olabilmektedir (Mazman vd. 2010).



a- rüzgar enerjisinden elektrik üretimi

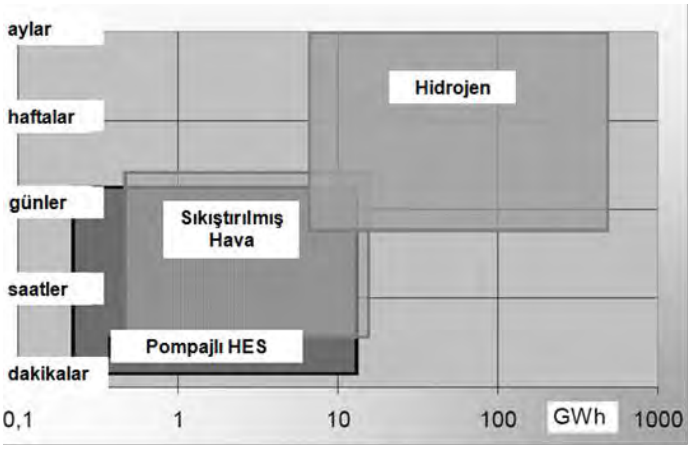


b- güneş enerjisinden elektrik üretimi

Şekil 1. Elektrik üretiminin yıllar bazında değişimi (Enerji Atlası, 2018)

MW kapasiteli yenilenebilir rüzgar ve güneş enerjisi santrallerinde, talebe uygun sürekli enerji üretiminin güvence altına alınabilmesi için, büyük ölçekli enerji depolama tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2'de büyük ölçekli enerji depolama sistemleri, güç ve zaman bazında, karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Dünyada uygulanmakta olan

büyük ölçekli enerji depolama tesisleri ağırlıklı olarak pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerden (PHES) oluşmaktadır. Diğer yöntemler ise yeraltında doğal gaz, sıkıştırılmış hava enerjisi ve hidrojen gazı depolama teknolojilerinden oluşmaktadır (Özarslan 2012, 2013). GWh ölçekli ve uzun süreli enerji depolama uygulamaları PHES aracılığıyla mümkün olabilmektedir.



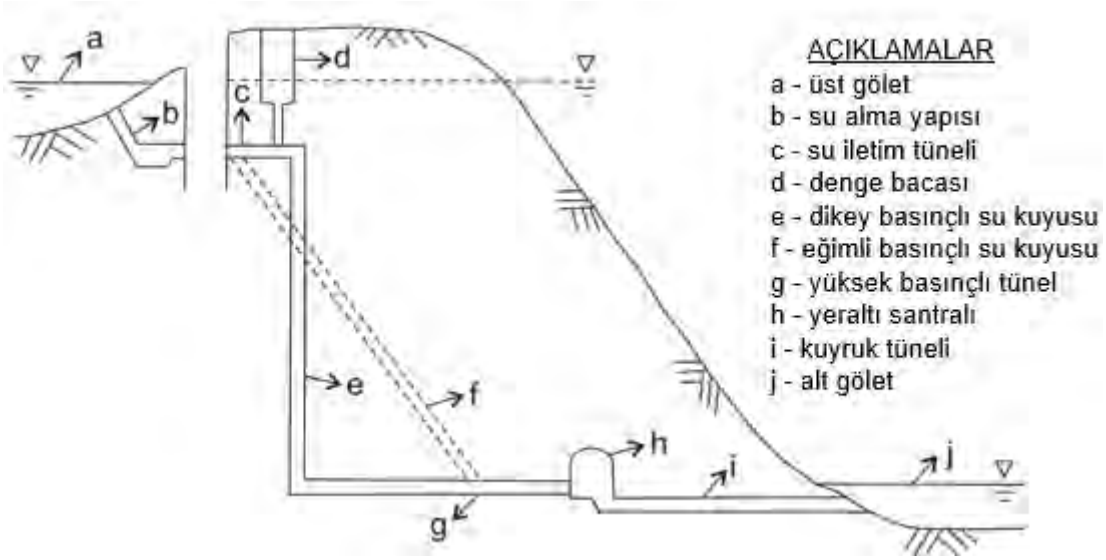
Şekil 2. Büyük ölçekli enerji depolama sistemleri (Crotogino, 2010)

2 POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SANTRALLER

Hidroelektrik santraller (HES) suyun enerjisinden faydalanarak elektrik üreten yapılardır. HES, suyun potansiyel enerjisinin mekanik enerjiye ve mekanik enerjinin de elektrik enerjisine dönüştürüldüğü tesislerdir. Elde edilecek elektrik gücü, başlıca suyun akış debisine ve düşüş yüksekliğine bağlıdır. HES depolama özelliklerine, yapılarına, su düşülerine ve kapasitelerine göre sınıflandırılabilmektedir. Düşü yüksekliği 50 m'den fazla olan santraller yüksek düşülü santraller olarak kabul görmektedir. Depolama özelliklerine göre hidroelektrik santraller deposuz veya depolu (doğal, yatay) olmak üzere ayrılabilmektedir. Deposuz santraller genelde doğrudan nehir veya bir kanal üzerinde kurulmaktadır. Su depoları veya başka bir ifadeyle gölleri olmadığından akan suyun enerjisini elektriğe çevirirler. Depolu santrallerde suyun depolanması esas olup genellikle su rejimlerinin düzensiz olduğu akarsularda bütün yıl boyunca düzenli olarak elektrik enerjisi üretilebilmesi için oluşturulmaktadır. Bu tip santrallere örnek olarak; yaygın olarak kullanılan baraj göletli hidroelektrik santraller (HES) ve bu çalışmanın konusu olan pompaj depolamalı hidroelektrik santraller (PHES) verilebilmektedir. Türbinlerin yer aldığı santral yapıları hem yerüstünde hem de yeraltında inşa edilebilmektedir. Son yıllarda santrallerin yeraltında olması tercih edilmektedir.

PHES, hidroelektrik santrallerin bir çeşidi olup, sistemin amacı güç talebinin düşük olduğu zamanlarda suyu yüksekte bir gölette depolamak ve biriktirilen sudan elektrik enerjisi talebinin fazla olduğu zamanlarda hidroelektrik enerji elde etmektir. PHES'de alt ve üst olmak üzere iki gölet olup, su depolama göletleri inşa edilecek havuzlar dışında nehir, doğal göl, mevcut veya baraj göleti olabilmektedir. Enerji talebi yüksek olduğu zaman su üst seviyeden alt seviyeye düşürülerek elektrik enerjisi üretilir. Enerjiye talebi sınırlı olduğu zaman, fazla üretilen veya ekonomik olan elektrik enerjisi ile pompa çalıştırılarak su alt seviyeden üste yükseltilir. Su alma yapısı üst depolama göletinin yanında veya altında olacak şekilde yapılabilmektedir. Son yıllarda artan bir şekilde yeraltı santralli olarak yapılan pompaj depolamalı HES'lerde su iletim yapısı olarak basınçlı kuyu ve enerji tüneli kullanılıp, santralle alt gölet arasındaki bağlantı kuyruk suyu tüneli ile sağlanmaktadır (Şek. 3).

Basınçlı su veya enerji tünelleri içsel su basıncı etkisinde olmalarından dolayı genelde beton ve çelik kaplamalı olarak inşa edilmektedir. Bununla beraber iç basınç fazla değilse veya sızdırmazlık sorun teşkil etmiyorsa, açık cebri borularda veya tünellerde sadece beton malzeme de kullanılabilmektedir (DSİ 2012). Yüksek düşülü hidroelektrik tesislerde maliyetin önemli bir kısmını yüksek basınçlı su tünellerinde kullanılan kaplama malzemeleri oluşturabilmektedir. Özellikle çelik kaplama kullanılması durumunda önemli maliyet artışları oluşabilmektedir.



Şekil 3. Yeraltı pompaj depolamalı hidroelektrik santral (PHES) ve su iletim yapıları tesis şeması (Brekke and Ripley, 1993).

Santral binası bölgesindeki yüzeysel ve derin jeolojik formasyon özelliklerinin belirlenebilmesi için gerekli tüm jeolojik ve jeoteknik çalışmaların yapılarak, projelendirme aşamasında karşılaşılabilecek belirsizlikler giderilmelidir. Santral yapı tipleri yerüstü, yarı-gömülü ve yeraltı olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Yeraltı santraller ve temel yapıları tercihen sağlam kaya kütlesi içerisinde inşa edilmelidir (DSİ 2012).

Avrupa Komisyonunun yayınladığı raporda (JRC 2013) ülkemizin ve diğer Avrupa ülkelerinin PHES potansiyeli, tanımlanmış senaryolara göre, coğrafik bilgi sisteminden (GIS) elde edilen veriler kullanılarak değerlendirilmiştir. Senaryolar mevcut iki gölet (S1) veya mevcut bir göl ve yapılacak bir gölet (S2) varsayımına dayanarak yapılmıştır. Minimum düşü yüksekliğinin 150 m ve göletler arası uzaklığın 1 km, 5 km, 20 km olması durumları değerlendirilmiştir. Avrupa ülkeleri içinde PHES kapasitesi en yüksek ülke Türkiye'dir. Göletler arası 20 km'lik mesafe varsayımına göre ülkemizin S1 senaryosuna göre yaklaşık 19,6 TWh, S2 senaryosuna göre gerçekleştirilebilecek 29,3 TWh değerinde PHES kapasitesi vardır. Ülkemizde gerçekleştirilebilecek PHES kapasitesinin senaryo ve mesafeye göre dağılımı Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Farklı senaryolar ve mesafelere göre Türkiye'de gerçekleştirilebilecek PHES potansiyelleri (JRC 2013)

Senaryo 1 (S1)			**Senaryo 2 (S2)**		
1 km	**5 km**	**20 km**	**1 km**	**5 km**	**20 km**
0*	4*	19631*	3*	3338*	29319*

S1: mevcut iki gölet durumu

S2: mevcut ve yapılacak bir gölet durumu

* Enerji birimi: GWh

Verilerden Türkiye'nin enerji depolama amaçlı çok yüksek PHES potansiyeli sahip olduğu anlaşılmaktadır. Göletler arası mesafenin fazla olması nedeniyle, topoğrafik ve jeolojik koşullara bağlı olarak, göletler arası yeraltı su iletme tünelleri için mekanize kazı makineleri (TBM) ön plana çıkmaktadır. Ülkemizde çeşitli HES projelerinde su iletim tüneli kazı ve tahkimat işlerinde TBM kullanılmış olup özet bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir. 3.75 m çapında olan ilk yerli TBM makinesi imalatı 2017 yılında gerçekleşmiş olup Tekirdağ da Ergene derin deşarj tünel ve arıtma projesinde kullanılmaktadır (E-Berk 2018).

3 YERALTI KAZI VE TAHKİMAT YÖNTEMLERİ

Delme-patlatma (D-P) yöntemiyle tünel açımı yeraltı kazılarında yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Çapı 8 m'den küçük olan ve kaya yapısal kalitenin iyi olduğu ortam

koşullarında tüneller D-P yöntemi ile tek aşamada tam kesit açılabilir. Kaya koşullarının zayıfladığı ve kazı aynalarının daha geniş olacağı yerlerde kademli yöntem tercih edilmektedir. Bu yöntemde önce üst yarı, daha sonra ise alt yarı kazılıp desteklenmektedir (DSİ 2012). HES projelerinde su iletim tünel kesit ve boyutlarının daha sınırlı olması nedeniyle tek kademede kazı ve tahkimat uygulamasına olanak sağlamaktadır. D-P yönteminin en önemli avantajı kaya şartlarının kısa mesafelerde değişkenlik gösterdiği koşullarda da uygulanabilmesidir. Projelerde hızlı tünel açılmasına olan gereksinim ve işçilik maliyetlerinin artması ile birlikte tünellerde makine ile kazı ve uygulaması yaygınlaşmaktadır. Uzun tünellerde (>4.25 km) ve proje bitiş süreleri göz önüne alındığında mekanize tünel kazısı D-P yöntemine göre daha hızlı ve ekonomik olabilmektedir (Bilgin 1989). Sert kaya ve yumuşak zemin koşullarında farklı tipte TBM makineleri kullanılmaktadır (Bilgin et al. 2014).

Çizelge 2. HES projeleri ve TBM özet bilgiler (E-Berk 2012, Bilgin et al. 2016)

HES veya sulama projesi	Tünel uzunluğu	TBM çapı	TBM tipi
Kargı, Çorum	11800 m	9.8 m	Çift kalkanı
Mavi Tünel, Konya	17034 m	4.2 m	Çift kalkanlı
Yamanlı, Adana	7900 m	4.4 m	Çift kalkanlı
Dogancay, Adana	6655 m	4.1 m	Çift kalkanlı
Karakuz, Adana	11000 m	3.0 m	Çift kalkanlı
Uluabat, Bursa	11400 m	5.0 m	EPB tipi

Tam Kesit Tünel Açma Makineleri (TBM) ile uygun jeolojik ve kaya yapısı koşullarında mekanize kazı ile yüksek tünel ilerleme hızları sağlanabilmektedir. TBM ile kazıda açıklık çevresinde düzgün yüzey elde edilmekte, örselenme ve aşırı sökülme sınırlanmaktadır. Dairesel açıklık kesiti de jeomekanik duraylılık açısından en avantajlı kesit şeklini sağlamaktadır. Genelde TBM ile kalıp beton segmenti uzunluğunda kazı yapılıp, kazının tamamlanması ile birlikte daha önceden hazırlanmış olan segmentler makine içinde tünel yüzeyine döşenmektedir.

TBM ile kazı yönteminin en önemli dezavantajı değişken jeolojik ve jeomekanik koşullara sınırlı bir şekilde uyum sağlayabilmeleridir. TBM'de kazıyı sağlayan kesiciler kaya tipleri ve mineralojik içeriklere bağlı olarak (kuvars vb) aşınabilmekte ve daha kısa sürede değişim gereksinimi nedeniyle tünel açma maliyetlerini etkileyebilmektedir. Mekanize kazı yapılacak kayaçların aşındırıcılığın kestirimi amacıyla Cerchar aşınma deneyi yaygın olarak kullanılmaktadır (Alber et al. 2013). TBM ile kazı ve destekleme sistemlerinin verimi uygun jeolojik ve koşullar ile yakından ilgilidir. Jeolojik ve jeomekanik saha çalışmalarının doğruluk derecesi tünellerde TBM ile ilerleme hızı ve maliyetini doğrudan etkilemektedir. TBM makinelerinin yüksek maliyeti nedeniyle bu durum büyük önem arz etmektedir ve proje araştırma ve etüt çalışmalarına yeterince zaman ve kaynak yaratılmalıdır (DSİ 2012). Tünel ilerlemelerinde açıklık çevresinde karşılaşılabilecek olası duraysızlıklar kazı aynasında ilerlememelerin yavaşlamasına, makinenin sıkışmasına ve çok olumsuz durumlarda çalışmanın uzun süre durdurulmasına yol açabilmektedir.

TBM kazısı ve çok iyi kalitede denetimli patlatma sonucunda tüneli çevreleyen kaya kütlesinde en az düzeyde örselenme meydana gelmektedir. Sert kaya kütlelerinde zayıf kalitede patlatma, çevre kaya kütlesinde 2-3 m'ye kadar uzanan yersel hasarlara (çatlak, geçirgenlik vb.) neden olabilmektedir (Hoek 2006). Tünel açma çalışmalarında kazı ile tahkimat birbirini ardalayan zamanlarda yapılması gerekmektedir. Kalkan kullanılarak yapılan mekanize tünel açımlarında kazı ile birlikte nihai destekleme yapılabilmektedir.

HES ve PHES projelerinde açılan su iletme tünelleri basınçlı tip tünel sınıfında yer almaktadır. Tünelde iç basıncı oluşturan su düşü yüksekliğine (H) bağlı olarak; düşük

(H<5m), orta (5m<H<100m) ve yüksek (H>100m) basınçlı tünel sınıfına ayrılmaktadır. Basınçlı tünellerde hangi tip destekleme (püskürtme beton, kaya saplaması, çelik hasır vb.) ve kaplama (betonarme, çelik vb.) yapılacağı ortam (kaya yapısı, birincil gerilmeler vb.) ve işletme koşullarına (derinlik, su debisi, içsel su basıncı, açıklık geometrisi vb.) bağlıdır. Orta ve yüksek basınçlı su iletim tünellerinde su sızdırmazlığının sağlanabilmesi için kaplama betonunda çatlak genişliği oluşumu sınırlanmalıdır. İç su basıncının kaya ve kaplama tarafından birlikte taşınabilmesi için tam temasının sağlanması ve bunun için kontak enjeksiyonun tekniğine uygun şekilde yapılması gerekmektedir. Zayıf kaya koşullarında yeteri kadar kontak ve konsolidasyon enjeksiyonları birlikte uygulanmalıdır. Özellikle yüksek basınçlı su (enerji) tünellerinde, kaya ve birincil gerilme koşullarının uygun olmadığı durumlarda çatlak genişlikleri sınırlandırılması ve kaya içerisinde oluşabilecek hidrolik kırılma engellenmeyebilmektedir. Bu durumda tünel kaplaması olarak çelik kaplama kullanılmalıdır. Yerüstünde cebri boru uygulamalarında çelik kaplama iç su basıncının tamamını alacak şekilde, yeraltında ise kaya ile etkileşime girecek şekilde tasarlanmalıdır. Çelik kaplama-beton-kaya arası tam temasın sağlanması kontak enjeksiyonu uygulaması ile mümkün olabilmektedir (DSİ 2012).

4 SAYISAL ÇÖZÜMLEMELER

Sayısal çözümlemelerde PHASE2 sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. PHASE2 programı, jeomekanikte karşılaşılan düzlem birim deformasyon durumu ile iki boyutlu yeraltı açıklıklarının (tünel, maden vb.) gerilme ve duraylılık çözümlemelerinde kullanılmaktadır. Program ile sayısal gerilme çözümlemesinde, kaya kütlesinin elastik ve çeşitli yenilme ölçütlerine göre elasto-plastik malzeme davranışları modellenebilmektedir (Rocscience 2012). Su iletme tünelleri için yapılan örnek sayısal çözümlemelerde, çeşitli işletme koşulları (kaya özellikleri, açıklık ve tahkimat şekli, vb.) göz önünde bulundurulmuştur.

4.1 Birincil Gerilme ve İçsel Su Basıncı Durumu

İki boyutlu düzlem birim deformasyon çözümlemelerinde düşey (Pv) ve birbirine dik iki adet yatay asal birincil gerilmeler tanımlanabilmektedir (Ph). Çalışmada, su iletme tüneli açıklıkları çevresinde, hidrostatik birincil gerilme durumunun etkili olduğu varsayılmıştır. Hidrostatik birincil gerilme durumunda tüm asal birincil gerilme bileşenleri birbirine eşit olmaktadır ($Pv=Ph_{max}=Ph_{min}=Ph$). Düşey birincil gerilmeler üst örtü tabakalarının ortalama birim hacim ağırlıkları ve yerüstünden derinlik (H) değerlerinden yararlanılarak hesaplanabilmektedir. Düşey birincil gerilmenin tahmininde Eşitlik 1 kullanılabilmektedir. HES projesi su iletim tünelinde 200 m temsili derinlik için 5 MPa düşey birincil gerilme (Pv) değeri hesaplanmaktadır.

$$Pv\ (MPa) = 0.025\ (MPa/m) \times H\ (m) \quad (1)$$

PHES tesisleri için derinlerde, üst ve alt su depolama rezervuarlarındaki su düşü veya yükseklik farkına (H) bağlı olarak, etkili olan içsel statik su basıncı Eşitlik 2 aracılığıyla hesaplanabilmektedir (Hoek 2006). HES projesi su iletim tünelinde 200 m temsili su düşü yükseklik farkı için maksimum 2 MPa içsel su basıncı (Pi) değeri hesaplanmaktadır.

$$Pi\ (MPa) = 0.01\ (MPa/m) \times H\ (m) \quad (2)$$

4.2 Kaya Özellikleri

Kaya malzemesi ve kaya kütlesi özellikleri bozunma/ayrışma etkisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Köken ve Özarslan (2018) laboratuvar ve arazi çalışmaları aracılığıyla andezit kaya türü için bozunmamış ve orta derecede bozunmuş/ayrışmış kaya malzemesi mekanik özellikleri ve Jeomekanik Dayanım İndeksi

(GSI) araçlığıyla kaya kütlesi özelliklerini belirlemiştir. Ayrışma/bozunma durumunun kaya malzemesi ve kütlesi kalitesi üzerindeki önemli bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum ileri derecede ayrışmış fay ve makaslama zonlarında daha da kötüleşmektedir (Köken ve Özarslan, 2018). Örnek sayısal çözümlemelerde andezit kaya türü için kullanılan kaya malzemesi parametreleri ve GSI değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Andezit kaya türü için Hoek-Brown (H-B) yenilme ölçütü m_i parametresi 25 alınmıştır (Hoek 2006). Bu değerlerden faydalanarak örselenmemiş eklemli kaya kütleleri için genelleştirilmiş H-B yenilme ölçütü parametreleri m_b, s, a ve E_m değerleri andezit kaya kütlesi için yaygın kullanılan eşitlikler aracılığıyla elde edilmiştir (Hoek 2006, Ulusay ve Sönmez 2007).

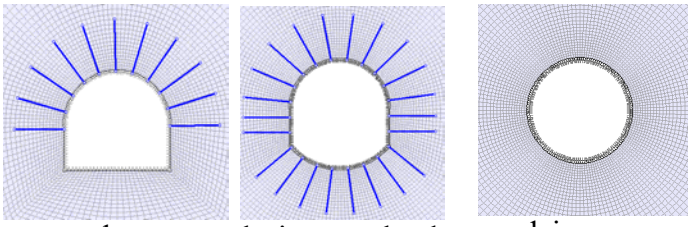
Çizelge 3. Andezit kaya malzemesi ve kütlesi özellikleri (Köken ve Özarslan 2018)

Kaya Türü	σ_{ci} (MPa)	E_{ti} (GPa)	GSI
Ayrışmamış Andezit, W_0	84.5	22.0	75
Orta Derecede Ayrışmış Andezit,W_2	34.5	7.4	40

σ_{ci} : Tek eksenli basınç dayanımı, E_{ti} : Teğetsel Young Modülü, GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi

4.3 Tünel Açıklık Şekilleri

Su iletme amaçlı atnalı, invert tabanlı atnalı ve dairesel kesitli yeraltı tünel açıklıkları için sayısal çözümlemeler yapılmıştır (Şek. 4). Atnalı kesit HES projelerinde yaygın bir şekilde D-P yöntemi ile açılan derivasyon, bağlantı ve su iletme tünellerinin açılmasında kullanılmaktadır. Atnalı kesitler kalın beton kaplama ile dairesel su iletme açıklığına dönüştürülebilmektedir. İnvert tabanlı atnalı kesitler özellikle düşük basınçlı su iletim amaçlı tünellerde tercih edilebilmektedir. HES projelerinde TBM ile açılan su iletme tünelleri dairesel kesitli olmaktadır.



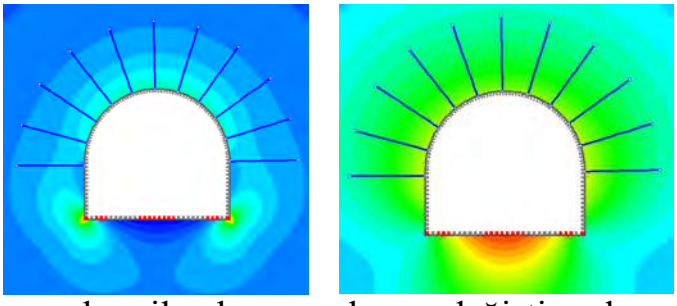
a- atnalı b- invert tabanlı c- daire

Şekil 4. Su iletme tüneli açıklık şekilleri

HES projeleri için D-P yöntemi ile açılan atnalı ve invert tabanlı atnalı kesitli yeraltı tünel açıklıklarında tahkimat bileşenleri kaya saplamaları, püskürtme beton, çelik hasır ve beton kaplamadan oluşmakta olup, TBM ile açılan dairesel kesitli tünellerde başlıca tahkimat bileşeni özel imalat beton segmentlerinden oluşmaktadır. Ayrıca, tünel duraylılığı ve içsel su basıncının kaya ve beton kaplama tarafından birlikte desteklenebilmesi için tam teması sağlamak üzere kontak enjeksiyonu ve gerektiğinde konsolidasyon enjeksiyon uygulamaları yapılmaktadır.

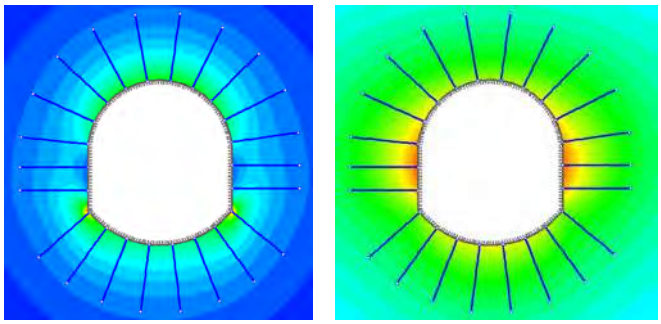
4.4 Duraylılık Çözümlemeleri

Atnalı, invert tabanlı ve daire açıklık kesitleri için 200 m derinlikte 5 MPa hidrostatik gerilme durumunda andezit kaya yapısı için örnek duraylılık çözümlemeleri yapılmıştır (Şek. 5-7). Atnalı ve invert tabanlı kesitler için kazının D-P yöntemi ve tahkimat bileşenlerin püskürtme beton, kaya saplaması ve beton kaplamadan oluştuğu varsayılmıştır. Dairesel kesit için kazının TBM ile yapıldığı ve tahkimat bileşenlerinin beton segment ve kaya-kaplama teması için kontak enjeksiyonu uygulaması yapıldığı varsayılmıştır.



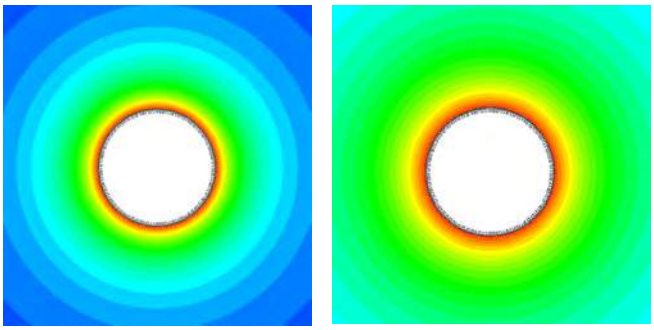
a- asal gerilmeler b- yer değiştirmeler

Şekil 5. Atnalı kesit için duraylılık analizi



a- asal gerilmeler b- yer değiştirmeler

Şekil 6. Invert tabanlı atnalı kesit için duraylılık analizi

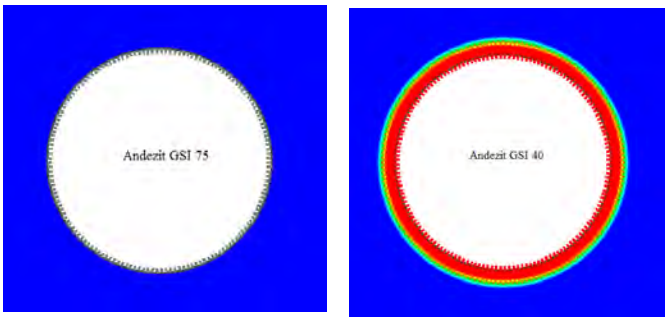


a- asal gerilmeler b- yer değiştirmeler

Şekil 7. Dairesel kesit için duraylılık analizi

Atnalı açıklık şekli taban ile yan duvarın birleştiği bölgedeki köşeli yapısı nedeniyle, hidrostatik birincil gerilme durumunda, köşelerde yüksek gerilme yığılmalarına yol açmaktadır. Bu bölgede yüksek gerilme ve yer değiştirmelerin de etkisiyle, kaplama betonda çatlamalar oluşabilmektedir Bu durum aynı zamanda açıklık tabanında, kaya koşullarına da bağlı olarak, önemli miktarda taban kabarmalarına ve yenilmelere yol açabilmektedir. Yeraltı açıklıkların özellik hidrolik yapılar (basınçlı su tüneli vb.) amacıyla tasarlanması durumunda bu sakıncalar daha da artmaktadır. Madenlerde ve tünellerde, açılma kolaylığı ve maliyetin de etkisiyle, atnalı kesit şekli tercih edilmektedir. Su iletim yapılarında klasik atnalı kesit şekline yuvarlatılmış bir invert taban şekli verilerek sorunlar kısmen azaltılabilmektedir. Açıklık tabanında ve yan duvar ile birleşme bölgelerinde ilave destekleme elemanları (kaya saplamaları, püskürtme beton vb.) kullanılması durumunda, açıklık duraylılığı önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Su iletim tüneli gibi hidrolik yapılarda açıklık duraylılığı ve işlevselliği açısından en uygun kesit şeklini dairesel açıklık oluşturmaktadır. TBM ile açılan su tünellerinde kesit şekli dairesel olmaktadır.

Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ve bozunma/ayrışma etkisi ile bağlantılı olarak ifade edilen kaya kalitesinin değişimi ile açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerini incelemek için elasto-plastik çözümlemeler yapılmıştır. Elasto-plastik çözümlemelerde kullanılan GSI değerleri ve kaya malzemesi, özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. Kazının örselenme etkisi olmadan TBM ile yapıldığı ve açıklık çevresinin desteklenmesi için C30 kalitesinde beton segmentlerin kullanıldığı varsayılmıştır. Dairesel açıklık çevresinde kaya ile kaplama betonu arasında tam temas sağlandığı ön görülmüştür. Şekil 8'de dairesel açıklık çevresinde farklı andezit kaya kalitesi koşullarında oluşan yenilme bölgelerine ait görünümler yer almaktadır. İyi kalite (GSI 75) kaya koşullarında açıklık çevresinde yenilme bölgesi oluşmazken, kaya kalitesinin azalması (GSI 40) ile açıklık çevresinde geçirgenliği artıran çatlaklı yapıya sahip yenilme bölgesi oluştuğu görülmüştür. Ayrıca, beton kalite sınıfına ve özelliklerine bağlı olarak kaplama betonunda da yenilmeler meydana gelebilmektedir.



a- iyi kalite kaya yapısı b- orta-zayıf kalite kaya

Şekil 8. Farklı kaya kalitesi koşullarında oluşan yenilme bölgelerine ait görünümler

Açıklık çevresindeki yenilme bölgeleri, tünel güzergahında fay veya makaslama zonlarının geçilmesi durumunda, daha da artabilmektedir. Bu durum, gerekli önlemlerin alınmaması durumunda TBM ile kazıda ilerleme hızlarını olumsuz

etkileyebilmektedir. Bundan dolayı, su iletim yapılarında tünel güzergahı boyunca, gerekli jeolojik, jeoteknik ve jeomekanik etütlerin yapılması, uygun kazı ve tahkimat yöntemi ile ekipmanlarının seçimi açısından, büyük önem taşımaktadır.

Sayısal çözümleme yöntemleri, kullanılan malzeme modelleri, girdi parametreleri ve geometri duyarlığına bağlı olarak gerçeğe yakın sonuçlar verebilmektedir. Ancak sayısal çözümlemelerin sonuçlarına kesin sonuçlar olarak bakılmamalı, sadece yol gösterici olarak kullanmak ve elde edilen bulguları iyi değerlendirmek gerekmektedir. Önerilen yöntem, deneyimsel ve laboratuvar test yöntemlerinden elde edilen ön tasarımının, sayısal yöntemlerle de kontrol edilerek ana tasarıma dönüştürülmesi ve yerinde gözlemler ile sürekli iyileştirme ilkelerinin benimsenmesidir.

5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Büyük kapasiteli yenilenebilir rüzgar ve güneş enerjisi santrallerinden talebe uygun elektrik enerjisi üretiminin güvence altına alınabilmesi için pompaj depolamalı hidroelektrik santrallere (PHES) ihtiyaç duyulmaktadır. Avrupa ülkeleri içinde PHES kapasitesi en yüksek ülke Türkiye'dir. Ülkemizdeki yüksek kapasiteli PHES potansiyelinin değerlendirilebilmesi için ağırlıklı olarak uzun mesafeli (> 5 km) su iletme yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda tünellerde tam mekanize yeraltı kazı ve tahkimat yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Tam Kesit Tünel Açma Makineleri (TBM) ile uygun jeolojik ve kaya yapısı koşullarında mekanize kazı ile yüksek tünel ilerleme hızları sağlanabilmektedir. TBM ile kazıda oluşan dairesel açıklık kesiti de jeomekanik duraylılık açısından en avantajlı kesit şeklini sağlamaktadır. Jeolojik, jeoteknik ve jeomekanik saha çalışmalarının doğruluk derecesi tünellerde TBM ile ilerleme hızı ve maliyetini doğrudan etkilemektedir. TBM makinelerinin yüksek maliyeti nedeniyle bu durum büyük önem arz etmektedir ve proje araştırma ve etüt çalışmalarına yeterince zaman ve kaynak yaratılmalıdır. Elde edilecek bulgular HES/PHES projelerinde su iletme tünellerinde kazı ve tahkimat yöntemleri ile ekipmanların seçilmesinde göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

Alber, M., Yaralı, O., Dahl, F., Bruland, A., Kaesling, H., Michalakopoulos, T., Cardu, M., Hagan, P., Aydın, H., Özarslan, A., 2014. ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test. *Rock Mechanics snd Rock Engineering,* 47(1), pp. 261-266.

Bilgin, N. 1989. *İnşaat ve Maden Mühendisleri için Uygulamalı Kazı Mekaniği*, Birsen Yayınevi, 192 s, İstanbul.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. 2014. *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*, CRC Press, 366 p.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. 2016. *TBM Excavation in Difficult Ground Conditions*, Ernst & Sohn, 336 p.

Brekke, T.L., Ripley, B.D. 1993. Design of pressure tunnels and shafts, *Comprehensive Rock Engineering*, Vol: 2, Balkema, pp. 349-368, New York.

Crotogino, F. 201. Grid scale energy storage based on pumped hydo, compressed air and hydrogen, *KBB Underground Technologies*, Hannover.

DSİ, 2012. Barajlar ve hidroelektrik santraller tasarım rehberi, 226 s, Ankara.

E-Berk 2012. An Overview of TBM Tunnelling in Turkey and Middle East, www.e-berk.com/eng/company-catalog/

E-Berk, 2018. E-Berk Tünel ve Zemin Teknolojileri, www.e-berk.com/

Enerji Atlası, 2018. www.enerjiatlasi.com/

Hoek, E. 2006. Kaya Mühendisliği (çev. M. Karakuş ve H. Başarır), TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, 319 s, Ankara.

JRC, 2013. Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage, *JRC Scientific and Policy Reports*, 74 p., Luxembourg.

Köken, E., Özarslan, A. 2018. *Sarnıç köy (Havran/Balıkesir) çevresindeki andezitlerin ayrışma bozunma açısından incelenmesi*, S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.6, s.2, s. 296-316.

Mazman, M., Biçer, E., Kaypmaz, C., Yıldız, A., Uzun, D., Tırıs, M., 2010. Yenilenebilir enerji için elektrik enerjisi depolama teknolojileri, *Solar Future 2010 Bildiriler Kitabı*, s. 113-118, İstanbul.

Özarslan, A. 2012. Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(19), pp. 14265-14277

Özarslan, A. 2013. Yenilenebilir enerji kaynakları için büyük ölçekli enerji depolama yöntemleri, *3eElectrotech*, Vol. 226, s. 230-240.

Rocscience, 2012. Phase2 (ver. 8.0), Toronto, Canada, http://www.rocscience.com

Saraç, M. 2012. Enerji Depolama Sistemleri ve Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller, *Türkiye 12. Enerji Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara.

Ulusay, R., Sönmez, H. 2007. *Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri* (Genişletilmiş 2. Baskı), TMMOB Jeoloji Müh. Odası Yayınları: 60, 292 s, Ankara.

Mekanize Kazılarda Performans Tahmini

Performance Prediction for Mechanized Excavations

PLCM Kaya Kesme Deney Sonuçları ile Kayaçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması

Investigation of the Relationships between PLCM Rock Cutting Test Results and Physical and Mechanical Properties of Rocks

R. Çomaklı
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Niğde

C. Balcı
İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET Tam boyutlu doğrusal kazı deney seti (FLCM) tünel açma makinelerinin (TBM) kazı performansının tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte FLCM deney seti büyük blok numune temini ve fazlaca insan gücü gereksinimi gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Bu sebeplerden dolayı İTÜ Maden Mühendisliği Bölümünde taşınabilir doğrusal kazı deney seti (PLCM) geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni deney seti FLCM kazı deney setine benzer şekilde tasarımlandırılmış olup farklı kesici uçlar deneylerde kullanılabilmektedir.

Yapılan bu çalışmada PLCM deney seti kullanılarak on farklı kayaç numunesi üzerinde yardımsız kaya kesme deneyleri yapılmıştır. Numunelerin beş tanesi daha önceki çalışmalar için kullanılan numunelerdir. Diğer beş numune ise İstanbul'da Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy (ÜÜÇ) metro projesinde kazısı yapılan formasyonlardan alınmıştır. Yardımsız kaya kesme deney sonuçlarından elde edilen normal ve yuvarlanma kuvveti ve spesifik enerji değerleri ile kayaçların tek eksenli basınç ve dolaylı (Brazilian) çekme dayanımı değerleri arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

ABSTRACT Full Scale Linear Rock Cutting Machine (FLCM) is widely used for performance prediction of tunnel boring machines (TBM). However, FLCM test device has some disadvantages such as requires too much manpower and large blocks of rock samples. For these reasons a new portable linear rock cutting (PLCM©) machine was developed in the Mining Engineering Department of ITU. The newly developed test device was designed similar to the FLCM and different type cutting tools could be used in experiments.

In this study, unrelieved rock cutting tests were performed on the ten different rock samples with using PLCM. Five of the samples are used for previous studies. The other five samples were collected from Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy (ÜÜÇ) metro project excavations in Istanbul. The relationships between the rolling force, normal force and specific energy values with the uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength were statistically analyzed.

1 GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde madencilik ve inşaat alanlarında mekanize kazıcıların kullanımı artarak devam etmektedir. Klasik kazı işlemlerinin yapıldığı projelere oranla mekanize kazı işleminin yapıldığı projelerde çalışmalar daha ekonomik olarak yapılsa da, özellikle ilk yatırım maliyeti mekanize kazı projelerinde çok daha fazladır. Bu nedenle bu projelerde; özellikle mekanize kazıcı ve uygun keski seçimi, kesici kafa dizaynı ve kazı performans tahmini gibi parametrelerin

proje başlamadan önce doğru şekilde yapılması çok önemlidir. Proje başlamadan önce yapılacak doğru seçimler ve tahminler proje maliyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Tüm bu önemli parametrelerin belirlenmesinde en doğru sonuçlar ise öncelikle kayaç kazılabilirlik özelliklerinin doğru şekilde tanımlanmasıyla mümkün olmaktadır.

Kayaç kazılabilirliğinin en gerçekçi tahmini, laboratuvar kesme deneyleri ile yapılabilmektedir ve günümüzde uluslararası alanda kabul görmüş kesme deney setleri; tam boyutlu doğrusal (FLCM) ve küçük boyutlu doğrusal kazı setleridir (SLCM). Bu deney setleri dünyada sadece birkaç laboratuvarda bulunmakta ve bazı dezavantajları bulunmaktadır. Başlıca dezavantajları; öncelikle her iki deney setinin kullanımında tecrübeli insan gücüne ihtiyaç olmasıdır. Bununla birlikte büyük boyutlu doğrusal kesme deneylerinde büyük blok numuneler gerekmekte ancak büyük blok numunelerin elde edilmesi ve laboratuvar ortamına taşınması bir hayli güç olmaktadır. Küçük boyutlu kesme deneylerinde ise sadece indeks kama uçlu keskiler kullanılabilmekte ve dolayısıyla bu deney yöntemi her mekanize kazıcı tasarımı veya performans tahmini için kullanılamamaktadır.

FLCM ve SLCM kaya kesme deney setlerinin dezavantajları göz önünde bulundurularak farklı çalışma grupları tarafından daha yeni kaya kesme deney setleri geliştirilmeye çalışılmıştır (Bilgin vd. 2006a; Jalali ve Naghadehi 2013; Entacher vd. 2014; Kang vd. 2016; Cardu vd. 2016; Yaşar ve Yılmaz 2017). İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü'nde de yeni bir taşınabilir doğrusal kazı deney seti (PLCM) geliştirilmiştir (Balcı vd. 2016a, b; Balcı vd. 2015; Polat vd. 2015; Çomaklı vd. 2015). Geliştirilen bu yeni deney seti önceki geliştirilenlerden farklı olarak kazı performans tahmininde en güvenilir sonuçlar veren FLCM'e benzer şekilde geliştirilmiş olup tüm mekanize kazıcıların performans tahmini için kullanılabilmektedir.

Geliştirilen yeni PLCM deney setinde farklı kesici uçlar kullanılarak çalışmalar yapılmış ve PLCM deney sonuçları FLCM deney sonuçları ve teorik modellerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Balcı vd. 2016b; Balcı vd. 2015; Polat vd. 2015; Çomaklı vd. 2015). Yapılan bu çalışmalar sonucunda PLCM deney sonuçlarının FLCM deney seti yerine kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında ise PLCM deney sonuçları ile kayaçların dayanım özellikleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

2 ARAZİ ÇALIŞMALARI

Bu çalışma kapsamında kullanılan numunelerden beş tanesi Üsküdar ile İstanbul'un doğu tarafında bulunan Ümraniye ve Çekmeköy ilçelerini birbirine bağlayan Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy metro tüneli projesinden kazı esnasında alınmıştır. Tünel uzunluğu yaklaşık 20 km olup 16 istasyondan ve depo sahalarından oluşmaktadır. Yapılan bu çalışma kapsamında Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy (ÜÜÇ) metro kazısı sırasında çalışma sahası TBM'in ilerleme hızına bağlı olarak farklı zamanlarda ziyaret edilerek TBM'nin şafttan çıkışı sırasında oluşan küçük bloklardan 5 farklı kayaç numunesi alınmıştır. Şekil 1'de numune alınan istasyonlar gösterilmektedir. Alınan numunelerin istasyonlara göre dağılımı ise Çizelge 1'de verilmiştir.

Şekil 1. Blok numune alınan istasyonlar

3 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

3.1 Fiziksel – Mekanik Testler

ÜÜÇ metro hattı kazısı sırasında alınan blok numuneler laboratuvar ortamına getirilmiş ve numune hazırlama işlemlerinden sonra

kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda kayaçların yoğunluk, nokta yük ve tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımı ile Schmidt yüzey sertlik değerleri belirlenmiştir.

Çizelge 1. Tünel kazısı sırasında alınan numunelere ait bilgiler

Lokasyon	Şaft No	Hat No	Formasyon	Tarih
Ümraniye – Çarşı	S7	1	Çamurtaşı	Ağustos 2013
Çarşı – Libadiye	S6	2	Kireçtaşı	Ekim 2013
Libadiye – Kısıklı	S5	2	Diyabaz	Nisan 2014
Libadiye – Kısıklı	S5	1	Konglomera	Mayıs 2014
Kısıklı – Altunizade	S4	2	Kireçtaşı (Altere)	Haziran 2014

Karot numunelerin kullanıldığı deneysel çalışmalar ISRM (2007) standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Deneyler sonunda beş farklı kayaç numunesi için elde edilen ortalama değerler Çizelge 2'de verilmiştir. Numuneler 1, kireçtaşı (A); 2, altere kireçtaşı; 3, diyabaz; 4, Çamurtaşı; 5, konglomera; 6, bej mermer; 7, traverten; 8, küfeki kireçtaşı; 9, kireçtaşı (B) ve 10, kumtaşı olarak kodlanmıştır.

3.2 PLCM Kaya Kesme Deneyleri

Kaya kesme deneyleri yeni geliştirilen PLCM test cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şek. 2). Kaya kesme deneyleri yapılırken tüm kayaç türlerinden uygun boyutlarda (30x20x11 cm) numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler daha sonra 13,7 cm çapında ve 4 mm uç genişliğine sahip CCS tip mini disk keski kullanılarak yardımlı ve yardımsız olarak kesilmiştir. Yardımlı ve yardımsız kaya kesme deneylerinde kesme derinliği (d) her bir kayaç numunesi için sırasıyla 1, 3 ve 5 mm olarak ayarlanmış olup yardımlı deneylerde keskiler arası mesafe 20 mm olarak ayarlanmıştır. Kayaçların fiziksel mekanik özellikleri ile sadece yardımsız kaya kesme deneylerinden elde edilen normal, yuvarlanma kuvvetleri ve spesifik enerji değerleri arasındaki ilişkiler araştırılmış olduğundan yardımsız PLCM kaya kesme deneylerinden elde edilen değerler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 2. Fiziksel-mekanik deney sonuçları

	γ (gr/cm^3)	UCS (MPa)	BTS (MPa)	SHH	SH	$I_{s(50)}$
1	2,63	41,8	4,96	36,6	32,6	2,59
2	2,44	10,9	2,35	35,6	18,8	1,09
3	2,66	123,8	10,87	56,6	47,9	2,88
4	2,58	24,4	3,56	39,8	30,4	1,01
5	2,71	30,3	4,59	49	43,4	1,61
6	2,7	160,7	7,82	70,4	62	3,81
7	1,92	9,1	3,17	45,8	36,3	1,23
8	2,16	15,6	1,14	15,6	18,8	0,5
9	2,7	70,2	7,73	57,4	56,5	2,03
10	2,8	120,6	11,94	50,2	60,5	3,2

γ: Yoğunluk, UCS: Tek eksenli basınç dayanımı, BTS: Brazilian (dolaylı) çekme dayanımı, SHH: Schmidt sertlik değeri, SH: Shore sertliği, $IS_{(50)}$: Nokta yük dayanımı.

Şekil 2. Taşınabilir doğrusal kazı deney seti (PLCM)

Çizelge 3. Yardımsız PLCM kaya kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar

	d= 1 mm			d= 3 mm		
	FN	FR	SE	FN	FR	SE
1	628,5	87,2	20,4	1136,8	206,3	9,9
2	397,5	63,4	9,1	714,4	142,1	9,1
3	1555,9	207,4	36,9	2036,4	399,8	30,6
4	387,6	68,9	10,3	581,7	123,4	5,7
5	859,5	111,1	16,7	1590,4	325,0	14,6
6	967,5	122,7	23,4	1790,5	490,0	21,9
7	670,0	66,2	16,9	1096,2	190,6	9,1
8	154,9	14,4	7,9	515,5	80,2	5,4
9	540,3	57,0	12,1	1452,6	277,9	10,7
10	1414,3	175,8	40,4	1967,2	431,2	32,9

	d= 5 mm		
	FN	FR	SE
1	1865,5	464,5	8,8
2	974,3	410,4	8,5
3	2496,7	571,9	22,6
4	926,6	238,7	5,7
5	1812,6	460,7	14,3
6	3478,8	796,9	18,1
7	1727,7	323,1	7,5
8	844,6	193,8	4,6
9	1483,8	347,9	8,4
10	2373,7	658,3	21,5

4 BULGULAR VE TARTIŞMA

TBM kazı performansı tahmininde kullanılan yöntemlerden birisi de FLCM kaya kesme deneyleridir. Daha önce yapılan birçok çalışmada FLCM kaya kesme deney sonuçları kullanılarak TBM kazı performansı tahmin edilmiştir (Özdemir vd. 1978, Balcı 2009, Bilgin vd. 2006, 2007, 2008, Feridunoğlu 2009, Tumaç 2010). Yeni geliştirilen PLCM kaya kesme deney seti ise FLCM deney setinin dezavantajlarını giderecek şekilde tasarlanmıştır. PLCM deney seti kullanılarak yapılan çalışmalarda bu deney setinden elde edilen sonuçların güvenilirliği araştırılmıştır (Çomaklı ve Balcı 2015, Çomaklı vd. 2015, Balcı vd. 2015, Polat vd. 2015). Bu çalışmalarda mini disk ve konik uçlu keskiler kullanılmıştır. Çomaklı ve Balcı (2015) tarafından yapılan çalışmada mini disk keski ile yapılan kaya kesme deney sonuçlarının daha önceki kaya kesme deney setlerinden elde edilen sonuçlara benzer şekilde sonuçlar verdiği görülmüştür. Balcı vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada ise yine mini disk keskiler kullanılarak yapılan PLCM kaya kesme deney sonuçları ile teorik yaklaşımlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve PLCM deney sonuçları ile teorik değerler arasında iyi ilişkiler elde edilmiştir.

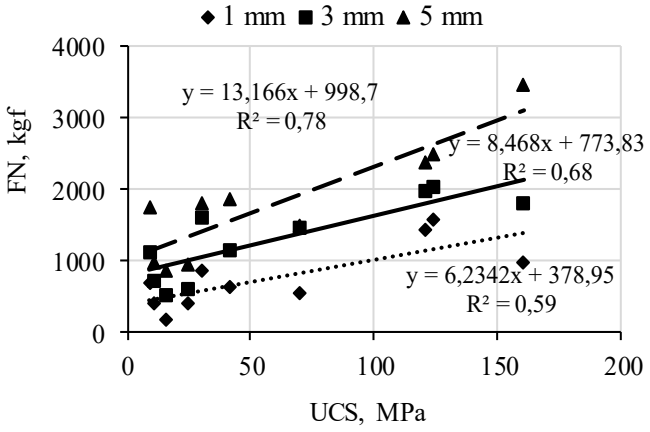
Yapılan bu çalışmada ise PLCM deney sonuçlarının güvenilirliğinin belirlenmesi amacıyla on farklı numune üzerinde yapılan PLCM kaya kesme deney sonuçları ile kayaçların bazı mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

1, 3 ve 5 mm kesme derinliklerinde yardımsız olarak yapılan kaya kesme deneylerinden elde edilen ve Çizelge 3'de toplu olarak verilen normal (FN) ve yuvarlanma (FR) kuvvetleri ile spesifik enerji (SE) değerlerinin öncelikle kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değerlerine bağlı olarak değişimleri incelenmiştir (Şek. 3-5).

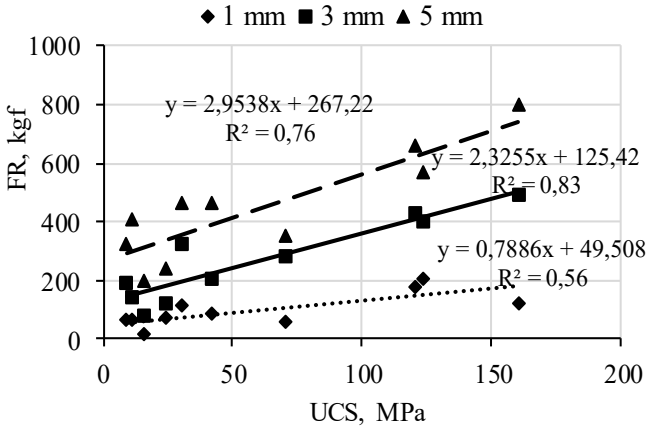
Şekil 3 ve 4'e bakıldığında daha önceki deney setlerinden (FLCM, SLCM) elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak disk keskiye etki eden normal ve yuvarlanma kuvveti değerlerinin kayaçların artan UCS değerlerine bağlı olarak arttığı görülmüştür. Benzer şekilde spesifik enerji değerlerindeki değişiminde UCS değerleri ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür (Şek. 5).

Kayaçların dolaylı (Brazilian) çekme dayanımı değerlerine bağlı olarak PLCM kaya kesme deneylerinden elde edilen parametrelerin değişimleri ise Şekil 6-8'de verilmiştir.

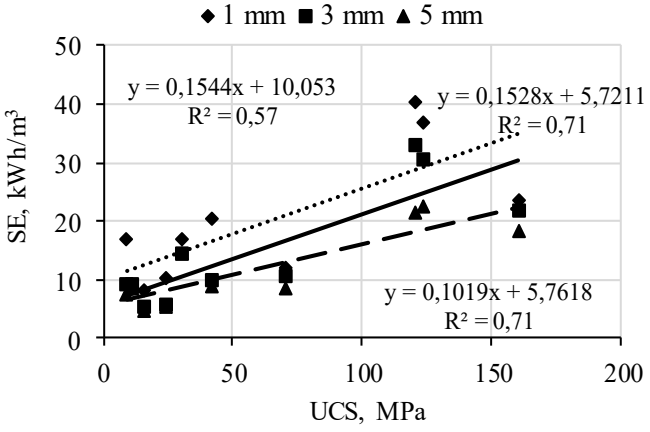
Kayaçların BTS değerlerine bağlı olarak kuvvet değerleri ve spesifik enerji değerlerinde oluşan değişimlere bakıldığında elde edilen ilişkilerin FLCM ve SLCM deney setlerinden elde edilen sonuçlara benzer olduğu görülmektedir (Balcı, 2004). Bunun yanında elde edilen ilişkilerin geneline bakıldığında korelasyon katsayısı değerlerini düşüren kayaçların genel olarak bej mermer ve kumtaşı gibi çok kırılgan



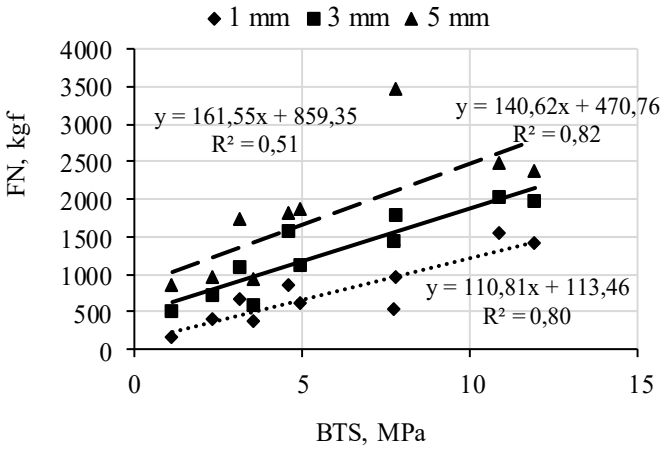
Şekil 3. UCS değerine bağlı olarak normal kuvvet değerlerinin değişimi



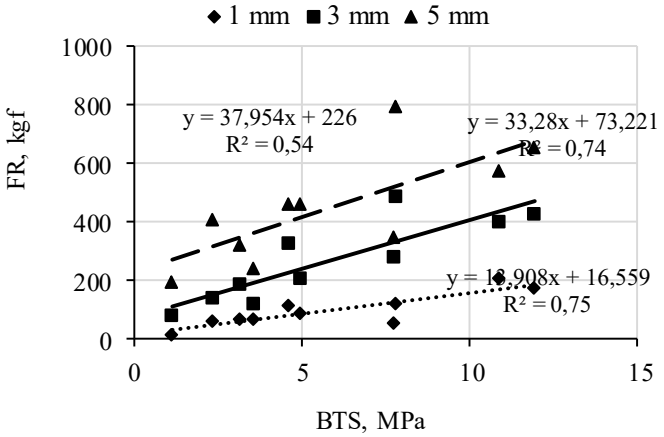
Şekil 4. UCS değerine bağlı olarak yuvarlanma kuvvet değerlerinin değişimi



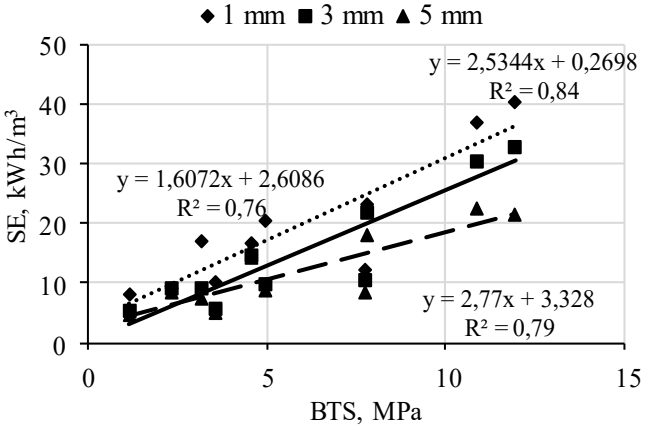
Şekil 5. UCS değerine bağlı olarak spesifik enerji değerlerinin değişimi



Şekil 6. BTS değerine bağlı olarak normal kuvvet değerlerinin değişimi



Şekil 7. BTS değerine bağlı olarak yuvarlanma kuvvet değerlerinin değişimi



Şekil 8. BTS değerine bağlı olarak spesifik enerji değerlerinin değişimi

kayaçlar olduğu görülmektedir. Bu kayaçların yapılan istatistiksel analizlere dahil edilmemesi elde edilen ilişkilerin tümünün artmasına ve korelasyon katsayısı değerlerinin FLCM deney seti için elde edilen sonuçlara daha yakın olmasına sebep olmaktadır. Bu durumda PLCM deneylerinde kullanılan numunelerin boyutlarının daha küçük olmasından ve bu durumun kayaçların kırılganlık ve çatlak yapısı gibi özelliklerinin etkisinin daha fazla etkili olmasıyla açıklanabilmektedir. Benzer durum prototip olarak geliştirilen ilk PLCM deney setinden elde edilen sonuçlar için de geçerli olmuştur (Feridunoğlu 2009; Tumaç 2010).

Buna rağmen elde edilen sonuçların tümüne bakıldığında kayaçların UCS ve BTS değeri ile farklı kesme derinliklerinde elde edilen normal, yuvarlanma kuvvetleri ile spesifik enerji değerleri arasında anlamlı ilişkilerin olduğu söylenebilir. İstatistiksel analizler sonucunda oluşturulan grafiklerden elde edilen eşitlikler kullanılarak kayaçların UCS ve BTS değerlerine bağlı olarak FN, FR ve SE değerleri tahmin edilebilecektir. Bununla birlikte daha fazla kayaç numunesi kullanılarak yapılacak PLCM deney sonuçları kullanılarak bu ilişkiler geliştirilebilecektir.

5 SONUÇ

Bu çalışma kapsamında yeni geliştirilen PLCM kaya kesme deney seti kullanılarak on farklı kaya numunesi üzerinde 1, 3 ve 5 mm kesme derinliklerinde yardımsız kaya kesme deneyleri yapılmıştır. PLCM deneylerinden elde edilen normal ve yuvarlanma kuvvetleri ve spesifik enerji değerleri ile kayaçların UCS ve BTS değerleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen eşitliklerin daha önce FLCM ve SLCM deney setleri için yapılan çalışmalardan elde edilen eşitliklere benzer olduğu görülmüştür. Bu durum da PLCM deney sonuçlarının kazı mekaniği temel ilkelerine uyumlu sonuçlar verdiğini ve dolayısıyla güvenle kullanılabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte elde edilen eşitliklerin daha fazla kayaç numunesi üzerinde yapılacak çalışmalarla geliştirilmesi daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar desteklerinden dolayı TÜBİTAK (Proje No: 112M859) ve İTÜ BAP Birimine (Proje No: 381094) teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Balci, C., Demircin, M.A., Copur, H., Tuncdemir, H. 2004. Estimation of optimum specific energy based on rock properties for assessment of roadheader performance. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104, 633–641.

Balcı, C., Bilgin, N., Çopur, H., Tumaç, D., Akgül, M. 2007. Tünel Açma Makinelerinin (TBM) Tam Boyutlu Kesme Deneyi ile Performans Tahmini. *Birinci Maden Makinaları Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Dumlupınar Üniv., Kütahya.

Balci, C., Bilgin, N., Copur, H., Tumac, D. 2016a. Development of a portable linear rock cutting machine for selection of mechanical miners by investigating the cuttability of some rocks. *TUBITAK Project No:* MAG 112M859, Report submitted to Tubitak. (in Turkish).

Balci, C., Comakli, R., Polat, C., Tumac, D., Copur, H., Bilgin, N. 2016b. Performance Prediction of TBMs using a New Generation of Portable Linear Rock Cutting Machine PLCM. *ITA World Tunnel Congress (WTC 2016)*, 9 p., San Francisco.

Balcı, C., Bilgin, N., Copur, H., Tumac, D. 2009. Tam Cepheli Tünel Açma Makineleri (TBM) Performans Tahmini ve Optimizasyonu. *TUBİTAK Proje Raporu, Proje No: 106M298*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Feridunoglu, C., Tumac, D. 2006a. Full Scale Rock Cutting Tests for TBM Performance Prediction for Kadikoy-Kartal Metro tunnels, *Technical Report Prepared for Anadoluray Joint Venture*, ITU Faculty of Mines, Istanbul.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Feridunoglu, C., Tumac, D. 2006b. Development of a portable rock cutting rig for rock cuttability determination, *Turkish Scientific and Research Council TUBITAK-Misag-274 (104M013)*, 49 p.

Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., Tumac, D., Akgül, M., Yüksel, A., Kahriman, A. 2007. Kadıköy–Kartal metro tünellerinde kullanılacak tünel açma makinelerinin (TBM) bazı tasarım parametrelerinin kesme deneyleri ile belirlenmesi

ve performans tahmini, *Ulaşımda Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu*, s. 63-71, İstanbul.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Tumac, D., Akgul, M., Yuksel, A. 2008. The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in Istanbul Kozyatagi - Kadikoy metro tunnels, *Proceedings of World Tunnel Congress*, pp. 1509-1517, India.

Cardu, M., Iabichino, G., Oreste, P., Rispoli, A. 2016. Experimental and analytical studies of the parameters influencing the action of TBM disc tools in tunnelling. *Acta Geotechnica*.

Comakli, R., Balci, C., Polat, C., Tumac, D., Avunduk, E., Copur, H., Bilgin, N., 2015. Cutter Forces Measurement with (PLCM©) Using Mini Disc Cutters: Comparison with the Theoretical Models, *ITA World Tunnel Congress (WTC 2015)* and 41st General Assembly, p. 10, Dubrovnik, Croatia.

Çomakli, R. 2015. Taşınabilir Doğrusal Kazı Deney Seti Kullanılarak TBM Performans Tahmin Modeli Geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ, İstanbul.

Çomaklı, R., Balcı, C. 2015. Kayaç Kazılabilirlik Özelliklerinin Belirlenmesinde CCS Tip Mini Disk Keski Kullanılması, *S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg*., c.3, ss.1 – 13.

Entacher, M., Lorenz, S., Galler, R. 2014. Tunnel boring machine performance prediction with scaled rock cutting tests, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,* 70:450–459.

Feridunoğlu, O.C. 2009. Kayaç kazılabilirliğinin tayini için taşınabilir kayaç kesme deney aletinin geliştirilmesi. *Doktora Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ISRM, 2007. R. Ulusay, J.A. Hudson (Eds.), The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006, *ISRM Turkish National Group*, Ankara, Turkey.

Jalali, S.M.E., Naghadehi, M.Z. 2013. Development of a new laboratory apparatus for the examination of the rotary-percussive penetration in tunnel boring machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, pp. 88–97.

Kang, H., Cho, J.W., Park, J.Y., Jang, J.S., Kim, J.H., Kim, K.W., Rostami, J., Lee, J.W. 2016. A new linear cutting machine for assessing the rock-cutting performance of a pick cutter, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 88, pp. 129–136.

Ozdemir L., Miller R.J., Wang F.D. 1978. Mechanical Tunnel Boring Machine Prediction and Machine Design. *NSF APR73-07776-A03*, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.

Polat, C., Balci, C., Comakli, R., Tumac, D., Avunduk, E., Copur, H., Bilgin, N. 2015. Cutter Forces Measurement with PLCM Using Mini Conical Pick: Comparison with the Theoretical and Empirical Models, *ITA World Tunnel Congress (WTC 2015) and 41st General Assembly*, p. 8, Dubrovnik, Croatia.

Tumaç, D. 2010. Değişik kayaç ve disk keskilerin kayaç kazılabilirliği üzerine etkisinin araştırılması, *Doktora tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yasar S., Yilmaz A.O. 2017. A Novel Mobile Testing Equipment for Rock Cuttability Assessment: Vertical Rock Cutting Rig (VRCR), *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.50, pp. 857-869.

On the Development of Robust Performance Risk Indicators for Hard Rock TBMs

M. Zare Naghadehi, P. Haghi Topraqlou
Department of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

H. Çopur
Mining Engineering Department, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

ABSTRACT In this paper, two new performance risk indicators are introduced for the first time to evaluate penetration and advance of the tunnel boring machines in hard rock conditions using the probabilistic systems approach. Three mechanized tunneling projects were chosen to be studied in this research and a database was compiled for this purpose. The new indices were computed for every tunnel ring within the database hence enabling the authors to relate them to measured (field) penetration rate and advance rate values where available. The results showed strong correlations between the suggested indices and the measured penetration rate and advance rate in the field.

1 INTRODUCTION

As the mechanized tunneling technology is successfully and rapidly developed, managerial issues becomes more crucial. One of the most sought-after studies in this field is to evaluate or estimate performance of the tunneling machine especially in long tunnels with changing geological conditions, which are considered as a concern and a complicated problem. Therefore, several performance prediction tools have been proposed during the past years including analytical models such as the Gehring's model (Gehring, 1995) and the Colorado School of Mines (CSM) model (Rostami 1997, Rostami and Ozdemir 1993), and empirical models including the most widespread empirical models are Norwegian University of Sciences and Technology (NTNU) model developed by Bruland (1998) (recently updated by Macias (2016)), and the Q_{TBM} (Barton, 2000), and other more recent multi-factor models (see e.g., Ates et al. 2014, Copur et al. 2014, Frough et al. 2015, Zare Naghadehi and Ramezanzadeh 2016, Zare Naghadehi et al. 2018, Namli and Bilgin 2017, R. Mikaeil et al. 2017, Mikaeil et al. 2009). Main output parameters suggested by these prediction models are the rate of penetration (ROP) (the most significant representative of the machine performance together with the other indicators (Jalali and Zare Naghadehi, 2013), the utilization factor (UF) and more recently the field penetration index (FPI).

The present study aims to the prediction of TBM performance in hard rock environment with a relatively higher accuracy compared to the previously developed models. To that end, unique capabilities of the systems approach are utilized to incorporate a larger number of effective parameters into the model as well as to capture the opinions of multiple experts in the field of tunneling by using a probabilistic improvement to the methodology. The results of this study are also compared to field measurements in order to present the field applicability of the proposed model.

2 SYSTEMS METHODOLOGY

The rock engineering systems (RES) approach (Hudson, 1992) provides a framework to evaluate design procedures.

The interaction matrix, as the basic tool in the systems approach, is employed to characterize the importance of parameters and of their interactions: All parameters influencing the system are arranged along the leading diagonal of the interaction matrix, whereas the influence of each factor on the other factors is included, as an off-diagonal term, at the corresponding position. Assigning these values is usually referred to as "coding the matrix." The row passing through one parameter, say Pi, represents the influence of Pi on all the other factors in the system; while the column through Pi represents the influence of the other factors on Pi (Zare Naghadehi et al., 2011).

To be useful, the interaction matrix needs to be coded, quantifying the off-diagonal interactions between parameters at positions (i,j) and (j,i). The "expert semi-quantitative" (ESQ) method --where interactions between parameters are assigned by experts using a typical scale from 0 ("no interaction") to 4 ("critical interaction")-- is common in the literature. But the ESQ can only employ one unique code to quantify the influence of a parameter on the other(s) in the matrix, which is often a limitation when uncertainties about interactions exist. To deal with such uncertainties, Zare Naghadehi et al. (2011) proposed the probabilistic expert semi-quantitative (PESQ) coding method, in which probabilities are assigned to the different coding values considered for each matrix interaction. This probabilistic information can be represented as a set of matrices, with each one containing, in its (i-j)-th position, the probability that a particular code represents the influence of Pi on Pj. The PESQ coding approach is utilized herein and details are provided below.

The PESQ coding allows identifying the parameters with the highest probability of being dominant or subordinate, and also the parameters with the highest probability of being interactive. That is, variability and/or uncertainties can be explicitly included in the analysis, and the effects of such uncertainties can be quantified (Zare Naghadehi et al., 2011).

Once that the RES interaction matrix is computed (coded), simple arithmetic computations are to be done on the matrix in order to achieve the corresponding "weights" of the system's parameters. While those are represented in a probabilistic way, the weights will be instead characterized as probability distributions. Then, a system index can be defined using these weights as well as the "ratings" assigned to each input parameter considered for the given problem. The research presented in this paper, is based on this recently proposed improvement to the framework of the systems approach.

3 NEW RISK INDICATORS

3.1 System's Parameters and Weightings

The previously developed hard rock TBM performance prediction models consider different sets of parameters in their calculations. In the present study, considering one of the exceptional capabilities of the systems approach, there has been no limitation in the number of parameters that can be taken into account in the analyses. However, some criteria were kept in mind in selection of them such as the degree of importance, availability of the parameters in given mechanized tunneling projects, the least overlap among the parameters, etc. In this manner, a number of 12 effective parameters were selected to play a role in the system of the machine excavation in hard rock conditions as follows:

P1: UCS (Uniaxial compressive strength); P2: BTS (Brazilian tensile strength); P3: Quartz content; P4: RQD (Rock quality designation); P5: ALPHA (Discontinuities angle relative to the axis of the tunnel); P6: Mixed face condition; P7: Water inflow; P8: Gas emission; P9: Clay content; P10: Squeezing/Swelling; P11: Karstic condition; and P12: Contractor's experience.

The parameters have been chosen in a way that they cover the influences on both the rate of penetration (ROP) and the advance rate (AR). The former is covered by P1 to P6 while the whole list is considered to be effective on the machine utilization.

The mentioned twelve parameters are placed along the leading diagonal of a matrix referred to as the *interaction matrix* where the interactions between pairs of parameters are coded based on a scale between 0 and 100 by multiple experts from the academia and the industry in the field of tunneling. These codes in this study –and as a result, the entire process- are dealt with in a probabilistic way, which has already been discussed in Section 2. However, the results can be always shown deterministically using significant probabilities of occurrence such as 50% and 90%, which is useful in understanding and comparison of the roles of parameters in the system. Figure 1 depicts the interaction intensities (corresponding Cause plus Effect values) of the parameters in the considered system of mechanized tunneling. Weights of the factors are achieved using these values.

However, the weights are also treated in a probabilistic way, which results in weight distributions rather than single percentile values as weights for each parameter. Figure 2(a) shows the Cause-Effect plot for P1 (UCS) as an instance whereas its weight distribution is depicted in Figure 2(b).

On the other hand, the parameters require to be classified regarding their positive/negative influence on the response of the system. Such classification was developed for the present system. For instance, a quartz content less than 10% is considered as the most favorable condition for penetration and has hence given a 0 score. On contrary, when this mineral is present in the rock with the content between 70-100%, a score of 1 is assigned. Other percentile values are assigned scores between 0 and 1.

3.2 Database

Three hard rock mechanized tunneling projects with similar machine types (double-shield) and project conditions were selected and as a result, a cumulative length of 74 km was used to establish a large database of case histories. The projects are listed as follows:

- Karaj Water Conveyance Tunnel (KWCT), North of Iran
- Zagros Water Conveyance Tunnel (ZWCT), West of Iran
- Ghomrood Water Conveyance Tunnel (GWCT), Central Iran

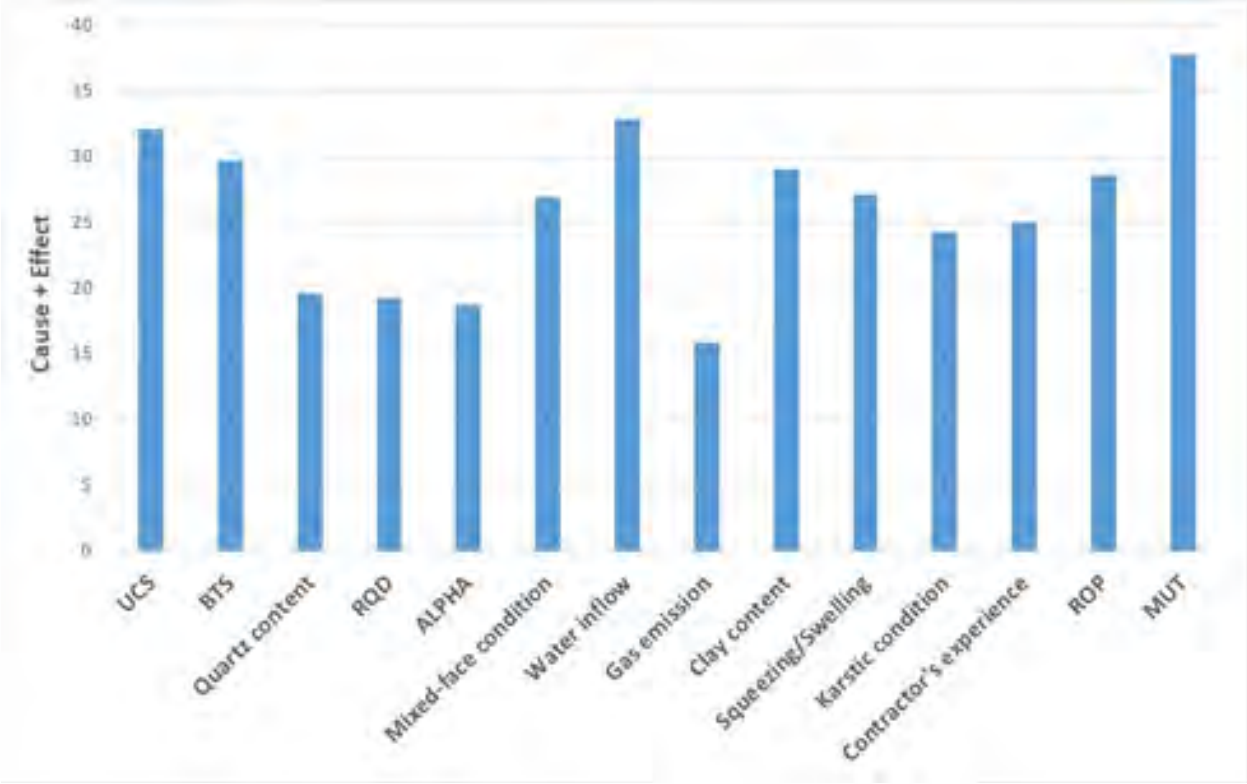
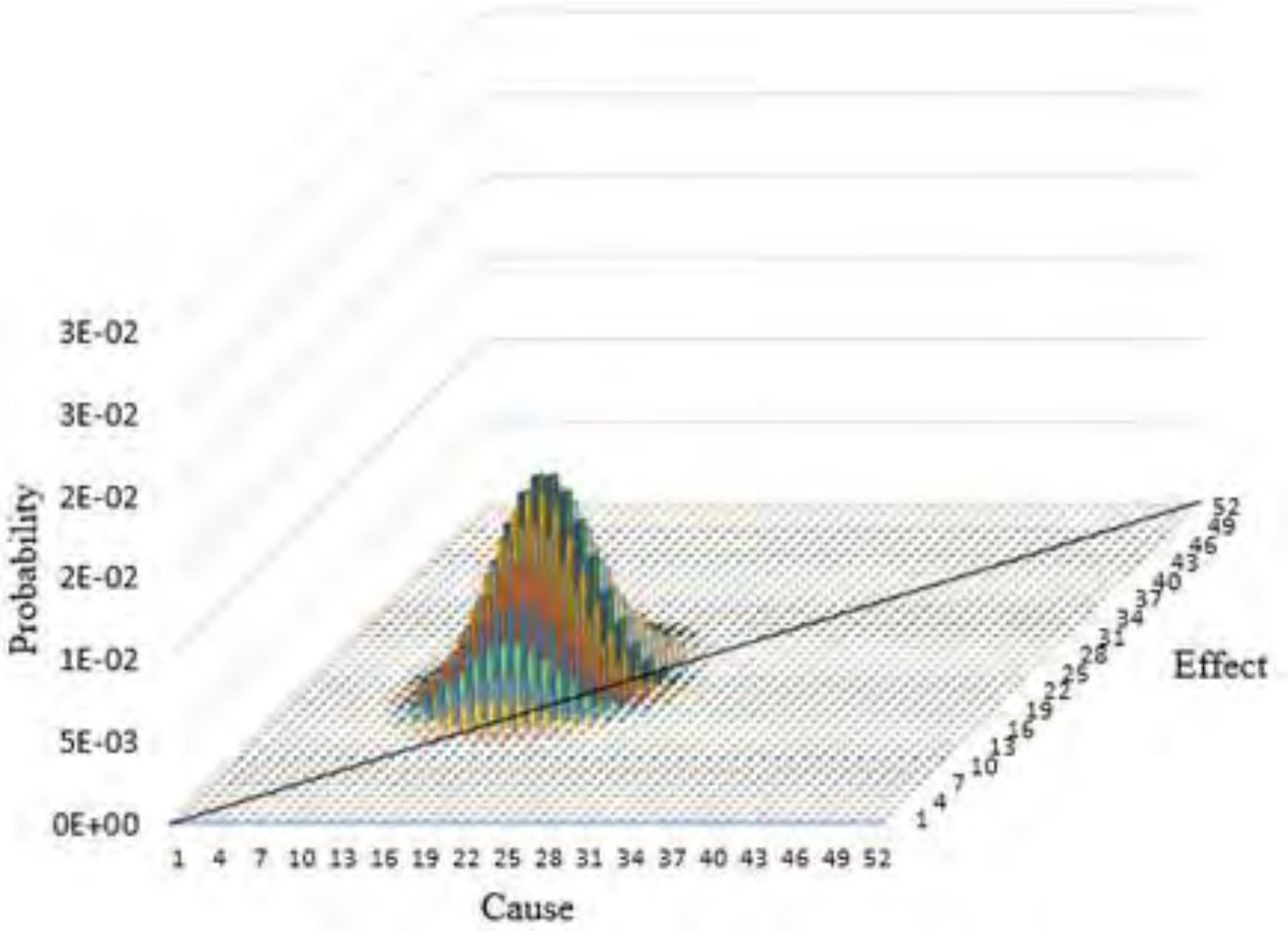
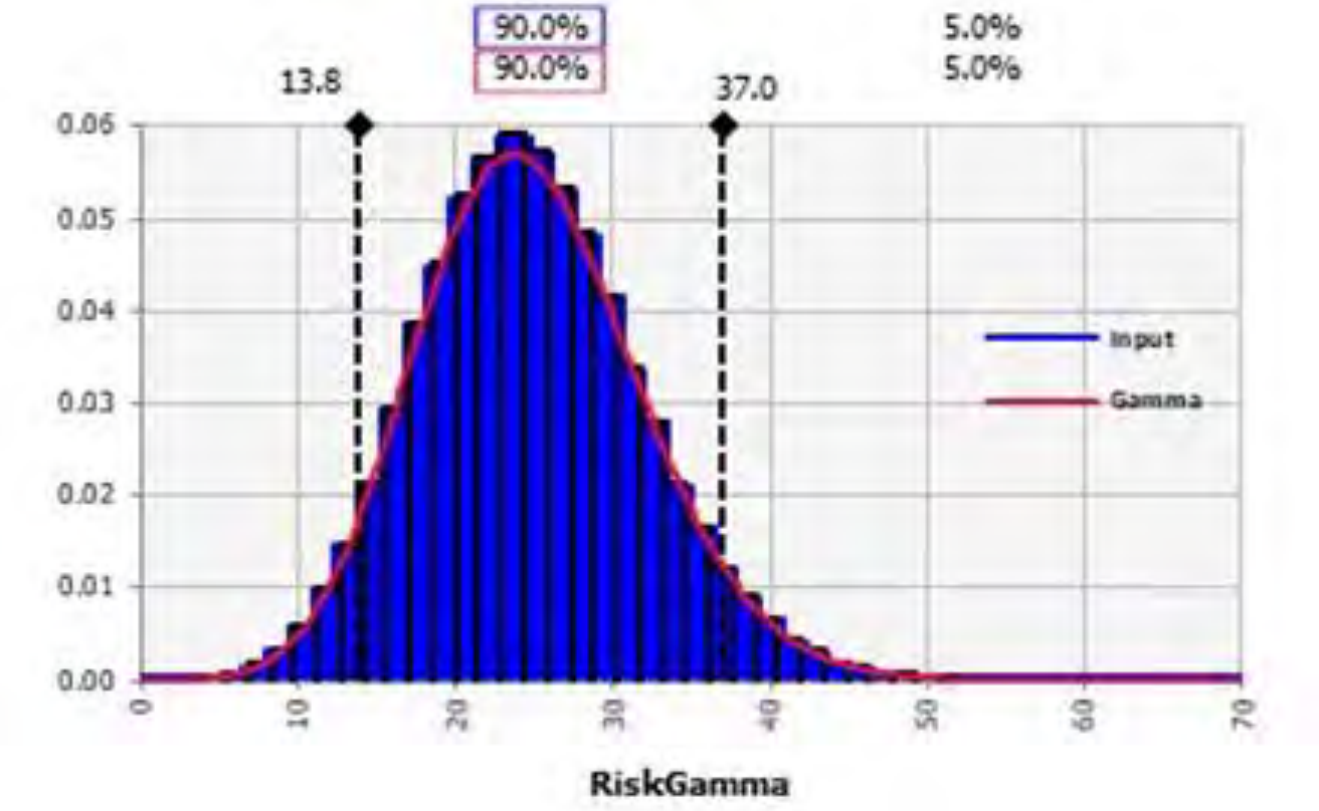


Figure 1. Levels of the interaction intensities of the parameters in the system



(a)



(b)

Figure 2. Results of the C-E plot (a) and the parameter weight distribution (b) of the P1

All three tunnels have been excavated with water conveyance purpose in Iran with slightly different sorts of measured parameters. It is worthy to note that the available parameters for each project are considered as a full list of a sub-system and the others - not measured for that given project - are eliminated from the list. That way, the parameters weights are altered compared to the weights of the major list (the list including 12 items) and new probability distributions are obtained, which are unique for that project.

3.3 Definitions and Computations

Two risk indicators of machine performance are developed in this study including Penetration Risk Index (PRI) and Advance Risk Index (ARI) both ranging from 0 to 100 percent. It is assumed that the penetration and advance of the machine are reduced as PRI and ARI increase, respectively. These indices are defined straightforwardly as follows.

$$PRI, ARI = \sum_i W_i . R_i \qquad (1)$$

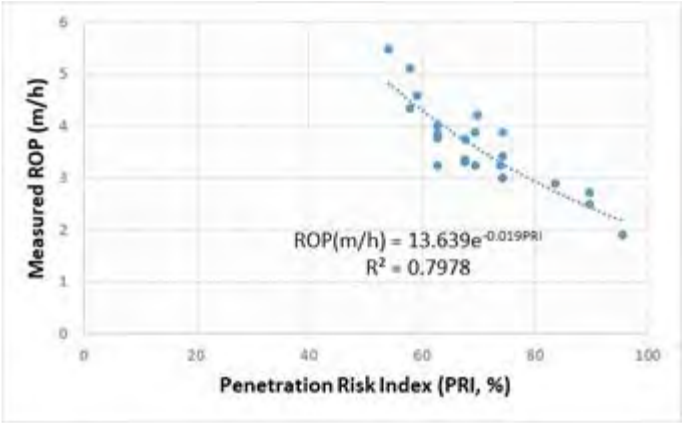
where W_i is the i-th parameter weight, which is calculated from the interaction matrix as described in Section 3.1, and it is fixed for all applications in this research; and R_i is the i-th parameter rating for the project and is read from the classification table.

The corresponding values of the projects and the weights calculated in the previous sections were utilized to compute the indices for all the tunnel stations of the database. These indices were then correlated to the measured ROP and AR in the field in order to display the applicability of the proposed methodology. The comparisons show substantial agreement between the indices values and the measurements. As an example, Figure 3 (a,b) illustrates the results for the GWCT project.

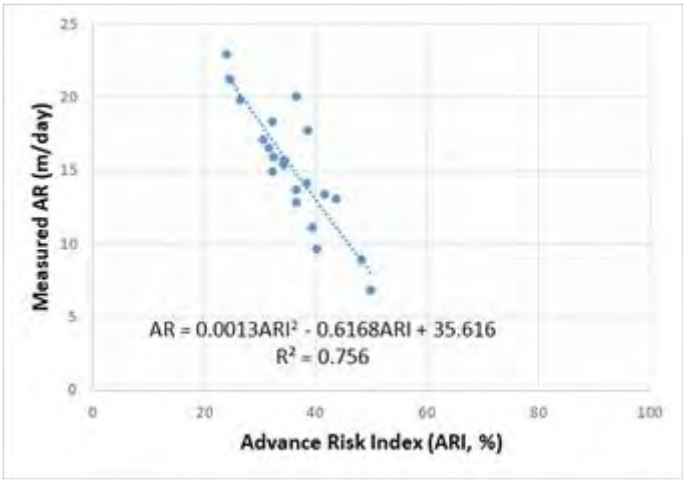
In Figure 3, 90% probability of occurrence has been used as the criterion of converting probabilistic figures to deterministic values. It is clear that, as expected, field penetration and advance rates drop as the PRI and ARI increase. Coefficients of determination (R^2) are acceptable as they are close to 0.8, compared to that of predictions of the well-known NTNU method for this project, which equals to 0.074 (predicted for ROP).

4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

It is highly in demand to consider probabilities in order to reduce uncertainty and subjectivity in the interactions between the factors affecting an engineering system. The probabilistic expert semi-quantitative (PESQ) coding method was employed in this paper to assess the importance that 12 input parameters, which affect the performance of the machine in hard rock conditions. Using such approach, the main factors touching the output in this project are identified, with results showing the significant importance of some factors and the reduced importance of others in the system.



(a)



(b)

Figure 3. Results of the PRI (a) and ARI (b) compared to field measurements of the GWCT project

Two performance risk indicators (PRI and ARI) are developed, computed for an extensive database of TBM excavation case histories, and compared to real field data. An excellent agreement were found between the indices values and field measurements, which confirms the field applicability of the proposed indices. These were indeed estimated probabilistically for various zones / sections defined along the tunnels path, using an expert-based probabilistic coding of the RES interaction matrix, and the highest probabilities of occurrence were used for comparisons. In particular, the validation exercise conducted suggests that, given the uncertainties involved, the results of the PRI and ARI could be acceptable in practice to higher extent against the other well-known performance prediction models. Nonetheless, keeping in mind that the performance of the machine is highly sensitive to any change to unpredicted situations such as encountering difficult ground conditions, possible incidents during the excavation, change in the policy of repair and maintenance, etc.; any prediction models can easily be unsuccessful to present acceptable estimations. Therefore, the user should consider these likely situations and resulted limitations while estimating the performance for any given tunneling project by using such predictive indicators.

ACKNOWLEDGEMENT

This study covers the partial results of a project supported by TÜBİTAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) (Program of BİDEB 2221). The authors would like to thank to TÜBİTAK, without whom this study would be impossible.

REFERENCES

Ates, U., Bilgin, N., Copur, H. 2014. Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *40*, 46–63.

Barton, N. 2000. *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*. Balkema, Rotterdam.

Bruland, A. 1998. *Hard Rock Tunnel Boring.* Norwegian Institute of Technology (NTNU), Trondheim, Norway.

Copur, H., Aydin, H., Bilgin, N., Balci, C., Tumac, D., Dayanc, C. 2014. Predicting performance of EPB TBMs by using a stochastic model implemented into a deterministic model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *42*, 1–14.

Frough, O., Torabi, S.R., Yagiz, S. 2015. Application of RMR for Estimating Rock-Mass–Related TBM Utilization and Performance Parameters: A Case Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *48*(3), 1305–1312.

Gehring, K. 1995. Leistungs- und Verschleissprognosen im maschinellen Tunnelbau. *Felsbau*, *13*, 439–448.

Macias, J. 2016. *Hard Rock Tunnel Boring: Performance Predictions and Cutter Life Assessments*. Norwegian University of Sciences and Technology (NTNU).

Mikaeil, R., Zare Naghadehi, M., Ghadernejad, S. 2017. An Extended Multifactorial Fuzzy Prediction of Hard Rock TBM Penetrability. *Geotechnical and Geological Engineering*.

Mikaeil, R., Zare Naghadehi, M., Sereshki, F. 2009. Multifactorial fuzzy approach to the penetrability classification of TBM in hard rock conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *24*(5), 500–505.

Namli, M., Bilgin, N. 2017. A model to predict daily advance rates of EPB-TBMs in a complex geology in Istanbul. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *62*, 43–52.

Rostami, J. 1997. *Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure*. Colorado School of Mines, Golden, CO.

Rostami, J., Ozdemir, L. 1993. A new model for performance prediction of hard rock TBM. In L. D. et al. Bowerman (Ed.), *Proceedings of RETC,* pp. 793–809. Boston, MA.

Zare Naghadehi, M., Jimenez, R., KhaloKakaie, R., Jalali, S. 2011. A probabilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes. *Engineering Geology*, *118*, 82–92.

Zare Naghadehi, M., Ramezanzadeh, A. 2016. Models for estimation of TBM performance in granitic and mica gneiss hard rocks in a hydropower tunnel. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *76*(4), 1627–1641.

Zare Naghadehi, M., Samaei, M., Ranjbarnia, M., Nourani, V. 2018. State-of-the-art predictive modeling of TBM performance in changing geological conditions through gene expression programming. *Measurement*, *126*, 46–57.

Aynı Formasyon-Değişken Litolojide Kazı Yapan İki Farklı EPBM'in Performans Analiz ve Değerlendirmesi

Performance Analysis and Evaluation of Two Different EPBMs Excavating the Same Formation-Variable Lithology Conditions

N. Tokgöz
İ.Ü-C. Mühendislik Fakültesi,Maden Mühendisliği Bölümü, Avcılar/İstanbul

İ.S. Binen
Gülermak – Nurol – Makyol Metro Yapım Ortaklığı, İstanbul

ÖZET Bu araştırmada, aynı güzergâhta karşılıklı kazı yapan iki farklı marka ve teknik yapıdaki EPBM'in, aynı formasyon-değişken litolojide kazı performans büyüklüklerinde gözlenebilecek mertebe değişimi ve bu değişimlerin sebeplerinin karşılaştırılmalı olarak araştırılması hedeflenmiştir.

Bu amaçla, 6,5 m kazı çaplı 1100 metrelik ikiz tünellerin açılması sırasında farklı marka ve teknik özellikteki iki farklı EBPM'in toplam 1438 adet ham verisi bu araştırma kapsamında analiz edilip değerlendirilmiştir. Sekiz adet kazı performans büyüklüğünü kapsayan ve litolojik ayrışmaya bağlı üç temel kazı zonunun esas alındığı bu veri seti için, *bütünleşik veri modelleme yöntemi"* karşılaştırılmalı olarak kullanılmıştır. Bu bağlamda, özellikle her iki EPBM'in harcadığı spesifik enerji (kWh/m^3) büyüklüğündeki belirlenen mertebe yakınsamalarının, kazı ilerleme hızlarında belirlenen farklılıklara rağmen, kazı materyalinde artan ayrışma/bozunma derecesine bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. Özellikle tamamen ayrışmış kiltaşlarında artan ince taneli kazı materyal litolojisi, ilerleme hızlarının kestirimini belirleyen ve denetleyen önemli büyüklük olmuştur.

ABSTRACT In this study, it was aimed to investigate and compare the variations in the performance parameters of two EPBMs driving in opposite directions on the same line which passes through different lithological units of the same formation.

For this reason, a total of 1438 raw data entries which obtained from the EPBMs during the excavation of twin tube tunnels with a length of 1100 meters and 6.5 meters in diameter have been analyzed and evaluated. An "integrated data modelling method" was used comparatively for the data set which includes 8 excavation parameters and 3 different excavation zones that were determined in compliance with the degree of weathering. In that aspect, it was observed that especially the margin between the specific energy (kWh/m^3) consumed by both EPBMs, despite the differences in advance rates, were decreasing depending on the increasing degree of weathering in the excavation zone. Particularly, fine-grained lithological components that reside in completely weathered claystones were found to be the most significant parameter which determines and control the estimation of excavation advance rates.

1 GİRİŞ

İstanbul, artan altyapı gereksinimlerinden trafik ve ulaşım problemlerini çözebilmek üzere vazgeçilmez nitelikte metro yatırımlarını arttırarak sürdürmekte ve mevcut 145 km uzunluğunda metro ağını 2020 yılı sonunda 980 km'ye ulaştırmayı hedeflemektedir.

Şehirlerin, artan nüfusa bağlı olarak sürekli büyüyen altyapı ve ulaşım

ihtiyaçlarının karşılanmasında tünelcilik faaliyetlerinin önemi her geçen yıl artmaktadır. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de ve özellikle İstanbul'da gerçekleştirilen altyapı yatırımlarının sayısı bu duruma iyi bir örnek teşkil etmektedir. Gelişen teknolojiye bağlı olarak söz konusu altyapı projelerinde kullanılan yöntemler de zamanla değişmekte, klasik tünelcilik yöntemleri yerini daha ekonomik ve emniyetli olarak kabul edilen Tünel Açma Makinelerine (TBM) bırakmaktadır.

TBM ile tünel açma faaliyetlerinde en önemli tartışma konularından birisi TBM'lerin kazı performansı olarak öne çıkmaktadır. TBM'lerin kazı performansları, proje maliyetlerine ve sürelerine doğrudan etki ettiklerinden karar alma ve fizibilite süreçlerinin en üst sıralarında yer almaktadır. Bu sebeple TBM'lerin kazı performansına etki eden faktörler son yıllarda pek çok yabancı araştırmacı tarafından da çalışılmaktadır (Barton 2000, Bieniawski et al. 2008, Gong ve Zao 2009, Salimi et al. 2015, González 2016).

Son yıllarda, özellikle İstanbul'un kompleks jeolojisi ve içerdiği zorlu zemin şartlarında, EPB-TBM'lerle kazıdaki performans parametrelerinin tek veya çok değişkenli fonksiyonel kestirimlerine (regresyon) yönelik kayda değer veri modelleme araştırmaları dikkat çekmektedir (Tokgöz vd. 2013, Ateş vd. 2014, Tokgöz vd. 2015, Namlı ve Bilgin 2015, Bilgin 2016, Bilgin vd. 2016, Tokgöz 2016 ve 2017, Avunduk ve Copur 2018). Bu tür bilimsel ve teknik altyapılı araştırmalar; EPBM'lerin kazı performansına etki eden parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimlerinin iyi anlaşılabilmesi yanında, kazı performanslarının en az hata payları ile "bire-bir" düzeyinde yüksek kestirimlere ulaşılmasına olanak tanıyabilmektedir. Böylelikle gelecek projeler için özellikle karar alma süreçlerinin teknik ve ekonomik olarak daha da iyileştirilmesine imkân sağlamış olacaktır.

Bu bağlamda, tamamlanan Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi, karmaşık ve değişken jeolojik yapı içerisinde yoğun şehirleşme altında tek yönde 18,5 km uzunluğunda ikiz tüp sistemiyle yapılmıştır ve pasa basıncı dengeleme (EPB) prensibiyle çalışan TBM'lerde kazı performanslarının karşılaştırılması ve etkili olan parametrelerin irdelenmesi açısından oldukça önemlidir.

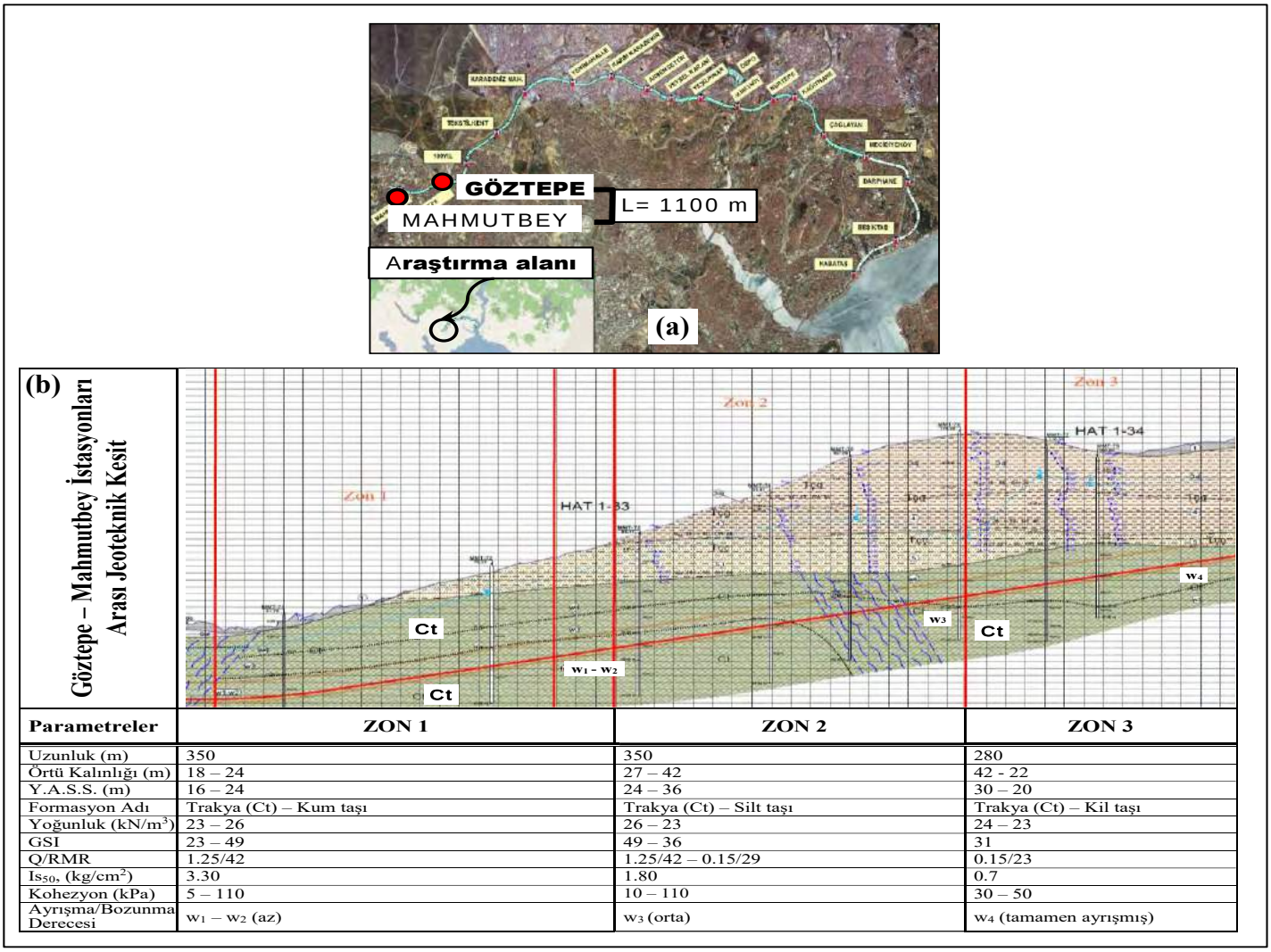
Bu çalışmada ise, aynı formasyon-değişen litolojide, aynı hatta kazı yapan ve aynı kazı çaplı iki farklı EPBM'in kazı performansları, litolojiyi belirleyen üç farklı ayrışma / bozunma zonuna göre incelenmiştir. Burada, kazı ilerleme hızına etki eden parametreler ve bu parametrelerin birbirleriyle ilişkileri, ise çoklu fonksiyonel kestirim (regresyon) kullanılarak, *"bütünleşik veri modelleme yöntemiyle*" karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analizlerde kullanılacak gerekli ham veri ise, yukarıda sözü edilen projenin Mahmutbey ve Göztepe İstasyonları arasındaki kazı performans verilerini kapsamaktadır.

2 ARAŞTIRMA ALANININ JEOLOJİSİ

Söz konusu bölge jeolojik gelişimi bakımından karmaşık bir yapıdadır. Çökel kayaçlardan oluşan bölge sık ardalanmalar, kum mercekleri, akiferler, fay hatları ve ezik zonlar barındırmaktadır.

Tüm metro hattının içinden geçtiği hâkim formasyon Trakya Formasyonu (Ct)'dur. Trakya Formasyonu, başlıca kumtaşı silttaşı, kiltaşı ve şeyl ardalanmalarından oluşmaktadır. Trakya Formasyonu içerisinde yer alan kumtaşları kuvarsça zengin, orta ve yüksek dayanımlı, yer yer kırıklı çatlaklı ve bozunmuş halde gözlenmiştir (Polat 2014, 2015). Alt kısımlarda yer alan kiltaşı-silttaşı ardalanmaları kil açısından zengin olabilmektedir. Göztepe İstasyonundan başlamak suretiyle Mahmutbey İstasyonuna doğru gidildikçe kumtaşı-kiltaşı/silttaşı ve kiltaşı ardalanmaları ile karşılaşılmış, kayaçların bozunma ve ayrışma derecelerinin arttığı saptanmıştır. +21.700 ve +21.820 km'leri arasında ise ön jeoteknik çalışmalarda belirlenmiş olan bir ezik zon / fay bölgesi geçilmiştir. Ayrıca üzerinde geçmiş dönemlerde açılmış halen aktif veya pasif konumda olan pek çok su kuyusu da yapılan çalışmalarda tespit edilmiş ve bu kuyular kazılardan önce kapatılmıştır.

Jeoteknik etütlerle belirlenmiş ve bu 3 ayrı bölge ayrışma/bozunma sırasıyla Zon 1 (w_1 – w_2), Zon 2 (w_3) ve Zon 3 (w_4) olarak adlandırılarak, bu araştırmanın kazı performans analizleri için gerekli ham veri seti, böylelikle oluşturulmuştur. Araştırma bölgesinde yer alan tünel güzergâhı, bu araştırma kapsamında belirlenen ilgili zonlar ve düşey jeolojik kesite sırasıyla Şekil 1'de yer verilmiştir.



Parametreler	ZON 1	ZON 2	ZON 3
Uzunluk (m)	350	350	280
Örtü Kalınlığı (m)	18 – 24	27 – 42	42 - 22
Y.A.S.S. (m)	16 – 24	24 – 36	30 – 20
Formasyon Adı	Trakya (Ct) – Kum taşı	Trakya (Ct) – Silt taşı	Trakya (Ct) – Kil taşı
Yoğunluk (kN/m^3)	23 – 26	26 – 23	24 – 23
GSI	23 – 49	49 – 36	31
Q/RMR	1.25/42	1.25/42 – 0.15/29	0.15/23
Is_{50}, (kg/cm^2)	3.30	1.80	0.7
Kohezyon (kPa)	5 – 110	10 – 110	30 – 50
Ayrışma/Bozunma Derecesi	w_1 – w_2 (az)	w_3 (orta)	w_4 (tamamen ayrışmış)

Şekil 1. Tünel güzergâhının yerbulduru haritası *(a)* ile jeoteknik kesiti *(b)*

3 MALZEME VE YÖNTEM

Bu araştırma kapsamında, Mahmutbey ve Göztepe İstasyonları arasında yer alan yaklaşık 1100 metrelik ikiz tünellerin açılması sırasında aynı kazı çapına (6,5 metre) sahip farklı marka ve teknik özellikteki iki EPB-TBM'in birbirlerine karşılıklı olarak çalıştırılması konu edilmiştir. Bu kazılar sırasında her iki TBM'in de kesici kafa dönme hızı (RPM), kesici kafa torku (Tr), toplam itme (thrust) kuvveti (*Th*), ilerleme hızı (AR), penetrasyon (PR), arın/ayna dengeleme basıncı (EP), köpük enjeksiyon oranı (FIR) gibi temel kazı performans parametreleri, EPBM'lerin otomasyon sistemlerine ait olan data logger tarafından sürekli olarak kaydedilmiştir. Bu veriler, proje öncesinde hazırlanmış olan ve kazı sırasında yapılan gözlemler ile güncellenen jeoteknik ve jeolojik veriler ile bütünleştirilmiştir. EPBM literatüründe, kazı odası basınç sensörlerinden alınan veriler, "arın/ayna dengeleme basıncını" belirlemede doğrudan kullanılabilmektedir. Bu araştırmada da ilgili veri setine, kazı odası basınçları da dahil edilmiştir. Bunun yanı sıra, makinanın toplam thrust değerinden, ortalama arın dengeleme basıncının çıkarılması ile "Net Thrust (NTh, kN)" büyüklüğü türetilmiş ve bu büyüklüğün kazı

ilerleme hızı üzerinde etkisi de yine bu çalışmada irdelenmiştir.

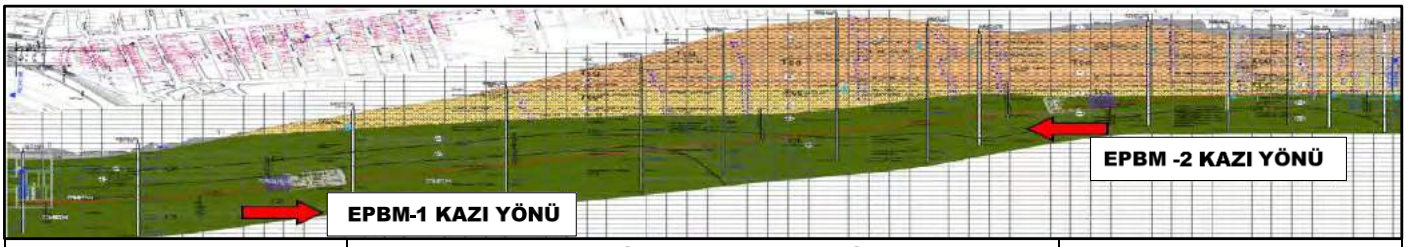
Kazı performans veri seti; EPBM-1 =746 ve EPBM-2 = 737 adet ham veri olmak üzere toplamda 1438 adet ham veriyi kapsamaktadır. Ayrıca, her iki EPBM'in işletme sürecinde kayıt altına alınan vardiya ve üretim raporları da yukarıdaki geri analiz veri setine eklenip, makinalardan faydalanma oranları da belirlenmiştir. Böylelikle, tüm bu kazı performans büyüklüklerinin birbirleriyle olan ilişkileri çoklu fonksiyonel kestirim (regresyon) analizi yardımıyla *"bütünleşik veri modelleme yöntemi*" kullanılarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

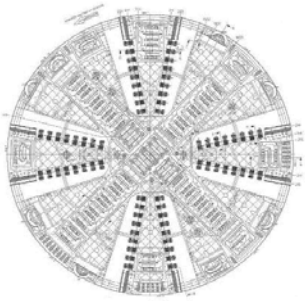
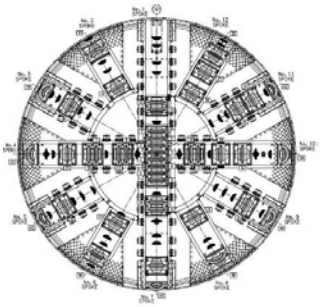
3.1 EPBM'lerin Teknik Özellikleri

Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi delme tünellerinin Veysel Karani İstasyonu ile Mecidiyeköy İstasyonu arasında kalan bölümü NATM yöntemiyle, Veysel Karani İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonları arasında kalan kısmı ise EPBM'ler ile açılmıştır. Metro hattının inşaatında ikiz tüp sistemi benimsenmiş olup TBM tünellerinin segment dış çapı 6300 mm, segment iç çapı ise 5700 mm'dir.

Çalışma kapsamında incelenen bölge olan Göztepe ve Mahmutbey İstasyonları arasındaki yaklaşık 1150 metrelik kısım, karşılıklı yönlerde kazı yapan aynı kazı çapına sahip farklı marka ve teknik özellikte iki EPBM ile açılmıştır (EPBM-1 ve EPBM-2). EPBM-1, Göztepe İstasyonundan kazısına başlayarak Mahmutbey İstasyonuna varmıştır. EPBM-2 ise Mahmutbey İstasyonunda açılan pilot tünelden kazısına başlayarak Göztepe İstasyonuna ulaşmıştır. EPBM'lerin teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Farklı iki EPBM'in teknik özellikleri



	TEKNİK ÖZELLİKLER	
	EPB TBM - 1	EPB TBM - 2
	• Model Yılı = 2006 • Kazı çapı = 6.55 m • Thrust kapasitesi = 32 000 kN • İtme Pistonu Sayısı= 16x2 • Tork kapasitesi = 4 400 kNm @ 1.8 RPM, 2100 kNm @ 3.8 RPM • Tahrik sistemi = 8 x Hidrolik • Kesici Kafa Dönüş Yönü = Çift Yönlü • Kesici Kafa Dönüş Hızı= 0-1.8 RPM, 1.8 – 3.8 RPM	• Model Yılı= 2015 • Kazı çapı = 6.56 m • Thrust kapasitesi= 40 000 kN • İtme Pistonu Sayısı= 16 • Tork kapasitesi= 5 440 kNm • Tahrik sistemi = 6 x VFD (Elektrikli) • Kesici Kafa Dönüş Yönü=Çift Yönlü • Kesici Kafa Dönüş Hızı = 0-3 RPM
 EPBM - 1 Kesici Kafa		
• Kafa açıklık oranı= %20 • Disk Tipi ve Sayısı= 41x17" CCS • 4 x Çiftli Disk • 22 x Tekli Disk • 11 x Çevre Diski • 68 Face sıyırıcı • 8 Gauge sıyırıcı		
		 EPBM - 2 Kesici Kafa
		• Kafa açıklık oranı = %37 • Disk Tipi ve Sayısı = 43x17"CCS • 5 x Çiftli Disk • 22 x Tekli Disk • 11 x Çevre Diski • 96 Face sıyırıcı • 12 Gauge sıyırıcı

4 BULGU VE DEĞERLENDİRMELER

Her iki EPBM'in kazı performans veri setine ilişkin analizler ve değerlendirmeler, Çizelge 1 ile Şekil 2 ve Şekil 3'de topluca sunulmuştur. İlgili çizelge şekiller ile birlikte değerlendirildiğinde, şu önemli bulgu ve değerlendirmelere ulaşılmaktadır.

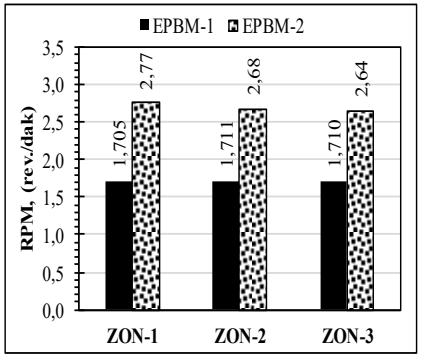
- EPBM-1 iki kademeli bir ana tahrik sistemine sahip olup yüksek tork kapasitesi olan 4400 kNm değerine ilk kademede erişebilmekte ve bu durum kesici kafa dönüş hızını 1,8 RPM ile sınırlandırmaktadır.

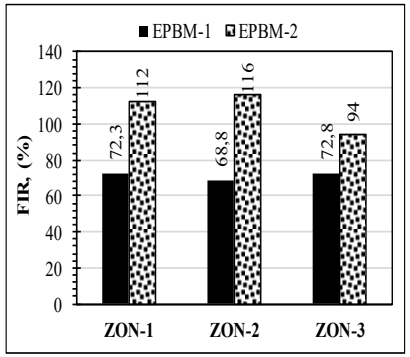
Çizelge 2. Aynı formasyon (Trakya, Ct) - değişken litolojide kazı yapan iki farklı EPBM'in (1 ve 2) kazı performans büyüklüklerinin istatistiksel analizi ve değerlendirmesi.

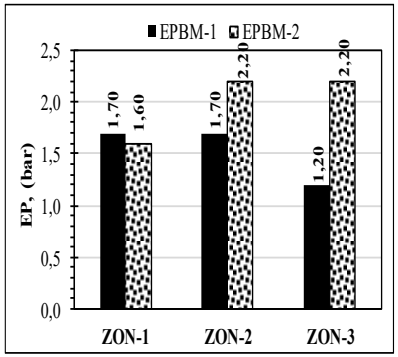
KAZI PERFORMANS BÜYÜKLÜKLERİ

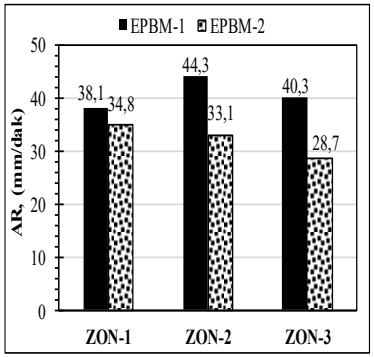
İSTATİSTİKSEL ANALİZ		*RPM* (rev./dak.)		Th (kN)		Tr (kN.m)		EP (bar)		FIR (%)		NTh (kN)		AR (mm/dak.)		*PR* (mm/rev.)		SE (kWh/m³)	
		①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②
ZON-1	*n*	236	235	236	235	236	235	236	235	236	235	236	235	236	235	236	235	236	235
	$\bar{X}$	**1.705**	**2.773**	**15352**	**16498**	**2748**	**1242**	**1.7**	**1.6**	**72.3**	**112**	**9956**	**11122**	**38.1**	**34.8**	**22.32**	**12.56**	**5.5**	**4.29**
	SD	0.040	0.096	1624	4566	395	196	0.3	0.3	18.3	35	4299	5245	9.5	6.6	5.54	2.33	1.8	1.29
	V (%)	2.92	3.46	10.6	27.7	14.4	15.8	17.3	20.4	25.4	31.3	43	47	25.1	19.0	24.82	18.55	33.1	30.00
ZON-2	*n*	238	247	238	247	238	247	238	247	238	247	238	247	238	247	238	247	238	247
	$\bar{X}$	**1.711**	**2.676**	**15280**	**16302**	**2620**	**1282**	**1.7**	**2.2**	**68.8**	**116.0**	**9683**	**9049**	**44.3**	**33.1**	**25.88**	**12.35**	**4.4**	**4.48**
	SD	0.050	0.177	2676	3417	478	199	0.4	0.8	13.4	28.2	2856	3624	8.4	6.7	4.75	2.25	1.2	1.31
	V (%)	2.92	6.61	17.5	21.0	18.2	15.5	25.4	38.6	19.5	24.3	30	40	18.9	20.1	18.35	18.21	27.9	29.24
ZON-3	*n*	168	183	168	183	168	183	168	183	168	183	168	183	168	183	168	183	168	183
	$\bar{X}$	**1.710**	**2.644**	**12789**	**14842**	**2602**	**1227**	**1.2**	**2.2**	**72.8**	**94.5**	**9027**	**7260**	**40.3**	**28.7**	**23.60**	**10.88**	**4.7**	**4.81**
	SD	0.070	0.155	2802	3222	495	289	0.4	0.4	16.7	24.1	**1932**	2782	7.2	4.0	4.25	1.60	1.3	1.61
	V (%)	4.10	5.86	21.9	21.7	19.0	23.5	31.2	18.4	23.0	25.5	21	38	17.9	13.8	18.00	14.70	27.9	33.40
TÜM VERİLER	*n*	746	737	746	737	746	737	746	737	746	737	746	737	746	737	746	737	746	737
	$\bar{X}$	**1.707**	**2.695**	**14708**	**15762**	**2624**	**1238**	**1.5**	**1.9**	**71.4**	**110**	**9534**	**7020**	**40.1**	**33.1**	**23.49**	**12.26**	**4.9**	**4.4**
	SD	0.069	0.179	2806	3869	518	232	0.5	0.6	16.7	32	2967	2477	9.4	7.0	5.48	2,34	1.7	1.4
	V (%)	4.04	6.64	19.1	24.5	19.7	18.7	29.8	32.6	23.4	29.0	31	35,3	23.6	21.0	23.33	19.00	34.3	32.3

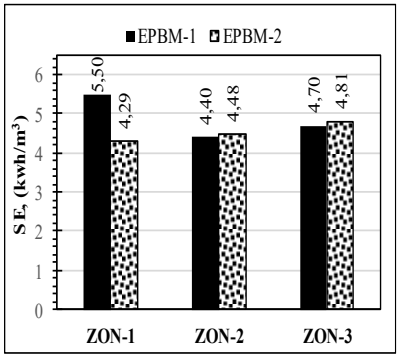
Açıklamalar: *① = EPBM-1, ② = EPBM-2, AR= İlerleme Hızı (mm/dak.), RPM=Kesici kafanın dönüş hızı (rev./dak.), Th= Thrust (kN), NTh = Net trust oranı (kN), Tr= Kesici kafa torku (kN.m), EP= Ayna basıncı(≅kazı odası basıncı) (bar), FIR =Köpük enjeksiyon oranı (%), SE= Spesifik Enerji (kwh/m³), n= Veri sayısı, $\bar{X}$=Ortalama değer, SD= Standart Sapma, V= Değişkenlik katsayısı [V=(SD/ $\bar{X}$)x100. %].*







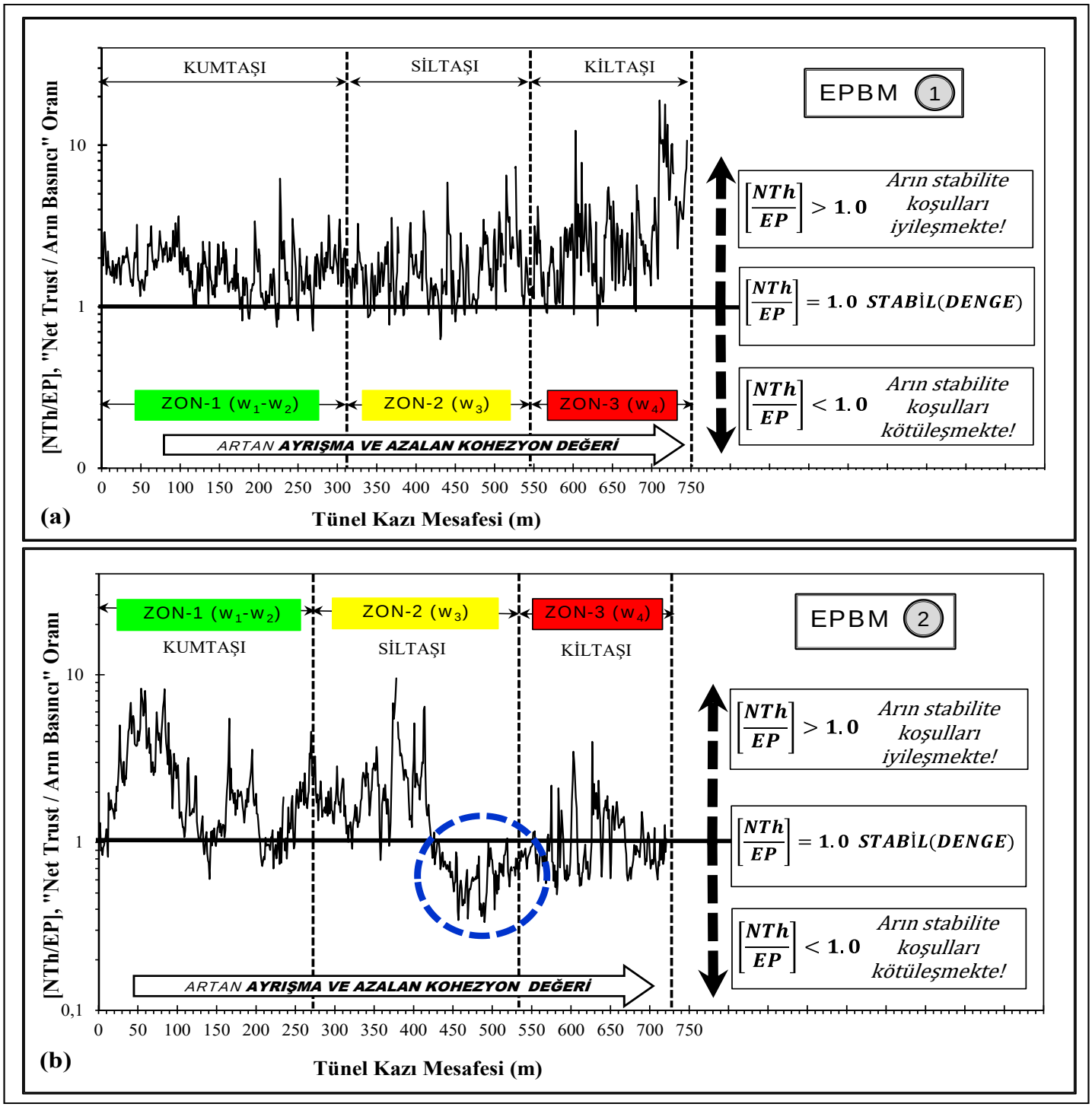




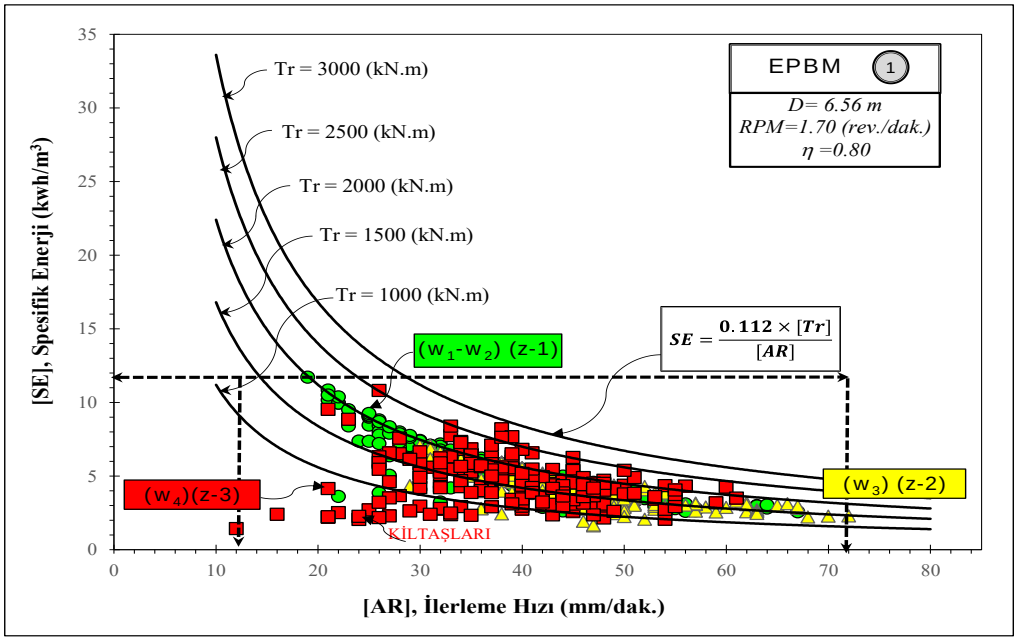
EPBM-2'den ise 5440 kNm tork kapasitesinden daha geniş bir RPM aralığında faydalanabilmektedir. EPBM-1'in hidrolik bir tahrik sistemine, EPBM -2'nin ise elektrikli (VFD) bir tahrik sistemine sahip olması kazı karakterine etki eden bir başka önemli farklılıktır.

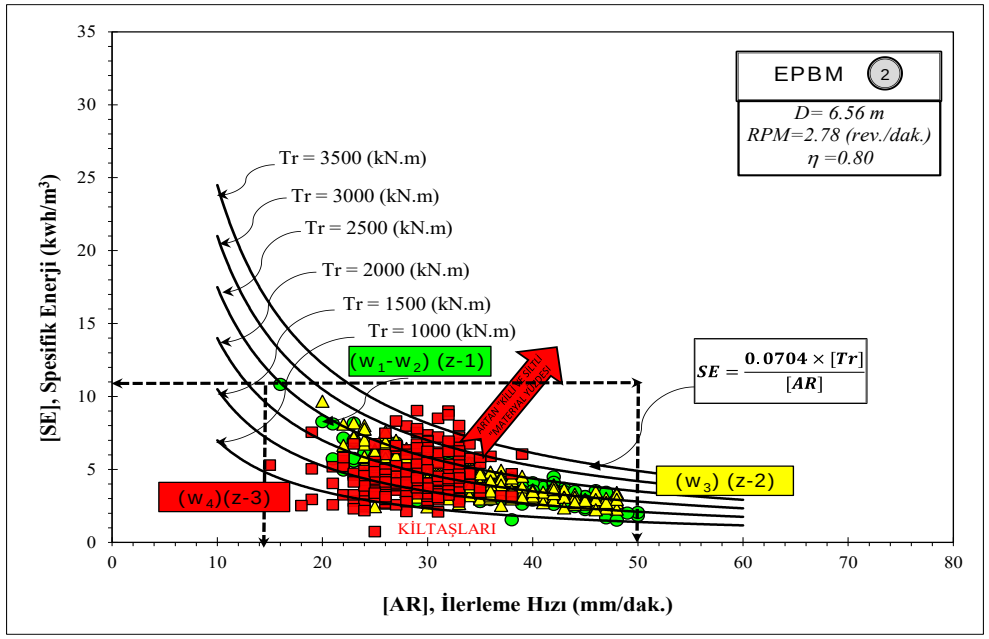
- Kazı ilerleme hızlarında; EPBM-1' de kumtaşında (z-1; w_1-w_2) ortalama AR=38,1 mm/dak, silttaşında (z-2; w_3) ise AR=44.3 mm/dak olarak hesaplanmıştır. EPBM-2'de ise aynı durum kumtaşında 34.8 ve 33.1 mm/dak olarak hesaplanmıştır. Ancak kiltaşlarında (z-3; w_4) kazıya geçildikten sonra, EPBM-1'de AR=40,3 mm/dak, EPBM-2'de AR=28.7 mm/dak ile kendi kazı ilerleme hızları içinde sırasıyla %9 ve %13,5 oranında düşüşler gerçekleşmiştir (Bkz. Çizelge 2).
- Ayrışma/bozunma derecesi kumtaşından (Z-1; w_1-w_2) silttaşına (Z-2; w_3) doğru zonal geçişlerde kazı ilerleme hızı artışları her iki makinada da gözlenirken, orta derecede ayrışmış silttaşından (Z-2;w_3), tamamen ayrışmış kiltaşına geçişlerde ise her iki makinada da azalma dikkat çekicidir (Bkz. Çizelge 2). Bu azalmanın özellikle kiltaşının tamamen ayrışmış/bozunmuş (w_4) olmasına karşılık daha kolay kazılabilirlikle artması beklenirken, tam tersine düşmüştür. FIR değerlerine bakıldığında ise, yine azalan değerler görülmüştür. Bu durum, tamamen ayrışma-bozunma (w_4) sonrası kiltaşlarının açığa çıkan kil boyutu malzemedeki (<2μ) % artışlarla açıklanabilir. Bu durum, artan kil yüzdesinin kazı sırasında kesici kafayı sarmalayarak tork ve ilerleme hızında düşüşlere yol açmış olabilir. Ancak burada FIR değerlerinde de kazı ve ayrışma zonlarına göre düşüş göz önünde bulundurulduğunda, FIR'dan beklenen etki sağlanamadığı için, kesici kafada ayrışmadan beklenen kazı kolaylığı ve dolayısıyla kazı performans artışlarına ulaşılamamıştır. Yukarıdaki değerlendirmeye dahil edilmesi gereken özellikle kiltaşlarında, kilin yapısı, doğal su içerikleri yanında "kıvam limitleri (likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi)" gibi "kil morfolojisine" ilişkin veri olmadığından, daha ayrıntılı ilişkilendirilip, değerlendirilememiştir.
- Bir diğer önemli bulgu ise EPBM-1'in [NTh/EP] oranının 746 m ring kazısı boyunca artan stabilite koşullarında [NTh/EP]>1.0 kazıyı gerçekleştirmiş olmasıdır (Şekil 2 (a)). EPBM-2'de ise aynı büyüklüğün ayrışma zonlarından 420 no'lu ring kazısından sonra (Bkz. (Şekil 2 (b), kesikli mavi renkli daire), orta derecede (w_3) ayrışma/bozunma zonuyla (Z-2) temsil edilen bir ezik zon (fay zonu)'un varlığıdır (Bkz. Jeoteknik kesit, Şekil 1(b)). Tam bu noktada, iki EPBM'in yan yana geçtiği bilinmektedir. Bu iki makinanın birbirine 40-50m mesafeye geldiğinde, olası arın stabilite şartlarının kötüleşmesini ("NTh/EP" <1.0) (yeryüzü çökme riski-tasman, vd) engellemek üzere, belli bir süre (birkaç gün) EPBM-1 durdurulup, EPBM-2'nin ayna basıncı 0.75-1.0 bar kadar yükseltilmiştir. EPBM-2 kazısını tamamladıktan ve EPBM-1 ile birbirlerinden uzaklaşma mesafesi 40-50 m ulaştığında ise EPBM-1 tekrar kazı faaliyetine başlatılmıştır. Böylelikle, iki TBM'de birbirinin etki alanlarından çıkarılmış, diğer bir anlatımla, arın stabilite şartlarının kötüleşmesine izin verilmeden emniyetli kazı şartları sağlanmıştır ("NTh/EP">1.0). Arın stabilite şartının aşırı iyileştirilmesinin, diğer bir anlatımla makinanın thrust değerini arttırma yoluna gidilmesinin, özellikle sığ şartlarda kazı yapılan şehir tünelciliğinde, yeryüzünde kabarmalara yol açabileceği de mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.
- Burada yine önemle hatırlanması gereken bir diğer konu da, EPBM-2'nin kafa açıklık (%37) oranının EPBM-1'den (%20) daha yüksek olmasıdır. Bilindiği üzere, kafa açıklığı arttıkça arın stabilitesinin sağlanması zorlaşmaktadır. Kafa açıklık oranı daha yüksek olan EPBM 2 için tüm EP değerlerinin ortalaması 1,9 bar iken (V=32,6%) kafa açıklık oranı daha düşük olan EPBM-1 için bu değer 1,5 bar (V=29,8%) olarak gözlemlenmiştir. Yüksek açıklık oranı, tork kullanımını ciddi oranda azaltırken (Bkz. Çizelge 2) stabilite kaygısı duyulan ayna koşullarında stabilite kaybı riskini düşürmek için daha yüksek dengeleme basıncı (EP) kullanılmasını gerektirdiği görülmüştür.

• EPBM-1'in spesifik enerji (SE) tüketiminde litolojik geçişlerde, özellikle kumtaşından silttaşına geçişlerde (ayrışma/bozunma) yaklaşık %20'lik bir kazanç sağlandığı görülürken kiltaşına geçişte ise %6,5'luk bir artış gözlenmesi dikkat çekmektedir. EPBM-2'nin kendi içinde ayrışma zonlarına bağlı geçişlerde SE tüketiminin, kumtaşından silttaşına geçişte %4,4'lük artış, silttaşından kiltaşına geçişte ise %7.4'lik bir artış görülmüştür. Buradan, EPBM-2 ayrışma/bozunma zonlarının her üçünde de giderek artan bir enerji tüketimi söz konudur (Bkz. Çizelge 2, Şekil 3(b)). Bu artış özellikle kiltaşlarında artan tork değerlerinde daha da belirginleşmektedir.



Şekil 2. Aynı formasyon ((Trakya, Ct)- değişken litolojide kazı yapan iki farklı EPBM -1 *(a)* ve 2 *(b)*'nin "Net Thrust/Arın Basıncı" "(NTh/EP) oranlarının değişim analizi ve değerlendirmesi





DEĞERLENDİRME NOTLARI:

1. Kazı materyalinin kesme direnci arttıkça kazı için gerekli birim için enerji miktarı (kwh/m^3) artmakta ve makinanın ilerleme hızı düşmektedir. Ayrışmamış/bozunmamış ya da az derecede bozunmuş [Bkz.(w_1-w_2); zon-1] ve gevşememiş olduğu düşünülen bu kazı materyallerinin ise;
   - "*Zayıf çimentolanma ile taşlaşmaya başlamış, yatay tabakalı ve az bozunmuş, gevşek –aşırı konsolide olmuş zayıf tortullar* (kumtaşı, silttaşı veya kil taşı) ($Is_{(50)} \leq 3.30$kg/cm^2)
   - *"Metamorfizma"* geçirmiş (silt taşı şisti veya kil şisti) zayıf tortullar ($Is_{(50)} \leq 1.80$kg/cm^2) olabileceği,
   - Veya materyal gevşeyip, ayrışmış, tamamen bozunmuş ve sonrasında kuruyup, sıkışarak normal konsolidasyona uğramış kil/kiltaşları ($Is_{(50)} \leq 0.70$ kg/cm^2) olabilir.
2. Kazı materyali su alıp, içerdiği smektit türü kil (montmorillonit) şişerek kabarmış, gevşemiş, çözünmüş, tamamen bozunmuş ve kısmen ayrışmış (kimyasal) olabilir (Bkz. w_3-w_4; Zon -2 ve 3). Bu durumda ise kesme direnci yanında, kazı için gerekli enerji miktarı azalmakta ve makine daha hızlı ilerleyebilmektedir. Ancak, özellikle plastisitesi yüksek smektit grubu kil minerallerinin varlığında, kil ve silt gibi bu tür ince taneli (kohezyonlu) materyallerin, kesici kafayı sarmalayarak bloke edip, kazı hızını düşürebileceği burada önemle hatırlanmalıdır (Tokgöz, vd, 2013;Tokgöz, vd, 2015; Tokgöz, 2016; Tokgöz, 2017.).

Şekil 3. Aynı formasyon (Trakya, Ct) - değişken litolojide kazı yapan EPBM -1 *(a)* ve EPBM-2 *(b)*'nin, Spesifik Enerji (SE, kWh/m^3) - İlerleme Hızı (AR, mm/dak) - "Kesici Kafa Torku (Tr, kN.m) bütünleşik veri analizi. *(w_1-w_2=az derecede , w_3=orta derecede, w_4=tamamen bozunmuş/ayrışmış kazı materyali; z-1, 2, ve 3 = Zon-1, Zon-2 ve Zon-3)*

• Trakya formasyonu içinde tamamlanan bu kazı çalışmalarında, ayrışmış/bozunmuş ve az tutturulmuş (taneler arası zayıf çimentolanma) tamamen ayrışmış (w_4) zayıf ve gevşek taşlaşma özelliğini yitirmiş, ancak aşırı konsolide olmuş materyaller olarak değerlendirilebilir. Nitekim, jeomekanik verilerden de artan ayrışma derecesine bağlı olarak nokta yükü dayanım indeksleri ($Is_{(50)}$) ve kohezyon (c) mertebe değişimleri sırasıyla;

- Kumtaşı → $Is_{(50)}$ =3.30 kg/cm^2 → z-1;w_1-w_2
- Silttaşı → $Is_{(50)}$ =1.80 kg/cm^2 → z-2;w_3,
- Kiltaşı → $Is_{(50)}$ =0.70 kg/cm^2 → z-3;w_4,

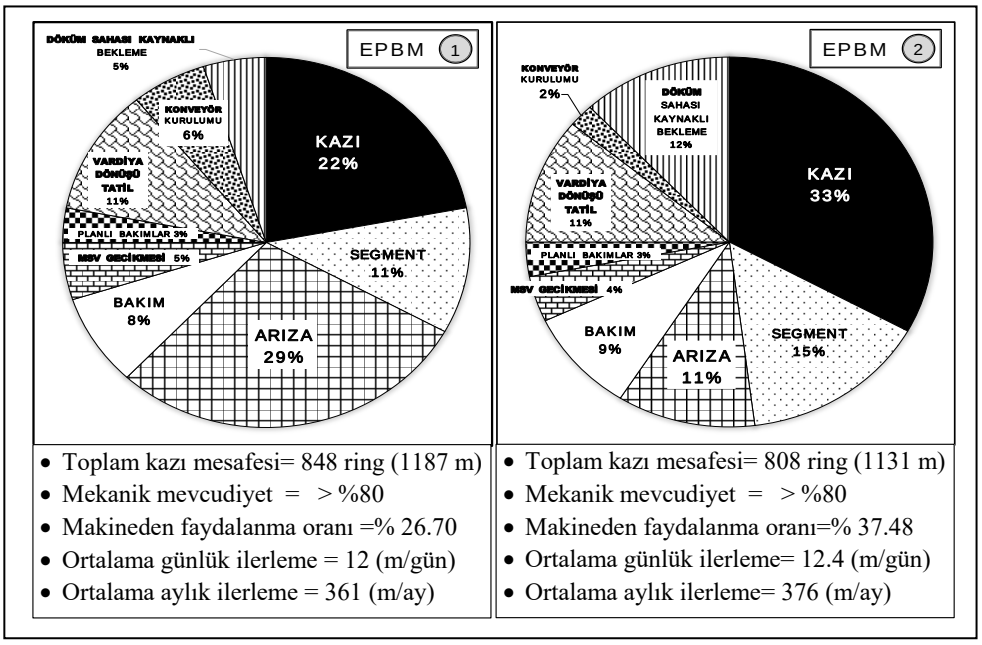
- Kumtaşı → c = 5-110 kPa → z-1;w_1-w_2
- Silttaşı → c = 10-110 kPa → z-2;w_3,
- Kiltaşı → c = 30-50 kPa → z-3;w_4,

olarak belirlenmiştir (Bkz. Şekil 1 (b)). Bu dayanım mertebeleri, yukarıda belirtilen açıklamaları destekleyerek, doğrulamaktadır.

• Bu tür killi ve siltli tortul kazı materyallerinin, doğal su içeriği ne kadar fazla ise o kadar fazla plastik ve yapışkan bir hal alıp akışkan çamur kıvamına geçebildiği gibi, ne kadar kuru ve çimentolanma derecesi (karbonat veya kuvars içeriği, vd.) > 25% ise kesmeye karşı o kadar fazla direnç göstereceği ve bu yüzden geçici dayanım artışlarına rastlanılabileceği unutulmamalıdır (Tokgöz 2016, Tokgöz vd. 2017, Tokgöz 2017).

• EPBM-1'de kazı ilerleme hızlarının 12-72 mm/dak, EPBM-2'de ise 15-50 mm/dak. aralığı arasında değişen değerler aldığı anlaşılmaktadır (Bkz. Şekil 3 (a) ve (b)). Spesifik enerji mertebelerinin ise EPBM-1 için 1.42 – 13.6 kWh/m^3 aralığında, EPBM-2 için ise 1.51 – 12.5 kWh/m^3 aralığında değiştiği gözlenmiştir (Bkz. Şekil 3(a) ve (b)).

• Yukarıdaki değerlendirmelere ek olarak saha üretim raporları da incelenmiş ve Şekil 4'te sunulmuştur. Her iki EPBM'in günlük ortalama kazı ilerleme hızları yaklaşık 12 m/gün'dür. Aylık ortalama ilerleme miktarlarında ise 15 m gibi bir fark bulunmaktadır. EPBM-1 ve EPBM-2 için makineden faydalanma oranları sırasıyla %26,70 ve %37,48 olarak hesaplanmıştır. EPBM-2 daha önce kazı faaliyeti gerçekleştirmeyen (yeni) bir makine olup, diğer bir anlatımla, kullanıma hazır mekanik mevcudiyeti (mechanical availability) > % 85 - 90 olabileceği düşünüldüğünde, hesaplanan %37,48 faydalanma oranıyla beklenildiği gibi standartları karşılayabilir nitelikte bir performans gösterdiği anlaşılmaktadır. EPBM-1'in %26,7'lik EPBM-2' den daha düşük faydalanma oranı, EPBM-1'in 2006 model revize edilmiş/ onarım görmüş (kullanıma hazır mekanik mevcudiyeti iyileştirilmiş < %70-80) daha eski bir makine oluşu ile açıklanabilir.

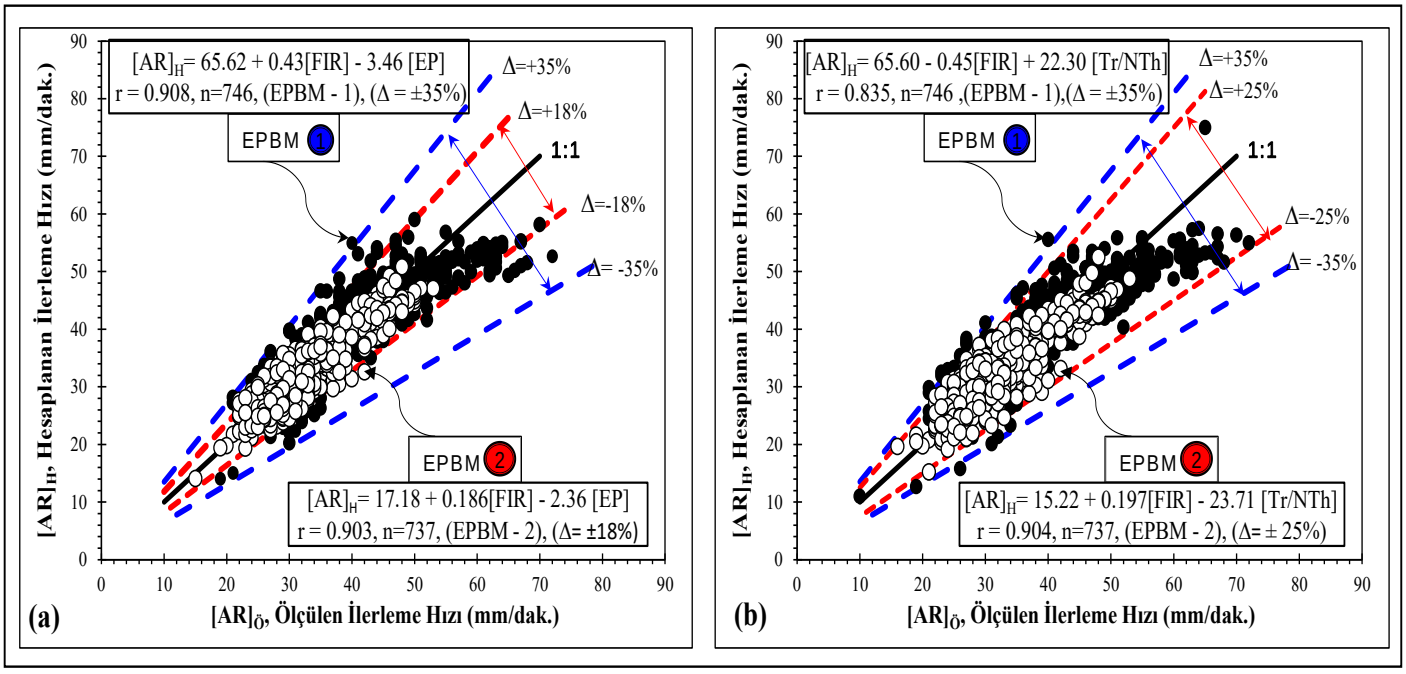


Şekil 4. EPBM -1 ve EPBM-2'nin mekanik mevcudiyet (mechanical availability) ve mekanik verimlilik analizi

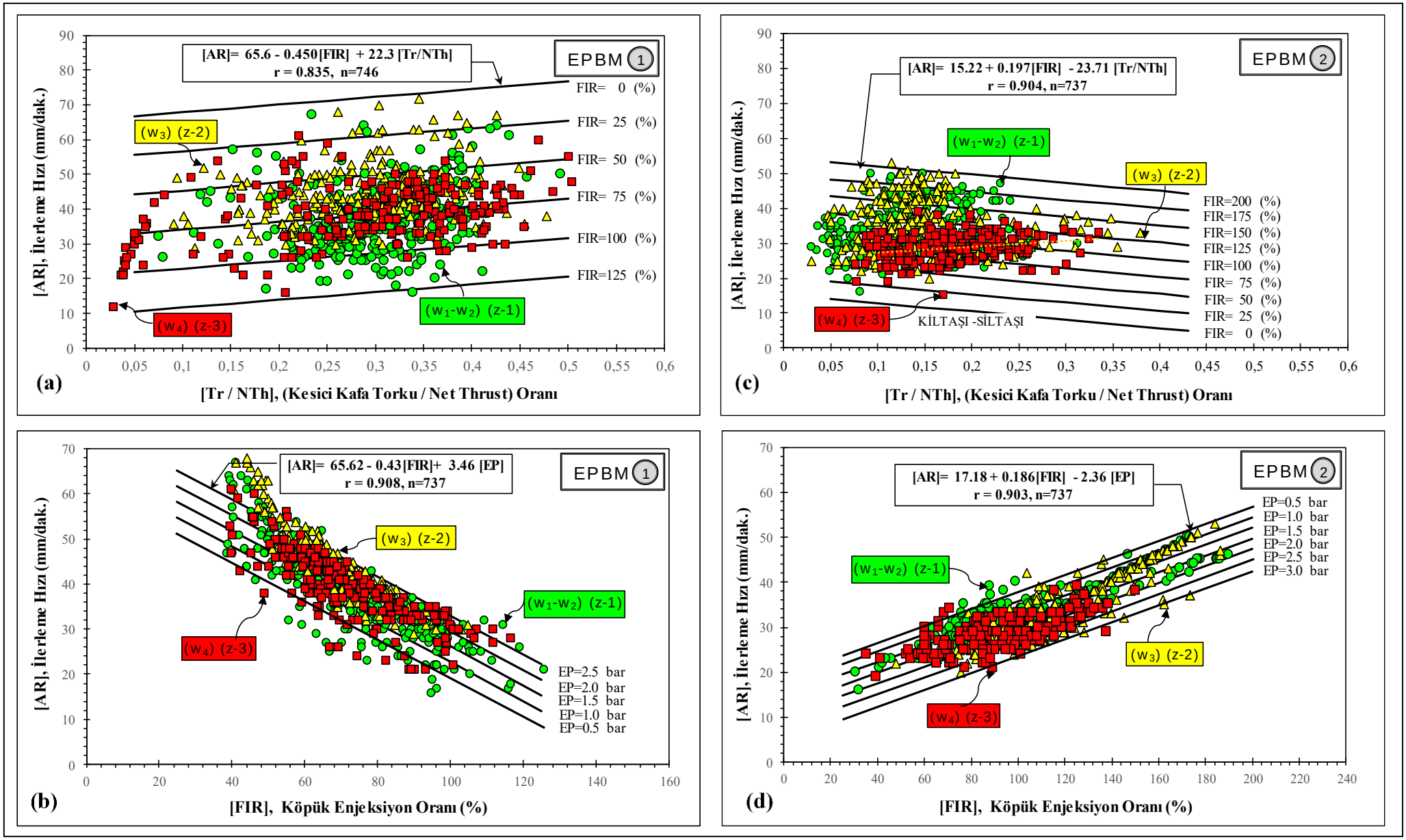
Bu araştırma kapsamında, bütünleşik-sayısal bir modele yönelebilmek üzere, her iki EPBM'in arın dengeleme basıncı (kazı odası basınçları) (EP), "kesici kafa torku/net trust" (Tr/NTh) oranı ile köpük enjeksiyon oranı (FIR) gibi bağımsız değişkenlerin, kazı ilerleme hızı (AR)'nin üzerinde etkilerini belirlemek üzere, çoklu-fonksiyonel kestirim (regresyon) analizleri denenmiştir. Bu denemelerden korelasyon katsayısı r=0.835-0.908 arasında değişen oldukça anlamlı ilişkiler elde edilmiştir (Şekil 5a, b, c ve d). Bu kapsamda elde edilen bulgu ve değerlendirmeler ise aşağıda sunulmuştur:

- EP (bar) ve FIR (%) değerleri, AR (mm/dak) büyüklüğünün kestirimini belirleyen ve denetleyen en önemli iki bağımsız değişken olmuştur (r= 0.903 ve r=0.908) (Bkz. Şekil 5(b) ve (d)). Bu anlamlı ilişki, kazı ilerleme hızı AR'nin, artan FIR (%) değerine karşılık azalan EP (bar) büyüklüğü ile artabileceğine işaret etmektedir. Burada, kullanılan zemin şartlandırma kimyasalları ve FIR yüzdelerinin her iki makinada da farklı olduğu hemen belirtilmelidir.
- Kazı ilerleme hızının kestiriminde denenen bir başka bağıntıda da "Tr/NTh" ve yine FIR bağımsız değişkenleri yer almıştır (Şekil 5 (a) ve (c)). Burada ise korelasyon katsayıları r=0.805 ve r=0.904 olarak hesaplanmıştır. EPBM-2'ye ait olan ve oldukça anlamlı bir fonksiyonel ilişkiye işaret eden (r=0.904) bu bağıntıdan, artan "Tr/NTh" ve FIR değerlerinde kazı ilerleme hızı AR'de artmaktadır (Bkz. Şekil 5(c)). Ancak EPBM-1'de aynı büyüklüklerdeki fonksiyonel ilişkiler farklılaşmakta ve AR büyüklüğü, yine artan Tr/NTh oranlarına karşılık bu kez azalan FIR değerleriyle artmaktadır (Bkz. Şekil 5(a)).

Her iki EPBM için, ölçülen (gerçekleşen) kestirilen kazı ilerleme hızları ($AR_Ö$) ile fonksiyonel kestirim yoluyla hesaplanan kazı ilerleme hızları (AR_H)'nın mertebe yakınsamaları, "1:1 doğru tekniği" ile de ayrıca değerlendirilmiştir (Şekil 6). Bu değerlendirmelerde, AR=*f* (FIR, EP) kestiriminin (bkz. Şekil 6 (a)) Δ=±18 hata bantları içinde kalarak diğer bağımsız değişkenlere bağlı yapılan fonksiyonel kestirime AR = *f* (FIR, Tr/NTh) göre daha yüksek kestirim gücü elde edilmiştir. Bu kestirim, Δ=±25% ve ±35% hata bantları arasında daha az kestirim gücü vermiştir (Bkz. Şekil 6 (b)).



Şekil 5. Aynı formasyon (Trakya, Ct) - değişken litolojide kazı yapan EPBM -1 *(a)* ve EPBM-2 *(b)*'nin, ölçülen (gerçekleşen) kazı ilerleme hızları ($AR_Ö$) ile kestirim yoluyla hesaplanan kazı ilerleme hızları (AR_H)'nın 1:1 doğru tekniği ile analizi



Şekil 6. Aynı formasyon ((Trakya, Ct) - değişken litolojide kazı yapan EPBM -1 *(a ve b)* ve EPBM-2 *(c ve d)*'nin İlerleme Hızlarının (AR), "Kesici Kafa Torku /Net Thrust " Oranı (Tr/NTh), Köpük Enjeksiyon Oranı (FIR) ile Arın Basıncı (EP)" büyüklükleri bazında çoklu regresyon (fonksiyonel kestirim) analizi *(w_1-w_2=az derecede, w_2=orta derecede, w_4=tamamen bozunmuş/ayrışmış kazı materyali; z-1, 2, ve 3= Zon-1, Zon-2 ve Zon-3)*

5 SONUÇLAR

Trakya Formasyonu içindeki değişken litolojik koşullar altında, farklı marka ve teknik özellikteki iki ayrı EPBM'in karşılıklı kazısının performans analizleri bütünüyle değerlendirildiğinde aşağıdaki önemli sonuçlara ulaşılmıştır:

- Zemin şartlandırma kimyasalı olarak her iki EPBM'de de farklı kimyasallar kullanılmıştır. Buna rağmen, her iki makinanın köpük enjeksiyon oranları (FIR), kazı ilerleme hızının kestiriminde bağımsız birer değişken olarak arın basıncı (EP) ile birlikte mutlaka fonksiyonel kestirim (regresyon) analizlerine dahil edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.
- Kazı materyalinin ayrışma/bozunma derecesinin, spesifik enerjiyi (SE, kwh/m^3) belirleyen ve denetleyen önemli bir fiziko-kimyasal büyüklük olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle tamamen ayrışmış (w_4) kiltaşlarında her iki makinanın da kazı ilerleme hızlarındaki belirgin farklılıkların, ayrışmadan dolayı artan <2μ kil ve kil boyutu malzeme yüzdesi ve bunu yeterli dispersif etki ile materyalin başarılı olarak şartlandırılması sonrasında daha büyük kazı ilerleme hızlarına ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.
- Farklı marka ve teknik özellikteki iki EPBM'in kazı performans büyüklüklerinden özellikle spesifik enerjideki mertebe yakınsaklıkları dikkat çekicidir.
- Bu araştırma kapsamında kestirilerek, önerilen ampirik bağıntılar, Trakya Formasyonu (Ct) içinde ayrışma/bozunma derecesi kumtaşından (w_1-w_2), silttaşı (w_3) – kiltaşına (w_4) doğru artan ve çok zayıf çimentolanmış, aşırı konsolide olmuş ardalanmalı kompleks bir litoloji için geçerlidir. Elde edilen bu ampirik bağıntılar ± 18% hata bantları arasında daha iyi kestirim gücüne sahiptir. Ayrışmaya bağlı farklı ve ardalanmalı bu litolojik geçişler, kazı performans büyüklüklerinde dalgalanmalara yol açmakta ve özellikle, kazı ilerleme hızı ile spesifik enerji büyüklüklerinin kestirim gücünü azaltabilmektedir.
- Her iki EPBM'in kesici kafa tork değeri, ilerleme miktarı (mm/dak.), ya da penetrasyon değerinin (mm/rev) ve dolayısıyla spesifik enerji tüketimlerinin ayrı ayrı kestirimlerinde, arın basınçları/kazı odası basınçları (EP, bar) ile köpük enjeksiyon oranlarının (FIR, %), bağımsız bir değişken olarak mutlaka çoklu fonksiyonel kestirim (regresyon) analizlerine dahil edilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Ayrıca, helezon konveyördeki basınçlandırma, tork ve açıklık oranlarının da bu tür kestirim değerlendirmelerinde hesaba katılması gerektiği burada önemle hatırlanmalıdır.

TEŞEKKÜR BİLDİRME

Yazarlar, mesleki ve bilimsel duyarlılıkla bu araştırmaya sağladıkları ham veri desteklerinden dolayı *Gülermak – Kolin – Kalyon Metro Yapım Ortaklığı* Sayın Yetkililerine, teşekkürlerini sunmayı bir görev bilirler.

KAYNAKLAR

Ates, U., Bilgin, N., Copur, H. 2014. Estimating thrust, torque and other design parameters of different type TBMs with some criticism of TBMs used in Turkish Tunnelling Projects. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 20, pp. 46–63.

Avunduk, E., Copur, H. 2018. Empirical modeling for predicting excavation performance of EPB TBM based on soil properties. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.71, pp. 340-353.

Barton, N. 2000. TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. Balkema, Rotterdam.

Bieniawski, Z.T., Celeda, B., Galeras, J.M., Tardaguila, I. 2008. New applications of the excavability index for selection of TBM types and predicting their performance, Proceedings of the World Tunnel Congress. Akra, India, pp. 1618–1629.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. 2016. TBM Excavation in Difficult Ground Conditions Case Studies from Turkey, Wiley Ernst & Sohn, 333 p.

Bilgin, N. 2016. An appraisal of TBM performances in Turkey in difficult ground conditions and some recommendations. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.57, pp. 265-276.

Gong, Q.M., Zhao, J. 2009. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction. International Journal of. Rock Mechanic and Mining Science, 46 (1), pp. 8–18.

González, C., Arroya, M., Gens, A. 2016. Thrust and torque components on mixed-face EPB drives,

Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.57, pp: 47-54.
Polat, F. 2014. Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Hattı, Depo Sahası, Bakım Alanı ve Depo Bağlantı Hatları İnşaat İşleri Jeolojik – Jeoteknik İşler Raporu Yenimahalle – Mahmutbey Arası (Km 15+535 – 22+763), Istanbul.
Polat, F. 2015. Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Hattı, Depo Sahası, Bakım Alanı ve Depo Bağlantı Hatları İnşaat İşleri Jeolojik – Jeoteknik İşler Raporu Yenimahalle – Alibeyköy Deresi Arası (Km 13+780 – 10+540), Istanbul.
Salimi, A., Rostami, J., Moormann, C., Delisio, A. 2015. Application of non-linear regression analysis and artificial intelligence algorithms for performance prediction of hard rock TBMs, Tunnelling and Underground Space Technology 58, pp. 36–246.
Tokgöz, N., Binen, I.S., Kuruyer, V. 2013. An evaluation of fine grained sedimentary soils of waste water tunnels in terms of Geotechnical Parameters Defining and Controlling Excavation Performance, in: Proceedings of the 3rd International Symposium on Underground Excavations for Transportation, 29-30 November 2013., Istanbul, pp:157-173, (in Turkish).
Tokgöz, N., Binen, I.S., Avunduk, E. 2015. An evaluation of fine grained sedimentary materials in terms of geotechnical parameters which define and control excavation performance of EPB TBM's. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.47, pp. 211-221.
Tokgöz, N. 2016. An assessment method for fine-grained sedimentary materials excavated by EPB TBM., Geomechanics and Tunnelling, Vol 9, No. 4, pp: 326-337.
Tokgöz. N., Çinku, K., Özdemir, O. 2017. İnce Taneli Killi Tortul Materyallerin EPB-TBM İle Kazısında Topaklanma, Yapışma ve Tıkanmaya Karşı Risk ve Etki Analizi, TÜBİTAK-1001, Projesi, No: 214M431.
Tokgöz, N. 2017. Integrated parameter analysis and performance prediction of the EPB-TBMs for over-consolidated clays. In: Proceedings of the International Tunneling Symposium in Turkey, Turkish Tunnelling Society (Eds: Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Tumac, D.) 02-03 December, pp. 111-122, Istanbul/Turkey.

Needle Penetration Index Test to Estimate Performance of Transverse Type Roadheaders

S. Kahraman, M. Rostami, E. Saygın
Hacettepe University, Mining Engineering Department, Ankara, Turkey

ABSTRACT Estimating the potential performance of a selected roadheader is important for planning and cost estimation in the excavation projects. In this study the predictability of roadheader performance from the needle penetration test was investigated. The performance measurements of the two transverse type roadheaders were carried out in Eynez Underground Coal Mine. The needle penetration tests were also performed at the gallery faces during performance measurements. The correlations between the net cutting rate (NCR) and the needle penetration index (NPI) values were investigated for each machine. It was seen that increasing the NPI values decreases the NCR values. A multiple regression model was also derived for the prediction of the transverse type roadheaders. Concluding remark is that the derived model is significant and can be practically used for estimation of the NCR of transverse type roadheaders in coal excavations.

1 INTRODUCTION

The mechanical excavation of rocks has been becoming widespread more and more because it is faster and more efficient than the drilling and blasting. High advancing rates, flexibility, safety, and less labour are the main advantages of mechanical excavation compared to classical excavation. It also reduces the support costs by minimizing overbreak and ground disturbance. Roadheaders have been commonly used for the excavation of rocks in tunnelling and mine developments since about 1960s. The prediction of the potential performance of a selected roadheader is very useful for planning and cost estimation in rock engineering projects.

Several models have been suggested by different researchers for the performance prediction of roadheaders (Table 1). However, these models generally include direct testing methods, which are difficult to carry out. In this study, the evaluation of the performance prediction of roadheaders was carried out using the needle penetration index test, which is a simple and practical test, and can be applied in the field.

2 NEEDLE PENETRATION TEST

The needle penetration testing device was initially manufactured for estimating the compressive strength of soft and very soft rocks. Several researchers have used the needle penetration index (NPI) to estimate the uniaxial compressive strength of rocks (Yamaguchi et al. 1997, Aydan et al. 2008, Erguler and Ulusay 2007, Park et al. 2011, Ulusay and Erguler 2012, Aydan 2012). A few scientists have also studied the correlations between the NPI and other rock parameters such as tensile strength, elastic modulus, seismic velocities, cohesion, and internal friction angle (Aydan 2012, Aydan and Ulusay 2013, Aydan et al. 2014).

Table 1. Previous performance prediction models for roadheaders

Model number	Model	Reference	Remarks
1	$NCR = k\frac{P}{SE}$	Rostami et al. (1994)	---
2	$NCR = \frac{719}{\sigma_c^{0.78}}$	Gehring (1989)	250 kW transverse type cutterhead
3	$NCR = \frac{1739}{\sigma_c^{1.13}}$	Gehring (1989)	230 kW axial type cutterhead
4	$\mathrm{NCR} = 0.28\mathrm{P}(0.974)^{\mathrm{RMCI}}$ $RMCI = \sigma_c\left(\frac{RQD}{100}\right)^{2/3}$	Bilgin et al. (1990)	Axial type cutterhead
5	$NCR = 27.511e^{0.0023RPI}$ $RPI = \frac{PW}{\sigma_c}$	Copur et al. (1998)	Transverse type cutterhead, for evaporitic rocks
6	$NCR = 75.7 - 14.3ln\sigma_c$	Thuro and Plinninger (1999)	132 kW transverse type cutterhead
7	$NCR = 109.25\sigma_c^{-0.72}$ $NCR = 81.21SH^{-0.78}$	Tumac et al. (2007)	90 kW axial type cutterhead
8	$NCR = 510588\sigma_c^{-2.1779}$	Ocak and Bilgin (2010)	300 kW transverse type cutterhead
9	$RMBI = e^{\left(\sigma_c/\sigma_t\right)}x\left(\frac{RQD}{100}\right)^3$ $\mathrm{NCR} = 30.75\mathrm{RMBI}^{0.23}$	Ebrahimabadi et al. (2011)	82 kW axial type cutterhead
10	$\mathrm{NCR} = 1.79\sigma_c + 0.501\alpha + 0.636\mathrm{RQD} - 4.839\sigma_t - 22.127$	Abdolreza and Yakhchali (2013)	82 kW axial type cutterhead
11	$NCR = -2.92I_s - 0.79A_w + 22.95$	Kahraman and Kahraman (2016)	112 kW axial type cutterhead

Nomenclature: NCR is the net cutting rate (m^3/h), P is the cutting head power (kW), k is the energy transfer ratio, SE is the specific energy (kWh/m^3), σ_c is the uniaxial compressive strength (MPa), σ_t is the Brazilian tensile strength (MPa), RQD is the rock quality designation (%), RPI is the roadheader penetration index (kWxton/MPa), W is the roadheader weight (ton), SH is the Shore hardness, RMBI is the rock mass brittleness index, α is angle between tunnel axis and the planes of weakness, I_s point load index (MPa), and A_w is water absorption ratio (%).

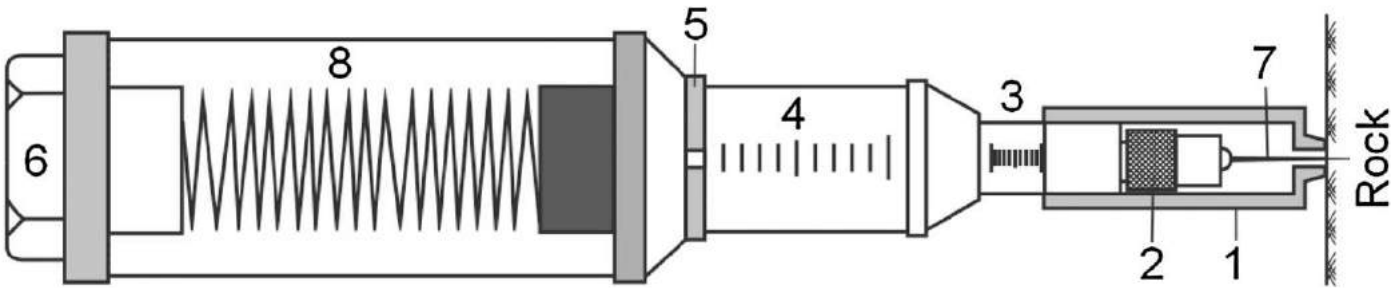


Figure 1. Needle penetrometer: 1-presser, 2-chuck, 3- scale for penetration, 4- scale for load, 5-load indicator, 6-cap, 7-needle, and 8-spring (Ulusay et al., 2014)

In the needle penetration test, the needle of the penetrometer (Fig. 1) is penetrated into the specimen or rock surface up to 100 N is achieved and the depth of penetration is read from the position of the presser on the penetration scale. The maximum depth of penetration (10 mm) may be obtained for softer and saturated rocks before the maximum penetration force is reached. Under the circumstances, the test is terminated at this depth, the penetration load is read from the load scale, and the needle penetration index (NPI) is calculated from the following equations (Ulusay et al., 2014):

$$NPI = F/D \quad (1)$$

where NPI is the needle penetration index (N/mm), F is the applied force (N), and D is the penetration depth (mm).

3 FIELD STUDIES

The study was carried out in the Soma Eynez East Lignite Mine located in Soma county of Manisa city, in the west of Turkey. The performances of two transverse type roadheaders were measured when operating in coal excavations. The machines have a cutterhead powers of 100 kW and 150 kW, respectively.

The net cutting times of the machines were recorded at 7 different points during roadway excavation. The volume of the excavated muck was calculated from the cross-sectional area of the opening and the advancing distance for each location. Then, the volumes of the mucks were divided by the cutting times and the NCR were obtained as m^3/h (Table 2). Before the excavation of each round, the needle penetration tests were performed ten times at the gallery faces (Fig. 2). After calculating the NPI values, the results were averaged (Table 2).

Figure 2. Needle penetration test at coal face

4 RESULTS AND EVALUATION

The correlations between the NCR and NPI values were investigated for each machine. It was seen that the NCR values decreses with the increasing NPI values (Fig. 3). It was also seen that the NCR value of the machine having high power was higher than that of the machine having low power.

Because the data set is small for each machine, the simple regression analysis was not carried out. The multiple regression analysis was carried out to develop a performance prediction model. The model and the correlation coefficient (r) are as follows:

$$NCR = 0.102P - 0.56NPI + 35.59 \quad (2)$$

$$r = 0.98$$

Table 2. Net cutting rate and needle penetration index values

Observation location	Cutting head power (kW)	Net cutting rate (m^3/h)	Needle penetration index (N/mm)
Roadway 1110	150	30.8	35
Roadway 1110	150	25.4	41
Roadway 1110	150	28.1	40
Roadway 5109	100	16.5	52
Roadway 5109	100	19.6	43
Roadway 5111	100	24.8	37
Roadway 5111	100	20.3	42

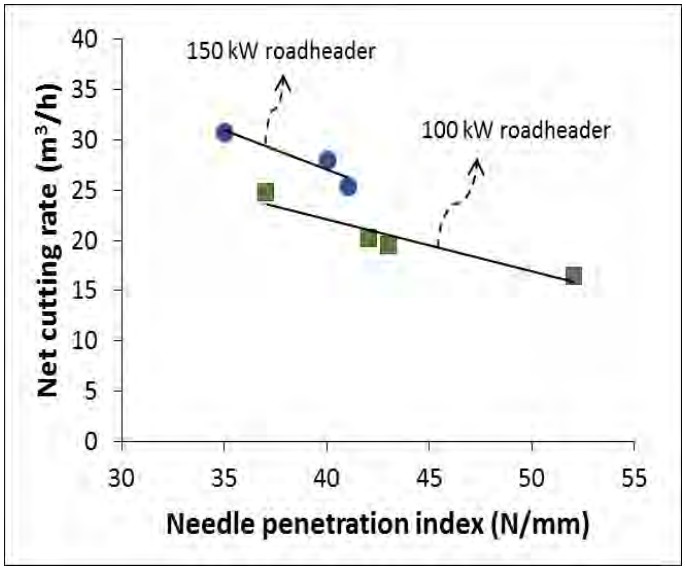


Figure 3. Correlation between net cutting rate and the needle penetration index

where NCR is the net cutting rate (m^3/h), P is the cutterhead power (kW), and NPI is the needle penetration index (N/mm).

Validation of the Eq. (2) was checked by the t-test and the F-test. The significance of r values can be determined by the t-test, assuming that both variables are normally distributed and the observations are chosen randomly. The test compares computed t-value with tabulated t-value using the null hypothesis. In this test, a 95% level of confidence was chosen. If the computed t-value is greater than tabulated t-value, the null hypothesis is rejected. This means that r is significant. If the computed t-value is less than tabulated t-value, the null hypothesis is not rejected. In this case, r is not significant. As seen in Table 3, the computed t-value is greater than tabulated t-value for the Eq. (2). Therefore, it can be said that the equation is valid according to the t-test.

The significance of regressions was determined by the analysis of variance. In this test, a 95% level of confidence was chosen. If the computed F-value is greater than tabulated F-value, the null hypothesis is rejected that there is a real relation between the dependent and independent variables. Since the computed F-values are greater than the tabulated F-values for the Eq. (2), the null hypothesis is rejected (Table 3). Therefore, it is concluded that this equation is valid according to the F -test.

Table 3. Results of *t*- and *F*-tests

Eq. no	Tabulated *t*-value	*t*-value	Tabulated *F*-ratio	*F*-ratio
2	± 2.57	-5.64	6.60	47.35

5 CONCLUSIONS

Usability of the needle penetration test was investigated for performance prediction of transverse type roadheaders. A performance prediction model was developed by multiple regression analysis. The statistical analysis showed that the derived model was strong and significant.

It is concluded that the needle penetration test can be practically used for performance prediciton of transverse type roadheaders for coal excavations. However, this is a preliminary study and the number of data set is few. Therefore, further study is required to check the validity of the derived equation for different cases.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank to Demir Export A.Ş. for allowing field studies.

REFERENCES

Abdolreza, Y.C., Yakhchali, S.H. 2013. A new model to predict roadheader performance using rock mass properties, *J. Coal Sci. & Eng*., 19 (1), 51-56.

Aydan, O. 2012. The inference of physico-mechanical properties of soft rocks and the evaluation of the effect of water content and weathering on their mechanical properties from needle penetration tests, *Symposium of ARMA*, Chicago, Paper No. ARMA12- 639 (on CD).

Aydan, O., Ulusay, R. 2013. Geomechanical evaluation of Derinkuyu antique underground city and its implications in geoengineering. *Rock Mech. Rock Eng.,* 46, 731–754.

Aydan, O., Watanabe. S., Tokashiki, N. 2008. The inference of mechanical properties of rocks from penetration tests, *Proc. 5th Asian Rock Mech. Symp. (ARMS5),* Tehran-Iran, vol 1, pp. 213–220.

Aydan, O., Sato. A, Yagi, M. 2014. The inference of geo-mechanical properties of soft rocks and their degradation from needle penetration tests, *Rock Mech. Rock Eng,.* 47,1867–1890.

Bilgin, N., Seyrek, T., Erdinc, E., Shahriar, K. 1990. Roadheaders clean valuable tips for Istanbul Metro. *Tunnels Tunnell*., 22, 29–32.

Copur, H., Ozdemir, L., Rostami, J. 1998. Roadheader Applications in Mining and Tunneling Industries, *Annual Meeting of American Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME),* Orlando, Florida, March 10-12, Preprint Number: 98-185.

Ebrahimabadi, A., Goshtasbi, K., Shahriar, K., CheraghiSeifabad, M. 2011. A model to predict the performance of roadheadersbased on rock mass brittleness index, *J. South Afr. Inst. Min. Metall.,* 111, 355-364.

Erguler, Z.A., Ulusay, R. 2007. Estimation of uniaxial compressive strength of clay-bearing weak rocks using needle penetration response, *Proc. 11th Congr. Int. Soc. Rock Mechanics*, Lisbon, vol 1, pp. 265–268.

Gehring, K.H. 1989. A cutting comparison. *Tunnels Tunnell*, 21, 27–30.

Kahraman, E., Kahraman, S. 2016. The performance prediction of roadheaders from easy testing methods, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75, 1585-1596.

Ocak, I., Bilgin, N. 2010. Comparative studies on the performance of a roadheader, impact hammer and drilling and blasting method in the excavation of metro station tunnels in Istanbul, *Tunn. Undergr. Sp. Tech*., 25, 181–187.

Park, Y., Obara, Y., Kan, S.S. 2011. Estimation of uniaxial compressive strength of weak rocks using needle penetrometer, *Proc. 12th ISRM Int. Congr. Rock Mech.*, Beijing, pp. 795–798.

Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D.M. 1994. Performance prediction: A key issue in mechanical hard rock mining, *Mining Engineering*, 11, 1263-1267.

Thuro, K., Plinninger, R.J. 1999. Roadheader excavation performance - geological and geotechnical influences, *The 9th ISRM Congress*, Paris, pp. 1241–1244.

Tumac, D., Bilgin, N., Feridunoglu, C., Ergin, H. 2007. Estimation of rock cuttability from shore hardness and compressive strength properties. *Rock Mech. Rock Eng*., 40 (5), 477–490.

Ulusay, R., Erguler, Z.A. 2012. Needle penetration test: evaluation of its performance and possible uses in predicting strength of weak and soft rocks, *Eng. Geol*., 149–150, 47–56.

Yamaguchi, Y., Ogawa, N., Kawasaki, M., Nakamura, A. 1997. Evaluation of seepage failure response potential of dam foundation with simplified tests, *J. Jpn. Soc. Eng. Geol*. 38(3), 130–144.

Amasra Taşkömürü Havzası'nda Kullanılan Kollu Galeri Açma Makinesi Performansının Schmidt Çekiciyle Değerlendirilmesi

Assessment of Performance of Roadheader used in Amasra Hardcoal Basin by Schmidt Hammer

M. Akkaş
Hattat Enerji ve Maden Tic. A.Ş., Amasra Taşkömürü İşletmesi, Amasra, Bartın

O. Su
Bülent Ecevit Üniversitesi, ZMYO, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Zonguldak

S.S. Şenkal
Hattat Enerji ve Maden Tic. A.Ş., Amasra Taşkömürü İşletmesi, Amasra, Bartın

ÖZET Bu çalışmada, yeraltı galerileri ve tünellerinin açılmasında büyük öneme sahip kollu galeri açma makinasının kazı aynasında yapılan Schmidt çekici değerlerine göre performans değerlendirilmesi irdelenmiştir. Bu amaçla; Amasra taşkömür havzasında çalışan galeri açma makinasının ilerleme hızı ve net kazı hızı değerleri belirli bir mesafe boyunca kayıt altına alınmış ve bu değerlerden spesifik enerji hesaplanmıştır. Makinanın kömür, silttaşı ve kumtaşı formasyonlarını kazısı sırasındaki performansı ile Schmidt çekici değerleri arasındaki ilişkisi incelenmiştir. Tahkimatın makine performansına etkisi vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, arazide kayıt edilen ilerleme hızı değerlerinin laboratuvar deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu, makinanın formasyona uygun olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, arazide yapılan Schmidt çekici deneyi ile makine performansının tahmin edilebilir olduğu ortaya konmuştur.

ABSTRACT In this study, evaluation of a roadheader performance, which are very significant for driving underground roadways and tunnels, is examined based on the Schmidt hammer test results obtained from excavation faces. In this context, rate of advance and instantaneous cutting rate of a machine driven at the Amasra hard coal basin was recorded for a certaın distance and the specific energy was calculated based on the recorded values. The relationships between the machine performance and Schmidt hammer values were investigated when coal, siltstone, and sandstone rocks are excavated. The effect of support on the machine performance was examined.

As a result, it was determined that the recoded values of cutting rate and advance rate obtained from field were compatible with the laboratory test results, which indicated that the machine was selected properly according to the rock formation. In addition, the performance of the machine would be predicted successfully by Schmidt hammer test.

1 GİRİŞ

Yeraltı kömür madenciliğinde hazırlık çalışmaları kapsamında farklı kesitlerde galeriler ve rekup lağımları açılmaktadır. Üretime (faaliyete) bir an önce geçebilmek için bu galerilerin en kısa zamanda, güvenli ve ekonomik olarak açılması hedeflenir. Ancak kayaç yapısı, jeolojik ve hidrojeolojik koşullar gerek kazı yöntemini ve gerekse de ilerleme hızlarını etkiler.

Mekanize yöntemlerle kazı üretim hızını arttırır ve uzun vadede çok yüksek randımanlar elde edilebilir. Yüksek üretimin verimli bir şekilde gerçekleşmesi için

yeraltında başta kazı olmak üzere, nakliyat ve tahkimatta kullanılan tüm ekipmanların kesintisiz çalışmalarının sağlanması gerekir. Ayrıca, açılan galerinin duraylılığı delme patlatma yöntemine göre daha iyidir. Ancak ilk yatırım maliyetleri yüksektir.

Kayaçların sertlik, dayanım ve aşındırıcılık özellikleri makine performansını tahmin edilmesinde oldukça önemlidir. Bu özellikler mekanize kazı makinelerinde kullanılan keski ve kesici kafanın ömrünü belirlemektedir. Bu nedenle makine performansının optimize edilmesi için kesici kafanın formasyonun özelliklerine uygun bir şekilde tasarlanması ve kesme parametrelerinin doğru seçilmesi gereklidir. Bu sayede ilerleme hızları artar ve spesifik enerji düşer.

Sertlik belirleme yöntemlerinden bir tanesi olan Schmidt çekici, kayacın yerindeki basınç dayanımını tahmin etmek; bozunma durumu, tavan kontrolü, kayanın süreksizliklerini belirlemek; kollu galeri açma makineleri ve TBM performansı tahmin etmek, delici makine delme hızını belirlemek; kaya sökülebilirliğinin tahmini gibi çeşitli amaçlara yönelik kaya kazısı açısından bir sınıflama parametresi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise arazide galeri açma makine performansının tahmin edilebilirliğinde kullanılmıştır.

Schmidt çekici ile makine performans tahmini bazı araştırmacılar açısından ilgi çekici olmuştur. Bilgin vd. (2002) metro tünellerinin açılmasında kullanılan darbeli kırıcıların kayacın RQD değerine bağlı olarak Schmidt çekici verilerinden performans tahminleri yapılabileceğini göstermişlerdir. Kahraman vd. (2004) 13 farklı karbonatlı kayacın geniş çaplı dairesel testere ile kesilebilirliğini ve üretim hızını eğrisel regresyon analiziyle geliştirdikleri modellerden güvenilir bir şekilde tahmin edilebildiğini belirlemişlerdir. Göktan ve Güneş (2005) Schmidt çekici deney yöntemleriyle kazı makinası performans tahminine yönelik bir çalışma yapmış ve 90 kW gücündeki bir galeri açma makinasının net kazı hızının tahmin edilebilirliğine yönelik regresyon analizleri ortaya koymuştur. Çopur (2010) mermer ocaklarında kullanılan zincirli kollu testere makinalarının performans tahmininde Schmidt çekici değerlerinden faydalanmıştır. Yurdakul ve Akdaş (2012) doğal taş kesmede kullanılan geniş çaplı dairesel testereleri için spesifik enerji tahmin edebilmek üzere Schmidt çekici ve kayacın diğer fiziko-mekanik özelliklerinden yararlanarak istatistiksel bir model geliştirmişlerdir. Çomaklı vd. (2014) 38 mm ve 70 mm çaplarındaki karot örnekleri üzerinde yürüttüğü Schmidt çekici deney sonuçları ve kayacın diğer fiziko-mekanik özelliklerinden yararlanarak spesifik enerji tahmin modeli geliştirmişler ve bu modeli galeri açma makinasının performans tahmininde uygulanabilirliğini tartışmışlardır. Tumac (2015) büyük çaplı dairesel testerelerin performansının karbonatlı kayaçlarda tahmin edilmesinde kullanmıştır. Tumac ve Tolouei (2017) laboratuvarda hazırladığı karot örnekler üzerinde N tipi Schmidt çekiciyle yaptığı deney sonuçlarını mermer fabrikalarında kullanılan büyük çaplı dairesel testerelerin net kesim hızı ile ilişkilendirmişlerdir.

Bugüne kadar yapılmış olan tüm bu çalışmalar laboratuvarda alınan karot örnekleri üzerinde yürütülen Schmidt çekici deneylerinden elde edilmiştir. Ancak, arazide yerinde yapılan Schmidt çekici deney sonuçları ile makine performansının tahmin edilmesi ile ilgili yapılmış çalışma sayısı çok çok azdır. Bu bağlamda Amasra'da bir kömür madeninde kullanılan galeri açma makinesinin performansının tahmin edilmesine yönelik bir çalışma yürütülmüştür.

2 PERFORMANS TAHMİNİ

Galeri açma makinaları ve diğer birçok kazı makinasının performans tahmini uzun yıllardır araştırmacıların en çok ilgisini çektiği hususlardan birisi olmuştur. Çünkü makine satın alımı için yapılan ilk yatırımın kısa sürede kendini amorti etmesi, makine performansının ve hatta makinadan faydalanma oranının yüksek olmasına bağlıdır. Bu amaçla doğru makine seçiminin yapılabilmesi için, kayaç yapısına ve makine türüne bağlı geliştirilmiş birçok ampirik bağıntı vardır. Bunlar temelde kayacın mekanik özelliklerine bağlı olarak arazide

elde edilen ilerleme hızlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi sonucunda geliştirilmiştir. Bu bağıntılardan en yaygın kullanılanı Eşitlik 1'de Bilgin vd. (1988) tarafından önerilenidir.

$$ICR = 0{,}28\ P\ 0{,}974^{RMCI} \quad (1)$$

Burada; ICR net kazı hızı (m^3/h), P kesici kafa gücü (kW), RMCI kayaç kütle kazılabilirlik indeksi (MPa)'dır.

Diğer taraftan laboratuvar ortamında yürütülen bire-bir ölçekli ve küçük boyutlu kayaç kesme setlerinde yapılan kazılabilirlik deneyinden çeşitli kazı makinalarının performansı tahmin edilmektedir. Bu nedenle kesme deney setleri artık birçok araştırma merkezi ve laboratuvarda kullanılır hale gelmektedir. Bu deneyde keski üzerinde rol oynayan ortalama kesme kuvvetleri değerlendirilerek Eşitlik2'den spesifik enerji değerleri ve Eşitlik 3'den de net kazı hızı hesaplanabilmektedir.

$$SE = \frac{FC}{Q} \quad (2)$$

$$ICR = k\ \frac{P}{SE} \quad (3)$$

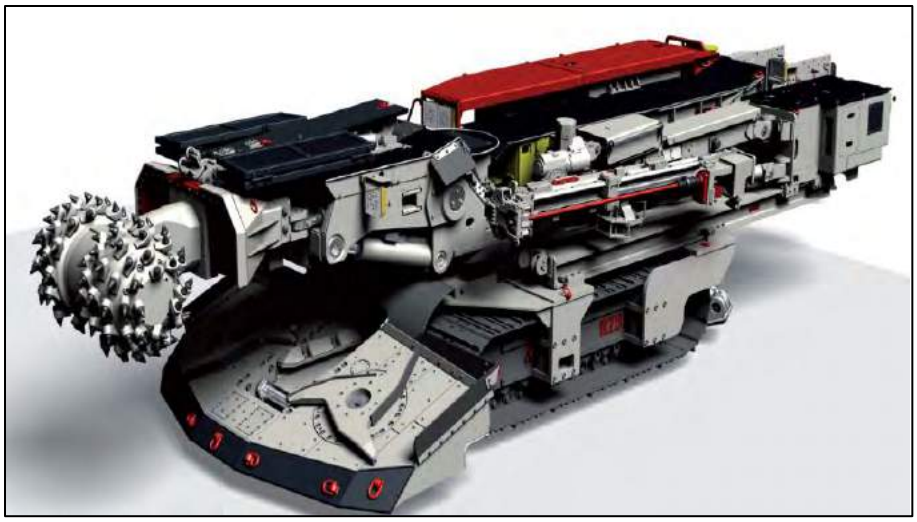
Burada; SE Spesifik enerji (MJ/m^3 - kWh/m^3), FC otalama kesme kuvveti (kN), Q kesme sonrası ortaya çıkan pasa miktarı (m^3/km), ICR net kazı hızı(m^3/h), k enerji transfer oranı katsayısı.

Kesme setlerinin maliyetlerinin yüksek olması, numune taşıma ve hazırlamada yaşanan zorluklar nedeniyle bilgisayar ortamında oluşturulan sayısal modeller ile kazı makinası performansının tahmin edilmesi de son yıllarda araştırmacıların odaklandığı konular haline gelmiştir. Bu konudaki gelişmeler halen sürmektedir.

3 ARAZİ ÇALIŞMALARI

Amasra taşkömürü havzasında Hattat Enerji ve Maden Ticaret A.Ş. tarafından tam mekanize olarak planlanan yeraltı taşkömürü işletmesinde ana kat galerileri ve üretim panolarının tabanyolu hazırlıkları için kollu galeri açma makineleri kullanılmaktadır. Bu bağlamda üç adet Deilmann-Haniel marka travers tip kollu galeri açma makinesi satın alınmıştır. Bunlardan bir tanesi DH R60T ve diğer ikisi de DH R75T'dir.Gerek Amasra ve gerekse de Zonguldak taşkömür havzalarında galeri açma makinalarının kullanımına yönelik yapılan bu yatırımlar, havza tarihinde bu makinalarla kazıda bazı zincirlerin kırılmasına sebep olmuş ve bu sayede mekanize kazıda çok önemli gelişmeler sağlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, EC300 damarında üretim yapmak için DH R75T galeri açma makinasının 270 m boyunca açılan üst taban yolundaki performansı incelenmiştir. Makinenin genel görünümü Şekil 1'de, teknik özellikleri de Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. DH R75T galeri açma makinesinin genel görünümü

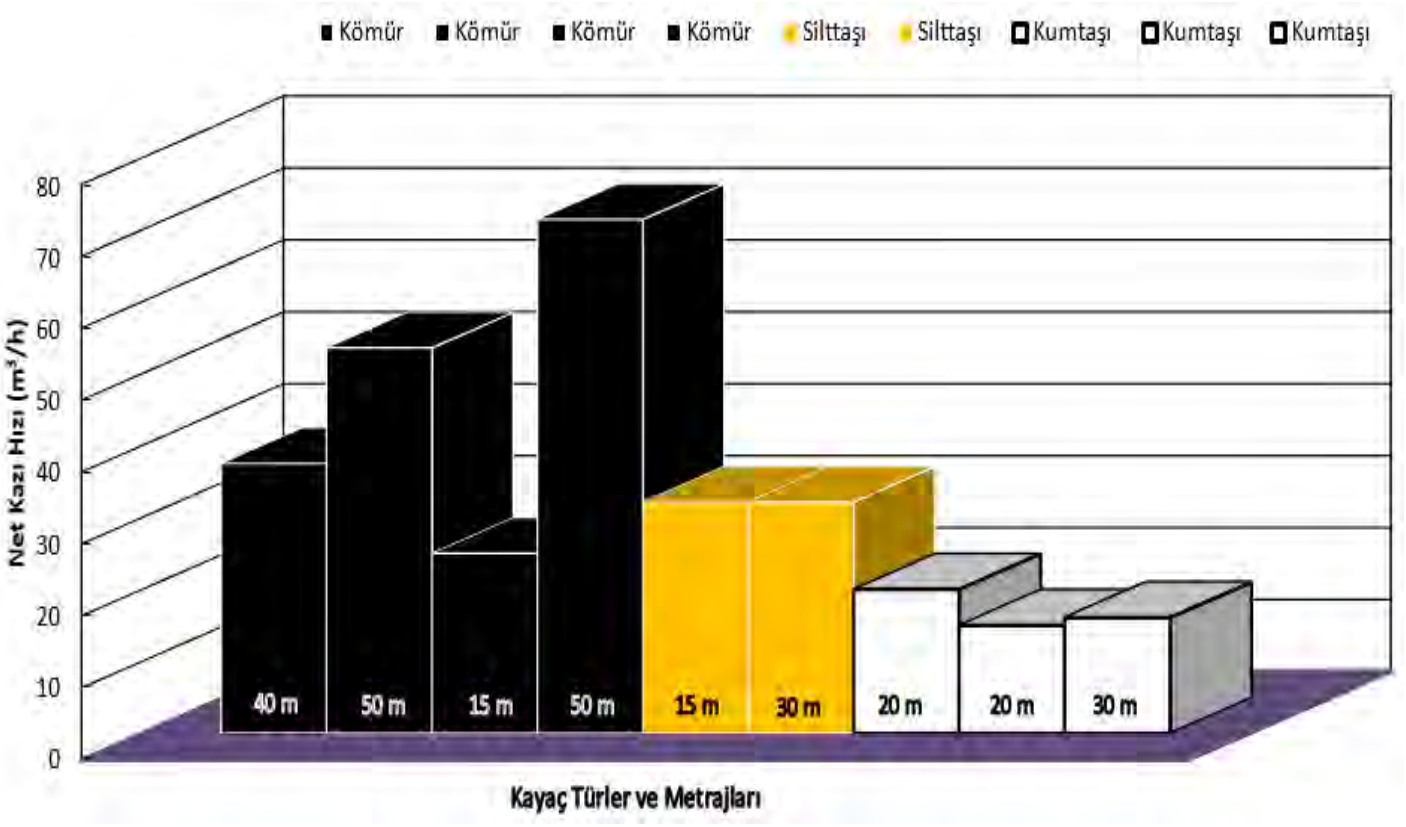
Çizelge 1. DH R75T galeri açma makinesinin teknik özellikleri

Özellik	Değer
Makine ağırlığı	79 ton
Kazı kesiti	14 - 38 m²
Maks. kesebileceği dayanım	120 MPa
Kesici kafa tipi	Travers
Çalışma eğimi	Enine: ±8° Boyuna: ±18°
Kesici kafa gücü	200 kW (AC)
Toplam güç	355 kW
Kesici kafa devri	52,4 dev/dk
Kesici kafa kesme hızı	3,1 m/s
Keski sayısı	2 x 55 =110 adet
Kesici kafa çapı	1,14 m

Kollu galeri açma makinasıyla 155 m kömür, 45 m silttaşı ve 70 m de kumtaşı kayaçlarında kazı yapılmıştır. Ancak bu ilerlemeler formasyonun değişkenliğinden dolayı farklı metrajlarda olmuştur. Tabanyolları B24 kesitte açılmıştır.

Kazı yapılan kömür ve çevre kayaçlarda (silttaşı, kumtaşı) ilerlemeler sırasında metrajlara bağlı olarak arında L tipi Schmidt çekici ile sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, kazı sırasındaki net kazı hızı kayıt altına alınmıştır(Şek. 2).

Bununla birlikte formasyona bağlı olarak makina kesici kafasının tükettiği akım değerleri ölçülmüş ve buradan harcadığı güç hesaplanmıştır. Bu veriler ışığında arazideki spesifik enerji değerleri Eşitlik 3'e göre belirlenmiştir.

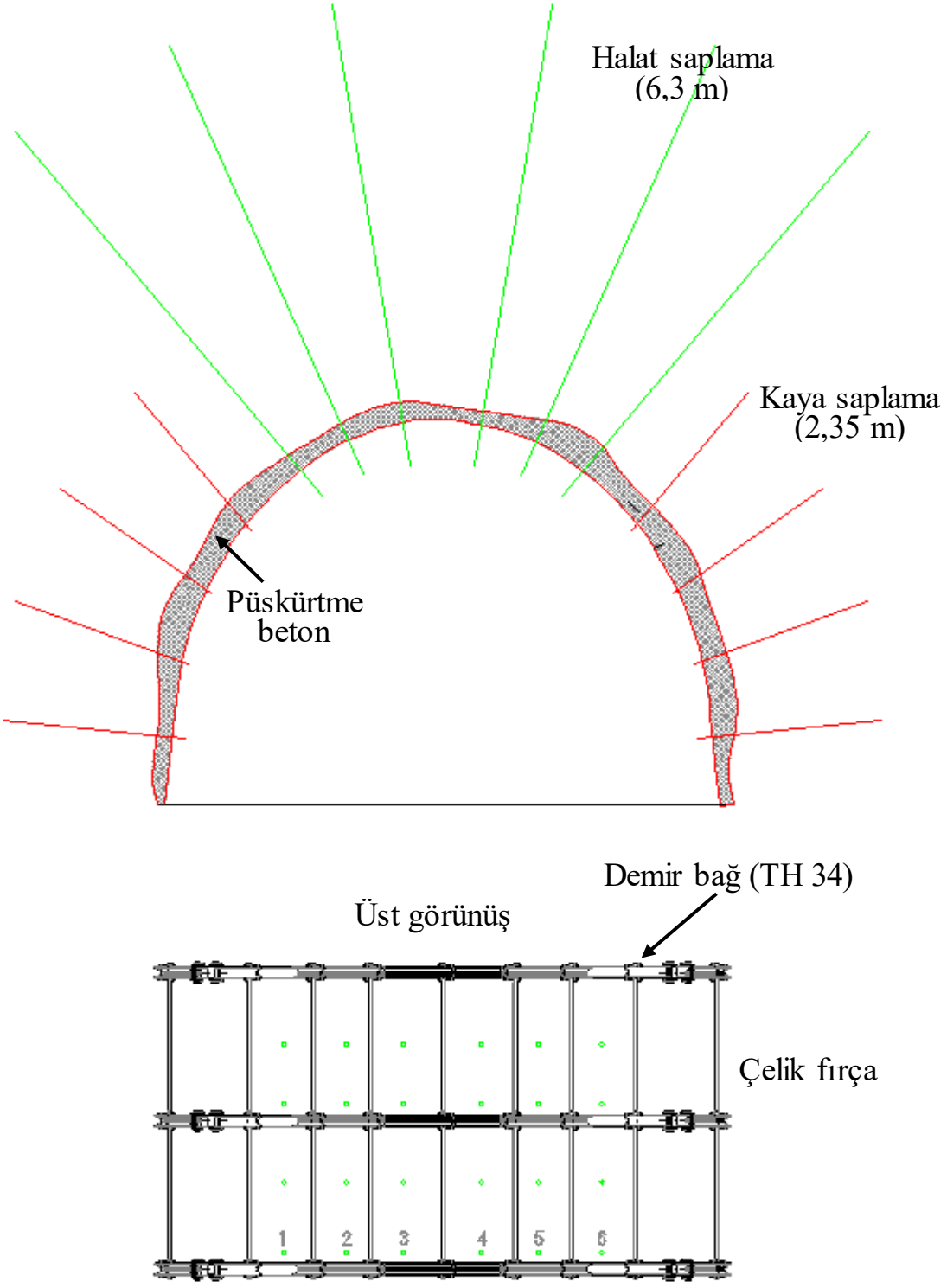


Şekil 2. Kayaç türlerine göre elde edilen net kazı hızları

4 TAHKİMATIN KAZI HIZINA ETKİSİ

Galeri açma makinası belirli bir mesafe ilerleme yaptıktan arkadan tahkimat yapılmaktadır. Amasra taşkömür havzasında kazı yapılan galeride arının RQD değerleri ortalama sınırlarda (%60-70) olduğu için tahkimatta önemli bir zaman kaybı yaşanmaktadır. Bu nedenle tahkimatta öncelikle halat saplamaları (Ø15,24 x 6300 mm) ve kaya saplamaları(Ø23 x 2350 mm), sonra da TH 34 demir bağlar monte edilmektedir. Son olarak toz tutucu ekipmanların hemen arkasından püskürtme beton uygulanmaktadır. Şekil 3'te havzada uygulanan tahkimat modeli gösterilmiş olup, tahkimat için harcanan süreler ilerleme hızını

düşürmektedir. Halat saplama ve kaya saplama montajı, sağlı ve sollu olacak şekilde iki adet makina ile yapılmakta ve böylece tahkimata harcanan süre minimize edilmektedir. Püskürtme beton ise arın gerisinden yapıldığından ilerleme miktarını etkilememektedir. Havzada uygulanan bu tahkimat modeli için ortalama montaj süreleri Çizelge 2'de sunulmuştur. Bu çizelgeden görüleceği üzere, halat ve kaya saplaması için harcanan süreler toplam tahkimat montaj süresinin yarısını almaktadır. Eğer bu işler yapılmazsa makinadan faydalanma oranı artar ve dolayısıyla net kazı hızı da yükselir.



Şekil 3. B24 galerisi tahkimat modeli

Çizelge 2. Tahkimat montaj süreleri

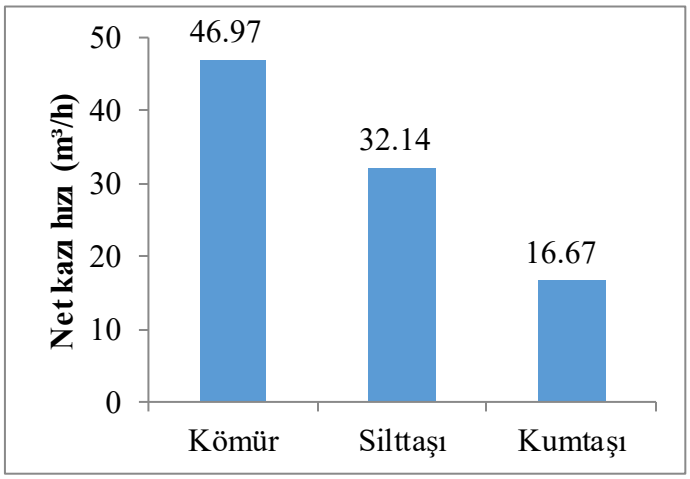
Tahkimat	Adet	Süre (dk)		
		Minimum	Maksimum	Ortalama
Çelik Hasır	5	2	4	15
Halat Saplama	6	20	30	150/2 = 75
Kaya Saplama	8	10	15	100/2 = 50
TH 34 Bağ	1	90	130	110
TOPLAM		**200**	**300**	**250**

5 DEĞERLENDİRME

5.1 Performans Değerlendirmesi

Bir kazı makinasının performansı kayaca, makinaya ve işletmeye bağlı etkenlere bağlıdır. Kayaca bağlı etkenler makine performansının önceden tahmin edilmesinde önemli olurken, makinaya bağlı etkenler ise kazı makinası performansını direk etkiler. İşletmeye bağlı etkenler, yani çalışma ortamının eğimi, kesiti, tahkimat yöntemi, vb. parametreler de kazı makinasının veriminde etkilidir (Akçın ve Akkaş, 2011).

Bu çalışmada R75T kollu galeri açma makinasının 270 m kazısı sonucu arazideki performansı incelenmiş ve bu amaçla net kazı hızı düzenli olarak kayıt altına alınmıştır. Bu değerler kayaç türüne göre sınıflandırıldığında, metrajlara bağlı olarak hesaplanan ortalama kazı hızı değerleri Şekil 4'de gösterilmiştir.



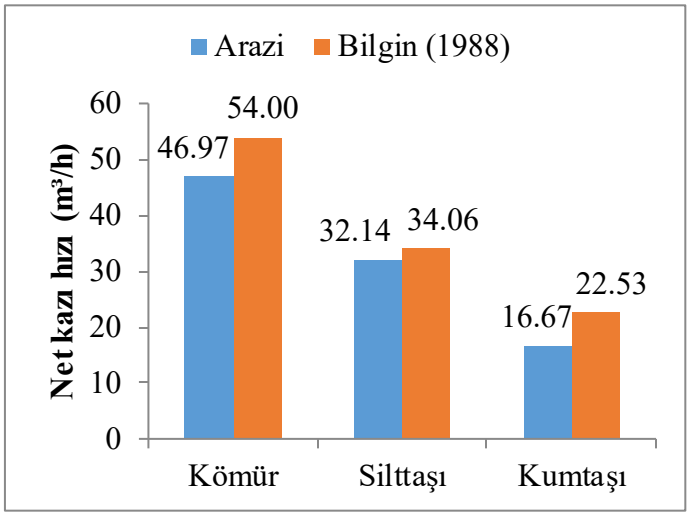
Şekil 4. Kayaç türüne göre kollu galeri açma makinasının net kazı hızı

Diğer yandan; makine kazı yaparken kömürde ortalama 94 A, silttaşında 112,5 A, ve kumtaşında ise 127 A akım çekmiştir. Bu değerler Eşitlik3'de yerine konduğunda (k=0,55 için)arazi verilerine dayanarak hesaplanan ortalama spesifik enerjileri kömür, silttaşı ve kumtaşı için sırasıyla 1,71, 2,61 ve 5,67 kWh/m^3 olarak belirlenmiştir.

Gerçekte laboratuvarda yapılan kazılabilirlik deneyleri sonuçlarına göre Eşitlik 2'den tahmin edilen spesifik enerji değerleri, bu çalışmada makinanın arazideki performans değerlerinden Eşitlik 3'e göre hesaplanmıştır. Böylece laboratuvarda doğrusal kesme deneyinde yapılan deneysel çalışmaların araziden elde edilen gerçek değerlerle karşılaştırılması sağlanmıştır.

Ersoy vd. (2016); aynı havzada aldığı blok örnekler üzerinde bire-bir ölçekli kesme setinde yaptığı deneysel çalışmalardan spesifik enerji değerlerinin silttaşında 4,71 kWh/m^3 ve kumtaşında 5,74 kWh/m^3 olduğunu belirlemişlerdir. Bu sonuçlar arazideki gerçek değerlerle de uyuşmaktadır.

Yine Ersoy vd. (2016) tarafından hesaplanan ampirik performans tahmin sonuçları (Bilgin (1988)'e göre) ile arazide belirlenen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5'te gösterilmiştir. Buna göre bu çalışma kapsamında arazide elde edilen değerlerin, Bilgin (1988) teoremi ile oldukça yakın sonuçlar sergilediği görülmüştür. Bu da arazide kullanılan R75T galeri açma makinasının formasyona uygun olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, Ersoy vd. (2016) aynı formasyonlarda R60T galeri açma makinasıyla 4 aylık süre zarfında makinanın ortalama kazı miktarının 21,83 m^3/h olduğunu belirtmişlerdir.



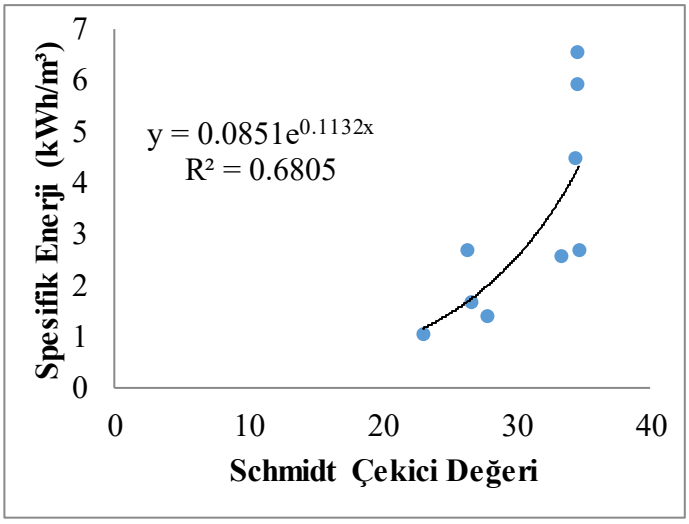
Şekil 5.Arazide ölçülen ve ampirik hesaplanan performans tahmin modelinin karşılaştırılması.

4.1 Schmidt Çekiciyle Performans Tahmini

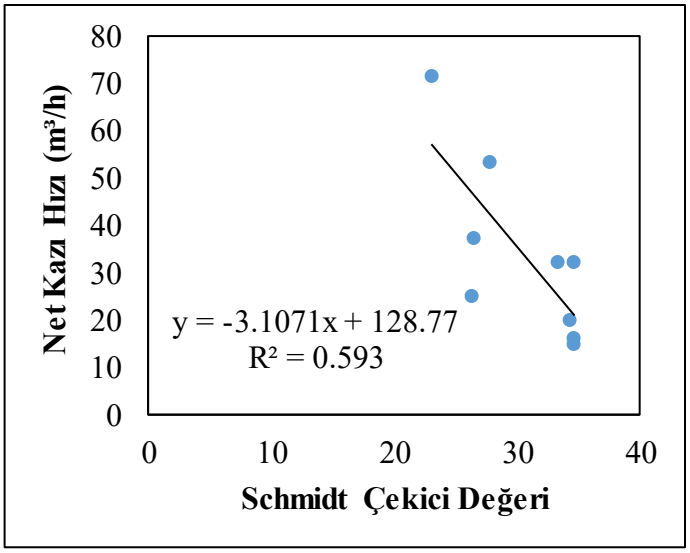
R75T galeri açma makinası ile kazı yapılırken, ilerleme metrajlarına bağlı olarak arında L tipi Schmidt çekiciyle sertlik ölçümleri yapılmıştır. Makine ilerledikçe formasyondaki değişkenliğe göre makinanın kazı süresi (h) ölçülmüş ve yaptığı ilerleme miktarı (m) kayıt altına alınmıştır.Buna göre 30 m^2 kesit alanındaki net kazı hızı (ICR) hesaplanmıştır. Burada, galeri kesitleri 24 m^2 olacak şekilde sürülse de, tahkimatsız faydalı kesit alanı 30 m^2 olarak açılmıştır.

Nominal gücü 200 kW olan kesici kafanın Schmidt çekici ölçümleri sırasında arında kazı yaparken çektiği akım değerleri de anlık olarak kayıt altına alınmıştır. Buna göre 1000 V gerilimle çalışan makinanın harcadığı güç belirlenmiştir. Tüm bu değerler Eşitlik 3'te yerine konularak spesifik enerji hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında Schmidt çekici ile spesifik enerji ve Schmidt çekiciyle net kazı hızları arasında anlamlı ilişkiler olduğu bulunmuştur (Şek. 6-7).

Yukarıda değinildiği üzere, spesifik enerji değerlerinin arazide ve laboratuvar sonuçlarının uyumlu olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda Şekil 6'te gösterildiği üzere, Schmidt çekici ile 7 farklı noktada yapılan ölçüm değerlerinin spesifik enerji ile üstel bir ilişki (R=0,82) sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, net kazı hızı ile Schmidt değeri arasında korelasyon katsayısı (R=0,77) olan doğrusal azalan bir ilişki olduğu görülmüştür. Yani, sertlik değerinin yüksek olduğu kayaçlarda galeri açma makinasının ilerleme hızı düşmekte ve spesifik enerji değerleri artmaktadır. Bu durum genel olarak beklenen bir sonuçtur. Ancak, Şekil 6-7'de verilen ilişkilerden Schmidt çekici ile arazide makine performansı tahmininin yapılabileceği görülmüştür. Kazı sırasında makine performansının değerlendirmesi açısından faydalı olabilecek bir bulgudur. Elde edilen sonuçların güvenilirliğini arttırmak için diğer kaya türlerinde de deney yapılması faydalı olacaktır.



Şekil 6. Schmidt çekici değeri ile spesifik enerji arasındaki ilişki



Şekil 7. Schmidt çekici değeri ile net kazı hızı arasındaki ilişki

5 SONUÇLAR

Bu çalışmada kayacın sertliğinin belirlenmesinde ve yerindeki dayanımının dolaylı olarak tahmin edilmesinde önemli bir cihaz olan Schmidt çekici ile makine performansının tahmin edilmesinde uygulanabilirliği irdelenmiştir.

Bu amaçla 270 m uzunluğunda R75T tip galeri açma makinası ile açılan taban yolunda farklı kazı mesafelerinde kömür, silttaşı ve kumtaşı kayaçlarının kazısı yapılmıştır. Üç farklı tip formasyonda metrajlara bağlı olarak arında Schmidt çekici değerleri ölçülmüş ve makinanın net kazı hızı kayıt edilmiştir.

Bunun yanı sıra tahkimat sisteminin net kazı hızına etkisinin çok önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Kayacın RQD değeri ne kadar düşerse tahkimat o kadar önem kazanır ve harcanan süre de artar. Bu da net kazı hızını düşürür. Bir başka deyişle, süreksizlik düzlemlerinin az olması, halat saplama ve kaya saplama kullanımını azaltır. Eğer ki galeri ilerlemelerinde saplamaya ihtiyaç duyulmazsa net kazı hızı da yaklaşık %50 oranında artış sağlayabilir.

Arazide yapılan ölçümlerin istatistiksel değerlendirilmesi sonucu elde edilen yüksek korelasyon katsayılarından Schmidt çekici ölçümlerinin makine ilerleme miktarları ve spesifik enerjinin tahmin edilmesinde uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. Ancak elde edilen sonuçlar kömür ve çevre kayaçları (sedimanter tip) için geçerli olup, deney yönteminin diğer kayaçlarda yapılan ilerlemeler için de tekrarlanması önerilir.

Bu sonuçlar aynı zamanda laboratuvarda bire-bir ölçekli kesme setinde yapılan kazılabilirlik deneylerinin gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini de doğrular nitelikte olduğunu ortaya koymaktadır.

Diğer yandan, galeri açma makinalarının Amasra taş kömür havzasında başarıyla kullanılmış ve kullanılıyor olması, yüksek ilerleme hızlarına ulaşılması, Zonguldak havzasındaki galeri ve taban yolu ilerlemelerine de olumlu katkı sağlayacak ve havza geleceğine de önemli ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

Akçın N.A., Akkaş, E. 2011. Gelik İşletmesi'nde kullanılan kollu galeri açma makinasının performansının incelenmesi. *Türkiye 22. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, Ankara, pp. 171-180.

Bilgin, N., Dincer, T., Copur, H. 2002. The performance prediction of impact hammers from Schmidt hammer rebound values in Istanbul metro tunnel drivages. *Tunnelling and Underground Space Technology* 17: 237–247

Bilgin, N., Seyrek, T., Shahriar, K. 1988. Roadheader performance ın Istanbul, Golden Horn Golden horn clean up contributes valuable data. *Tunnels and Tunneling*, 41-44.

Comakli, R., Kahraman, S., Balci, C. 2014. Performance prediction of roadheaders in metallic ore excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, pp. 38-45.

Copur, H. 2010. Linear stone cutting tests with chisel tools for identification of cutting principles and predicting performance of chain saw machines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47, 1, pp. 104-120.

Ersoy C., Balcı, C., Şenkal, S.S. 2016. Amasra Taşkömürü Havzasında çalışan kollu galeri açma makinesinin performans değerlendirmesi. *Türkiye 20. Kömür Kongresi*, Zonguldak, pp. 37-47.

Göktan, R.M., Gunes, N. 2005. A comparative study of Schmidt hammer testing procedures with reference to rock cutting machine performance prediction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 3, pp. 466-472.

Kahraman, S., Fener, M., Gunaydin, O. 2004. Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 7, pp. 1123-1131.

Tumac, D. 2015. Predicting the performance of large diameter circular saws based on Schmidt hammer and other properties for some Turkish carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75, pp. 159-168.

Tumac, D., Tolouei, S. 2017. Mermer fabrikalarında kullanılan büyük çaplı dairesel testerelerin (S/T) performans analizi. *Journal of Polytechnic*, 20, 3, pp. 651-662.

Yurdakul, M., Akdas, H. 2012. Prediction of specific cutting energy for large diameter circular saws during natural stone cutting. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53, pp. 38-44.

Kayadan Oyma Yapıların Kazısında Kayaç Özeliklerinin Kollu Galeri Açma Makinesi Kesici Uç Tüketimine Etkisi

Effects of the Rock Properties on the Cutter Consumption in Rock-cut Structures Excavation

R. Çomaklı, A.R. Mavi
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

ÖZET Kapadokya bölgesinde fazlaca bulunan ve genel olarak kayadan oyma yapı (KOY) olarak adlandırılan yeraltı açıklıklarının kazısında kollu galeri açma makineleri (KGAM) yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. KOY' ler düşük dayanıma sahip tüfler içerisinde kazılmakta ve genel olarak soğuk hava deposu veya restaurant olarak tasarımlandırılmaktadır.

KOY'lerin kazısında karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi kesici uç tüketiminin fazla olmasıdır. Bu çalışma kapsamında Nevşehir bölgesinde bulunan iki farklı KOY kazısında KGAM kazı performansları analiz edilerek kesici uç tüketim oranları belirlenmiştir. Aynı proje sahasında kayaçların su içeriği ve tek eksenli basınç dayanımı gibi bazı fiziksel mekanik değerleri bölgesel olarak farklılık göstermektedir. Bu kapsamda iki farklı proje sahasında sekiz ayrı bölgeden numune alınmış ve fiziksel mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri ile kesici uç tüketimi değerleri arasındaki ilişkiler basit regresyon analizi yöntemi ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

ABSTRACT The roadheaders are commonly used on the excavation of the underground spaces that located in Cappadocia Region and generally called as rock-cut structures (RCS). RCSs are excavated in tuffs with low strength and are generally designed as restaurant and cold storage rooms.

One of the most important problems in the excavation of KOYs is the excessive cutter consumption rate. In this study, excavation performances of roadheaders were analyzed in two different KOY excavations in Nevşehir region and the field cutter consumption rates were determined. The physical and mechanical properties such as uniaxial compressive strength and water content values of the rocks in the project areas differ in locally. In this context, rock samples were collected from eight different excavation areas in two different projects and their physical and mechanical properties were determined. The relationships between physical and mechanical properties of rocks and field cutter consumption rate of roadheaders were statistically analyzed by simple regression analyze method.

1 GİRİŞ

Mekanize kazı yöntemlerinin gelişmesi temel olarak artan insanlık nüfusuna ve bu nüfusun ihtiyaçlarına daha hızlı cevap verebilme ile alakalıdır. Bu yöntemler gerek madencilik gerekse inşaat mühendisliği alanında daha kapsamlı projelerin daha hızlı ve güvenli şekilde tamamlanmasına olanak sağlamaktadır. Kollu galeri açma makineleri (KGAM) de mekanize kazıcılardan birisi olup madencilik ve inşaat sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır.

KGAM' ler kayadan oyma yapıların (KOY) kazısında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapılar genellikle kolay kazılabilen formasyonlarda soğuk hava deposu, otel veya restoran olarak inşa edilmektedir. KOY kazılarında KGAM kazı

performansı yüksek olmasına rağmen firmaların karşılaştığı en büyük problem kesici uç aşınmasıdır. Silis oranının fazla olduğu tüflerde açılan KOY' lerin kazısı sırasında oluşan kesici uç tüketim maliyeti işçi maliyetini geçebilmektedir.

Mekanize kazı yöntemi seçilirken uygun makinenin seçimi kadar uygun kesici uç seçimi de oldukça önemlidir (Arı, 1990; Thuro ve Plinninger, 1999). Mekanize kazı yöntemlerinde kesici uç seçimini etkileyen parametreler genel olarak kayaç, kesici uç ve makine özellikleri olarak sınıflandırılmaktadır (Arı, 1990). Kesici uçların seçimi, dizilimi ve aşınması genel olarak projenin maliyetini ve başarısını etkilemektedir. Şöyle ki; kesici uçların doğru seçimi ve kesici kafaya doğru şekilde yerleştirilmeleri neticesinde kesme verimliliği artmakta ve kazı esnasında oluşacak titreşimlerin düzeyini kontrol edilebilir kılmaktadır (Tiryaki, 2000). Kesici uç aşınması kazı esnasında gerekli olan kesme kuvvetlerinin artmasına sebep olmakta ve bu durumda enerji sarfiyatını artırmaktadır (Bilgin, 1977, 1982; Bölükbaşı, 1986; Hekimoğlu ve Fowell, 1988).

Kazılan kayacın fiziksel, mekanik ve mineralojik özellikleri aşınmayı önemli şekilde etkilemektedir. Kesici uç aşınmasında etkili kayaç özellikleri kuvars ve diğer sert mineral içeriği, kuvars tanelerinin ortalama tane boyu, sert minerallerin tane şekilleri, tanelerin birbirleri ile bağlantı şekilleri ve dolgu maddesi ile kayacın dayanım özellikleri şeklinde sınıflandırılmıştır (Tunçdemir, 2002). Bununla birlikte kesici uç malzemesi, kesici uç dizayn parametreleri ve kazı sırasında değişecek operasyonel parametreler de yine kesici uç tüketiminde etkilidir (Bilgin vd., 2014).

Doğruöz ve Bölükbaşı (2012) farklı tek eksenli basınç dayanımına sahip kayaçlar üzerinde farklı aşınma yüzeyine sahip keskilerle kaya kesme deneyleri yapmışlardır. Bu araştırma sonucunda kazı esnasında optimum spesifik enerji değerinin elde edilebilmesi için kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değerleri arttıkça uçlarda müsaade edilebilir aşınma yüzeyi oranın daha az olması gerektiği bildirilmiştir.

Kayaçların aşındırıcılık özellikleri ile mekanize kazıcıların (KGAM, TBM gibi) keski tüketiminin araştırılması amacıyla bazı laboratuvar deneyleri geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılanları Cerchar ve Schimazek aşındırıcılık deneyleridir.

Cerchar aşınma deneyi kesici uç tüketimi için ISRM tarafından önerilen bir test yöntemi olup KGAM kesici uç tüketiminin tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır (Alber vd., 2014). Johnson and Fowell, (1986) geliştirdikleri modelde kayaçların Cerchar aşınma indeks (CAI) değerlerine bağlı olarak KGAM kesici uç tüketiminin tahmin edilebileceğini bildirmişlerdir. Benzer şekilde bir model Özdemir (1998) tarafından geliştirilmiş olup bu modelde kesici kafa dönüş hızının ve su kullanımının da etkileri dikkate alınmıştır. KGAM kesici uç tüketimi tahmini için geliştirilen en kapsamlı çalışmalardan biri Çopur vd. (1997, 1998) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada KGAM ve kayaç özelliklerine bağlı olarak yeni bir kesici uç tüketimi tahmin modeli geliştirilmiştir.

Yapılan bazı araştırmalarda kayaçların CAI değerleri ile tek eksenli basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir (Al-Ameen ve Waller, 1994; Deliormanlı, 2012; Altındağ vd., 2010; Kahraman vd., 2010). Bu çalışmalar CAI değerinin artan tek eksenli basınç dayanımı değeri ile arttığını ortaya koymuştur. Dolayısıyla kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değeri arttıkça KGAM kesici uç tüketiminin artacağı söylenebilir.

Schimazek aşınma deneyi de yine kayaçların aşındırıcılığın tahmininde kullanılmaktadır. Schimazek ve Knatz (1970), tarafından yapılan çalışmada keski ucunda meydana gelen aşınma miktarı ile Schimazek aşınma indeksleri arasında doğrusal bir İlişkinin olduğu saptanmıştır.

Daha önce yapılan çalışmalara genel olarak tünel ve madencilik sektöründe kullanılan KGAM' ler üzerine yapılmış olup genel olarak çalışılan kayaçlar belirli bir tek eksenli basınç dayanımı değerinin üzerindedir. Yapılan bu çalışmada ise çok

düşük dayanımlı tüflerin kazısında kullanılan KGAM' ler için kesici uç tüketimi ile kayaç özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Elde edilen ilişkilere bakıldığında, sonuçların daha sert kayaçlardan elde edilen ilişkilerden farklı olduğu ortaya çıkmıştır.

2 ÇALIŞMA SAHASI

Bu çalışma kapsamında Kapadokya bölgesinde Nevşehir il sınırlarında bulunan iki farklı KOY kazısı için KGAM kazı performansı analiz edilmiştir (Şekil 1). Kapadokya bölgesi genel olarak Kapadokya Volkanik Sahasında bulunan Neojen - Kuvaterner volkanik kayalardan oluşmaktadır (Toprak vd., 1994). Nevşehir il sınırları içerisinde bulunan KOY' ler Kavak ve Zelve bölgelerinde yer almaktadır. Bu bölgeler Ürgüp formasyonu içerisinde yer alan piroklastik kayaçlardan oluşmaktadır. Renkleri pembe veya beyaza yakın özellik gösteren bu ignimbiritlerin (tüf) kalınlığı 10 – 150 metre arasında değişmektedir (Innocenti vd. 1975, Toprak vd. 1994).

Şekil 1. Proje sahasının gösterimi

Tasarlanan depolar genel olarak bir ana galeri ve bu galerinin her iki tarafında açılan birçok odadan oluşmaktadır. Ana galeri ve odaların boyutları kazı yapılan bölgeye göre değişiklik gösterebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında kazısı yapılan soğuk hava depolarında ana galeri uzunluğu 125 metre olup 6,5 metre genişliğe ve 6,5 metre yüksekliğe sahiptir. Galeri etrafında açılan odaların genişlik ve yükseklikleri ise 6 metre olup derinlikleri 25 metre olacak şekilde tasarlanmıştır (Şek. 2).

Şekil 2. KGAM tarafından kazısı yapılan KOY

3 PROJE SAHALARINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1 KGAM Teknik Özellikleri

Yapılan bu çalışma kapsamında 2 farklı KOY kazısında KGAM performansı (net kazı hızı, kesici uç tüketimi gibi) incelenmiş olup, bu kazılar aynı KGAM tarafından farklı zamanlarda yapılmıştır. Kullanılan KGAM' ye ait teknik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. KOY kazılarında kullanılan KGAM teknik özellikleri

Model	**PAURAT E 196**
Ağırlık (t)	75
Kesici kafa tipi	Eksenel
Kazı gücü (kW)	200
Kesici kafa çapı (cm)	130
Keski tipi	Konik
Keski sayısı	64

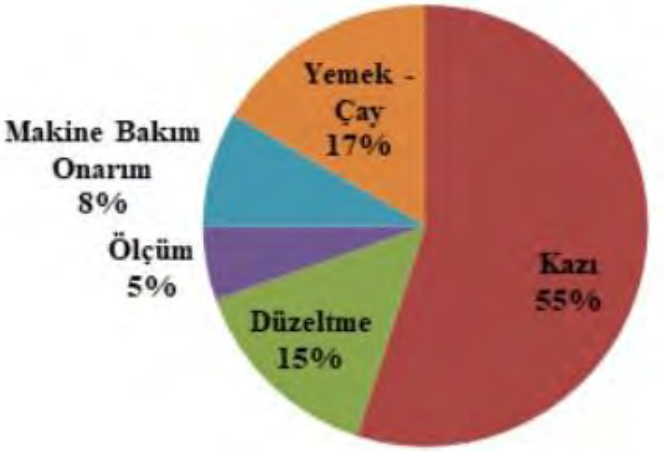
3.2 KGAM Kazı Performans Değerleri

İki farklı KOY kazısında her bir kazı bölgesinde 5 gün boyunca ölçümler yapılmış ve öncelikle çalışma sürelerinin dağılımı belirlenmiştir. Proje sahalarından Höyük sahasında kazılan formasyon özelliklerinin değiştiği 3 farklı ve Sulusaray sahasında ise 5 farklı bölge için çalışma sürelerinin dağılımı belirlenmiştir. Genel olarak çalışma süreleri birbirine yakın olduğu için her iki saha için ortalama çalışma süresi dağılımını gösterir değerler örnek olarak Çizelge 2'de verilmiştir. Sulusaray sahası için belirlenen ortalama çalışma sürelerinin dağılımının grafiksel gösterimi ise örnek olarak Şekil 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. İki proje sahası için çalışma sürelerinin dağılımı

Proje Adı	Çalışma süreleri (saat)					
	Toplam Çalışma	Kazı	Düzeltme	Ölçüm	Makine Bakım Onarım	Yemek
H1	13,50	7,15	2,30	0,50	1,30	2,25
	13,50	7,30	2,25	0,40	1,25	2,30
	13,50	7,25	2,15	0,60	1,40	2,10
	13,50	7,10	2,20	0,70	1,35	2,15
	13,50	7,50	2,25	0,55	1,20	2,00
	13,50	**7,26**	**2,23**	**0,55**	**1,30**	**2,16**
SS1	13,50	7,52	1,98	0,70	1,10	2,20
	13,50	7,45	1,95	0,80	1,15	2,15
	13,50	7,20	2,00	0,75	1,25	2,30
	13,50	7,64	1,96	0,65	1,00	2,25
	13,50	7,31	1,94	0,75	1,20	2,30
	13,50	**7,42**	**1,97**	**0,73**	**1,14**	**2,24**

Bölgeler seçilirken proje sorumlusu ve KGAM operatörünün yönlendirmesiyle özellikle kayaç özelliklerinin değiştiği bölgeler belirlenmiştir. Bu doğrultuda iki farklı KOY kazısı projesinde toplam sekiz ayrı bölge için KGAM kazı performansı değerleri kayıt altına alınmıştır. Kaydedilen bu değerler kullanılarak her bir proje sahası için ortalama KGAM günlük ilerleme oranı, makine kullanım oranı, net kazı hızı, anlık kazı hızı değerleri ve kesici uç tüketim miktarı hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 3'de verilmiştir. Anlık kazı oranı değeri kazılan galerinin kesit alanına ve KGAM ilerleme oranına göre hesaplanmıştır. Kesici uç tüketim değeri ise günlük değiştirilen keski sayısına ve kazılan malzeme miktarına göre hesaplanmıştır.



Şekil 2. Sulusaray proje sahası için çalışma sürelerinin dağılımı

Çizelge 3. KGAM arazi performans değerleri

Kazı Alanı	NKM (m^3/gün)	MKO (%)	GİM (m/gün)	AKO (m^3/saat)	KT (keski/m^3)
SS1	285,74	53,00	12,72	39,96	0,045
SS2	292,48	56,00	13,02	40,07	0,045
SS3	301,25	54,00	13,41	41,55	0,046
H1	281,40	57,00	10,00	36,31	0,054
H2	309,54	56,50	11,00	42,11	0,054
H3	298,85	56,00	10,62	39,82	0,048
H4	394,42	55,00	10,60	52,45	0,049
H5	429,22	55,00	10,64	53,33	0,051

NKM; Net kazı miktarı, MK; Makine kullanım oranı, GİM; Günlük ilerleme miktarı, AKO; Anlık kazı oranı, KT; Kesici uç tüketimi

3.3 Yerinde Yapılan Schmidt Sertlik Değeri Deneyleri

Belirlenen çalışma alanlarında KGAM kazısıyla birlikte Schmidt çekici yardımıyla kayaçların yüzey sertliği değerleri belirlenmiştir. Schmidt sertlik değerleri ölçümü ISRM (2007) standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Bunun yanında arazide ölçümler yapılırken dayanımı düşük kayaçlarda ölçüm alınmasının çok doğru sonuçlar vermeyeceği düşünülmüş ve bunun için özenli davranılmıştır.

Kazı yapılan bölgede kayaç Schmidt sertlik değeri belirlenirken mümkün oldukça fazla farklı bölgelerden ölçüm alınmıştır. Elde edilen bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak kazılan kayaç için Schmidt sertlik değeri olarak kaydedilmiştir.

4 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

4.1 Fiziksel ve Mekanik Testler

KOY kazılarının yapıldığı proje sahalarından alınan blok numuneler laboratuvar ortamına getirilmiş ve numune hazırlama işlemlerinden sonra kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda kayaçların yoğunluk, su içeriği, nokta yük ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.

Karot numunelerin kullanıldığı deneysel çalışmalar ISRM (2007) standartlarına uygun olarak yapılmıştır. KOY kazılarının yapıldığı formasyonların dayanımı düşük tüflerden oluşmasından dolayı deneylerde mümkün oldukça fazla numune kullanılmış ve her bir deney yöntemi için elde edilen değerlerin ortalaması alınarak o kayaç için deney sonucu olarak kaydedilmiştir. Her bir kayaç numunesi için deneyler sonunda elde edilen ortalama değerler Çizelge 4'de verilmiştir.

4.2 Cerchar Aşınma Testleri

ISRM standartlarına uygun olarak yapılan bu deneyde, taze kırılmış düzgün olmayan numuneler kullanılmıştır (Alber vd., 2014). Deneyde çekme dayanımı 2000 N/mm^2, uçları 90^0 konik şekilli uçlar, Cerchar deney aletine yerleştirildikten sonra, 70 N'luk dikey bir kuvvet altında düzgün olmayan numune yüzeyinde 1 cm'lik kazıma yapılmıştır. Deneyden sonra uçlarda oluşan aşınma miktarları mikroskop altında ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Cerchar aşınma indeks değerleri belirlenirken kayaçların çok düşük dayanıma sahip olmalarından kaynaklı deney ucunun çok fazla saplanması gibi sorunlarla karşılaşılmıştır. Bu sebepten dolayı her bir kayaç numunesi için mümkün oldukça fazla deney yapılmış olup elde edilen değerlerin ortalaması alınarak CAI değeri olarak kaydedilmiştir. Kayaçların ortalama CAI değerleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4. Laboratuvar deney sonuçları

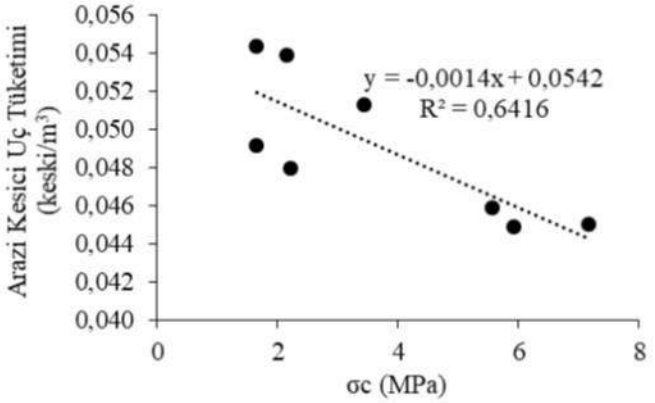
Numune Kodu	γ (gr/cm^3)	ω (%)	$Is_{(50)}$ (MPa)	σ_c (MPa)	YSS	CAI
SS1	1,23	20,74	0,24	5,91	19,23	1,02
SS2	1,38	22,07	0,26	7,17	22,45	1,05
SS3	1,22	21,74	0,24	5,56	19,20	1,12
H1	1,18	27,18	0,07	2,16	13,89	1,24
H2	1,14	28,41	0,07	1,65	14,02	1,52
H3	1,17	26,01	0,08	2,22	14,78	1,34
H4	1,16	26,76	0,07	1,65	12,45	1,41
H5	1,25	24,32	0,14	3,44	16,25	1,48

γ; Yoğunluk, ω; Su içeriği, $Is_{(50)}$; Nokta yük dayanımı, σ_c; Tek eksenli basınç dayanımı, SS; Yerinde Schmidt sertlik değeri, CAI; Cerchar aşınma indeks değeri.

5 BULGULAR VE TARTIŞMA

KOY kazıları sırasında elde edilen KGAM arazi kazı performansı değerleri kazı yapılan bölgeden alınan kayaç numunelerinin fiziksel mekanik özellikleri ile arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu ilişkiler incelenirken basit regresyon analizi yöntemi kullanılmıştır.

Kazılan kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile KGAM kesici uç tüketimi arasındaki ilişkiye bakıldığında negatif lineer bir ilişkinin olduğu görülmektedir (Şek. 3).



Şekil 3. Tek eksenli basınç dayanımı ile KGAM kesici uç tüketimi arasındaki ilişki

Daha önceki çalışmalara bakıldığında ise elde edilen bu ilişkinin beklenilen bir durum olmadığı anlaşılmaktadır. Şöyle ki, önceki araştırmalar da elde edilen sonuçlar KGAM kesici uç tüketiminin kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin artmasıyla artacağı bildirilmiştir (Çopur, 1997, 1998; Plinninger, 2004; Bilgin vd. 2014). Önceki

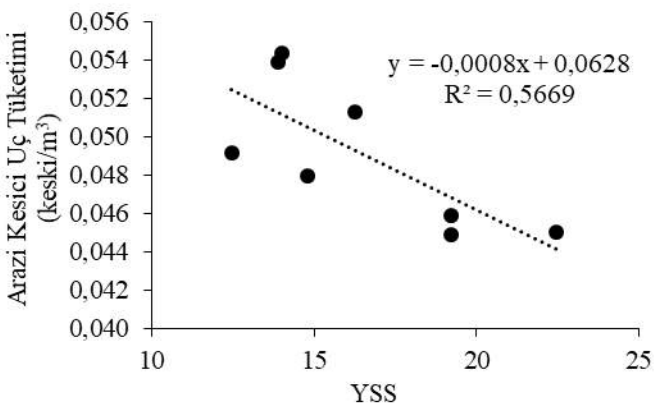
çalışmalardan elde edilen sonuçlara bakıldığında KOY kazılarındakine benzer şekilde çok düşük dayanıma sahip kayaçların çok fazla olmadığı genellikle KGAM kazı performansının değerlendirildiği kayaçların belirli bir dayanım değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sebepten dolayı çok düşük dayanımlı kayaçlarda elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir.

Bu durum ayrıca kazı esnasında kayaç parçalanması teorilerinin / şekillerinin düşük dayanımlı tüflerde sert kayaçlardan farklı olmasıyla da açıklanabilir. Şöyle ki, kazı esnasında kayaç üzerine etki eden kuvvetler etkisiyle kayaçta çatlaklar oluşur ve bu çatlakların birleşmesiyle kaya parçalanır ve kopar (Bilgin, 1998; Rostami ve Özdemir, 1993). Ancak, çok düşük dayanımlı tüflerde bu çatlak oluşumu gerçekleşmemekte veya çok az gerçekleşmektedir. Bu durum kazı performansını düşürmekte ve keskilerin kayaca daha çok gömülmesine sebep olmaktadır. Bu durum da keskilerin aşınmasını artırmaktadır. Kayacın tek eksenli basınç dayanımı arttıkça ise çatlak oluşumu artmakta ve keskilerin daha fazla gömülmesine gerek kalmadan parçalanma olmaktadır. Tüm bu durumlar göz önüne alınarak çok düşük dayanımlı tüf benzeri kayaçlarda kayaç dayanımının artmasıyla kesici uç tüketiminin azalması açıklanabilir.

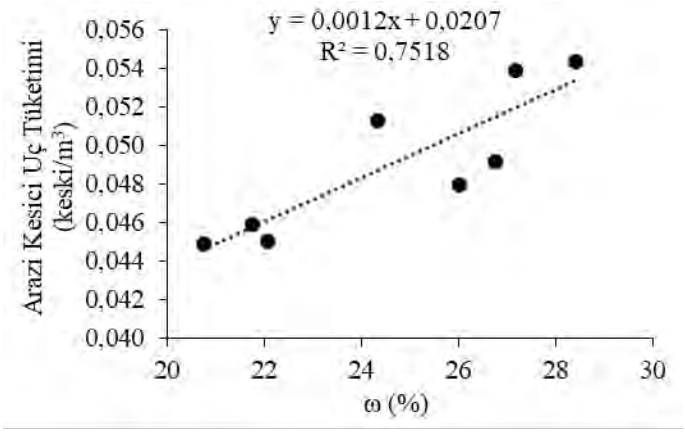
Benzer şekilde kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile Schmidt sertlik değeri arasındaki ilişki düşünüldüğünde, bu çalışmada elde edilen yerinde Schmidt çekici sertlik değeri ile kesici uç tüketimi arasındaki ilişki de beklenildiği gibi olmamıştır (Şekil 4) (Bilgin vd., 1990). Şöyle ki; yerinde yapılan deneylerden elde edilen Schmidt çekici sertlik dayanımı değerleri arttıkça kesici uç tüketimi azalmaktadır.

Kesici uç tüketimi ile kayaçların su içeriği arasındaki ilişkiye bakıldığında ise su içeriği değeri arttıkça kesici uç tüketimi değerinin arttığı görülmektedir (Şekil 5). KGAM kullanımında su genelde kesici ucun aşırı ısınmasını önleyip aşınmayı azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Yani suyun kesici uç tüketiminin azaltılması hususunda pozitif bir etkisi vardır (Özdemir, 1998; Bilgin vd, 2014). KOY kazılarında ise kazı esnasında su kullanılmamakta ancak kayaçlar genelde belirli oranda su içeriğine sahiptir ve bu durumda kesici uçların aşırı ısınmasını engellemektedir. Bununla birlikte, KOY kazılarında kayaçlar çok düşük dayanımlı olduğundan dolayı su içeriği fazla olan kayaçların kazısında, kazılan ince taneli malzemeler keskileri daha fazla sarmakta ve dönmelerini engellemektedir. Benzer şekilde çok ince taneli malzemeler kesici ucun kafaya bağlandığı kısımdaki boşluğa dolmakta ve burayı tıkayarak kesici ucun dönmesini engellemektedir. Bu durumda yine kesici ucun bloke olarak daha fazla ve tek taraflı olarak aşınmasına sebep olmaktadır.

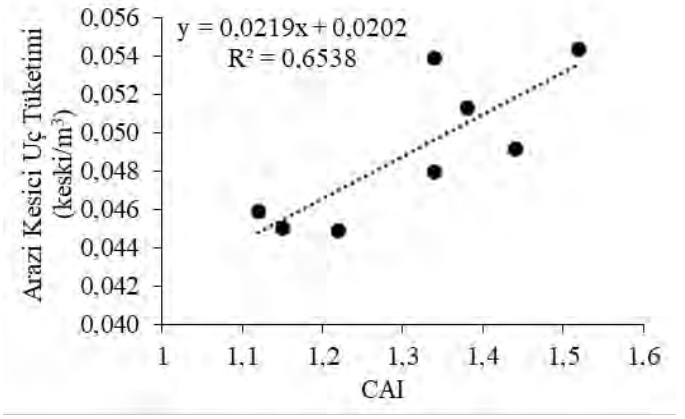
Kapadokya bölgesinde bulunan KOY kazılarının yapıldığı tüflerin düşük dayanımlı olmaları sebebiyle Cerchar aşınma indeks deneyleri sağlıklı bir şekilde yapılamamıştır. Mümkün oldukça fazla numune üzerinde deneyler yapılmış olsa da deney ucunun kayaca gömülmesi sorunu çözülememiştir. Buna rağmen elde edilen Cerchar aşınma indeks değerleri ile KGAM arazi kesici uç tüketimi değerleri arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak incelenmiştir. Buna göre kayaçların Cerchar aşınma indeks değerleri arttıkça KGAM kesici uç tüketimi artmaktadır. Bu durum beklenilen bir sonuç olmasına rağmen elde edilen ilişki önceki çalışmalarda elde edilen ilişkilere kıyasla daha düşüktür (Johnson ve Fowell, 1986; Çopur vd., 1998, 1997; Özdemir, 1998; Plinninger vd., 2003; Plinninger, 2004).



Şekil 4. Yerinde Schmidt sertlik dayanımı değeri ile KGAM kesici uç tüketimi arasındaki ilişki



Şekil 5. Kayaçların su içeriği değeri ile KGAM kesici uç tüketimi arasındaki ilişki



Şekil 6. Cerchar aşınma indeks değeri ile KGAM kesici uç tüketimi arasındaki ilişki

6 SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Kapadokya bölgesinde bulunan kayadan oyma yapıların kazısında kullanılan kollu galeri açma makinelerinin kazı performansları değerlendirilmiş ve özellikle kesici uç tüketimi değerleri belirlenmiştir. Kazı yapılan formasyonlar düşük dayanımlı tüflerden oluşmakta olup kazı esnasında alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ile fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen laboratuvar deney sonuçları kullanılarak kayaç özelliklerinin KGAM kesici uç tüketimi üzerine etkileri araştırılmıştır.

Genellikle madencilik ve tünel kazılarında karşılaşılan ve daha yüksek tek eksenli basınç dayanımına sahip kayaçların kazısında elde edilen ilişkilerden farklı ilişkiler KOY kazıları için elde edilmiştir. Şöyle ki; kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değeri arttıkça kesici uç tüketimin azaldığı görülmüştür. Benzer durum yerinde Schmidt sertlik değeri değerleri ile kesici uç tüketimi arasındaki ilişkide de elde edilmiştir.

Buna karşın kayaçların su içeriği değeri arttıkça kesici uç tüketimi değeri de artmaktadır. Kesici uç tüketimi ile Cerchar aşınma indeks değeri arasındaki ilişki ise önceki çalışmalara benzer şekilde elde edilmiş olup; kesici uç tüketimi ile Cerchar indeks değeri arasında pozitif lineer ilişki elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar desteklerinden dolayı TÜBİTAK (Proje No: 217M171) ve HÖYÜK inşaat firması yetkililerine teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

AL-Ameen, SI., Waller, MD. 1994. The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar abrasive index. *Eng Geo* 4(36):293-301.

Alber, M., Yarali, O., Dahl, F., Bruland, A., Kasling, H., Michalakopoulos, T.N., Cardu, M., Hagan, P., Aydin, H., Ozarslan, A. 2014. ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the cerchar abrasivity test. *Rock Mechanics and Rock Engineering,* 47.

Altındağ, R., Şengün, N., Saraç, S., Mutlutürk, M., Güney, A. 2009. Evaluating the relations between brittleness and cerchar abrasion index of rocks. *Eurock 2009, ISRM Regional Symposium, Crotia*, 195-200.

Arı, H. 1990. TTK Asma işletmesi Kömür Çevre Kayaçlarının Kazılabilirliğinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, HÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. Zonguldak.85 s

Bilgin, N., Seyrek, T., Erdinç, E. 1990. Kuzey ve güney haliç projeleri örneği ve tünel açma makinalarının seçimi için bazı yeni kriterler. *2. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu*.

Bilgin, N. 1977. Investigations into the mechanical cutting characteristics of some medium and high strength rocks, *PhD thesis*, The University of Newcastle Upon Tyne, England.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. 2014. *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*. CRC Press, Taylor and Francis Group, London.

Bölükbaşı, N. 1986. Yeraltı kömür ve kayaç kazı mekanizasyonu. ODTÜ Maden Mühendisliği Bölümü, Seminer, No:4, Ankara, 112s.

Copur, H., Rostami, J., Ozdemir, L., Bilgin, N. 1997. Studies on performance prediction of

roadheaders, *in: Proceedings of the 4th International Symposium on Mine Mechanization and Automation*. Brisbane, Queensland, Australia, p. 4A1–4A7.

Copur, H., Ozdemir, L., Rostami, J. 1998. Roadheader applications in mining and tunneling. *Mining Engineering*.

Deliormanlı, A.H. 2012. Cerchar abrasivity index (CAI) and its relation to strength and abrasion test methods for marble stones. *Constr. Build. Mater*., 30:16-21.

Doğruöz, C., Bolukbasi, N. (2012). Effect of cutting picks and cutting performance on uniaxial compressive strength. *Journal of the Institute of Science and Technology of Dumlupinar University*, Kutahya, Turkey, Num:27.

Fowell, R.J., Richardson, G., Gollick, M.J. 1994. Prediction of boom tunnelling machine excavation rates, *in: 1st North American Rock Mechanics Symposium, Rock Mechanics, Models, and Measurement Challenges from Indusry*. Austin, USA, p. 243–251.

Hekimoğlu, O.Z., Fowell, R.J. 1988. Bomlu kazı makinalarının temel özellikleri ve seçimleri. *6. Kömür Kongresi,* Zonguldak, 29-52.

Innocenti, F.., Mazzuoli, R.., Pasquarè, G., Radicati Di Brozolo, F., Villari, L. 1975. The Neogene calcalkaline volcanism of Central Anatolia: geochronological data on Kayseri—Nigde area. *Geological Magazine*, 112, 349.

ISRM, 2007. In: Ulusay, R., Hudson, J.A. (Eds.) *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring:* 1974–2006. Ankara, Turkey.

Johnson, S.T., Fowell, R.J. 1986. Compressive strength is not enough: Assessing pick wear rates for drag tool equipped machines, in: Hartman, H.L. (Ed.), *27th US Rock Mech. Symp.* Tuscazoosa, AL. AIME, New York, pp. 840–845.

Kahraman, S., Alber, M., Fener, M., Günaydin, O. 2010. The usability of Cerchar abrasivity index for the prediction of UCS and E of Misis Fault Breccia: Regression and Artificial Neural Networks Analysis, *Expert Syst. Appl*., 37(12):8750-8756.

Ozdemir, L. 1998. Mechanical Tunneling, Raise Boring and Shaft Drilling. *Short Course*. Golden, Colorado

Plinninger, R.J., Kasling, H., Thuro, K., Spaun, G. 2003. Testing conditions and geomechanical properties influencing the Cerchar abrasiveness index (CAI) value. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40:259–263.

Plinninger, R.J., Kasling, H., Thuro, K. 2004. Wear prediction in hardrock excavation using the Cerchar abrasiveness index (CAI). *EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium*, ed. Schubert, pp. 599–604.

Rostami, J., Ozdemir, L. 1993. A new model for performance prediction of hard rock TBMs. Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference, USA, pp. 794–809.

Schimazek, T., Knatz, H. 1970. The influence of rock structures on the cutting speed and pick wear of heading machines (in German), Glücckauf, March: 275–278.

Thuro, K., Plinninger, R.J. 1999. Roadheader excavation performance-geological and geotechnical influences, 9th ISRM Congress, Theme 3: Rock dynamics and tectonophysics / Rock cutting and drilling, Department for General, Applied and Engineering Geology, Technical University of Munich, Germany. Paris, August, 25-28.

Tiryaki, B. 2000. Keski dizilim parametrelerinin tamburlu kesici-yükleyicilerin performansına etkilerinin incelenmesi. Yerbilimleri, No 22, 237-246.

Toprak, V., Keller, J., Schumacher, R. 1994. Volcanotectonic features of the Cappadocian Volcanic Province, in: Volcanological Cong. Ankara, Turkey., p. 58

Tuncdemir, H. 2002. Kollu galeri açma makinelerinin veya benzer makinelerin cevher kazısında kullanımlarının araştırılması. Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 319 s.

Delme-Patlatma

Drilling-Blasting

Kuzey Marmara Otoyolu Cebeci Tüneli Patlatma Tasarımının Bilgisayar Destekli Değerlendirilmesi

Computer-aided Evalution of Blast Design Applied in North Marmara Highway Cebeci Tunnel

T. Hüdaverdi, Ö. Akyıldız, D. Duran
İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET Bu çalışmada, tünel kesiti iki kısma ayrılarak gerçekleştirilen bir patlatma faaliyeti incelenmektedir. Araştırmanın amacı, arazide elde edilen ölçümlere dayanarak özel bir simülasyon yazılımı ile mevcut patlatma tasarımını değerlendirmektir. Ayrıca patlayıcı miktarı ve ateşleme tasarımındaki değişimin etkisi farklı senaryolar üzerinden incelenmiştir. Yapılan incelemede aynanın iki kısım halinde patlatılması sayesinde, sağ kısım patlatılırken ekstra bir serbest yüzey oluştuğu görülmüştür. Bu durum patlatma işini kolaylaştırmaktadır. Yazılım yardımıyla gerçekleştirilen simülasyonda çevre deliklerinde oluşan enerji miktarının yer yer 30 MJ/m^3 olduğu tespit edilmiştir. Aşırı söküm ihtimalini önlemek için tavan kısmındaki deliklere kontur patlayıcılar şarj edilmiş ve enerji dağılımı yeniden değerlendirilmiştir. İncelenen patlatma tasarımı için yer sarsıntısı değerlendirmesi de yapılmıştır. 1,63 kg'lık anlık patlayıcı şarjı için 25 ve 50 metrelerde tahmin edilen yer sarsıntısı seviyesi 9,8 mm/s ve 3,2 mm/s'dir. Patlatma simülasyon yazılımlarının tünel patlatmalarının ayrıntılı analizi için son derece faydalı olduğu tespit edilmiştir.

ABSTRACT In this study, a tunnel blast operation, which was performed dividing the face into two sections, has investigated. The aim of this study is to examine the blast design based on field measurements by using specific simulation software. The variation in explosive charge amount and the initiation system were also investigated considering different scenarios. Division of the face into two sections provided an extra free face during blasting of the right section of the tunnel. This technique made the blast operation more effective. The simulation has shown that energy distribution of the contour holes reaches 30 MJ/m^3 in some parts. Contour explosives were charged into roof holes to prevent over break and energy distribution re-analyzed for the new scenario. Additionally, blast induced ground vibration was also evaluated for the tunnel blast. For 1.63 kg charge weight, the expected ground vibration values are 9.8 mm/s and 3.2 mm/s for 25 m and 50 m, respectively. It is concluded that blast simulation software may be very helpful to examine the efficiency of tunnel blasts.

1 GİRİŞ

Yeraltı patlatmaları grubuna dahil olan tünel patlatmaları, kaya patlatma tekniğinin en zor uygulamalarından biridir. Tünel patlatmalarında açık ocak atımlarında olduğu gibi bir serbest yüzey mevcut değildir. Bu nedenle patlatma tasarımının ve ateşleme düzeninin dikkatle planlanması gerekir.

Ayrıca günümüzde şehir içinde gerçekleştirilen tünel patlatmalarında çevresel etki büyük önem kazanmaktadır. Mümkün olduğunca en düşük seviyede yer sarsıntısı oluşturarak çalışılmalıdır.

Tünel patlatmalarında en düşük miktarda patlayıcı kullanarak en yüksek verimliliğin elde edilmesi planlanmaktadır. Bunun yanında proje hattına uygun kesit elde edilmesi istenir. Parçalanmamış kısımlar olumsuz olduğu gibi, aşırı söküm de istenmez. Yığının parça boyutu yüklemeye elverişli olmalıdır. Desteklemeyi gerektirecek yeni çatlakların oluşması önlenmelidir. Ayrıca, atım sonrası ilerleme miktarının planlanan değere mümkün olduğunca yakın olması istenir.

Tünel atımlarında serbest yüzey oluşturmak için delikler açılı olarak delinebilir. V kesme orta çekme olarak adlandırılan teknik, açılı delik delme mantığına dayanmaktadır. Bu uygulamada, verimli bir atım için deliklerin açıları dikkatle ayarlanmalıdır. Paralel kesme (burn cut) yönteminde ise aynanın ortasında geniş çaplı bir delik veya delik grubu oluşturulur. Bu deliklerin çapı 89 veya 102 mm olabilir. Geniş delikler patlayıcı ile şarj edilmez ve patlayıcı içeren delikler için suni bir serbest yüzey vazifesi görür. Açılı delmeye oranla paralel delik delmede genel olarak daha fazla ilerleme sağlanmaktadır.

Günümüzde tünel patlatmalarında kullanılan patlayıcılar yeraltı atımları için özel olarak üretilmektedir. Ülkemizde gerçekleştirilen operasyonlarda büyük ölçüde emülsiyon patlayıcılar kullanılmaktadır. Emülsiyon kartuş patlayıcılar istenilen ebat, çap ve ağırlıkta üretilmektedir. Büyük ölçüde suya dayanıklı oldukları için verimlilikleri yüksektir. Çevre delikleri için boyları uzun çapları çok ince olan kontur patlayıcılar üretilmektedir. Kontur patlayıcılar aşırı sökümün önlenmesi amacıyla deliklere şarj edilmektedir. Ateşleme sistemi olarak elektriksiz ateşleme sistemlerinin şehir içi patlatmalarında yaygınlaştığını söylemek mümkündür.

Bu çalışma kısmı cepheli olarak gerçekleştirilen bir şehir içi tünel patlatma faaliyetini incelemektedir. Araştırma tünel patlatmaları için tasarlanan özel bir benzetim yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Özellikle patlayıcı enerji dağılımının tespiti üzerine yoğunlaşılmıştır. Ek olarak atım aynasını iki kesite ayırarak gerçekleştirilen patlatmanın avantajları üzerinde durulmuştur. Patlatma kaynaklı yer sarsıntısı için bir ön değerlendirme de yapılmıştır.

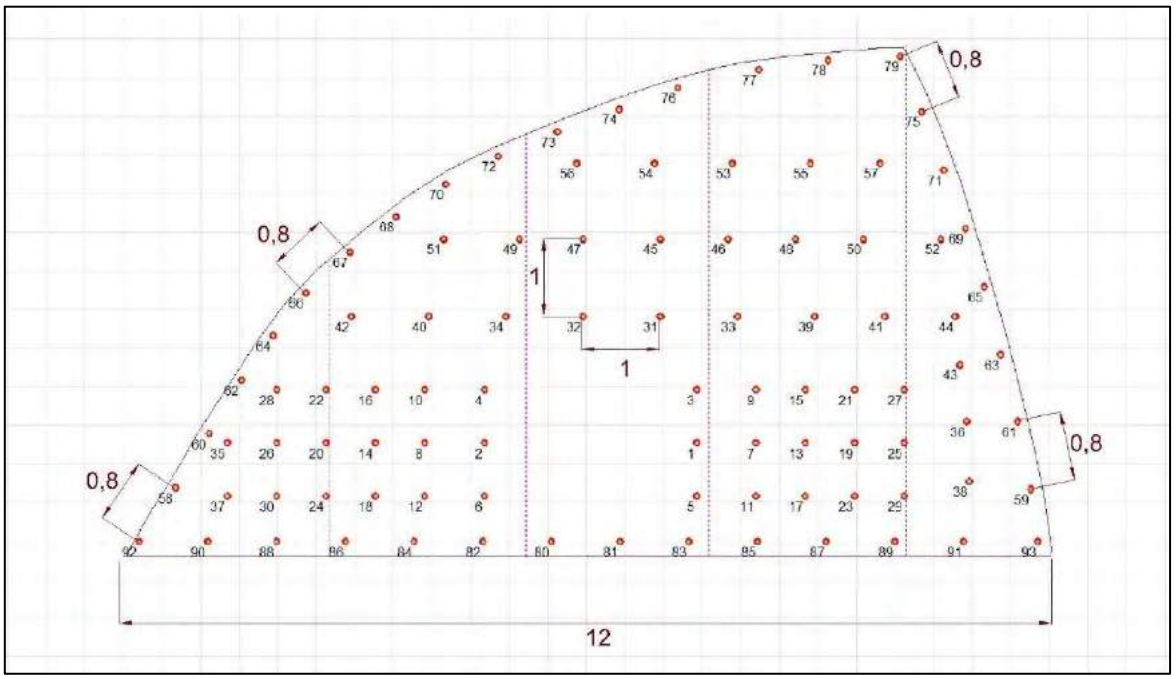
2 CEBECİ TÜNELİNDE UYGULANAN PATLATMA TEKNİĞİ

2.1 Temel Atım Tekniği ve Kullanılan Patlayıcılar

Geniş kesitli olan Cebeci tüneli alt ve üst olmak üzere iki yarıya ayrılarak patlatılmaktadır. Üst yarı tünel patlatma tekniğiyle kazılmaktadır. Alt yarı ise basamak patlatma tekniği uygulanarak kazılmaktadır. Bu bildiri tünel patlatma tekniğiyle gerçekleştirilen kazı operasyonuna odaklanmıştır. Kazılacak kesit sol ve sağ olmak üzere iki kısma ayrılarak patlatılmaktadır. Patlayıcı olarak emülsiyon tip kartuşlar kullanılmaktadır (Çizelge 1). Kartuşların ağırlığı 545 gramdır. Bir deliğe 3 adet kartuş yerleştirilmektedir. Bir delikteki patlayıcı miktarı 1,635 kg'dır. Emülsiyon patlayıcılar suya dayanıklı oldukları için verimlilikleri yüksektir. Ateşleme Nonel elektriksiz kapsüller ile gerçekleştirilmektedir.

2.2 Patlatma Tasarımı

Aşağıda Şekil 1'de sol kısmın delik düzeni görülmektedir. Patlatılacak kısım yaklaşık 55 m^2'dir. Sol kısımda toplam 93 adet delik mevcuttur. Delik çapı 45 milimetredir. Atım sırasında serbest yüzey yaratmak amacıyla bu kısımda "V" kesme atım tekniği uygulanmaktadır. Ortadaki delikler 60^o açıyla delinmektedir. Serbest yüzey orta çekme delikleriyle sağlanmaktır. Genel tünel patlatma tekniğine uygun olarak son patlayan delikler taban delikleridir (Şekil 1). Çevre deliklerinde delikler arası mesafe değeri 0,8 m civarındadır. Üst tarafta delikler arası mesafe ve dilim kalınlığı 1 metredir. Tabanda delikler arası mesafe 1─1,2 m arasında değişmektedir.



Şekil 1. Aynanın sol kısmı için delik düzeni ve ateşleme sırası

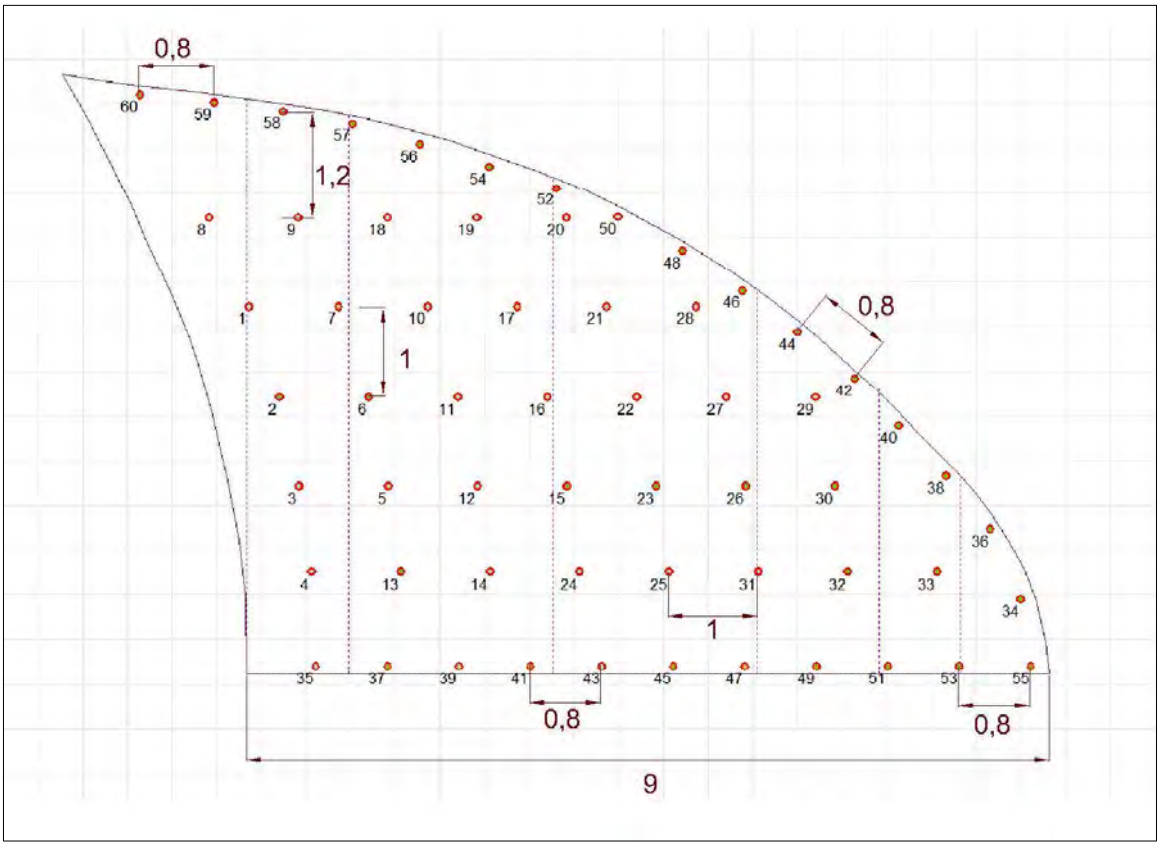
Çizelge 1. Kullanılan patlayıcının teknik ve fiziksel özellikleri

İdeal Patlama Hızı	6140 m/s
İdeal Patlama Basıncı	112900 atm
Yoğunluk	1,20 gr/cm
Suya Dayanıklılık	Çok iyi
İdeal Patlama Isısı	4370 Kj/Kg
İdeal Gaz Hacmi	873 lt/Kg
ANFO'ya göre hacimce kuvvet	%193
Boyutlar	38 x 400 mm
Ağırlık	545 gr

Şekil 2'de sağ kısmın tünel kesiti ve ateşleme düzeni görülmektedir. Sağ yarı atımında toplam 60 adet delik patlatılmaktadır. Ayanın sol tarafında boşluk oluştuğu için, bu paternde ateşleme aynanın sol tarafından başlamakta ve sağ taraftaki çevre deliklerine doğru ilerlemektedir. Taban delikleri ve çevre delikleri en son patlayan deliklerdir. Bununla birlikte en son ateşlenen delikler tavanın üst sol kısmında bulunan 56–60 No'lu çevre delikleridir. Tarama deliklerinde dilim kalınlığı ve delikler arası mesafe 1 metre civarındadır. Sol yarı atımından farklı olarak taban delikleri ve çevre deliklerinde delikler arası mesafe sabittir ve bu değer 0,8 metre olarak planlanmıştır. Sol taraf patlatmasında özgül şarj 0,91 kg/m^3 iken sağ tarafta bu değer 0,72 kg/m^3 değerine düşmüştür. İki kısım halinde patlatma, sağ bölümde metreküp başına delinen delik sayısını da azaltmaktadır. Özgül delme sol kısım atımında 1,62 m/m^3 iken, sağ yarı atımında 1,32 m/m^3 seviyesinde gerçekleşmektedir. Çizelge 2'de sağ ve sol kısım için gerçekleşen tasarım değerleri sunulmuştur.

3 PATLAYICI ENERJİ DAĞILIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Enerji dağılımının incelenmesi patlatma verimliliğinin tespiti için önem arz etmektedir. Enerji dağılımını belirleyen temel parametreler deliklerin konumu ve deliklerdeki patlayıcı miktarıdır. Enerji yoğunluğunun beklenenden düşük olması parçalanmayı zayıflatacaktır. Özellikle çevre deliklerinde gereğinden fazla enerji aşırı söküme neden olacaktır. Tünel patlatma tekniğinde genellikle orta kesme diklerinde ve taban deliklerinde üretim deliklerine göre daha fazla şarj uygulanabilir. Çevre deliklerinde aşrı sökümü önlemek için şarj yoğunluğu düşürülmektedir.



Şekil 2. Aynanın sağ kısmı için delik düzeni ve ateşleme sırası

Çizelge 2. Sağ ve sol kısım için gerçekleşen patlatma tasarım parametreleri

	Delik sayısı	Toplam Şarj (kg)	Gecikme başına maksimum şarj (kg)	Özgül delme (m/m^3)	Özgül şarj (kg/m^3)
Sol Kısım	93	152	1,635	1,67	0,91
Sağ Kısım	60	98,1	1,635	1,32	0,72

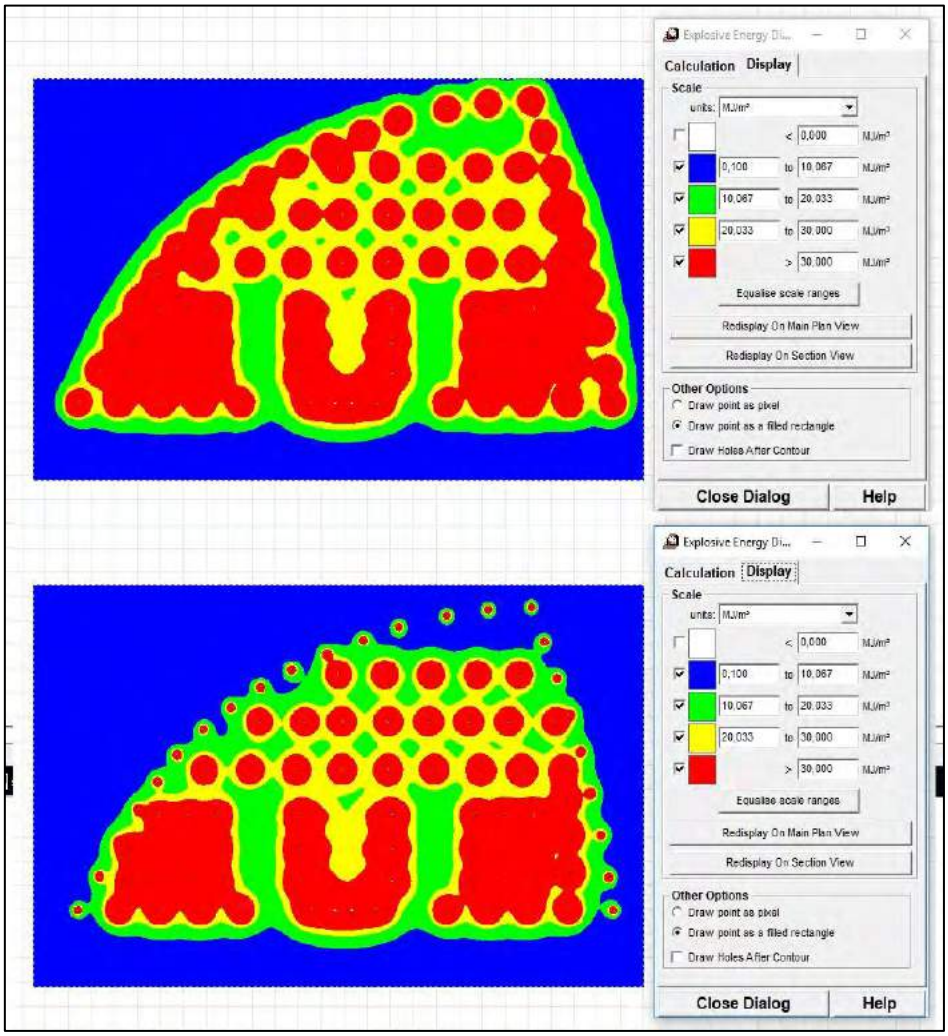
Bu bölümde, aşırı sökümün önlenmesi amacıyla, tünellerde kullanılan kontur patlayıcı çevre deliklerine yerleştirilerek enerji dağılımının nasıl değiştiği incelenmiştir. Kontur patlayıcılar tünel ve yeraltı patlatmalarında ön kesme ve son kesme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu patlayıcıların çapı, delik çapına göre daha düşüktür. Delik boyunca homojen bir enerji dağılımı sağlarlar. Bu araştırmada Trimex ticari markalı patlayıcı incelenmiştir. Kontur patlatıcının çapı 19 mm, uzunluğu ise 735 mm'dir. Yoğunluğu 1,08 gr/cm^3'dür. İdeal patlama hızı 5490 metre/saniye'dir. Patlama basıncı diğer deliklere şarj edilen emülsiyon patlayıcıya göre %28 oranında daha düşüktür. Çevre deliklerine 2 adet kontur patlayıcı yerleştirilmiştir. Şarj uzunluğu 1,47 m, şarj ağırlığı ise 440 gramdır.

Şekil 3'de sol kısım patlatma paterni için enerji dağılımı görülmektedir. JKSimBlast yazılımı atım sırasında oluşan patlayıcı enerjisini Megajoule/ton (Mj/t), Mj/m^3, kg/t gibi farklı birimlerle inceleme imkânı vermektedir. Şekil 3a'da bütün deliklerde 1,63 kg emülsiyon kartuş patlayıcı mevcuttur. Enerji dağılım ölçeğinde görüldüğü üzere orta kesmenin sağ ve sol kısmındaki tarama deliklerinde 30 Mj/m^3'den fazla enerji açığa çıkmaktadır. Üst tarama deliklerinde enerji yoğunluğu 20-30 Mj/m^3 arasında değişmektedir. Aynanın özellikle solunda çevre deliklerine çok yakın kısımda enerji yoğunluğu 30 Mj/m^3'ün üzerindedir. Bu

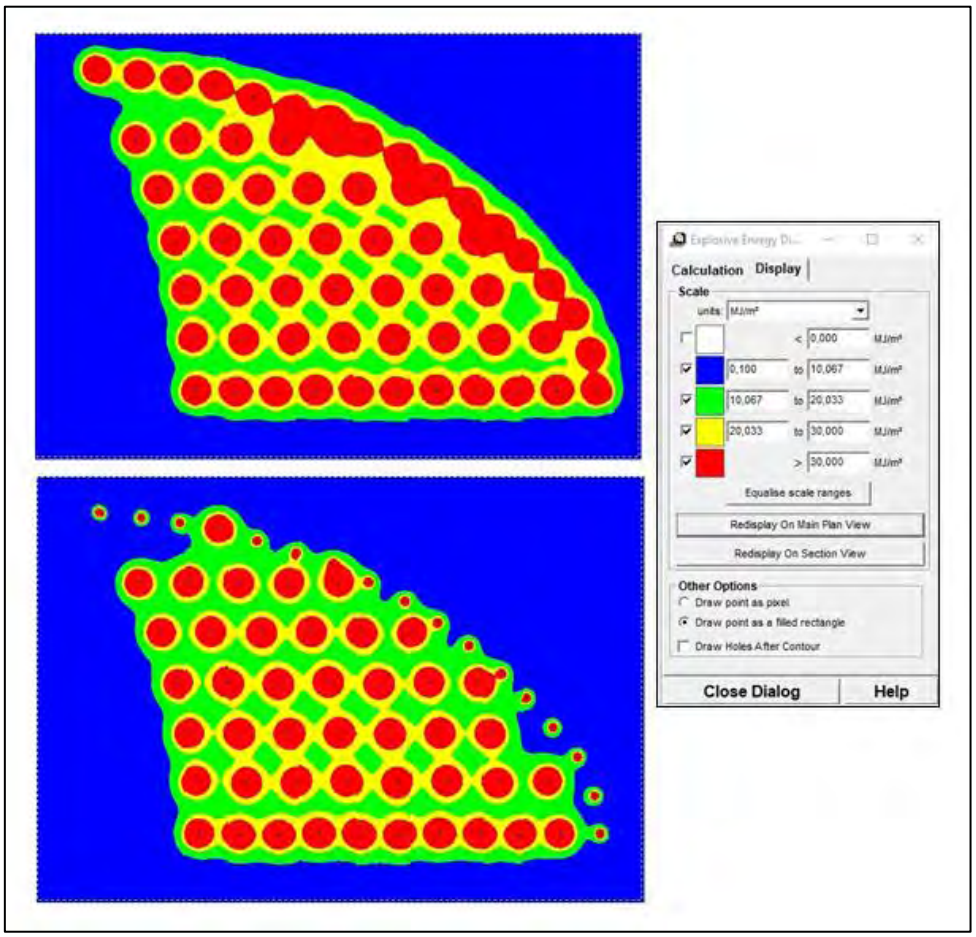
durum aşırı söküm ihtimalini güçlendirmektedir.

Şekil 3b'de ise çevre deliklerine 2 adet tünel patlatmaları için özel olarak üretilen kontur patlayıcı yerleştirilmiştir. Şarj uzunluğu yaklaşık 1,5 m, şarj ağırlığı ise 450 gr'dır. Görüldüğü gibi çevre deliklerinde enerji yoğunluğu azalmıştır. Sol ve sağ çevre deliklerinde enerji yoğunluğu 10-20 Mj/m^3 seviyesine düşmüştür. Aşırı söküm ihtimali azaltılmıştır. Bununla birlikte aynanın en ucunda bulunan 76-79 No'lu delikler civarında enerji yoğunluğu 10 Mj/m^3'ün altında düşmüştür (Şekil 3b). Deneme atımlarından sonra bu kısımda parçalamada bir zafiyet söz konusu olursa, bu kısımdaki şarj miktarı artırılabilir.

Şekil 4 de ise sağ kısım için enerji dağılımı ortaya konmuştur. Şekil 4a'da bütün deliklerde emülsiyon kartuş patlayıcı mevcuttur. Atımın genelinde enerji yoğunluğu sol kısım patlatmasına göre da düşüktür. Tarama deliklerinin ve taban deliklerinin çevresinde enerji 30 Mj/m^3 üzerindedir. Tarama bölgesindeki enerji yoğunluğu 20-30 Mj/m^3 mertebesindedir. Bu paternde de atımın sağ bölgesindeki çevre deliklerinde 30 Mj/m^3' ün üzerinde kırmızı renkle gösterilen bir enerji yoğunluğu göze çarpmaktadır. Şekil 4b'de sağ kısımdaki 17 çevre deliğine 2 adet kontur patlayıcı yerleştirilmiştir. Görüldüğü üzere bu kısımda enerji yoğunluğu yer yer 20 Mj/m^3' ün altına düşürülmüştür. Bu paternde de aynanın sol üt bölgesindeki 58, 59 ve 60 No'lu üç delik ile 38 No'lu sağ çevre deliği civarında enerji yoğunluğu tamamen 10 Mj/m^3' ün altındadır (Şekil 4b). Bu kısımda yeterli kırma gerçekleşmez ise şarj miktarının artırılması düşünülebilir.



Şekil 3. Sol kısım atımı için patlayıcı enerji dağılımı



Şekil 4. Sağ kısım atımı için patlayıcı enerji dağılımı

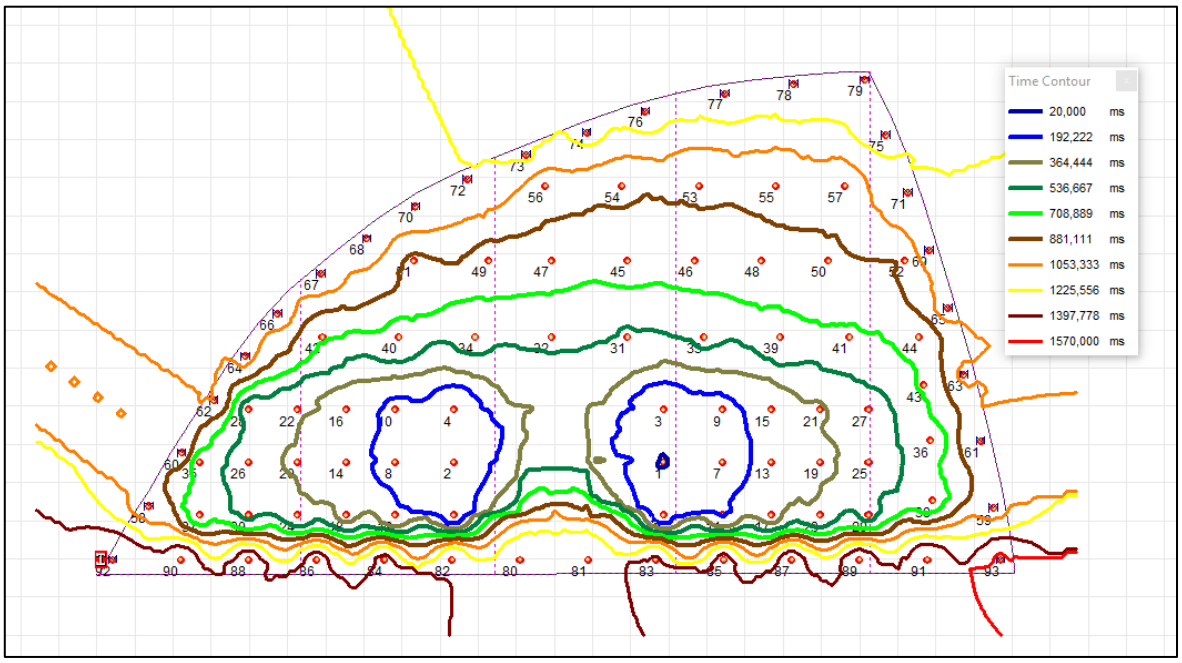
4 ATIMLAR İÇİN YER SARSINTISI KESTİRİMİ

Patlatma kaynaklı yer sarsıntısının önlenmesi için patlayıcı şarjı ve ateşleme tasarımı dikkatle belirlenmelidir. Bilgisayar yazılımları son derece karmaşık ateşleme simülasyonları geçekleştirebilirler. Çeşitli senaryoları deneyerek aynı anda patlayan delik sayısını, dolayısıyla yer sarsıntısı seviyesini düşürmek mümkündür. Şekil 5 de sol kısım atımı için yazılım yoluyla oluşturulan ateşleme konturları görülmektedir. Farklı renkli konturlar farklı ateşleme zamanlarını gösterir. Burada incelenen yüzey ateşleme zamanıdır. Delikler arası gecikme 17 milisaniye gecikmeli yüzey kapsülleri ile sağlanmıştır. Ateşleme konturları deliklerin atım anındaki, hareketini görmek için de kullanılabilir. İncelenen patlatma tasarımı için yer sarsıntısı değerlendirmesi de yapılmıştır.

Bu amaçla Uluslararası Patlayıcı Mühendisleri Birliği'nin önerdiği tahmin formülü kullanılmıştır:

$$ppv = 1{,}140\left(D/\sqrt{W}\right)^{-1{,}6} \qquad (1)$$

Yukarıdaki formülde *ppv*, mm/s cinsinden yer sarsıntısını ifade etmektedir. *D* patlatma noktası ile ölçüm istasyonu arasındaki mesafedir. W (kg) maksimum patlayan anlık şarj miktarıdır. 1,63 kg'lık anlık patlayıcı şarjı için 25 ve 50 metrelerde tahmin edilen yer sarsıntısı seviyesi 9,8 mm/s ve 3,2 mm/s'dir. Nonel kullanılarak gecikme başına tek deliğin patlatılması oluşacak yer sarsıntısının düşük kalmasını sağlamıştır. Aynı anda patlayan delik sayısının iki veya üçe çıkarılması sarsıntı seviyesini yükseltecektir. Bu senaryolar değerlendirilerek tahmini yer sarsıntısı seviyeleri Çizelge 3'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Sol kısım atımı için ateşleme konturları

Çizelge 3. Farklı anlık şarjlar için tahmini yer sarsıntısı seviyeleri

	Tahmini yer sarsıntısı seviyesi (mm/s)		
Anlık Şarj (kg)	*25 m*	*50 m*	*100 m*
1,63	9,8	3,2	1,1
3,27	17	5,6	1,9
4,90	23,6	7,8	2,6

5 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Geniş kesitli tünel atımlarında atım aynasının iki veya daha fazla parçaya ayrılarak patlatmanın planlanması sıklıkla uygulanan yöntemlerden biridir. Yapılan incelemede aynanın iki kısım halinde patlatılması sayesinde, sağ kısmın patlatılırken ekstra bir serbest yüzey oluşturulduğu tespit edilmiştir. Aynanın sağ kısmı sol tarafta daha önce patlatılmış boşluğa doğru ilerlemektedir. Bu durum patlatma işini kolaylaştırmaktadır. Kullanılan patlayıcı miktarı düşmektedir. Böylece kullanılan patlayıcı miktarı ve delik delme miktarında nispi düşüş sağlanmaktadır. Sağ kısım atım paterninde özgül şarj %18 seviyesinde daha düşüktür. Yine sağ tarafta metreküp başına delme miktarı %21 oranında sol tarafa göre daha düşüktür.

Uygulanan patern için tahmin edilen yer sarsıntısı seviyesi 50 m için 3,2 mm/s gibi düşük bir değerdir. Düşük yer sarsıntısını sağlayan en önemli unsur gecikme başına patlayan şarjın yalnızca bir delik olmasıdır. Elektriksiz ateşleme sistemleri yeraltı patlatmalarında sınırsız gecikme aralığı yaratma imkanı vermektedir. Şehir içi tünel patlatmalarında mutlaka elektriksiz ateşleme sistemleri kullanılmalı, ihtiyaç duyulduğunda elektronik kapsüllerden faydalanılmalıdır.

Bilgisayar yazılımlarının en büyük avantajlarından biri enerji dağılımının incelenmesine imkan vermesidir. Bu çalışmada mevcut paternin enerji dağılımı incelenmiş, ek olarak çevre deliklerine kontur patlayıcı yerleştirilmesi durumunda ortaya çıkacak sonuçlar irdelenmiştir. Özellikle tünel atımları için geliştirilen patlayıcılar ile çevre deliklerinde enerji dağılımı yer yer 10 Mj/m^3'ün altına düşürülmüştür.

Özellikle kentsel bölgelerde gerçekleştirilen tünel patlatmaları titizlikle planlanmalıdır. Patlatma verimliliği yanında çevresel etkilerin ve ateşleme düzeninin de simülasyon yazılımlarıyla atım öncesi analizi büyük fayda sağlayacaktır. Bilgisayar yazılımları tasarım aşamasının yanı sıra, özellikle proje boyunca atım verimliliğin her aşamada kontrolü için kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

Stiehr J.F., Dean J.L. (Eds) 2011. ISEE Blasters' Handbook 18th Edition, International Society of Explosives Engineering, Cleveland, Ohio.

Persson, P.A., Holmberg, R., Lee, J. 1993. Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, Boca Raton, Fla.

JKSimBlast User Manuel, 2006. Soft-Blast Pty Ltd, Queensland, Australia.

AKH Demiryolu Projesi Kapsamında Gerçekleştirilen Patlatmalı Tünel Kazılarında Yelpaze Çekme Metodunun Uygulanması ve Değerlendirilmesi

Implementation of Fan-Cut Method in Tunnel Excavations by Drilling and Blasting within the Scope of AKH Railway Project

E. Alan, D. Şimşek, A. Domaç
Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş., Kombolcha, Etiyopya

ÖZET Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş. tarafından yapımı devam eden Awash-Kombolcha-Hara Gebaya (AKH) Demiryolu Projesi kapsamında konvansiyonel sistem ile kazı yapılmakta, kaya tünellerinde kazı yaparken delme-patlatma teknolojisinden faydalanılmaktadır. Tasarım yapılırken Langefors, Kihlström ve Olofsson formüllerinden faydalanılmıştır.

Standart kesit tünellerde V kesme metodu uygulanarak yapılan patlatmalı kazılarda –tünel kesiti ve öngörülen ilerleme/atım kısıtlarından dolayı- yeterli ilerleme ve öteleme sağlanmamış, tabanda ve özellikle dip köşelerde sorunlarla karşılaşılmıştır. Bu sorunları bertaraf etmek için Yelpaze kesme içeren alternatif patern hazırlanıp uygulanmış, sorunlar giderilmiştir.

Standart kesit tünellerde delme-patlatma yöntemi ile kaya kazısı yaparken uygulanan Yelpaze kesme tasarımı ve uygulama sonuçları bu bildiride sunulmaktadır.

ABSTRACT During the tunnel excavation works of Awash–Kombolcha –Hara Gebaya (AKH) Railway Project, which is being constructed by Yapı Merkezi Cons. & Ind. Inc. with conventional system, drilling and blasting method is being used in rock formations. Langefors, Kihlström and Olofsson formulas are used for designing of the patterns.

In standart section tunnels due to the poor advance and mass movement V-Cut method was insufficient according to the estimated advance values and shot numbers. Problems encountered at the bottoms and corners. In order to solve these problems an alternative Fun-Cut pattern designed and used successfully.

In this study the Fan-Cut method, which has been designed and used for standart section tunnel excavations by drilling and blasting, and the results of the applications are presented.

1 GİRİŞ

Amik Ovası'ndan Türkiye'ye giriş yaparak ülkemizde "Doğu Anadolu Fay Hattı" ismini alan dünyanın en büyük fay hattı olarak bilinen Rift Vadisi'nin başladığı, 3,2 milyon yaşındaki Lucy'nin vatanı, Afrika Kıtası'nda sömürge edilememiş tek ülke olan Habeşistan topraklarında 1993'de yapılan halk oylaması sonucu kurulan, kahvenin anavatanı olan Etiyopya'daki AKH Demiryolu Projesi (Proje) inşası devam etmektedir. Proje güzergâhında mağmatik kayaçlar hakîmdir. Kaya formasyonlarda kazı yaparken mekanik yöntemler ve delme-patlatma teknolojisinden optimum seviyede faydalanılmaktadır.

Yer altı ve yer üstündeki her ortamda (su, kaya, duraylı/duraysız/viskoz zemin vs.) inşa edilen, giriş ve çıkışı olan sanat/mühendislik yapıları "Tünel" olarak tanımlanmaktadır. Kaya formasyonlarda tünel inşa ederken mekanik kazı, teknik ve/veya ekonomik açıdan uygun değilse delme-patlatma ile kazı kaçınılmazdır. Langefors (Langefors ve Kihlström 1979) ve Olofsson (Olofsson 2002) formüllerinden faydalanılarak başlangıç paternleri hazırlanan Proje'de, başlangıç paternleri reel şartlara uygun olarak revize edilmiş; Fan-Cut, Burn Cut, V-Cut yöntemleri ifa edilerek başarılı sonuçlara ulaşılmıştır.

2 GENEL BİLGİLER

2.1 AKH Demiryolu Projesi

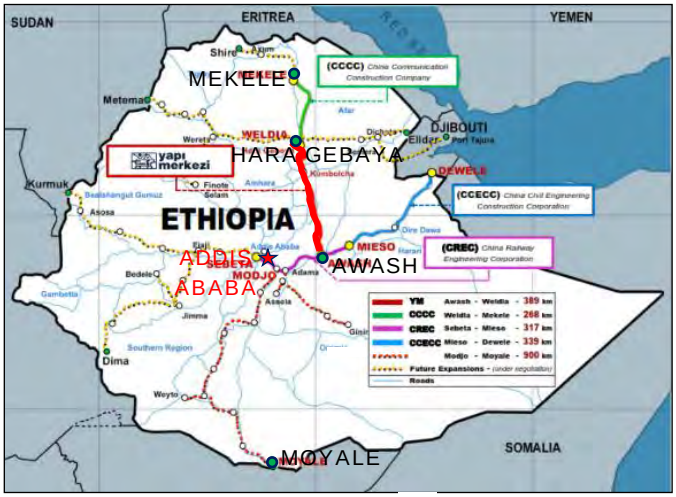
Proje tasarımı Yapı Merkezi tarafından yapılmakta, imalatlar devam etmektedir. Demiryolu güzergâhı Awash'dan başlamakta, Amibara, Shewarobit, Senbete, Karakore, Mekoy, Kombolcha, Haik, Mersa'dan geçip Hara Gebaya'da sona ermektedir (Şek. 1, 2).

Bünyesinde 10 adet istasyon (Çiz. 1) bulunan demiryolu hattı, Etiyopya halkına raylı sistem ile hem emniyetli, konforlu ve hızlı ulaşım imkânı sunacak hem de yük-eşya vs. taşıyarak ülke ekonomisine ve kalkınmasına büyük katkı sağlayacaktır.

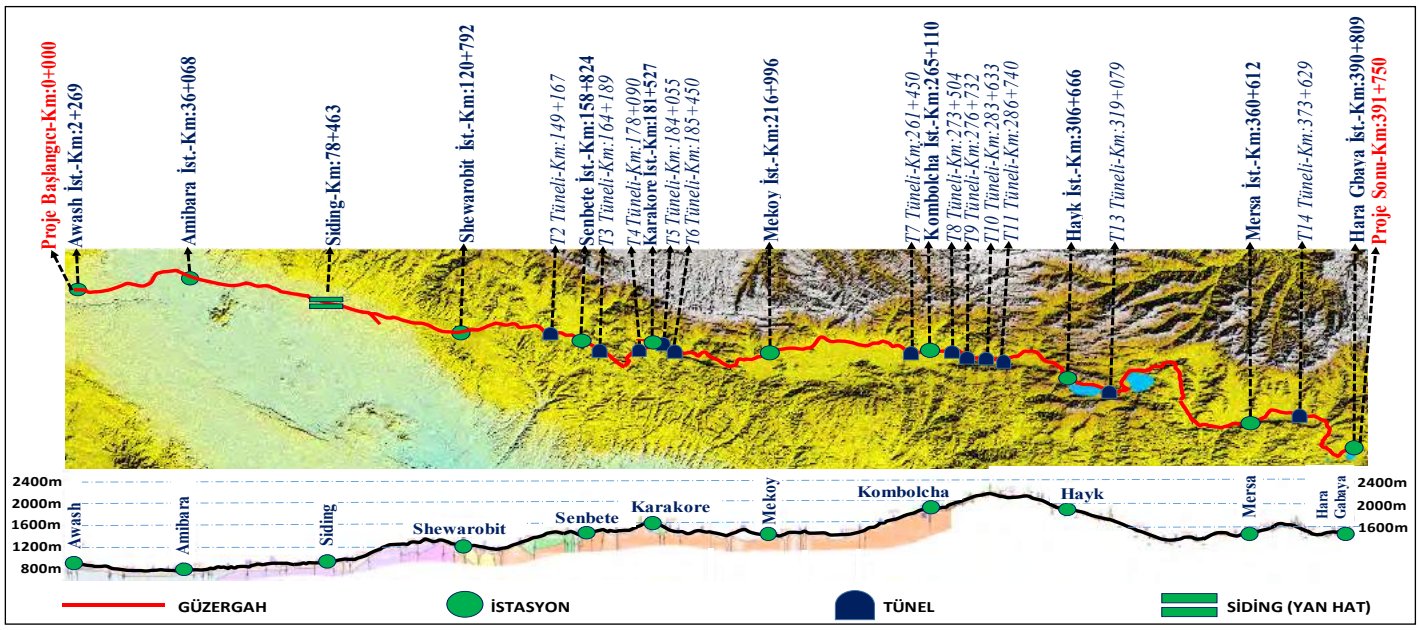
İşvereni Ethiopian Railway Corporation (ERC), müşaviri SYSTRA - MD olan projemiz kapsamında 1. etapta (Km:0+000-Km:270+500) 6 adet, 2. etapta (Km:270+500-Km:391+750) ise 6 adet daha olmak üzere toplam 12 adet tünel bulunmaktadır (Şek. 2). Tünel yapım metodu olarak Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM-New Austrian Tunelling Method) uygulanmaktadır. 1. etapta bulunan tünellerin imalatları tamamlanmış olup 2. etapta yer alan tünellerin imalatları devam etmektedir.

Çizelge 1. Proje hakkında genel bilgiler

Hat uzunluğu	Direkt hat uzunluğu	391,75	km
	İstasyon, Siding vd. dahil hat uzunluğu	446	km
Proje hızı	Yolcu taşımacılığı	120	km/sa
	Yük taşımacılığı	80	km/sa
Tünel bilgileri	Tünel sayısı	12	adet
	Toplam tünel uzunluğu	10.641	m
Köprü-viyadük bilgileri	Köprü-viyadük sayısı	55	adet
	Köprü-viyadük uzunluğu	6.274	m
Üst geçit bilgileri	Üst geçit sayısı	10	adet
	Toplam üst geçit uzunluğu	569	m
Alt geçit bilgileri	Alt geçit sayısı	1	adet
	Alt geçit uzunluğu	60	m
Menfez bilgileri	Menfez sayısı	874	adet
	Toplam menfez uzunluğu	44.390	m
İstasyon sayısı		10	adet
Toprak işleri miktarı (Kazı + Dolgu)		~90x10^6	m^3



Şekil 1. Awash – Kombolcha - Hara Gebaya Demiryolu Proje güzergâhının Etiyopya haritası üzerinde görünümü



Şekil 2. AKH Demiryolu Projesi güzergâhı yerleşimi ve planlanan istasyonlar

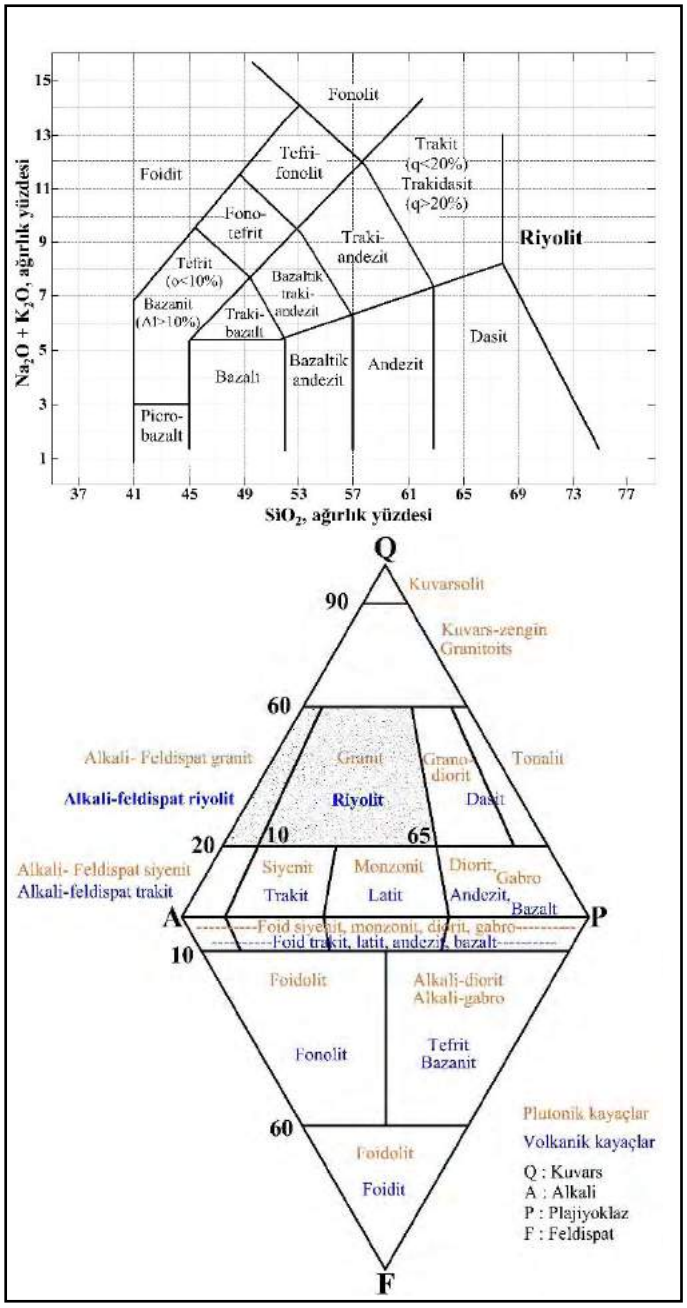
3 AKH DEMİRYOLU PROJE GÜZERGÂHININ JEOLOJİK YAPISI

AKH Demiryolu Proje güzergâhında Ancharo ve Ashangi Formasyonları hâkimdir.

3.1 Ancharo Formasyonu

Ancharo Formasyonu; Oliosen-Miosen (~33,90-5,33 milyon yıl önce) isimli jeolojik zamanlarda oluşmuştur. Volkanizma ile oluşmuş asit magmatik kayaçları (Şek. 3) kapsar. Bu formasyon içerisindeki litolojiler; riyolitik lav akıntısı, camsı bazalt, pumis, asidik ignimbirit/aglomera.

Ancharo Formasyonu içerisinde inşa edilen T4 Tüneli'nin geoteknik değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. T4 Tüneli'nde patlatmalı kazı yapılan Riyolit sağlam kayaç (ISRM, International Society for Rock Mechanics) olup dolgusuz ve kapalı süreksizlikler içerir.



Şekil 3. Mağmatik kayaçların sınıflandırılması (Streckeisen, 1973)

Çizelge 2. T4 Tüneli güzergâhının geoteknik değerleri (Ancharo Formasyonu)

Mühendislik özellikleri	Simge	Değerler	Birim
Kaya yoğunluğu	γ	2,62	t/m^3
Kaya kalite göstergesi	RQD	66,00	%
Statik elastisite modülü	$Ei_{(s)}$	15,00	GPa
Elastisite modülü	$E_{(m)}$	1.000,00	MPa
Kayanın içsel sürtünme açısı	ϕ	46,00	°
Kohezyon kuvveti	c	100,00	kPa
Poisson oranı	ν	0,23	---
Kesme dayanımı	c_m	900,00	kPa
Tek eksenli basınç dayanımı	σ_{yb}	5,78	MPa
Kaya maddesinin tek eksenli basınç dayanımı	σ_{lab}	89,00	MPa

3.2 Ashangi Formasyonu

Ashangi Formasyonu; Eosen-Oligosen (~56,00-23,03 milyon yıl önce) olarak adlandırılan jeolojik zamanlarda oluşan traki bazalt ve traki andezit isimli kayaçlardan oluşmuştur. Ashangi formasyonu içerisindeki litolojiler: Traki bazalt, Porfiri bazalt, Traki andezit, Bazaltik ignimbirit/aglomera. Kaya sınıflama sistemi olarak tünellerde RMR kullanılmakta, RMR (Çiz. 3) ve TBD (Şek. 5) değerine göre kazı ve tahkimat yapılmaktadır.

Çizelge 3. RMR değerine göre uygulanan tünel kazı ve tahkimatı (Erkoç, 2010)

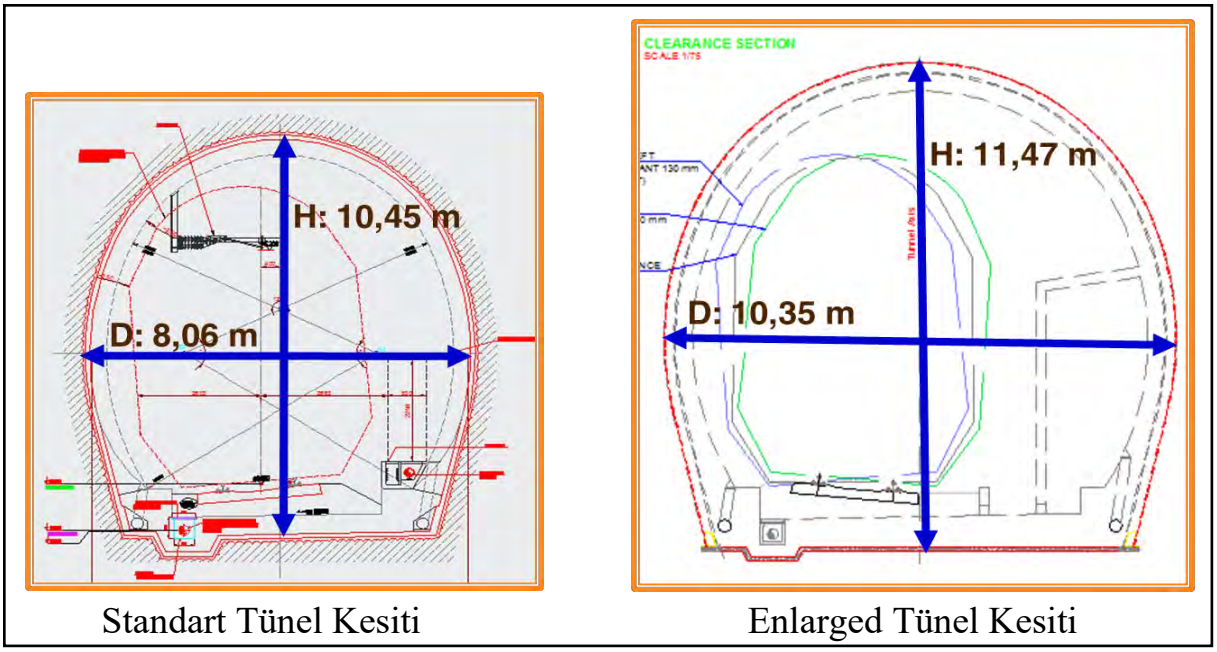
RMR değeri	Kaya kalitesi	Patlatmalı kazı gerekliliği
0-20	A5-Çok zayıf	Patlatmaya gerek yok
21-40	A4-Zayıf	Gevşetme patlatması, paterne gerek yok.
41-60	A3-Orta	Patlatma var, ilerleme uzun olmayabilir. Fazla kazı çıkabilir, destekleme gerekmez.
61-80	A2-İyi	Patlatma var. Patlat, patlat, destekle
81-100	A1-Çok iyi	Patlat, ……. destekle

4 PROJE KAPSAMINDAKİ TÜNELLERE AİT BİLGİLER (1. ETAP)

Projedeki demiryolu tünelleri Standart kesit (içinde kaçış yolu bulunmayan dar kesit tünel) ve Enlarged kesit (bünyesinde insan kaçış yolu bulunan, boyu 1 km'den uzun olan geniş kesitli tünel) olarak adlandırılmıştır (Şek. 4). Kaçış tünelleri; işletme sırasında tünelde olası bir yangın esnasında yolcuların emniyetli ve hızla tünellerden tahliye olabilmeleri içindir.

Proje'de 1. etaptaki tünellerin maksimum örtü kalınlıkları 42-322 m arasındadır. Üzerindeki sarp için T4 Tüneli'nde kazılacak formasyonun jeolojik ve geoteknik bilgileri tünel içinden yapılan sismik yöntem araziden dolayı planlanan düşey sondaj noktalarına ulaşılamadığı ile (TSP-Tunnel Seismic Prediction) elde edilmiştir. Formasyonların mühendislik özelliklerine ve değerlerine göre, tahkimat tipi ve tünel kesitleri 5 grupta tasarlanarak inşa edilmektedir.

Proje güzergâhının Faz-1 kısmında imalatı tamamlanan tünellere ait bilgiler Çizelge 4 ve Çizelge 5'de yer almaktadır.



Standart Tünel Kesiti — Enlarged Tünel Kesiti

Şekil 4. AKH Demiyolu Projesi'nde tünel kesitleri boyutları

Çizelge 4. Tünel kazı kesitleri

Tünel Tip Kesitleri	Kazı alanları (m^2/m)			
	Üst yarı (m^2)	Alt yarı (m^2)	Taban (m^2)	Toplam alan (m^2)
A5 Enlarged-max.	67,164	28,966	5,226	101,356
A5 Enlarged-ort.	62,856	28,966	5,226	97,047
A5 Enlarged-min.	58,548	28,964	5,226	92,738
A4 Enlarged	56,560	29,686	5,226	91,742
A3 Enlarged	53,140	29,360	-	82,500
A5 Standart-max.	45,876	30,464	2,198	78,538
A5 Standart-ort.	41,465	30,422	2,198	74,084
A5 Standart-min.	37,054	30,378	2,198	69,630
A4 Standart	44,440	21,670	2,198	68,308
A3 Standart	43,420	19,310	-	62,730
A2 Standart	-	-	-	62,000
A1 Standart	-	-	-	61,270

Çizelge 5. İmalatı tamamlanmış olan tünellere ait bilgiler

Tüneller	Başlangıç Km	Bitiş Km	Tünel uzunluğu (m)	Maksimum örtü kalınlığı (m)	Formasyon & Kaya adı	*Kaya sınıflarına göre tünel uzunlukları* A5 RMR (<20) (m)	A4 RMR (20-40) (m)	A3 RMR (40-60) (m)	A2 RMR (60-80) (m)	A1 RMR (80-100) (m)	TOPLAM (m)
T2 Tüneli Standart Kesit	149+167	149+355	187,00	42	Bazalt	-	187,00	-	-	-	187,00
T3 Tüneli Standart Kesit	164+189	164+545	385,00	47	Bazalt	-	86,50	298,50	-	-	385,00
T4 Tüneli Standart Kesit	178+090	179+620	1.000,90	322	Riyolit	-	201.,20	799,70	-	-	1.000,90
T4 Tüneli Enlarge Kesit	-	-	525,50	-	Kil	207,00	318,50	-	-	-	525,50
T5 Tüneli Standart Kesit	184+055	184+458	403,00	44	Riyolit	-	282,70	120,30	-	-	403,00
T6 Tüneli Standart Kesit	185+450	185+772	326,05	80	Riyolit	-	326,05	-	-	-	326,05
T7 Tüneli Standart Kesit	261+450	261+737	287,00	49	Bazalt	-	176,85	110,15	-	-	287,00
Standart Kesit-Toplam tünel uzunluğu			2.588,95			-	1.261,30	1.328,65	-	-	2.588,95
Enlarge Kesit-Toplam tünel uzunluğu			525,50			207,00	318,50	-	-	-	525,50
Genel Toplam tünel uzunluğu			3.114,45			207,00	1.578,80	1.328,65	-	-	3.114,45
RMR değerine göre tünel uzunlukları (%)						6.65%	50.69%	42.66%	0%	0%	100%

5 PATLATMALAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Mekanik yöntem ile kazılması teknik ve/veya ekonomik açıdan uygun olmayan kayaçları ana kütleden koparmada alternatif bir yöntem olan patlatmalı kazı tekniği, günümüzde yoğun olarak kullanılmaktadır. Sivil patlayıcı maddeler kullanarak uygulanan bu yöntem; uygulamada elde edilen tecrübe, teknolojideki gelişmeler ve ilk yatırım maliyetinin düşük olması sebepleri ile tercih edilmektedir.

Çevreden herhangi bir maddenin katkısı olmadan, ısı, basınç, darbe, şok ve/veya elektrik akımı etkisi ile ses üstü hızda (>343 m/s) kimyasal reaksiyona girerek ani yüksek sıcaklık ile birlikte büyük hacimlerde gaza dönüşebilen; katı, sıvı veya gaz haldeki, organik veya inorganik, kimyasal bileşim ve/veya karışımlara "Patlayıcı Madde" denir (Alan 2013). Patlayıcı maddelerin reaksiyonu sonucu meydana gelen olaya "Patlama" denir.

Patlayıcı maddeler, ısı, darbe, şok vb. etkilerle detonasyona uğradıklarında oluşan yüksek basınçlı şok dalgaları reaksiyon zonu ve Chapman-Jouget düzlemi önünde yer alır. Bu şok dalgaları patlayıcı madde atomlarının iyon hale geçmesini sağlayarak patlayıcı madde kolonu içerisinde ilerler (detonasyon devam eder). Reaksiyonunun tamamlandığı bölgede oluşan gazlar genleşerek kayaya yüksek basınçta kuvvet uygular. Detonasyon sonucu oluşan ve kayaca 280.422 kg/cm^2'ye kadar basınç uygulayan (Orica Sweden, SEB Course, 2016) şok dalgaları kayaç içerisinde ilerlerken kayaçtaki mikro çatlakları geliştirir, daha büyük çatlaklar oluşturur. Süreksizlik, serbest yüzey, dokanak, su vb. nedenlerle bir kısmı yansıyan şok dalgaları kayanın dayanımını yenemeyecek aşamaya gelene kadar kırma devam eder. Şok dalgasının kayayı kıracak enerjisi kalmadığında kayıp enerji olarak sönümlenene kadar formasyon içerisinde hareket eder. Yüksek basınçlı büyük hacimli gazlar (1 kg patlayıcı detone olduğunda ~850-1.000 litre gaz açığa çıkarır) kaya içerisinde mevcut ve/veya şok dalgalarının oluşturduğu çatlaklara dolarak kama etkisi ile kayacı kırar ve öteler.

Patlatma sonucu oluşan enerjiler, kullanım açısından Faydalı enerji (Şok ve Gaz enerjisi) ve Kayıp enerji (Isı, Işık, Ses ve Sismik enerjileri) olarak kategorize edilmektedir.

5.1 Patlatmalı Tünel Kazıları

Patlatmalı tünel kazısı yapılacak ortamlarda üst yarıda ve tam kesit patlatmalarda tek, alt yarıda yapılan patlatmalı kazılarda iki serbest yüzey olduğu, dar kesitlerde çalışıldığı için yüzey patlatmalarına göre daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Tünellerde yapılan patlatmalı kazılarda ikinci ve üçüncü serbest yüzeyler, patlatma ile oluşturulmaktadır. Kesme bölgeleri geometrik konumlarına göre adlandırılmakta olup patlatmalı tünel kazısı yaparken Yelpaze kesme, Paralel çekme, V çekme, Piramit çekme yöntemleri tek tek veya kombine halde uygulanmaktadır. Projede tamamlanış olan patlatmalı tünel kazılarında Yelpaze çekme (Fan-cut) metodu yoğun olarak ifa edilmiştir.

5.2 Patlatmalı Tünel Kazılarında Önemli Parametreler

Patlatmalı tünel kazısı tasarımı yaparken kontrol edilebilir parametreler ve kontrol edilemeyen parametreler etkindir. Kontrol edilemeyen etkenlerden biri olan formasyon; kontrol edilebilir parametreleri (delik boyu, delik çapı, özgül şarj, özgül delgi, patlayıcı madde seçimi, çevre, ortam, verim vd.) doğrudan etkilemekte olup tüm parametreler birlikte değerlendirilmektedir.

Formasyon: Tünel kazı işlerinde kontrol edilemeyen faktörlerden biri olan formasyon, uygulanacak kazı yöntemini/yöntemlerini; buna bağlı olarak kazı adımını (ring boyu), delik çapı, özgül şarj vd. delme-patlatma parametrelerinin sayısal değerini kontrol eder.

Delik Çapı: Patlatmalı tünel kazılarında ihtiyaç duyulan delikler önceden tasarlanan paterne uygun ve optimum çapta delinmelidir. Patlayıcı madde şarj yoğunluğunu (kg/m) kontrol eden delik çapı arttıkça enerji yoğunluğu artar. Büyük çaplı delikler; sarsıntıyı, pasanın savrulmasını ve örselenmeyi arttırdığı için delik çapının belirlenmesinde parametrelerin çok hassas değerlendirilmesi gerekmektedir. Genellikle; sehpalı tabancayla delinen deliklerin çapı 32-38 mm arasında, jumboların deldiği deliklerin çapları ise 38-51 mm arasında tercih edilir.

Delik Boyu: Tünel kazı işlerinde amaç, emniyetli, hızlı ve ekonomik ilerleme sağlamaktır. Kontrollü tünel patlatmaları yapılarak kazılan tünellerde ilerleme hızını, delik boyu belirlemektedir. Fakat delik boyunu formasyon (kaya madde ve kaya kütle kalitesi, kil ve su muhtevası, mühendislik özellikleri, süreksizlikler arası dolgu, örtü kalınlığı vs) tünel kesiti, yapısal hasar riski, imkân, kısıt, konum vs. sınırlandırmaktadır. Patlatmalı tünel kazısı yaparken delik boyunun, tünel genişliğinin %50'sinden büyük olmaması hedeflenir. Patlatmalı tünel kazılarında delik boyu uzadıkça tabanca yanaşma boşluğu (L=10 cm+3 cm/m delik boyu) ve istenmeyen kazı da artmaktadır.

Özgül Şarj: $1m^3$ kayayı, ana kayadan koparıp ötelemek için sarf edilen patlayıcı madde miktarına "özgül şarj" denilmekte olup birimi "kg/m^3"tür. Özgül şarjı etkileyen temel faktörler; jeolojik yapı (formasyon, zonlar, süreksizlikler, tabakaların yönü ve doğrultusu vd.), geoteknik parametreler (RQD, RMR, kayaç dayanımı vd.), tünel kesiti, delik boyu ve çapı, hafriyatın ardışık işlerde kullanılması vd. Tünel kesit alanı, delik çapı ve kaya türü özgül şarj miktarını doğrudan etkilemekte olup, sert kayaçlarda bu miktar artmaktadır.

Özgül Delgi: 1 m^3 kayacı ana kayadan patlatarak koparabilmek için ihtiyacımız olan delik uzunluğuna "özgül delgi" denir, birimi "m/m^3"tür. Delik delme süresini, patlayıcı madde ve sıkılama şarj süresini, delgi makinası ve delme ekipmanı maliyetini (amortisman, tamir, bakım, onarım, yedek parça, diğer direkt ve endirekt maliyetler), kapsül sayısı ve patlayıcı madde sarfiyatını, özetle patlatmalı kazı maliyetini ve ardışık işlemler maliyetini doğrudan etkilemektedir. Özgül delgi miktarını; tünel kesit alanı, kesme metodu, delik çapı ve hafriyatı yükleyecek makine özellikleri belirleyici etkenlerdendir. Delik çapı küçüldükçe bir ilerlemede delinecek delik sayısı ve toplam delik uzunluğu artmakta; delik çapı büyüdükçe delinecek sayısı ve delik uzunluğu azalmakta, hafriyattaki kayaların boyutu büyümektedir.

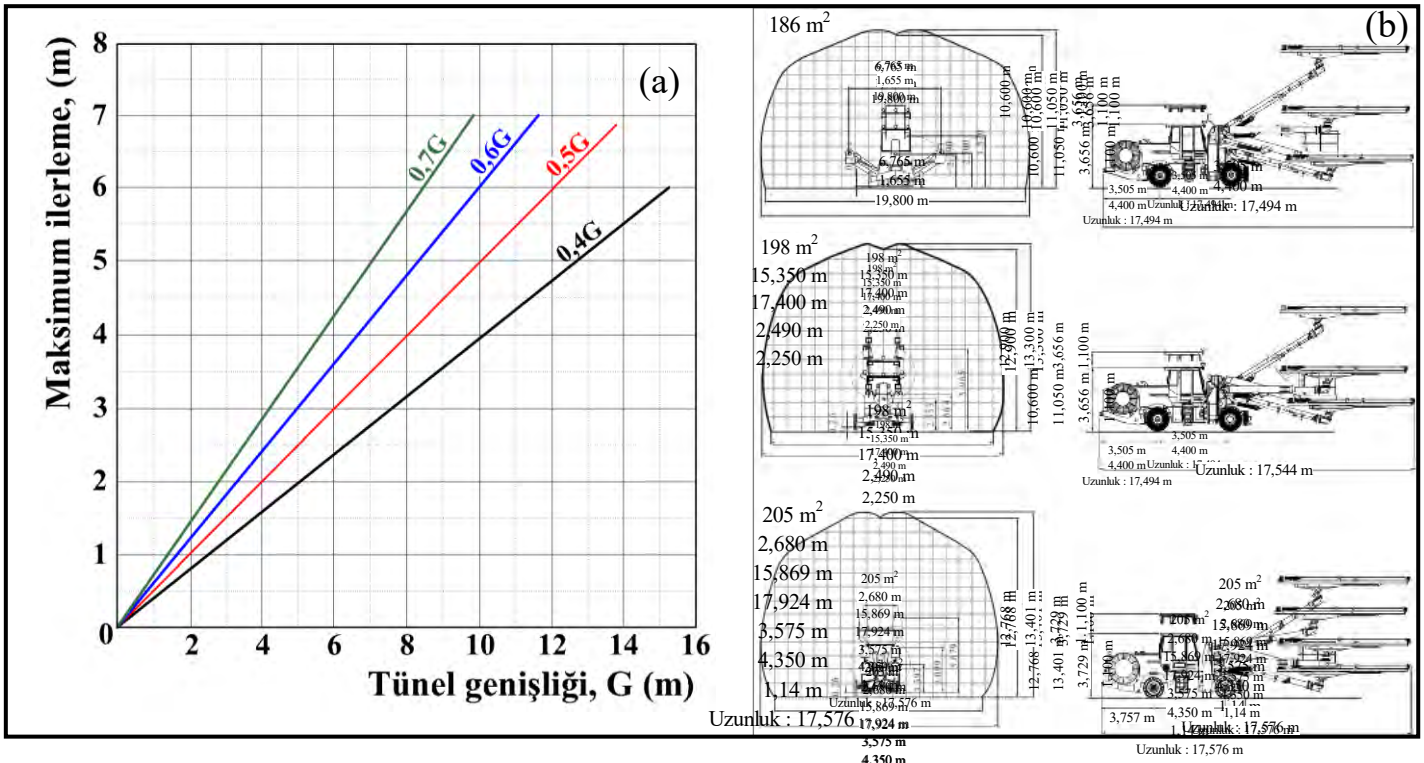
5.3 Orta Kesme (V-Cut) ve Yelpaze Kesme (Fan-Cut) Yöntemi

Yeraltı patlatma tasarımlarında uygulanan kesme yöntemlerinin temel prensibi, önceden tasarlanan paterne uygun olarak tünel aynasında delinen kesme deliklerinin kontrollü patlatılması ile ikinci serbest yüzeyi oluşturmaktır. Kesme bölgesi dışındaki delikler planlanan sıra ile ateşlenerek serbest yüzeye doğru patlatma gerçekleştirilir.

Fan-Cut, V-Cut uygulamasının asimetrik halidir. V-Cut ve Fan-Cut uygulamasındaki temel prensipler aşağıda açıklanmıştır;

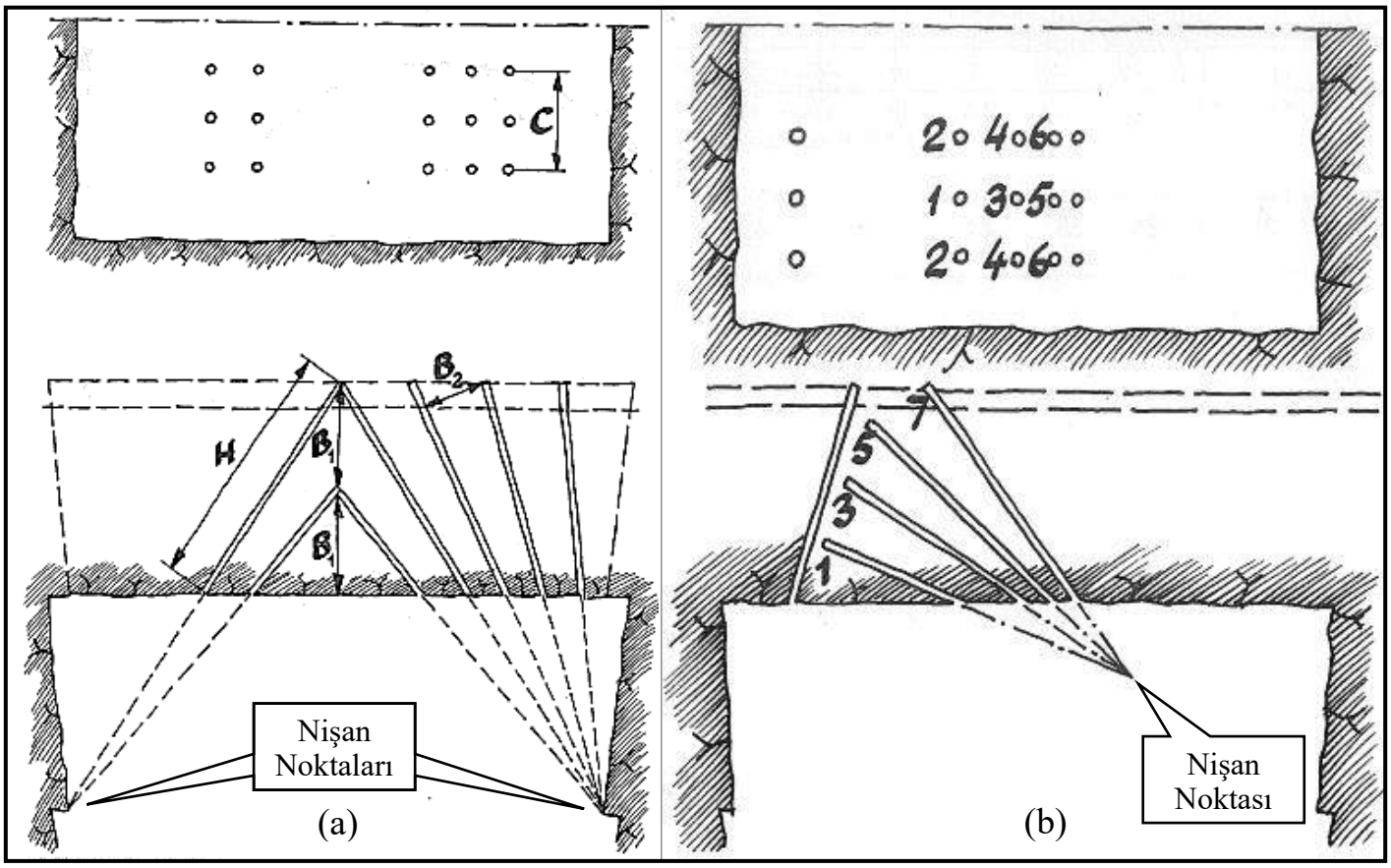
- Kesme açısının (iç açı) minimum 60 derece olması önerilmektedir. Kesme açısı 60 dereceden yüksek olduğunda patlatma verimi artar. Kesme açısı 60 dereceden küçük ise özgül patlayıcı madde sarfiyatı ve patlatma maliyeti yükselir. Böyle durumlarda alternatif kesme yöntemleri değerlendirilmelidir.
- Patlayıcı ve kapsülün olumsuz etkisini (duyarsızlaşma/sağırlaşma/desensitizasyon, ateşleme, ateş alma vd. riskler) bertaraf etmek için kesme deliklerinin dip kısımları arasında minimum 30 cm mesafe olmalıdır.
- Kapsül ateşlendikten sonra hafriyatın kesme bölgesindeki boşluğu kilitlenmeden terk edebilmesi için, ardışık patlayacak delikler arasında yeterli gecikme süresi bulunmalıdır. Parçalanmış olan kayanın aynadan çıkış hızının; tünellerde 40-100 m/s, açık işletmelerde yapılan patlatmalarda 10-30 m/sn olduğu tespit edilmiştir (Alan 2001). Paternler tasarlanırken parçalanmış kayanın delikten çıkış hızı dikkate alınarak kapsül gecikme aralıkları itina ile belirlenmelidir.
- Teorik olarak tünel genişliğinin %40-70'i aralığında delik boyu (ilerleme uzunluğu, m/atım) hedeflenmelidir (Erkoç 1990).
- Tünel aynasına delinecek delikler önceden tasarlanan paterne uygun olarak delinmeli, deliklerin şarjı, sıkılaması ve bağlantısı da paternde belirtildiği gibi ifa edilmelidir.

Aşağıdaki tünel genişliği-maksimum ilerleme grafiğinde (Şek. 5a) görüldüğü üzere delme-patlatma teknolojisi kullanarak tünellerde yapılacak kazılar tünel genişliği ile girifttir. Tünel maliyetine doğrudan etki eden ilerleme hızını maksimum seviyede tutmak için delici makinalar tünel kesiti, amaç ve patlatma metoduna uygun olmalıdır (Şek.5b).

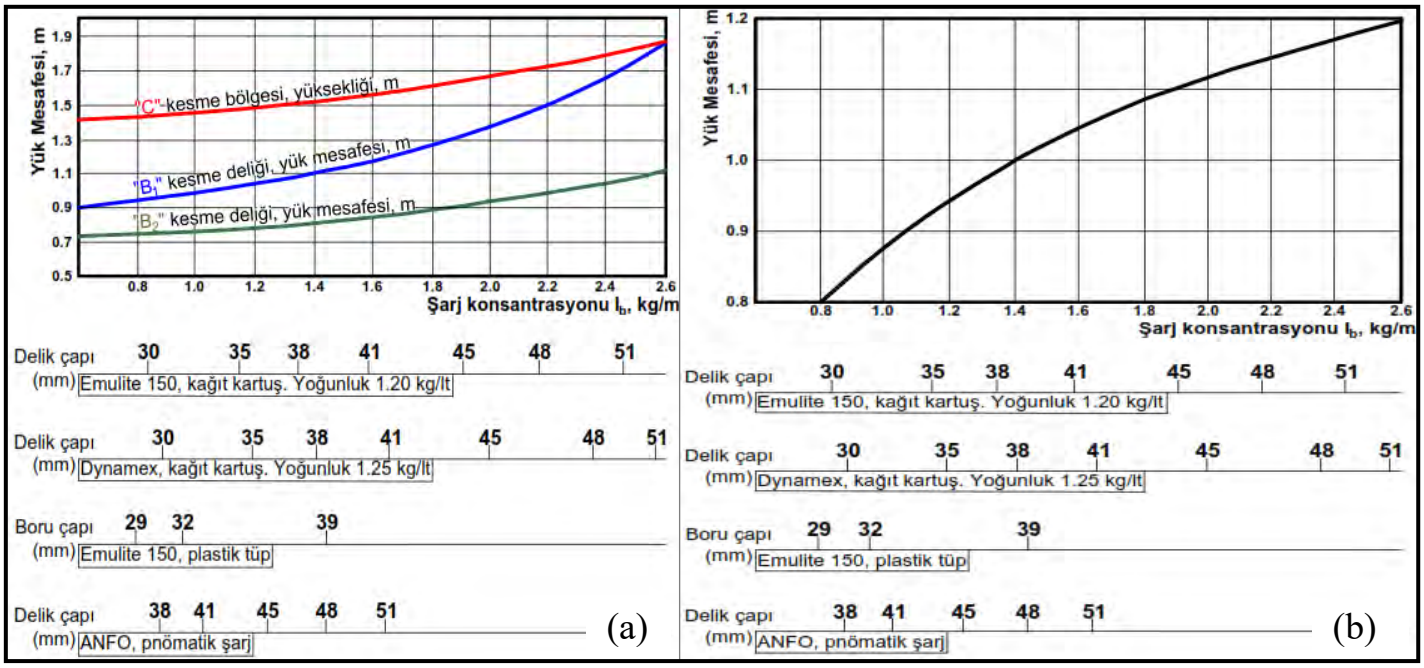


Şekil 5. a) Tünel genişliği-maksimum ilerleme ilişkisi (Erkoç, 1990), b) Tünel kesitine uygun delici makine örnekleri (Atlas Copco, 2017 Katalog)

Patlatmalı tünel kazılarında uygulanan V-Cut ve Fan-Cut yöntemlerine ait delik tasarımı ve semboller aşağıda görülmektedir. Patlatmalı kazı yapılacak aynaya işaretlenmiş deliklerin delinmesi sırasında nişan noktasına (Şek.6) riayet edilmesi patlatma verimi ve patlatma ekonomisi açısından hayati önem taşır. Olofsson'a ait formüller (Çiz. 6) kullanılarak V-Cut ve Fan-Cut patern tasarımı yaparken Şekil 7'deki abaklardan faydalanılmıştır.



Şekil 6. Kesme deliklerinin plan ve kesit görünümleri (Olofsson, 2002) a) V-Cut, b) Fan-Cut



Şekil 7. V-Cut ve Fan-Cut uygulanacak patern tasarımı yaparken kullanılacak abaklar (Olofsson, 2002) a) Kesme bölgesi delik tasarımında referans alınacak abak b) Tarama, duvar, çevre ve taban bölgesi delik tasarımında referans alınacak abak

Çizelge 6. V-Cut ve Fan-Cut delik dizaynında kullandığımız ampirik formüller

Bölgeler	Parametre	Langefors ve Kihlström (1979)			Olofsson (2002)		
		Sembol	Formül	Birim	Sembol	Formül	Birim
Kesme Bölgesi	Dip şarj yoğunluğu	I_{dip}	$(3,14*(D^2)*P*S)/(4*1000)$	kg/m	I_b		kg/m
	Yük mesafesi	V	$I_{dip}*(30/D)*f$	m	B_1-B_2		m
	Delikler arası mesafe	E	0,8*V	m	S		m
	Dip şarj uzunluğu	H_{dip}	(1/3)*H	m	h_b	(1/3)*H	m
	Kolon şarj yoğunluğu	I_{kol}	$0,5*I_{dip}$	kg/m	I_c	(0,3-0,5)*Ib	kg/m
	Sıkılama boyu	H_o	0,3*V	m	h_0	$0,3*B_1$ veya $0,5*B_2$	m
	Kolon şarj uzunluğu	H_{kol}	$H-(H_{dip}+H_o)$	m			m
Tarama Bölgesi	Dip şarj yoğunluğu	I_{dip}	$(3,14*(D^2)*P*S)/(4*1000)$	kg/m	I_b		kg/m
	Yük mesafesi	V	$I_{dip}*(30/D)$	m	B	B	m
	Delikler arası mesafe	E	V	m	S	1,1*B veya 1,2*B	m
	Dip şarj uzunluğu	H_{dip}	(1/3)*H	m	h_b	(1/3)*H	m
	Kolon şarj yoğunluğu	I_{kol}	$(0,4-0,5)*I_{dip}$	kg/m	I_c	$0,5*I_b$	kg/m
	Sıkılama boyu	H_o	0,5*V	m	h_0	0,5*B	m
	Kolon şarj uzunluğu	H_{kol}	$H-(H_{dip}+H_o)$	m			m
Duvar Bölgeleri	Dip şarj yoğunluğu	I_{dip}	$(3,14*(D^2)*P*S)/(4*1000)$	kg/m	Ib		kg/m
	Yük mesafesi	V	$I_{dip}*(30/D)$	m	B	0,9*B	m
	Delikler arası mesafe	E	V	m	S	1,1*B	m
	Dip şarj uzunluğu	H_{dip}	(1/4)*H	m	h_b	(1/6)*H	m
	Kolon şarj yoğunluğu	I_{kol}	$(0,3-0,4)*I_{dip}$	kg/m	I_c	$0,4*I_b$	kg/m
	Sıkılama boyu	H_o	0,5*V	m	h_0	0,5*B	m
	Kolon şarj uzunluğu	H_{kol}	$H-(H_{dip}+H_o)$	m			m
Tavan Bölgesi	Dip şarj yoğunluğu	I_{dip}	$(3,14*(D^2)*P*S)/(4*1000)$	kg/m	Ib		kg/m
	Yük mesafesi	V	$I_{dip}*(30/D)$	m	B	0,9*B	m
	Delikler arası mesafe	E	V	m	S	1,1*B	m
	Dip şarj uzunluğu	H_{dip}	(1/6)*H	m	h_b	(1/6)*H	m
	Kolon şarj yoğunluğu	I_{kol}	$(0,3-0,4)*I_{dip}$	kg/m	I_c	$0,3*I_b$	kg/m
	Sıkılama boyu	H_o	0,5*V	m	h_0	0,5*B	m
	Kolon şarj uzunluğu	H_{kol}	$H-(H_{dip}+H_o)$	m			m
Taban Bölgesi	Dip şarj yoğunluğu	I_{dip}	$(3,14*(D^2)*P*S)/(4*1000)$	kg/m	Ib		kg/m
	Yük mesafesi	V	$I_{dip}*(30/D)$	m	B	B	m
	Delikler arası mesafe	E	0,8*V	m	S	1,1*B	m
	Dip şarj uzunluğu	H_{dip}	H	m	h_b	(1/3)*H	m
	Kolon şarj yoğunluğu	I_{kol}	Yok	kg/m	I_c	I_b	kg/m
	Sıkılama boyu	H_o	Yok	m	h_0	0,2*B	m
	Kolon şarj uzunluğu	H_{kol}	Yok	m			m

Langefors formüllerinde kullanılan diğer simgelerin anlamları ve ek bilgiler

Diğer Simgeler	Delik çapı	D	mm
	Delik boyu	H	m
	Patlayıcı kuvveti	S	Dynamex M; kuvvet:1, yoğunluk:1,4 g/cm^3
	Patlayıcı yoğunluğu	P	kg/dm^3

İç açı değerine göre düzeltme katsayısı

AÇI (°)	***f***
60	1,0
75	1,1
90	1,2

Kayaç adı	Patlatmaya tepkisi	Patlatma direnci	Aşındırma özelliği	Açıklamalar	c katsayısı
Kılıçkaya Bazalt	İyi	Orta	Orta derece	Sivas, Suşehri ilçesindedir. Delmeye dirençlidir.	0.375
Plaketli Kalker	Plastik	Düşük	Aşındırıcı	Şanlıurfa, Bozova ilçesindedir. Delmeye dirençsizdir.	0.230
Bazalt	İyi	Orta	Orta derece	Şanlıurfa, Bozova ilçesindedir. Delmeye dirençlidir.	0.375
Kutlular Dasit	İyi	Orta	Yüksek derece	Trabzon, Sürmene ilçesindedir. Delmeye dirençlidir.	0.450
Kutlular	İyi	Orta	Orta derece	Trabzon, Sürmene ilçesindedir. Delmeye dirençlidir.	0.650
Attepe Kalker	İyi	Orta	Düşük derece	Kayseri, Develi ilçesindedir. Delmeye dirençlidir.	0.350
Attepe	Plastik	Yüksek	Orta derece	Kayseri, Develi ilçesindedir. Delmeye dirençlidir.	0.600
Seydişehir Kalker	İyi	Orta	Düşük derece	Konya, Seydişehir ilçesindedir. Delme direnci ortadır.	0.350

Notlar: * Langefors, çalışmalarını İsveç Graniti'nde (c:0,4) Dynamex M (kuvvet:1) kullanarak yapmıştır. Formüllerle hesaplama yapılırken patlatılacak kaya özellikleri -0,4/c bağıntısı kullanarak- ve kullanılacak patlayıcı kuvvetine göre düzeltme yapılmalıdır.

** Olofsson formüllerinden faydalanarak patlatma tasarımı yapılırken Şekil 7'deki abaklar kullanılmaktadır.

*** Türkiye'deki bazı kayaçlara ait "c katsayısı" değerleri Erkoç (1990)'dan alınmıştır.

6 AKH DEMİRYOLU PROJESİ'NDE V-CUT VE FAN-CUT YÖNTEMİ İLE PATLATMALI TÜNEL KAZISI

Projemiz kapsamında yapılan patlatmalarda sarf ettiğimiz patlayıcı madde, kapsül ve bağlantı elemanları Türkiye'den Cibuti'ye deniz yolu ile getirilmekte, konteynerler limanda tırlara yüklenerek karayolu ile depolarımıza (9 adet, toplam 1.475 ton patlayıcı madde ve 450.000 adet kapsül kapasiteli) nakledilmektedir.

Patlatmalı kazılarda kullanılan ürün bilgileri Çizelge 7'de görülmektedir. Standart kesit tünel kazılarında uygulanan Fan-Cut tasarımına ait 3D görünümü Şekil 8'tedir.

Çizelge 7. Patlatmalı kazılarda kullandığımız ürün, cihaz ve ekipman bilgileri

Patlayıcı madde bilgileri (Avrupa Birliği Kodu UN 1.1 D)

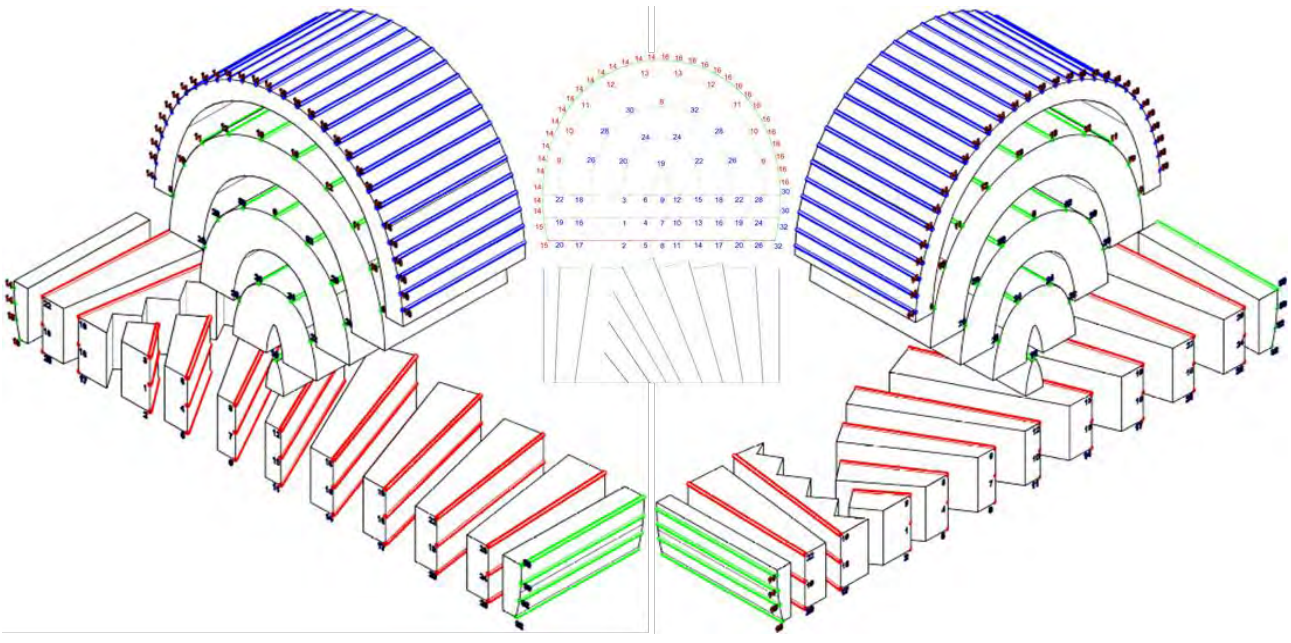
Patlayıcı maddeler	Duyarlılık	Kartuş boyutları (mm)	Kartuş/Torba ağırlığı (kg)	İdeal patlama hızı (m/sn)	İdeal patlama basıncı (atm)	İdeal patlama sıcaklık (^{o}K)	Yoğunluk (gr/cm^3)	Suya dayanımı	Patlama entalpisi (MJ/kg)	Raf ömrü (ay)
Powergel Magnum	Kapsüle Duyarlı	50*450	1,000	6.345	11.935	2.502	1,20	Çok İyi	3.684	12
Powergel Magnum 365	Kapsüle Duyarlı	27*225	0,155	6.437	121.400	2.943	1,20	Mükemmel	4.433	12
Powergel Magnum 365	Kapsüle Duyarlı	38*400	0,545	6.437	121.400	2.943	1,20	Mükemmel	4.433	12
Powergel P750-H.ANFO	Yemlemeye Duyarlı	65*500	2,000	6.195	11.0570	2.330	1,26-1,27	Mükemmel	3.100	6
ANFO	Yemlemeye Duyarlı	PPAN	25,000	4.850	48.960	2.946	0,78-0,80	Yok	3.890	6

Kapsül, bağlantı elemanları ve cihazlar

Kapsüller	Elektrikli Kapsül
	Nonel MS Kapsül
	Nonel LP Kapsül
	Nonel Handidet
	Nonel HTD
Bağlantı Elemanı	İnfilaklı Fitil 5-6 g/m PETN
	İnfilaklı Fitil 40 g/ m PETN
	İnfilaklı Fitil 80 g/m PETN
	Şok Tüp
	Zil Teli 2*0,50 mm^2
	Şok Tüp Birleştirici
Ateşleme ve Kontrol Cihazları	Manyeto
	Ohmmetre
	Starter
Ölçüm Cihazı	Sismograf

Non-el MS (milisaniye) ve LP (uzun periyot) kapsül bilgileri

Sıra no	Kapsül no	Gecikme	Sıra no	Kapsül no	Gecikme	Sıra no	Kapsül no	Gecikme
1	MS 1	25 ms	15	MS 15	375 ms	29	LP 10	1400 ms
2	MS 2	50 ms	16	MS 16	400 ms	30	LP 11	1600 ms
3	MS 3	75 ms	17	MS 17	425 ms	31	LP 12	1800 ms
4	MS 4	100 ms	18	MS 18	450 ms	32	LP 13	2000 ms
5	MS 5	125 ms	19	MS 19	475 ms	33	LP 14	2500 ms
6	MS 6	150 ms	20	MS 20	500 ms	34	LP 15	3000 ms
7	MS 7	175 ms	21	MS 22	550 ms	35	LP 16	3500 ms
8	MS 8	200 ms	22	MS 24	600 ms	36	LP 17	4000 ms
9	MS 9	225 ms	23	MS 26	650 ms	37	LP 18	4500 ms
10	MS 10	250 ms	24	MS 28	700 ms	38	LP 19	5000 ms
11	MS 11	275 ms	25	MS 30	750 ms	39	LP 20	5500 ms
12	MS 12	300 ms	26	MS 32	800 ms	40	LP 21	6000 ms
13	MS 13	325 ms	27	LP 8	1000 ms			
14	MS 14	350 ms	28	LP 9	1200 ms			

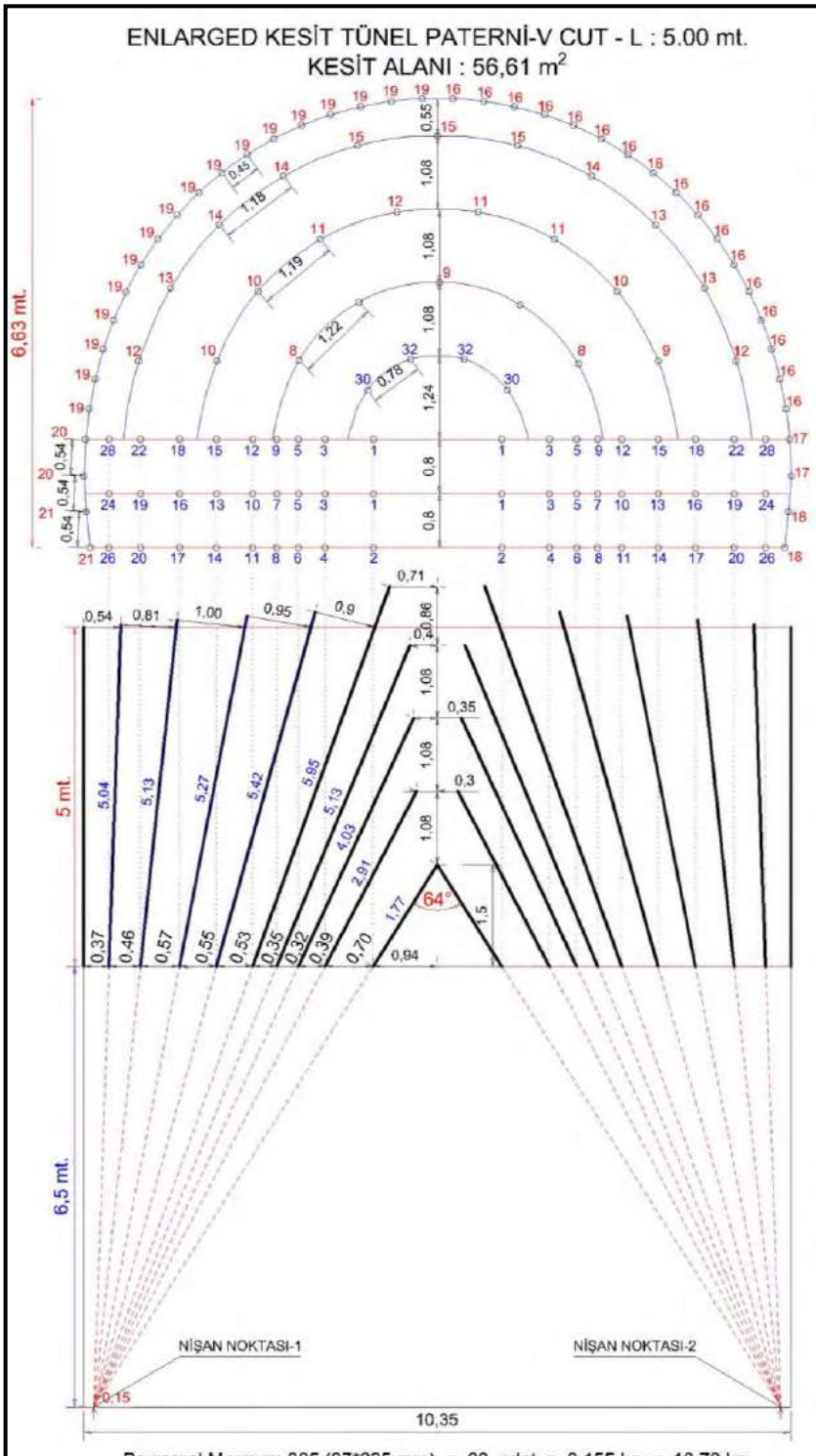


Şekil 8. Patlatmalı tünel kazılarında uyguladığımız Fan-Cut dizaynının 3D görünümü

Enlarged kesit tünellerde uygulanan V-Cut tünel paterni Şekil 9'da görülmektedir.

Mevcut jumboların bomları uzun olduğu için standart kesit tünellerde, V-Cut yöntemi uygulanarak deneme patlatması yapıldığında kesme açısının 60 derecenin altında (54°) olması sebebi ile verimli sonuç alınamamıştır.

Bu nedenle standart kesitli tünellerde, 45 mm çapında delikler delinerek Fan-Cut metodu uygulanmaktadır (Şek. 10.1, 10.2).



MS NON-EL KAPSÜL, PATLAYICI MADDE ŞARJ BİLGİLERİ VE SIKILAMA UZUNLUKLARI

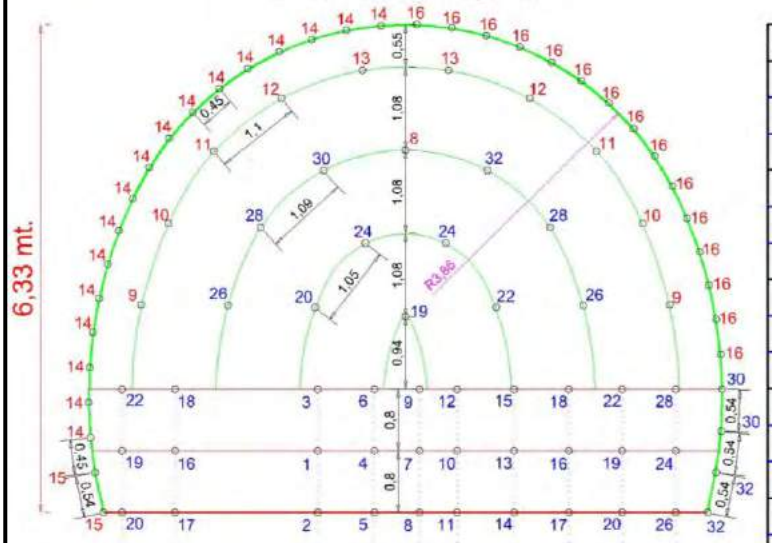
Kapsül Numarası	Gecikme (milisaniye)	Delik Sayısı (ad)	P.Magnum 365 (adet) 27*225 mm	P.Magnum 365 (adet) 38*400 mm	İnfilaklı Fitil 80 g/mt.(m)	Sıkılama Boyu (m)	Delik Uzunluğu (m)
MS 1	25 ms	4	-	3	-	0,57	1,77
MS 2	50 ms	2	-	3	-	0,57	1,77
MS 3	75 ms	4	-	6	-	0,51	2,91
MS 4	100 ms	2	-	6	-	0,51	2,91
MS 5	125 ms	4	1	6	1,50	1,63	4,03
MS 6	150 ms	2	1	6	1,50	1,63	4,03
MS 7	175 ms	2	1	7	2,00	2,33	5,13
MS 8	200 ms	2	1	7	2,00	2,33	5,13
MS 9	225 ms	2	1	7	2,00	2,33	5,13
MS 10	250 ms	2	1	9	2,00	2,35	5,95
MS 11	275 ms	2	1	9	2,00	2,35	5,95
MS 12	300 ms	2	1	9	2,00	2,35	5,95
MS 13	325 ms	2	-	11	-	1,02	5,42
MS 14	350 ms	2	-	11	-	1,02	5,42
MS 15	375 ms	2	-	11	-	1,02	5,42
MS 16	400 ms	2	-	11	-	0,87	5,27
MS 17	425 ms	2	-	11	-	0,87	5,27
MS 18	450 ms	2	-	11	-	0,87	5,27
MS 19	475 ms	2	-	11	-	0,73	5,13
MS 20	500 ms	2	-	11	-	0,73	5,13
MS 22	550 ms	2	-	11	-	0,73	5,13
MS 24	600 ms	2	-	10,5	-	0,84	5,04
MS 26	650 ms	2	-	10,5	-	0,84	5,04
MS 28	700 ms	2	-	10,5	-	0,84	5,04
MS 30	750 ms	2	1	7	2,00	2,20	5,00
MS 32	800 ms	2	1	7	2,00	2,20	5,00
TOPLAM	58	22	475	41	-	-	

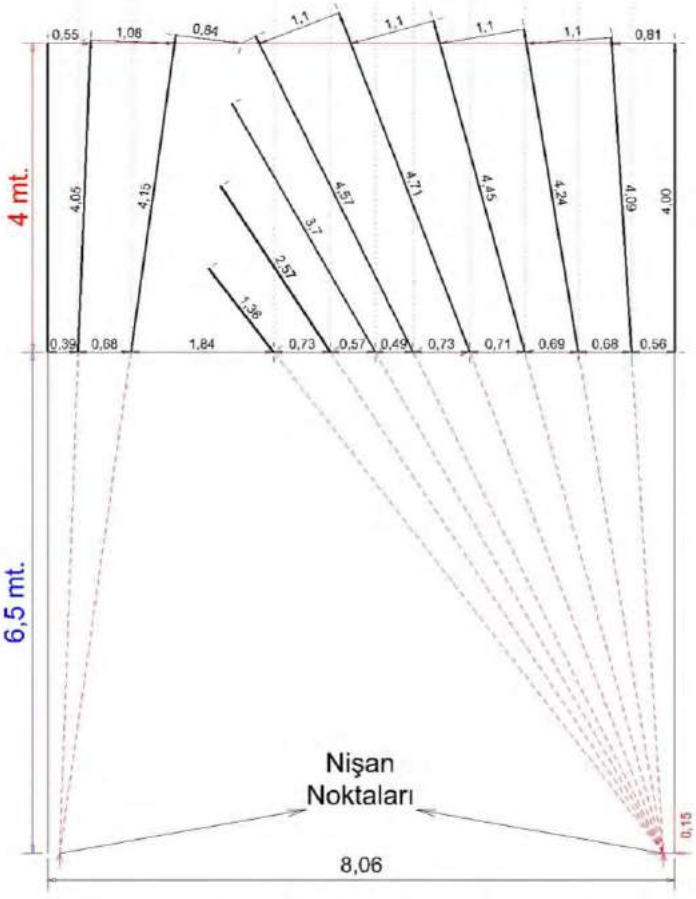
LP NON-EL KAPSÜL, PATLAYICI MADDE ŞARJ BİLGİLERİ VE SIKILAMA UZUNLUKLARI

Kapsül Numarası	Gecikme (milisaniye)	Delik Sayısı (ad)	P.Magnum 365 (adet) 27*225 mm	P.Magnum 365 (adet) 38*400 mm	İnfilaklı Fitil 80 g/mt.(m)	Sıkılama Boyu (m)	Delik Uzunluğu (m)
LP 8	1000 ms	3	1	7	2,00	2,20	5,00
LP 9	1200 ms	3	1	7	2,00	2,20	5,00
LP 10	1400 ms	3	1	7	2,00	2,20	5,00
LP 11	1600 ms	3	1	7	2,00	2,20	5,00
LP 12	1800 ms	1	1	7	2,00	2,20	5,00
LP 12	1800 ms	2	-	9	-	1,40	5,00
LP 13	2000 ms	3	-	9	-	1,40	5,00
LP 14	2500 ms	3	-	9	-	1,40	5,00
LP 15	3000 ms	3	-	9	-	1,40	5,00
LP 16	3500 ms	17	1	-	5,00	0,60	5,00
LP 17	4000 ms	2	-	10	-	1,00	5,00
LP 18	4500 ms	2	-	11	-	0,60	5,00
LP 19	5000 ms	17	1	-	5,00	0,60	5,00
LP 20	5500 ms	2	-	10	-	1,00	5,00
LP 21	6000 ms	2	-	11	-	0,60	5,00
TOPLAM	66	47	274	196	-	-	

Şekil 9. Enlarged kesit tünellerde başarı ile uygulanan V-Cut dizaynlı patern

STANDART KESİT TÜNEL PATERNİ-FAN CUT - L:4 mt.
KESİT ALANI : 43,42 m^2





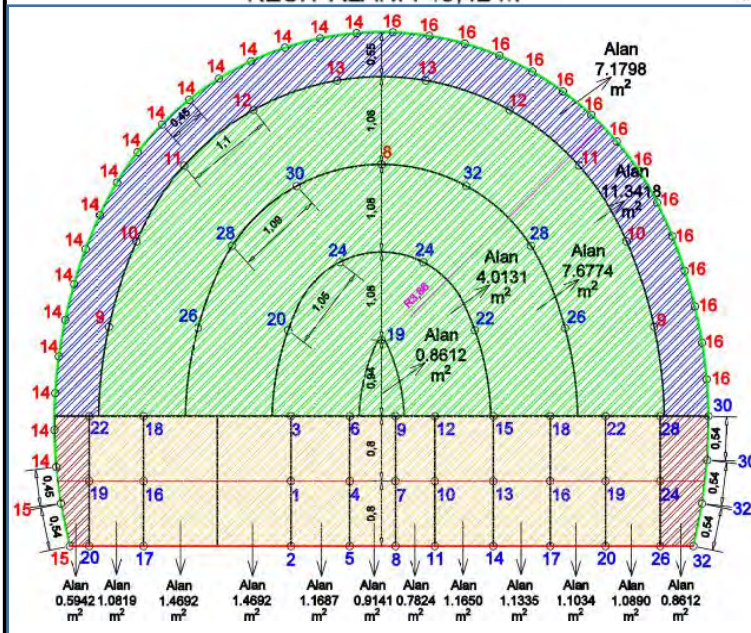
P.Magnum 365 (27*225 mm) = 38 adet x 0,155 kg = 5,89 kg
P.Magnum 365 (38*400 mm) = 424,5 adet x 0,545 kg = 231,35 kg
İnfilaklı fitil (80 g/m) = 134,81 metre x 0,08 kg = 10,78 kg
İnfilaklı fitil (5 g/m) = 60 metre x 0,005 kg = 0,030 kg
Patlatma hacmi = 173,68 m^3
Toplam patlayıcı miktarı = 248,33 kg
Özgül şarj miktarı = 1,430 kg/m^3
Özgül delme miktarı = 2,036 m/m^3
Özgül kapsül miktarı = 0,524 adet/m^3
Toplam delik sayısı = 90 adet
Birim zamanda patlayan maksimum patlayıcı miktarı : **12,54** kg

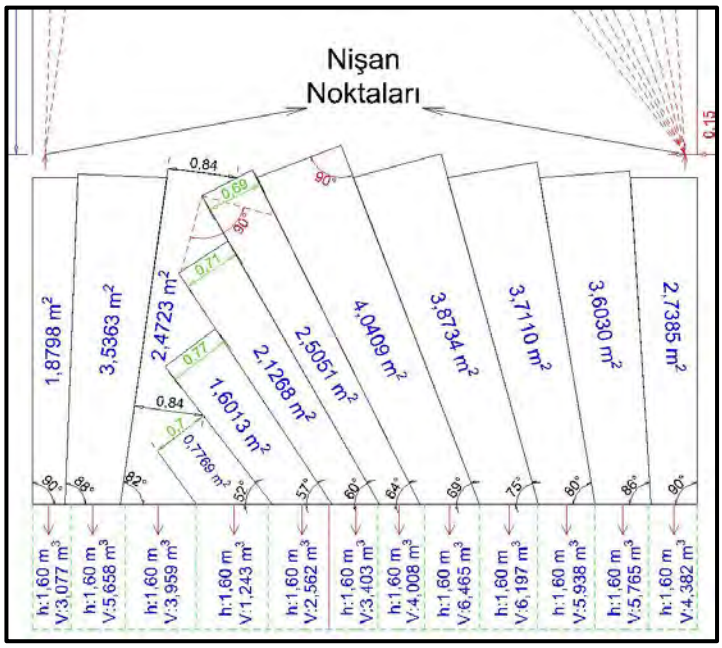
MS/LP NONEL KAPSÜL, PATLAYICI MADDE
ŞARJ BİLGİLERİ VE SIKILAMA UZUNLUKLARI

Kapsül Numarası	Gecikme (milisaniye)	Delik Sayısı(ad)	P.Magnum 365 (Adet) 27*225 mm	P.Magnum 365 (Adet) 38*400 mm	İnfilaklı Fitil 80 g/mt.(m)	Sıkılama Boyu(m)	Delik Uzunluk(m)
MS 1	25 ms	1	-	2	-	0,56	1,36
MS 2	50 ms	1	-	2	-	0,56	1,36
MS 3	75 ms	1	-	2	-	0,56	1,36
MS 4	100 ms	1	-	4,5	-	0,77	2,57
MS 5	125 ms	1	-	4,5	-	0,77	2,57
MS 6	150 ms	1	-	4,5	-	0,77	2,57
MS 7	175 ms	1	1	7	0,90	0,90	3,70
MS 8	200 ms	1	1	7	0,90	0,90	3,70
MS 9	225 ms	1	1	7	0,90	0,90	3,70
MS 10	250 ms	1	1	8	1,37	1,37	4,57
MS 11	275 ms	1	1	8	1,37	1,37	4,57
MS 12	300 ms	1	1	8	1,37	1,37	4,57
MS 13	325 ms	1	-	10	-	0,71	4,71
MS 14	350 ms	1	-	10	-	0,71	4,71
MS 15	375 ms	1	-	10	-	0,71	4,71
MS 16	400 ms	1	-	9	-	0,85	4,45
MS 17	425 ms	1	-	9	-	0,85	4,45
MS 18	450 ms	1	-	9	-	0,85	4,45
MS 16	400 ms	1	-	8	-	0,95	4,15
MS 17	425 ms	1	-	8	-	0,95	4,15
MS 18	450 ms	1	-	8	-	0,95	4,15
MS 19	475 ms	1	-	8	-	1,04	4,24
MS 20	500 ms	1	-	8	-	1,04	4,24
MS 22	550 ms	1	-	8	-	1,04	4,24
MS 19	475 ms	1	-	8	-	0,85	4,05
MS 20	500 ms	1	-	8	-	0,85	4,05
MS 22	550 ms	1	-	8	-	0,85	4,05
MS 19	475 ms	1	-	7	-	1,20	4,00
MS 20	500 ms	1	-	7	-	1,20	4,00
MS 22	550 ms	1	-	7	-	1,20	4,00
MS 24	600 ms	2	-	7	-	1,20	4,00
MS 24	600 ms	1	-	8	-	0,89	4,09
MS 26	650 ms	1	-	8	-	0,89	4,09
MS 28	700 ms	1	-	8	-	0,89	4,09
MS 26	650 ms	2	-	7,5	-	1,00	4,00
MS 28	700 ms	2	-	7,5	-	1,00	4,00
MS 30	750 ms	1	-	7,5	-	1,00	4,00
MS 32	800 ms	1	-	7,5	-	1,00	4,00
MS 30	750 ms	2	-	8	-	0,80	4,00
MS 32	800 ms	2	-	8	-	0,80	4,00
LP 8	1000 ms	1	-	7	-	1,20	4,00
LP 9	1200 ms	2	-	7,5	-	1,00	4,00
LP 10	1400 ms	2	-	7,5	-	1,00	4,00
LP 11	1600 ms	2	-	7,5	-	1,00	4,00
LP 12	1800 ms	2	-	7,5	-	1,00	4,00
LP 13	2000 ms	2	-	7,5	-	1,00	4,00
LP 14	2500 ms	17	1	-	4	0,60	4,00
LP 15	3000 ms	2	-	8	-	0,80	4,00
LP 16	3500 ms	15	1	-	4	0,60	4,00

Şekil 10.1. Standart kesit tünellerde uygulanan Fan-Cut dizaynlı patern; kapsül özellikleri, patlayıcı madde şarj bilgileri ve sıkılama uzunlukları

STANDART KESİT TÜNEL PATERNİ-FAN CUT - L:4 mt.
KESİT ALANI : 43,42 m²





STANDART KESİT FAN CUT	BİRİM	KESME BÖLGESİ	TARAMA BÖLGESİ	DUVAR	ÇEVRE	GENEL TOPLAM
DELİK/KAPSÜL SAYISI	adet	*30*	*22*	*8*	*30*	*90*
	%	33.33%	24.44%	8.89%	33.33%	100.00%
TOPLAM DELİK UZUNLUĞU	m	*113.67*	*88.00*	*32.00*	*120.00*	*353.67*
	%	32.14%	24.88%	9.05%	33.93%	100.00%
MAKSİMUM YÜK MESAFESİ	m	*1.10*	*1.08*	*0.81*	*0.55*	---
KESİT ALANI	m^2	*11.38*	*23.89*	*1.46*	*7.18*	*43.905*
	%	25.91%	54.42%	3.31%	16.35%	100.00%
KÜBAJ	m^3	*45.60*	*91.30*	*22.42*	*14.36*	*173.68*
	%	26.26%	52.57%	12.91%	8.27%	100.00%
P. MADDE SARFI	kg	*120.01*	*80.93*	*33.14*	*14.26*	*248.33*
	%	48.33%	32.59%	13.34%	5.74%	100.00%
ÖZGÜL DELGİ	m/m^3	*2.68*	*1.39*	*1.44*	*8.36*	*2.04*
KAPSÜL BİRİM SARF	ad/m^3	*0.84*	*0.35*	*0.36*	*2.09*	*0.52*

MS/LP NONEL KAPSÜL, GECİKME BAŞINA ŞARJ MİKTARI,BÖLGESEL ÖZGÜL ŞARJ MİKTARI BİLGİLERİ

Kapsül Numarası	Gecikme (milisaniye)	Delik Sayısı:(ad)	Gecikme Başına Şarj Miktarı(kg)	Alan(m^2)	Yükseklik (m)	Kübaj(m^3)	Lokal Özgül Şarj(kg/m^3)	BÖLGE
MS 1	25 ms	1	1,09	0,777	1,60	1,243	2,63	1.Kesme Bölgesi (SAĞ)
MS 2	50 ms	1						
MS 3	75 ms	1						
MS 4	100 ms	1	2,45	1,601	1,60	2,562	2,87	2.Kesme Bölgesi (SAĞ)
MS 5	125 ms	1						
MS 6	150 ms	1						
MS 7	175 ms	1	4,04	2,127	1,60	3,403	3,56	1.Kesme Tarama Bölgesi
MS 8	200 ms	1						
MS 9	225 ms	1						
MS 10	250 ms	1	4,62	2,505	1,60	4,008	3,46	2.Kesme Tarama Bölgesi
MS 11	275 ms	1						
MS 12	300 ms	1						
MS 13	325 ms	1	5,45	4,041	1,60	6,465	2,53	3.Kesme Tarama Bölgesi
MS 14	350 ms	1						
MS 15	375 ms	1						
MS 16	400 ms	1	4,91	3,873	1,60	6,197	2,38	4.Kesme Tarama Bölgesi
MS 17	425 ms	1						
MS 18	450 ms	1						
MS 16	400 ms	1	4,36	2,472	1,60	3,956	3,31	1.Kesme Bölgesi (SOL)
MS 17	425 ms	1						
MS 18	450 ms	1						
MS 19	475 ms	1	4,36	3,711	1,60	5,938	2,20	5.Kesme Tarama Bölgesi
MS 20	500 ms	1						
MS 22	550 ms	1						
MS 19	475 ms	1	4,36	3,536	1,60	5,658	2,31	2.Kesme Bölgesi (SOL)
MS 20	500 ms	1						
MS 22	550 ms	1						
MS 19	475 ms	1	3,82	0,369	4,00	1,477	2,58	1.Aşağı Doğru Pat.
MS 20	500 ms	1	3,82	4,013	4,00	16,052	0,48	2.Aşağı Doğru Patlayan
MS 22	550 ms	1						
MS 24	600 ms	2						
MS 24	600 ms	1	4,36	3,603	1,60	5,765	2,27	Tarama Yana Doğru Patlayan
MS 26	650 ms	1						
MS 28	700 ms	1						
MS 26	650 ms	2	7,63	7,677	4,00	30,710	0,87	3.Aşağı Doğru Patlayan
MS 28	700 ms	2						
MS 30	750 ms	1						
MS 32	800 ms	1						
MS 30	750 ms	2	8,72	1,369	4,00	5,477	1,59	Duvar Delikleri
MS 32	800 ms	2	8,72	2,972	1,60	4,754	1,84	Taban Köşe-SAĞ
LP 8	1000 ms	1	3,82	-	-	-	-	3.Aşağı Doğru Pat.
LP 9	1200 ms	2	8,18	11,342	4,00	45,367	0,90	4.Aşağı Doğru Patlayan
LP 10	1400 ms	2						
LP 11	1600 ms	2						
LP 12	1800 ms	2						
LP 13	2000 ms	2						
LP 14	2500 ms	17	8,08	4,475	4,00	17,90	0,43	Çevre Delikleri-SOL
LP 15	3000 ms	2	8,72	2,972	1,60	4,754	1,84	Taban Köşe-SOL
LP 16	3500 ms	15	7,13	4,475	4,00	17,90	0,43	Çevre Delikleri-SAĞ

Şekil 10.2. Standart kesit tünellerde uygulanan Fan-Cut dizaynlı patern; gecikme başına patlayıcı madde şarj miktarı ve bölgesel özgül şarj bilgileri

6.1 AKH Demiryolu Projesi'nde Fan-Cut Yöntemi ile Yapılan Patlatmalı Tünel Kazılarının Yapısal Hasar Riski Açısından Değerlendirilmesi

Projemiz kapsamında patlatmalı kazı yaparken oluşan titreşim ve hava şoku bünyemizdeki 4 adet White Mini Seis III sismografla ölçülmekte (Şek. 11), değerler kaydedilmekte ve sonuçlar yorumlanarak ardışık patlatma faaliyetlerinde gerekli kararlar alınmakta, uygulanmaktadır.

T4 Tüneli standart kesitte yapılan patlatmalı kazılar esnasında sismograf ile ölçülerek elde edilen değerler ve diğer parametrelere ait bilgiler aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çiz. 8).

White Mini Seis III Sismograf (Jeofon, mikrofon, aksesuarlar,taşıma çantası)

White Mini Seis III Özellikleri

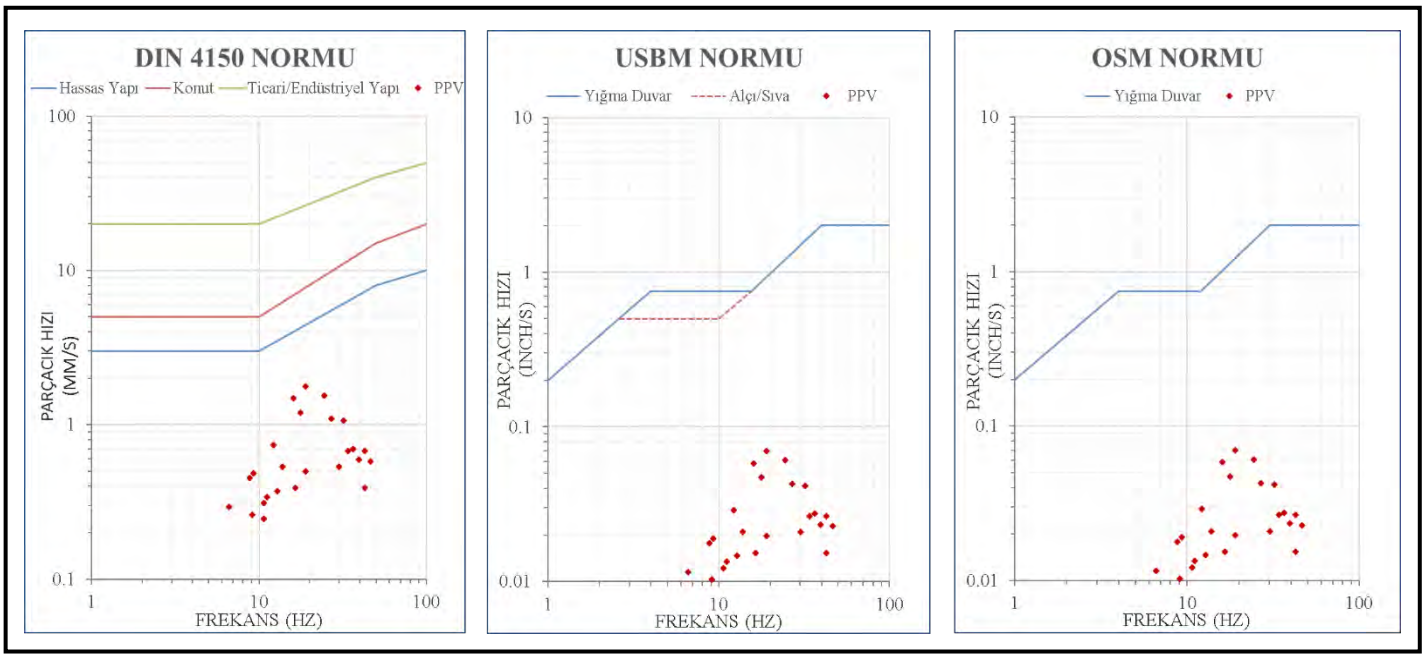
Kanal sayısı	4 kanal (3 sismik, 1 akustik)
PPV ölçüm aralığı	0,127-260 mm/sn
PPV ölçüm hassasiyeti	0,008 mm/sn
Frekans aralığı (ISEE)	2-250 Hz
Frekans aralığı (DIN)	1-315 Hz
Hava şoku ölçüm aralığı	88-148 dB
Ses ölçüm hassasiyeti	0,0156 Pa
Bellek	>500 MB
Depolama kapasitesi	2000 den fazla dalga formu
Çalışma ortamı sıcaklık aralığı	(-18) - (+54) ^{o}C
Boyutları	15x11,5x9 cm
Ağırlık	1,6 kg
Batarya	6 V - şarj edilebilir
Batarya ömrü	7-10 gün

Şekil 11. White Mini Seis III sismografı ve özellikleri

Çizelge 8. Patlatmalar sırasında ölçülen titreşim değerleri (T4 Tüneli-Standart kesit, Fan-Cut)

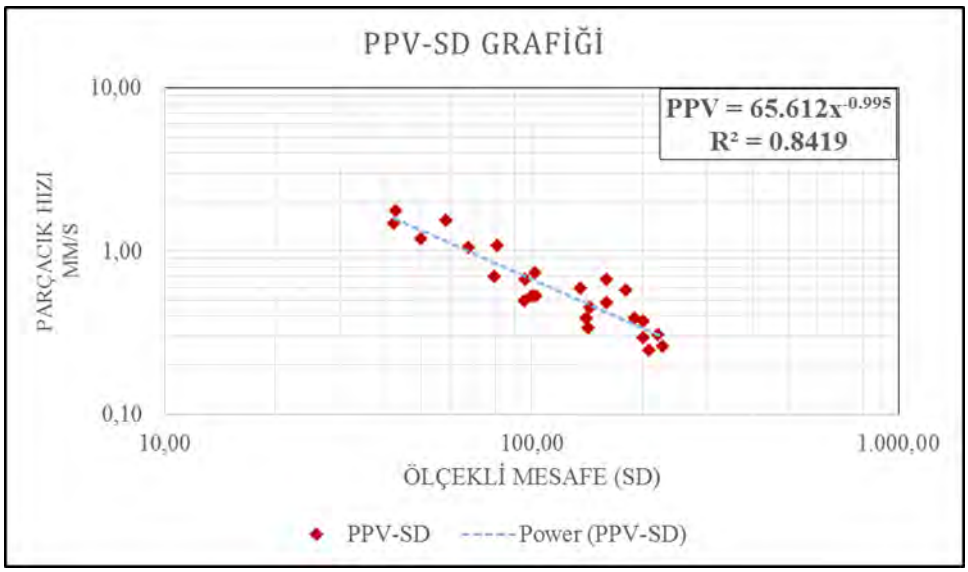
Sıra No	Maksimum Parçacık Hızı (PPV) (mm/s)	Frekans (f) (Hz)	Boyuna (PVL) (mm/s)	Boyuna Frekans (f) (Hz)	Düşey (PVV) (mm/s)	Düşey Frekans (f) (Hz)	Enine (PVT) (mm/s)	Enine Frekans (f) (Hz)	İvme (a) (mm/s^2)	Yer Değiştirme (g) (mm)	Yatay Mesafe (L) (m)	Mesafe (R) (m)	Ölçekli Mesafe (SD) (m/kg$^{1/2}$)
1	1,48	16,00	1,31	19,70	0,80	42,70	1,48	16,00	325,00	0,02	139,34	148,73	42,00
2	1,77	19,00	1,69	14,60	0,80	19,70	1,77	19,00	317,00	0,02	141,75	150,99	42,64
3	1,20	17,70	1,20	17,70	0,50	14,60	1,09	32,00	268,00	0,01	168,94	176,47	49,83
4	1,06	32,00	1,06	32,00	0,60	14,60	0,90	14,60	276,00	0,01	234,36	237,26	67,00
5	1,55	24,40	1,55	24,40	0,70	10,40	1,39	32,00	390,00	0,02	201,06	206,94	58,44
6	0,70	36,60	0,70	36,60	0,30	21,30	0,70	30,10	187,00	0,01	277,35	279,68	78,98
7	1,09	26,90	1,09	26,90	0,60	13,80	1,04	30,10	244,00	0,01	283,35	285,63	80,66
8	0,50	19,00	0,42	32,00	0,23	22,30	0,50	19,00	122,00	0,01	336,37	338,19	95,50
9	0,68	34,10	0,68	34,10	0,31	12,80	0,64	39,40	179,00	0,01	338,37	340,18	96,06
10	0,53	30,10	0,53	30,10	0,25	28,40	0,48	24,40	122,00	0,01	352,36	354,09	99,99
11	0,74	12,20	0,74	12,20	0,33	21,30	0,68	30,10	154,00	0,01	358,36	360,07	101,68
12	0,53	13,80	0,50	9,70	0,26	13,50	0,53	13,80	122,00	0,01	362,36	363,95	102,78
13	0,60	39,40	0,60	39,40	0,29	8,00	0,53	28,40	146,00	0,01	478,34	479,48	135,40
14	0,39	16,50	0,39	16,50	0,20	10,00	0,37	32,00	89,40	0,00	498,35	499,38	141,02
15	0,34	11,10	0,34	11,10	0,15	15,10	0,34	34,10	81,30	0,00	502,34	503,36	142.,14
16	0,45	8,80	0,45	8,80	0,21	10,20	0,33	102,00	73,20	0,01	508,34	509,35	143,84
17	0,68	42,70	0,58	20,50	0,42	42,70	0,68	42,70	187,00	0,01	566,22	567,07	160,14
18	0,48	9,30	0,48	9,30	0,37	8,70	0,37	39,40	187,00	0,01	566,29	567,14	160,16
19	0,58	46,50	0,58	46,50	0,23	56,90	0,47	36,60	163,00	0,00	637,33	637,99	180,16
20	0,39	42,70	0,39	42,70	0,20	51,20	0,36	13,10	106,00	0,00	672,33	672,96	190,04
21	0,37	12,80	0,37	12,80	0,18	12,50	0,36	10,40	73,00	0,00	711,32	711,87	201,03
22	0,25	10,70	0,23	7,90	0,17	6,50	0,25	10,70	40,60	0,00	736,33	736,82	208,07
23	0,31	10,70	0,31	10,70	0,25	9,70	0,28	11,60	40,60	0,01	777,32	777,79	219,64
24	0,26	9,10	0,25	8,10	0,17	9,00	0,26	9,10	106,00	0,00	802,32	802,74	226,69
25	0,29	6,60	0,29	6,60	0,21	10,70	0,25	16,50	48,80	0,00	710,81	711,83	201,01

Fan-Cut uygulayarak gerçekleştirdiğimiz kontrollü tünel patlatmaları sırasında hiçbir yapıya zarar ve/veya hasar verilmediği tespit edilmiştir. Patlatmalı tünel kazıları sırasında sismograf ile ölçülerek elde edilen değerleri uluslararası kabul gören Alman DIN 4150, Amerikan OSM ve USBM normlarını baz alarak değerlendirdiğimizde, yapılan patlatmaların hassas yapılara (kerpiç yapılar, tarihi eserler vd.) dahi hasar vermeyecek bölgede (eşik hasar limitinin altında) olduğu görülmektedir (Şek. 12).



Şekil 12. Çizelge 8'deki titreşim değerlerinin DIN 4150, OSM ve USBM Normlarında konumu

T4 Tüneli'nin Standart kesit kısımlarında yapılan patlatmalı kazılar sırasında ölçülen titreşim parametre değerleri arasındaki matematiksel ilişki (korelasyon değeri ve yönü; Person, 1900) araştırıldığında PPV (Peak particle velocity, maksimum parçacık hızı) ve SD (Scaled distance, ölçekli mesafe) arasında yüksek ilişki olduğu tespit edilmiştir **(R^2=0,8419)**. Yapılan çalışmada ayrıca PPV veya SD ($SD=R/\sqrt{W}$, R: Ölçüm noktası ile patlatma noktası arasındaki mesafe, W: Birim zamanda patlayan maksimum patlayıcı miktarı, Dowding 1985) değerlerinden birisi bilindiğinde diğer değişkeni tahmin etmede kullanabilmek için regresyon bağıntılarındaki arazi iletim katsayısı (***k=65,612***) ve sönümlenme katsayısı (***β= -0,995***) da tespit edilmiştir (Şek. 13).



Şekil 13. Çizelge 8'deki titreşim değerlerinin PPV-SD grafiği ve regresyon analizi

7 SONUÇLAR

AKH Demiryolu Projesi kapsamındaki kaya tünellerinde uygulanan atımların paternleri hazırlanırken Langefors ve Olofsson formüllerinden faydalanılmıştır. Ölçülen titreşim parametre değerleri, istatistiksel sonuçları, uluslararası normlar (DIN 4150, USBM, OSM), reel durum, formasyonun mühendislik özellikleri ve atımlardan elde edilen sonuçlar sentezlenerek paternler revize edilmiş, güncel tasarımlar yapılmıştır.

Üst yarıdaki üretim deliklerinin çapı 45 mm olup Jumbo (Atlas Copco 282, çift bom) ile yatay delinmektedir. Alt yarıdaki deliklerin çapı ise 76 mm olup 70^{o} eğimde ve Rock Drill (Atlas Copco Flexirock T35) ile dikey delinmektedir. Üst yarıda yapılan patlatmalı kazılarda Nonel MS ve LP kapsüller kullanılırken, alt yarıda yapılan patlatmalı kazılarda çift gecikmeli (dual delay) kapsüller tercih edilmektedir.

Standart kesit kaya tünellerinde, üst yarıda, Fan-Cut uygulanan patlatmalı kazılarda; 1,43 kg/m^3 özgül şarj, 2,036 m/m^3 özgül delme, 0,524 adet/m^3 özgül kapsül ve % 97,45 verimle çalışmalar devam etmektedir.

Projenin Faz-1 etabındaki tünellerde gerçekleştirilmiş olan 1.000 adet kontrollü patlatmalı kazı uygulamasının sonuçları birlikte değerlendirildiğinde; özgül şarj 0,99 kg/m^3, özgül delme 1,424 m/m^3, özgül kapsül sarfı 0,385 adet/m^3 olarak tespit edilmiştir.

Projenin Faz-2 etabındaki standart kesit tünellerde yapılan patlatmalı kazılarda Şekil 10.1'deki Fan-Cut tasarımı çevre deliklere kapsül konulmadan, ön kesme (pre-splitting) yaparak uygulanmaktadır. Patlatmalı kazı veriminde değişiklik olmamakla birlikte tünel kontörü düzgün kesilmekte, kapsül maliyeti ve işçiliğinden tasarruf edilmektedir.

AKH Demiryolu Projesi'nde patlatmalı kazı çalışmaları devam etmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, teşvik ve desteklerinden dolayı Sn. Ersin ARIOĞLU'na, Sn. Ergin ARIOĞLU'na, Sn. Özge ARIOĞLU'na, Sn. İlker İNCELEME'ye, Sn. Erhan CENGİZ'e, Sn. Ümit KILIÇ'a, patlatma ekibimize ve Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş. ve AKH Demiryolu Projesi çalışanlarına teşekkür ederler.

Patlatma mühendisliği alanında hazırlanan bu bildiride belirtilen görüş ve sayısal değerlendirmeler yazarlarına aittir. Hiçbir kurum veya kuruluşu ilgilendirmemektedir.

KAYNAKLAR

Alan, E. 2001. *Kontrollü Tünel Patlatmaları*, İstanbul (Bitirme tezi).

Alan, E. 2013. *Tünelcilik, Metro ve Patlatma ile Tünel Kazısı*, Yıldızeli (Yayınlanmamış, Kitap)

Erkoç, Ö.Y. 1990. *Kaya Patlatma Tekniği*, İstanbul

Langefors, U., Kihlström, B. 1979. *The modern Technique of Rock Blasting*, Stockholm, Sweden

Geological Society Engineering Group Working Party 1972. *The preparation of maps and plans in terms of engineering geology. Quarterly Journal of Engineering Geology.*

Olofsson, S. 2002. *Applied Explosives Technology For Costruction and Mining*, Arla, Sweden

Orica *SEB Course*, 2016, Sweden.

Streckeisen, A. 1973. *Plutonic rocks. Classification and nomenclature recommended by the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks,* Geotimes Vol.18.

Tünel Kazılarında "Son Kesme" Uygulamalarının Önemi

The Importance of Smooth Blasting in Tunnel Excavations

Ç. Uzun
Maxam Anadolu Patlayıcı Maddeler, Ankara

İ.H. Çelik
Limak İnşaat A.Ş., Artvin

ÖZET İnşaat sektöründe tünel çalışmalarının artmasına paralel olarak yer altı kazıları üzerinde yapılan araştırmalar da önem kazanmaktadır. Yer altı kazılarında ise uygun zeminde patlatma yapmak akla ilk gelen yöntemlerden biridir. Uygulamalara bakıldığında patlatma yöntemleri de değişkenlik göstermektedir. Bu yöntemlerden biri "son kesme" uygulamasıdır. Özel bir patlatma yöntemi olan son kesme, farklı uzunluk ve ebatlarda oluşturulan kazı kesitlerinin projeye uygun, istenilen şekilde kazanılabilmesi amacı ile uygulanmaktadır. Proje sınırı olarak belirlenen kazı kesiti dışındaki çalışmalar gerek kaya stabilitesi, gerekse yüklenici firmaların jeolojik sebepler dışındaki fazla kazılarda hak edişleri yönünden sıkıntılar oluşturmaktadır.

Çalışmada son kesme yönteminin uygulama şekilleri anlatılarak, yöntemin kendi içindeki farklılıkları tartışılarak, uygulamadaki kolaylık ve zorlukları belirtilmiştir. Ayrıca uygulamalarda kaya, formasyon ve istenilen kazı ebadına göre "son kesme" uygulamalarının farklı miktarlarda patlayıcı bulunduran infilaklı fitillerle verimli ve maliyet açısından en uygun yöntemin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Zemin ve patlayıcı madde ile ilgili her bir parametrenin önemli olduğu "son kesme" uygulamalarının önemini farklı değişkenler açısından incelemeyi amaçlayan çalışmanın sonuçlarının literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

ABSTRACT In parallel with the augmentation in tunnel works in the construction sector, researches on underground excavations are gaining importance as well. In underground excavations, blasting on the proper ground is one of the first methods that come to mind. When considering the applications, blasting methods are also variable. One of these methods is the "smooth blasting" application. The smooth blasting, which is a special blasting method, is applied with the aim of obtaining the desired shape of the excavation sections formed in different lengths and sizes in accordance with the project. The works outside of the excavation area determined as project boundaries are creating problems in terms of both rock stability and the progress billings of contracting firms in excess excavations except geological causes.

In the study, the application methods of smooth blasting are explained, the differences among the methods are discussed, and the ease and difficulties in application are indicated. Besides, in the applications, it was aimed to determine the most appropriate method in terms of cost and efficiency with detonating cords containing different amounts of explosives for "smooth blasting" applications according to the rock, formation and desired excavation size.

It is considered that the results of the study aiming to examine the importance of "smooth blasting" applications in terms of different variables, which are important for each parameter related to ground and explosives, will contribute to the literature.

1 GİRİŞ

Gelişmekte olan ülke sayısının artması, şehirlerin büyümesi ve inşaat yapılarının çoğalmasına neden olmaktadır. Hızla gelişen madencilik ve inşaat sektörlerinde kullanılan patlayıcıların, özellikle şehirlere, yerleşim yerlerine, boru hattı, jeotermal sahalar vb. yerlere çok yakın mesafelerde kullanılması, patlatma titreşimlerinin artık sadece patlayıcı madde kısıtlaması ile değil, bilim ve teknolojinin kazandırdığı yeni yöntemlerle en aza indirilmesi gerekliliğini ortaya çıkartmıştır. Gerek yerleşim yerlerine yakın yeraltı kazılarında, gerekse proje kazılarında patlatma öncesi ve sonrasındaki kayaç durumunun kontrol edilebilirliği açısından titreşim ve kayaç stabilitesi oldukça önem arz etmektedir. Kayacın doğal direncinin korunması ve örselenmemesi stabilite problemlerini azaltmaktadır (Kahraman ve Kılıç, 2000).

Bütün jeolojik formasyonlarda çok iyi başarı beklenmemesine rağmen en kötü formasyonlarda bile iyi bir planlamayla aşırı kazı minimum da tutulabilir. (Kahraman ve Kılıç,2000) Plansız olan çalışmalar hem gereksiz personel kullanımına hem de öngörülemeyen maliyetleri ortaya çıkartacaktır. Bu riske mühendislik hesaplamaları ve planlamalarıyla daha çözümcü olarak yaklaşabilmekteyiz. Yapılan her planlamada ve çözüm yolunda mühendisin kendi tecrübeleri sayısal verilerin yararlı kullanılabilmesi açısından oldukça önemlidir.

Patlatma noktasından başlayarak hedefe ilerleyen sismik dalgalar yol boyunca çeşitli etkilerle karşılaşır. Patlayıcı miktarı, türü, patlayıcı-kayaç etkileşimi, ayna etkisi, karmaşık jeoloji (tabakalanma, tektonik ve litolojik özellikler) bu etkenlerin başlıcalarıdır (Aldaş vd., 2009). Bütün bu etkenler yeraltında verimli çalışmayı etkilemektedir ve tünel patlatmalarında fazla kazıların oluşmasına sebep vermektedir.

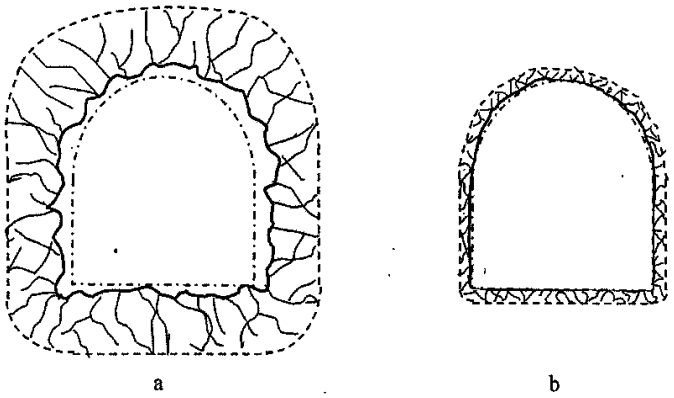
Yeraltı tünel patlatmalarında aşırı açılmayı önlemek için (Küçük ve Aksoy, 2017);

- Çevre deliklerinde, delik aralıklarının azaltılması
- Çevre deliklerinde, şarj miktarlarının azaltılması
- İnfilaklı fitilin (80 g/m'lik) doğrudan uygulanması
- Çevre deliklerinin daha küçük çaptaki kapsüle duyarlı patlayıcılarla şarj edilmesi
- Çevre deliklerinin bir dolu bir boş olarak şarj edilmesi

Çalışmada yukarıda belirtilen durumlar değerlendirilerek uygulama şekilleri, patlayıcı madde seçimi, farklılıklarda oluşan maliyetler ve uygulamadan elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

2 "SON KESME" ÖZEL PATLATMA YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

"Son kesme" uygulamasından şekil 1'de görüldüğü gibi net ve verimli sonuçlar alabilmek için kayacın yapısına ve bununla birlikte elde edilen sınıflandırma sonuçlarına göre verimliliği, titreşimi ve maliyeti düşünülerek yapılmalıdır. Aksi takdirde aşırı kazıdan kaynaklanan stabilite problemleri önlemez duruma gelecek, iş sağlığı ve güvenliği açısından tehlikeli bir durum oluşacaktır.



Şekil 1. Aşırı kazı ve çatlatma yönünden klasik patlatma (a) ile son kesme yönteminin (b) karşılaştırılması (Kahraman ve Kılıç, 2000)

Geçmişte Elbar-1 ya da türevleri olarak ifade edilen pvc kaplı plastik kartuşların (çapı 17 mm – 22 mm; uzunluğu 725 mm- 1000 mm) her iki ucundaki bağlantı mekanizmaları ve merkezleme kanatları ile birbirine eklenerek, delik içerisinde istenilen şekilde yerleştirilebilecek hale getirilerek kullanılmasıyla tünel kazılarında "son

kesme" uygulaması yapılmaktaydı (MKE katalog). Halen az da olsa tercih edilmektedir.

Yöntem günümüzde genel olarak infilaklı fitilin farklı gramajları kullanılarak ve düşük gramajlı ve düşük çaplı ürünlerin aralıksız delik içerisine şarj edilmesiyle yapılmaktadır.

İnfilaklı fitil yöntemlerinde değişken olan infilaklı fitilin gramajı, delgi dibinde iyi bir kesme için kullanılan kapsüle duyarlı patlayıcının gramajı ve cinsidir. İnfilaklı fitil ile uygulamalar 5, 10, 40 ve 80 g/m infilaklı fitiller kullanılarak yapılmaktadır. 5, 10 g/m infilaklı fitil ile yapılan uygulama, 40, 80 g/m infilaklı fitil ile yapılan uygulamadan farklılıklar göstermektedir. Ekipmanların beraber olarak delik içerine yerleştirilmesinde önemli sıkıntılar olmasından dolayı 5 g/m ve 10 g/m infilaklı fitil ile "son kesme" uygulaması tercih edilmemektedir.

Delginin tamamının 27 mm çapında kapsüle duyarlı patlayıcıların kullanılmasıyla doldurulması uygulama şeklide farklı bir yöntem olarak değerlendirilmeye alınmıştır. Günümüzde en fazla kullanılan yöntem 40 g/m veya 80 g/m ile uygulanan yöntemdir. Bununla beraber uygulama kolaylığı açısında değerlendirilebilir bir yöntem olan düşük ağırlık ve düşük çaplı kapsüle duyarlı patlayıcılar ile uygulama yöntemi de anlatılmıştır.

2.1 40 g/m ve 80 g/m İnfilaklı Fitil ile "Son Kesme" Uygulaması

İnfilaklı fitil delik boyundan biraz uzun kesilmelidir. İnfilaklı fitil, kapsüle duyarlı patlayıcının bir ucundan içine yerleştirilir. Ayna dizaynına göre gecikmesi belirlenen LP elektriksiz kapsül, kapsüle duyarlı patlayıcının diğer ucundan içine yerleştirilir ve bu şekilde delik içerine konulur.

40 g/m ve 80 g/m infilaklı fitil ile uygulama RMR ve Q değerlendirmeleri sonucu sağlam olarak ifade edilebilecek zeminlerde tercih edilmelidir. Bu değerlendirmelerden nispeten bozuk olan zeminlerde "son kesme" uygulamasında infilaklı fitil, kapsüle duyarlı patlayıcı (150 g – 500 g aralığında) ve elektriksiz kapsülden oluşan ekipmanların delik içerisinde ilerlemesi zor olmaktadır. Bu nedenle uygulama esnasında belirtilen ekipmanların Şekil 1'de görüldüğü gibi bir çıta üzerine yerleştirilerek delik içerisine konulması daha kolay olacaktır.

Şekil 1. İnfilaklı fitilin çıta ile hazırlanması (Uzun, 2010)

2.2 Düşük Ağırlıklı ve Düşük Çaplı Kapsüle Duyarlı Patlayıcı Maddeler ile "Son Kesme" Uygulaması

İnfilaklı fitil ile "son kesme" uygulamasına alternatif olarak düşünülebilecek bir uygulamadır. Bu yöntemde toplam şarj çok düşük tutularak, şarjın kolona homojen olarak dağılması nedeniyle tüm delik boyunca uygun bir patlatma alanı oluşturulur (Celik, 2014).

27 mm çapında, 220 gram ağırlığında ve 340 mm uzunluğunda kapsüle duyarlı patlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilen yöntemde, delik dibine konulacak kartuşa elektriksiz kapsül yerleştirilir ve deliğe konulur. Deliğin tamamı aralıksız bir şekilde, kartuşlar üst üste gelmeyecek şekilde delik içerisine yerleştirilir. Bu durumu sağlamak için sıkılama çubuğunun üzerine 1 metre aralıklarla çizgiler çizilerek her bir kartuşun ilerlemesinden sonra sıkılama çubuğunun delik içerisinde kalan kısmı kontrol edilmelidir.

Her iki uygulamada da patlayıcıların çapı ve ağırlıkları formasyon özellikleri dikkate alınarak seçilmelidir. Aksi taktirde yumuşak

bir formasyonda kullanılan yüklü patlayıcı istenmeyen kazılara neden olabilir (Uzun, 2010). "Son kesme" uygulamasından önce ateşleyici ve delgi operatörüne genel bilgilerin verilmesi yararlı olacaktır. Şekil 2'de görüldüğü gibi delgiden önce aynaya proje sınırlarını ifade eden çizgilerin topoğraf tarafından çizilmesi uygulama verimliliği açısından önemlidir.

Şekil 2. "Son Kesme" uygulaması önce sınırları işaretlenmiş olan ayna da delgi

3 PATLAYICI MADDE SEÇİMİ

Patlatma sonucu kayaçta oluşan açıklığın tahkimat süresinin tamamlanmasına kadar kendi kendini taşıyabilmesi ilerlemenin kesit genişliğinin 2/3'ünün altına inmemesi için gerekli olan bir durumdur (Küçük ve Aksoy, 2017).

27 mm çapındaki kapsüle duyarlı patlayıcı maddeler ile şarj yapılması sonrasında zeminin patlatma sonrasında detaylıca gözlemlenmesi gerekmektedir. Gramajı yüksek ya da kolon şarjının homojen dağılmaması durumunda tünel kesiti sınırında ya da bu sınıra yaklaşılarak yapılan patlatmalarda kayacın örselenmesine sebep olmaktadır. Bu örselenmeye delginin ne kadar düzgün yapıldığı da etki etmektedir.

İnfilaklı fitil ile yapılan "son kesme" uygulamalarında delik dibinde kullanılan kapsüle duyarlı patlayıcı madde olarak uygulamada genellikle 27 mm çapında ürünler kullanılmaktadır. Ancak delgi dibinde istenilen parçalanma yapılamazsa 32 mm çapında 400 g ağırlığında ya da 38 mm çapında 500 g ağırlığında ürünler kullanılmalıdır. İstenilen parçalanma olmadığında infilaklı fitilin tamamının yanmaması da patlatmalardan sonra gözlemlenen durumlar arasındadır.

40 g/m ve 80 g/m infilaklı fitil ile yapılan "son kesme" uygulamalarında infilaklı fitilin gramajına karar verilmesi durumunda, öncelikle aynanın jeolojik haritalamaları dikkate alınmalıdır. Sert ve jeolojik etkenleri az olan zeminlerde 40 ya da 80 g/m kullanımı olumlu sonuçlar vermektedir. Şekil 3'de iyi bir uygulama sonucu görülmektedir.

Patlayıcı madde seçiminde karar verecek olan mühendisin mesleki tecrübeleri optimum çalışma şekillerinin belirlenmesinde zaman ve maddi olarak tasarruf sağlayacağı da aşikar bir durumdur.

Şekil 3. 40 g/m infilaklı fitil ile "son kesme" uygulaması sonrası aynanın durumu

4 MALİYETLER

Bütün uygulamalarda 1 adet elektriksiz kapsül kullanıldığı için hesaplamalara dahil edilmemiştir. Delik boyu 3,5 metre olarak öngörülmüştür. Çünkü "son kesme" uygulaması delgi makinasının tij uzunluğunun tamamına yakının kullanıldığı delgilerde daha yüksek randıman vermektedir.

4.1 Düşük Ağırlıkta ve Düşük Çapta Kapsüle Duyarlı Patlayıcılarla Delgilerin Doldurulması

Delgi başına 10 adet 27 mm çapında, 220 mm uzunluğunda ve 0,220 g ağırlığında kapsüle duyarlı patlayıcılar ile şarj yapılmaktadır.

10 x 220 g = 2200 g
2200 g x Kap.Duy.Pat.Fiyatı $ = 7,2 $

4.2 80 g/m İnfilaklı Fitil ile "Son Kesme" Uygulaması Yapılması

Delik boyundan biraz uzun kesilecek olan infilaklı fitil için ortalama 3,7 metre üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

3,7 m x 80 g/m İnf.Fit.Fiyatı $ = 8,80 $

1 adet 27 mm çapında ve 220 g ağırlığında kapsüle duyarlı patlayıcı kullanılmıştır.

220 g x Kap.Duy.Pat.Fiyatı $ = 0,72 $
Toplam = 9,52 $

4.3 Diğer Uygulama Yöntemleri

Geçmişte "son kesme" uygulaması için kullanılan Elbar ürünlerinin maliyetleri de bilgi amaçlı olarak verilmiştir.

1 Elbar 735 mm boyundadır ve 3,5 metrelik delgide 5 adet kullanılmaktadır.

5 x Elbar Pat. Fiyatı $ = 14,00 $

Uygulama zorlukları sebebiyle tercih edilmeyen bir yöntem olan 5 g/m ve 10 g/m infilaklı fitil ile uygulamanın da maliyetleri bilgi amaçlı olarak verilmiştir.

Delik boyundan biraz uzun kesilecek infilaklı fitil için ortalama uzunluk 3,7 metre alınmıştır.

3,7 m x 10 g/m İnf.Fit.Fiyatı $ = 1,48 $

40 cm aralıklarla 27 mm çapında 220 g ağırlığında kapsüle duyarlı patlayıcılardan toplam 8 adet kullanılmaktadır.

8 x 220 g = 1760 gr
1760 g x Kap.Duy.Pat.Fiyatı $ = 5,77 $
Toplam = 7,25 $

5 SONUÇLAR

Farklı uygulama yöntemleri formasyondaki iş yapılabilirliğimizi dikkate alarak seçilmek zorunluluğundadır. Tünelde devam eden iş periyotlarının ortalama zamanlarının aşılmaması için "son kesme" yöntemi uygulanmadan önce gerekli hazırlıkların yapılması gerekmektedir.

Jeolojik yapı ve kayacın sertliği eklem ve çatlakların durumu ve sıklığı uygun bir sonuç için etkilidir. Sert ve homojen yapılarda genelde başarı oranı yüksektir. Kırık ve çatlaklı yapılarda şarjla birlikte delme sorunu da yaşanabilir. Özellikle kırıntılı ve zayıf zeminlerde 40 g/m ve 80 g/m infilaklı fitille yapılan uygulama şeklinde aynalar doluma başlanmadan önce hazırlık gerekmektedir. Ateşleyicinin ve delgi operatörünün tecrübeli olması gereken bir uygulama şeklidir. Delgi içindeki kolon şarjının eşit dağılması önemli olduğu için delgilerde sapma, boyut ve öngörülemeyen hatalar konusunda operatöre bilgiler verilmelidir.

Maliyet açısından irdelendiğinde 40 g/m ve 80 g/m ile yapılan uygulamanın daha pahalı olduğunu belirtebilir. Ancak uygulama yöntemleri arasındaki kullanım tercihi yapılırken aralarındaki maliyet farkı değil, uygulama yapılacak formasyonun özellikleri belirleyici olmalıdır.

Şekil 4'de verimli bir uygulama sonrasında delgiye hazırlanacak olan aynanın durumu görülmektedir.

Şekil 4. "Son kesme" uygulaması sonrasında aynanın görünümü

KAYNAKLAR

Çelik, İ.H. 2014. Açık kazı delgi ve patlatmaları çalışma notları. (Yayınlanmamış).

Kahraman, S.. Kılıç, A. 2000. Kontrollü patlatma yöntemleri ve Tarsus ayrımı- Gaziantep otoyolu t2 tüneli uygulaması. Madencilik, 39,2, ss. 12-14.

Küçük, K., Aksoy, C.O. 2017. Şehir içi tünel inşaatlarındaki kazılarda patlatma tasarımı ve titreşim modellemesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 19,57, ss. 1035-1037.

MKE patlayıcı ürün kataloğu.

Maxam patlayıcı ürün kataloğu.

Uyar Aldaş, G.G., Ecevitoğlu, B., Can, A.Z. 2009. Patlatma kaynaklı titreşimleri azaltılmasında yüzey dalgalarının bastırılması yönteminin uygulanması: TKİ YLİ Milas işletmesinde bir uygulama. Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, 1,1, ss. 82-93.

Uzun, Ç. 2010. Tünel kazılarında son kesme çalışması. Nitromakdnx Dergisi, 21, ss. 20-21.

Kadıköy-Kartal Metro İnşaası Sırasında Yapılan Kontrollü Tünel Patlatmalarının Yapısal Hasar Riski Açısından Değerlendirilmesi

Analyze of the Controlled Blasting Applications Made During Kadıköy-Kartal Metro Construction in Terms of Structural Damage Risk

E. Alan
Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A. Ş. AKH Demiryolu Projesi, Etiyopya

ÖZET Kadıköy-Kartal Metrosu (Proje, KKM), İstanbul'un Anadolu yakasındaki trafik yoğunluğunun çözümüne katkı sağlamak ve D100/E5 Karayolu'ndaki trafik yoğunluğunu gidermek amacı ile inşa edilmiştir. Proje'nin inşası sırasında konvansiyonel sistem ile kaya formasyonlarda tünel kazısı yapılırken delme–patlatma teknolojisinden de faydalanılmıştır. Patlatmalı tünel kazısı yaparken ifa edilen 401 adet atım (kontrollü tünel patlatması) sırasında oluşan titreşim ve sesin şiddeti aletler ile ölçülerek 995 kayıt alınmış, uluslararası kabul görmüş olan Alman DIN 4150 Normu'na göre her istasyon ayrı ayrı analiz edilmiştir. Patlatmalı kazılar sırasında yapılara hasar verilmemiştir.

ABSTRACT Kadıköy-Kartal Metro (Project, KKM) is constructed to contribute to the solution of heavy traffic of Anatolian side of İstanbul and to reduce the intensity of D100/E5 Highway. During the tunnel excavation works in rock formation, which excavated by conventional method, drilling and blasting technique is used in the project. The vibration parameters and sound intensity values of 401 shots are monitored and 995 records received. All monitoring stations are analyzed separately regarding to the internationally excepted German DIN 4150 Norm. No structure was damaged during the blasting applications.

1 GİRİŞ

Atatürk diyor ki "Her gittiğim yerde köylüler benden iki şey istedi; Yol ve Okul". Eğitim eşit, kaliteli, çağdaş, özgür, bilimsel; bilim özgür; ulaşım güvenli, emniyetli, konforlu (doluluk, hız, klima, direkt gidiş), uygun (dakik, hizmet süresi, sefer sıklığı, kapasite, erişilebilir, hat kapsamı, ücret), çevre dostu, çağdaş ve sistemlerle entegre olmalıdır.

Yeryüzündeki ulaşım hatları, enerji hatları, yoğun yapılaşma, altyapılar, tarihi yapılar vs. yeraltında tüneller açarak raylı sistem ile toplu taşıma yapmayı zorunlu kılmaktadır. Tehditlere karşı sığınak olarak da kullanılan metronun amacı, kent insanını bir yerden başka bir yere ulaştırmak değil, kent hayatını yaşanabilir kılmaktır… Onu rahat ve huzurlu bir ortamda, düzenli ve güvenli koşullarda, kentsel öğelerle ilişkili kılmak ve uygarca yaşatmaktır" (Vardar, 1994).

İstanbul'da 2018'de ulaşımda karayollarının payı % 87, toplu ulaşım payı % 42, metronun payı % 2, denizyolunun payı % 2,5'tur. İstanbul'da trafik sıkışıklığının yakıt ve kayıp işgücü maliyeti 3,5 milyar $/yıl-2012, Proje ihale bedeli 1.258.093.959 $+KDV'dir (eşdeğer). Ortak yaşam alanlarında yaşam kalitesini artırmak ve şehri geleceğe taşımak için kentler metro hatları ile donatılmalıdır.

Delme-patlatma teknolojisi, disiplinler ve mühendislik disiplini sentezlenerek, yapılara hasar vermeden kentlerde patlatmalı kazılar yapılmaktadır. Kadıköy-Kartal Metrosu'nun tamamı yeraltında olup, Kadıköy İstasyon tünelleri deniz seviyesinden 32 metre altında patlatmalı kazılar da yaparak inşa edilmiştir.

Proje kapsamında yapılan patlatmalı tünel kazıları, bu bildiride yapısal hasar riski açısından değerlendirilecektir.

2 GENEL BİLGİLER

2.1 Türkiye'de Raylı Sistem ve Metro

1851-1923 yılları arasındaki 72 yılda yapılan 8.619 km demiryolu hattının 4.136 km'lik bölümü milli sınırlarımız içinde kalmıştır Bu hatların 1.377 km'sini devlet, 2.404 km'sini imtiyazlı yabancı şirketler (İngiltere, Rusya, Almanya, Belçika, Fransa) işletiyordu. Bu hatlar 1928–1948 yılları arası devletimizce işletmecilerden satın alınıp millileştirilmiştir. Ülkemizde; 1923-1938 yılları arasında 3.098 km, 1938-2017 yılları arasında ise 3.002 km demiryolu inşa edilmiştir.

İstanbul'da; toplu insan ulaşımında ilk vapur 1854'de, ilk tramvay 1869'da çalışmış tramvay ve vapurlarda haremlik-selamlık bölümü uygulaması 1923'de kaldırılmıştır.

Karayolu ile yük taşımada ve ulaşımda, demiryoluna göre 3 kat fazla enerji tüketilir. Ülkemizde yük taşımada % 93, yolculukta % 95 oranda karayolu kullanılıp 2017'de 37.19 milyar $'lık enerji ithalatı yapılmıştır.

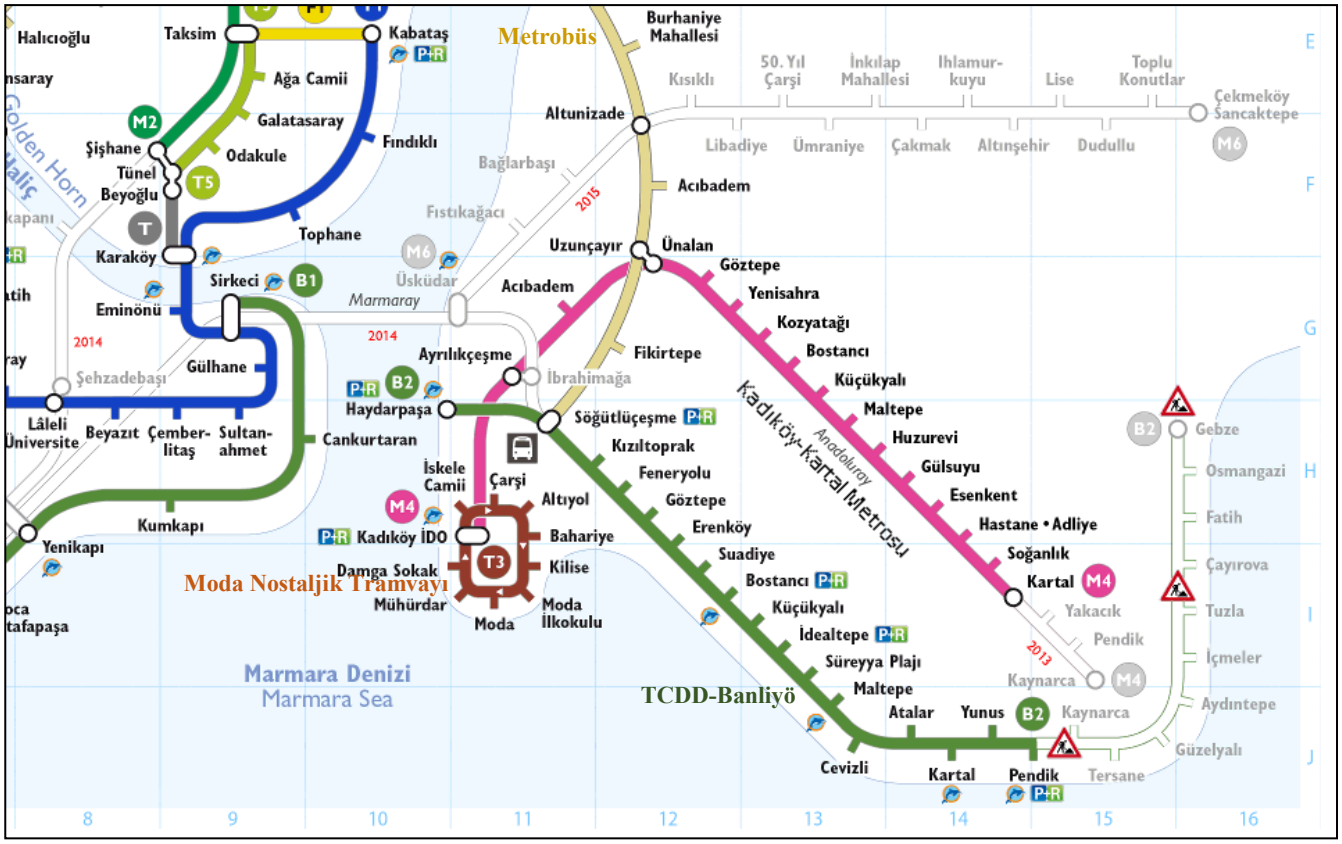
Metrolar; korunmuş yolu ve kılavuz hattı olan, elektrikle beslenen, sinyalizasyonlu, otomasyonlu, işletme hızı 24-50 km/h, azami hızı 80-110 km/h, kötü hava koşullarından en az etkilenen, modern, havayı kirletmeyen, ergonomik raylı toplu taşıma sistemidir. 124 filo, 90 metro istasyonu bulunan İstanbul'da günlük ulaşımda kullanılan lastik tekerlekli araç 1.881.141 adet, karayolu ile yapılan toplu taşımadaki durak sayısı 19.236 adettir.

2.2 Proje Hakkında Genel Bilgiler

2005'de temeli atılan Proje'nin yüklenicileri Anadoluray Ortak Girişimi (Yapı Merkezi, Doğuş, Yüksel, Yenigün, Belen) ve Avrasya Metro Grubu (Astaldi, Makyol, Gülermak) olup 2012 yılında hizmete alınmıştır. 21.662 m uzunluğunda olan KKM'na daha sonra Yakacık, Pendik ve Tavşantepe istasyonları eklenerek hat uzunluğu 26,5 km'ye ulaşmış, 2016'da işletmeye alınmıştır. Kadıköy İst. İDO, şehir hatları ve Moda tramvayı ile; Ayrılıkçeşme/İbrahimağa İst. Marmaray ile; Yenisahra İst. Göztepe-Ümraniye Metrosu ile; Ünalan İst. Metrobüs ile; Kozyatağı İst. Bostancı-Dudullu Metrosu ile; Tavşantepe İst. Sabiha Gökçen Havaalanı Metrosu ile entegredir. Peron boyu 180 m. (8'li vagona uygun), ticari hız 45 km/h, hizmet aralığı 06:00–24:00, Pendik-Kadıköy ulaşım süresi 34 dk, hizmet kodu M4 (Şek. 1) olup. tünellerin kesit alanları aşağıdadır (Çiz. 1).

Çizelge 1. Proje'deki tünellerin kesit alanları

Tünel adı	Tünel kesit alanı
Kuyruk tüneli	38,37 m^2
Yaklaşım tüneli	41,62 m^2
Hat tüneli	47,66 m^2
Bağlantı tüneli	56,08 m2
Merdiven tüneli	59,61 m^2
Peron tüneli	74,00 m^2
Makas tüneli	171,55 m^2



Şekil 1. M4-Kadıköy-Tavşantepe metro hattı, istasyonları ve entegre hatlar (IBB, 2018)

2.3 Formasyonlar ve Ozellikleri

İstanbul'un jeolojik yapısı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Abdüsselamoğlu 1963, Baykal ve Kaya 1963, 1965, Kodamanoğlu 1977, Önalan 1990, Ketin 1991, Seymen 1995). Kalınlığı birkaç km.'yi bulan İstanbul grubuna ait Sedimanter Kayaçlar, Paleozoyik istifi ile Triyas ve Tersiyer yaşlı çökellerden oluşmuşlardır. Kurtköy Formasyonu kuvars, feldispat, mika ve opak minerallerden; Aydos Formasyonu şeyl, silttaşı, kuvars arenitlerden; Dolayoba Formasyonu kireçtaşı ve şeyllerden; Kartal Formasyonu kuvars, feldispat ve mikadan, Tuzla Formasyonu kireçtaşı ve çamurtaşından, Trakya Formasyonu kumtaşı, kiltaşı ve silttaşından oluşmaktadır.

Kayaçlar deforme olmuş, çatlak sistemleri gelişmiştir. Yenisahra, Gülsuyu, Cevizli, Kartal bölgelerinde daha fazla olmak üzere volkanik sokulumlara rastlanılmaktadır. Kayaçlar geniş bir dayanım aralığında değişim göstermektedir (Çiz. 2).

Çizelge 2. Proje güzergâhındaki formasyonlar'ın laboratuvar deneyi ortalama sonuçları ve kaya kütle sınıfları (Arıoğlu, Yüksel, Yeşilçimen, 2006)

	Formasyon Adı	Sembol	Birim	Trakya Form.	Kartal Form. Zon-A	Kartal Form. Zon-B	Kurtköy Form.	Dolayoba Form.
Mühendislik Özellikleri	Özgül Ağırlık	γ	t/m^3	2,65	2,61	2,67	2,69	2,70
	Porozite	n	%	4,85	4,24	1,81	1,01	1,82
	Tek Eksenli B. Day.	σ_{bk}	kgf/cm^2	465,90	325,80	359,50	527,30	452,00
	Çekme Dayanımı	$\sigma_{çk}$	kgf/cm^2	64,30	48,20	56,90	77,40	63,80
	Elastisite Modülü	E_k	kgf/cm^2	94.877	78.443	73.100	108.379	181.179
	Poisson Oranı	v	-	0,27	0,30	0,27	0,30	0,30
	Kohezyon (Üç Eksenli)	c	kgf/cm^2	138,50	131,40	153,00	150,70	173,10
	Kaya Kalitesi	RQD	%			58	39	72
	İçsel Sürtünme Açısı	Ø	(°)	37,90	40,50	45,90	45,40	46,20
Kaya Kütle Sınıfı	Kaya Kalite Tanımı'na (RQD) göre			Çok Zayıf	Çok Zayıf	Orta	Zayıf	İyi
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı'na göre			Orta Dayanım	Orta Dayanım	Orta Dayanım	Daya-nımlı	Orta Dayanım
	Jeolojik Dayanım İndeksi'ne (GSI) göre			Parçalanmış / Zayıf	Parçalanmış / Zayıf	Bloklu-Örselenmiş / İyi	Bloklu-Örselenmiş /Orta	Bloklu-Örselenmiş /İyi

2.4 Proje Güzergâhındaki Yapılar

Tünel imalatına başlamadan önce güzergâh üzerindeki ve güzergâhın ellişer metrelik kenarları dahilinde tüm yapılar incelenmiştir. Birçok yapının bodrumunda su kuyusu bulunduğu, suyun yapının temelinde depolandığı, birçok kolonun ve kirişin çeşitli maksatlarla kırıldığı, birçok duvarın yıkılarak balkonun odaya katıldığı, buraya sürekli yükler (Oturma grubu, kitaplık, çamaşır makinası, buzdolabı vs.) konularak çatlaklara sebep olunduğu, birçok evin oturulamaz halde olduğu (Şek. 2) ama ikamet edenlerin bulunduğu tespit edilmiş, raporlanmış, yetkili kurumlara sunulmuş, müteakiben kazı çalışmalarına başlanılmıştır.

Şekil 2. Kirişi kırılmış, bodrum katında su kuyusu ve pompa düzeneği kurulmuş yapı

2.5 Patlatmalı Kazıların Çevresel Etkileri

Patlatmalı kazıda amaç çevreye, cana, mala ve değerlere zarar vermeden, minimum rahatsızlık vererek optimum parçalanma ve ötelemeyi en ekonomik şekilde sağlamaktır. Bu amaçla kayaca 280.422 kg/cm^2'ye kadar basınç uygulanır. Patlatmalar sırasında açığa çıkan enerjiler Faydalı Enerji ve Kayıp Enerji olarak 2 grupta toplanır (Kuzu, 2011).

Faydalı Enerji; Kayayı kırma ve ötelemede harcanan enerjilerdir. Bunlar: Şok enerjisi, şok basıncı, gaz enerjisi ve gaz basıncıdır. Bu enerjilerin, toplam faydalı enerji içindeki dağılımı sırasıyla % 15 ve % 85 oranındadır. Parçalanan kayanın aynadan çıkış hızı yüzey atımında 10-30 m/s, tünelde 40-100 m/s'dir.

Kayıp Enerji: Faydalı enerji dışındaki enerjilerdir. Bunlar: Atmosferde yayılan ısı, ışık, ses enerjileri ve yeryüzünde yayılan, patlatma kaynaklı titreşimlerin kaynağı olan, sismik dalgalar ile taşınan sismik enerjidir.

Titreşim açısından, atım yerine yakın (<200 m) alanda en etkileyici faktör patlatma tasarımı ile ilgili değişkenler olurken, uzak mesafede (>200 m) dalganın taşındığı ortam, patlatma tasarımından fazla önem kazanır. Genellikle; büyük atımlar, kalın toprak tabakaları, tortul tabakalar, uzun mesafeli kombinasyonlar yapılarda tehlike oluşturur. Çünkü titreşimler ilerlerken sönümlenerek binaların doğal frekans değerleri (~4-12 Hz) ile aynı frekans oluşturduğunda yapılarda rezonans oluşturarak zarara yol açabilirler.

En güvenli tahmin, atımlar gözlemlenerek elde edilir. Patlatma kaynaklı titreşimlerin tahmininde Ölçekli mesafe (SD)-Maksimum parçacık hızı (PPV) arası ilişkinin ampirik olarak incelenmesi uygulanan başlıca yoldur.

Yapısal hasar oluşumunda PPV, Frekans, SD, Hava şoku, Deplasman, İvme, Periyot değerleri, sismik dalga tipi, kaya fırlaması, jeolojik yapı, jeoteknik değerler, temel tipi, yapı türü ve konumu, tasarım, topoğrafya, iklim vd. önemlidir. Patlatmalı kazıların çevreye olumsuz etkileri (yer sarsıntısı, kaya savrulması, hava şoku, toz-gaz emisyonu) kaçınılmazdır. Patlatmalı kazı yaparken detonasyon anında oluşan gazlar kaya kütlesi içerisinde yeterince hapsedilemez ise çatlaklardan atmosfere erken ve yüksek hızda deşarj olurken kaya parçalarını da iterek taş savrulmasına, atmosfere boşaldıklarında ise hava şokuna sebep olur. Yüzey atımlarında maksimum taş fırlama mesafesi (Lm, m) $Lm=260xd^{2/3}$ (d:delik çapı, inç; Jimeno vd. 1995) formülü ile hesaplanır. Fırlayan taşın 2 km uzaktaki insana çarpması ile can kaybı yaşanmıştır. Toz, kaya kütlesi hareket ettiğinde iç öğütme sonucu oluşur.

Patlatmalı kazı yaparken çevresel etkilerin ve yapısal hasar riskinin minimize edilmesi için en önemli unsurlar atım yerine uzaklık, birim zamanda patlayan maksimum patlayıcı madde miktarı ve kapsül gecikme aralığıdır. Patlatma Mühendisi; atım sırasında ortaya çıkacak kayıp enerjinin çevreye verebileceği olumsuzlukları minimize etmek için gerekli önlemleri almalı, gereksiz önlemler alarak maliyeti yükseltmemelidir. Maruz kalınan şikâyetler (haklı veya haksız (psikolojik, bilgisizlik, kötü niyet)) değerlendirilmelidir.

3 TÜNEL KAZILARI VE ÖLÇÜMLER

3.1 Proje'de Kazı Çalışmaları

Şaftlar, Tam kesit kaya tüneli kazı makinesi (TBM) ve Zemin basıncını dengeleyerek kazı yapan tam kesit tünel açma makinası (EPBM) montaj/demontajı yapılan tüneller, kaçış tünelleri, Kozyatağı-Kartal İstasyonları arasındaki hat tünelleri, asansör boşlukları Konvansiyonel yöntemlerle kazılmıştır. Bu kazılar yapılırken güvenlik, çevre, verimlilik ve ekonomiklik kıstasları esas alınarak frezözler (rotary bitli kesici), kırıcılar (hidrolik, havalı, elektrikli), delme-patlatma teknolojisi ve Kısmi kesit tünel açma makineleri (Roadheader) kullanılmıştır. Tünel inşa ederken Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) uygulanmıştır.

Patlatmalı kazı yaparken; delikler jumbo ile delinmiştir. Patlatmada, Orta Çekme ve Paralel Çekme yöntemleri uygulanmış, Paralel çekmedeki boş delikler 89 mm, diğer delikler 41 mm çaptadır. Patlayıcı olarak P. Magnum 365 (yoğunluğu 1,20 g/cm3, ideal patlama hızı 6.437 m/s, ideal patlama basıncı 121.400 atm) çevre deliklerinde Trimex, 47 farklı gecikme aralıklı Nonel Exel MS/LP kapsül, bağlantı elemanı olarak İnfilaklı fitil (6 g/m-PETN), fitili ateşleyici olarak taviksiz elektrikli kapsül, ateşleme cihazı olarak elektronik manyeto kullanılmıştır.

3.2 Sismik Ölçümlerin Yapılması

Yersarsıntısı ile ilgili ilk ölçümler Rockwell tarafından 1919'da yapılmıştır. Proje'de, sismik enerjinin oluşturduğu titreşimler jeofon, hava şoku ise mikrofon ile elektrik sinyalleri şeklinde Instantel marka cihaza gönderilerek parametre değerleri hafızaya kaydedilmiştir. Atım ile ölçüm istasyonları arası mesafeler teodolit ile belirlenmiş, atıma yakın yapıların yanı ölçüm istasyonu olarak bilinçli tercih edilmiştir. Atım aynası ile ölçme istasyonları arasındaki mesafelerin % 86'sı 200 metre veya altındadır (Çiz. 3).

Çizelge 3. Atım ile ölçme istasyonu arasındaki mesafeler

Atım bölgesi	Atım ile ölçme istasyonu arasındaki mesafeler								Toplam	
	0-50 (m)	50-100 (m)	100-150 (m)	150-200 (m)	200-250 (m)	250-300 (m)	300-350 (m)	350-400 (m)	(adet)	(%)
Kadıköy İst.	3	12	6	1	-	-	-	-	22	2
İbrahimağa İst	6	9	6	2	-	-	-	-	23	2
Acıbadem İst.	25	134	15	-	-	-	-	-	174	17
Ünalan İst.	-	5	4	5	5	5	4	-	28	3
Ünalan Makas	-	1	-	-	-	-	-	-	1	0
Göztepe İst.	5	16	1	-	-	-	-	-	22	2
Yenisahra İst.	61	138	33	2	-	-	1	-	235	24
Kozyatağı İst.	12	43	14	9	57	35	6	2	178	19
Bostancı İst.	2	11	34	19	10	10	2	6	94	9
Küçükyalı İst	16	88	93	19	2	-	-	-	218	22
Toplam (adet)	130	457	206	57	74	50	13	8	995	100
Toplam (%)	13	46	21	6	7	5	1	1	100	

3.3 Titreşimlerin Parametre Değerleri

Projede patlatmalı kazı yapılırken ölçülerek sismografın hafızasına kaydedilen hava şoku ve titreşim parametrelerinin değerleri, aritmetik ortalamaları aşağıdadır (Çiz. 4, 5).

Çizelge 4. Ölçülen PPV, frekans ve mesafe değerleri

Parametre	Formasyon	Kayaç	PPV (mm/s)	Frekans (Hz)	Mesafe (m)	Gecikme başına şarj (kg)	Örtü kalınlığı (m)
Kadıköy İst.	Trakya F.	Diyabaz	7,62	85	86,98	1,77	35,53
İbrahimağa İst.			14,50	64	37,02	1,51	25,82
Acıbadem	Tuzla-Baltalimanı F.	Diyabaz, Kireçtaşı	24,80	85	48,28	3,20	28,23
Ünalan İst.	Kartal F. Zon-A	Kireçtaşı	29,10	100	34,22	4,46	37,14
Ünalan Makas			4,44	47	69,97	2,45	39,21
Göztepe İst.			5,33	57	85,09	2,65	32,08
Yenisahra İst.		Kireçtaşı, Diyabaz	8,38	73	65,79	2,75	24,62
Kozyatağı İst.	Kartal F. Zon-B	Kireçtaşı	29,10	73	56,00	3,04	34,74
Bostancı İst.			5,59	73	103,39	3,24	31,08
Küçükyalı İst.	Kurtköy F.	Arkoz	14,60	73	42,34	2,59	18,90

Çizelge 5. Ölçülen titreşim ve hava şoku değerlerinin aritmetik ortalamaları

Parametre	Atım sayısı	Ölçüm sayısı	Özgül şarj Patlayıcı	Özgül şarj Kapsül	Frekans	Genlik	Mesafe	Hava şoku	Ölçekli mesafe	Gecikme başına şarj	Örtü kalınlığı
Sembol			Wö	K	f	A	R		SD	W	H
Birim	adet	adet	kg/m^3	ad/m^3	Hz	mm	m	dB	m/kg$^{1/2}$	kg	m
Kadıköy İst.	8	22	1,36	0,39	72,75	0,05	93,65	113	71,99	1,77	35,53
İbrahimağa	6	23	3,38	0,73	59,48	0,12	88,11	121	74,54	1,51	25,82
Acıbadem	68	174	1,86	0,61	66,06	0,09	75,74	122	48,30	3,20	28,23
Ünalan İst.	14	28	1,18	0,38	75,04	0,06	189,32	111	93,18	4,46	37,14
Ünalan Makas	1	1	1,00	0,89	47,00	0,07	69,97	122	44,70	2,45	39,21
Göztepe İst.	11	22	0,92	0,37	54,00	0,07	70,66	114	40,26	2,65	32,08
Yenisahra	120	235	0,94	0,30	59,64	0,16	51,54	110	37,51	2,75	24,62
Kozyatağı	66	178	1,25	0,28	71,21	0,10	183,91	126	110,88	3,04	34,74
Bostancı İst.	40	94	1,31	0,45	81,36	0,01	172,14	109	97,66	3,24	31,08
Küçükyalı	67	218	1,48	0,49	64,64	0,07	103,69	121	70,04	2,59	18,90
Toplam	401	995									

Patlatmada atmosfere boşalan reaksiyon ürünü gazlar önce hava şokunu, atımdan uzaklaştıkça gürültüyü oluşturur. Hava şoku yapılarda sarsıntı ve hasara yol açabilirken, gürültü insanları rahatsız eder, hasar vermez. Atımlar sırasında ölçülen seslerin şiddeti 148 dB (gürültü, hava şoku) altındadır. Ölçülen ses ve gürültü değerlerinin toplam ölçüm sayısına oranı % 99, hava şoku değerlerinin oranı ise % 1'dir (Çiz. 6, 8).

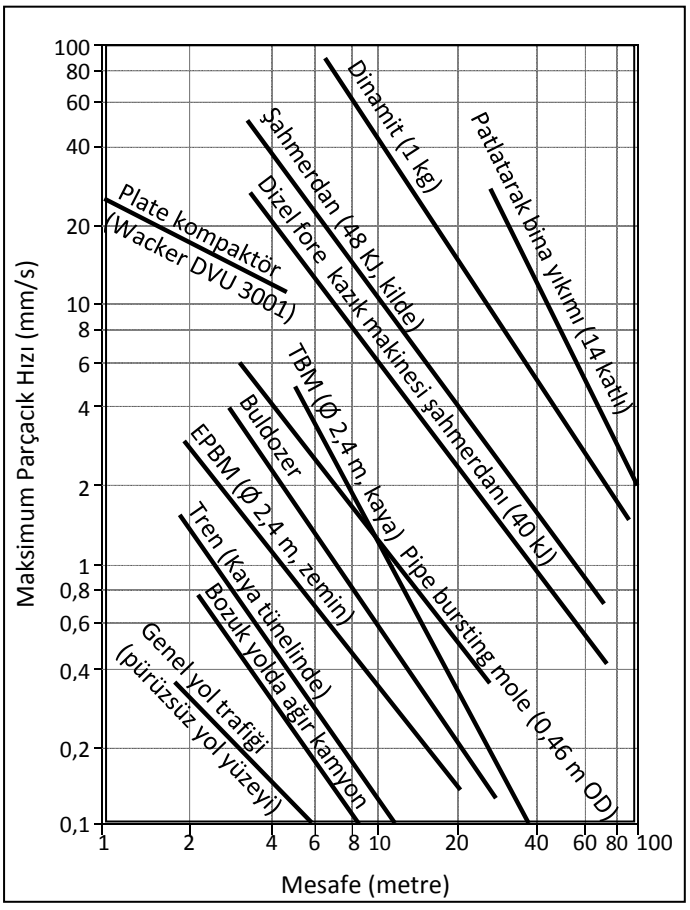
Çizelge 6. Ölçülen gürültü ve hava şoku değerlerinin oransal dağılımı

Gürültü değeri	Kadıköy (%)	İbrahimağa (%)	Acıbaden (%)	Ünalan (%)	Göztepe (%)	Yenisahra (%)	Kozyatağı (%)	Bostancı (%)	Küçükyalı (%)
80-130 dB	100,00	100,00	86,15	100,00	100,00	93,72	68,13	97,73	98,55
130-140 dB	-	-	13,85	-	-	6,28	18,68	2,27	1,45
140-150 dB	-	-	-	-	-	-	13,19	-	-

4 ATIMLARIN YAPISAL HASAR RİSKİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Günlük yaşantımızda karşılaştığımız birçok aktivite (inşaat, madencilik, trafik, yıkım vs) sırasında titreşim oluşmaktadır. Günümüzde, yapısal hasar riski açısından en fazla değerlendirmeye tabii tutulan titreşim parametreleri parçacık hızı ve frekanstır.

12 farklı kaynağın oluşturduğu titreşimin PPV değer aralığı aşağıdadır (Şek. 3) Şekil 3 incelendiğinde, KKM'nda patlatmalı kazılar yaparken ölçülen PPV değerlerinin, birçok aktivite sırasında ölçülen PPV değerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

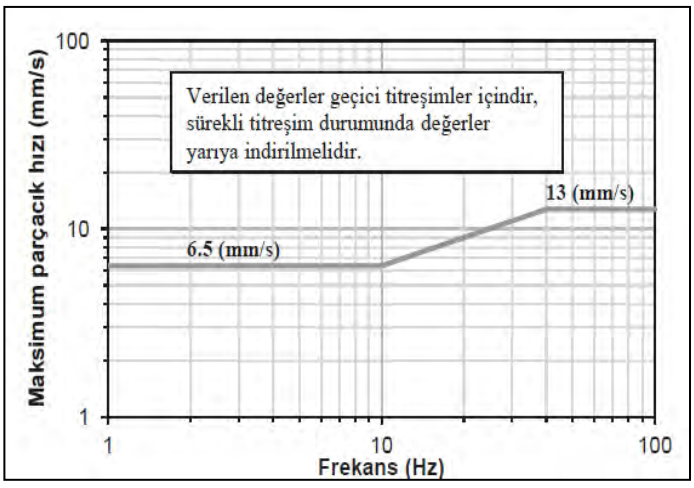


Şekil 3. Farklı kaynakların oluşturduğu titreşimlerin PPV değerleri (New, 1986)

İnsanlar, Parçacık hızı değeri >0,25 mm/s olan sarsıntıları algılar. Parçacık hızı (PV) değerleri, 12 ve 20 mm/s eşik değerlerini aştığında konutlarda sırası ile kum ve alçı sıvalarda gözle görülebilen çatlaklar oluşur.

Kaplaması yapılmamış tünelde PV değeri 305 mm/s iken kaya düşmesi gerçekleşmiş, PV değeri 610 mm/s iken yeni çatlaklar oluşmuştur (Langefors, Kihlström, 1973). PV değeri 254 mm/s olduğunda sağlam kayada herhangi kırılma gözlemlememiştir (Calder, 1977). PPV değeri 254-635 mm/s arasında ise az kavlaklanma, PPV değeri 635-2.540 mm/s arasında ise büyük çekme ve radyal çatlaklar oluşmaktadır. PV değeri 2.540 mm/s olduğunda kaya kütlesi kırılarak ayrılır. PV değeri 635 mm/s'nin üstüne çıktığında çoğu kaya belli oranda hasar görür (Oriard, 1982; Kazaz, Kazaz, 2015).

Patlatma kaynaklı PPV değeri tahminine yönelik birim zamanda patlayan maksimum patlayıcı miktarı (W) ve atım-ölçüm noktası arası mesafeyi (R) esas alan birçok ampirik yaklaşım vardır. Tarihi ve hassas yapılar için önerilen titreşim kriteri grafiği Şekil 4'tedir.



Şekil 4. Tarihi, hassas eski yapılar için PPV-Frekans ilişkisi (Konon, Schuring, 1983)

Yapısal hasar riski açısından atım lokasyonu yakınlarında patlatma tasarımı (delik düzeni, aynı anda patlayan patlayıcı miktarı, gecikme süresi, atım yönü vs); atımdan uzaklaştıkça sismik dalgaların iletildiği, yapının üzerinde bulunduğu jeolojik yapının mühendislik özellikleri daha etkin ve tayin edicidir. 10 Hz altındaki frekanslar yapıda hasar olasılığını arttırır. Sağlam kaya üzerine inşa edilen yapıların hasar görme riski azdır. Projede yapılan atımların yapılara etkisi değerlendirilirken ulusal kısıtlar, Alman DIN 4150, ABD USBM ve OSM Normları ve realite göz önüne alınmıştır. Bu bildiride en muhafazakâr norm olan DIN 4150 Normu grafikleri kullanılacaktır. Bu normda yapı türü, PPV ve frekans değeri ilişkisi, yapısal hasar sınırı belirlenmiştir (Çiz. 7).

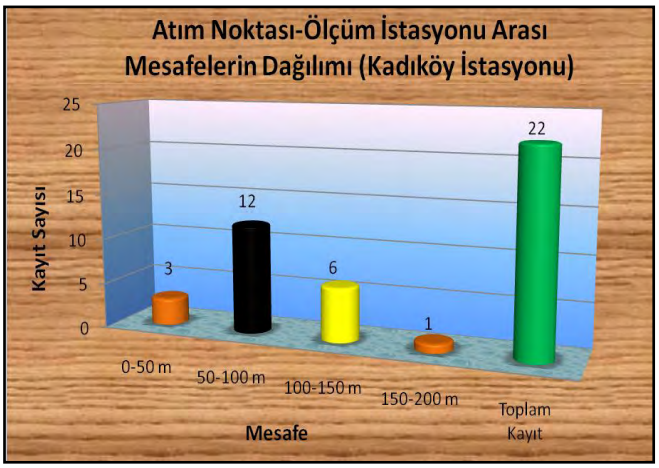
Çizelge 7. Din 4150 Normu'nda yapı türü ve Frekansa göre PPV sınır değerleri (Alan, 2013)

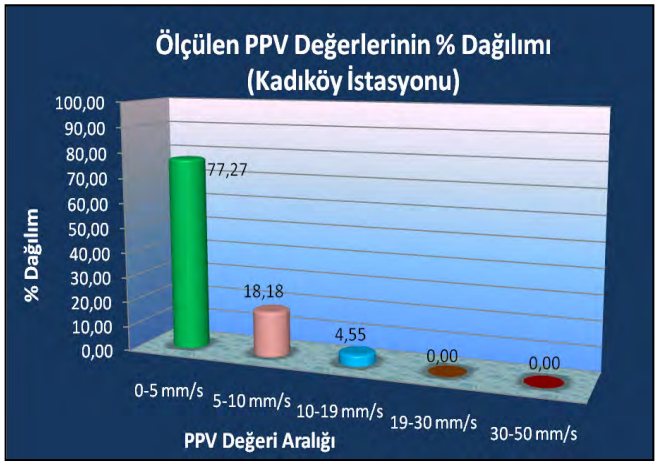
Frekans (Hz)	Parçacık hızı sınır değerleri (PPV) (mm/sn)	Yapı türü
0-10	3	Eski bina, tarihi yapı
	5	Dayanıklı bina, yığma tuğla
	20	Betonarme, çelik konstrüksiyon
10-50	3-8	Eski bina, tarihi yapı
	5-15	Dayanıklı bina, yığma tuğla
	20-40	Betonarme, çelik konstrüksiyon
50-100	8-10	Eski bina, tarihi yapı
	15-20	Dayanıklı bina, yığma tuğla
	40-50	Betonarme, çelik konstrüksiyon

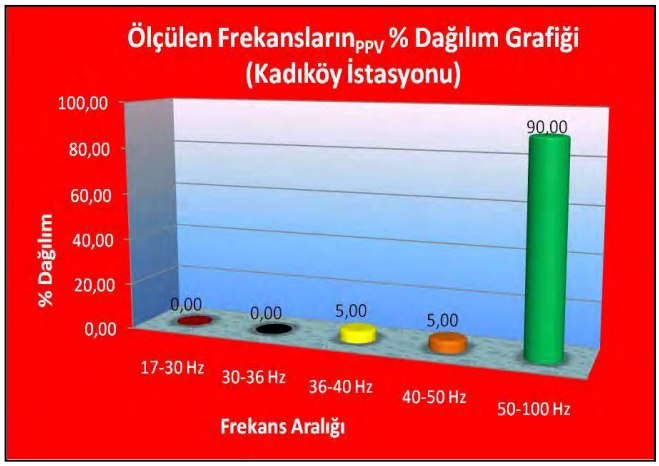
Birim zamanda birim yüzeyden geçen ses enerjisi, ses şiddeti olarak tanımlanmaktadır. Şiddetli ses yapılara hasar verebilir. Ses dalgalarının frekans değerleri 0,1-200 Hz arasında olup <20 Hz sesleri duyamayız. Ses hızı, topoğrafya ve atmosferik şartlara göre değişmekle birlikte normal şartlarda havada 344 m/s, suda 1.540 m/s'dir. Ses birimi dB ise, ses şiddeti logaritmik olarak artmaktadır. Proje'de kaydedilen ses değerleri Çizelge 8'de; atım-ölçme istasyonları arası mesafe, frekans, PPV dağılımı ve Alman DIN 4150 Normu grafikleri aşağıda (Şek. 5-14) verilmiştir. Grafiklerdeki eşik hasar çizgileri sırasıyla hassas yapıları, konut türü yapıları ve endüstriyel binaları temsil etmektedir.

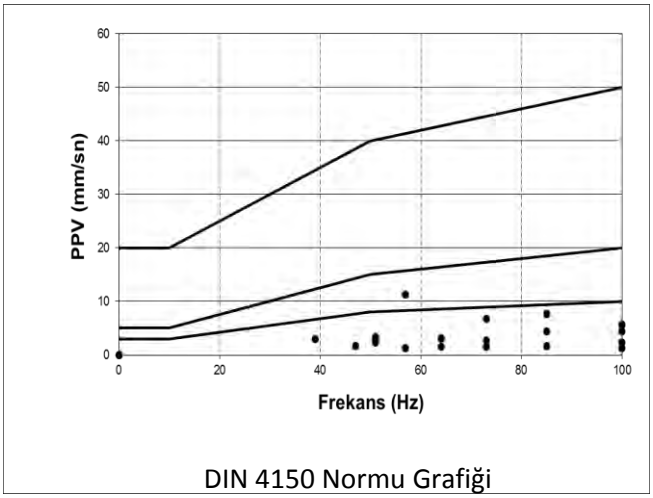
Çizelge 8. Ses şiddeti, etkisi, şiddet faktörü ve Proje'de ölçülen ses değerlerinin dağılımı

	Ses şiddeti (dB)	Etki	Sesin şiddet faktörü (Eşik değerin katları)	Proje'de ölçülen ses dB aralığı	adet	(%)
Hava şoku	190	Mavi balina sesi	10.000.000.000.000.000.000			
	180	Binalarda hasar oluşur	1.000.000.000.000.000.000			
	170	Camlar ve panolar kırılır, sıva çatlar	100.000.000.000.000.000			
	160	Kulak zarı hasar görür, gevşek cam düşer	10.000.000.000.000.000			
	150	Pencere camları şıngırdar, bazıları kırılır	1.000.000.000.000.000			
	140	Ani ses için maksimum seviye	100.000.000.000.000	140-150	12	1,21
Gürültü	130	Emniyetli ses seviyesi, hidrolik kırıcı sesi	10.000.000.000.000	130-140	58	5,83
	120	Rahatsız edici sürekli ses sınırı, ağrı eşiği	1.000.000.000.000	120-130	285	28,64
	110	Gök gürültüsü, demir kesen daire testere	100.000.000.000	110-120	277	27,84
	100	Darbeli matkap,helikopter sesi	10.000.000.000	100-110	124	12,46
	90	8 saatlik sürekli sesten rahatsız olma	1.000.000.000	90-100	35	3,52
	80	Elektrikli süpürge sesi, bağırarak konuşma	100.000.000	80-90	1	0,1
	70	Caddede yoğun trafik sesi, kamyon sesi	10.000.000			
Ses	60	Karşılıklı konuşma	1.000.000			
	50	Sınıf ortamı, yağmur, bulaşık makinası sesi	100.000			
	40	Evdeki sessizlik, oturma odası sesi	10.000	0-80	203	20,4
	30	Kütüphane, sessiz özel ofis sesi	1000			
	20	Fısıltı ile konuşma, sessiz orman sesi	100			
	10	Yaprak hışırtısı, ağaçtan düşmesi sesi	10			
	0	Eşik değer (duyulabilir alt sınır 0,0002 µbar)	1			
Topam					995	100.00



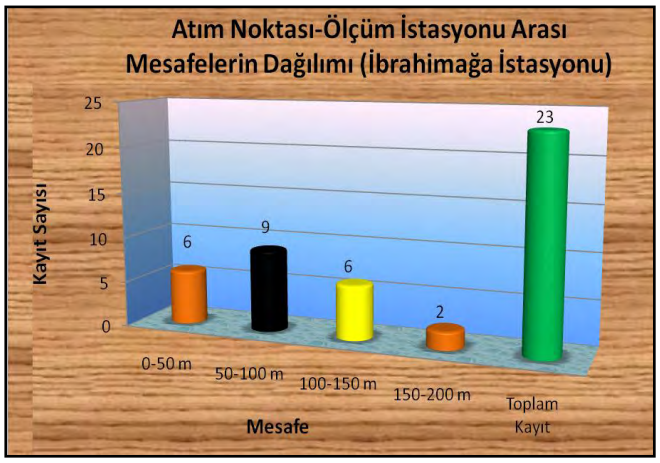


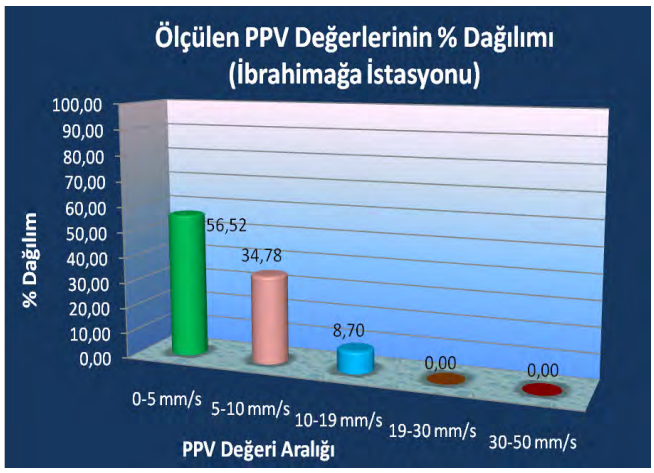


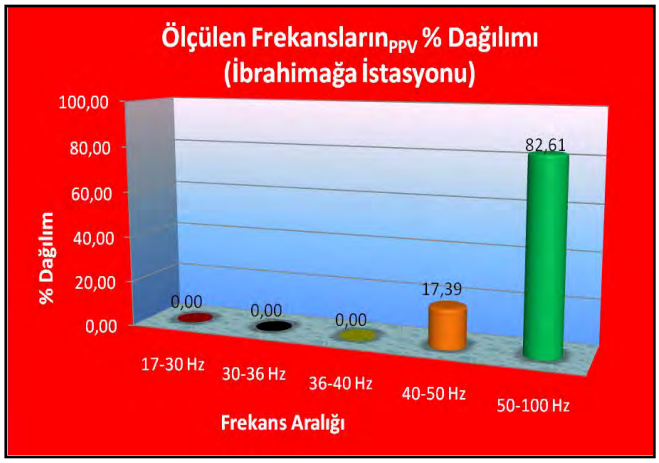


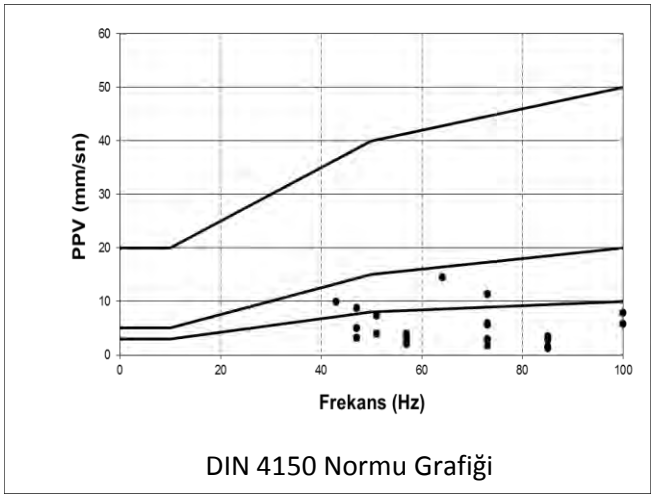
DIN 4150 Normu Grafiği

Şekil 5. Kadıköy İst'nda mesafe, frekans ve PPV değer dağılımı, DIN 4150 Norm Grafiği



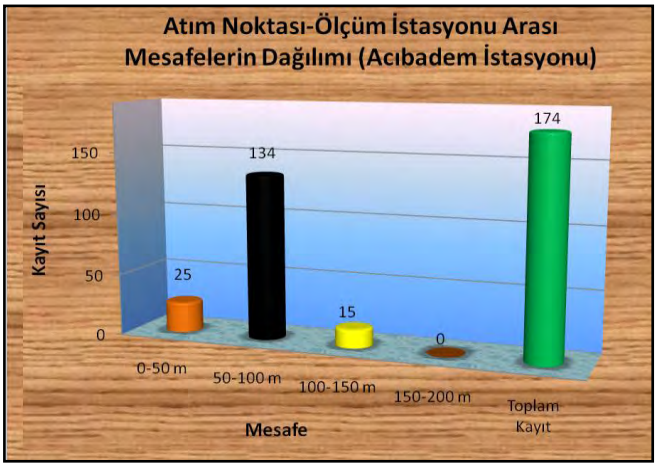


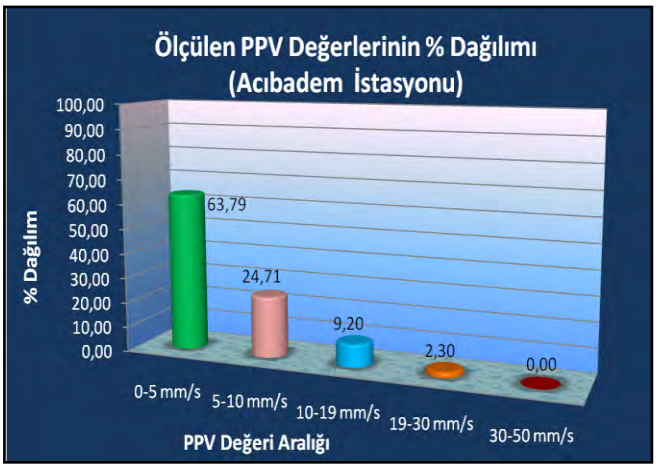


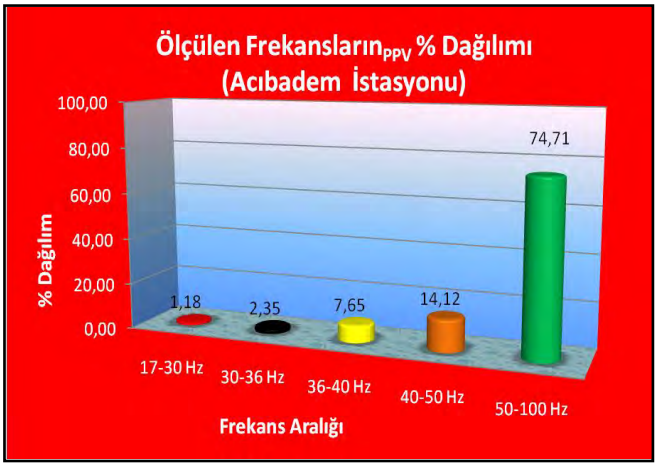


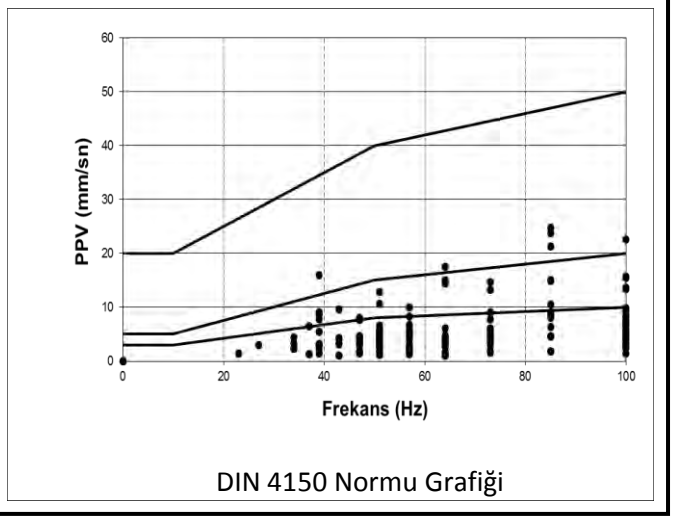
DIN 4150 Normu Grafiği

Şekil 6. İbrahimağa İst'nda mesafe, frekans, PPV değer dağılımı, DIN 4150 Norm Grafiği



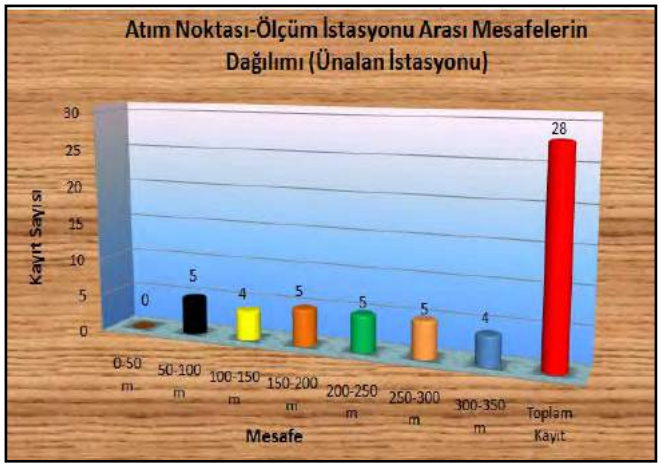


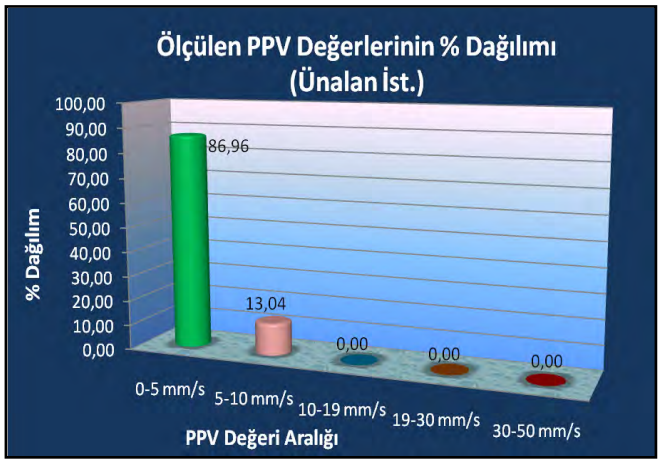


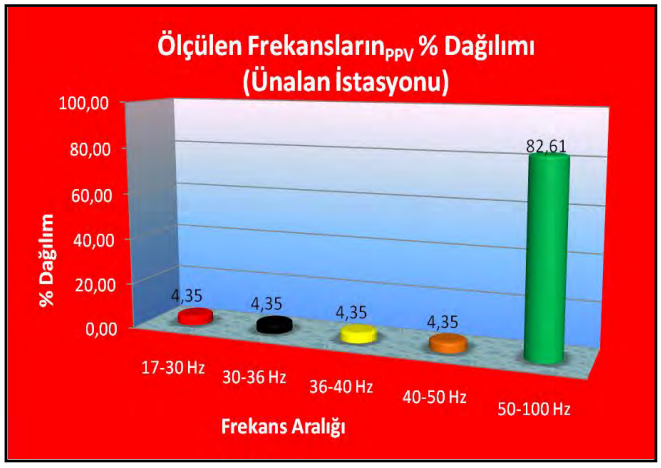


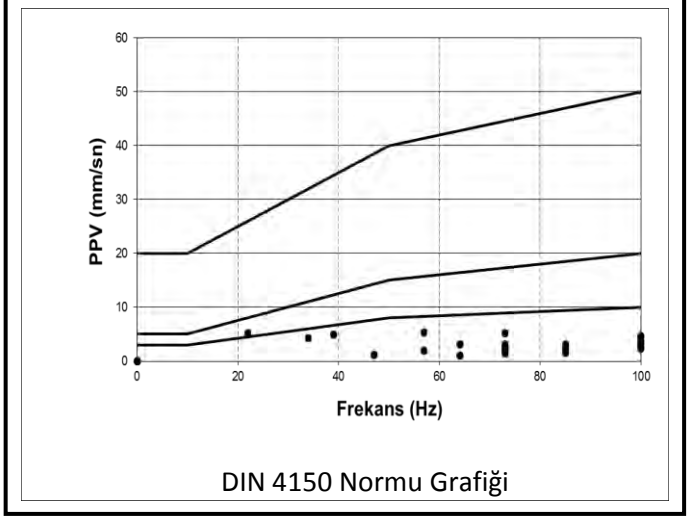
DIN 4150 Normu Grafiği

Şekil 7. Acıbadem İst'nda mesafe, frekans ve PPV değer dağılımı, DIN 4150 Norm Grafiği



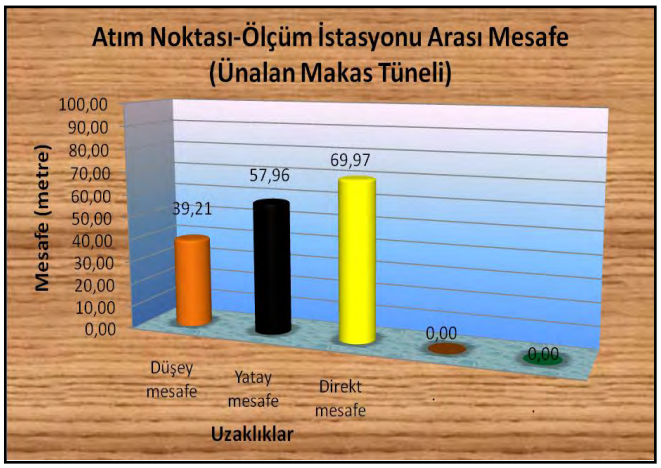


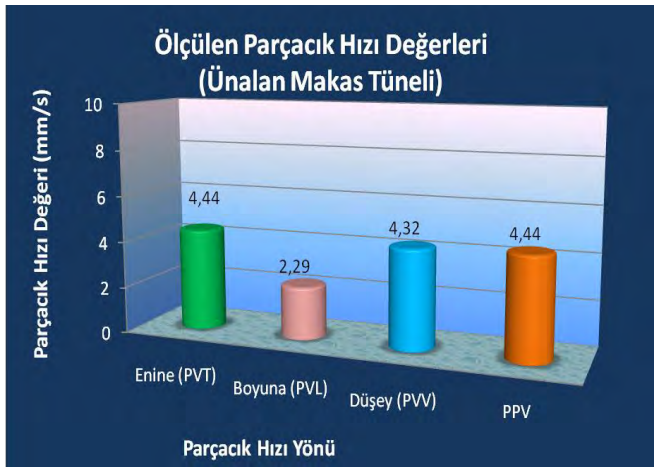


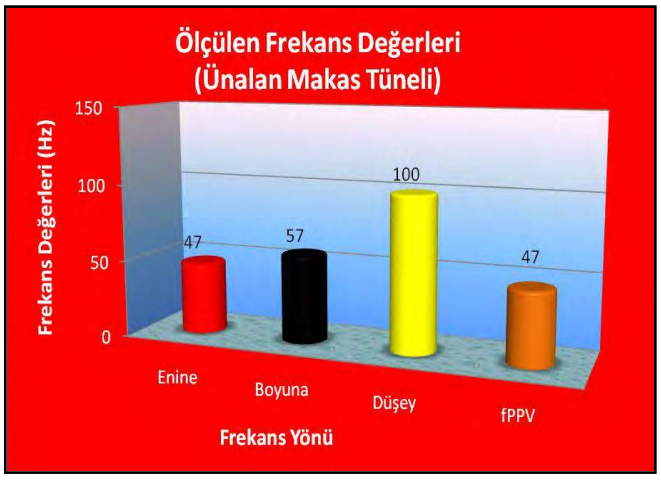


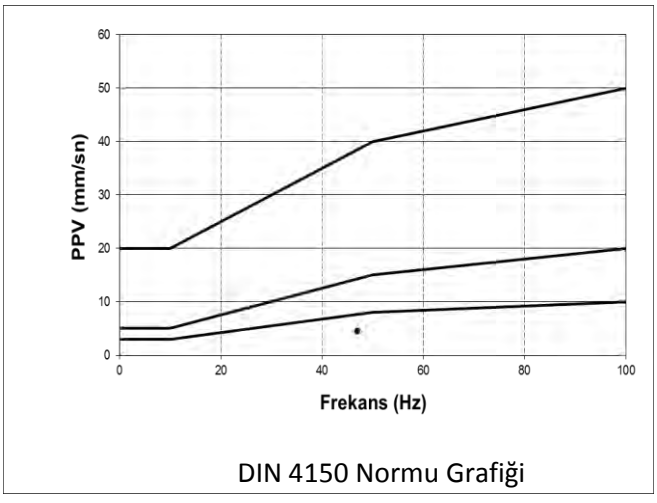
DIN 4150 Normu Grafiği

Şekil 8. Ünalan İst'nda mesafe, frekans ve PPV değer dağılımı, DIN 4150 Norm Grafiği



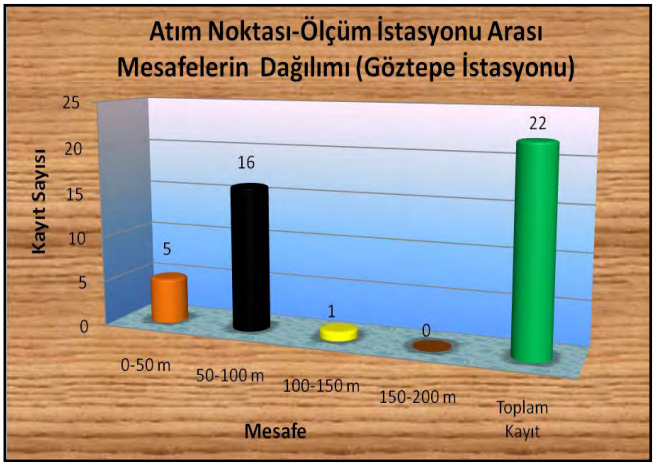


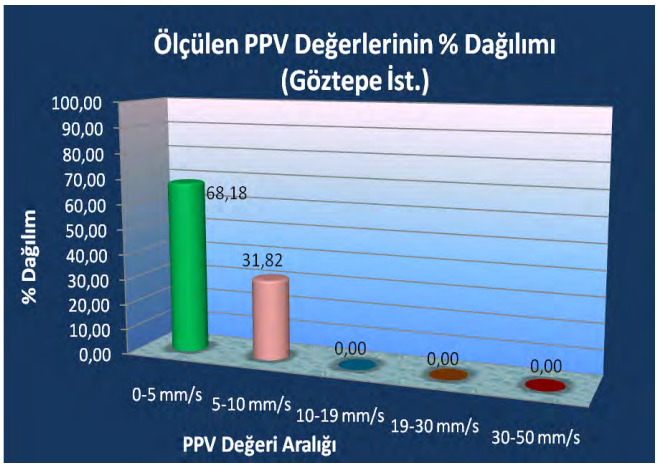


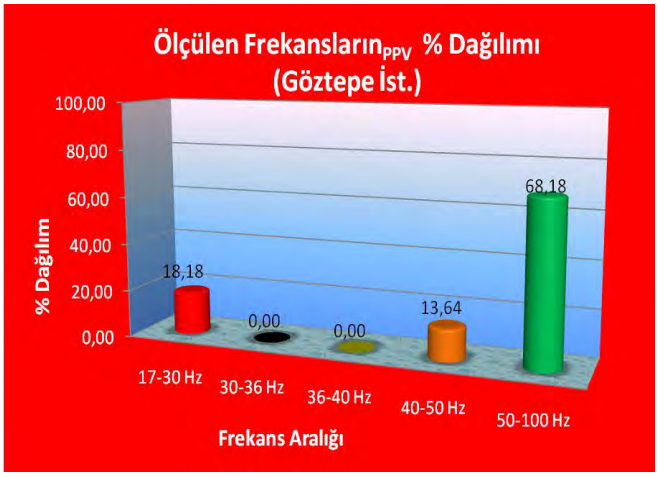


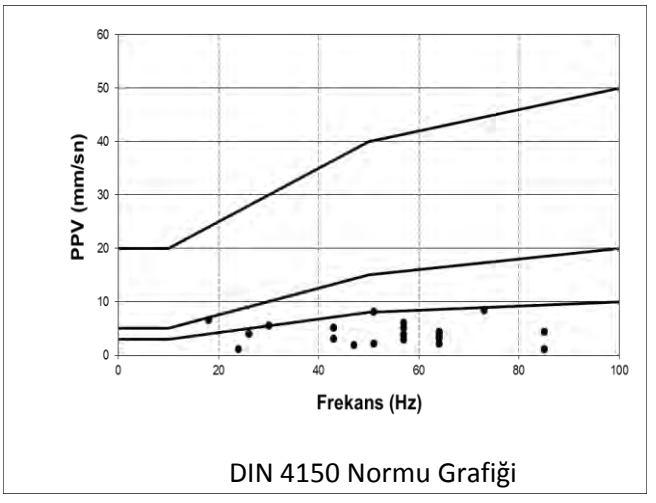
DIN 4150 Normu Grafiği

Şekil 9. Ünalan Makas'da mesafe, frekans, PPV değer dağılımı, DIN 4150 Norm Grafiği



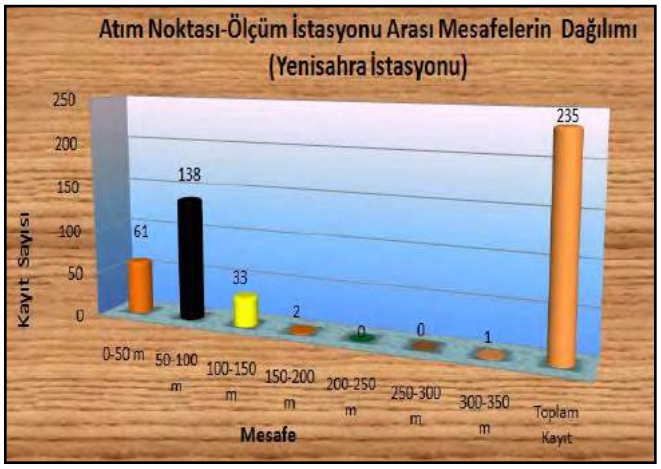


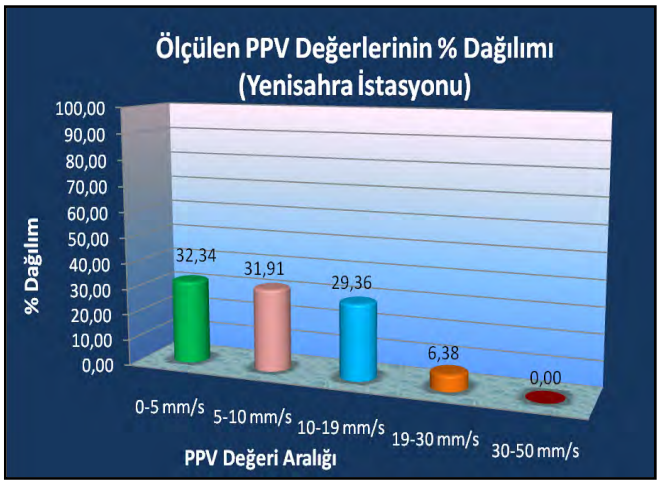


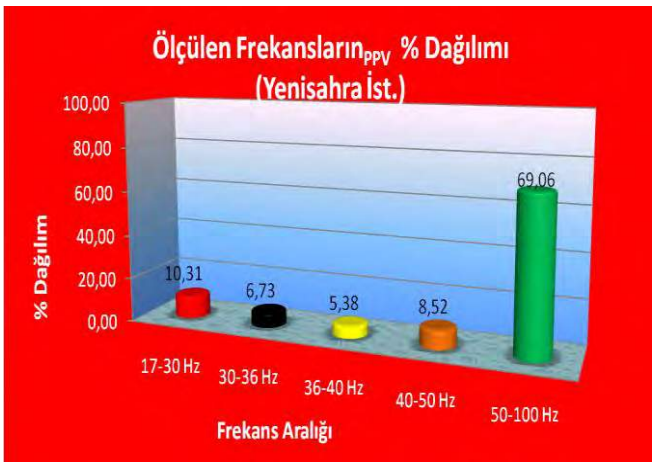


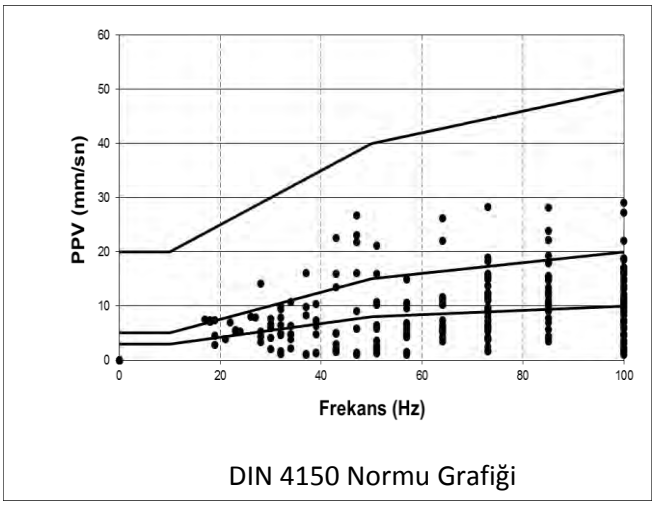
DIN 4150 Normu Grafiği

Şekil 10. Göztepe İst'nda mesafe, frekans ve PPV değer dağılımı, DIN 4150 Norm Grafiği

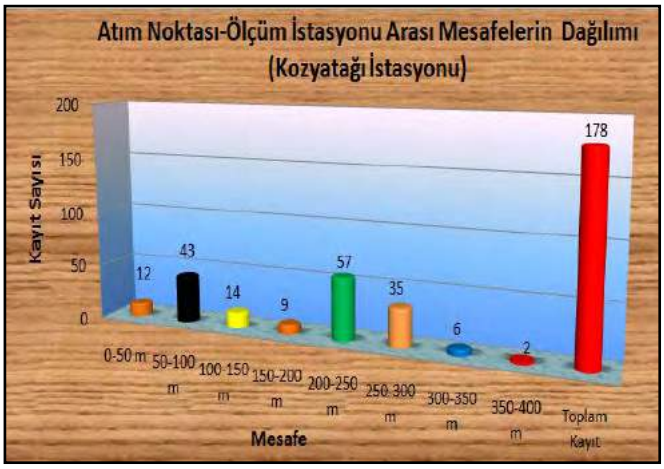


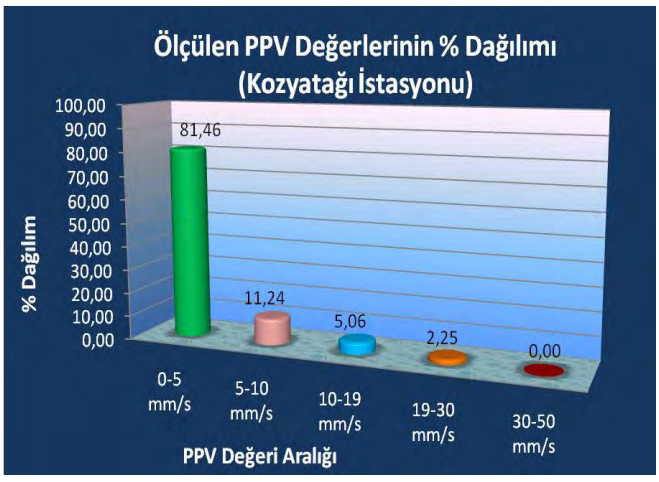


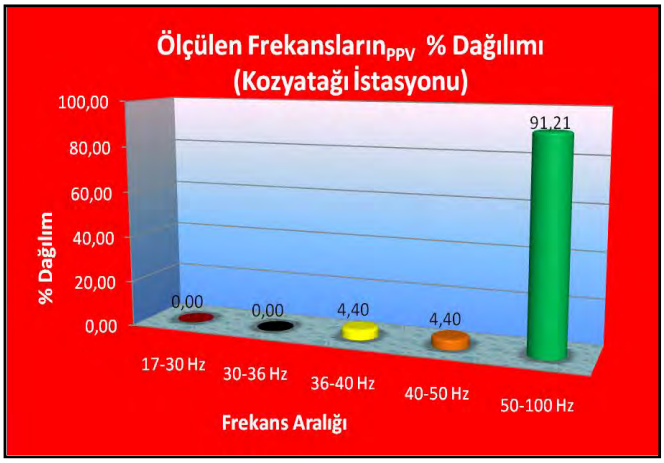


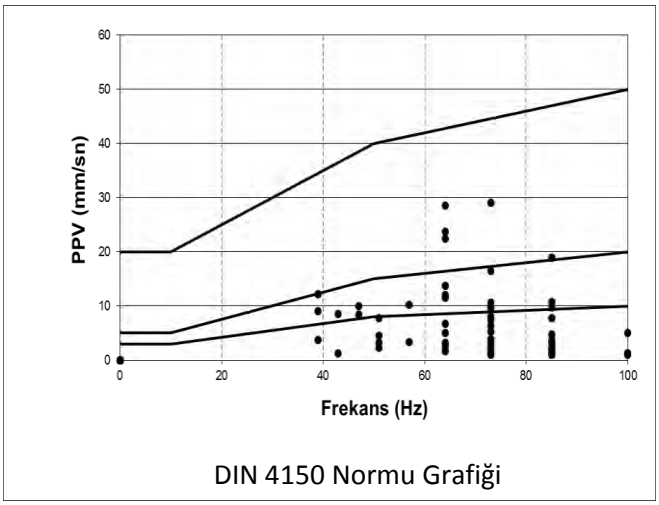


Şekil 11. Yenisahra'da mesafe, frekans ve PPV değer dağılımı, DIN 4150 Norm Grafiği

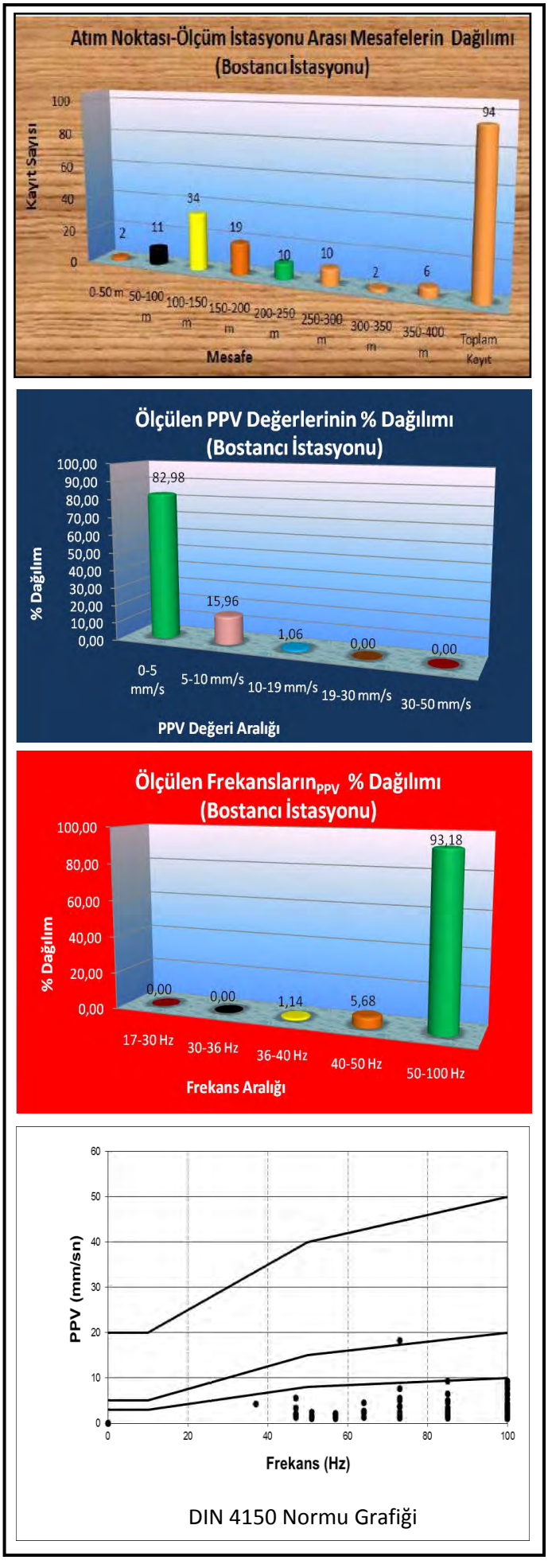




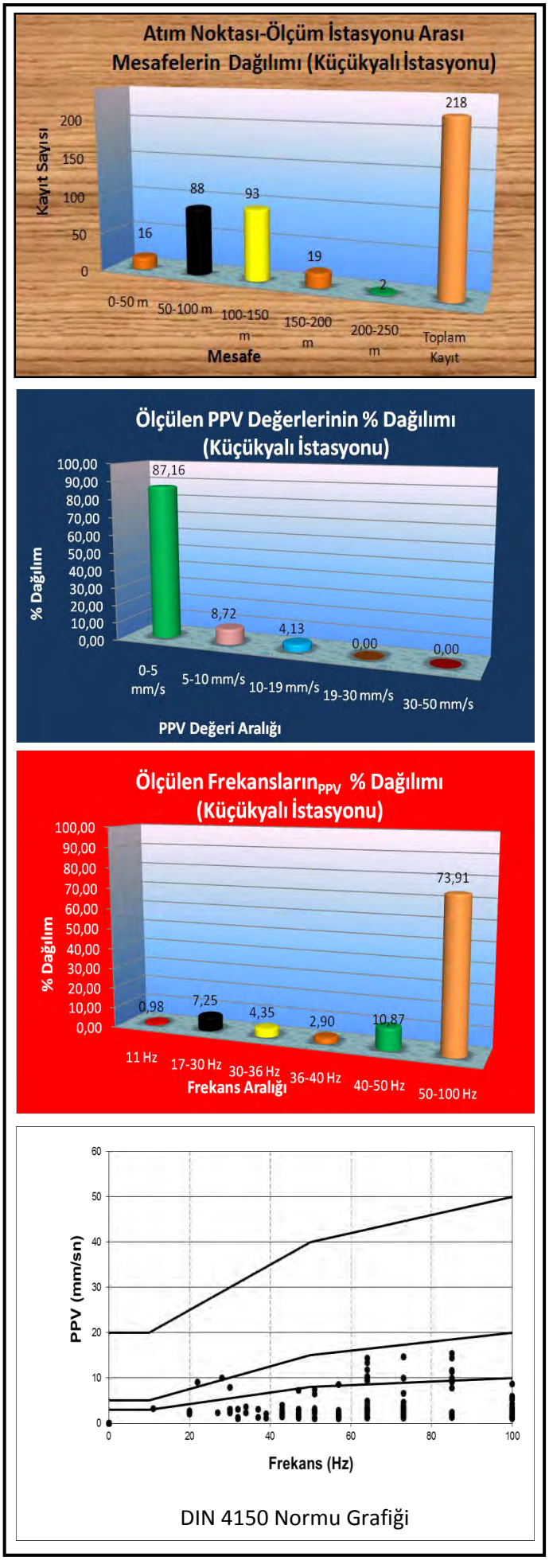




Şekil 12. Kozyatağı İst'nda mesafe, frekans, PPV değer dağılımı, DIN 4150 Norm Grafiği



Şekil 13. Bostancı İst'da mesafe, frekans ve PPV değer dağılımı, DIN 4150 Norm Grafiği



Şekil 14. Küçükyalı'da mesafe, frekans ve PPV değer dağılımı, DIN 4150 Norm Grafiği

Titreşimlerin ölçülen parametre değerleri, istatistiksel sonuçları, dalga formları ve reel durum sentezlenerek değerlendirilmiştir. Ölçülen PPV değerleri (Eşik değer: 50 mm/s DIN 4150) ve hava şoku (Limit değer, 140 dB) Eşik hasar değerinin altındadır. Yüksek frekanslı patlatmalar (% 90,13'ü >40 Hz) yapılmıştır. Limit deplasman: anıtlar için 0,1 mm, normal bina için 0,4 mm, mühendislik yapılarında ise 0,76 mm'dir (Alan 2013). Ölçülen pik deplasman değeri 0,19 mm'dir.

5 SONUÇLAR

Projede patlatmalı kazılar yapılmadan önce güzergâh boyunca 100 m genişlikte (50'şer m sağ ve sol tarafı kapsayacak şekilde) yapı tespitleri yapılıp raporlanmış, onaylatılmış, ilgili birim/kurum/kuruluşlara sunulmuştur.

Düşük genlik ve PPV, yüksek frekans oluşturacak kapsüller kullanarak gecikme başına özgül şarj pik düzeyde tutulmuş; tünel girişine bant perde çekilerek ses şiddeti azaltılmış, emniyetli, verimli, ekonomik 1,26 kg/m^3 özgül şarj ve % 91,80 verimle İstanbul'da şehir içinde, yapıların ve deniz seviyesi altında (-32 m) dahi patlatmalı tünel kazısı yapılmıştır. Titreşimler ve reel durum, yapısal hasar açısından normlarla (USBM, DIN 4150, OSM) birlikte değerlendirilmiştir.

Patlatmaların titreşim parametre değerleri kaydedilmiş, raporlanıp bağımsız kuruluşlar tarafından onaylanmış, dağıtımı yapılmıştır.

Proje'de, patlayıcı-patlatma kaynaklı kaza olmamış, yapılara hasar verilmemiştir (Alan vd. 2007, Kahriman vd. 2007, Alan 2013).

5 ÖNERİLER

Patlatma yapılmadan önce mevcut yapıların teknik özellikleri ve yapısal hasar kriterleri belirlenmeli; patlatmanın yapılacağı kaya maddesi/kaya kütlesi, formasyonun jeolojik özellikleri ve jeomekanik değerleri, formasyonların mühendislik özellikleri tespit edilmeli; patlatmada oluşacak titreşim ve hava şoku tanımlanmalı, hedeflenen titreşim parametre değerleri ve hava şoku değeri belirlenmeli, yapıların hasar kriterleri ile patlatma sonrası parametreler eşleştirilerek patlatma tasarımı yapılmalı; tasarım mutlak uygulanmalı; öncesinde, atım sırasında ve sonrasında ölçümler yapılmalı; ölçülerek, istatiksel yöntemler veya ampirik formüllerle hesaplanarak elde edilen parametre değerleri ve tüm bilgiler sentezlenerek analiz edilmeli; özgün, bilimsel, matematiksel yorumlanmalı; sonuçlar paylaşılmalı, değerlendirilmelidir.

Yapılara zarar/hasar vermemek için; yüksek frekanslı (>40 Hz, min 12 Hz) ve düşük PPV değerli (tarihi/kalas üzeri sıva duvarlı/kerpiç yapılar/anıt/heykel için <13 mm/s, modern alçı pano duvarlı yapılar için <19 mm/s, çelik/betonarme yapılar için <51 mm/s, kaya mağaralar için <100 mm/s) yer titreşimi oluşturan, <140 dB hava şoku yaratan, taş fırlatmayan patlatmalı kazılar yapılmalıdır.

6 TEŞEKKÜR

Teşvik ve desteklerinden dolayı Sn. Ersin Arıoğlu'na, Sn. Prof. Dr. Ergin Arıoğlu'na, Sn. Prof. Dr. Ali Kahriman'a, Sn. Sami Özge Arıoğlu'na, Sn. Ramih Muştu'ya, Sn. İlker İnceleme'ye, Sn. İlker Tutkavul'a, Sn. Hacı Haksal'a, Sn. Ayhan Şahna'ya, Sn. Abdullah Kılıç'a, Sn. Mehmet Semizer'e, Sn. Gökalp Kahraman'a, Sn. Müfit Erdil'e, Sn. Alper Çeltikçi'ye, Sn. Ertuğrul Dinçel'e ve ekiplerime sonsuz teşekkürler...

7 KAYNAKLAR

Alan, E. 2013. Kadıköy-Kartal Metrosu Kozyatağı İstasyonu'nda Yapılan Tünel Patlatmalarının Yapısal Hasar Riski Açısından Değerlendirilmesi, İstanbul (Yüksek lisans tezi, Okan Üniversitesi).

Alan, E., Sefer, İ. 2007. Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesi'nde Yapılan Kontrollü Tünel Patlatmalarının Yapısal Hasar Riski Açısından Değerlendirilmesi, *5. Delme-Patlatma Sempozyumu,* Ankara.

Arıoğlu, E., Yüksel, A., Yeşilçimen, A. 2006. Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesi'nde Jeolojik ve Jeoteknik Araştırma Çalışmaları, *VIII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, İstanbul.

Jimeno, E.L., Jimeno, C.L., Carcedo, A. 1995. Drilling and Blasting of Rock, Brookfield, US.

Kahriman, A., Özer, U., Adıgüzel, D., Karadoğan, A., Aksoy, M., Mustu, R., Dinçer, E., Alan, E., Sefer, İ. 2007. Kadıköy-Kartal Metrosu Tünel Güzergâhında Patlatma Kaynaklı Titreşimlerin İncelenmesi, *2. Ulaşımda Yeraltı Kazıları Sempozyumu*, İstanbul.

Kazaz, İ., Kazaz, E. 2015. İnşaat Kaynaklı Yer Sarsıntısının Tarihi Yapılara Etkisi, *5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu*, Erzurum.

Konon, W., Schuring, J.R. 1983. *Vibration Criteria for Historic And Sensitive Older Buildings*. American Society of Civil Engineers, Houston.

Kuzu, C. 2011. Taşocağı İşletmeciliğinde Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler, *Madencilik*, Ankara.

New, B.M. 1996. *Ground Vibration Caused By Civil Engineering Works*. Research Report, 53, Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport, Berkshire.

Bir Yeraltı Maden İşletmesinin Galeri Patlatmalarında Elektronik Ateşleme Sistemi Kullanılarak İyileştirilmesi

Improving an Underground Mine by Implementing the Electronic Blasting Systems at Development Blasts

Ö.G. İlik, Ö. Düzgün, B. Gençtürk
Kapeks Üretim Patlayıcı Maddeler Limited Şirketi, Ankara

ÖZET Patlatmalı kazı uygulamalarında, patlatma verimini etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesi gecikme süreleridir. Kaya ozelliklerine uygun gecikme aralıklarının ve sürelerinin kullanılması, kayacın ötelenmesi ve kesme uygulamaları için radyal çatlakların oluşmasında büyük önem taşımaktadır. Belirlenen gecikme sürelerinin doğru ve tutarlı bir şekilde uygulanması elektronik ateşleme sistemleri ile mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmada, bir yeraltı maden işletmesinin galeri patlatmalarında, patlatma sonucu oluşan doğrusal ilerleme miktarının %17.7 orandaki arttığı ve fazla kazının (overbreak) azaldığı (%18.3) saptanmistir.

ABSTRACT Delay time is one of the most important parameters affecting the blast efficiency in rock blasting applications. Depending on the rock properties, the use of appropriate delay intervals and delay times for generating the radial cracks is very important for rock displacement and perimeter control applications. Accurate and consistent application of the specified delay times has become possible with the electronic initiation systems. In this study, 17.7% increase in the advance rate and reduction in the overbreak (18.3%) were obtained at an underground mine's development blasts.

1 GİRİŞ

Bilindiği üzere, Patlatma tasarımında ateşleme tasarımı ve özgül şarj hesaplaması patlatma performansını doğrudan etkileyen en önemli parametrelerdir. Uygun olmayan patlatma tasarımlarında, fazla kazı, az kazı (overbreak, underbreak), örselenmiş ve durağanlığını kaybetmiş yan cidarlar gibi sonuçlar meydana geldiği sıkça görülmektedir. Bu husus doğrultusunda delikler arasındaki gecikme süresi, ayna yüzeyinde homojen bir enerji dağılımının gerçekleştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Günümüz patlatma operasyonlarında en sık kullanılan ateşleme sistemleri elektriksiz ateşleme sistemleridir. Bu sistemler belirli bir gecikme süresi, bu gecikme sürelerinin uzun periyotlu olması ve ayrıca bu sürelerinin yüksek sapma oranlarına sahip olması, patlayıcının oluşturduğu enerjinin kontrol altına alınmasını zorlaştırmaktadır. Bu çalışma kapsamında bir yeraltı maden ocağının hazırlık kazı patlatmalarında 1 adet elektriksiz ve 2 adet elektronik ateşleme sistemi kullanılarak patlatmalar yapılmış, gecikme düzeninin patlatma performansına etkisi irdelenmiş ve sonuçlar CMS (Cavity Monitoring System) ile doğrusal ve hacimsel ilerleme kayıt altına alınmıştır.

2 ATEŞLEME SİSTEMLERİ

Patlatma ile kazı uygulamalarında ateşleme sırası, gecikme süresi patlatma performansını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Bu yüzden kullanılan ateşleme sistemlerinin verebileceği gecikme süresinin çeşitliliği, doğruluğu ve tutarlılığı çok önemlidir.

2.1 Elektriksiz Ateşleme Sistemi

Elektriksiz Ateşleme sistemlerinde (Nonel) gecikme süreleri, kapsül içerisinde yer alan piroteknik gecikme elemanın uzunluğuna bağlı olarak belirli bir gecikme süresi ile üretilmektedir, ve gecikme elemanının uzunluğu kimyasal özelliğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Sekil 1). Her bir piroteknik gecikme elemanının yanma hızlarının farklılık göstermesi, gecikme süresinde çeşitli oranlarda sapmalar yaratmaktadır. Bu sapmaların oranı arttıkça patlatma sonucu verim olumsuz etkilenmektedir. Nonel kapsüller uzun periyot ve kısa periyot olmak üzere iki türde üretilmekte olup, yer altı patlatmalarında uzun periyotlu kapsüller kullanılmaktadır. Uzun periotlu kapsüller üretici firmalara göre değişkenlik göstermekte genel olarak 0 ms den 7500 ms ye kadar 23 seri olarak üretilmektedirler. Seriler kendi aralarında 100'er, 200'er ve 500'er ms artarak devam etmekte, seri numarası arttıkça gecikme süreside artmaktadır. Uzun periyot kapsüller için üretici firmalar tarafından kabul edilebilir sapma oranları, yaklaşık %±5,0-6,0 civarında olmakla beraber bu oran %10 kadar çıkabilmektedir.. Bu orana bağlı olarak gecikme süresi arttıkça sapma miktarı da artmaktadır.

Şekil 1. Nonel kapsül kesiti

2.2 Elektronik Ateşleme Sistemi

Nonel kapsüller ile elektronik kapsüllerin çalışma prensibi birbirinden tamamen farklılık göstermektedir. Elektronik kapsüllerde (Sekil 2) sistemin ateşlenmesi, her kapsül içerisinde bulunan mikroçipe belirli bir elektriksel akım ile gönderilen algoritmik kod ile gerçekleştirilmektedir. Elektronik ateşleme sisteminde verilebilecek gecikme süresi aralığı üretici firmalara göre değişkenlik göstermekle beraber 0'dan 14.000ms kadar 1 ms hassasiyetle gecikme süresi tayin edilebilmektedir. Elektronik ateşleme sistemlerinde gecikme süresi tayini mikroçip ile dijital olarak yapılabildiğinden sapma oranları nonel kapsüllere göre oldukça düşüktür. Bu değer yine üreticilere göre değişkenlik göstermekle beraber yaklaşık %0,050 civarındadır. Bu sapma oranı nonel kapsüllere göre ihmal edilebilecek ölçüdedir.

Şekil 2. Elektronik kapsül kesiti

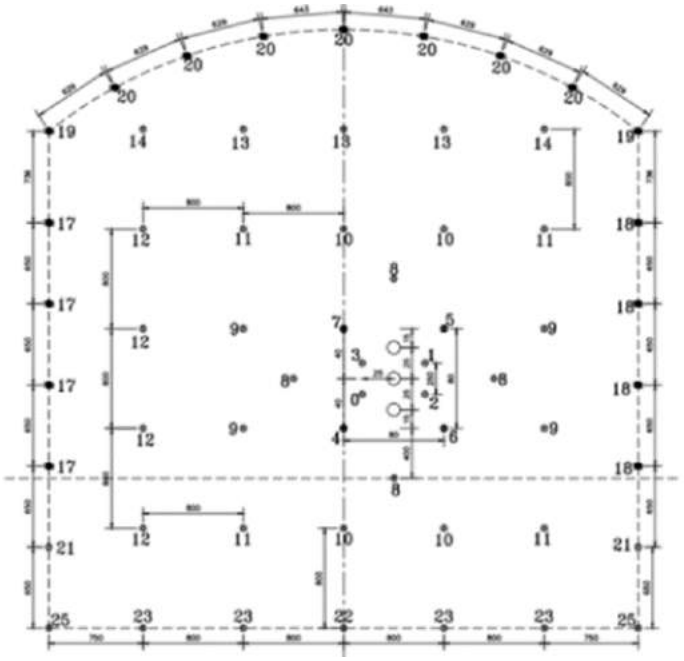
3 PATLAMA PARAMETRELERİ

İyileştirme çalışmasının yapıldığı hazırlık galerisinin jeolojik yapısı tektonizma geçirmiş koyu renkli bazalt ve gabro diyorit kayaç yapılarıdır. Bu jeolojik yapı içerisinde gerçekleştirilen Delme patlatma ile kazı işleminde delgi tasarımı olarak Paralel Kesme (Burn Cut) yöntemi uygulanmaktadır. Çizelge 1'de ayna delgi parametreleri ve Şekil 3'de ayna kesiti, delgi tasarımı ve gecikme düzeni görünmektedir.

Üretim deliklerinde ana patlayıcı olarak yemlemeye duyarlı patlayıcı ANFO, yemleyici olarak (36x420) ebatlarında Kapsüle Duyarlı Emülsiyon patlayıcılar kullanılmaktadır. Son kesme uygulaması için ise çevre duvar ve tavan deliklerine (19x750) kapsüle duyarlı kontur patlayıcılar kullanılmaktadır.

Çizelge 1. Delgi parametreleri

Kesit Alanı	(m2)	20
Boş Delik Çapı	(mm)	102
Üretim Delik Çapı	(mm)	45
Delik Boyu	(m)	3.8
Boş Delik Sayısı	Adet	3
Kesme Delikleri Sayısı	Adet	8
Tarama Delikleri Sayısı	Adet	27
Çevre Duvar Delikleri Sayısı	Adet	12
Tavan Delikleri Sayısı	Adet	7
Taban Delikleri Sayısı	Adet	7



Şekil 3. Ayna kesit ve delgi tasarımı

4 SAHA UYGULAMASI

Yapılan çalışma doğrultusunda biri Elektriksiz ateşleme sistemi (Nonel) diğer ikisi ise Elektronik Ateşleme Sistemi olarak kullanılmak üzere 3 adet patlatma gerçekleştirilmiştir. Bu patlatmalarda delgi düzeni, delik şarj miktarı gibi parametrelerde bir değişiklik yapılmadan sadece ateşleme sırası ve gecikme süreleri değiştirilmiştir.

4.1 Nonel Uygulaması

Nonel ateşleme sistemi kullanılarak mevcut delgi ve delik şarj miktarları ile atım gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'de atım öncesi aynanın kesit görüntüsü görülmektedir.

Şekil 4. Ayna kesit görüntüsü

Atım bölgelerine göre delikler arası gecikme sürelere aralıkları, min ve max gecikme süreleri Çizelge 2'de görülmektedir.

Çizelge 2. Atım bölgelerine göre gecikme süreleri

Ayna Bölgelerine Göre Delik Türleri	Delikler Arası Gecikme Süreleri, (ms)	Min.- Max Gecikme Süresi, (ms)
Kesme Delikleri	100	100 - 1000
Tarama Delikleri	200	1200-3000
Çevre Duvar Delikleri	200	4000-4500
Tavan Delikleri	500	5000-5500
Taban Delikleri	500	6000-7500

4.1.1 Patlatma sonucu

Gerçekleştirilen patlatma sonrası çevre görüntüsü Şekil 5'de görülmektedir.

Şekil 5. Çevre görüntüsü

Patlatma sonrası kesit alanın 24,20 m^2 olduğu hacimsel üretimin 75,20 m^3 ve doğrusal ilerlemenin 3,1 m olduğu CSM sistemi ile ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Galeri kesit alanının da ki artış (overbreak), örselenmiş yan cidar gibi problemleri beraberinde getirmektedir. Ayrıca, patlatma sonrası yığın içerisinde patlamamış kapsüle duyarlı kontur patlayıcılara rastlanmıştır, bu problem uzun gecikme aralıkları ile gerçekleşen patlatmanın bir sonraki delik içerisindeki şarj kolon sürekliliğinin bozulduğu ve patlayıcı enerji dağılımının homojenliğini yitirdiği yorumu yapılabilmektedir. Gerçekleştirilen atım 7,5 s'de tamamlanırken bu süreyi elektronik kapsüllerle kısaltmak mümkün hale gelmektedir.

4.2 Elektronik Uygulaması

Elektronik ateşleme sistemi kullanılarak mevcut delgi ve deik şarj miktarları ile atım gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da atım öncesi aynanın kesit görüntüsü görülmektedir.

Şekil 6. Ayna kesit görüntüsü

Kesme bölgesindeki deliklere 200 ms, Tarama bölgesindeki deliklere 30 ms, Çevre ve taban deliklerine 4 ms, arttırarak gecikmeler belirlenmiştir. Ek 1'de deliklere ait gecikme süreleri detaylı bir şekilde görülmektedir.

4.2.1 Patlatma sonucu

Gerçekleştirilen patlatma sonrası çevre görüntüsü Şekil 7'de görülebilmektedir.

Şekil 7. Çevre görüntüsü

Patlatma sonrası 19,26 m2 kesit alanı, 69,36 m3 hacimsel üretim ve 3.6m dogrusal ilerleme gerçekleştirilmiştir. Patlatmanın seri gerçekleşmesi serili bir yığın formu oluşturmuş bunu önlemek adına 2. Elektronik denemesinde üretim deliklerin gecikme aralığı artırılarak değiştirilmiştir.

4.3 Elektronik Uygulaması

2. Elektronik ateşleme sistemi kullanılarak yapılan patlatmada kesme bölgesi Jumbo operatörü tarafından aynanın sol tarafına delinmiştir. Yapılan bu değişikliğin gecikme düzenin değiştireceğinden bölgeler çizilerek işaretlenmiş ve delik konumları belirlenmiştir. Şekil 8'de atım öncesi aynanın kesit görüntüsü görülmektedir.

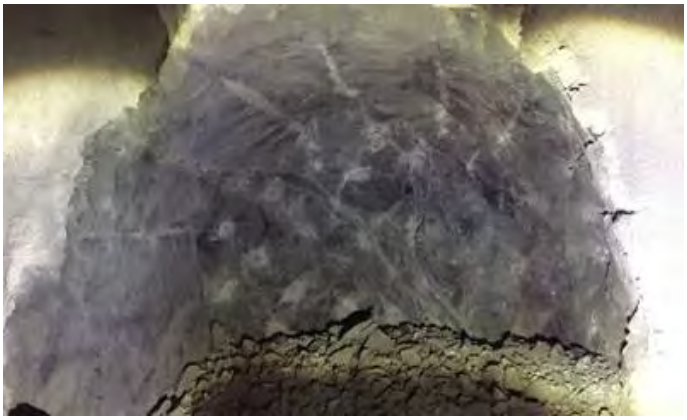
Şekil 8. Ayna kesit görüntüsü

Kesme bölgesindeki deliklere 200 ms, 1. Elektronik patlatmasında yığın formunun fazla serili olmasından dolayı tarama delik ve taban deliklerinin 40 ms, Çevre deliklerine ise 4 ms, arttırarak gecikmeler belirlenmiştir. Ek 1'de deliklere ait gecikme süreleri detaylı bir şekilde görülmektedir.

4.3.1 Patlatma Sonucu

Gerçekleştirilen patlatma sonrası çevre görüntüsü Şekil 9'da çevre görülmektedir.

Patlatma sonrası 20,27 m^2 kesit alanı, 3,7 m doğrusal ilerleme ile 75,00 m^3 hacimsel üretim gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9. Çevre görüntüsü

5 UYGULAMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI

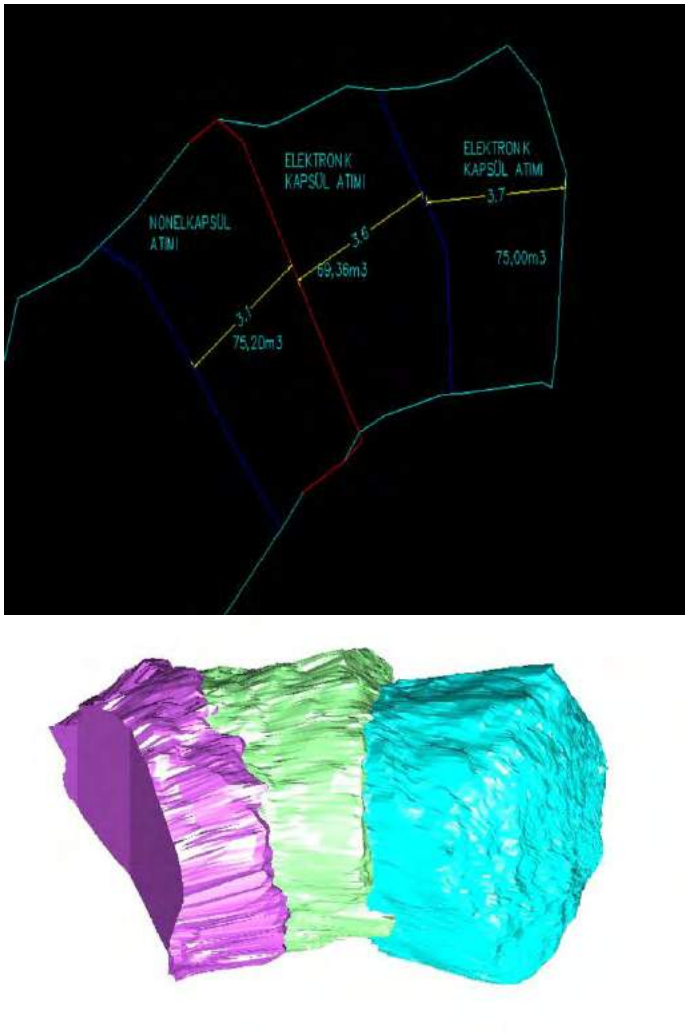
Yapılan patlatmalara ait alınan CSM ölçümleri doğrultusunda elektronik ateşleme sistemi ile gerçekleştirilen atımlarda Fazla kazı (overbreak) olmadığı (elektronik patlatma kesit alanının nonel'e göre %18.3 azaldığı) ve ilerlemenin elektriksiz ateşleme sistemi ile gerçekleştirilen atımdan daha fazla (%17.7) gerçekleştiği Şekil 10'da yer alan karşılaştırılmalı doğrusal ilerleme ve kazı hacmi ölçümünde görülmektedir.

Gerçekleştirilen patlatmalara ait doğrusal ilerleme, Hacimsel Üretim ve Kesit alanı verileri Çizelge 3'de karşılaştırmalı olarak görülebilmektedir.

6 SONUÇ

Yapılan çalışmada elde edilen veriler doğrultusunda patlatma enerjisinin, gecikme süresi ile kontrol altına alınması sonucu doğrusal ilerleme miktarının arttığı (%17.7) ve fazla kazının (overbreak) azaldığı (%18.3) görülmektedir. Bu husus doğrultusunda elde edilen verilerin toplam proje veya işletme maliyetine olan etkilerini aşağıda belirtilmiştir;

- İlerleme hızının artması ;
- fazla kazı (overbreak) azalması;
- Destekleme birim tüketimlerinin azalması; ve
- Homojen ve uygun tane boyu dağılımı ile yükleme, taşıma maliyetlerinin azalması.



Şekil 10. Doğrusal ilerleme ve kazı hacmi ölçümünde görülmektedir.

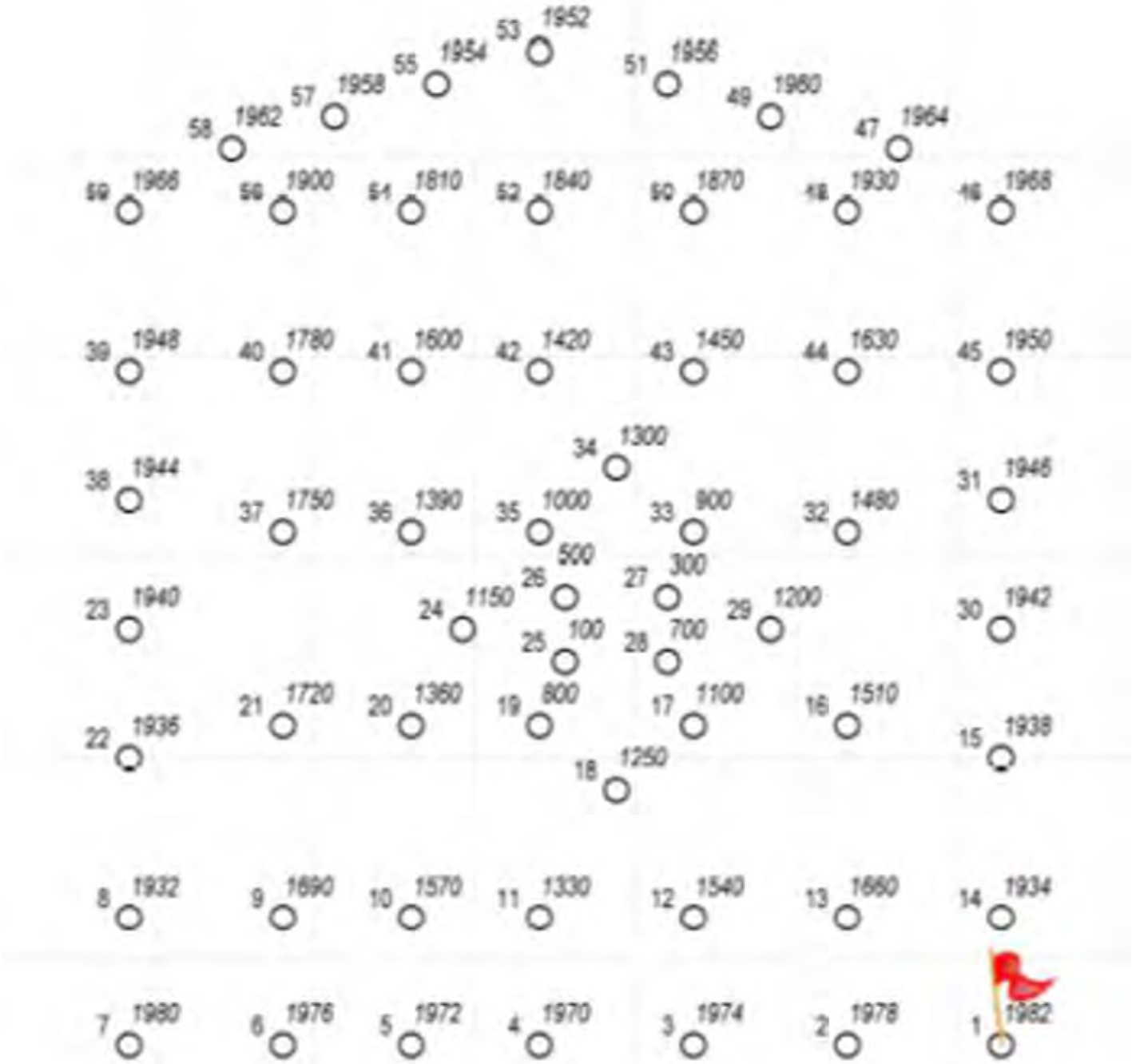
Çizelge 3. Patlatmalara ait doğrusal ilerleme, hacimsel üretim ve kesit alanı verileri

Atım İsimleri	Doğrusal İlerleme (m)	Hacimsel Üretim (m^3)	Kesit Alanı (m^2)
Elektriksiz	3,1	75,20	24,20
Elektronik 1	3,6	69,36	19,26
Elektronik 2	3,7	75,00	20,27

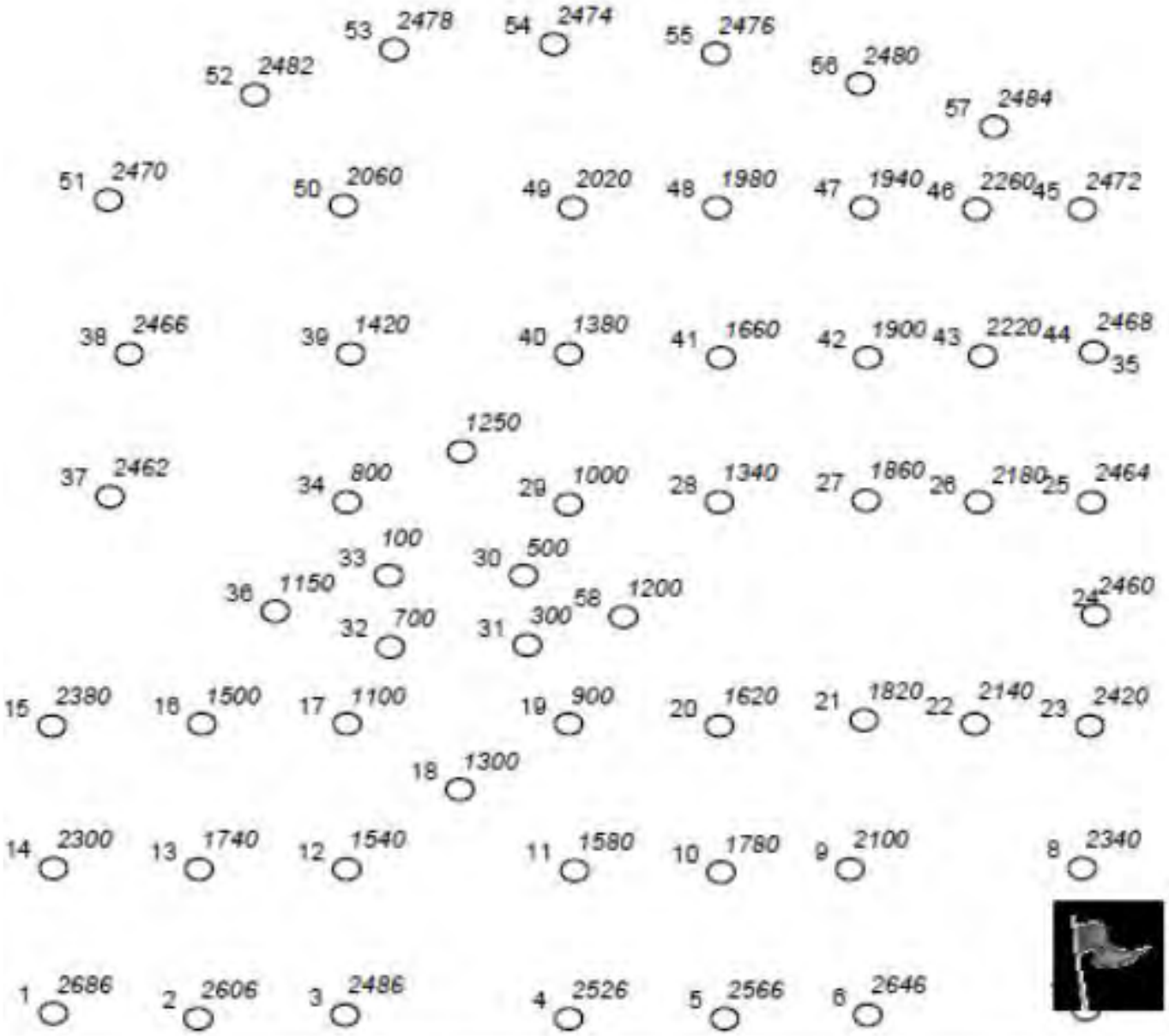
KAYNAKLAR

Düzgün, Ö. İlik, Ö.G. 2017. Elektriksiz ile Elektronik Ateşleme Sistemlerinde Belirlenen Gecikme Sürelerinin Doğruluklarının İrdelenmesi, *IX. Uluslararası Delme Patlatma Sempozyumu* (s.136-137).

Ek 1.



1. Elektronik Deliklere ait detay gecikme süreleri



2. Elektronik Deliklere ait detay gecikme süreleri

Kadıköy-Kartal Metro Güzergâhı'nda Patlatmalı Tünel Kazısı Yapılan Formasyonların "k" ve "β" Katsayılarının Tespit Edilmesi, Kapsül Gecikme Aralığının Genliğe Etkisi

Determining "k" and "β" Coefficients of the Formation that Excavated by Blasting on Kadıköy-Kartal Metro Route, The Effect of Detonator Delay Time on Amplitude

E. Alan
Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A. Ş. AKH Demiryolu Projesi, Etiyopya

ÖZET Uygulamalı Patlatma Mühendisliği alanında hazırlanan bu bildiride; Kadıköy-Kartal Metrosu ve güzergâhın jeolojik yapısı hakkında bilgi verilmiş, 401 adet atım (Patlatmalı tünel kazısı) incelenmiş, atım yaparken oluşan titreşimlerin parametre değerleri sismograflar ile ölçülerek kaydedilmiş (kayıt sayısı 995), atım yapılan formasyonların arazi iletim (k) ve jeolojik katsayıları (β) tespit edilmiştir. Ayrıca, kireçtaşında yapılan ARGE çalışmasında, kapsül gecikme aralığının genliğe etkisi araştırılmıştır.

ABSTRACT In this study of Applied Explosives Engineering; Kadıköy-Kartal Metro Project and the geology of the route is presented, 401 shots (Tunnel excavation by blasting) are examined, the vibration parameters of the shots are recorded by seismographs (995 records), the field transmission coefficients (k) and geological coefficients (β) of the formations are determined. Also, during the R&D studies in limestone the effect of detonators delay time on amplitude is investigated.

1 GİRİŞ

Atatürk 1922'de "Hayatta en hakiki mürşit (önder, klavuz, doğru yolu gösteren) ilimdir" diyor. Beşeri unsurlar, doğal/tabii unsurları doğrudan etkilemektedir. Katastrofik yağış nedeniyle Çin'deki Banqiao ve Shimantan Barajlarının 1975'de yıkılması ile oluşan selde 62 baraj daha yıkılmış, 171 bin kişi yaşamını kaybetmiş, 11 milyon insan evsiz kalmıştır (Abay, Baykan, Baykan, 2015). Hollanda'da 22 sel felaketinde 1 milyon kişi hayatını kaybetmiş, yapılan barajlardan dolayı 120 yıldır sel felaketi yaşanmamıştır.

Patlayıcı madde kaynaklı tehditlerin çoğu insanların yaptığı hatalardan (aksaklık, ihmalkârlık, ciddiye almama, maliyet kaygısı, bilgisizlik vs) kaynaklanmaktadır. 21.9.1921'de, Almanya/Oppau'da Amonyum sülfo nitrat patlayınca 561 insan hayatını kaybetmiş, 1.952 kişi yaralanmış, 7.500 kişi evsiz kalmıştır. 16.04.1947'de ABD-Texas Limanı'ndaki "Grandcamp" ve "High Flyer" isimli gemilerdeki Amonyum Nitrat (AN) patladığında ise 581 kişi hayatını kaybetmiş, 5.000'den fazla insan yaralanmış, 2.000 kişi evsiz kalmıştır. Unsurlar, iklim, imkânlar, kısıtlar vs. hayatımızı şekillendirmektedir.

İnsanlar ekonomik, sosyal, doğal ve siyasi sebeplerle göçmekte, gelişmemiş/az gelişmiş bölgelerden gelişmiş bölgelere, kırsal alanlardan kentsel alanlara göç artmaktadır. Nüfusun alansal dağılışında beşeri ve doğal faktörler etkilidir. Göçler; barınma, sığınma, sağlık, ulaşım, haberleşme, altyapı vb. birçok problemi de birlikte getirmektedir. İnsanların ulaşmak istedikleri yerlere normal sürelerde gidememesi; zaman, işgücü, enerji ve verim kaybına sebep olmakta, kentlerde yaşam konforunu düşürmektedir. Yerleşim yerinde

yaşam konforunu sağlamak, insanların zaman, işgücü, enerji, verim, ekonomik vd. kayıplarını azaltmak ve ardışık zararlarını gidermek için tünellere ihtiyaç artmaktadır.

Konvansiyonel metot ile kazılarak inşa edilecek kaya tünellerinde (Peron, isale, atık su, enerji, hat, ulaşım vs); el aletleri, hidrolik kırıcılar, pnömatik kırıcılar, kazıcı makineler (tamburlu, diskli, bitli, kalem keskili, hidro mekanik vd.), mekanize sistemler (TBM.,-Tunnel Boring Machine-, Roadheader vd) ile kazı teknik ve/veya ekonomik yönden uygun değilse, delme-patlatma teknolojisinden faydalanarak kısıtları gözeterek kontrollü patlatmalar ile kazı yapmak kaçınılmazdır. Tespit ettiğimiz Arazi iletim katsayısı "k" ve Özel jeolojik sabit "β" değerleri ile ARGE sonuçları, benzer formasyonlarda yapılacak patlatmalı kazılara kaynak oluşturacaktır.

2 GENEL BİLGİLER

2.1 Proje Hakkında Genel Bilgiler

Kadıköy Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesi inşaat işleri Anadoluray Ortak Girişimi tarafından başlatılmış, Avrasya Metro Grubu tarafından tamamlanmıştır. Proje güzergâhı; Kadıköy Meydanı'ndan başlayıp Ayrılık Çesmesi'nden (Ibrahimağa) geçip Koşuyolu deresinden Acıbadem'e ulaşıp, E-5/D-100 Karayolu altından veya yakınından geçip Kartal Köprüsü'ne uzanmaktadır (Şek. 1), '"Marmaray Projesi" ile İbrahimağa İstasyonu'nda kesişmektedir.

İstanbul'da trafik sıkışıklığının, yakıt ve kayıp işgücü maliyeti 3,5 milyar $/yıl'dır (Yıldırım, 2013).

60.000 yolcu/saat-yön kapasiteli bu ağır metro projesi, İstanbul'un Anadolu yakasındaki ulaşım sorununun çözümüne katkı sağlamaktadır. Tünel örtü kalınlığı 8-60 metre arasında değişmektedir. İstasyon sayısı 16, ticari hız 45 km/saat, maksimum hız 80 km/saat, maksimum eğim % 5, maksimum dever 130 mm, hat açıklığı 1435 mm, dizideki araç sayısı 4-8 adettir.

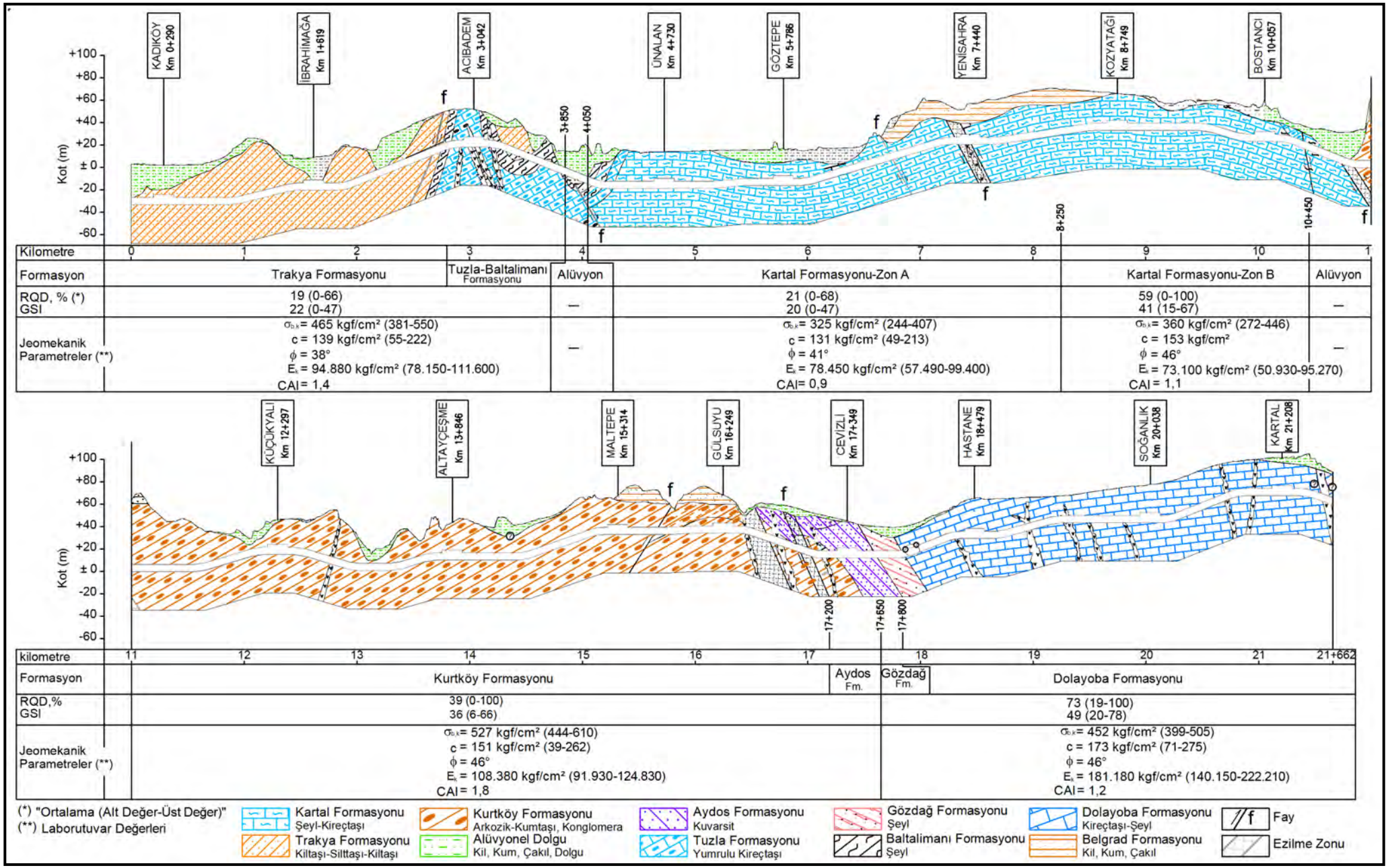
29.01.2005'de temeli atılıp 17.08.2012'de hizmete açılan projenin faydaları aşağıdadır:

- ✓ E5/D100 Karayolunun taşıma kapasitesi korunmuş, trafik yoğunluğu kaynaklı maliyet tasarruf edilmiştir.
- ✓ İnşaat ve işletme süresince çevre ile etkileşim minimize edilmiştir,
- ✓ Muhtemel yolcu artışı durumunda sistemin kapasitesi artırılabilmektedir.

Şekil 1. Kadıköy-Kartal metro güzergâhı ve istasyonlar (Yüksel,Yeşilçimen, Arıoğlu, 2006)

2.2 Formasyonlar ve Ozellikleri

İstanbul'un jeolojik yapısı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Abdüsselamoğlu 1963, Baykal ve Kaya 1963, 1965, Kodamanoğlu 1977, Önalan 1990, Ketin 1991, Seymen 1995). Kalınlığı birkaç km.'yi bulan İstanbul grubuna ait Sedimanter Kayaçlar, Paleozoyik istifi ile Triyas ve Tersiyer yaşlı çökellerden oluşmuşlardır. Kurtköy Formasyonu kuvars, feldispat, mika ve opak minerallerden; Aydos Formasyonu şeyl, silttaşı, kuvars arenitlerden; Dolayoba Formasyonu kireçtaşı ve şeyllerden; Kartal Formasyonu kuvars, feldispat ve mika, Tuzla Formasyonu kireçtaşı ve çamurtaşı, Trakya Formasyonu kumtaşı, kiltaşı ve silttaşından oluşur (Yüksel, Yeşilçimen, Sözak vd 2005).



Şekil 2. Kadıköy-Kartal Metrosu güzergâhının jeolojik profili (Yüksel ve ark., 2005; Arıoğlu, Yüksel, Yeşilçimen, 2006)

Çizelge 1. Proje güzergâhındaki formasyonlar'ın laboratuvar deneyi ortalama sonuçları ve kaya kütle sınıfları (Arıoğlu, Yüksel, Yeşilçimen, 2006)

	Formasyon Adı	Sembol	Birim	Trakya Form.	Kartal Form. Zon-A	Kartal Form. Zon-B	Kurtköy Form.	Dolayoba Form.
Mühendislik Özellikleri	Özgül Ağırlık	γ	t/m^3	2,65	2,61	2,67	2,69	2,70
	Porozite	n	%	4,85	4,24	1,81	1,01	1,82
	Tek Eksenli B. Day.	σ_{bk}	kgf/cm^2	465,9	325,8	359,5	527,3	452,0
	Çekme Dayanımı	$\sigma_{çk}$	kgf/cm^2	64,3	48,2	56,9	77,4	63,8
	Elastisite Modülü	E_k	kgf/cm^2	94.877	78.443	73.100	108.379	181.179
	Poisson Oranı	v	-	0,27	0,30	0,27	0,30	0,30
	Kohezyon (Üç Eksenli)	c	kgf/cm^2	138,5	131,4	153,0	150,7	173,1
	Kaya Kalitesi	RQD	%			58	39	72
	İçsel Sürtünme Açısı	Ø	(°)	37,9	40,5	45,9	45,4	46,2
Kaya Kütle Sınıfı	Kaya Kalite Tanımı'na (RQD) göre			Çok Zayıf	Çok Zayıf	Orta	Zayıf	İyi
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı'na göre			Orta Dayanım	Orta Dayanım	Orta Dayanım	Daya-nımlı	Orta Dayanım
	Jeolojik Dayanım İndeksi'ne (GSI) göre			Parçalanmış / Zayıf	Parçalanmış / Zayıf	Bloklu-Örselenmiş / İyi	Bloklu-Örselenmiş /Orta	Bloklu-Örselenmiş /İyi

Güzergâhta jeolojik ve jeoteknik değerlerin elde edilmesi için önceden yapılan jeolojik çalışmalar, inşaat çukurları, yamaçlar, havalandırma kazıları incelenmiş; 4.536 metre delgi yapılarak 140 adet sondaj, 1.712 ad. arazi deneyi, 4.228 adet laboratuar deneyi yapılmıştır. Kayaçlar deforme olmuş, çatlak sistemleri gelişmiştir. Yenisahra, Gülsuyu, Cevizli, Kartal bölgelerinde daha fazla olmak üzere volkanik sokulumlara rastlanmaktadır (Şek. 2). Kayaçlar geniş bir dayanım aralığında değişim gösterir (Çiz. 1).

3 TÜNEL KAZILARI

Projedeki istasyon ve makas tünelleri, TBM ve Zemin basıncını dengeleyerek tam kesit tünel kazı makinası (EPBM-Earth Pressure Balance Machine) montajı/demontajı yapılan tüneller, merdiven tünelleri, kaçış tünelleri, Kozyatağı-Kartal İstasyonları arasındaki hat tünelleri Konvansiyonel metodla kazılmıştır. Konvansiyonel metod ile kaya tüneli kazısı yaparken kırıcı (hidrolik, havalı, elektrikli) ve delme-patlatma teknolojisi kullanılmış, tünel inşa ederken ise Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM - New Austrian Tunnelling Method) uygulanmıştır. NATM; 1957-1965 arasında geliştirilmiş, ana hatları ilk kez 1963'de Prof. Rabcewicz tarafından yayınlanmıştır. Yöntemin esasları: Yuvarlak veya oval kesitte, hesaplanan deformasyona kontrollü müsaade edilerek stres, deplasman (yer/konum değişikliği) ve deformasyonlar (şekil değişikliği) gelişmiş ölçme sistemleri ile ölçülerek açılacak tünelde, formasyonun taşıyıcı özelliğini bozmayacak şekilde tutmak için drenaj önlemleri alınarak, uygun zamanda tahkimatın yapılması, formasyonun kilitlenmesini teşkil edecek halka şeklindeki beton kabuğun oluşturulmasıdır (Alan, 2001, 2007). Dayanım kaybına, kabul edilmeyecek oturmalara neden olabilecek aşırı ve/veya ani deformasyonlar engellenmelidir.

3.1 Makine ile Tünel Kazısı

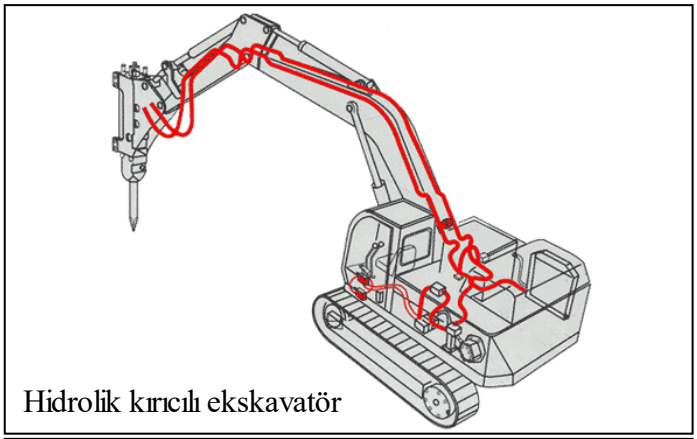
Konvansiyonel sistemde yapılan tünelciliğe kıyasla tam kesit tünel açma makinelerinin ilk yatırım maliyetleri yüksek, işletme maliyetleri düşüktür. İstenilmeyen yeraltı ve yeryüzü hareketlerini minimuma indirme kabiliyeti, daha sessiz, titreşimsiz, hızlı kazı yapması vd. nedenler ile tercih edilmektedir. Kesici

kafa, keski tipi, makineyi dengeleme sistemi, tahkimat sistemi, pasa taşıma sistemi vs. şartlara uygun dizayn edilebilmektedir.

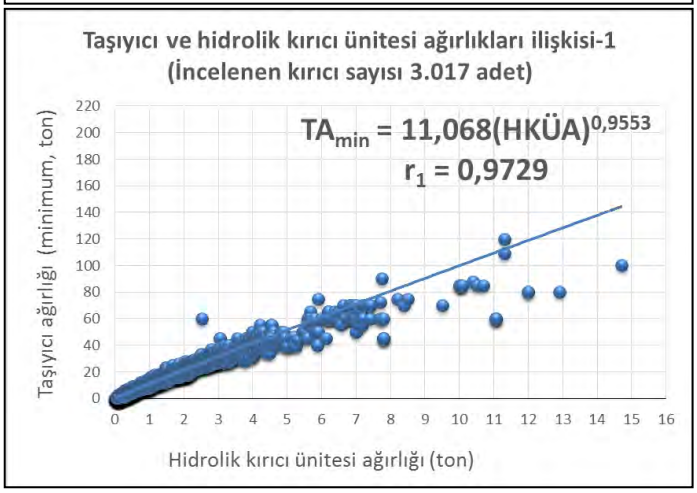
Projede, hat tünelleri kazısında kullanılan TBM'in kesici kafa dış çapı 6,50 m, aynaya uygulanan itme kuvveti 15.000 kN, kesici kafadaki diskler 17" ve 49 adet, tahkimat segmentli, elektrik gücü 3.000 KVA'dır.

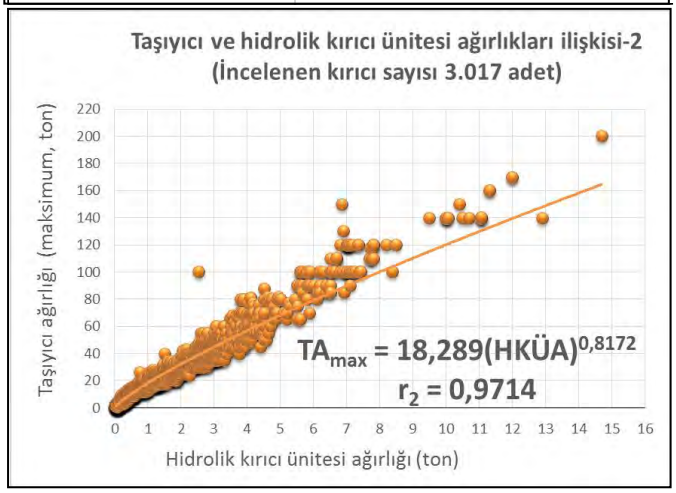
Zemin tünellerini kazarken kullanılan tam kesit tünel açma makinasının (EPBM) kesici kafa dış çapı 6,52 m, şilt uzunluğu 8,20 m, aynaya uygulanan itme kuvveti 40.000 kN, segmentli, elektrik gücü 2.500 KVA'dır.

Projede, hidrolik kırıcı ile de tünel kazısı yapılmaktadır. Dünyada üretilen 3.017 adet hidrolik kırıcı ağırlığının, üretici firmaların önerdiği taşıyıcı makine ağırlığı ile ilişkisi incelenerek bağıntılar (TA_{min}, TA_{max}) yüksek korelasyon değerleri (r_1=0,9729, r_2=0,9714) ile tespit edilmiş, hidrolik kırıcı ile taşıyıcı makine ağırlığı arasında pozitif yönde çok yüksek ilişki olduğu görülmüştür (Şek. 3).



Korelasyon değeri (r)	Korelasyon gücü ve yönü (Carl Person 1900)
0.00	İlişki yok (±)
0.00 < R^2 < ± 0.25	Çok zayıf ilişki (±)
± 0.25 ≤ R^2 < ± 0.50	Zayıf ilişki (±)
± 0.50 ≤ R^2 < ± 0.70	Orta ilişki (±)
± 0.70 ≤ R^2 < ± 0.90	Yüksek ilişki (±)
± 0.90 ≤ R^2 < ± 1.00	Çok yüksek ilişki (±)
± 1.00	Tam ilişki (±)





TAmin: Minimum taşıyıcı ağırlığı (ton) TAmax: Maksimum taşıyıcı ağırlığı (ton)

HKÜA: Hidrolik kırıcı ünite ağırlığı (ton)
r: Korelasyon değeri

Şekil 3. Hidrolik kırıcılı ekskavatör, Taşıyıcı ağırlığı-Hidrolik kırıcı ünitesi ağırlığı ilişki

3.2 Kontrollü Patlatmalar ile Tünel Kazısı

Önceden hazırlanan paterne uygun olarak, patlatmalı kazı yapılacak aynada delikler işaretlendikten sonra, patlatma delikleri jumbo (Atlas Copco Rocket Boomer 282, çift bom) ile delinmiştir. Patlatma yöntemi olarak Orta Çekme (Wedge Cut) ve Paralel Çekme (Parallel Cut, Burn Cut) yöntemleri uygulanmış, Paralel çekmedeki boş delikler Ø=89 mm, diğer delikler Ø=41 mm çaptadır.

Patlatmalı kazı yapılan kayalar çatlaklı ve düşük dayanımlı olduğu için patlayıcı madde olarak etkili itme enerjisi olan Powergel Magnum 365 (yoğunluğu 1,20 g/cm3, ideal patlama hızı 6.437 m/s, ideal patlama basıncı 121.400 atm) ve Trimex bilinçli olarak seçilmiştir. Emniyetli olması, 47 farklı gecikme aralığı, kullanım kolaylığı ve

ekonomik olma nedenleri ile Nonel Exel MS/LP kapsüller tercih edilmiştir. Bağlantı elemanı olarak İnfilaklı fitil (6 g/m-PETN), Fitili ateşleyici olarak elektrikli kapsül, ateşleme hattında kablo (0,25 mm^2 zil teli, 0,75 mm^2 ttr kordon kablo), ateşleme cihazı olarak elektronik manyetolar kullanılmıştır.

4 ÖLÇME ÇALIŞMALARI

4.1 Ölçümlerin Yapılması

Patlatma esnasında oluşan titreşim jeofon ile, hava şoku mikrofon ile elektrik sinyalleri şeklinde Instantel Mini Mate Plus cihaza (>0,5 mm/s titreşim hızını ölçebilir) kablo ile gönderilerek kaydedilmiştir. Normal trafik akışı, binadaki insan hareketlerinin yarattığı titreşim seviyesi 0,6 mm/s civarındadır.

Atım-ölçüm istasyonu arası mesafeler teodolitle belirlenmiş, genellikle maksimum sarsıntı patlatma noktasına yakın yerlerde hissedileceği için, atıma yakın yapıların yanları, yeryüzündeki ölçüm istasyonu olarak bilinçli tercih edilmiştir (Şek. 4).

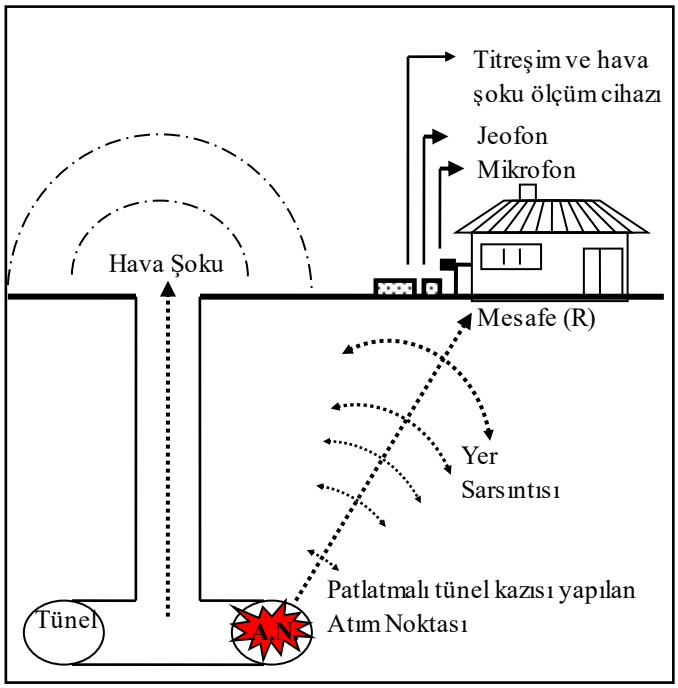
Reel Maksimum Parçacık Hızı (PPV-Peak Particle Velocity) ölçülerek tespit edilmiş, tahmini PPV değerini tespit ederken aşağıdaki ampirik formülden faydalanılmıştır (Kahriman vd. 1998).

$PPV=kx(SD)^{\pm\beta}$

k: Arazi iletim katsayısı

β : Özel jeolojik sabit

SD: Ölçekli Mesafe (Scaled Distance)



Şekil 4. Yersarsıntısı ve Hava şoku ölçme yönteminin şematik gösterimi (Alan, 2001)

4.2 Titreşimlerin Parametre Değerleri

Tünellerde patlatmalı kazılar yapılırken, 995 istasyonda ölçerek kaydedilen hava şoku ve titreşimlerin parametre değerlerinin aritmetik ortalamaları aşağıda Çizelge 2'de verilmiştir.

4.3 "k" ve "β" Katsayılarının Tespiti

Atım sırasında, yüksek hassasiyetli cihazlar ile yeryüzünde ölçülerek makine hafızasına kaydedilen titreşimlerin parametre değerleri (enine/boyuna ve düşey yönlerde parçacık hızı, frekans, genlik, ivme, yer değiştirme, hava şoku vd.) bilgisayarlara aktarılarak gerçekleşen tüm atımlar değerlendirilmiş, yapılacak patlatmalı kazılarda değişkenlere müdahale edilmiştir. Enine, boyuna, düşey yönlerdeki Parçacık Hızı (PV) değerlerinin maksimum olanı (PPV) ile frekans ve SD ilişkisi incelenmiş, formasyonların k ve β katsayıları, korelasyon değeri (r) tespit edilmiştir (Şek. 5; Çiz. 3a, b). Ünalan Makas Tüneli'ne ait tek ölçüm bulunduğu için k, β ve r değerleri tespit edilememiştir.

Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesi kapsamında yapılan patlatmalı tünel kazılarında kullanılan ve birim zamanda patlayan maksimum patlayıcı madde miktarı (W, kg), patlatma noktası ile ölçüm istasyonu arası mesafeler (R, m) ve ölçülen PPV değerleri kullanılarak istatistiksel yöntemlerle "k, β" katsayıları ve korelasyon değerleri "r" tespit edilmiştir (Şek. 5; Çiz. 3a, b). Tespit edilen yukarıdaki sayısal sonuçlardan faydalanarak benzer formasyonlarda emniyetli/verimli/ekonomik patlatmalı kazılar ve başlangıç tasarımları yapabilmek için aşağıdaki ampirik formüller kullanılarak tahmini PPV değerleri hesaplanabilir.

USBM (Duvall ve Fogelson, 1962)

$$PPV = k\left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-\beta}$$

Ambraseys-Hendron (1968)

$$PPV = k\left(\sqrt{\frac{W}{\sqrt[3]{R^2}}}\right)^{\beta}$$

Langefors-Kihlstrom (1978)

$$PPV = k\left(\frac{R}{\sqrt{W}}\right)^{-\beta}$$

4.4 "k" Katsayılarının Değerlendirilmesi

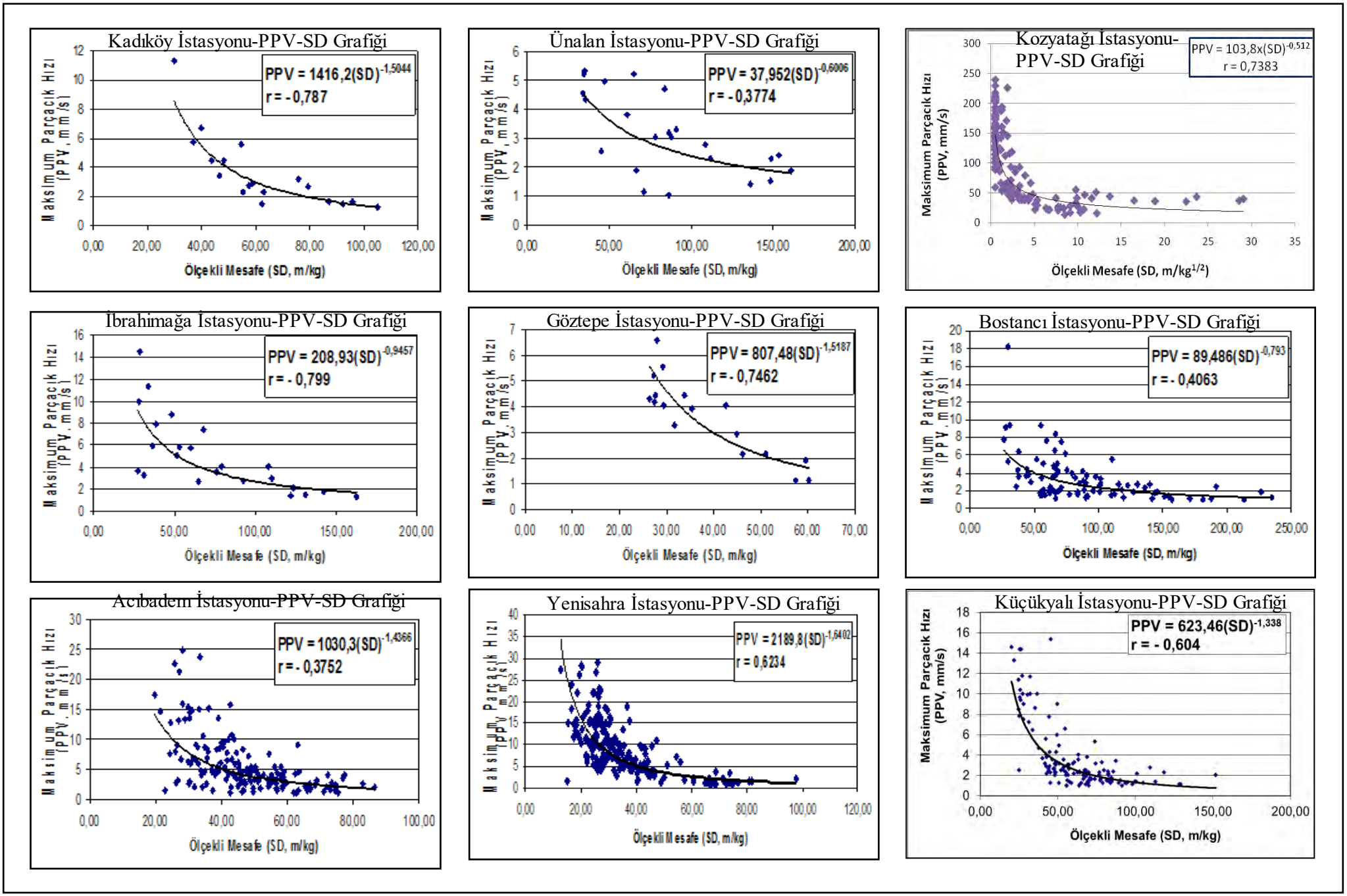
Yapılan istatistiksel çalışmada en yüksek Arazi iletim katsayısı (k) Yenisahra İstasyon bölgesinde tespit edilmiştir. Bu bölgedeki patlatmalı kazılar Kireçtaşı ve Diyabaz'da (dayk), çoğunlukla kısmi kesitte, lokal/patar atımı olarak yapılmış; tünel kazarken sokulumlara, süreksizliklere, ezilmiş zonlara ve fay breşine rastlanılmıştır. Tünellerin; aşırı derecede kırık, parçalanmış, çok zayıf formasyonda ve fay hattında bulunması, ölçüm istasyonlarının kum, kil, çakıl içeren Belgrad Formasyonu'nda (Şek. 2) olması, k değerinin yüksek olmasının sebepleridir.

5 KAPSÜL GECİKME ARALIĞININ GENLİĞE ETKİSİ (ARGE FAALİYETİ)

Yenisahra İstasyonu'nda Kartal Formasyonu Zon-A içerisinde, kireçtaşında, Powergel Magnum 365 patlayıcı madde, Nonel Exel MS kapsül kullanılarak ARGE patlatmaları yapılmış, SD hesaplanırken Dowding-1985 denklemi kullanılmıştır ($SD=(R/W^{1/2})$) (Çiz. 4-6; Alan ve Sefer 2007, Alan 2013).

Çizelge 2. Ölçülen Yersarsıntısı ve Hava şoku değerlerinin aritmetik ortalamaları

Patlatma Parametreleri	Atım Miktarı	Ölçme İstasyonu	Özgül Şarj		Frekans	Genlik	Mesafe	Hava Şoku	Ölçekli Mesafe	Gecikme Başına Şarj	Örtü Kalınlığı
			Patlayıcı	Kapsül							
Sembol			$W_ö$	K	f	A	R		SD	W	H
Birim	Adet	Adet	kg/m^3	adet/m^3	Hz	mm	m	dB	m/kg$^{1/2}$	kg/m^3	m
Kadıköy	8,00	22,00	1,36	0,39	72,75	0,048	93,65	112,91	71,99	1,77	35,53
İbrahimağa	6,00	23,00	3,38	0,73	59,48	0,123	88,11	120,53	74,54	1,51	25,82
Acıbadem	68,00	174,00	1,86	0,61	66,06	0,088	75,74	121,85	48,30	3,20	28,23
Ünalan İst.	14,00	28,00	1,18	0,38	75,04	0,055	189,32	111,20	93,18	4,46	37,14
Ünalan Makas	1,00	1,00	1,00	0,89	47,00	0,072	69,97	121,90	44,70	2,45	39,21
Göztepe	11,00	22,00	0,92	0,37	54,00	0,069	70,66	113,50	40,26	2,65	32,08
Yenisahra	120,00	235,00	0,94	0,30	59,64	0,158	51,54	109,97	37,51	2,75	24,62
Kozyatağı	66,00	178,00	1,25	0,28	71,21	0,098	183,91	126,10	110,88	3,04	34,74
Bostancı	40,00	94,00	1,31	0,45	81,36	0,006	172,14	109,20	97,66	3,24	31,08
Küçükyalı	67,00	218,00	1,48	0,49	64,64	0,068	103,69	120,50	70,04	2,59	18,90
	401,00	995,00									



Şekil 5. Patlatmalı kazı yapılan İstasyonlarda PPV-SD İlişkisi ve patlatmalı kazı yapılan formasyonların "k, β" katsayıları (Alan, 2013)

Çizelge 3a. Atım bölgelerine göre PPV tahmin denklemleri (Kahriman vd. 2007, Adıgüzel vd. 2007, Alan vd. 2007, Alan 2013)

Patlatmalı kazı yapılan			Tünel örtü kalınlığı	Kayıt sayısı	Korelasyon değeri	Arazi iletim katsayısı	Özel Jeolojik sabit	Tahmini PPV hesaplamada kullanılan ampirik formül referansı	Referans
Bölge	Formasyon	Kayaç	(m)	(adet)	(r)	(k)	(β)		
Kadıköy İstasyonu	Trakya Formasyonu	Diyabaz	35.53	14	-0,85	1.231,10	-1,48	USBM-1962	Alan, Sefer, 2007
				20	-0,84	1.866,00	-1,56	USBM-1962	Kahriman, Özer, Adıgüzel, Karadoğan, Aksoy, Muştu, Dinçel, Alan, Sefer, 2007
					-0,83	2.069,00	-1,55	Ambraseys vd.-1968	
					-0,79	171,90	3,42	Langefors vd.-1978	
				22	-0,79	1.416,20	-1,50	USBM-1962	Alan, 2013
İbrahimağa/ Ayrılık Çeşmesi İstasyonu			25,82	23	-0,80	208,93	-0,95	USBM-1962	Kahriman, Özer, Adıgüzel, Karadoğan, Aksoy, Muştu, Dinçel, Alan, Sefer, 2007
					-0,78	225,10	-0,95	Ambraseys vd.-1968	
					-0,80	69,11	2,24	Langefors vd.-1978	
					-0,80	208,93	-0,95	USBM-1962	Alan, vd. 2007; Alan 2013
Acıbadem İstasyonu	Tuzla-Baltalimanı Formasyonu	Diyabaz Kireçtaşı	28,23	170	-0,62	1.038,00	-1,43	USBM-1962	Kahriman, Özer, Adıgüzel, Karadoğan, Aksoy, Muştu, Dinçel, Alan, Sefer, 2007
					-0,70	6.379,00	-1,84	Ambraseys vd.-1968	
					-0,32	10,11	0,88	Langefors vd.-1978	
					-0,63	1.544,70	-1,55	USBM-1962	Alan, Sefer, 2007
				174	-0,38	1.030,30	-1,44	USBM-1962	Alan, 2013
Ünalan İstasyonu	Kartal Formasyonu Zon-A	Kireçtaşı	37,14	16	-0,73	46,48	-0,62	USBM-1962	Kahriman, Özer, Adıgüzel, Karadoğan, Aksoy, Muştu, Dinçel, Alan, Sefer, 2007
					-0,70	50,39	-0,61	Ambraseys vd.-1968	
					-0,74	12,76	1,46	Langefors vd.-1978	
				28	-0,38	37,95	-0,60	USBM-1962	Alan, 2013
Göztepe İstasyonu			32,08	22	-0,63	254,90	-1,15	USBM-1962	Kahriman, Özer, Adıgüzel, Karadoğan, Aksoy, Muştu, Dinçel, Alan, Sefer, 2007
					-0,60	252,70	-1,09	Ambraseys vd.-1968	
					-0,74	69,39	3,48	Langefors vd.-1978	
				22	-0,75	807,48	-1,52	USBM-1962	Alan, 2013
Yenisahra İstasyonu		Kireçtaşı Diyabaz	24,62	59	-0,93	16.139,00	-2,21	USBM-1962	Adıgüzel vd. 2007
				87	-0,86	5.584,00	-1.91	USBM-1962	Alan, Sefer, 2007
				205	-0,83	2.883,00	-1,71	USBM-1962	Kahriman, Özer, Adıgüzel, Karadoğan, Aksoy, Muştu, Dinçel, Alan, Sefer, 2007
					-0,83	4.484,00	-1,73	Ambraseys vd.-1968	
					-0,46	20,94	1,47	Langefors vd.-1978	
				235	-0,62	2.189,80	-1,64	USBM-1962	Alan, 2013

Çizelge 3b. Atım bölgelerine göre PPV tahmin denklemleri (Kahriman vd. 2007, Adıgüzel vd. 2007, Alan vd. 2007, Alan 2013)

Patlatmalı kazı yapılan			Tünel örtü kalınlığı	Kayıt sayısı	Korelasyon değeri	Arazi iletim katsayısı	Özel Jeolojik sabit	Tahmini PPV hesaplamada kullanılan ampirik formül referansı	Referans
Bölge	Formasyon	Kayaç	(m)	(adet)	(r)	(k)	(β)		
Kozyatağı İstasyonu	Kartal Formasyonu Zon-B	Kireçtaşı	34,74	51	-0,86	136,93	-0,959	USBM-1962	Adıgüzel vd. 2007
				64	-0,73	207,77	-1,014	USBM-1962	Alan, Sefer, 2007
				66	-0,70	254,30	-1,040	USBM-1962	Kahriman, Özer, Adıgüzel, Karadoğan, Aksoy, Muştu, Dinçel, Alan, Sefer, 2007
					-0,72	418,50	-1,120	Ambraseys vd.-1968	
					-0,49	16,970	-1,496	Langefors vd.-1978	
				91	-0,50	194,10	-0,996	USBM-1962	Alan, 2013
				178	-0,74	103,80	-0,512	USBM-1962	Alan, 2013
Bostancı İstasyonu			31,08	7	-0,64	334,52	-1,038	USBM-1962	Alan, Sefer, 2007
				83	-0,66	99,36	-0,810	USBM-1962	Kahriman, Özer, Adıgüzel, Karadoğan, Aksoy, Muştu, Dinçel, Alan, Sefer, 2007
					-0,64	108,70	-0,800	Ambraseys vd.-1968	
					-0,69	29,92	2,238	Langefors vd.-1978	
				94	-0,41	89,49	-0,793	USBM-1962	Alan, 2013
Küçükyalı İstasyonu	Kurtköy Formasyonu	Arkoz	18,90	114	-0,86	1.133,60	-1,501	USBM-1962	Adıgüzel vd. 2007
				127	-0,80	766,61	-1,401	USBM-1962	Alan, Sefer, 2007
				135	-0,78	644,20	-1,340	USBM-1962	Kahriman, Özer, Adıgüzel, Karadoğan, Aksoy, Muştu, Dinçel, Alan, Sefer, 2007
					-0,79	1.186,00	-1,440	Ambraseys vd.-1968	
					-0,74	28,03	2,160	Langefors vd.-1978	
				218	-0,60	623,46	-1,338	USBM-1962	Alan, 2013

Çizelge 4. ARGE çalışması genel bilgileri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Delik çapı	D	41,00	mm
Delik boyu	L	1,50	m
Özgül şarj	W	1,00	kg/delik
Sıkılama boyu	S	0,40	m
Mesafe	R	67,25	m

Çizelge 5. ARGE faaliyeti ölçüm sonuçları

	PPV (mm/s)	Frekans (Hz)	Genlik (mm)
Gecikmesiz patlatma	1,52	107	0,02
25 ms gecikme	1,65	59	0,02
75 ms gecikme	1,52	107	0,03

Çizelge 6. Hesaplanan "k, β, r" değerleri

Parametre	Sembol	Değer
Arazi iletim katsayısı	k	4,076
Özel jeolojik sabit	β	-0,236
Korelasyon katsayısı	r	-0,993

Kapsül gecikme aralığı 25 ms olduğunda şarjlar birbirlerini koopere ederek genliğin % 31,78 sönümlendiği, gecikme 75 ms iken genliğin % 37,3, (sönümlenmiş genliğe göre % 101,2) süperpoze olduğu tespit edilmiştir.

6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Proje kapsamındaki patlatmalar sırasında ölçülerek elde edilen titreşimlerin parametre değerlerinden istatistiksel yöntemlerle tespit edilen "k ve β katsayılarından faydalanarak, benzer şartlar ve formasyonlarda patlatmalı kazı çalışmalarına başlayabilmek için ihtiyaç duyulan birim zamanda patlayacak patlayıcı madde miktarı tahmini olarak hesapla tespit edilebilir (OSM Normu), tasarım yapılabilir.

Yenisahra İstasyon Tünelleri'nde yapılan ARGE çalışmasında, yapılan denemede kullanılanlardan en uygun kapsül gecikme aralığının 25 ms olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgi bize, 25 ms gecikme aralıklı kapsüller kullanarak daha ekonomik ve emniyetli patlatmalar yapmamıza olanak sağlamıştır.

7 TEŞEKKÜR

Teşvik ve desteklerinden dolayı Sn. Ersin Arıoğlu'na, Sn. Prof.Dr. Ergin Arıoğlu'na, Sn. Prof.Dr. Ali Kahriman'a, Sn. Sami Özge Arıoğlu'na, Sn. İlker İnceleme'ye, Sn. Ömer Çiçekoğlu'na, Sn. Suat Çetin'e, Sn. Mustafa Keskinpala'ya, Sn. Muammer Çınar'a, Sn. Ali Yüksel'e, Sn. İbrahim Sefer'e, Sn. Meral Alan'a, Sn. Anıl Alan'a, Sn. Akıncan Alan'a ve tüm ekiplerime sonsuz teşekkür ederim.

8 KAYNAKLAR

Abay, O., Baykan, N., Baykan, N.O. 2015. Tarih Boyunca Barajların Elden Çıkma Nedenleri, *4. Su Yapıları Sempozyumu,* Antalya.

Adıgüzel, D. Özer, Ü., Kahriman, A., Karadoğan, A., Aksoy, M. 2007. Kadıköy-Kartal Metrosu Tünel Güzergâhındaki Farklı Kaya Birimleri İçin Patlatma Titreşim Analizi, *5. Delme-Patlatma Sempozyumu,* Ankara.

Alan, E. 2001. *Kontrollü Tünel Patlatmaları*, İstanbul (Bitirme tezi, İstanbul Üniversitesi).

Alan, E., Sefer, İ. 2007. Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesi'nde Yapılan Kontrollü Tünel Patlatmalarının Yapısal Hasar Riski Açısından Değerlendirilmesi, *5. Delme-Patlatma Sempozyumu,* Ankara.

Alan, E. 2013. Kadıköy-Kartal Metrosu Kozyatağı İstasyonu'nda Yapılan Kontrollü Tünel Patlatmalarının Yapısal Hasar Riski Açısından Değerlendirilmesi, İstanbul (Yüksek lisans tezi, Okan Üniversitesi).

Alan, E. 2013. Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesi'nde Yapılan Kontrollü Tünel Patlatmalarının Yapısal Hasar Riski Açısından Değerlendirilmesi, Patlatma Yapılan Formasyonların "k" ve "β" Katsayılarının Tespit Edilmesi, Kapsül Gecikme Aralığının Genliğe Etkisi, *Yapı Merkezi-Yaratıcılık ve Buluşçuluk*, İst

Arıoğlu, E., Yüksel, A., Yeşilçimen, A. 2006. Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesi'nde Jeolojik ve Jeoteknik Araştırma Çalışmaları, *VIII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, İstanbul.

Kahriman, A., İpekoğlu, B., Tuncer, G., Kesimal, A., Karadoğan, A.K., Görgün, S., Alan, E. 1998. *Tuzla-Dragos Tünelleri Projesi L1-K Şaftları Arasındaki Tünel Kazısında Patlatmadan Kaynaklanan Titreşim Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi,* İstanbul.

Kahriman, A., Özer, Ü., Adıgüzel, D., Karadoğan, A., Aksoy, M., Mustu, R., Dinçer, E., Alan, E., Sefer, İ. 2007. Kadıköy-Kartal Metrosu Tünel Güzergâhında Patlatma Kaynaklı Titreşimlerin İncelenmesi, *2. Ulaşımda Yeraltı Kazıları Sempozyumu*, İstanbul.

Yüksel, A., Yeşilçimen, Ö., Sözak, N.N., Gülle, G. 2005. *Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Mühendislik Jeolojisi Raporu*, İstanbul.

http://www.hurriyet.com.tr/ekonomi/22042824.asp Trafik Tıkanıklığının Maliyeti 3,5 milyar TL, Yıldırım B. *Hürriyet*, ziyaret tarihi: 05.09.2013.

Delme-Patlatma ile Tünel Kazısı Eğitiminde Artırılmış ve Sanal Gerçeklik Uygulamaları

Augmented and Virtual Reality Practices in Tunnel Excavation Training with Drilling-Blasting

İ.S. Büyüksağış, M. Gürsoy
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

ÖZET Bu çalışmada, günümüz tünel açmada sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olan delme-patlatma ile tünel açma yönteminin öğrencilere artırılmış/sanal gerçeklik ortamında pratik olarak öğretilmesi üzerinde durulmaktadır. Asıl amaç sınıfta veya yer altında riskli koşullarda daha uzun sürede verilen temel bilgilerin, daha kısa zamanda ve daha detaylıca öğrenciye aktarılabilmesi ve saha da karmaşık durumlarda dahi kısa zamanda doğru kararı verme konumuna getirebilmektir. Eğitim içerisinde sanal gerçeklik gözlüğü takan kullanıcıdan delme-patlatma süreçlerini adımlar halinde takip etmesi ve patlatma sonrası havalandırma-pasa yükleme-tahkimat ilerletme iş adımlarını da öğrenmeleri hedeflenmektedir. Bahsedilen tüm aşamaların algoritması oluşturularak kullanıcının delme-patlatma ile tünel açma yöntemlerini, değişik ortam koşullarına göre uygulama becerilerini geliştirmeleri hedeflenmektedir. Kullanıcılar işlem adımlarını sanal ekranda seçerek ilerler ve her bir ayrı işlem adımında dikkat edilmesi gereken parametreleri detaylıca irdelerler. Ayrıca, artırılmış gerçeklik uygulaması ile her aşamada bir sonraki adımın nasıl görünmesi gerektiği de gösterilerek yapılacak işlemlerde hata olması önlenebilecektir.

ABSTRACT In this study, it will be emphasized that with drilling-blasting method in tunnel which is one of the frequently used methods in today's tunneling, is taught to the students practically in an augmented and virtual reality. The main goal is to be able to teach the basic information given in the class or in the underground conditions which are under risk and longer periods in a shorter time and in more detail, and to make a true decision in a short time even in complicated situations on the scene. It is aimed to be followed the user who wears the virtual reality glasses the drilling-blasting processes in steps and to learn the steps of ventilation-waste loading-support after blasting. By designing the algorithm of all the mentioned steps, it is aimed that the user develops application skills in drilling-blasting tunneling methods and according to different environment conditions. Users will progress by selecting the action steps on the virtual screen and will examine the parameters to be considered in each individual process step in detail. In addition, with the augmented reality application, it is possible to avoid mistakes in the operations by showing how each step should look next.

1 GİRİŞ

Artırılmış/sanal gerçeklik kavramları hızla günlük hayatımıza girmekte ve her yaş grubundaki insanların eğitimlerinde kullanılabilmektedir. Özellikle mühendislik kavramları ve uygulamalarının teorik ve pratik olarak öğrencilere verilmesinde zaman kazandırıcı olduğu kadar daha detaylı ve karmaşık ortamları görsel yolla öğretmede büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Diğer taraftan belirli düzeyde ilk yatırım maliyetleri sonrasında, sadece yazılımların

eklenmesi veya geliştirilmesi yoluyla daha ucuza nitelikli mühendis yetiştirilmesine de olanak tanır. Ayrıca, madencilik gibi ağır ve tehlikeli iş koşullarında iş başı eğitiminin verilmesinin riskli olduğu ortamlarda gerçeğine çok yakın koşullarda bile güvenli bir şekilde eğitim verilebildiği gibi öğrenci hangi seviyede olursa olsun yapacağı hataların kendisine ve fiziksel çevreye bir zararı olmamaktadır.

Genel madencilik alanında özellikle görselleştirme, eğitim, kazadan sakınma-kaçma, iş makinesi/ekipman benzetimleri üzerine AG-SG uygulamalarına ait çalışmalarının yoğunlaştığı görülmektedir. Ancak, AG-SG yardımıyla doğrudan tünelcilik ve delme-patlatma yönteminin yeni işgücünün yetiştirilmesinde kullanımına ilişkin özgün bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma ile bu alanda yapılabilecekler ve izlenmesi gereken yönteme de işaret edilmektedir.

2 EĞİTİMDE ARTIRILMIŞ VE SANAL GERÇEKLİK UYGULAMALARI

SG (Sanal Gerçeklik), katılımcılarına gerçekmiş hissi veren, bilgisayarlar tarafından oluşturulan dinamik bir ortamla karşılıklı iletişim olanağı tanıyan, bir benzetim modelidir (Pimental ve Teixeira, 1993). Her şeyden önce katılımcılara gerçekmiş hissi vermesidir. Kullanıcı, bilgisayarların oluşturmuş olduğu bu ortamda istediği yere gidebilmeli, yani kontrolün kendi elinde olduğunu hissetmelidir (Sui vd., 2001). Eğitimin sanal gerçeklik ortamında nasıl yapıldığı Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1. Sanal gerçeklik uygulaması

Sanal ortam veya sanal gerçekliğin değişik biçimi olan Arttırılmış Gerçeklikte kullanıcı gerçek ve sanal nesneleri aynı ortamda birlikte algılar (Azuma, 1997). Bir başka deyişle AG gerçek dünyanın değişimine yönelik herhangi bir girişim olmaksızın kullanıcıların gerçek dünya ile etkileşim halinde olduğu ve aynı zamanda arttırma ile gelişmiş izleme olanağının algılama noktasında sanal gerçeklikten farklıdır (Zhu vd, 2004).

Abdüsselam ve Karal (2012) çalışmalarında, geleneksel sınıf ve laboratuvar ortamlarında öğrencilerin dikkat sürelerinin daha kısa olduğu ve ilgilerinin çabuk dağılabildiği vurgulanmaktadır. Buna karşın AG ortamında kullanılan cihazın teknoloji ile iç içe olması, öğrenciye verilmeye çalışılan soyut kavramları somutlaştırması ve kavramayı kolaylaştırması sayesinde öğrencilerin dikkat sürelerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Eğitimin artırılmış gerçeklik ortamında nasıl yapıldığı Şekil 2'de verilmiştir.

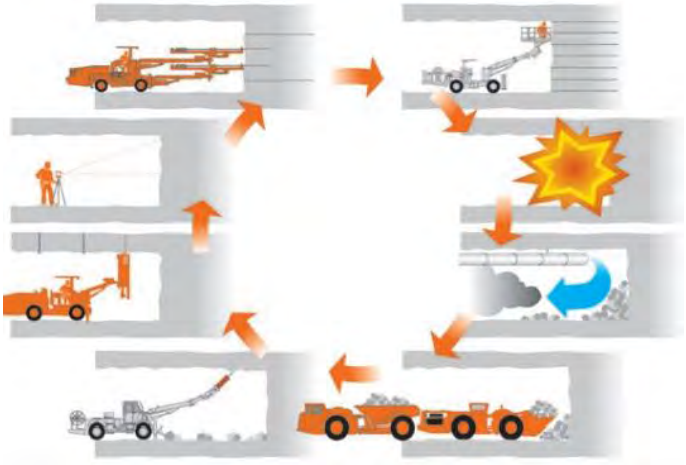
Şekil 2. Artırılmış gerçeklik uygulaması

3 SANAL GERÇEKLİK ORTAMINDA DELME-PATLATMA UYGULAMALARI

Kayaç faylanmalarına, tabakalanmalarına göre ölçümlerin doğru yapılması ve doğru patlatma noktaların seçimi özellikle yeraltı madenciliği için çok önemlidir. Bu yüzden sanal ortam uygulamaları, riskleri en aza indirmenin günümüz teknolojisiyle en gerekli ve kolay yöntemlerinden birisi haline gelmiştir.

Delme-patlatma yöntemiyle tünel kazısının gerçekleştirilmesinde kısaca ve sırayla şekil 3'te de şematize edilen şu adımlar izlenir (Köse vd., 2012):

- Patlatma deliklerinin delinmesi ve bu deliklere patlayıcı maddenin şarj edilmesi
- Patlayıcı ile şarj edilen deliklerin patlatılması ve patlatma gazlarının tahliye edilmesi
- Patlatılan kayanın yüklenmesi ve nakledilmesi
- Tünel duvarlarındaki askıda kalmış kaya parçalarının temizlenmesi
- Geçici tahkimatın kurulması
- Rayların,havalandırma ekipmanlarının, basınçlı hava borularının ve diğer donanımın ilerletilmesi.



Şekil 3. Delme-patlatma yönteminde kazı aşamaları (Heiniö, 1999)

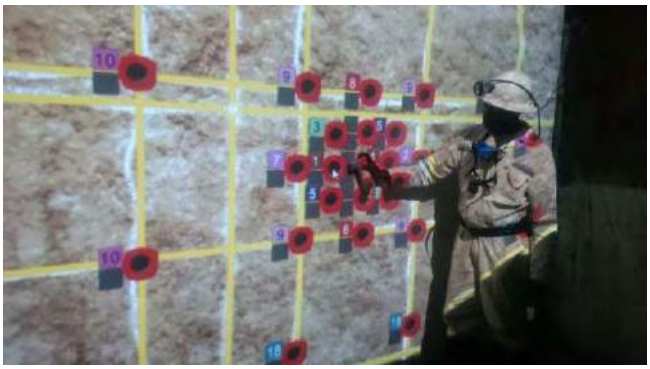
Bu bölümde delme ve patlatma metoduyla tünel açma işlem basamakları açıklanacak ve yapılacak olan işlemler akım şeması şeklinde özetlenecektir.

3.1 Delme

Yer kabuğunu oluşturan kayaların delik delinme yetenekleri birbirinden farklı olmaktadır. Bir kaya kütlesinde standart koşullarda standart bir lağım makinası ile delik delinirken elde edilen ortalama delik delme hızı (cm/dk) olarak ifade edilen sayı o kaya kütlesinin delinebilme yeteneğini gösterir (Ataman, 1988).

Kaya kütlelerinin delinebilme yetenekleri, onların sertlik derecelerine ve klivaj (dilinim) durumlarına ve yapıları ile onları oluşturan mineral ve/veya parçacıkların irilik derecelerine göre değişir. Bazı hallerde, kimyasal bileşimleri aynı olduğu halde yapıları farklı olmakla, farklı delinebilme yetenekleri göstermektedir. İri taneli kristallerden oluşan kaya kütleleri patlatmaya karşı olan dayanımları büyük olmaktadır (Ataman, 1988).

Güney Afrika'da bir şirketin mühendislerine eğitim amacıyla hazırladığı ve tünellerde delik tasarımının nasıl yapılacağı ile ilgili gerçeğe çok yakın oluşturduğu odanın görseli Şekil 4'te verilmiştir.



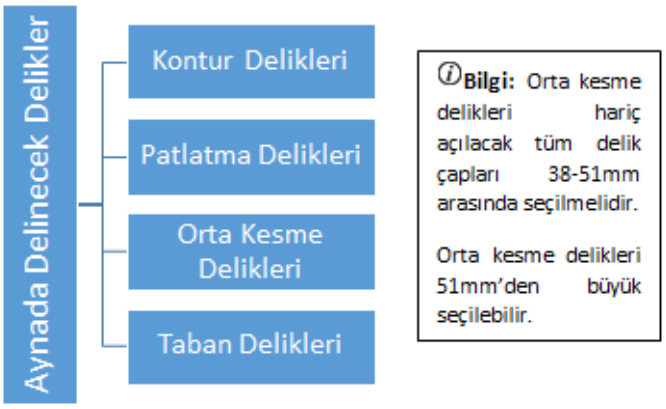
Şekil 4. Mühendisin patlatma noktaları tasarımı

Aynı şirketin inşa ettiği tünel simülasyon öncesindeki ve sonrasındaki hali Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 5. Tünel simülasyon odası

3.1.1 Deliklerin Delinmesi

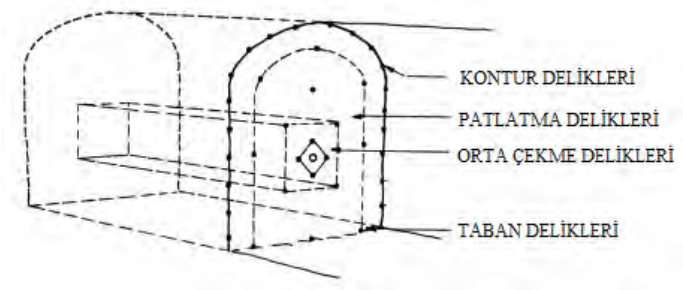
Patlatma delikleri tasarlarken göz önüne alınması gereken yol Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Aynada delinecek delikler

Delinecek noktaların aynada gösterimi Şekil 7'de verilmiştir.

Delinecek delik tespiti yapıldıktan sonra özellikle gecikmeli kapsül kullanılacak olan patlatmalarda kesim tipi belirlemek büyük önem taşır. Kesim tipi seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar Şekil 8'deki şemada verilmiştir.

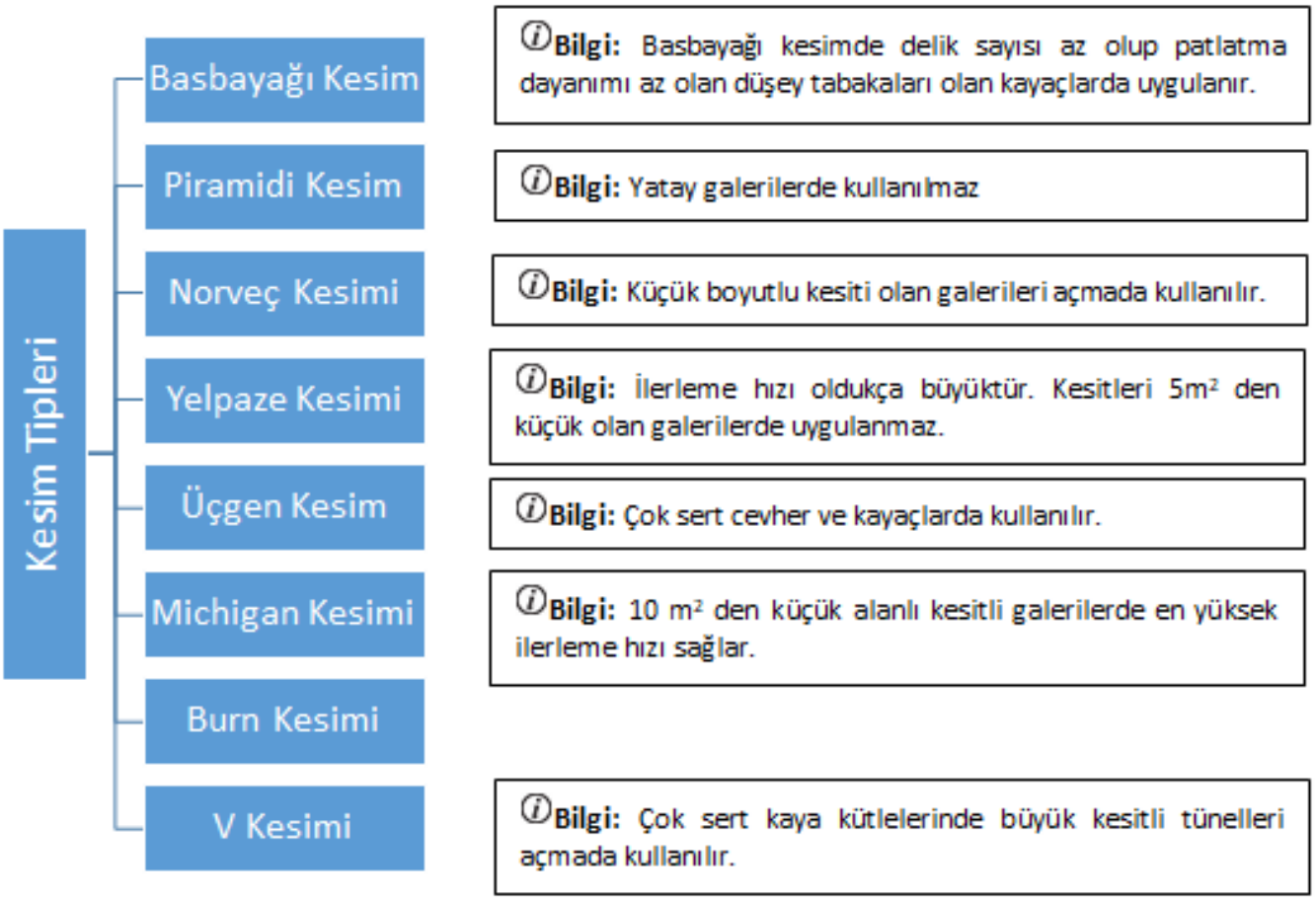


Şekil 7. Tünel arınında delinen delik türleri (Heiniö, 1999)

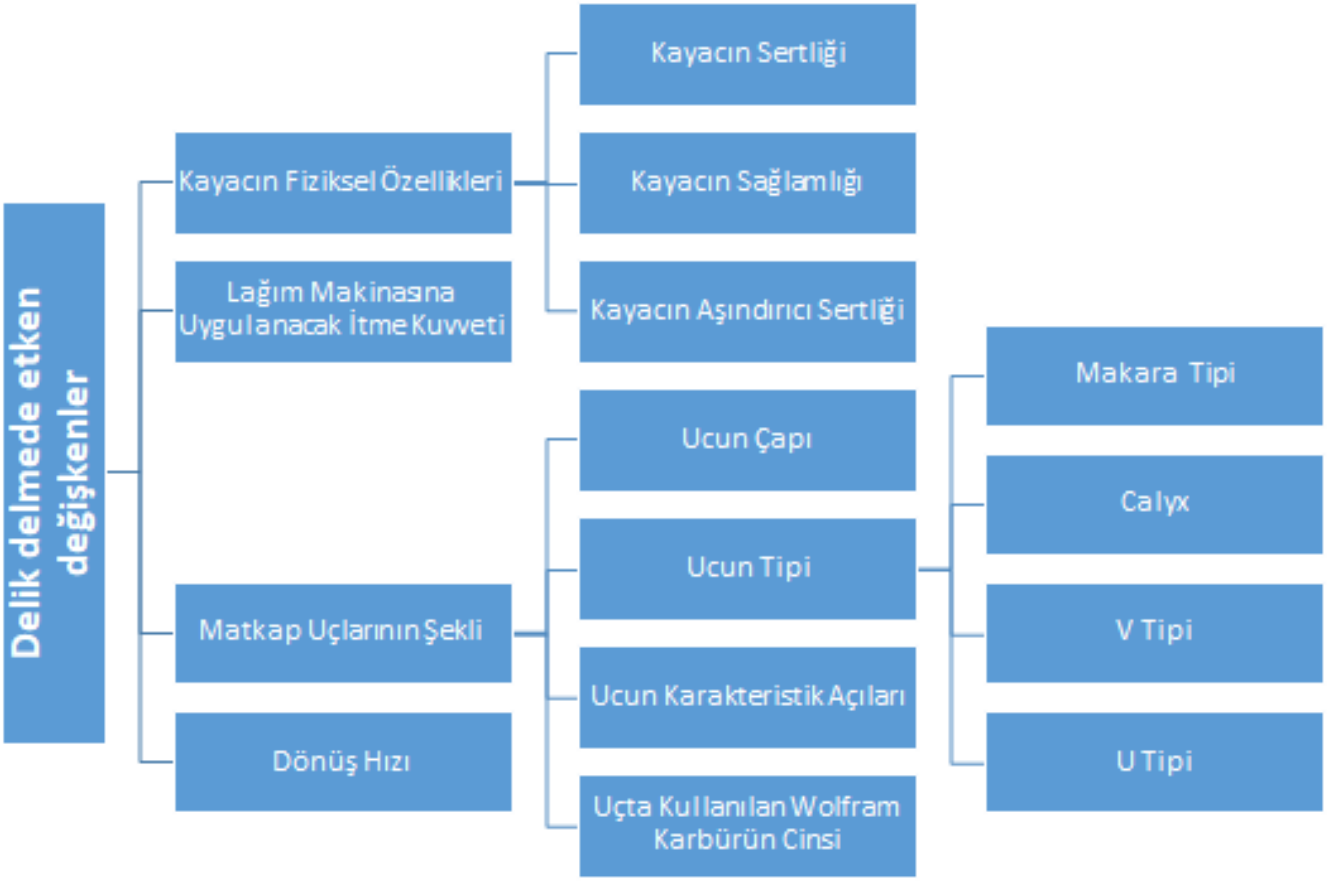
Delik delmede değişkenleri incelendiğinde Şekil 9'da verildiği gibi etkenler hesaba katılmalıdır.

Sanal ortamlarda kullanıcılar akım şemalarında belirtilen şekilde seçimler yaparak adım adım ilerleme kaydedecektir.

Seçimlerinin sonucunda kullanıcı tasarladığı tünel ilerleme işlemlerine göre sanal ortam seçimlere göre değişimler gösterip uygulamaya geçecektir.



Şekil 8. Tünel arınındaki kesim tipleri seçimi



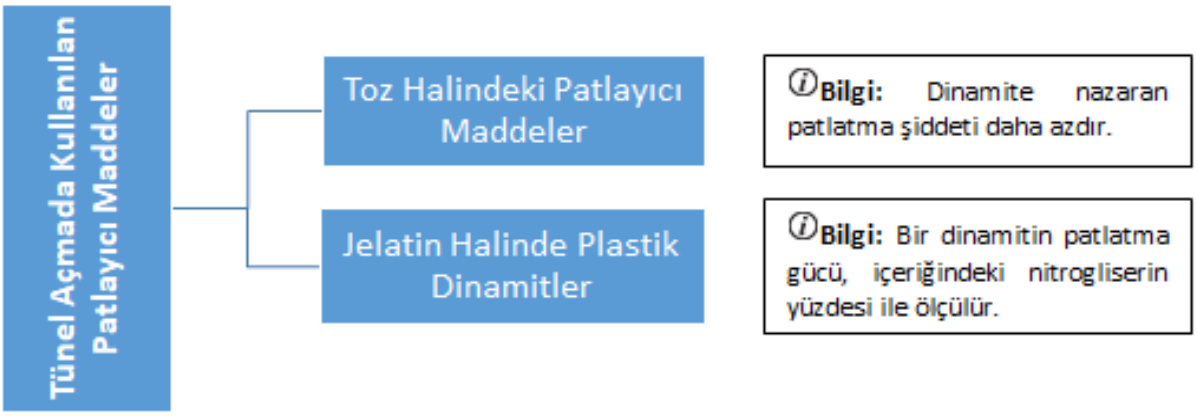
Şekil 9. Delik delmede etken değişkenler

3.2 Patlatma

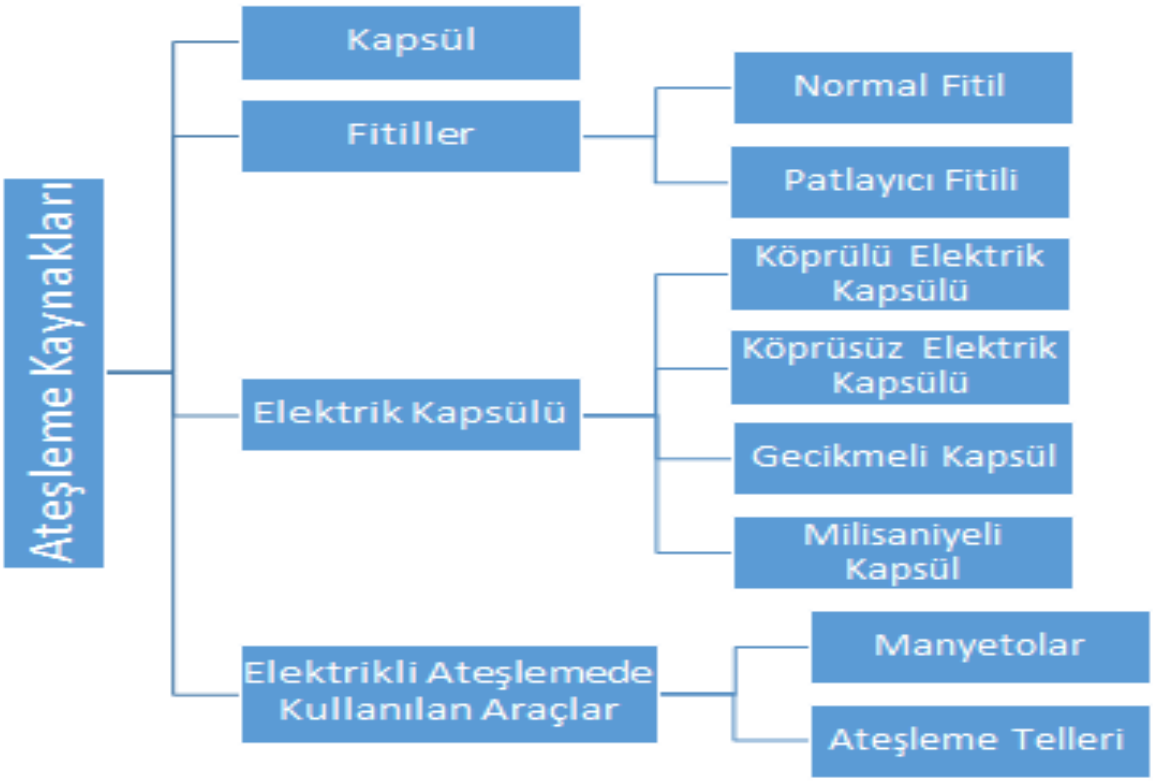
Bir kaya kütlesini patlatma demek; o kütlenin uygun görülen yerlerinde patlatma delikleri açarak bu deliklere uygun nitelikte ve miktarlarda patlayıcı madde koyarak üstünü sıkılamak suretiyle hazırlamak ve emniyetli bir şekilde onu ateşleyerek patlatmaktır (Ataman, 1988).

Patlatma sonucunda, kullanılan patlayıcı maddenin cinsine, miktarına ve içine yerleştirildikleri deliklerin derinliklerine ve ağız durumlarına göre değişir. O halde kayaç kütlesinin içine doğru uygun görülen noktalardan yeterli sayıda ve derinlik ile bir takım lağım delikleri açmak gerekir. İşte birlikte patlatılması tasarlanan bu deliklerin oluşturduğu bütüne "delik düzeni (type of cut)" denir (Ataman, 1988).

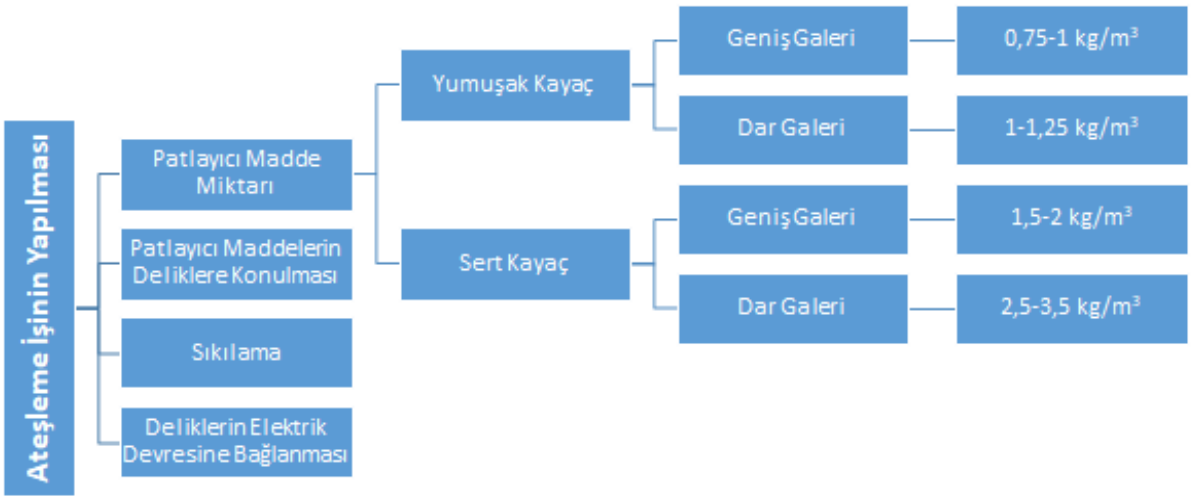
Bu delikler patlayıcı madde ile doldurulurken kullanılan gecikmeli kapsüllerin gecikme sürelerini belirleyen numaralarını kesim şeklini gösteren planda işaretleme işlemine de o patlatmanın "ateşleme düzeni (ignition pattern)" denir (Ataman, 1988). Tünel açmada kullanılan patlayıcı maddeler Şekil 10'da verilmiştir. Patlatmanın yapılabilmesi için gerekli olan ateşleme kaynakları kapsül, fitil ve elektrik kapsüllerinden meydana gelir. Ateşleme kaynakları seçimi Şekil 11'de verilmiştir. Seçilecek patlayıcı maddenin uygulanma aşamasında neler yapılması gerektiği Şekil 12'de verilmiştir (Saltoğlu, 1976).



Şekil 10. Patlayıcı madde seçimi



Şekil 11. Ateşleme kaynakları



Şekil 12. Ateşleme işlemi uygulaması

4 ÖRNEK BİR AG UYGULAMASI GELİŞTİRME-AŞAMALARI

AG ortam uygulamaları doğru bilgi ve çıkarımların elde edilmesinde öğrenme çevresine yenilikler getirerek, bu bilgilerin ve çıkarımların daha iyi anlaşılmasını, irdelenmesini ve farkına varılmasını sağlamaktadır. AG ortamlarının birer oyun olduğu ve eğitim öğretimin dışında kaldığı iddia edilse de geleneksel ortamlarda öğrenciler kısa sürede odaklanma kabiliyetlerini kaybederken, AG ortamında bu süre uzayabilmektedir. Eğitimde öğrencinin öğretilecek konuya odaklanma süresinin artırılması başarıyı da beraberinde getirmektedir (Wagner ve Barakonyi, 2003; Winkler, Herczeg ve Kritzenberger, 2002). Bu başarıya ulaşmak için AG ortamının oluşturulmasında gerçekleştirilmesi gereken adımlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Zhou vd. 2008, Kaleci vd. 2016);

A. Gerçek ortama aktarılabilen bir dijital nesnenin (resim, ses, video ya da üç boyutlu model vb.) Oluşturulmasında gerekli olan donanım ve yazılımlara ihtiyaç vardır. Tercih edilen ortamda modellenecek nesnelerin üç boyutlu olmasıyla gerçeklik duygusu pekiştirilecektir.

B.Kullanıcı konumunun kontrol edilebileceği izleme yönteminin belirlenmesi gereklidir. İzleme yöntemi ile oluşturulan dijital nesne ile kullanıcının konumu ilişkilendirilerek koordinat konumuna göre görseller güncellenecektir. Bu durumda kullanıcı görselleştirilen dijital nesne ile sürekli bir etkileşim halinde koordinatlara göre oluşabilecek değişiklikleri izleyerek durumlar arası fark ve benzerlikleri inceleyebilecektir. Aksi durumda kullanıcıyla etkileşimi olmayan bir görselin sıradanlaşması kaçınılmazdır.

C. Dijital nesne kullanılan işaretleyici konumu referans alınarak oluşturulmalıdır. Böylelikle kullanıcının ortamdaki işaretleyici üzerinde yaptığı herhangi bir değişiklik dijital nesnenin görüntüsü, konumu, büyüklüğü vb. gibi durumları anında değiştirecektir. Bu değişim geliştirici tarafından hazırlanan ortamın inandırıcılığını arttırarak dijital nesnenin gerçek bir nesne gibi ortamda yer almasını sağlayacaktır.

D. Dijital nesne donanım aygıtları yardımıyla kullanıcıya gerçek ortamda görselleştirilmelidir. Günümüzde bu donanımlara ekran, gözlük, projeksiyon vb. aygıtlar örnek verilebilir. Günden güne gelişen teknolojilerle birlikte bu donanımlar çeşitlenecektir. Ancak, geliştiriciler taşınabilirlik ve maliyet açısından küçük ekranları tercih etmektedirler.

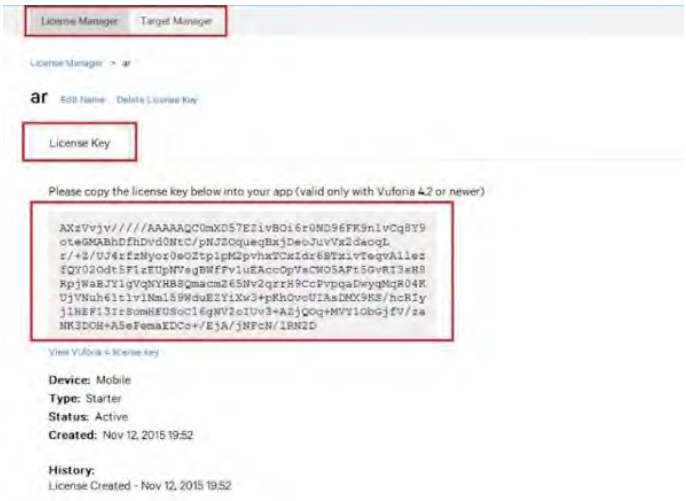
E. AG ortamları giriş ve çıkış aygıtlarını desteklemektedir. Geliştirici en az bir giriş ve bir çıkış aygıtı ile ortamı şekillendirmelidir. Ancak kullanıcıya sunulan ortamda mutlaka görselleştirilen dijital nesnelerin kontrolleri kullanıcıya verilmelidir.

F. Etkileşimli bir kullanım alanı oluşturmaya özen gösterilmelidir. AG ortamlarında çoğunlukla kullanıcı uygulamalarda aktif rol alacağından deneyimlerinin ve fiziksel becerilerinin gelişimine olumlu yönde katkı sağlanacaktır (Abdüsselam ve Karal, 2015). Bu adımlarda basit olarak bir AG materyali hazırlamanın aşamaları verilmiştir. Bu bölümde örnek bir AG uygulamasının Unity 3D yazılım motoru ve Qualcomm Vuforia SDK (yazılım geliştirme kiti) yazılımları kullanılarak geliştirilmesi verilecektir (Kaleci vd, 2016). AG uygulaması için Unity 3D yazılım motoru birçok farklı formattaki 3D modelleri desteklemesine ve geliştirilen uygulamaların birçok farklı platforma sorusuz şekilde çıkarılmasına izin vermesi; Vuforia yazılım kiti ise Unity 3D ile sorunsuz ve hızlı şekilde çalışmasından, güncel ve ücretsiz sürümü olması nedeniyle tercih edilebilir. Unity 3D oyun motorunun 64 bit versiyonlari Vuforia 5 sürümü ile uyumsuz olması nedeniyle uygulama geliştirme ortamı olarak Unity 3D yazılım motorunun 32 bit versiyonlu tercih edilir. Sistemde kurulu bir Unity 3D yazılım motoru bulunduğuna göre Vuforia geliştirme kiti kurulum aşamasına geçilebilir. Öncelikle *https://developer.vuforia.com/* adresinden kullanıcı kaydının yapılması gerekmektedir. Kayıt olduktan sonra ücretsiz hesap planı seçilip devam edilir. Projeye başlamadan önce *https://developer.vuforiacom/downloads/sdk* adresinden "Download for Unity" eklentisi indirilmelidir. Bu eklenti Vuforia geliştirme

kitinin Unity yazılım motoruna entegre olmasını sağlar (Şekil 13) (Kaleci vd, 2016).

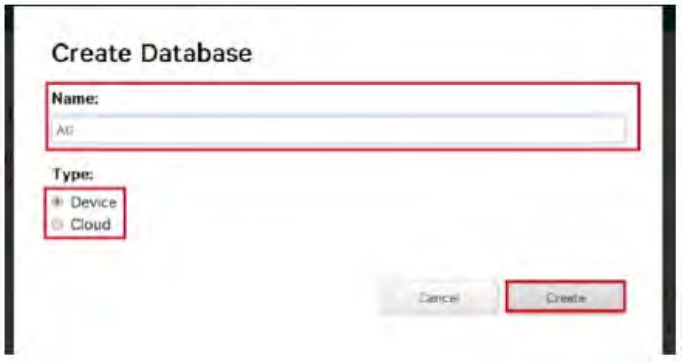
Şekil 13. Vuforia 5 SDK Unity eklentisi

Eklenti indirilip Unity 3D yazılım motoruna dâhil edildikten sonra Vuforia hesabı sayfasında yer alan "Develop" menüsünden "License Manager" ve "Target Manager" sekmelerine geçilir. "License Manager" sekmesinde geliştirilmesi gereken uygulama için bir lisans anahtarı oluşturulmalıdır. Geliştirilecek uygulamanın Unity yazılım motorunda çalışabilmesi için bir lisans koduna ihtiyaç vardır ve bu lisans anahtarı bu amaçla kullanılır (Şekil 14) (Kaleci vd, 2016).



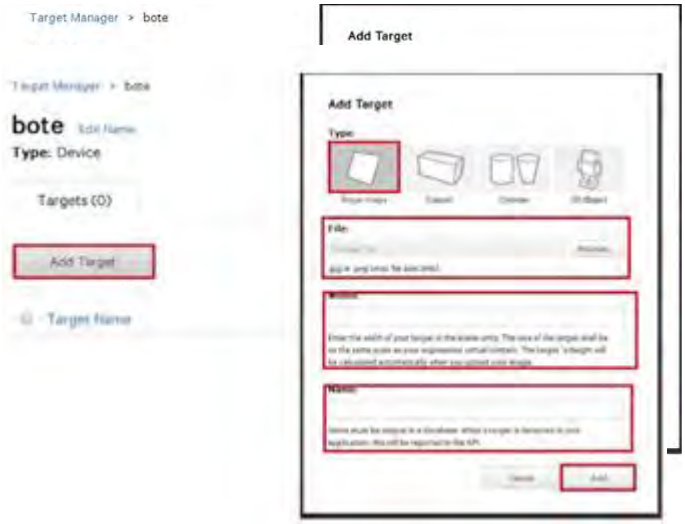
Şekil 14. Vuforia lisans anahtarı oluşturma

"Target Manager" sekmesinde öncelikle "Add Database" butonuna tıklayarak yeni bir veri tabanı oluşturulur ve oluşturulan veri tabanının cihazda mı yoksa bulut ortamda mı saklanacağı seçilir. Bulut ortamı ücretli olduğundan "Device" tercih edilmelidir (Şekil 15) (Kaleci vd, 2016).



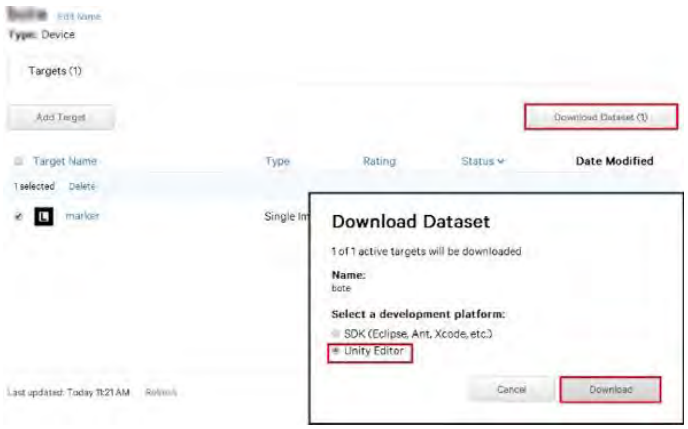
Şekil 15. Vuforia veritabanı oluşturma

Oluşturulan veri tabanına tıklayıp giriş yapıldığında "Add Target" penceresinde işaretleyici ya da işaretleyiciler (resim, QR kod, 3B model) eklenmesi istenir. İşaretleyici iki boyutlu bir fotoğraf dosyası ya da üç boyutlu bir model olabilir (Şekil 16) (Kaleci vd, 2016).



Şekil 16. Vuforia hedef resim veya marker ekleme

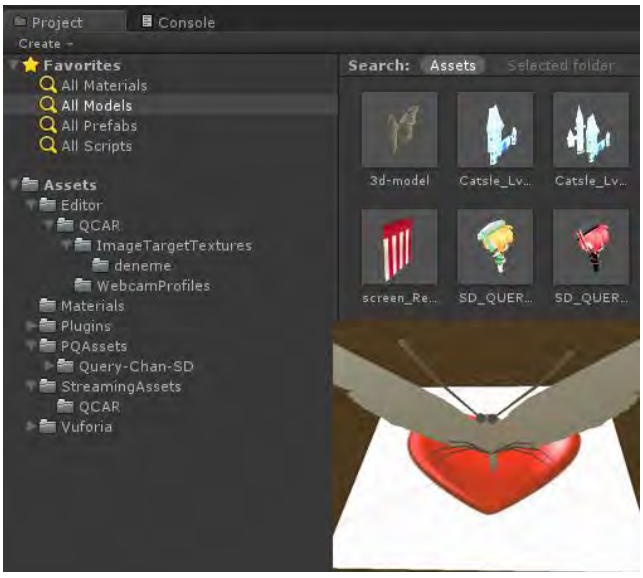
Daha önceden belirlenmiş olan işaretleyici seçildikten sonra otomatik olarak seçilen seçiciye uygun olarak bir "Unity Asset" oluşturulur. Son olarak da "Download Dataset" butonuna tıklanarak Unity 3D yazılım motoruna eklenecek olan dosya indirme işlemine geçilir (Şekil 17) (Kaleci vd, 2016).



Şekil 17. Vuforia Dataset İndirme

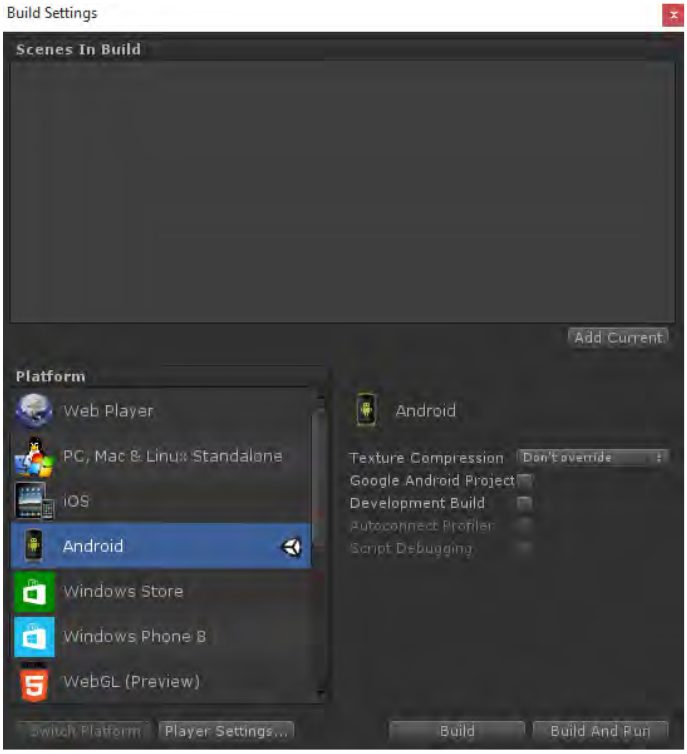
Unity Asset indirildikten sonra Unity 3D yazılım motoru ile uygulamanın geliştirilme aşamasına geçilebilir. Öncelikle Unity 3D yazılım motoru açılarak yeni bir projenin oluşturulması gerekir. Daha sonra açılan sahneye indirilen Vuforia SDK asset'i ve Vuforia veri tabanında oluşturulan hedef dataset eklenir (Şekil 18-19) (Kaleci vd, 2016).

Şekil 18. Unity'de Vuforia ve Datasetleri Assets bölümüne dahil etme



Şekil 19. Unity'de model ekleme ve ekranda marker ve model bindirmesi

Son olarak hedef üzerinde gösterilmesi planlanan 3D model Unity 3D yazılım motoru penceresinde yer alan "assets" bölümüne eklenir. "Prefabs" bölümü seçilip "AR Camera" ve "Image Target" modülleri ortama taşınır ve gerekli düzeltmeler yapılır. Gerekli son ayarlamalar ve düzeltmeler yapıldıktan sonra uygulama istenilen platforma çıkarılabilir. Bu uygulama masaüstü uygulaması (Linux, Windows, MacOS); mobil ortam uygulaması (Android, IOS, Blackberry, Windows Phone); Oyun konsolu (Xbox, PlayStation); Web Player ortamlarına çıktı olarak sunulabilmektedir (Şekil 20) (Kaleci vd, 2016).



Şekil 20. Unityde Vuforia ve Datasetleri Assets bölümüne dahil etme

Yukarıda özetle bir AG uygulamasının nasıl oluşturulduğuna ilişkin bazı genel bilgiler paylaşılmıştır. Bir önceki bölümde verilen tünelcilikte uygulanan delme-patlatma yönteminde dikkat edilmesi gerekenler ve işlem adımlarına ilişkin algoritmalar gerekli modelleme ve görsellerin oluşturulması sonrasında, hem artırılmış hem de sanal gerçeklik yazılımlarına dönüştürülerek, uygulayıcıların kendilerini sınamasına ve etkileşimli olarak daha çabuk öğrenmelerine olanak sağlanır. Görsellikle birleştirilen teorik bilgiler özellikle farklı seviyelerde ve çoklu tekrarlar ile kullanıcıların daha çabuk

ve detaylı öğrenmelerine, ayrıca farklı koşullarda bile yorum getirebilme veya sonuç çıkartmalarına yardımcı olur. Bu yolla seviyesi ne olursa olsun kullanıcı doğru bilgileri öğreninceye kadar kendisine ve çevresine fiziki bir zarar vermeden yetkinlik kazanabilir. Bir tünelde AG-SG eğitim uygulama örneği Şekil 21'de görülmektedir.

Şekil 21. Bir tünelde AG-SG eğitim uygulamaları

5 SONUÇLAR

Artırılmış ve sanal gerçeklik uygulamaları çok fazla avantajlı yönleri olmasından dolayı günümüzde birçok bilim dalına uygulama platformu olarak destek sağlamaktadır. Çok tehlikeli iş gruplarında en üst sıralarda yer alan madencilik endüstrisinde de yaşanmış veya olası tüm ihtimaller göz önüne alınarak oluşturulması planlanan bu sanal platformlarda tasarlanan kurguların, başta öğrencilere, sektörde çalışan maden mühendislerine ve maden işçilerine iyi bir rehber olacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla kazaların ve hesaplama hatalarının önlenmesi açısından sanal ortamların yaygınlaşması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, AG-SG ortamları yardımıyla öğrencilere ve sektörde işe yeni başlayan mühendis ve işçilere delme ve patlatma yöntemiyle tünel açma yöntemi işlem adımları daha kolay nasıl verilir konusu tanıtılmaya çalışılmıştır. Yöntemin gerektirdiği koşullar kullanıcı tarafından adım adım seçimle ilerlenerek uygulama yapılır. Her seçimin sonucu farklı bir senaryoya yönlendirilmektedir. Böylelikle tüm koşulların sonuçlarının farklı seviyelerde de öğrenilmesi sağlanmaktadır.

5.KAYNAKLAR

Abdüsselam, M.S. Karal, H. 2012. Fizik Öğretiminde Artırılmış Gerçeklik Ortamlarının Öğrenci Akademik Başarısı Üzerine Etkisi: 11. Sınıf Manyetizma Konusu Örneği, Eğitim ve Öğretim Araştırmaları Dergisi.

Abdüsselam, M.S., Karal, H. 2015. Artırılmış Gerçeklik, Eğitim Teknolojileri Okumaları, 2015, ISBN: 978-605- 318- 126- 2, pp. 149 – 170.

Ataman, T. 1988. Kayalarda Delik Delme ve Patlatma, ODTÜ yayıncılık, Ankara.

Azuma, R.,T. 1997. A Survey of Augmented Reality, Teleoperators and Virtual Environments, pp. 355-385.

Heiniö, M. 1999. Rock Excavation Handbook.

Kaleci, D., Demirel, T., Akkuş, İ. 2016. Örnek Bir Artırılmış Gerçeklik Uygulaması Tasarımı, Akademik Bilişim Konferansı,

Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H., Aksoy, C.O. 2012. Tünel ve Kuyu Açma, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.

Pimental, K., Teixeira, K. 1993. Virtual Reality Through the New Looking Glass, 2nd Ed., McGraw-Hill.

Saltoğlu, S. 1976. Madenlerde Hazırlık ve Kazı İşleri, İTÜ, İstanbul.

Sui, Y., Geng, D., Allen, C.R., Burn, D., Bell, G.D., Rowland, R. 2001. Three-Dimensional Motion System (Data-Gloves): Application for Parkinson's Disease and Essential Tremor", IEEE Int. Workshop on Virtual and Intelligent Measurement Systems, Budapest, Hungary.

Wagner, D., Barakonyi, I. 2003. "Augmented Reality Kanji Learning"; in: "Proceedings of the 2nd IEEE/ACM Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2003)", IEEE Computer Society Press, ISBN: 0-7695-2006-5, pp. 335 - 336.

Winkler, T., Herczeg, M., Kritzenberger, H, 2002. Mixed reality environments as collaborative and constructive learning spaces for elementary school children. In World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecomm.(Vol. 2002, No. 1, pp. 1034-1039.

Zhou, F., Duh, H.B.L., Billinghurst, M. 2008. Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR. In Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality pp. 193-202. IEEE Computer Society.

Zhu, W., Owen, C.B., Li, H., Lee, J.H. 2006. Design of the PromoPad: An automated augmented reality shopping assistant. In *Association for Information Systems - 12th Americas Conference On Information Systems, AMCIS 2006,* Vol. 5, pp. 2906-2914.

Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde Fazla Kazının Kontrol Altına Alınması

Control of Overbreaks in Efemcukuru Gold Mine

İ.D. Doğan
Tüprag Metal Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş., İzmir

ÖZET Çalışma İzmir ili Menderes ilçesi Kokarpınar mevkiinde bulunan Tüprag Metal Madencilik Efemçukuru Altın Madeni İşletmesinde yapılmış olup, çalışmada delinen deliklerin fazla kazıya etkisinin takip edilmesi, optimizasyonu ve fazla kazı oranının planlanan kazı oranını %10'un altına düşürülmesi hedeflenmiştir. Delme işlemi jumbolar ile sulu delme şeklinde yapılmakta ve kullanılan bit çapı 45 mm ve 57 mm olmaktadır.

Söz konusu yeraltı madeninde, gerek cevher gerek ise pasa galerilerinde delme patlatma sonucunda oluşan fazla kazı miktarının düşürülmesi, maliyet ve selektif madencilik açısından önem arz etmektedir. Fazla kazı yönetimi, Tüprag Efemçukuru Altın Madeni'nde sürekli gelişim ve optimizasyon prensiplerine dayandırarak kontrol altına alınmıştır. Projenin ilerleyişi mevcut durumda birçok adımla değerlendirilmiş ve bu adımlar mutlak bir sırayla birbirini izlemiştir.

ABSTRACT This study has been conducted in Tüprag Efemcukuru Gold Mine located in Kokarpınar district of Menderes, İzmir; aiming for the observation and optimization of the effects of drilled holes on overbreaks, as well as reducing the ratio of overbreaks to the planned ratio of below 10%. Drilling is performed as hydraulic drilling with jumbos, using bits of 45 mm and 57 mm diameters.

Reducing the amount of overbreaks in the studied mine, that results from the drillings and blasts in both production and development galleries, bears great significance for cost efficiency and selective mining. In Tuprag Efemcukuru Gold Mine, management of overbreaks has been taken under control through the principles of continuous development and optimization. The progression of the project has been evaluated in numerous steps that follow each other subsequently with absolute precision.

1 TÜPRAG EFEMÇUKURU ALTIN MADENİNDE FAZLA KAZI

1.1 Fazla Kazının Etkileri

Yeraltı madenciliğinde gerek cevher gerek ise pasa galerilerinde delme patlatma sonucunda oluşan fazla kazı miktarının düşürülmesi, maliyet ve selektif (seçimli) madencilik açısından önem arz etmektedir.

Fazla kazı miktarı pasa galerilende nakliye maliyetleri ile direk ilişkilendirilmektedir. Planlanandan daha fazla miktarda patlamış malzeme miktarı kamyon sefer sayıları ile direk ilişkilendirilebilmektedir.

Patlatma sonucunda kavlaksız duvar ve tavan yüzeyi elde etmek iş güvenliği açısından önem arz etmektedir. Düzgün patlamış bir ayna, ayna döngüsünde bir sonraki operasyonların (nakliye, tahkimat vb) daha emniyetli bir şekilde yapılmasını kolaylaştırmaktadır.

Fazla kazının maliyete bir diğer etkisi ise püskürtme beton tahkimatı maliyetidir. Plan dışı yapılan kazı tahkimat standartları gereği daha fazla püskürtme beton kullanımına yol açmaktadır.

Tüm bunların yanında yapılan fazla çalışmalar (fazladan nakliye, fazladan tahkimat vb) yapılan işlerde zaman kaybına neden olmaktadır. İlk bakışta bu zaman kayıpları çok küçük görülüyor olsa da toplam ayna döngüsüne bakıldığında aslında kaybın küçük olmadığı görülmektedir.

Fazla kazının cevher galerilerine önemli etkilerinden biri de kirlenme oranının artmasıdır.

Selektif madencilik yöntemlerinden biri olan "kaz doldur"da damar kontağında bulunan tavan ve tavan taşında yapılan fazla kazılar ekonomik değeri olmayan ürünün de nakliye edilmesine sebep olmaktadır. Bu da planlanan tenörün düşmesine ve cevherin ortalama operasyon maliyetinin yükselmesine neden olmaktadır. Bu durumun bir diğer olumsuz etkisi cevher hazırlama tesisinde görülmekte ve konsantre ürün maliyetlerini arttırmaktadır.

Cevher galerilerinde fazla tavan bölgesinde yapılan fazla kazılar ise daha sonra planlanılacak bir üst kat üretimi esnasında olumsuz durumlara neden olmaktadır. Tavan bölgesinde yaplan fazla kazı bir üst katın üretimi esnasında daha fazla macun dolgu tesviyesinin yapılması gerekliliğini doğurmaktadır. Bu durum maliyet ve kirlenmeyle doğrudan ilişkilendirilmektedir.

1.2 Fazla Kazı Projesi

Fazla kazı yönetimi, Tüprag Efemçukuru Altın Madeni'nde sürekli gelişim ve optimizasyon prensiplerine dayandırarak kontrol altına alınmıştır. Projenin ilerleyişi mevcut durumda birçok adımla değerlendirilmiş ve bu adımlar mutlak bir sırayla birbirini izlemiştir.

Proje takımı oluşturularak fazla kazı nedenleri araştırılması kararlaştırılmış ve adım adım gidilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Fazla Kazıda Güncel Durum

İlk olarak fazla kazı probleminin tanımlanması hedef alınmıştır. Haftalık üretim ve hazırlık aynaları atım başı fotoğraflanarak fazla kazı oranları hesaplanıp üretim bölümü ile paylaşılmaya başlanmıştır. Bu süreçte fazla kazı yapılan aynaların delgisini yapan jumbo operatörleri ve şarj operasyonu yapan ateşçilerle paylaşılmıştır.

Haftalık bazda yapılan bu çalışma operatörlerle paylaşılıp fazla kazı hakkında bir farkındalık yaratılmıştır. Fazla kazı oranı yüksek aynalarının delgi ve şarj operasyonlarını yapan operatörlerle iletişime geçilerek nedenleri hakkında fikir alışverişinde bulunulmuştur.

1.3.1 Anket

Fazla kazı probleminde operatörlerin kendi sorumluluklarını farkında olup olmadığı ya da bu konuda ne derece yetkin olduğunu saptamak amacıyla anketler hazırlanıp operatörlere sunulmuştur.

Anket sonuçları değerlendirilirken isimler göz önünde bulundurulmamış, jumbo ve ateşçilerin genel seviyesi hakkında bilgi sahibi olmak amaçlanmıştır.

1.3.2 Değerlendirme Kartları

Yapılan fazla kazı yönetimi toplantılarında, fazla kazıya yol açan nedenlerin doğru ve ayna ayna tespit edilmesi için yeraltı operasyonlarında görevli olan jumbo operatörleri, ateşçi ve vardiya amirlerine delgi, şarj ve ayna kontrolleri sırasında doldurmaları için dört soruluk kısa kartlar hazırlanması kararlaştırılmıştır (Şek. 1).

Jumbo Operatörleri için değerlendirme kartı hazırlanırken delgi öncesi ayna durumunun fazla kazıya etkisi, kayaç kalitesi ve mekanik problemlerin ayna delgi kalitesi ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır.

Ateşçiler için değerlendirme kartları hazırlanırken ateşçinin ayna şarjı öncesi dikkat etmesi gereken hususlar ve delginin ya da fazla kazıya neden olabilecek etkenlerin nasıl değerlendirmesi gerektiği vurgulanmıştır (Şek. 2).

Vardiya amirleri için değerlendirme kartları hazırlanırken vardiya amirinin kontroller esnasında fazla kazı olması halinde değerlendirme adımları oluşturulması hedeflenmiştir (Şek. 3).

Tüm bu değerlendirme kartları ile operatörler ve amirlerde bir fazla kazı farkındalığı yaratılmıştır.

Bu süreçte ayna ayna doldurulan kartlar incelenmiştir. Operatörler ve vardiya amirleriyle birebir iletişim kurularak fazla kazıya sebep olan durumlar tespit edilmiştir. Değerlendirme kartlarının proje ekibine bir diğer faydası ise ayna ayna fazla kazı takip kültürünün oluşmasını sağlaması olmuştur.

2 STANDARTLAŞMA

Yapılan değerlendirmeler sonucu fazla kazı nedenleri delgi eğimleri ve doğrultu hataları, patlatma olarak belirlenmiş ve bu konu başlıklarının mühendislik çalışmalarıyla ele alınarak çözülmesi kararlaştırılmıştır.

2.1 Ayna Delgi Standartları

Tüprag Efemçukuru Yeraltı Altın Madeni'nde cevher ve pasa aynaları için her kesitte delgi planları oluşturulmuş ve bu delgi planları jumbo operatörlerine dağıtılarak delgi standartları oluşturulmuştur.

Delgi planları oluşturulurken çevre delikleri arası mesafe azaltılmış ve patlatma sonrası daha düzgün bir kesit elde edilmesi amaçlanmıştır.

Delgi planları cevher ve pasa aynalarında her kesite göre hazırlanmış böylelikle operatörlerin delgi esnasında insiyatif almaları engellenmiştir.

Hazırlanan delgi planlarında delikler için delgi açı ve doğrultuları ayrıntılı bir şekilde gösterilmiş, operatörler bu konuda bilgilendirilmiştir (Şek. 4).

2.2 Ayna Şarj Standartları

Delgi planları oluşturulduktan sonra ayna şarj standardının oluşturulması kararlaştırılmıştır.

2.2.1 Ayna gecikme numaraları

Hazırlanan delgi planlarına göre gecikmeli kapsül numaraları verilmiştir. Hazırlanan standart ile ateşçilerin aynada inisiyatif almaları engellenmiş, delinen her deliğin hangi gecikme ile patlayacağı belirlenmiştir.

Çevre delikleri pasa aynalarında tek gecikmede patlatılması ile daha düzgün bir ayna kesiti oluşturulması amaçlanmıştır.

Cevher aynalarında ise istenen kesite göre çevre delikleri gecikmeleri verilmiştir. Böylece planlanan kesitlerde olduğu gibi gerçekleşen ayna atımlarında paralelkenar kesit elde edilmesi sağlanmıştır (Şek. 5).

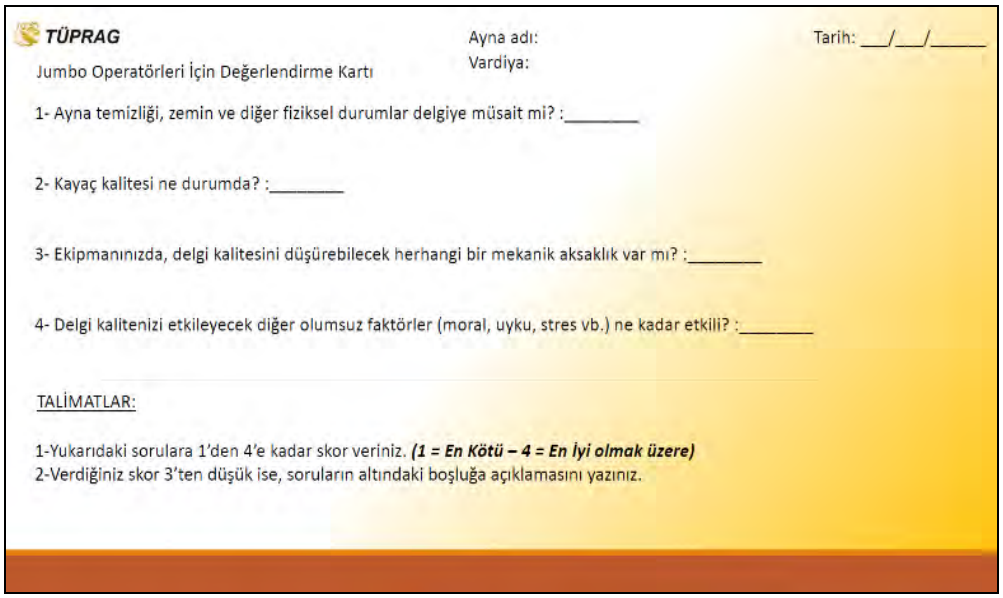
2.2.2 Çevre delikleri dolum standardı

Aynada fazla kazı nedenlerinden bir diğeri patlamamış patlayıcı probleminden kurtulmak için çevre delikleri dolum standardı değiştirilmesi hedef alınmıştır.

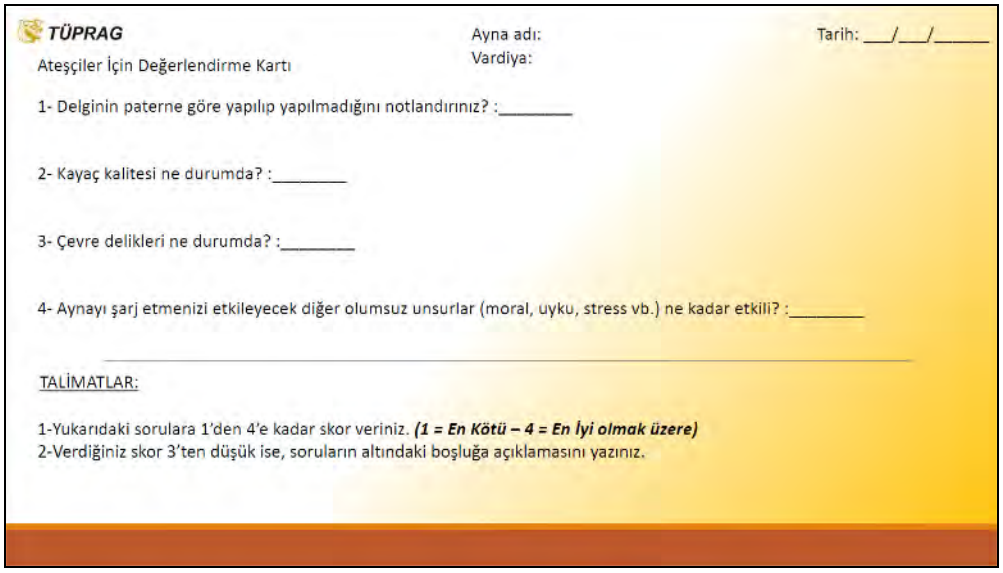
Çevre delikleri şarjı için tasarlanmış olan kesme patlayıcısı operasyon esnasında hem uygulama zorluğu hem de patlatma sonrası patlamadan kalması nedeni ile fazla kazı problemine neden olduğu saptanmıştır. Delikte patlamamış patlayıcı düzgün bir kesit elde edilememesine yol açmaktadır. Ayrıca operasyon döngüsü olarak gecikmeler yol açmakta ve planlamayı olumsuz olarak etkilemektedir.

Çevre delikleri için patlatmada kesme amacıyla şarj miktarını azaltmak ve patlamamış patlayıcı problemini ortadan kaldırmak için kesme patlayıcısı yerine ANFO+10 g/m'lik infilaklı fitil kullanımına geçilmesi kararlaştırılmıştır (Şek. 6).

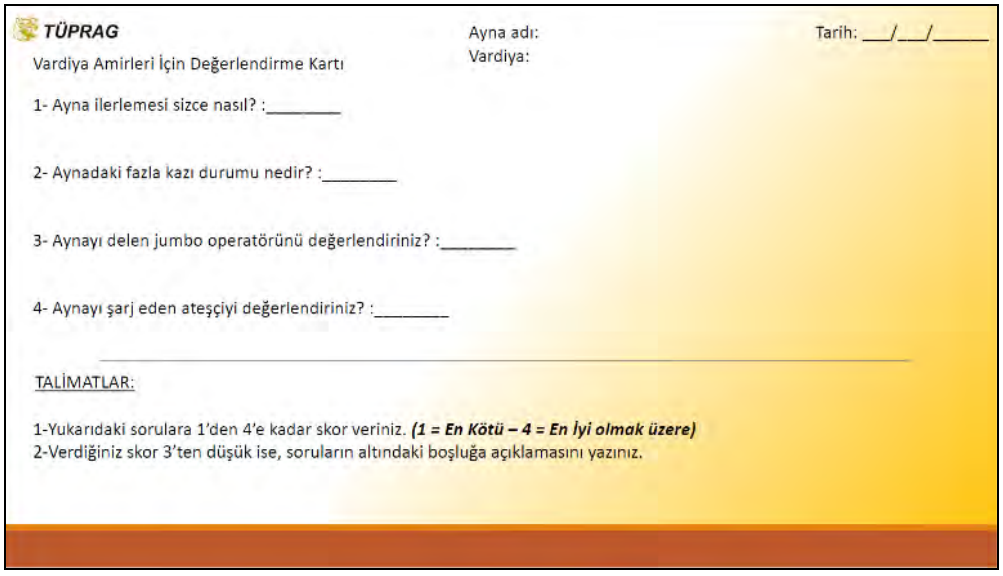
Bu çalışmada infilaklı fitil ve ANFO'nun detanasyon hızı arasındaki farkın kullanılması hedeflenmiştir. Yemlemeye bantlanan infilaklı fitil ANFO ile 3 metre delik şarjında kullanılmıştır. Böylelikle ANFO'nun bir kısmı infilaklı fitilin detonasyonu ile patlamaması sağlanmıştır. Bu da enerjinin düşmesine ve delik cidarının



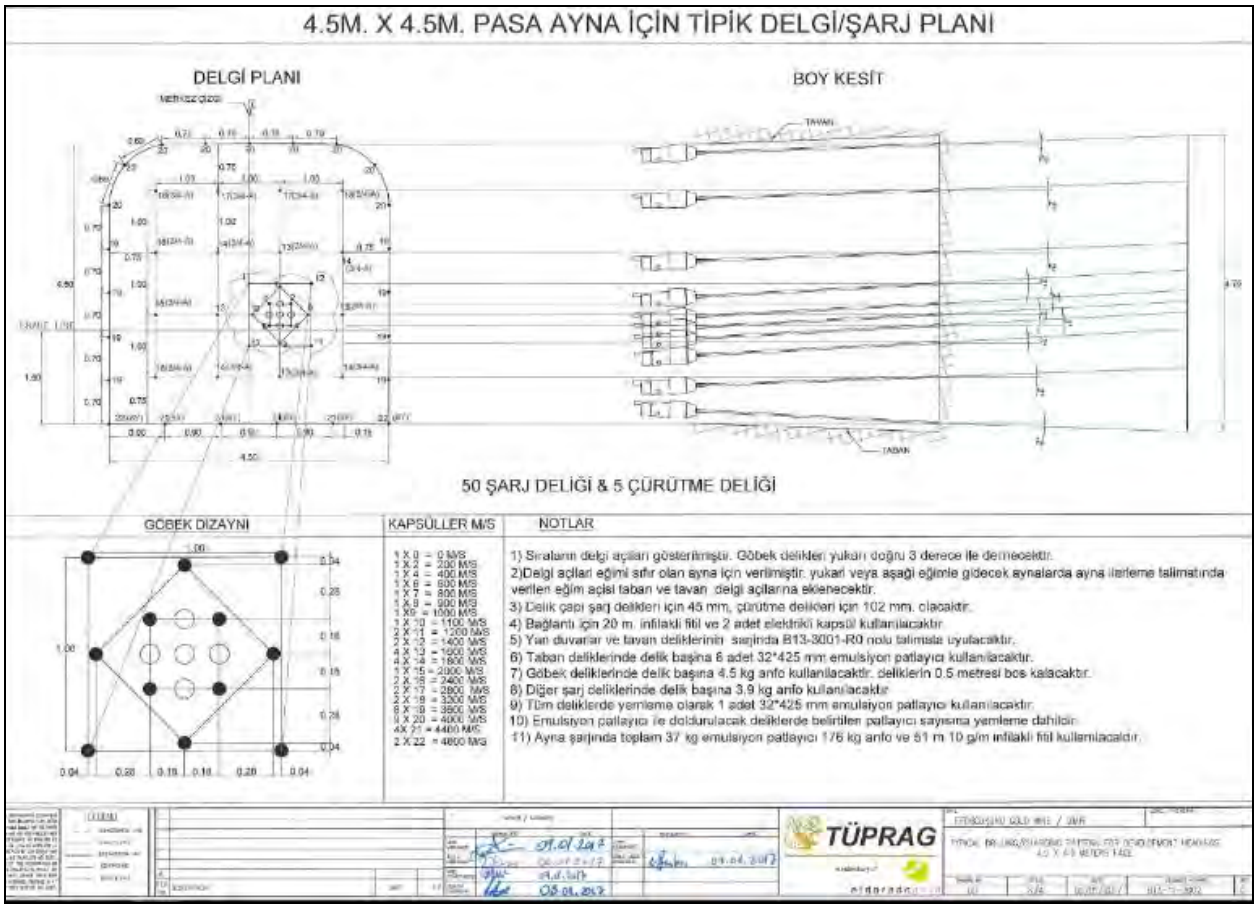
Şekil 1. Delgi operatör değerlendirme kartı



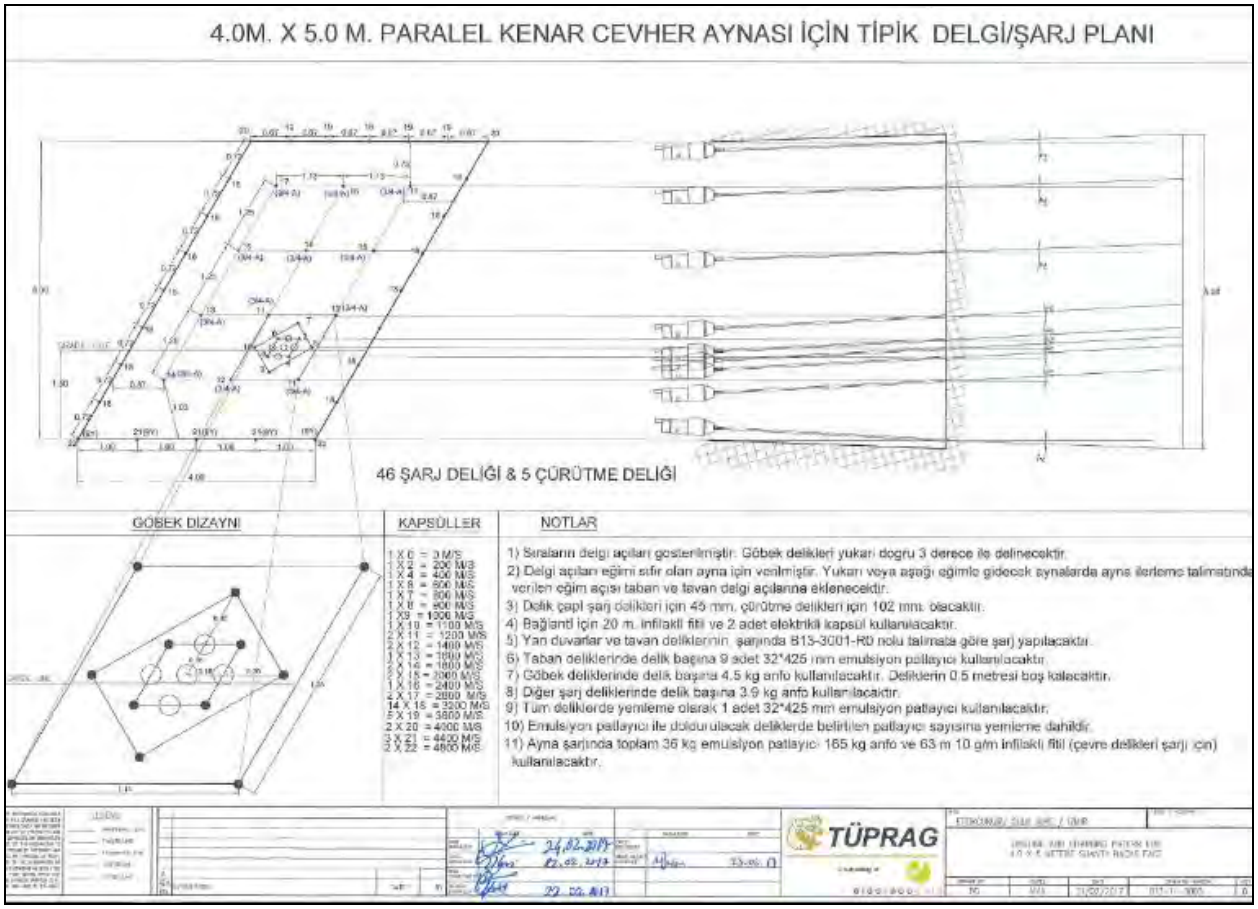
Şekil 2. Ateşçiler için değerlendirme kartı



Şekil 3. Vardiya amirler için değerlendirme kartı



Şekil 4. Pasa galeri için delgi planı



Şekil 5. Cevher galerisi şarj planı

deformasyonunun azalmasına sebep olmuştur. Yapılan denemelerde patlatma sonrası rot izleri gözlemlenmiştir.ANFO + infilaklı fitil kullanımı ile patlamamış patlayıcı sorunu ortadan kaldırılmıştır.

Yapılan denemeler sonunda ANFO+ infilaklı fitl kullanımı tüm çevre delikleri için standartlaştırılmış ve talimat haline getirilerek ateşçilere dağıtılmıştır. Talimat ile ilgili eğitimler planlanmış ve kullanımı standartlaştırılmıştır.

3 RAPORLAMA

Hedeflenen fazla kazı miktarının denetleyebilmek ve ayna takibinin devam ettirebilmek amacıyla raporlama ve amberg ayna kesit takibi sistemiyle standartlaşmaya gidilmiştir.

3.1 Amber Ayna Bazında Takip

Ayna nakliyesi ve tahkimatı sonrası çizm için aynaya giren haritacılar tarafında alınan ölçümlerden amberg programı ile fazla kazı miktarı atım atım hesaplanmıştır. Bilgisayar programı ile heasplanan bu fazla kazı miktarları ayna ayna üretim bölümü ve yöneticiler ile paylaşılarak fazla kazı takibi kolaylaştırılmıştır. Ayrıca olası fazla kazı yapılan aynalara müdahale ve önlem süresi kısaltılmıştır. Böylelikle anlık çözümler hemen uygulanabilmiş ve olası kötü sonuçların önüne geçilmesi kolaylaştırılmıştır (Şek. 7).

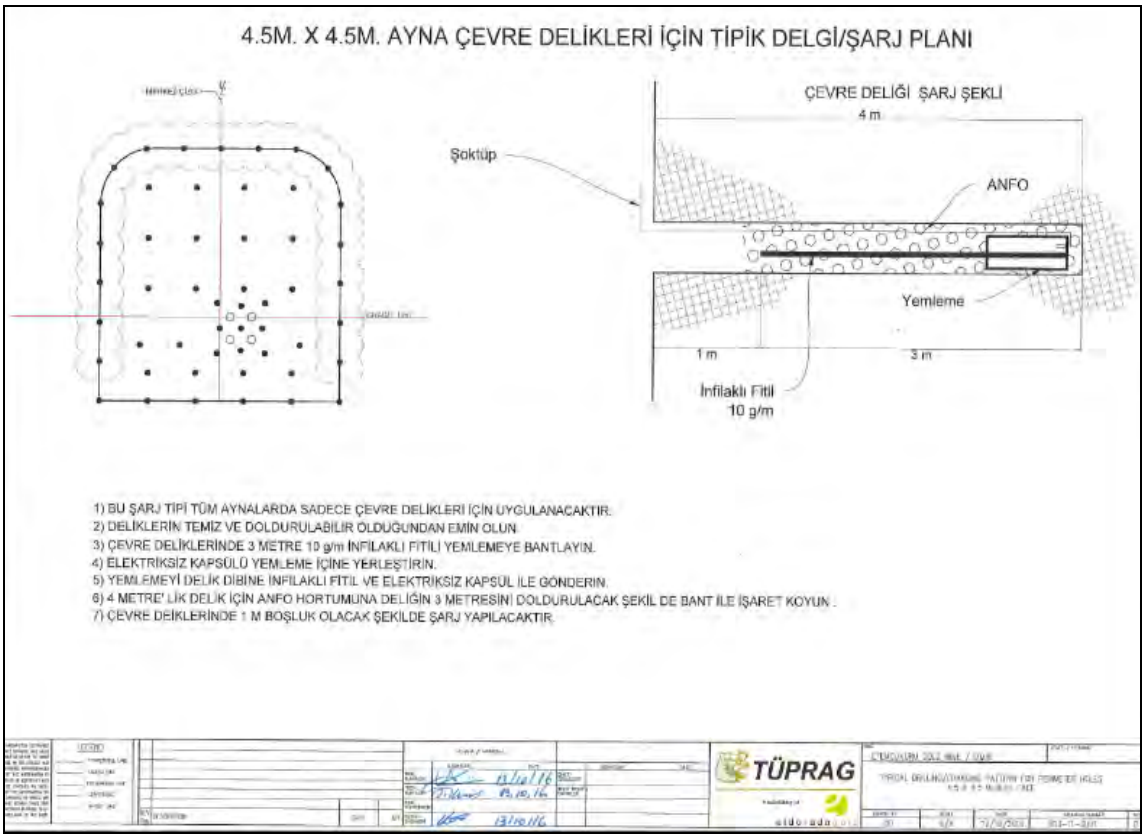
3.2 Aylık Raporlama

Değiştirilen standartların fazla kazıya etkisinin aylık bazda takibi için her ay A3 fazla kazı raporu çıkartılması kararlaştırılmıştır.

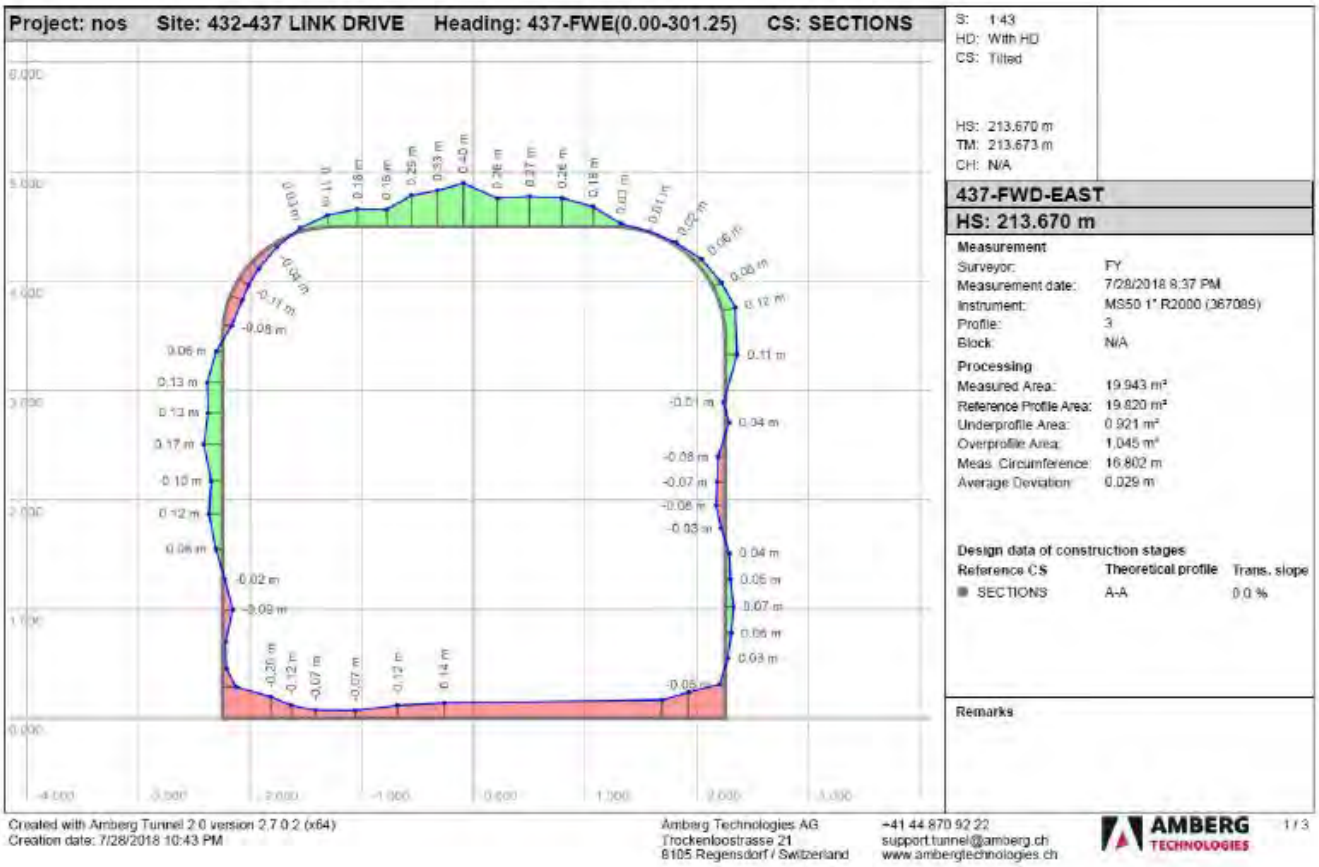
A3 fazla kazı raporunda cevher ve pasa galerilerinde aylık fazla kazı miktarları, patlayıcı ton başı maliyeti, 1 metre kazı hazrlık ilerlemesi maliyeti ve cevher galerilerinde kirlenme miktarları ayrıntılı bazda verilmektedir.

Hazırlanan bu rapor her ay üretim ve planlama bölümleriyle paylaşılarak fazla kazının kontrol altında tutulması sağlanmıştır.

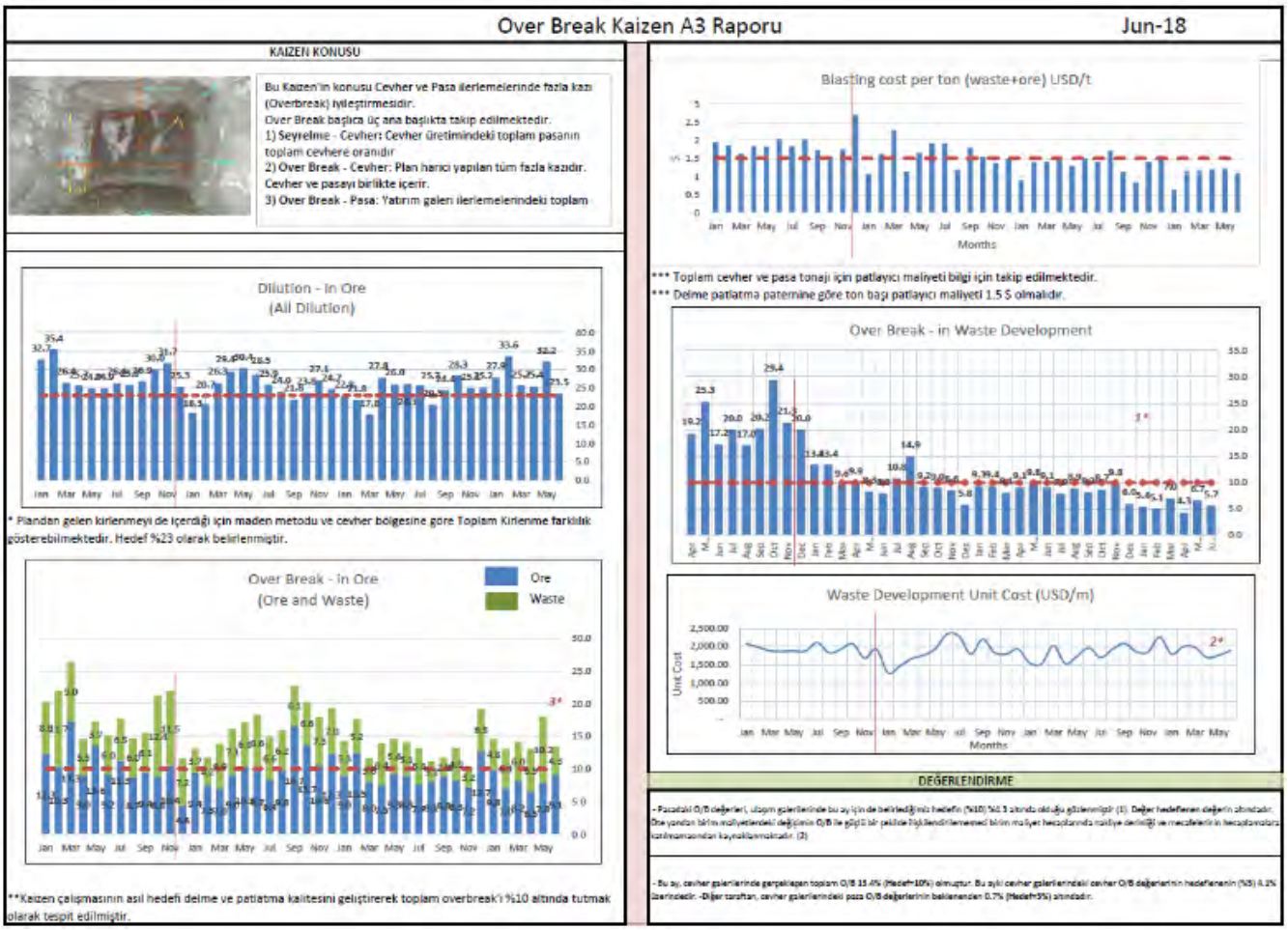
Her ay incelenen raporlar sonucunda proje sürekli canlı tutulmakta ve fazla kazı miktarlarının dhaha da fazla aşağıya çekilmesi konusunda çalışmalar devam etmektedir (Şek. 8).



Şekil 6. Çevre delik dolum standardı



Şekil 7. Amberg atım takip raporu



Şekil 8. Aylık A3 raporu

Kuzey Marmara Otoyolu Cebeci Tünelinde Yapılan Patlatmalı Kazılarda Ateşleme Sistemi ve Şaft Kapak Yapısının Hava Şoku Üzerine Etkisi

Effect on Air Blast of Shaft Cover Structure and Initiation System in Blasting Excavations in Cebeci Tunnel at Northern Marmara Highway

Ü. Özer, A. Karadoğan, M.C. Özyurt, Z. Sertabipoğlu
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fak., Maden Müh.i Bölümü, Avcılar-İstanbul

Ü.K. Şahinoğlu
Dr. Maden Müh., Esenyurt-İstanbul

İ. Sefer, B.C. Zaif, A. Durdu, A. Kişi, M.K. Günay, H. Karaoğlan
Kalyon-RSY, Kuzey Marmara Otoyolu, İstanbul

O. Özkul, O. Bayındır, M. Yurttaş
Orica-Nitro Patlayıcı Mad. San. ve Tic. A.Ş., Ankara

İ. Çevik, S. Şireci, S. Şahin, E. Kanlıçay
Sargın İnşaat, İstanbul

ÖZET Bu çalışmada, KRP Otoyol İnşaatı Adi Ortaklığı İşletmesi'nin yüklenicisi bulunduğu "İstanbul İli Sultangazi, Arnavutköy, Eyüp, Çatalca ve Silivri İlçeleri Kuzey Marmara Otoyolu (3. Boğaz Köprüsü Dahil) Projesi Kınalı Odayeri (Bağlantı Yolları Dahil) 1. Kesim (0+000 40+370), 2. Kesim (40+370 – 58+013), 7. Kesim (61+117 – 71+244) İnşaatı" işi kapsamında kazısı devam eden Cebeci Tüneli inşaatı patlatmalı kazılarında, Şaft 2 bölgesinde sağ ve sol tüp ileri ve geri aynalarında yapılan patlatmalar değerlendirilmiştir. Elektronik kapsül ve elektriksiz (nonel) kapsül kullanılan patlatmalarda, şaft üzeri kapaklı veya şaft üzeri brandalı şekilde yapılan atımlarda açığa çıkan gürültü ve hava şoku değerleri ölçülmüş ve ölçüm sonuçları ayrı ayrı analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçları ve yapılan analizlere göre elektronik kapsül kullanımının gürültü ve hava şokunun azaltılmasında elektriksiz ateşleme sistemlerine göre önemli ölçüde etkili olduğu ve aynı şekilde şaft üzerinde kullanılan kapağın gürültü ve hava şokunu minimize etmekte çok önemli katkıları olduğu anlaşılmıştır.

ABSTRACT In this study, blasting operations at tunnels, right and left tube faces in the excavation of Cebeci Tunnel construction within the scope of construction of Kınalı Odayeri (including the connection roads) 1st Section (0+000 40+370), 2nd Section (40+370 – 58+013) and 7th Section (61+117 – 71+244) in Northern Marmara Highway Project (including 3rd Bosphorus Bridge) in Sultangazi, Arnavutköy, Eyüp, Çatalca and Silivri districts in Istanbul, were evaluated. In shots using electronic detonators and nonel (non-electrical) detonators, the values of noise and air blast obtained from shots with covered shaft cover or canvas on the shaft collar were measured and the results were analyzed and evaluated separately. According to the results, it was understood that using the electronic detonators is considerably effective in reducing noise and air blast compared to the non-electrical initiation systems, and likewise the cover used on the shaft collar has a very important contribution to minimize noise and air blast.

1 GİRİŞ

Kayanın fiziksel özelliklerine bağlı olarak patlatmalı kazının kaçınılmaz olduğu tünelcilik çalışmalarında patlatma sonuçlarının tüm tünel açma işlemlerine önemli etkileri bulunmaktadır. Kayanın ve tünel güzergâhının jeolojik yapısı gereği mekanik kazının yapılamadığı yerlerde patlatmalı kazı yöntemi uygulanmaktadır (Kahriman 2004, Özer 2008, Özer vd. 2012, Kalaycı vd. 2013).

Patlatmalı kazı yöntemi tünelcilik faaliyetlerinde daha sonraki üretim işlemlerini etkilemektedir. Bundan dolayı patlatma yönteminin ve parametrelerinin tünel güzergahının jeolojik yapısına göre dizayn edilmesi gerekmektedir. Verimli bir patlatmadan beklenen; arzu edilen parça boyut dağılımına sahip, homojen ve iyi ötelenmiş bir yığın elde edilmesi, kaya fırlaması, titreşim ve hava şoku gibi çevresel etkilerin zarar verebilecek seviyelerin altında olmasıdır (Kahriman 2004, Özer 2008, Özer vd. 2012, Kalaycı vd. 2013, Kalaycı vd. 2013, Özer vd. 2016, Özer vd. 2017).

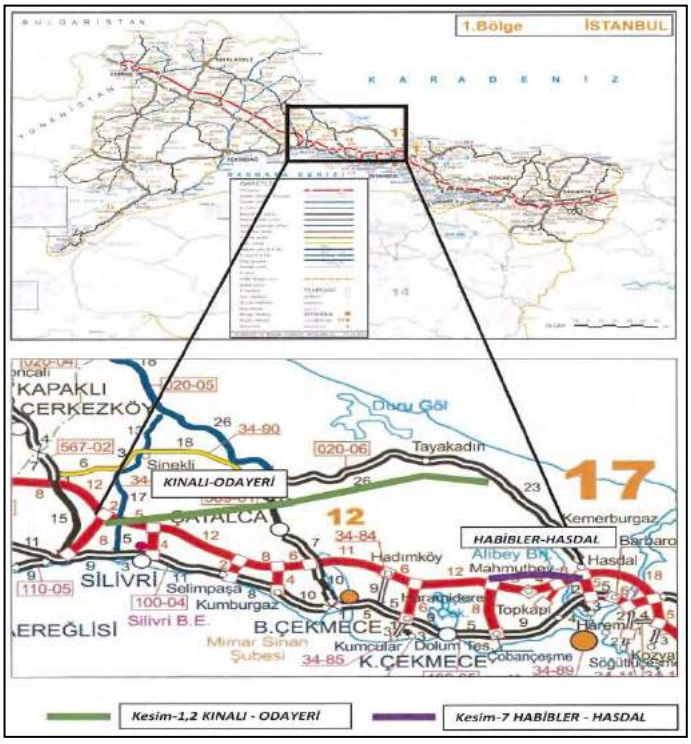
Ülkemizde kentsel dönüşüm çalışmalarının artmasına paralel olarak artan kaya kazısı işleri, çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Yerleşimin yoğun olduğu şehir merkezlerinde bulunan palatma sahalarında, risk noktalarının çok olması, patlatmanın çevresel çıktılarının minimize edilmesi sonuçlarının uygun yöntemlerle değerlendirilmesinin önemini arttırmaktadır (Kalaycı vd. 2013, Özer vd. 2016).

Yoğun yerleşim bölgesinde bulunan çalışma sahalarında yapılan patlatmalardan kaynaklı çevresel şikayetlerin büyük bir bölümü hava şoku ve gürültüden kaynaklanmaktadır (Özer vd. 2016). Amerika Birleşik Devletleri Madencilik Bürosu'nun (USBM) RI 8507 yönetmeliğine (Siskind vd., 1989) göre, hava şokundaki 1 dB artış, algıda 10 dB'e karşılık gelmektedir. Bu nedenle, patlatma kaynaklı hava şoku ve gürültü düşürülerek çevresel rahatsızlıklar azaltılabilir. Bunun için uygun patlatma tasarımına, hatasız işçiliğe ve ek önlemlerin alınmasına ihtiyaç vardır.

Özer vd. (2015) ve Özyurt vd. (2016), şehir merkezlerinde bulunan çalışma sahalarında, yüzeyde yapılan patlatmalarda (bina yıkımı, şaft kazısı vb.), deliklerin etrafının veya üzerinin branda gibi jeotekstil malzemeler ile kapatılması durumunda meydana gelen hava şokunun azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca, Yurttaş vd. (2015)'e göre, nonel kapsüllerin yerine elektronik kapsüller kullanıldığı takdirde, açığa çıkan hava şoku azalmaktadır.

2 ÇALIŞMA SAHASI

KRP Otoyol İnşaatı Adi Ortaklığı Ticari İşletmesi tarafından Kuzey Marmara Otoyolu (3.Boğaz Köprüsü Dahil) Projesi Kınalı-Odayeri (Bağlantı yolları dahil) Kesimi kapsamında İstanbul İli Silivri ilçesi Kınalı ile Arnavutköy Odayeri (KM 0+000 - 58+013) arasında ve Sultangazi ilçesi Gazi Mahallesi Cebeci Taş Ocakları ile Habipler mevkileri arasında (KM 61+117 - 71+244) inşa edilmektedir. Proje güzergahının yer bulduru haritası Şekil 1'de, 7.Kesim ve Cebeci Tünelinin görüntüsü ise Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Proje bölgeleri yer bulduru haritası (Tüm kısımlar) (KRP, 2016)

Şekil 2. 7.Kesim ve Cebeci Tüneli Güzergahı (Özer vd., 2017)

3 GÜRÜLTÜ VE HAVA ŞOKU ÖLÇÜMLERİ VE SONUÇLARI

3.1 Gürültü ve Hava Şoku Ölçümleri

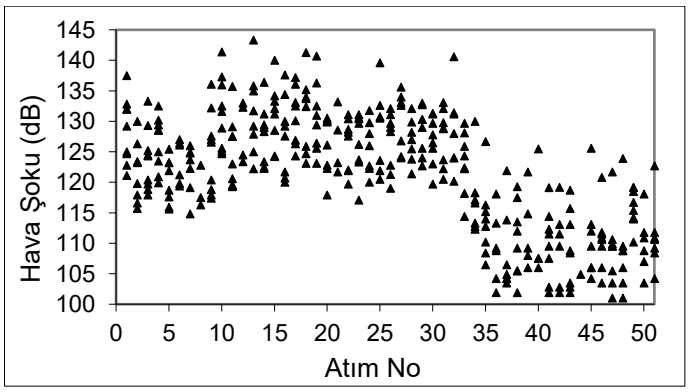
Kuzey Marmara Otoyolu Cebeci Tünelinde yapılan patlatmalı kazılarda ateşleme sistemi ve şaft kapak yapısının hava şoku üzerine etkisini analiz edebilmek amacıyla, Cebeci Tüneli Şaft 2 bölgesinde Sağ Tüp ve Sol Tüp ileri ve geri aynalarında elektronik kapsül ve elektriksiz (nonel) kapsül ile yapılan patlatmalar izlenmiş ve hava şoku ölçümleri yapılmıştır.

Şekil 3'de Cebeci Tüneli Şaft 2 Bölgesi Sağ Tüp ve Sol Tüp ileri ve geri aynaları gösterilmiştir. Ayrıca izlenen patlatmalarda gürültü ve hava şoku ölçümleri yine Şekil 3'de gösterilen ve tünel güzergahı üzerindeki Gazi Mahallesi'ne ait binaların yanlarında belirlenen 25 ölçüm istasyon noktasından ölçüm cihazları ile yapılmıştır.

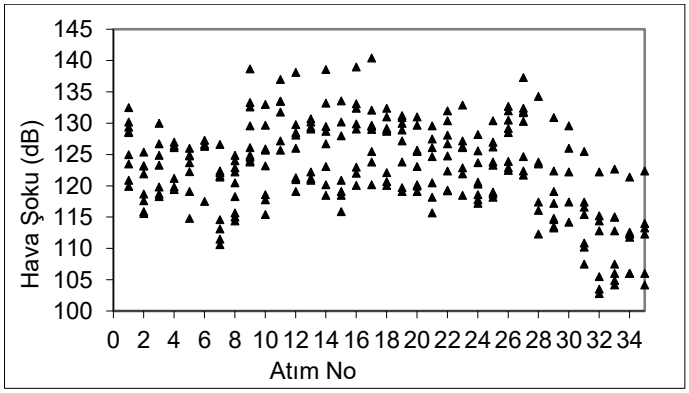
3.2 Gürültü ve Hava Şoku Ölçüm Sonuçları

Çalışma kapsamında, Kuzey Marmara Otoyolu'nun 7. Kesimi (61+117 – 71+244) bölgesinde patlatmalı kazı çalışmaları sırasında Şaft 2 Sağ Tüp İleri Aynada 23 ölçüm istasyonunda 51 atıma ait 373 (Şekil 4), Sağ Tüp Geri Aynada 21 ölçüm istasyonunda 35 atıma ait 262 (Şekil 5), Sol Tüp İleri Aynada 19 ölçüm istasyonunda 34 atıma ait 259 (Şekil 6) ve Sol Tüp Geri Aynada 20 ölçüm istasyonunda 27 atıma ait 192 (Şekil 7) olay cihazlar tarafından kaydedilmiştir.

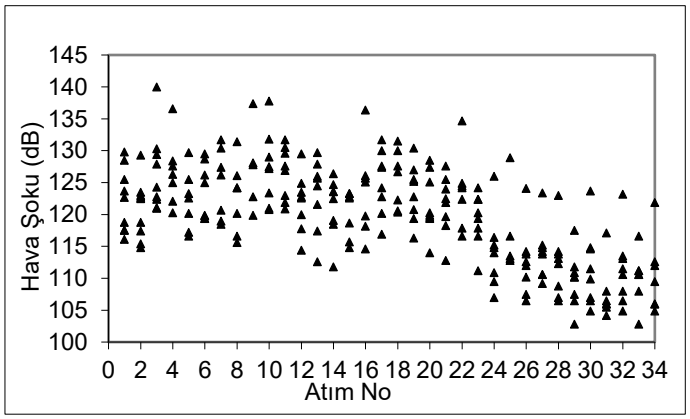
Şekil 3. Şaft 2 bölgesi tünel aynaları ve ölçüm istasyon noktaları



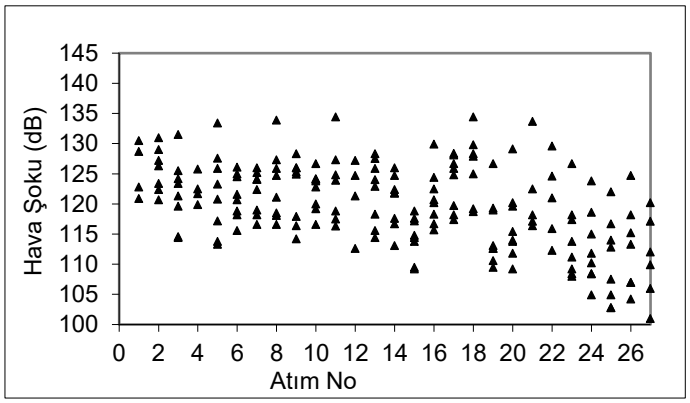
Şekil 4. Sağ tüp ileri ayna ölçüm sonuçları



Şekil 5. Sağ tüp geri ayna ölçüm sonuçları



Şekil 6. Sol tüp ileri ayna ölçüm sonuçları



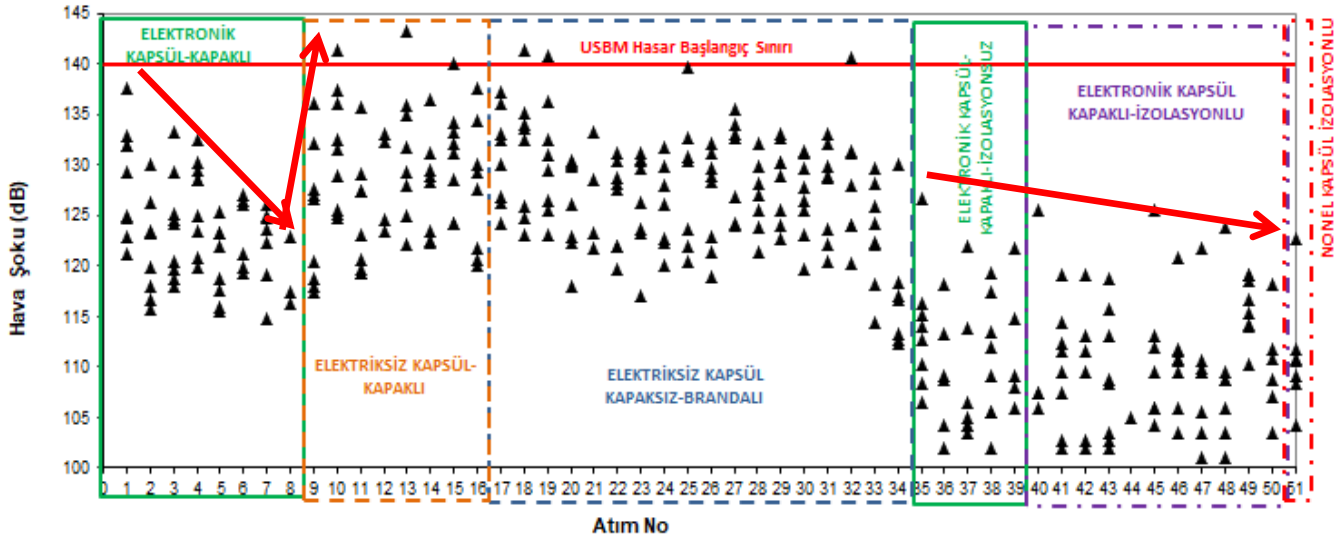
Şekil 7. Sol tüp geri ayna ölçüm sonuçları

4 GÜRÜLTÜ VE HAVA ŞOKU ÖLÇÜMLERİNİN ANALİZİ

Cebeci Tüneli Şaft 2 bölgesinde sağ ve sol tüp ileri ve geri aynalarında elektronik kapsül, elektriksiz (nonel) kapsül, şaft üzeri kapaklı, şaft üzeri kapaksız brandalı ve kapaklı izolasyonlu şekilde yapılan atımlarda açığa çıkan gürültü ve hava şoku ölçümü değerleri sırasıyla sağ tüp ileri ve geri ayna, sol tüp ileri ve geri ayna olmak üzere ayrı ayrı analiz edilmiştir.

4.1 Sağ Tüp İleri Ayna

Şaft 2 Sağ Tüp İleri Ayna kazısında elektronik ve elektriksiz (nonel) kapsül ile yapılan atımların titreşim ölçer cihazları tarafından kaydedilen hava şoku değerleri ile USBM sınırı Sağ Tüp İleri Ayna için Şekil 8'de sunulmuştur.



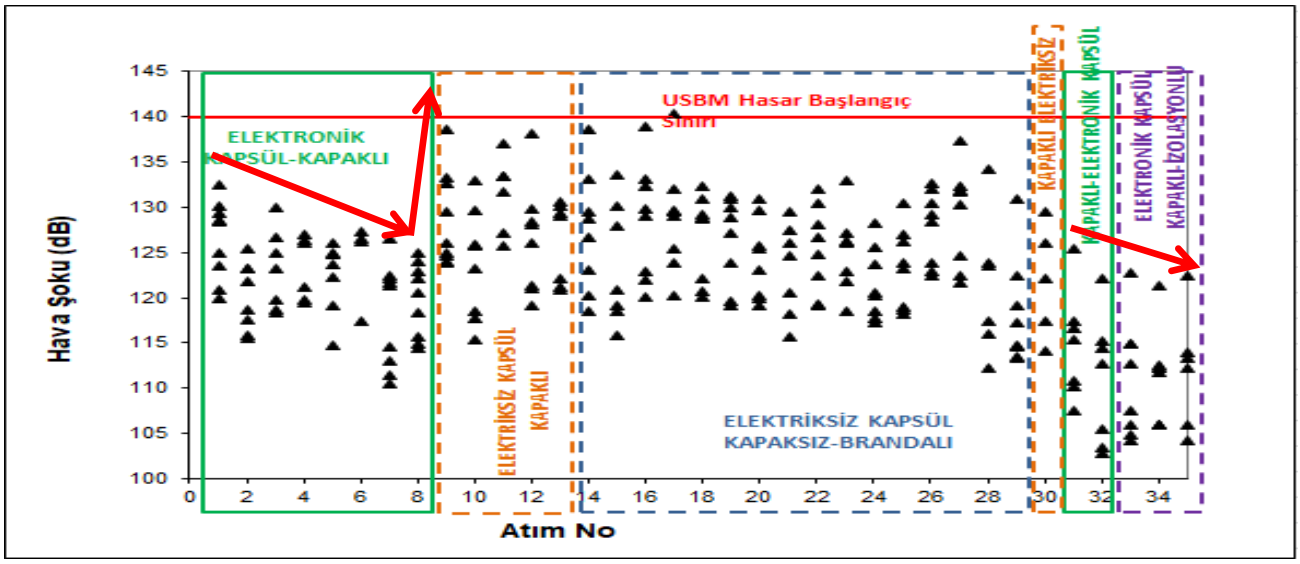
Şekil 8. Sağ tüp ileri ayna atımlarının hava şoku verilerinin USBM normuna göre toplu değerlendirmesi

Şekil 8 dikkatle incelendiğinde, Sağ Tüp İleri Aynanın 1. atımından itibaren 8. Atıma kadar elektronik kapsül kullanılarak patlatmalar yapıldığı, patlatmalarda şaft üzerinde kapak kullanıldığı ve şaft 2 den uzaklaştıkça kaydedilen hava şoku değerlerinin şaft girişine yakın olmasına rağmen düzenli bir şekilde azaldığı ve en yüksek değerin 123 dB'e kadar düştüğü açıkça görülmektedir. Ancak, 9. atımdan itibaren 34. atıma kadar elektriksiz (nonel) kapsüllerle yapılan atımlardaki kayıtların, 9-16. atımlarda şaft üzerinde kapak, 16-34 arası atımlarda şaft üzerinde branda olmasına ve atımların şaft

girişinden gittikçe uzaklaşmalarına rağmen yüksek olduğu ve bazı atımlarda USBM'in sınır değerinin üzerinde ölçüldüğü görülmektedir. 35. atımdan itibaren tekrar elektronik kapsül kullanılmaya başlanmış, şaft üzerinde kapak ve izolasyon ile hava şoku ölçüm değerleri daha düşük ölçülmeye başlanmıştır.

4.2 Sağ Tüp Geri Ayna

Şaft 2 Sağ Tüp Geri Ayna kazısında elektronik ve elektriksiz (nonel) kapsül ile yapılan atımların titreşim ölçer cihazları tarafından kaydedilen hava şoku değerleri ile USBM sınırı Sağ Tüp Geri Ayna için Şekil 9'da sunulmuştur.



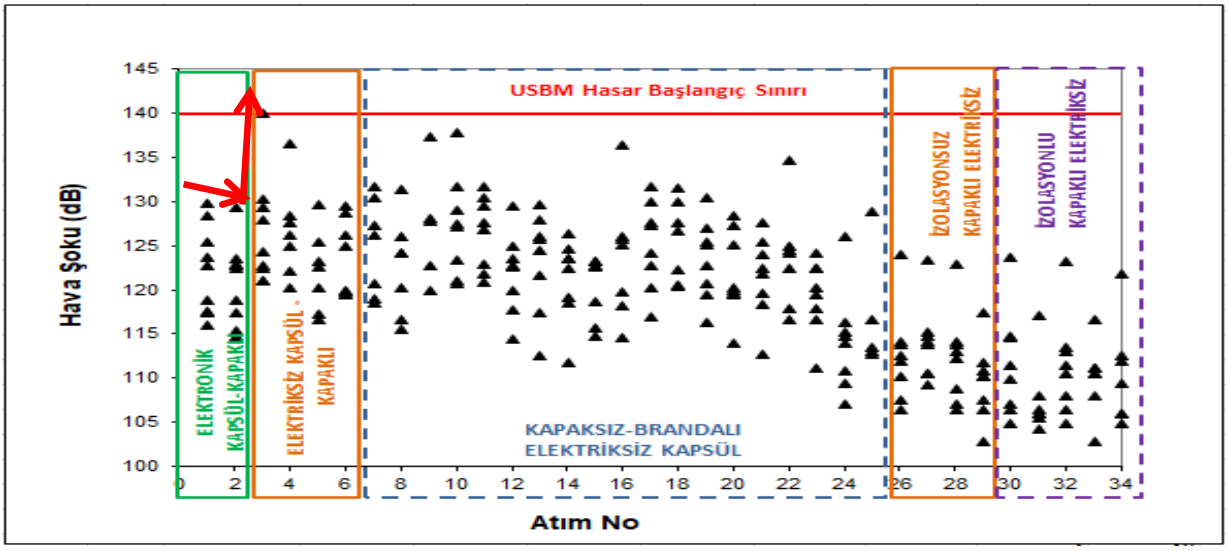
Şekil 9. Sağ tüp geri ayna atımlarının hava şoku verilerinin USBM normuna göre toplu değerlendirmesi

Şekil 9 dikkatle incelendiğinde, Sağ Tüp Geri Aynanın 1. atımından itibaren 8. Atıma kadar elektronik kapsül kullanılarak patlatmalar yapıldığı, patlatmalarda şaft üzerinde kapak kullanıldığı ve şaft 2 den uzaklaştıkça kaydedilen hava şoku değerlerinin şaft girişine yakın olmasına rağmen düzenli bir şekilde azaldığı ve en yüksek değerin 125 dB'e kadar düştüğü açıkça görülmektedir. Ancak, 9. atımdan itibaren 30. Atıma kadar elektriksiz (nonel) kapsüllerle yapılan atımlardaki kayıtlar, atımların şaft girişinden gittikçe uzaklaşmalarına kapak ve branda kullanılmasına rağmen yüksek olduğu ve bazı atımlarda USBM'in sınır değerinin üzerinde veya çok yakın ölçüldüğü görülmektedir. 31. atımdan itibaren tekrar elektronik kapsül kullanılmaya başlanmış, şaft üzerinde kapak ve izolasyon ile hava şoku değerleri daha düşük ölçülmeye başlanmıştır.

4.3 Sol Tüp İleri Ayna

Şaft 2 Sol Tüp İleri Ayna kazısında elektronik ve elektriksiz (nonel) kapsül ile yapılan atımların titreşim ölçer cihazları tarafından kaydedilen hava şoku değerleri ile USBM sınırı Sol Tüp İleri Ayna için Şekil 10'da sunulmuştur.

Şekil 10 dikkatle incelendiğinde, Sol Tüp İleri Aynanın 1.ve 2. atımında elektronik kapsül kullanılarak patlatmalar yapıldığı ve kaydedilen hava şoku değerlerinin şaft girişine yakın olmasına rağmen düzenli bir şekilde azaldığı açıkça görülmektedir. Ancak, 3. atımdan itibaren elektriksiz (nonel) kapsüllerle yapılan atımlardaki kayıtlar, atımların şaft girişinden gittikçe uzaklaşmalarına rağmen yüksek olduğu ve bazı atımlarda USBM'in sınır değerinin üzerinde veya çok yakın ölçüldüğü görülmektedir.

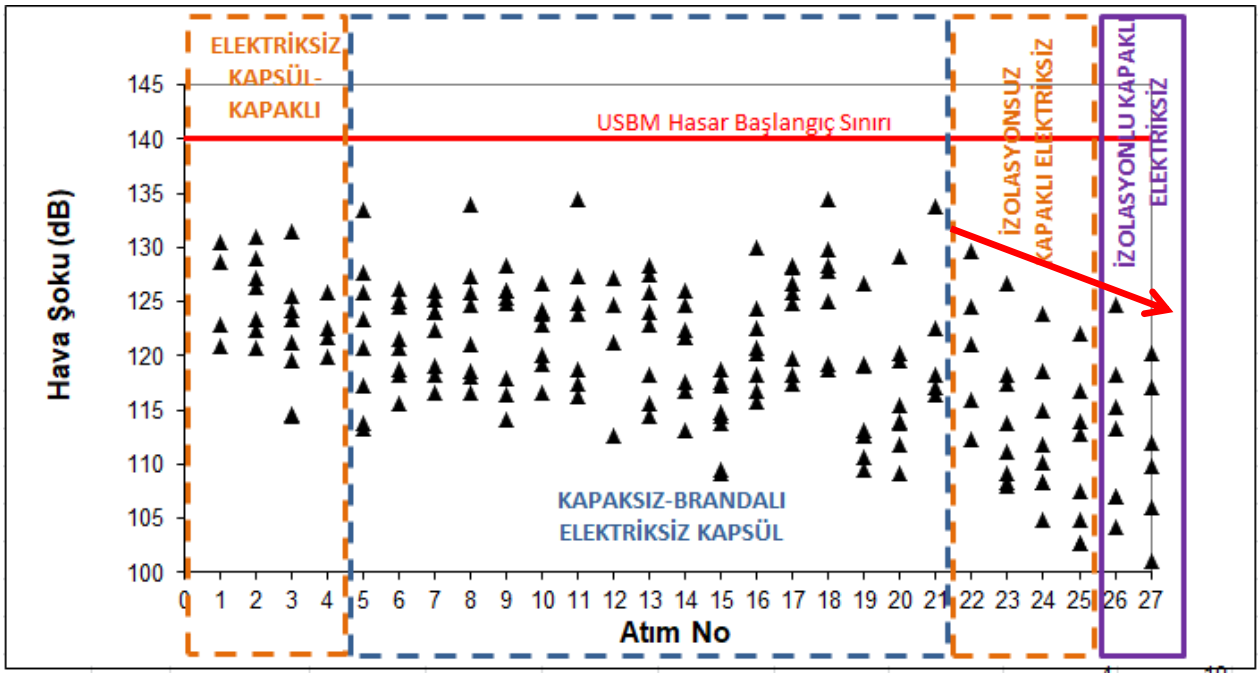


Şekil 10. Sol tüp ileri ayna atımlarının hava şoku verilerinin USBM normuna göre toplu değerlendirmesi

Dolayısı ile Şekil 10'da görüldüğü üzere, Sol Tüp İleri Aynada Elektronik Kapsüllerle yapılan atımlarda kaydedilen hava şoku değerlerinin Elektriksiz (Nonel) Kapsüllerle yapılan atımlarda kaydedilen hava şoku değerlerinden Şaft 2 girişine yakın olan atımlarda bile daha düşük olduğu açıkça anlaşılmaktadır. 7.atımdan itibaren 25. Atıma kadar kapak kullanımı yerine branda kullanımına geçildiği ve hava şoku değerlerinin tekrar yükselmeye başladığı, ardından tekrar kapak kullanımına geçildiğinde hava şoku değerlerinin tekrar düşmeye başladığı görülmektedir. Bu durum kapak kullanımının branda kullanımına göre hava şokunu azaltmada daha etkili olduğunu göstermektedir.

4.4 Sol Tüp Geri Ayna

Şaft 2 Sol Tüp Geri Ayna kazısında elektriksiz (nonel) kapsül ile yapılan atımların titreşim ölçer cihazları tarafından kaydedilen hava şoku değerleri ile USBM sınırı Sağ Tüp İleri Ayna için Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Sol tüp geri ayna atımlarının hava şoku verilerinin USBM normuna göre toplu değerlendirmesi

Şekil 11 dikkatle incelendiğinde, Sol Tüp Geri Aynanın tüm atımlarında elektriksiz kapsül kullanılarak patlatmalar yapıldığı ve 1-4 atımlarında şaft üzerinde kapak kullanıldığı, 5-21 atımlarında kapak yerine branda kullanıldığı şaft 2 den uzaklaşılmasına rağmen kaydedilen hava şoku değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Ancak, 22. atımdan itibaren tekrar kapak kullanımına geçilmesi ile hava şoku değerlerinin tekrar düşmeye başladığı görülmektedir. Bu durum kapak kullanımının branda kullanımına göre hava şokunu azaltmada daha etkili olduğunu göstermektedir.

5 SONUÇLAR

KRP Otoyol İnşaatı Adi Ortaklığı İşletmesi'nin yüklenicisi bulunduğu "İstanbul İli Sultangazi, Arnavutköy, Eyüp, Çatalca ve Silivri İlçeleri Kuzey Marmara Otoyolu (3. Boyaz Köprüsü Dahil) Projesi Kınalı Odayeri (Bağlantı Yolları Dahil) 1. Kesim (0+000 40+370), 2. Kesim (40+370 – 58+013), 7. Kesim (61+117 – 71+244) İnşaatı" işi kapsamında, 7. Kesim (61+117 – 71+244) Cebeci Tüneli'ne ait Şaft 2 Bölgesindeki Tünel kazılarında yapılan ölçüm sonuçları ve analizlere göre, gerek Şaft 2 girişine yakın gerekse Şaft 2 girişine uzak mesafelerdeki aynalarda, elektronik kapsül kullanılarak yapılan patlatmalarda kaydedilen gürültü ve hava şoku değerlerinin, elektriksiz kapsül kullanılarak yapılan patlatmalarda kaydedilen hava şoku değerlerine göre daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Özellikle de şaft girişlerine yakın aynalarda elektronik kapsül tercih edilmesi hava şoku değerlerinin hasar sınır değerinin altında kalması ve hava şoku etkisinin kontrol altında tutulması açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışma ile şehir içi patlatmalı tünel kazılarında, şaft üzerinde izolasyonlu veya izolasyonsuz kapak kullanımının gürültü ve hava şokunu minimize etmekte çok önemli katkıları olduğu anlaşılmıştır. Atımlarda şaft üzerinde kapak kullanımı yerine branda kullanımına geçildiği zaman hava şoku değerlerinin tekrar yükselmeye başladığı, ardından tekrar kapak kullanımına geçildiğinde hava şoku değerlerinin tekrar düşmeye başladığı anlaşılmaktadır. Bu durum kapak kullanımının branda kullanımına göre hava şokunu azaltmada daha etkili olduğunu göstermektedir. Şaft üzerinde izolasyonlu veya izolasyonsuz kapak ve de branda kullanımının gürültü ve hava şokunu minimize etmekte çok önemli katkıları olduğu anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

Kahriman, A. 2004. *Patlatma Mühendisliği Seminer Notu*, İ.Ü. Araştırma ve Yardımlaşma Vakfı, İstanbul

Kalaycı, Ü., Özer, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C. 2013. Beylerbeyi-Küçüksu Atık Su Tünelinde Patlatma Kaynaklı Titreşim Analizi, *VII. Delme Patlatma Sempozyumu*, 1-4 Kasım, Cilt.1, Ss.117-124, Eskişehir, Türkiye.

Kalaycı, Ü., Özer, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C., 2013. Patlatma Performansının Kombine Yöntemlerle Belirlenmesi, *VII. Delme Patlatma Sempozyumu*, 7-8 Kasım, Cilt.1, Ss.161-170, Eskişehir, Türkiye.

KRP, 2016. *KRP Otoyol İnşaatı Adi Ortaklığı İşletmesi Patlatma Sahaları Genel Jeoloji Değerlendirme Raporu*, KRP Otoyol İnşaatı Adi Ortaklığı İşletmesi Kalite Kontrol Birimi, 2016.

Özer, Ü. 2008. Environmental impacts of ground vibration induced by blasting at different rock units on the Kadikoy-Kartal metro tunnel, *Engineering Geology*, Vol.100, pp.82-90.

Ozer, U., Karadogan, A., Kalayci, U., Güçlücan, Z., Akgül, M. 2012. The Effect of Delay Time Sequence and Charge Per Delay on Ground Vibration:a Case Study, *Rock Fragmentation By Blasting, Fragblast 10*, 26-29 November, Vol.1, pp.207-211, India.

Özer, Ü., Kalayci Şahinoğlu, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C., Sertabipoğlu, Z. 2017. Ön Kesme Patlatmalarında Ateşleme Sırası İle Ayna Hasarı Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi, 9 Delme Patlatma Sempozyumu, 1-2 Aralık 2017, Vol.1, Pp.96-100, Ankara, Türkiye.

Özer, Ü., Kalaycı Şahinoğlu, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C. 2016. Kentsel Alanda Patlatmalı Kazılarda Proje Adımları, 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, 13-14 Ekim 2016, Vol.1, Pp.162-170, Kütahya, Türkiye.

Özer, Ü., Karadoğan, A., Sertabipoğlu, Z., Kalaycı, Ü., Özyurt, M.C. 2017. İstanbul İli Sultangazi, Arnavutköy, Eyüp, Çatalca ve Silivri İlçeleri Kuzey Marmara Otoyolu (3.Boğaz Köprüsü Dahil) Projesi Kınalı Odayeri (Bağlantı Yolları Dahil) 1. Kesim (0+000 – 40+370), 2. Kesim

(40+370 – 58+013), 7. Kesim (61+117 – 71+244) İnşaatı İşi Kapsamında Patlatmalı Kazı Çalışmalarında Patlatma Kaynaklı Titreşim ve Hava Şoku Ölçümü ve Değerlendirilmesi", Döner Sermaye Projesi (Devam ediyor), İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, İstanbul.

Özer, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C. 2015. *İstanbul İli Maltepe İlçesi 2775 Ada 9 Parselde Gerçekleştirilen Küçükyalı Alışveriş Merkezi ve Otel Projesi İşi Kapsamında Patlatmalı Temel Kazısı Çalışmalarından Kaynaklanan Titreşim ve Hava Şoku Ölçümlerinin Değerlendirilmesi*", Döner Sermaye Projesi, İstanbul Üniversitesi, 12.02.2015 - 74933216-939.02/45674, İstanbul.

Özyurt, M.C., Özer, Ü., Karadoğan, A., Kalaycı Şahinoğlu, Ü. 2016. Betonarme Bir Binanın Patlayıcı İle Yıkılması ve Veriminin İncelenmesi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, cilt.21, ss.43-64.

Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W., Dowding, C.H. 1989. *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting*, Report of Investigations 8507, United States Department of the Interior, Bureau of Mines, 1989.

Yurttaş, M., Özkul, O. Bayındır, O., Atlıhan, U. 2015. Kartal Meeting Point Projesinde Uygulanan Patlatmalı Temel Kazısında Elektronik Kapsül Kullanımının Hava Şoku, Sarsıntı ve Verimlilik Açısından İncelenmesi, *VIII. Delme Patlatma Sempozyumu*, İstanbul.

Kuzey Marmara Otoyolu, Cebeci Tüneli Patlatmalı Kazısında Gecikme Aralığının Parça Boyut Dağılımı ve İlerleme Üzerine Etkisinin Analizi

Analysis of the Effect of Delay Time on Particle Size Distribution and Advance of the Northern Marmara Highway, Cebeci Tunnel Excavated by Explosive

A. Karadoğan, Ü. Özer, K. Yıldırım, M.C. Özyurt, Z. Sertabipoğlu
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fak., Maden Müh. Bölümü, Avcılar-İstanbul

Ü.K. Şahinoğlu
Dr. Maden Müh., Esenyurt-İstanbul

O. Özkul, O. Bayındır, M. Yurttaş
Orica Nitro Patlayıcı Mad. San. ve Tic. A.Ş., Ankara

İ. Sefer, C. B. Zaif, A. Durdu, A. Kişi, M. K. Günay, H. Karaoğlan
Kalyon-RSY, Kuzey Marmara Otoyolu, İstanbul

İ. Çevik, S. Şireci, S. Şahin, E. Kanlıçay
Sargın İnşaat, İstanbul

ÖZET Bu çalışmada, "Kuzey Marmara Otoyolu İnşaatı" işi kapsamında Cebeci Tüneli inşaatı patlatmalı kazılarında, ateşleme zamanının parça boyut dağılımı ve ilerleme miktarı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, söz konusu tünel kazılarında elektronik kapsüller kullanılarak farklı gecikme aralıkları ile 7 adet patlatma yapılmıştır. Patlatma sonucu oluşan yığınlardan dijital görüntüler alınmış ve görüntü işleme tekniği ile parça boyut dağılımları analiz edilmiştir. Ayrıca her patlatmada ilerleme miktarları ölçülmüştür.

Araştırma sonucu elde edilen veriler ışığında, tünel inşaatında çevresel etkileri minimize edecek, uygun parça boyutu ve ilerleme miktarı verebilen, ardışık işlemleri kolaylaştırabilen uygun ateşleme zamanı ile patlatma tasarımlarının yapılabileceği ve patlatma veriminin arttırılabileceği ortaya konulmuştur.

ABSTRACT In this study, effects of delay time on the particle size distribution and unit advance in the blasting excavations of the Cebeci Tunnel construction within the scope of "Northern Marmara Highway Construction" work was investigated. For this purpose, 7 blasting operations by using electronic capsules with different delay times were performed. Digital images were obtained from the muck piles and particle size distributions were analyzed by using digital image processing technique. In addition, the unit advance was measured for each blasting.

It was demonstrated that in the data obtained from the research, blasting designs, which could minimize the environmental effects, provide appropriate particle size and unit advance, facilitate sequential operations in tunnel construction and blasting efficiency could be improved with appropriate delay time.

1 GİRİŞ

Kayanın fiziksel özelliklerine bağlı olarak patlatmalı kazının kaçınılmaz olduğu tünelcilik çalışmalarında patlatma sonuçlarının tüm tünel açma işlemlerine önemli etkileri bulunmaktadır. Kayanın ve tünel güzergâhının jeolojik yapısı gereği mekanik kazının yapılamadığı yerlerde patlatmalı kazı yöntemi uygulanmaktadır (Kahriman 2004, Özer 2008, Özer vd. 2012, Kalaycı vd. 2013).

Patlatmalı kazı yöntemi tünelcilik faaliyetlerinde daha sonraki üretim işlemlerini etkilemektedir. Bundan dolayı patlatma yönteminin ve parametrelerinin tünel güzergahının jeolojik yapısına göre dizayn edilmesi gerekmektedir. Verimli bir patlatmadan beklenen; arzu edilen parça boyut dağılımına sahip, homojen ve iyi ötelenmiş bir yığın elde edilmesi, kaya fırlaması, titreşim ve hava şoku gibi çevresel etkilerin zarar verebilecek seviyelerin altında olmasıdır (Kahriman 2004, Özer 2008, Özer vd. 2012, Kalaycı vd. 2013, Kalaycı vd. 2013, Özer vd. 2016, Özer vd. 2017).

Patlatma sonuçlarının arzu edilen ölçülerde olabilmesi için belli başlı parametrelerin patlatma üzerindeki etkisi tartışılmazdır. Optimum bir patlatma tasarımı yapabilmek için öncelikle patlatma olayında etkili olan parametreleri iyi bilmek gerekmektedir. Patlatma olayında etkili olan parametreleri, kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen parametreler olmak üzere iki grupta incelemek mümkündür (Kahriman, 2004).

Sahanın jeolojisi, patlayıcı madde özellikleri ve patlatma geometrisinin uygun bir modelde tasarlanması gerekmektedir. Patlatma, kaya parçalanmasında en önemli etken olup denetleyemediğimiz değişken ise sahanın jeolojisidir. Patlatma tasarımı ve patlayıcı madde kullanım özelliklerinin değiştirilmesi ile uygun bir patlatma sonucu elde edilebilir. Patlatma tasarımında özgül şarj ve dilim kalınlığı parametrelerinin saha yapısına ve istenilen patlatma sonuçlarına uygun olarak dizayn edilmesi verimli bir patlatma sonucuna ulaşmamızı sağlar. Patlatma sonrası hedeflenen sonuçlara ulaşabilmek için çalışılan sahaya uygun patlatma tasarımlarının yapılması ve bu tasarımların düzgün bir şekilde uygulanması çok önemlidir (Özkahraman 1994, Kahriman ve Ceylanoğlu 1996, Kanchibotla 2003, Kahriman 2004, Özer vd. 2006, Özdemir vd. 2007, Kalaycı 2011).

Patlatma verimliliği, patlatma öncesi ve sonrası birtakım gözlem ve ölçüm çalışmaları sonucu saptanır (Kalaycı vd., 2013). Teknolojinin gelişimiyle, bu alanda kullanılan ekipmanlar ve uygulanan metotlar da artmıştır. Özellikle lazer ve dijital görüntü işleme alanındaki gelişmeler patlatma çalışmalarının başarısına son yıllarda büyük katkılar sağlamıştır. Dijital görüntü işleme tekniği ile patlatma sonrası oluşan yığının parça boyut dağılımı tespit edilebilmektedir (Kemeny 1994, Girdner vd. 1996, Bobo 2001, Split-Engineering LLC 2001, Kemeny vd. 2001, Özdemir 2004, Kahriman vd. 2005, Özdemir 2009).

2 ÇALIŞMA SAHASI

KRP Otoyol İnşaatı Adi Ortaklığı Ticari İşletmesi tarafından Kuzey Marmara Otoyolu (3. Boğaz Köprüsü Dahil) Projesi Kınalı-Odayeri (Bağlantı yolları dahil) Kesimi kapsamında İstanbul İli Silivri ilçesi Kınalı ile Arnavutköy Odayeri (KM 0+000 - 58+013) arasında ve Sultangazi ilçesi Gazi Mahallesi Cebeci Taş Ocakları ile Habipler mevkileri arasında (KM 61+117 - 71+244) inşa edilmektedir.

Şekil 1. Patlatmalı kazı bölgelerini gösterir uydu görüntüsü

Söz konusu çalışma sahasında Trakya Formasyonu hakimdir. Trakya formasyonu,

kumtaşı-kiltaşı-silttaşı-şeyl ardalanmasından oluşur. Yer yer kanal dolgusu tipinde orta boyda polijenik konglomera ve kuvars konglomera seviyeli, ince-kalın katmanlı, Cebeciköy kalkerleri ile dereceli geçişli, çürüme rengi koyu sarımsı kahve, taze yüzeyi glokoni ve siyah mineraller ile gri-yeşilimsi gri, yeşilimsi sarı, grimsi mavi, siyahımsı gri renkli çamurtaşı mercekli, çalkantılı bir akıntıyla oluşmuş türbiditik çökellerdir. Formasyonu 10-20 cm ile 1-2 m arasında ve tekçe 30-40 m kalınlıkta, kirli sarımsı kahve renkli, genellikle çok ayrışmış, bozuşmuş andezit ile taze yüzeyleri açık mavimsi yeşilimsi gri renkli, diyabaz daykları kesmektedir. Dayklar, genelde fay, eklem ve kırık düzlemlerine paralel sokulmuşlardır (KRP, 2016).

3 YÖNTEM

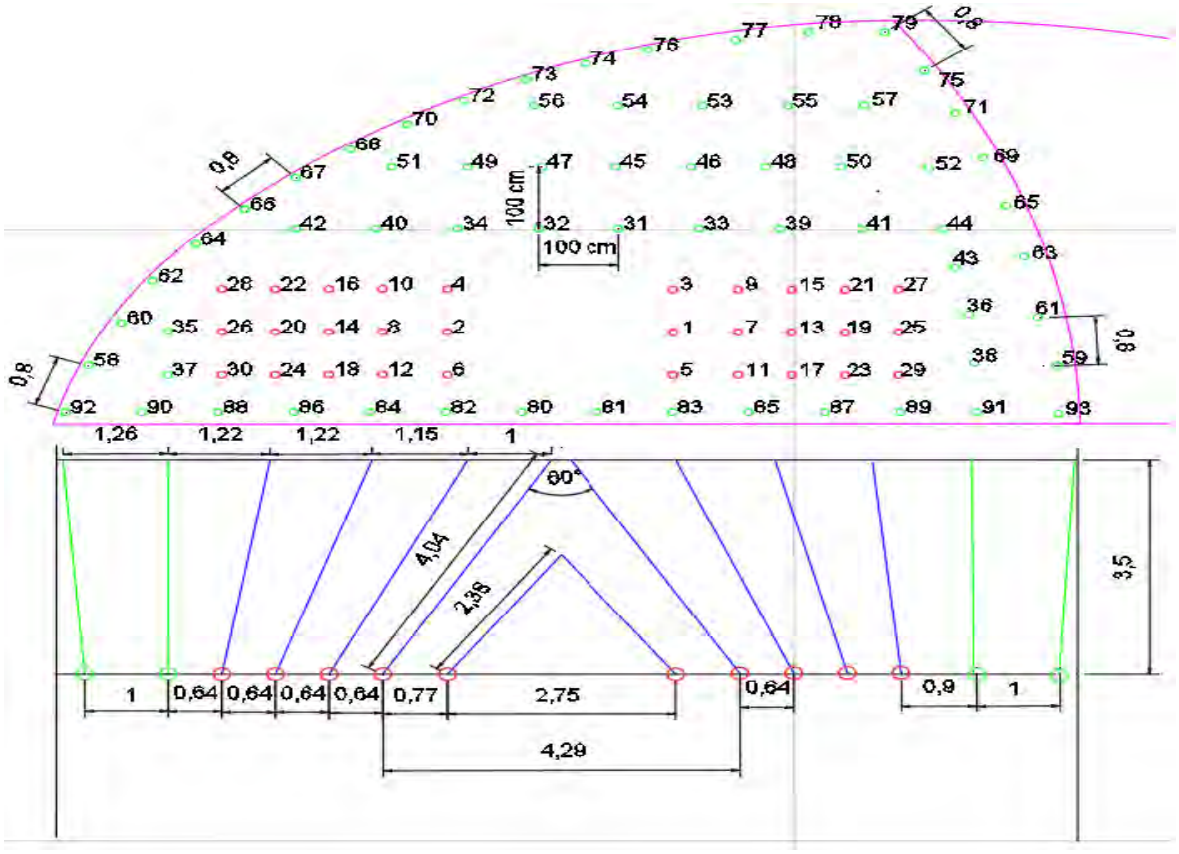
Bu çalışma kapsamında; söz konusu tünel güzergâhında ve benzer kaya kütlesi özelliklerine sahip sol tüp ileri ayna ve sağ tüp ileri aynada, elektronik kapsüller ile farklı zaman aralıklarında patlatmalar planlanmış ve patlatmalar sonucunda dijital görüntüler alınmış ve parça boyut dağılımları analiz edilmiştir. Ayrıca, her atımda ilerleme miktarı ölçülmüştür.

Patlatmalar sonucunda alınmış dijital görüntüler, dijital görüntü işleme yöntemi ile analiz edilmiş ve oluşan yığının parça boyutu dağılımı ortaya konmuştur. Çalışma sonucunda, gecikme aralığı ile parça boyut dağılımı ve ilerleme miktarı üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır.

4 BULGULAR

4.1 Patlatma Tasarımı

Bu çalışma kapsamında; benzer kaya kütlesi özelliklerine sahip, 60 m^2'lik tünel kesitlerinde (Sol tüp ileri ayna ve sağ tüp ileri ayna) toplam 7 adet patlatma planlanmıştır. İlgili patlatmalarda, aynı patlatma paterni (Şekil 2), farklı gecikme aralıkları ile uygulanmıştır (Çiz. 1).



Şekil 2. V-Cut patlatma tasarımı

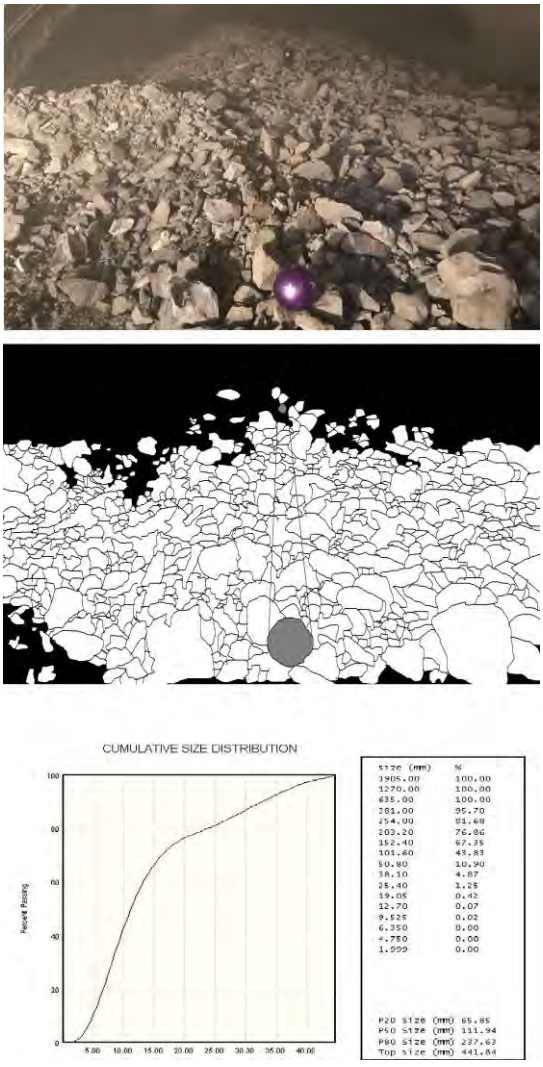
Çizelge 1. Patlatma tasarımları

Atım No	Ayna	Atım Tarihi	Delik Adedi	Toplam Şarj (kg)	Gecikme Başına Düşen Maksimum Şarj	Gecikme Aralığı (ms)	Delik Boyu (m)
1	Sağ Tüp İleri	25.1.2018	93	200	3,27	17	2,5
2	Sol Tüp İleri	27.1.2018	93	200	3,27	25	2,5
3	Sol Tüp İleri	29.1.2018	93	200	3,27	17	2,5
4	Sağ Tüp İleri	7.5.2018	93	200	3,27	17	2,5
5	Sağ Tüp İleri	7.5.2018	93	200	3,27	17	2,5
6	Sağ Tüp İleri	7.5.2018	93	200	3,27	25	2,5
7	Sol Tüp İleri	7.5.2018	93	200	3,27	33	2,5

4.2 Parça Boyut Dağılımı

Bu çalışma kapsamında izlenen 7 atım için patlatma sonucu açığa çıkan yığından fotoğraflar alınmıştır. Bu fotoğraflar bir dijital görüntü işleme programında (Split Desktop) işlenerek, yığının parça boyut dağılımı belirlenmiştir.

4 No'lu atım sonucu oluşan yığından alınan fotoğrafın dijital görüntü işleme prosesi Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. 4 No'lu atımın parça boyut analizi

Bu çalışma kapsamında izlenen 7 atıma ait parça boyutu analizi sonuçları Çizelge 2'de özetlenmiştir.

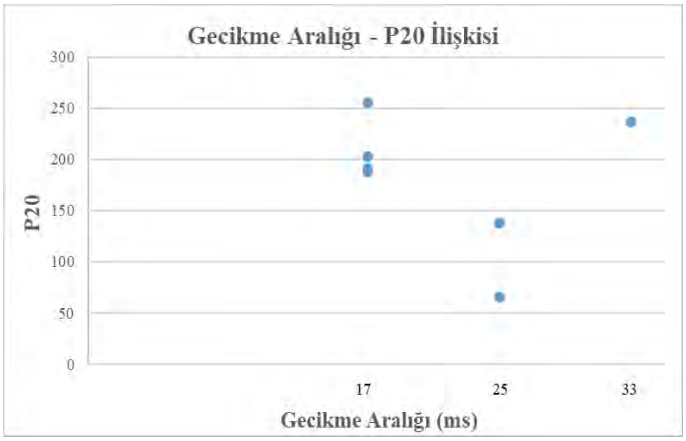
Çizelge 2. İzlenen atımlarda uygulanan gecikme aralıkları ve parça boyutu dağılımları

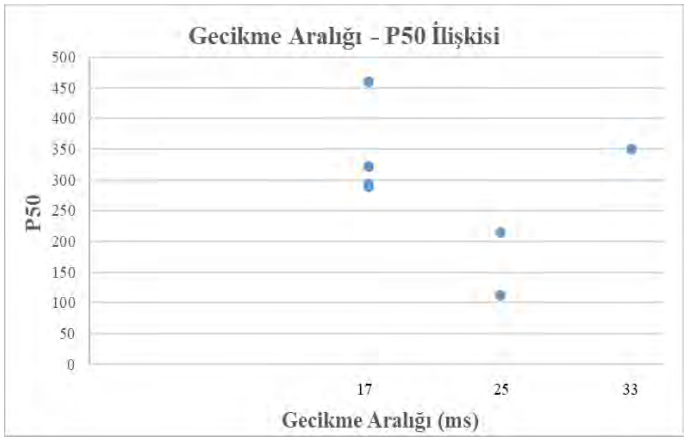
Atım No	P20	P50	P80	P100
1	191,35	293,17	468,79	987,67
2	138,07	215,31	314,51	490,03
3	202,47	289,33	455,69	923,24
4	255,56	460,28	603	815,4
5	187,52	321,24	505,09	880,92
6	65,85	111,94	237,63	441,84
7	236,77	349,97	480,74	670,04

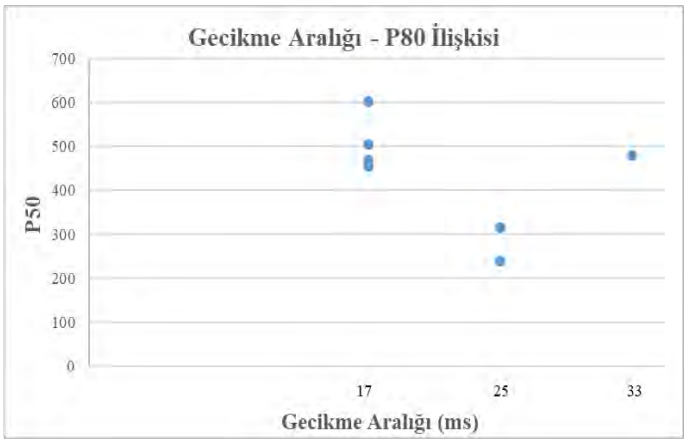
4.3 Gecikme Aralığı ile Parça Boyut Dağılımı Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

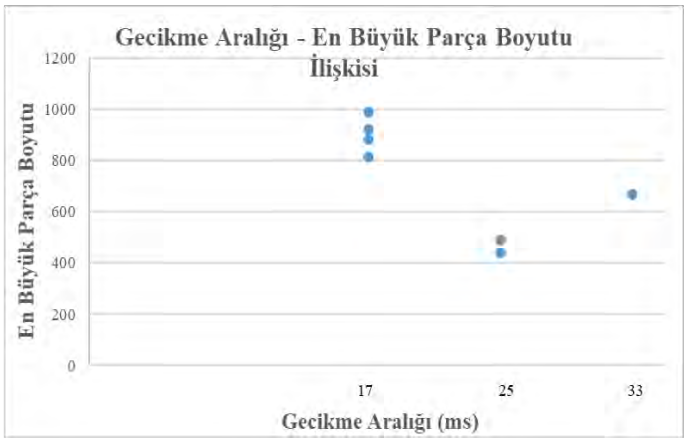
Bu çalışma kapsamında izlenen atımlarda oluşan yığının parça boyutu dağılımları ile gecikme aralığı arasındaki ilişki incelenmiştir (Şekil 4). Buna göre; 25 ms gecikme aralıkları ile yapılan patlatmalarda meydana gelen parçalanma seviyesinin diğer gecikme aralıkları ile yapılan patlatmalara göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. En düşük parçalanma ise gecikme aralığının 17 ms olduğu patlatmalarda meydana gelmiştir.

Şekil 4'te de görüldüğü üzere; gecikme aralığının artması ile parçalanma seviyesi artar veya azalır gibi bir genellemenin yanlış olduğu, istenilen parça boyut dağılımının elde edebilmesinin optimum gecikme aralığının belirlenmesine bağlı olduğu anlaşılmıştır.









Şekil 4. Gecikme aralığı ile parça boyutu arasındaki ilişkisi

4.4 Gecikme Aralığı ile Parça Boyut Dağılımı Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında izlenen atımlarda meydana gelen ilerleme miktarı topografik cihazlar vasıtasıyla ölçülmüştür (Çiz. 3). Buna göre; ilerleme miktarının 25 ms gecikme aralıkları ile yapılan patlatmalarda, diğer gecikme aralıkları ile yapılan patlatmalara göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 3. İzlenen atımlarda uygulanan gecikme aralıkları ve ilerleme miktarları

Atım No	İlerleme Miktarı (m)
1	2,3
2	2,45
3	2,4
4	2,2
5	2,3
6	2,5
7	2,3

5 SONUÇLAR

Dijital görüntü işleme tekniği ile belirlenmiş parça boyutu dağılımları ile gecikme aralıkları arasındaki ilişki incelenmiştir. 25 ms gecikme aralıkları ile yapılan patlatmalarda meydana gelen parçalanma seviyesinin diğer gecikme aralıkları ile yapılan patlatmalara göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Parçalanma seviyesinin en düşük olduğu patlatmalar ise gecikme aralığının 17 ms olduğu uygulamalardır.

Ayrıca, ilerleme miktarının 25 ms gecikme aralıkları ile yapılan patlatmalarda, diğer gecikme aralıkları ile yapılan patlatmalara göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.

Bu çalışma ile, gecikme aralığının artması ile ilerleme miktarı ve parçalanma seviyesi artar veya azalır gibi bir genellemenin yanlış olduğu, istenilen parça boyut dağılımının elde edebilmesinin optimum gecikme aralığının belirlenmesine bağlı olduğu anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

Bobo, T. 2001. What's New With The Digital İmage Analysis Software Splitdesktop?, 2001 High Tech Seminar - Blasting Technology, Instrumentation And Explosive Applications, Nashville, Tn Usa, July 22-26, 2001, pp. X1-9.

Girdner, K, Kemeny, J., Srikant, A., And Mcgill R. 1996. The Split System For Analyzing The Size Distribution Of Fragmented Rock, *Proceedings Of The Fragblast-5 Workshop On Measurement Of Blast Fragmentation (Franklin, J. And T. Katsabanis, Eds.),* Montreal, Quebec, Canada, Pp. 101-108.

Kahriman, A. 2004. *Patlatma Mühendisliği Seminer Notu*, İ.Ü. Araştırma ve Yardımlaşma Vakfı, İstanbul.

Kahriman, A., Ceylanoglu, A. 1996. Blast Design And Optimization Studies For A Celestite Open-Pit Mine İn Turkey, Mineral Resources Engineering, Vol. 5, No.2, pp. 93106.

Kahriman, A., Tuncer, G., Karadoğan, A., Özdemir, K. 2005. Kuz – Ram And Digital Image Processing System Combination To Determine Spesific Blasting Parameters, *Proceedings Of The Thirty – First Annual Conference On Explosives And Blasting Technique*, 6 – 9 February, Orlando, Florida, USA., Volume I, pp. 399 – 407.

Kalaycı, U. 2011. *Patlatmada Harcanan Faydalı Enerji İle Patlatma Verimi Arasındaki İlişkinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Ağustos, İstanbul.

Kalaycı, Ü., Özer, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C. 2013. Beylerbeyi-Küçüksu Atık Su Tünelinde Patlatma Kaynaklı Titreşim Analizi, *VII. Delme Patlatma Sempozyumu*, 1-4 Kasım, Cilt.1, Ss.117-124, Eskişehir, Türkiye.

Kalaycı, Ü., Özer, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C. 2013. Patlatma Performansının Kombine Yöntemlerle Belirlenmesi, *VII. Delme Patlatma Sempozyumu*, 7-8 Kasım, Cilt.1, Ss.161-170, Eskişehir, Türkiye.

Kanchibotla, S.S. 2003. Optimum Blasting? Is it minimum cost per broken rock or maximum value per broken rock, *Fragblast*, 2003, Vol. 7, No. 1, Pp. 35-48

Kemeny, J. 1994. A Practical Technique For Determining The Size Distribution Of Blasted Benches, *Waste Dumps, And Heap-Leach Sites, Mining Engineering*, Vol. 46, No. 11, Pp. 1281-1284

Kemeny, J., Mofya, E., Kaunda, R., Perry, G., Morin, B. 2001. Improvements İn Blast Fragmentation Models Using Digital İmage Processing, *Proceedings Of The 38th Rock Mechanics Symposium*, Washington, D.C., Usa.

KRP, 2016. *KRP Otoyol İnşaatı Adi Ortaklığı İşletmesi Patlatma Sahaları Genel Jeoloji Değerlendirme Raporu*, KRP Otoyol İnşaatı Adi Ortaklığı İşletmesi Kalite Kontrol Birimi, 2016.

Özdemir, K. 2004. *Dijital Görünü İşleme Tekniği İle Patlatma Verimlilik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.

Özdemir, K. 2009. *Basamak Patlatmasında Parça Boyut Dağılımının Ardışık İşlem Faaliyetlerine Olan Etkilerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi.

Özdemir, K., Kahriman, A., Özer, U., Tuncer, G. 2007. Bench Blasting Optimization Method Depending On Desired Fragmentation, *7th International Conference: Modern Management Of Mine Producing Geology And Environment Protection*, 11-15 June, Albena Resort, Varna, Bulgaria.

Özer, Ü., Karadoğan, A., Sertabipoğlu, Z., Kalaycı, Ü., Özyurt, M.C. 2017. *İstanbul İli Sultangazi, Arnavutköy, Eyüp, Çatalca ve Silivri İlçeleri Kuzey Marmara Otoyolu (3.Boğaz Köprüsü Dahil) Projesi Kınalı Odayeri (Bağlantı Yolları Dahil) 1. Kesim (0+000 – 40+370), 2. Kesim (40+370 – 58+013), 7. Kesim (61+117 – 71+244) İnşaatı İşi Kapsamında Patlatmalı Kazı Çalışmalarında Patlatma Kaynaklı Titreşim ve Hava Şoku Ölçümü ve Değerlendirilmesi", Döner Sermaye Projesi (Devam ediyor)*, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, İstanbul.

Özer, Ü. 2008. Environmental impacts of ground vibration induced by blasting at different rock units on the Kadikoy-Kartal metro tunnel, *Engineering Geology*, Vol.100, pp.82-90.

Ozer, U., Karadogan, A., Kalayci, U., Güçlücan, Z. , Akgül, M. 2012. The Effect of Delay Time Sequence and Charge Per Delay on Ground Vibration:a Case Study, *Rock Fragmentation By Blasting, Fragblast 10*, 26-29 November, Vol.1, pp.207-211, India.

Özer, Ü., Kalayci Şahinoğlu, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C., Sertabipoğlu, Z. 2017. Ön Kesme Patlatmalarında Ateşleme Sırası İle Ayna Hasarı Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi, 9 Delme Patlatma Sempozyumu, 1-2 Aralık 2017, Vol.1, Pp.96-100, Ankara, Türkiye.

Özer, Ü., Kalaycı Şahinoğlu, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C. 2016. Kentsel Alanda Patlatmalı

Kazılarda Proje Adımları, 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, 13-14 Ekim 2016, Vol.1, Pp.162-170, Kütahya, Türkiye.

Özkahraman, H.T. 1994. Critical Evaluation Of Blast Design Parameters For Discontinuous Rocks By Slab Blasting, Thesis (Phd.), Middle East Technical University.

Split-Engineering LLC, 2001. Split Desktop Version 2.0 User Manual, Split Engineering, Tucson, Arizona, US.

Özer, U., Özdemir, K., Kahriman, A., Karadoğan., A., Tuncer, G. 2006. The Importance Of Particle Size Distribution After Blasting And Arrangement Studies On This Basis, *6th International Conference: Modern Management Of Mine Producing Geology And Environment Protection*, 12-16 June, Albena Resort, Varna, Bulgaria, 2006, Pp: 43 – 52.

Kuyu Açma ve Delme

Shaft Sinking and Raise Boring

Balya Kurşun-Çinko Madeninde Kullanılan Başyukarı Delme Makinesinin (BDM) Performans Değerlendirmesi

Performance Evaluation of Raise Boring Machine (RBM) used in Balya Lead-Zinc Mine

T. Erdoğan
Sargın İnşaat ve Makine Sanayi Ticaret A.Ş., Ankara

E. Doğan
Eczacıbaşı Esan, Balıkesir

A. Shaterpour-Mamaghani, H. Çopur
İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET Geçmişte dikey ya da eğimli kuyular, delme-patlatma yoluyla ya da insan gücüyle açılırken, günümüzde, madencilik ve tünelcilik sektöründe bu iş için geliştirilmiş özel amaçlı makineler kullanılmaktadır. Başyukarı Delme Makinesi (BDM) bu makinelerden biridir. Türkiye'de bu makineler son dönemde, havalandırma veya diğer amaçlı kuyuların kazısında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. BDM'lerin kullanıldığı işletmelerden birisi de Balıkesir'in Balya ilçesinde bulunan Eczacıbaşı Esan Kurşun – Çinko yeraltı madenidir. Bu madende 2013 yılından günümüze kadar bir BDM ile beş adet havalandırma kuyusu açılmıştır. Bu bildiride, Esan Kurşun – Çinko madeninde kullanılan BDM'nin iki kuyunun açılması esnasındaki performansı (günlük ilerleme, itme / çekme kuvvetleri, kesici kafanın tork ve dönme hızları vd.) özetlenmiştir. Açılan kuyuların kılavuz delgi çapları 0,311 m ve genişletme çapları 2,44 m'dir. Kuyuların uzunlukları (derinlikleri) ise yaklaşık 200 m'dir. Değerlendirmeler jeolojik / jeoteknik parametrelerinin makinenin genel performansında daha etkin olduğunu göstermiştir. Ayrıca, birinci kuyunun delme / kazı işleminde performans değerleri daha optimal olmuştur.

ABSTRACT Vertical or inclined shafts were excavated by drilling-blasting or manual methods in the past; however, nowadays special-purpose machines developed for this work are used in the mining and tunneling sectors. Raise Boring Machine (RBM) is one these machines. In recent years, these machines have been widely used for excavation of ventilation or other purpose shafts in Turkey. Eczacıbaşı Esan lead-zinc underground mine located in Balya district of Balıkesir city is one of these projects. In this mine, five ventilation shafts have been excavated with a RBM since 2013. In this study, the performance (daily advance, pushing / pulling force, consumed reamerhead torque and rotational speed, etc.) of the RBM operation during excavation of two shafts in Esan lead-zinc mine are summarized. The pilot drilling and reaming diameters of these shafts are 0.311 m and 2.44 m, respectively. The lengths (depths) of the shafts are about 200 m. The evaluation shows that the geological / geotechnical parameters are more effective in the overall performance of the machine. In addition, the performance values of drilling / excavation operation of the first shaft are more optimal.

1 GİRİŞ

Günümüzde mekanik kazı, madencilik ve tünel endüstrisinde konvansiyonel delme ve patlama yöntemine güçlü bir alternatif olarak önemli bir rol oynamaktadır. Hızlı teknolojik gelişmeler sonucu, madencilik ve inşaat projelerinde kullanılmak üzere birçok kazı makinesi tasarlanmıştır. Mekanize kazı makinelerinin tasarımı, seçimi, performans tahmini ve optimizasyonu, madencilik ve tünel projelerinin fizibilite ve planlama aşamalarında, önemli konulardandır.

Başyukarı Delme Makineleri (BDM) bu mekanize kazı makinelerden biri olarak hızlı, güvenli ve verimli delme / kazma makineleri olarak madencilik ve tünel projelerinde özellikle dikey veya eğimli kuyu ve galeri açmak için kullanılmaktadır. Klasik başyukarı delme yönteminde, kuyunun hem üst hem de alt konumlarına erişim, bir ön şarttır. BDM, bir yeraltı delme işine, 254 mm (standart rod) ve 311 mm (stabilizer) çaplı rodlarla aşağı doğru şekilde delerek başlamaktadır. Bu deliğe kılavuz (pilot) delgi denilmektedir. Kılavuz delik açıldıktan sonra, pilot matkap ucu çıkarılır ve büyük çaplı bir genişletici ile değiştirilir. Genişletici kafa daha sonra üst seviyeye geri çekilerek dairesel bir açıklık oluşturur. Bu yöntem ile açılan kuyularda, genel olarak, genişletme işi bittikten sonra, oluşan kazı yüzeyi tahkimat yapmak için uygun bir şekilde tamamlanmaktadır. Kılavuz delgi işleminde çıkan pasalar, kuyunun dibinden, basınçlı suyun fışkırma (flushing) etkisi ile temizlenmektedir. Bununla birlikte, genişletme aşamasında ise, kazılan malzeme, yer çekimi ile açılan kuyunun tabanına düşer ve oradan geleneksel yöntemlerle, yükleyici kullanılarak taşınır. Güvenlik açısından pasa yükleme ve nakli BDM çalışmadığı anlarda yapılır.

Başyukarı delme işleri saha hazırlığı ile başlar. Makinenin konulacağı yer (temel) makine vder ünitelerin boyutlarına göre betonlanır. Sonra BDM kaya civatalarıyla, betonlanmış temele sabitlenir. Güç ve hidrolik ünitelerin sahaya taşınmasından sonra, BDM kılavuz delik delme için hazırlanmış duruma getirilir. Bu aşamada, su ihtiyacını karşılamak için, ihtiyacı karşılayacak kapasitede su tankı ve geri dönüş suyu için çökelme havuzu hazırlanır. Besleme tankından pompayla alınarak makinenin delici rodları içinden geçen su, kuyu dibini temizleyerek daha verimli delme işi yapılmasında yardımcı olur. Çökelme havuzunun büyüklüğü esas olarak delik boyutuna ve çıkan malzemenin yoğunluğuna bağlıdır. Kılavuz delmede, dengeleyici (stabilizer) tijler matkap ucunu desteklemek, salınım ve eğilme gerilmelerini azaltmak için kullanılır. Kılavuz delgisinde, makinenin doğru konumda olması, kuyu dibindeki malzemenin dışarı çıkartılmasında çok önemlidir. Başyukarı delme yöntemi, düz kontrollü delikler elde etmek için genellikle en doğru yöntemlerden biridir. Genişletme (raybalama - tarama) işi düşük bir dönme hızı ve baskı ile kuyu ağzının (collaring) açılması ile başlar (Lislerud ve Vainionpää 1997). Daha sonra operatör, kademeli olarak dönme hızını, uygulanan torku ve net çekme kuvvetini sabit değerler elde edilinceye kadar artırır ve son tijlerde kademeli olarak BDM operasyonel parametrelerini azaltır ve bu sayede kuyu ağzının ani çökmesinin önüne geçer (Shaterpour-Mamaghani ve Bilgin 2016).

Sürekli çalışma, başyukarı delme yönteminde diğer yöntemlere göre daha hızlı bir ilerleme yapılmasını sağlar. BDM'ler, temel olarak masif yapıya sahip sert, orta sert ve yumuşak kayaların kazısı için uygundur. Farklı açı ve çaplardaki esneklik, delme ve patlatma yöntemine kıyasla büyük bir avantajdır. BDM, genellikle kaplama gerektirmeyen düz, örselenmemiş duvarlara sahip bir açıklık oluşturur. BDM ile açılan kuyu, delme ve patlatma yöntemi ile açılan bir kuyudan daha kararlı ve pürüzsüzdür; bu sayede daha iyi bir hava akışına sahiptir, bu da havalandırma amaçlı kuyular için idealdir. Bu yöntem, konvansiyonel delme ve patlatma yöntemine göre birçok avantajı nedeniyle, yeni uygulamalar bulmaya devam etmektedir. Fakat jeolojik süreksizliklerin baskın olduğu jeolojik oluşumlarda birçok sorunla karşılaşılmaktadır. Bu durumlarda, kuyu ömrünü uzatmak amacıyla kuyu duvarlarını desteklemek veya zemini iyileştirmek için yapılması gerekli olan çalışmalara bağlı olarak kuyu açma süresi uzayabilmektedir. Visser (2009), birçok jeolojik süreksizliğe

sahip kaya oluşumlarının, kuyu delme işleminin sona ermesini uzatan risk faktörleri olduğunu belirtmiştir. Bu gibi durumlarda, derin ve / veya büyük çaplı kuyularda McCracken ve Stacey (1989) ayrıntılı bir jeoteknik veya kayaç kalitesi değerlendirmesi önermiştir (Peck ve Lee 2008). Ayrıca, bazı durumlarda montaj ve de-montaj süresi de uzun olabilir.

BDM'lerin ilk tij tasarımı 1962 yılında, Amerikan Robbins firması tarafından yapıldı. O tarihten günümüze bu makineler özellikle madencilik alanında çoğu projede kullanılmıştır. Yazarların bilgisine göre, Türkiye'de 1996-98 yıllarında, bu tip makineler ilk olarak Çayeli yeraltı madeninde iki adet 3,4 m çapında ve 140 m uzunluğunda 70° açı ile havalandırma kuyusu açmak için kullanılmıştır. Ayrıca iki adet 2,4 m çapında, 100 ve 80 m uzunluğunda dolgu kuyusu açılmıştır (Kazım Küçükateş, kişisel görüşme). Sonra bu makineler havalandırma kuyuları açmak için Esan Balya kurşun-çinko yeraltı madeni ve Eti Bakır Aşıköy yeraltı madeninde kullanılmıştır / kullanılmaktadır. Ayrıca bu makine ile Yusufeli HES ve Ambarlık HES projelerinde enerji ve kapak kuyusu açmak için Sargın İnşaat tarafından kullanılmıştır. Bu makinelerin, sağladıkları avantajlar nedeni ile Türkiye'de yakın bir zaman içerisinde özellikle metal madenlerinde ve tünel-inşaat sektöründe daha yaygın olarak kullanılacağı düşünülmektedir.

BDM'lerin kazı performansları esas olarak kayaçların jeolojik-jeoteknik özelliklerine, makinenin özelliklerine ve tasarımına, kesici kafaya uygulanan kuvvet ve dönme hızı gibi operasyonel parametrelere bağlıdır. Günümüzde bu makineler madencilik ve tünelcilikte sıkça kullanılıyor olmalarına rağmen, özellikle performans tahmini ve optimizasyonuna yönelik çalışmalara literatürde çok az rastlanmaktadır.

Morris (1969) yarı deneyimsel bir metotla kesici tüketimi ve kazı hızı tahmini için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, diğer faktörlerle birlikte, uç penetrasyon indeksi de makinenin performans tahmini için kullanılmıştır. Morris'in önerdiği bu modelleri Lightfoot (1970) bir BDM'de uygulamış ve iyi sonuçlar aldığını belirtmiştir. Seiler (1972) bir sphero-konik tungsten karbür ucu düz bir kaya yüzeyine hidrolik olarak bastırarak kazılabilirlik indeksini geliştirdi. Calder (1972) delme çalışmalarından kazı hızını tahmin etmek için deneysel bir model önermiştir. Bu çalışmada, kazı hızı kayanın tek eksenli basınç dayanımı, itme kuvveti ve kuyunun çapıyla ilgilidir. Piggott (1985), yumuşak ve orta dayanımlı formasyonlarda kuyuların daha hızlı ve ucuz delinmesi için bazı öneriler belirtmiştir. Nishimatsu vd. (1987), teorik kavramlar kullanarak kör kuyu açmak için kullanılan bir delme makinesinin, delme verimini arttırmak için çalışmışlardır. Dollinger (1977), BDM'lerde optimum performans elde etmek için makinenin ilerleme hızının ve keski tüketiminin dengelenmesi gerektiğini belirtmiştir. Bilgin (1989), Dollinger vd. (1998) ve Bilgin vd. (2014), uç batırma deneyinden elde edilen penetrasyon indeksinin BDM performans tahmini için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Elgenklow (2003), Robbins 34RH ve 53RH model BDM'lerin Şili'deki El Teniente madeninde performanslarını araştırmıştır. Bu çalışmada, makineden faydalanma oranı sırasıyla % 29.8 ve % 40.3 olarak belirlenmiştir. Ayrıca Everell (1972)'nin söylediği gibi başyukarı delme projelerinde verilen veriler yetersiz olduğundan dolayı, kaya özellikleri ile BDM performans parametrelerini ilişkilendirmek için yapılan girişimler yetersiz kalmıştır.

Ülkemize bu makineler döviz alımı yoluyla geldiği için, projelerin fizibilite çalışmaları için performans tahmini vazgeçilmezdir. Son yıllarda, Türkiye'de bu makinelerin performansıyla ilgili Shaterpour-Mamaghani ve arkadaşları bir sıra çalışmalar yürütmektedirler. Bu çalışmalarda, farklı maden ve tünel projelerinde kullanılan BDM'lerin sahadaki performans-operasyonel verileri toplanarak, laboratuvarda sahadan elde edilen kaya numuneleri üzerinde yapılan fiziksel-mekanik deney sonuçları arasında anlamlı ilişkileri ortaya çıkarmaya çalışmaktalar (Shaterpour-Mamaghani ve Bilgin 2016; Shaterpour-Mamaghani vd. 2016a,b; Shaterpour-Mamaghani vd. 2017).

Türkiye'de bu makineler son dönemde, iş güvenliğini ön planda tutan ve gelişmiş tekniklere yatkın, bir kısım maden ve inşaat

işletmelerinde, havalandırma vder amaçlı kuyuları açmak için kullanılmaya başlamıştır. Bu işletmelerden birisi de Balıkesir'in Balya ilçesinde bulunan Kurşun – Çinko madenidir. Bu madende 2013 yılından günümüze kadar bir BDM ile beş adet havalandırma kuyusu açılmıştır; ilerleyen dönemlerde de açılması planlanmaktadır. Bu bildiride, iki kuyunun açılması için kullanılan BDM'nin performansı (günlük ilerleme, itme / çekme kuvvetleri, kesici kafanın tork ve dönme hızları vd.) özetlenmiştir ve makinenin performansında etkili olan parametreler üç farklı kategoride (mekanik, jeolojik / jeoteknik ve işletmeyle ilgili parametreler) değerlendirilmiştir. Kuyuların kılavuz delgi çapları 0,311 m ve genişletme çapları 2,44 m'dir. Kuyuların uzunlukları (derinlikleri) sırasıyla 198,44 m ve 195,80 m'dir.

2 PROJENİN TANIMI

2.1 Balya Kurşun-Çinko Yeraltı Maden ve Kuyu Projelerine Genel Bakış

Balya yeraltı kurşun-çinko madeni Balikesir ilinde bulunmaktadır (Şek. 1). Eczacıbaşı Esan grubu 2007 yılından beri Balya madenini işletmektedir. Cevher üretimi arakatlı kazı yöntemi ile yapılmaktadır. Madenin ana galerisi olarak % 14,5 eğimli bir rampa, cevher üretim aynasından ana galeriye ulaşım mesafesini en aza indirgemek için kullanılmaktadır. Cevher yatağı genellikle kireçtaşı-dasit kontağında ve kireçtaşının çatlakları arasında oluşmuştur. Yeraltı maden ana galerisi, at nalı şeklinde 6500 m uzunluğunda, 5 m yüksekliğinde ve 5 m genişliğindedir. Paleozoik ve Trias kayaçları, yeniden kristalleşmiş kireçtaşı, meta kumtaşı, meta-killi kumtaşı ve kloritik killi silttaşı ile karakterizedir (Çiftçi vd., 2013).

Şekil 1. Balya kurşun-çinko madeninin yer bulduru

Balya kurşun-çinko madeninin yönetimi, 2013 yılında havalandırma kuyularının açılması için BDM kullanılmasına karar vermiştir. Bu kararın ana nedenleri, BDM ile sağlanacak olan uygun maliyetli, güvenli ve verimli kuyu açma operasyonuydu. Aynı yıl, 197,10 m uzunluğundaki ilk kuyu 38 günde BDM ile açıldı (kılavuz delgi 16 günde ve raybalama / genişletme 22 günde bitmiştir). Bu başarılı operasyondan sonra, maden yönetimi, diğer havalandırma kuyularının açılması için BDM'nin kullanımına devam etmeye karar vermiştir.

2.2 BDM Özellikleri

Bu madende havalandırma kuyularının açılması için Sandvik Rhino 1088 DC model BDM kullanılmıştır. Bu makinenin özellikleri Çizelge 1'de özetlenmiştir. Ayrıca Şekil 2'de BDM, kılavuz delgide kullanılan matkap ve raybalama kafası görülmektedir.

Çizelge 1. Kullanılan BDM'nin özellikleri

Kazı uzunluğu	610 m
Kazı çapı	0,66-2,44 m
İtme kuvveti	4000 kN
Kılavuz torku	300 kNm
Raybalama torku	160 kNm
Kılavuz delgi dönme hızı	0-60 dev/dak
Raybalama dönme hızı	0-21 dev/dak
Güç	400 kVA
Ağırlık (taşıyıcı hariç)	16.500 kg

Şekil 2. a) BDM, b) kılavuz delgi matkabı, c) raybalama kafası

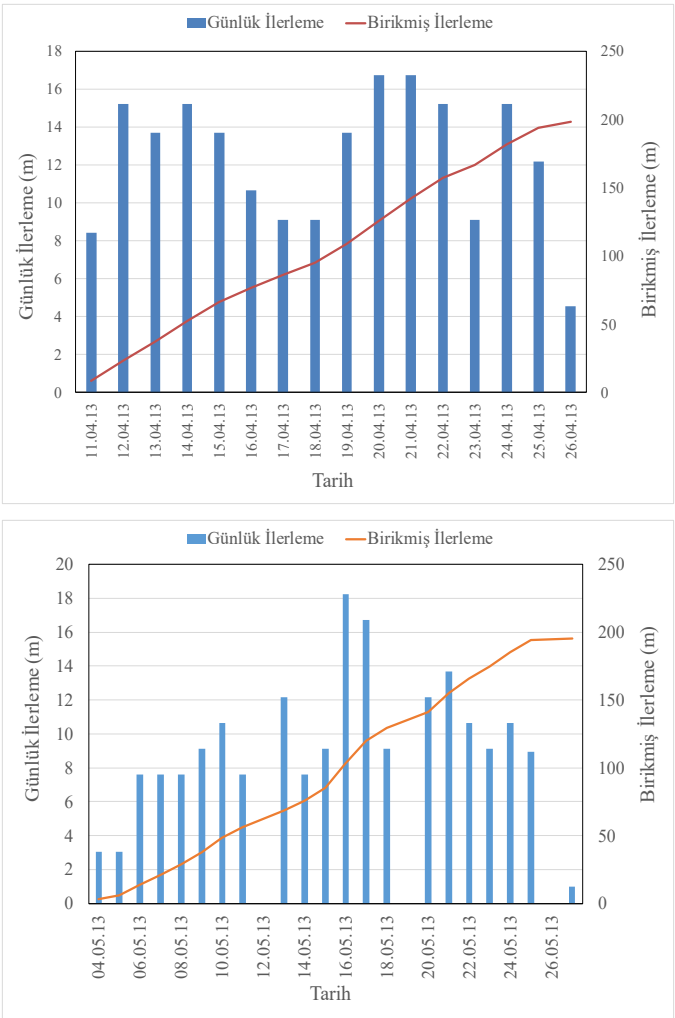
3 SAHA VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Bu çalışma kapsamında, açılan iki kuyunun kılavuz delgi ve raybalama operasyonları incelenmiştir. Birinci kuyunun kılavuz delgisi 11 Nisan 2013 tarihinde başlamış ve 26 Nisan 2013 tarihinde bitmiştir (toplam 16 iş günü). Ayrıca bu kuyunun raybalama işlemi aynı yıl 5 Mayıs'ta başlamış ve 27 Mayıs tarihinde bitmiştir (toplam 21 iş günü). Bu kuyunun toplam uzunluğu 198,44 m'dir. Kılavuz delgi çapı 0,311 m ve genişletme çapı da 2,44 m'dir. Şekil 3'te bu kuyunun kılavuz delgi ve raybalama işlemindeki günlük ve birikmiş (kümülatif) günlük ilerlemeler gösterilmiştir.

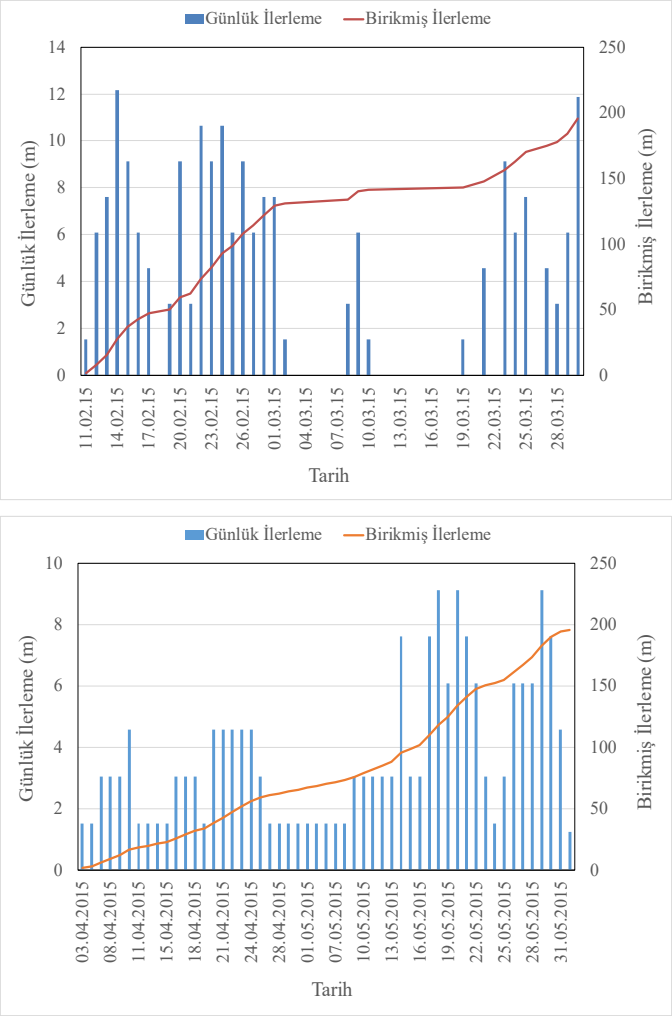
İncelenen ikinci kuyunun kılavuz delgisi 11 Şubat 2015 tarihinde başlamış ve toplam 31 iş günü sonrasında, 30 Mart 2015 tarihinde bitmiştir. Sonra raybalama işlemi 3 Nisan 2015'de başlamış ve 1 Haziran 2015'de bitmiştir (toplam 53 iş günü). Bu kuyunun toplam uzunluğu 195,80 metredir. Kılavuz delgi çapı 0,311 m ve genişletme çapı da 2,44 m'dir. Şekil 4'te bu kuyun kılavuz delgi ve raybalama işlemindeki günlük ve birikmiş günlük ilerlemeler görülmektedir.

Saha incelemeleri sırasında elde edilen sağlam kaya örneklerini karakterize etmek için bir dizi laboratuvar deneyi yapılmıştır. Bu kayaç örnekleri, kuyuların açıldığı yere en yakın olan sondajlardan alınmıştır. Laboratuvarda tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı deneyleri Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmıştır (ISRM 2007).

Bu kuyuların delme/kazı işlemi genel olarak kireçtaşı, dasit, andezit ve metasedimanter kayaçlarda yapılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında bu kayaçların tek eksenli basınç dayanımları 50-120 MPa arsında değişiklik göstermiştir. Ayrıca dolaylı çekme dayanımları da 5-11 MPa arsında değişmiştir. Statik elastisite değerleri ise 11-31 GPa; statik Poisson oranları da 0,11-0,23 arsında değişmiştir.



Şekil 3. Birinci kuyu günlük ve birikmiş ilerleme gösterimi (üst: kılavuz delgi, alt: raybalama)



Şekil 4. İkinci kuyu günlük ve birikmiş ilerleme gösterimi (üst: kılavuz delgi, alt: raybalama)

4 BDM PERFORMANS ANALİZİ

Bu bildiride incelenen her iki kuyu dik şekilde açılmıştır (eğilim 90º). Her iki kuyu projesinde 1 operatör, 1 operatör yardımcısı ve 2 işçi çalışmıştır. Ayrıca her gün 1 vardiya, 12 saat ve haftada 6 gün çalışılmıştır. BDM'nin ortalama ölçülen (delme/kazı zamanı, dönme hızı, tüketilen ticone bit torku ve itme/çekme kuvveti) ve tahmin edilen performans parametreleri (anlık penetrasyon, birim penetrasyon, net kazı hızı, tüketilen tricone bit gücü ve saha spesifik enerjisi) her iki kuyunun kılavuz delgi ve raybalama işlemleri için Çizelge 2 ve 3'de özetlenmiştir. Kullanılan tijlerin uzunluğu ise 1,524 m'dir (dengeleyici uzunluğu 1,44 m).

Çizelge 2. Kuyuların kılavuz delgi işleminde ölçülen ve/veya hesaplanan performans

Parametreler	Birim	Kuyu 1	Kuyu 2
Delme zamanı	dak./m	62	90
Dönme hızı	dev/dak.	14,2	16,5
Tüketilen net tork	kNm	3,0	4,0
Tüketilen net güç	kW	5,23	6,91
Saha spesifik enerji	kWh/m^3	45,70	84,72
Anlık penetrasyon	m/saat	1,65	1,24
Birim penetrasyon	mm/dev	1,99	1,36
Net kazı hızı	m^3/saat	0,13	0,09
İtme kuvveti	kN	153	166

Çizelge 3. Kuyuların raybalama işleminde ölçülen ve/veya hesaplanan performans

Parametreler	Birim	Kuyu 1	Kuyu 2
Kazı zamanı	dak./m	78	246
Dönme hızı	dev/dak.	3,8	3,8
Tüketilen net tork	kNm	45	45
Tüketilen net güç	kW	18,33	18,17
Saha spesifik enerji	kWh/m^3	3,48	9,27
Anlık penetrasyon	m/saat	1,39	0,60
Birim penetrasyon	mm/dev	6,37	2,66
Net kesme hızı	m^3/saat	6,41	2,76
Çekme kuvveti	kN	871	940

Başyukarı delme makinelerinin performans değerlendirmesi üç kategoride yapılabilir. Birinci kategori mekanik parametrelerdir. Bu kategori makinenin boyutları, ağırlığı, kullanılan tricone bit ve genişletici kafa, dönme hızı, sarf edilen enerji, itme / çekme kapasitesi vd. özellikleri kapsamaktadır. Bu iki projede aynı makine kullanıldığı için, makine özellikleri bakımından bir değerlendirme yapılamamıştır. Bu iki kuyunun kılavuz delgi işlemlerinde, dönme hızının %30 kapasitesi kullanılmıştır ve raybalama işleminde de %18 kapasitesi kullanılmıştır.

BDM performans değerlendirmesinde ikinci kategori jeolojik/jeoteknik parametrelerdir. Bu kategoride, kaya kütlesinin, ana fay zonlarının, kırıklı-çatlaklı ve tabakalı zeminlerin özellikleri, yeraltı suyunun durumu, delinen/kazılan kayaçların dayanımı önemli özelliklerdendir. Bu kuyulardaki performans değerlerine bakıldığı zaman, birinci kuyunun daha iyi bir

performansla çalıştığı görülmektedir. Ortalama delme işlemi sırasıyla birinci ve ikinci kuyularda 62 ve 90 dakika/metre sürmüştür. Kazı işlemi ise 78 ve 246 dakika/metre sürmüştür. Ayrıca, birinci kuyuda kılavuz delgide ortalama anlık penetrasyon 1,65 m/saat ve ikinci kuyuda 1,24 m/saat olarak hesaplanmıştır. Raybalama işleminde ise bu değer 1,39 m/saat ve 0,60 m/saat olarak hesaplanmıştır. Kuyuların uzunluğuna baktığımız zaman ikinci kuyu, birinci kuyudan 3 metre kısa olmasına rağmen daha uzun sürede bittiği görülmektedir. Bunun nedenleri şöyle açıklanabilir: ikinci kuyu kılavuz delgi işleminde iki sefer kuyu dibini temizlemek için bütün tijler geri çekilmiş ve kuyu temizliği bittikten sonra bütün tijler yeniden kuyuya sokulmuştur. Bu işlemde ilerleme hızını yavaşlatmıştır. Ayrıca operatörün belirtiği gibi 129-130 metreler arasında göçük olduğu için delme işlemi 6 gün boyunca kuyu temizlenmesi için durdurulmuştur. Bu derinlikte itme kuvvetinin 170 kN'dan 50 KN'a düştüğü görülmüştür. Anlık penetrasyon değeri ise 1,66 m/saat'den 0,63 m/saat'e gerilemiştir. Aynı metrenin raybalama işleminde çekme kuvveti 1815 kN'dan 690 kN'a düşüş göstermiştir. Ayrıca anlık penetrasyon değeri 0,05 m/saat'den 0,13 m/saat'e çıkmıştır. Böylelikle bu zonda, az kuvvet kullanarak daha fazla ilerleme sağlanabilmiştir. Bir diğer neden de bu kuyuların açıldıkları farklı kotlardır (derinliklerdir). Birinci kuyu 1215-1005 metre kotları arasında ve ikinci kuyu 1005-805 metre kotları arasında açılmıştır. Alınan kayaç örnekleri daha çok ikinci kuyuyu temsil ettikleri düşünülmektedir. Bu kayaçların içinden andezit örnekleri en yüksek basınç dayanımına sahiptirler. İkinci kuyuda andezit olan kısımların kazısında anlık penetrasyon hızı 1,68 metre/saat'dir. Bu da kazılan ortamın çok sert ve sağlam olduğu zaman ilerleme miktarlarının daha düşük olduğunu göstermektedir.

Üçüncü kategori ise operasyonel parametreleri içermektedir. Bu kategoride kuyunun uzunluğu, boyutu ve açısı, ayrıca işgücü kullanılabilirliği ve kalitesi (iş deneyimi) yer almaktadır. Buradaki iki kuyu projesinde, daha önce belirtildiği gibi her iki kuyunun nihai çapı 2,44 metredir. Ayrıca her iki kuyu 90^o açıyla açılmıştır. Kuyuların uzunluğuna bakıldığı zaman ikinci kuyu yaklaşık 3 metre birinci kuyudan daha kısadır. Buna rağmen bu kuyunun kılavuz delgi işlemi 15 gün ve raybalama işlemi 32 gün daha fazla sürmüştür. Her iki kuyuda aynı operatör ve operatör yardımcısı kullanılmıştır ve sadece diğer işçiler değiştirilmiştir.

5 SONUÇLAR

Bu çalışma, Balya kurşun-çinko madeninde havalandırma kuyuları açmak için kullanılan Başyukarı Delme Makinesinin (BDM) performansı üç kategoride (mekanik, jeolojik / jeoteknik ve işletmeyle ilgili parametreler) değerlendirmesi amaçlamıştır. Bunun için aynı BDM ile açılan iki kuyunun kılavuz delgi ve raybalama işlemleri sırasında performans parametreleri (günlük ilerleme, itme/çekme kuvvetleri, kesici kafanın tork ve dönme hızları vd.) incelenmiştir. Bazı önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Kılavuz delgi işleminde, ortalama günlük ilerleme sırasıyla birinci ve ikinci kuyuda 12,40 ve 6,32 m/gün olmuştur. Raybalama işleminde ise ortalama günlük ilerleme sırasıyla 9,30 ve 3,69 metre/gün olmuştur.
- İkinci kuyunun kılavuz delgi ve raybalama işleminde daha fazla itme ve çekme kuvvetleri (sırasıyla 166 ve 940 kN) uygulandığı tespit edilmiştir.
- Birinci kuyuda raybalama işleminde saha spesifik enerjisi (3,48 kWh/m^3) ikinci kuyunun saha spesifik enerjisinden (9,27 kWh/m^3) daha düşük çıkmıştır.

Ayrıca sahadan alınan kireçtaşı, dasit, andezit ve metasedimanter kayaç örnekleri üzerinde bazı önemli fiziksel-mekanik özellik deneyleri yapılmıştır. Bu özellikler aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- Kayaçların tek eksenli basınç dayanımları 50-120 MPa arasında değişiklik göstermiştir. Dolaylı çekme dayanımları ise 5-11 MPa arasında değişmiştir.
- Statik elastisite modülü değerleri 11-31 GPa ve statik Poisson oranları da 0,11-0,23 arsında değişmiştir.

Performans değerlendirmesinde ikinci kuyu birinci kuyudan 3 metre daha kısa olmasına rağmen çok daha uzun sürede tamamlanmıştır. Bunun önemli nedenlerinden biri jeolojik / jeoteknik parametrelerle ilgilidir. Bu kuyunun delme / kazı işleminde bazı derinliklerde boşluk / göçük olduğu için uzun duraklamalar yaşanmıştır ve performans değerlerinin daha düşük olmasına neden olmuştur.

Bu iki kuyu işlemi sırasında aynı makine kullanıldığı için, makine özellikleri bakımından bir değerlendirme yapılması mümkün olmamıştır. Bu iki kuyunun çoğu operasyonel parametreleri (kuyu çapı, operatör vd.) aynı olduğu için aynı olan operasyonel değerler için bir değerlendirme yapılmamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma üçüncü yazarın doktora tezinin bazı sonuçlarını özetlemektedir. Yazarlar Eczacıbaşı Esan İşletmesinden Sayın Ali Türkistanlı, Ahmet Baştürk ve Deniz Arslan; Sargın İnşaat ve Makine Sanayi Ticaret A.Ş. den, Sayın Huseyin Sait Sargın'a sonsuz teşekkürlerini sunarlar. Ayrıca üçüncü yazar, Sargın İnşaat'tan Fettah Topal, Dursun Bora ve Recep Solak'a, saha çalışmaları sırasında yardımlarından dolayı minnettardır.

KAYNAKLAR

Bilgin, N. 1989. *İnşaat ve Maden Mühendisleri için Uygulamalı Kazı Mekaniği*. Birsen, İstanbul, 192 s.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. 2014. *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*. CRC Press, New York, 366 p.

Calder, P.N. 1972. Rock Mechanics aspects of large hole boring machine design. In: *8th Canadian rock mechanics Symposium*, pp. 159-175, Canada.

Dollinger, G.L. 1977. *Choosing cutters for the best boreability*. Compressed Air Magazine, Sept, pp. 15–19.

Dollinger, G.L., Handewith, H.J, Breeds, C.D. 1998. *Use of the Punch Test for Estimating TBM Performance*. Tunnelling and Underground Space Technology, 13 (4): 403-408.

Elgenklow, M. 2003. Boxhole boring at El Teniente - The lieutenant marches on. *Tunn Undergr Sp Tech,* 18(5): 485-495.

Everell, M.D. 1972. Performance of raise borers as a function of geology and rock properties. In: *Proceeding of the 8th Canadian rock mechanics symposium*, November-December, pp. 83-100, Toronto.

Küçükateş, K. 2018. Üçüncü yazar ile kişisel görüşme bilgilerine dayanmaktadır.

Lightfoot, R.M. 1970. Drillability and wear Prediction by Laboratory Techniques and correlation with operation experience. In: *Australian Geomechanics Society Symposium on Raise and Tunnel Boring*, 15 p., Australia.

Lislerud, A., Vainionpää, P. 1997. Application of raise boring for excavation horizontal tunnels with Rhino machines. *Working report* 97-56 e. Posiva Oy, Helsinki, 54s.

McCracken, A., Stacey, T.R. 1989. Geotechnical risk assessment of large diameter raise-bored shafts. *Shaft Engineering, Institution of Mining and Metallurgy*, pp. 309–316.

Morris, R. 1969. Rock drillability related to a roller cone bit. In: *Proceedings of society of petroleum Engineers of AIME*. Paper No. SPE 2389, pp. 79-86.

Nishimatsu, Y, Okubo, S, Jinno, T. 1987. On the Performance and Dynamic Behavior of a Shield Type Blind Raise Boring Machine. In: *6th ISRM Congress*, pp. 705-708, Montreal.

Peck, W., Lee, M.F. 2008. Application of the Q-System to Australian Underground Mines. In: *Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mines, U.S Department of Health and Human Services CDC/NIOSH Office of Mine Safety and Health Services*, pp. 129.140.

Pigott, C.P. 1985. The route to more efficient blind shaft drilling. In: *Rapid Excavation and Tunnelling Conference,* Proceedings Volume 2, pp. 974-991, New York.

Seiler, W.K. 1972. Hard rock boring with tungsten carbide insert big cutters. In: *1st North American Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Proceedings Volume 2, pp. 1149-5, Chicago.

Shaterpour Mamaghani, A., Erdogan, T., Engin, D., Bilgin, N. 2016b. Evaluation of the Performance of a Raise Boring Machine in Pb-Zn Underground mine, Balya, Turkey. In: *World Tunnel Congress (WTC 2016)*, San Francisco, USA.

Shaterpour-Mamaghani, A., Bilgin, N. 2016. Some contributions on the estimation of performance and operational parameters of raise borers – A case study in Kure Copper Mine, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 54, pp. 37-48.

Shaterpour-Mamaghani, A., Bilgin, N., Balci, C., Avunduk, E., Polat, C. 2016a. Predicting Performance of Raise Boring Machines by Using Empirical Models. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (8), pp. 3377-3385.

Shaterpour-Mamaghani, A., Copur, H., Bilgin, N., Kocbay, A., Erdogan, T. 2017. Raise Boring Machine performance in the Yusufeli Dam and HEPP

Project. In: *World Tunnelling Congress (WTC2017)*, Bergen, Norway.

Visser, D. 2009. Shaft Sinking Methods Based on The Townlands Ore Replacement Project-Rise Boring. In: *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Shaft Sinking and Mining Contractors Conference*, 13 p.

Ciftci, Y., Revan, M.K, Sen, P., Zimitoglu, O. 2013. *The basic geological aspects of Eskisehir, Balikesir, Tepeoba, Izmir, and Usak ore deposits. International Workshop on Base and Precious Metals*, Field Trip Guide Book, May 20-27, MTA, Ankara, Turkey. pp. 22-27.

ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: *Ulusay R, Hudson JA (eds) Suggested methods prepared by the ISRM commission on testing methods, compilation arranged by the ISRM Turkish National Group.* Kozan Ofset, Ankara, 628 p.

Zigana Tünel Projesi, Mekanize Havalandırma Kuyuları Açılması Kapsamında, Raise Boring Operasyonları

Zigana Highway Tunnel Project, Raise Boring Operations in Mechanization of Ventilation Shafts Opening

F. Yazar, O. Şirin, S.Ö. Koç, K. Küçükateş
Eti Bakır A.Ş. Küre Yeraltı İşletmesi, Kastamonu

ÖZET 2013 yılından beri, Küre Yeraltı Bakır İşletmesi bünyesinde projelendirilen havalandırma ve cevher nakil kuyularının mekanize kazıları Raise Boring ile yapılmaktadır. Bu kuyuların inşa edilmesinde kullanılacak kazı yöntemi belirlenmeden önce, iş emniyeti, kuyu maliyetleri, zaman faktörü ve çalışma kolaylığı gibi parametreler değerlendirilmiştir. Dünyada pek çok maden projesinin de, her amaca yönelik şaft kazılarında yaygın olarak kullandığı Raise Boring sistemi, bu konuda artan tecrübeler ve başarılı operasyonlar ile günümüzde karayolu tüneli ve hidroelektrik santrallerde de tercih edilmeye başlanmıştır.

RBM tamamen sondaj mantığına dayalı rotasyon hareketi ile kazı yapar. Sadece tek bir operatör ve işçi ile çalıştırılır. Çok daha hızlı ve güvenli şekilde, kazı yüzeylerini örselemeden kuyular inşa etmektedir. Çalışma başlamadan önce, kuyu bölgesinin havalandırma, aydınlatma ve lojistik gibi ortam koşulları iyileştirilir. Bu sayede çalışan personel için tozdan, gürültüden ve insan hayatını riske edebilecek etmenlerden uzak, konforlu bir çalışma alanı hazırlanmış olur. Ayrıca iş verimliliği anlamında maksimum fayda sağlanmış olmaktadır. Klasik yöntemler ile kazı işlemlerinde ise bu sağlanamamaktadır. Özellikle çevreye olan etkilerinin ve kaya titreşimlerinin çok az olması, Raise Boring sisteminin tercih edilme nedenlerini güçlendirmektedir.

Maden İşletmeleri bünyesinde edinilen RBM tecrübelerini ve saha deneyimlerini bir adım daha ileriye taşımak adına, operasyon bünyesinde manuel şekilde toplanan veri setlerini, yeni dönem teknolojisi kullanılarak makine ile senkronize çalışan bir programa aktarıp, ilerleme ve rotasyon hızı, net kuvvet, uygulanan tork gibi önemli parametrelerin depolanması sağlanmaktadır. Çok daha sık aralıklarla veri oluşturan bu yazılım sayesinde, ister tek başına ister iki veya daha fazla verinin karşılaştırılarak yorumlanması sağlanmakta olup, en iyi değerleri yakalamak adına optimizasyon yapılması hedef alınmaktadır.

ABSTRACT Since 2013, the excavation of the ventilation and ore pass shafts projected in the Kure Underground Copper Plant has been done with Raise Boring. Prior to determining the excavation method to be used in constructing these shafts, parameters such as work safety, well costs, time factor and ease of operation were evaluated. The Raise Boring system, which is widely used by many mining projects in the world for shaft excavations for every purpose, has been started to be preferred in highway tunnels and hydropower plants today with its increasing experience and successful operations.

The RBM works on the same principle of as a core drill machine, which is the rotation. A single operator and an assistant can control. Among the advantages of the RBM operations are safety, speedy, less-vibration, silence and less dust. Prior to a RBM operation, ventilation and illumination of the working are a improved, providing better working condition for miner. Compared to conventional excavation methods, the RBM is more efficient and environment friendly.

In order to take the RBM experience and field experience gained in Mining Operations one step further, it is necessary to transfer data sets manually collected in the operation area, a program running synchronously with the machine using new period technology, storage of important parameters such as feed and rotation speed, net force, applied torque it is provided.

With this software, which generates data more frequently, more than one data are compared and interpreted, and optimization is planned to find the best values.

1 GİRİŞ

Bünyesindeki yeraltı kaynaklarının araştırılıp işletilerek, ülke ekonomisine kazandırılmasını hedefleyen Eti Bakır A.Ş. başta Küre Yeraltı İşletmesi olmak üzere, projelendirmekte olduğu yeraltı madencilik faaliyetlerini, dünyada çok hızlı büyümekte ve ilerlemekte olan sektörün gelişmelerine uygun şekilde takip edip, ülkemizde bu gelişim ve büyümenin öncüsü konumuna yükselmeyi kendine hedef edinerek yürütmektedir.

Bu amaç çerçevesinde, hazırlık ve projelendirme çalışmaları halen devam etmekte olup, ilerleyen yıllarda ülkemizin en derin maden işletmelerinden biri haline gelecek olan Küre Yeraltı Projesi'nin, havalandırma ve cevher nakil kuyularının, iş emniyeti, kuyu maliyeti, zaman faktörü ve çalışma kolaylığı gibi unsurlar değerlendirildiğinde, dünyadaki benzer işletmelerde de yaygın olarak kullanılan Raise Bore Makinesi ile açılması kararına varılarak harekete geçilmiştir.

Bir takım sektörel araştırmalar neticesinde, öncelikli olarak yedek parça ve servis hizmetleri göz önünde bulundurularak, başta Küre Projesine, sonrasında ise firma bünyesinde bulunan diğer madencilik, tünel ve inşaat projelerine en uygun model RBM'nin alınmasına karar verilmiştir. İlk yatırım maliyeti oldukça yüksek olan RBM teknolojisinin tercihinde, madencilik ve diğer kullanım alanlarında da yürüteceği faaliyetlerde, iş kalitesi ve verimliliğini arttırarak uzun vadede makine parkımızda önemli bir konuma sahip olacağının büyük etkisi bulunmaktadır.

Öyle ki, 2013 yılından bugüne yeraltı maden projelerinde 35'in üzerinde 1.8m ve 2.6m çaplarında, derinliği 30metreden 230 metreye kadar çıkabilen, toplamda 2,500 metreyi aşkın şaft kazısı yapılmış olup, operasyonlarına da tüm hızıyla devam etmektedir. Ancak maden projelerindeki bu yoğun programlara devam ederken, inşaat grubunun önemli projelerinden olan Zigana Tüneli Projesi kapsamında açılması hedef alınan ana havalandırma kuyularına da kapsamlı bir planlama yapılması gerekmekteydi.

Zigana Tünelleri Projesinde inşa edilmesi hedeflenen şaft çapının 3.6m olmasından ve RBM teknolojisine, gerek firma, gerekse sektördeki gelişen projelerde artan talepler üzerine, teknolojisi daha ileri ve daha kapasiteli bir ikinci RBM'in alınması konusunda çalışmalara başlanmıştı.

Daha önceki modelin kapasitesinde olan 1.8m ve 2.6m çaplarını büyüterek, 3.2m, 3.6m ve 4.2m çaplarında şaft kazısı yapabilme kapasiteli bir makinenin alınmasının, daha verimli olacağı düşünülerek, ilk yatırım maliyeti oldukça yüksek olan ancak uzun vadedeki karlılığı, götürüsünün oldukça üzerine çıkacak bir üst model RBM tedarik edilmiştir.

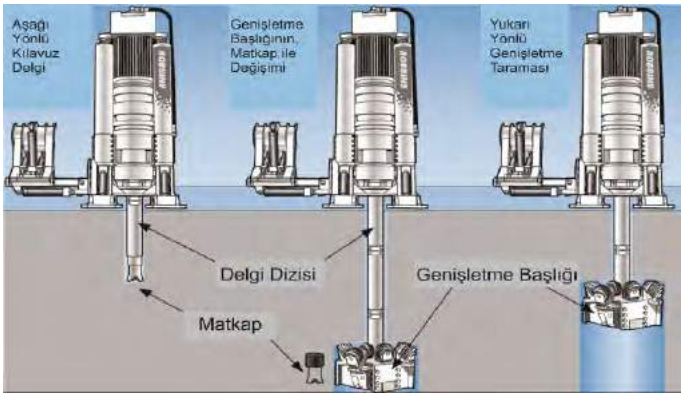
Bu hizmetin dışardan da sağlanabilme imkanı varken, firmanın yaptığı yatırım ile önce kendi projelerine ve ilerleyen dönemde gereksinim duyan her projeye destek verebilmek adına bu girişimde bulunmasının en büyük nedeni, hiç kuşkusuz geçtiğimiz 5 yıldaki maden projelerinde elde edilen başarılı operasyonlar ve bu teknoloji konusunda beceri kazanmış personel faktörüdür. RBM kazı tekniği üzerine yetişmiş ekiplerinden cesaret alarak, maden projelerinin ardından, daha geniş çapta ve daha uzun derinliklerde havalandırma şaftları inşa etmeye başlayan firmanın, mekanize şaft kazıları konusundaki son eseri Zigana Tüneli, Ana Havalandırma İstasyonu, Şaft kazısıdır.

Şekil 1. RBM'nin delgi lokasyonundan görünümü

2 GENEL ÇALIŞMA SİSTEMİ

Raise Boring, Türkçe çevirisi "Baş Yukarı Delme" olarak tanımlanan bir kazı yöntemidir. Genel çalışma ilkesi baş yukarı sondaj kavramına dayanan sistem, 6 metre çapına ve 1000 metre derinliğine kadar boyutlarda kuyular inşa edilebilmektedir. Raise Boring, günümüzün devamlı gelişen ve yenilenen madencilik koşullarında, havalandırma, cevher nakil ve personel taşıma amacıyla, gerek dikey gerekse eğik ve yatay kuyu açmanın en emniyetli, modern ve hızlı yoludur.

Baş yukarı sondaj operasyonunun temel çalışma mantığı, iki veya daha fazla seviyedeki katlar arasında dikey ya da eğik olarak nispeten dar çaplı bir pilot kuyu açılması, daha sonrasında ise açılan bu kuyunun tarama yöntemi ile genişletilmesi işlemidir.



Şekil 2. RBM'nin genel çalışma sistemi. Kılavuz delgisi (Piloting) ve Genişletme (Reaming)

Baş yukarı sondaj işlemi esnasında RBM, kuyu ile bağlanması istenen iki seviyeden, üstte olanın tabanında hazırlanan bir lokasyona kurulur. İlk olarak alttaki seviyeye kadar kılavuz olması açısından bir pilot delik açılır. Pilot delme işlemi tamamlandıktan sonra, alttaki seviyede kılavuz deliği açan matkap (rock bit) çıkarılarak, kuyunun sahip olması istenen çapta tarama yapacak olan genişletme başlığı (reamer) delgi dizisinin ucuna takılır. Genişletme başlığı ile delgi işlemi gerçekleştirilen kuyu boyunca belirli parametrelerde rotasyon hareketi sağlanarak, üst seviyedeki makinaya kadar tarayıp genişletme işlemi gerçekleştirilir. Pilot delgi esnasında matkap ucun kestiği kayaç parçaları kuyuda sağlanan su sirkülasyonu ile dışarıya atılıp, kuyu ağzından bir kanal yardımıyla tahliye edilirken, genişletme başlığının tarama esnasında parçaladığı malzemeler, alttan yukarıya doğru çapı genişlemekte olan kuyudan tabana düşerek zeminde birikme yapar. Bu yığılma, belirli bir seviyeye kadar yükseldiğinde, kovalı bir loder yardımıyla emniyetli şekilde tabandan sıyrılarak taşınır. (Raise Boring-Mining and Construction, 2012)

2.1 Mekanik Kaya Kazısı

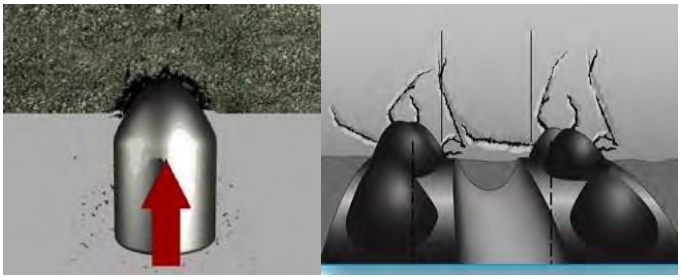
Raise boring, dönme ve kırma gücünü aynı anda kullanan bir delme metodudur. Genişletme başlığı dönerken, kayaya çok yüksek bir baskı kuvveti uygulanmaktadır. Bunun sonucunda genişletme başlığının her bir dönüşünde 0,3–2mm arasında bir penetrasyon (ilerleme) sağlanır. Delme performansının optimize edilmesindeki ana amaç, en iyi kesici uç ömrü ve ilerleme hızı kombinasyonunu sağlamaktır.

Raise boring mekanik kaya kazısı işlemi sırasında iki ana prensipten yararlanılır. Bunlar Krater oluşturma ve Kerf (Keserek) Kırmadır.

2.1.1 Krater oluşturma

Krater oluşturma, kaya üzerinde delici ucun kontak alanının hemen altında yer alan bölgede yarattığı kırma olayı için kullanılan bir terimdir. Eğer kayacın tek eksenli basınç dayanımını yenecek miktarda bir baskı

uygulanırsa, tungsten karbit uçların temas ettiği bölgenin hemen altında, kaya istenilen şekilde ufalanır ve bir krater oluşur.



Şekil 3. Krater oluşturma ve kerf (keserek) kirma

2.1.2 Kerf (keserek) kırma

Yeterli baskı kullanıldığı zaman, yan yana yerleştirilmiş olan tungsten karbit uçların oluşturduğu yanal çatlaklar, alt tarafta birleşerek kayaç yüzeyinden daha çok parça koparılmasını sağlar. Yan çatlaklar veya keserek kırma, raise boring uygulamasındaki en temel kaya kırma etkisidir. (Atlas Copco-Rock Drills, 2012)

3 OPERASYON SÜRECİ

3.1 Teorik ve Pratik Eğitimler

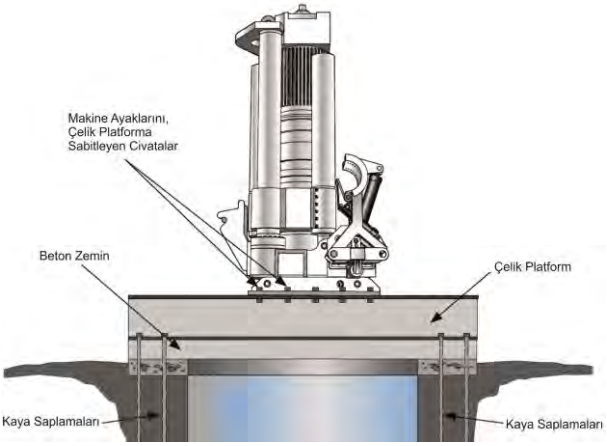
Yeni Raise Bore Makinesinin Zigana Tünel İşletmesine teslimi gerçekleştirildikten sonra, ilk iş olarak RBM'in çalışma programından sorumlu olan planlama-operasyon ve bakım birimlerinin mühendis ve formenlerine RBM'in temel çalışma sistemi hakkında sunum ve eğitimler verilmiştir. Daha sonrasında RBM ile delgi çalışması yapacak operatörler ve çalışanlar ile sürece elektrik ve mekanik yönden destek verecek servis birimlerine teorik ve pratik bilgilendirme yapılarak, saha uygulama sürecine başlanılmıştır. Bu aşamada RBM ile delgi planı yapılan ilk lokasyon, eğitim noktası olarak belirlenip, operasyon grupları tarafından, teknik eğitim ekiplerinin eğitim sürecinde RBM uygulamalarına emniyetli ve konforlu bir çalışma sunması açısından dizayn edilmiştir.

Şekil 4. RBM tarama başlığının saha uygulama eğitimleri ve kesicilerin montaj işlemleri

3.2 Nakliye ve Kurulum

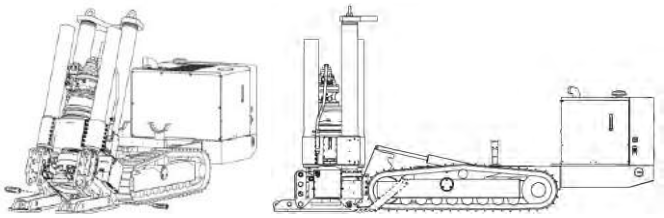
RBM ve güç ünitelerinin çalışma yerine nakliyesi yapılmadan önce, makine ayaklarının oturacağı platformun zemine montajı için taban betonu dökümü yapılmış, makine yerleşim planı topoğraflar tarafından hassas ölçülerde kontrol edilerek, platform betona sabitlenmiştir.

Şekil 5. RBM yerleşim lokasyonu betonu ve kanalı



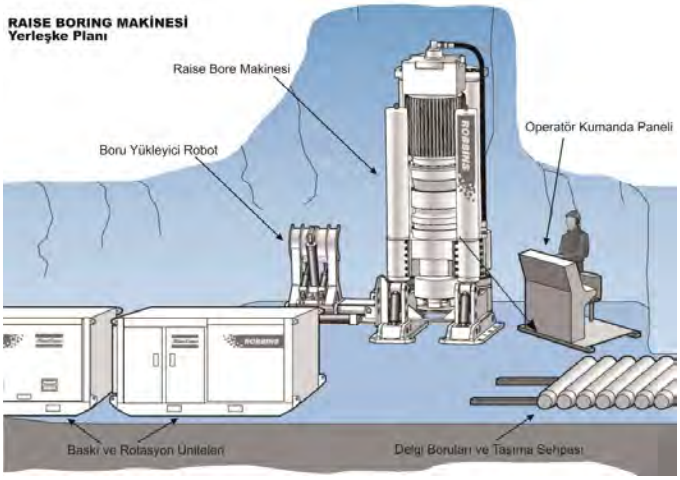
Şekil 6. RBM'nin makine ayaklarına civatalanması ve çelik platforma ait kaya saplamalarının yerleşimi

Lokasyon ölçümleri tamamlandıktan sonra, güç üniteleri (Rotasyon Ünitesi:200kW, Baskı Ünitesi: 55kW) ile yardımcı bağlantı ve montaj ekipmanları çalışma alanına taşınarak plana uygun şekilde konumlandırılmış, enerji ve su hattı bağlantıları hazırlanmıştır. Ardından RBM, uzaktan kumandalı paletli taşıyıcısı (crawler) ile delgi lokasyonuna getirilerek, makine ayakları için hazırlanan platformun üzerine oturtulmuş ve montaj işlemi sonrasında, paletli taşıyıcı, makine ile bağlantıları kesilerek, parka çekilmiştir.



Şekil 7. RBM'nin paletli taşıyıcı üzerinden indirilerek, çalışma lokasyonuna kurulum işlemleri

RBM elektronik terazisi ile dengeye getirildikten sonra güç ünitelerinin bağlantıları yapılmış, son etapta standart ve özel delgi tijleri ile trikon matkap ucu çalışma yerine taşınarak, boru yükleyici robotun altında konumlandırılan sehpa üzerine yerleştirilmiştir. Böylelikle pilot delgi için hazırlıklar tamamlanmış ve operasyonun birinci etabına başlanılmıştır.



Şekil 8. RBM'nin güç üniteleri ve delgi borularının çalışma bölgesindeki yerleşim planı

3.3 Kılavuz Delgi ve Tarama (Genişletme)

Pilot delgi aşamasında, matkabın kestiği kırıntılı malzemenin dışarıya atılması için kuyuya dakikada yaklaşık 550 ile 600 litre arasında su verilmektedir. Kırıntılı malzemeyi kuyu dışına taşıyan su, kuyu ağzından bir kanal aracılığıyla tahliye edilerek, çökertme havuzlarında dinlendirilip, tekrar kuyuya basılmaktadır. Kılavuz kuyunun tamamlanmasının ardından, alt seviyeye kadar indirilen delgi takımının ucundaki matkap ile dengeleyici ve genişletici tijler, hidrolik sistemli özel bir kriko yardımıyla sökülerek, delgi dizisinin ucuna genişletme başlığı takılır. Başlık, kriko ile belirli limitlerde basınç değerine ulaşana kadar sıkılarak, delgi takımı tarama operasyonuna hazır hale getirilir.

Şekil 9. RBM'nin kılavuz delgisinin tamamlanıp, matkabın genişletme başlığı ile değiştirilmesi

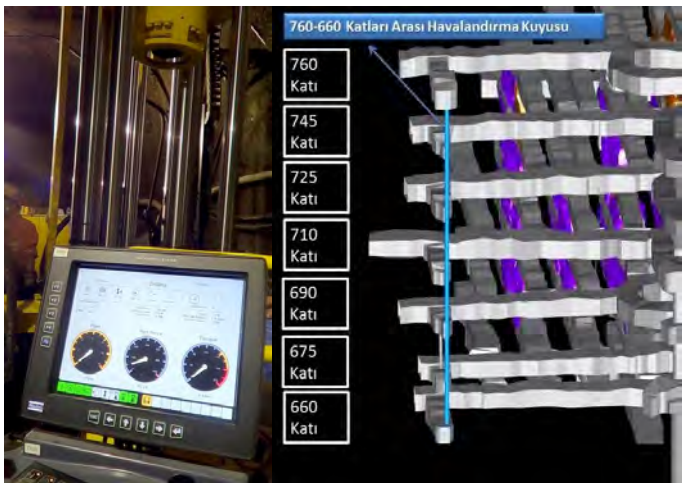
Küre Projesinde açılmış ve planlanmakta olan havalandırma ve cevher nakil kuyuları 1.8 ile 2.6 metre çaplarında, 20 ile 240 metre arasında değişen derinliklerdeyken, Zigana Tüneli Projesindeki havalandırma kuyuları 3.6 metre çapında olup, 250 metreden 400 metreye değişen derinliklerdedir. Dolaylı olarak, RBM tercihleri de bu çaplarda, maksimum 700-1000 metre derinliğe kadar delgi kapasitesiyle belirlenmiştir. Genişletme operasyonu öncesinde, istenilen kuyu çapına göre, tarama yapacak başlığa çap büyütme kanat ve kesicileri eklenilir. Montaj işleminin tamamlanmasının ardından, her biri 1.52 m olan tij borular, delgi esnasındakinin aksine yukarıya doğru çekilerek operasyona tarama işlemi ile

devam edilir. Genişletme aşamasında, çıkarılan pasa, yerçekimi etkisi ile tabanda biriktiği ve kuyu ağzından atılması gereken malzeme olmadığı için, kılavuz delgide kullanılan miktarda suya ihtiyaç kalmamaktadır. Gereksinime bağlı, RBM'in soğutma tahliyesinden gelen su, kılavuz kuyudan verilerek delgi dizisi ve kesicilerin (cutters) soğutulması ve yağlanması sağlanır. Ancak bu iş, yalnızca sağlam ve duraylı zeminlerde uygulanır. Çekilen her borunun, dişlerindeki özel katkılı yağ temizlenip, diş kalınlıkları kontrol edilerek bakımları yapılır ve kapakları kapatılarak muhafazaya alınır.

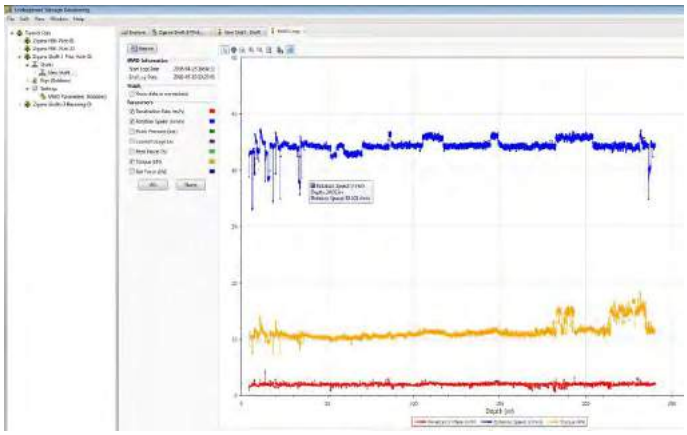
3.4 Operasyon Verilerinin Depolanması

Boruların üzerindeki seri numaraları, delgi dizisindeki pozisyonlarına göre kuyu bilgilerine kayıt edilir, bu sayede yorulmuş tijlerin, sonraki operasyonlarda daha az yük altında çalışması sağlanır. Kuyu veri tabanı oluşturulurken, pilot delgi ve genişletme çalışmalarının, ilerleme süreleri hassas şekilde kayıt altına alınır. Bu ilerleme verileri, delgi parametreleri (devir, baskı, yük vs.) ile birlikte raporlanarak, iş ve maliyet analizi yapılmasını kolaylaştırır. Örneğin; Farklı çaplı kuyuların, genişletme aşamalarında kesicilerin sayısı ve üstüne binen yük miktarları değiştiği için, tarama yüzeyine temas eden alan miktarı ile orantılı olarak ilerleme hızında da azalma meydana gelecektir. Öyle ki, 1.8 m çaplı kuyuda, tarama hızı ortalama 1.35 m/s iken, 2.6 m çaplı kuyuda 0,90 m/s'e kadar düşmektedir. Yeni RBM taramasındaki 3.6m çapında ise, artan kazı kesit alanıyla orantılı olarak ilerleme hızı 0,50 m/s değerlerine kadar düşmektedir. Tabiki bu değer kazı yüzey alanıyla olduğu kadar, kayaç kalite ve sertliği ile de alakalıdır. Ancak genel olarak, kazı alanı ile ters orantılı şekilde ilerleme hızı da değişkenlik göstermektedir.

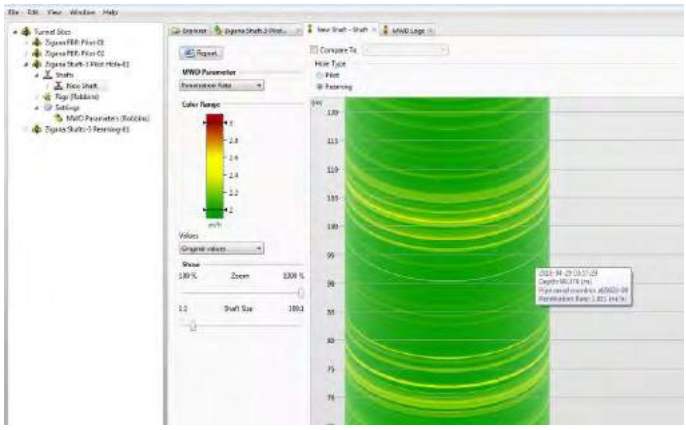
Yeni RBM ile değişim ve güncelleme geçiren veri tabanı depolama sistemleri, artık kullanıcı ile makine arasında daha sağlıklı ve kapsamlı bir veri akışı yaratmak amacıyla, makinanın delgi esansında ürettiği veriyi bilgisayarlara aktarıp, bir veya birden fazla veriyi karşılaştırarak yorumlayabilmeyi sağlayan bir yazılım (MWD) sunmaktadır. MWD, delgi esnasında dinamik ölçüm alan (Measurement While Drilling) bir sistemdir.



Şekil 10. RBM'nin kumanda panelinden çalışma verilerinin alınması, 3D ortamda kuyu modellenmesi



Şekil 11. RBM'nin kumanda panelinden alınan verilerin MWD ile karşılaştırılması



Şekil 12. RBM'nin kumanda panelinden alınan verilerin MWD ile 3D görüntülenmesi

Bu yazılım sayesinde, geçmişteki RBM operasyonlarında manuel olarak depolanan

delgi verileri, daha sık aralıklarla ve daha geniş bir yelpazede oluşturulmaktadır. Ayrıca bilgisayardaki yazılım aracılığı ile bu verileri grafik üzerinde tabloya dökebilir ve rapor formatına getirebiliriz. Buna ek olarak kuyu logunu 3D ortamda görüntüleyebilir ve görsel olarak daha verimli bir değerlendirme yapabiliriz.

MWD, makineyi takip etmek zorunda kalmadan, belirlenen aralıklarda otomatik olarak veri depoladığı için, insan faktöründen kaynaklı veri kaybı ve raporlama hatası gibi durumları da minimize etmektedir. İlerleme değeri, dönüş hızı, pompa basıncı, uygulanan net kuvvet ve maruz kalınan torq değerleri gibi daha birçok data'yı, zaman ve derinlik gibi farklı parametrelere göre üç boyutlu şekilde sunuyor olması, ilerleyen operasyonlarda, aynı yada farklı kayaç davranışlarına yönelik nasıl bir yol haritası takip etmemiz gerektiğine karşı en iyi parametreleri seçmemize yardımcı olmaktadır. Bu detayda veriyi, süreci bizzat takip edemediğiniz durumlarda dahi hazırlayabilmesi sayesinde, daha etkin mühendislik yapabilmek açısından zamanı çalmıyor ve çalışanlarımızı daha detaylı takip edebilmemizi sağlıyor. Geriye dönük işleyişi denetleyebilme imkanı vermesinden ötürü, ciddi maliyetleri ve operasyonel riskleri olan RBM operasyonlarını çok daha iyi yönetebilmemizi sağlamaktadır.

3.5 Delgi Operasyonunun Tamamlanması

Delgi dizisinin tamamının çekilmesinin ardından, çap büyütme işleminin tamamlanabilmesi için, genişletme başlığının kuyudan alınması gerekir. Ancak üzerinde RBM kurulu iken başlığı alabilmek imkansız olduğu için, kuyu derinliği ve ortam koşullarına göre uygun strateji geliştirilerek başlık söküm işlemi yapılmalıdır. Bunun için uygulanabilecek iki yol vardır.

Birincisi; genişletme işleminin ardından, delgi dizisini ucundaki başlık ile birlikte alt seviyedeki katın tabanına kadar indirerek, başlığın kriko yardımıyla sökümünü sağlamak ve delgi takımını tekrar çekerek operasyonu tamamlamaktır. Genellikle sığ derinlikli kuyularda tercih edilen bu sistem, nispeten fazla zaman gerektirse de, daha emniyetli ve garantilidir.

İkincisi ise; Genişletme başlığı ile RBM'in tabanındaki beton, platforma kadar sıfırlanarak temizlenilir ve ardından birkaç metre kuyuya indirilip, en az dört noktasından zincirlenerek, yüzeye sabitlenir. Bu işlem öncesinde, genişletme başlığı ağırlığına göre zincirlerin taşıma kapasitesi, yük dağılım hesapları ve sabitlenecek donatının yük çekme testleri yapılmış olması gerekir. Zincirlerle kuyuda sabit pozisyona getirilen başlık, delgi dizisinden çözülüp, RBM üzerinden toparlandıktan sonra, uygun bir vinç yardımıyla kuyudan alınarak operasyon sonlandırılır. İlkine göre daha riskli olduğu kabul edilen bu yöntem, çok daha pratik olması ve az zaman gerektirmesinden dolayı özellikle derin kuyularda tercih edilmektedir. (Küçükateş vd., 2013)

Şekil 13. RBM ile açılan kuyularda alt ve üst seviyelerden gözlenen yan duvarların kaya titreşimi olmaksızın örselenmemiş yüzeylerinin görünümü

4 DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Geçmiş dönemlerde yeraltı madencilik operasyonlarında, havalandırma, cevher nakil ve insan taşıma kuyuları, klasik delme, patlatma yöntemi ya da insan gücüne dayalı el burgusuyla delme şeklinde yapılmaktaydı. Bu yöntemlerde, çok sayıda personel ve kazıda kullanılan malzemenin kuyuya nakledilmesinden, patlatılmış kayaç ve atıkların kuyudan tahliyesine kadar tüm aşamalar oldukça zaman alan ve son derece

tehlikeli şekilde yapılmaktaydı. Ayrıca kuyu içerisinde kazı çalışması yapan personelin, havalandırma ihtiyacını gidermek ve iş kazası riskini indirgemek de başka büyük bir problem oluşturmaktaydı. Tüm bu risk ve zorluklar, açılacak kuyunun kesiti veya derinliğindeki büyümeye bağlı olarak artmaktaydı.

Eti Bakır A.Ş. olarak, her amaca yönelik şaft kazılarında RBM'in tercih edilmesinin ve buna bağlı olarak gelişen beklentilerin başında hiç şüphesiz iş emniyeti gelmektedir. RBM ile çalışma yapılacak bölgenin havalandırma, aydınlatma ve lojistik gibi ortam koşulları, iş sağlığı ve güvenliği standartlarına göre iyileştirilmektedir. Bu sayede çalışmayı yürüten personel için tozdan, gürültüden ve insan hayatını riske edebilecek etmenlerden uzak, konforlu bir çalışma alanı hazırlanarak, gerek çalışanların sağlığı ve güvenliği gözetilmiş, gerekse iş verimliliği anlamında maksimum fayda sağlanmış olmaktadır.

Tamamen sondaj mantığına dayalı rotasyon hareketi ile kazı yapan RBM, sadece tek bir operatör ve işçi ile çalışarak, çok daha hızlı ve güvenli şekilde, kazı yüzeylerini örselemeden hareket etmektedir. Delgi esnasında ufalanan kayaç parçalarının kuyu cidarına sıvanıp, zımpara etkisi yaratması sayesinde, yuvarlak ve pürüzsüz bir kuyu inşa etmektedir. Klasik yöntemlerde kullanılan kazı metotları ile ise bu sonuç sağlanamamaktadır.

Özellikle çevreye olan etkilerinin ve kaya titreşimlerinin çok az olması, raise boring sisteminin tercih edilme nedenlerini güçlendirmektedir. Öyle ki, günümüzde gelişmiş ülkelerin çoğu klasik yöntemler ile kuyu açmayı terk ederek raise boring sistemini kullanmaya başlamışlardır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma Cengiz İnşaat Zigana Şantiyesi ve Eti Bakır A.Ş. Küre İşletmesi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Küçükateş, K., Koç, S.Ö., Yazar, F. 2013. Eti Bakır A.Ş. Küre Yeraltı İşletmesi, RBM Kullanım Yönergesi (in Turkish).

Raise Boring Mining and Construction, Atlas Copco Rock Drills AB, SE-701 91, 2012. Örebro, Sweden.

Efemçukuru Altın Madeni Havalandırma Bacası Kazı ve Desteklenmesi

Excavation and Support of Ventilation Gallery in Efemçukuru Gold Mine

Ö. Yılmaz, H. Murat, İ. Atik
Soner Temel Mühendislik İnşaat ve Ticaret A.Ş., İstanbul

ÖZET Bu çalışmada Efemçukuru altın madeninde galerilerin havalandırılması için tasarlanan ve yeryüzü ile 592 katı arasında açılmış olan bir havalandırma bacasının tasarlanması, kazı hazırlıkları, inşaat işleri, delme–patlatma ve desteklenmesinden söz edilecektir.

ABSTRACT Design, developments, construction works, drilling and blasting and support works will be mentioned in this study for an inclined ventilation gallery located between the surface and +592 level in Efemçukuru Gold Mine.

1 GİRİŞ

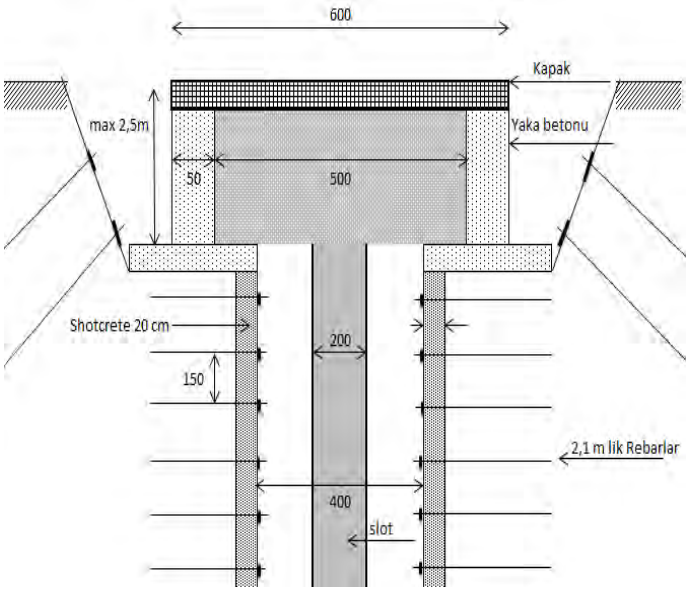
Efem çukuru altın madeninde havalandırma, üretim kadar önem taşımaktaydı. Derinleşen üretim katlarındaki sıkışan kirli hava ve patlatma sonrası oluşan tehlikeli gazların ocak dışına atılması için planlanan egzoz fanların yerleşeceği galerilerin yüzeye açılacak olan bacalarının bir an önce tamamlanması gerekiyordu. NOS üretim aynalarında 552 katına kadar inilmiş, yüzeyden inilecek havalandırma bacasının ise 592 katına inmesi planlanmıştı. Tüm bu ara katlar arasındaki havalandırma bacaları tamamlanmış, ancak sistemin tamamlanması için yüzeye çıkacak olan bacanın tamamlanması gerekiyordu. Maden içerisinde daha önce açılan tüm havalandırma bacalarının kazı ve desteklenmesi birbirinin aynısı olup, bacalar sağlam kaya sınıfı olarak adlandırdığımız havalandırma galerileri içerisinde açılmıştı. Ancak;592-Yüzey arasında açılacak olan bacanın jeolojik yapısı ve ön araştırma sondajlarının verileri doğrultusunda bu bacanın kazı ve desteklenmesinin diğerlerinden farklı olarak yeni bir tasarım ve destekleme ile inilmesi gerekliliğini doğurmuştu. Çünkü açılacak olan baca yüzeyde orman arazisi içerisinde ve yapılacak olan tüm imalatların çevreye zarar vermemesi gerekiyor idi. Bu nedenle açılacak olan bacanın geometrisini koruması ve İSGÇ açısından hiçbir sorun yaşanmaması gerekiyordu. Bu doğrultuda firmamızın yaptığı yapı sistem önerisi kabul görüp çalışmalarımıza başladık.

2 KAZI-DESTEKLEME VE DELME - PATLATMANIN TASARLANMASI

Giriş bölümünde de bahsettiğimiz gibi bacanın açılacağı bölgenin jeolojik yapısı ve kaya kalitesinin düşük oluşu, bu bacanın uzun yıllar hizmet etmesi beklentisi ile diğer bacalardan farklı olarak ilk kez Şekil 1'de de görüldüğü gibi çelik hasır, shotcrete ve rebar dan oluşan bir tahkimat sistemi öngörülmüştür.

Şekil 1'den de anlaşılacağı üzere, açılacak kuyu üzeri imalat boyunca prosedürlere uygun olması açısından çelik kapak ile

kapanacağından, patlatma sonrası açığa çıkacak olan pasanın tümü yeraltındaki galeriden alınacağından, öncelikli olarak 2 m genişliğinde bir slot deliği tasarlanmış ve bu delik açıldıktan sonra ise kuyunun geri kalan geometrisi, havalı tabancalar ile delme patlatma tekniğine uygun olarak tamamlanması ve tahkim edilmesi öngörülmüştür.



Şekil 1. Kazı ve destekleme önerisi

3 ÇALIŞMA SAHASININ DÜZENLENMESİ

Çalışma yapacağımız bölge Orman işletmesine ait olduğu için, öncesinde gerekli izinler alına bilmesi için uzun bir süre beklenilmiş ve izinler alındıktan sonra, sahaya gidilerek çalışmalarımıza başlayabildik. Havalandırma bacasının arazi içerisindeki çıkış noktası, orman içi ulaşım yolların birbiriyle kesiştiği kavşağın merkezinde oluşu nedeni ile öncelikli olarak Şekil 2'de görüldüğü gibi yollar yeniden dizayn edilerek çalışma sahası düzenlenmiş ve saha güvenlik altına alınmıştır.

Baca yeri belirlendikten sonra, tüm çalışma sahası güvenlik açısından tel çit ile çevrilmiş ve çalışmalarda faydalanacağımız basınçlı hava ve su için yeraltındaki galeriyi kesecek şekilde, Şekil 3'deki gibi sondaj yapılarak, gerekli hava ve su yüzeye alınmıştır.

Şekil 2. Çalışma sahasının düzenlenmesi

Şekil 3. Servis hatlarının yüzeye alınması

4 AĞIZ YAKASI BETONU VE DELGİ HAZIRLIĞI

Çalışma sahası yeterli güvenlik altına alındıktan sonra ağız yakası betonu hazırlıklarına başlanılmış ve Şekil 1 ve Şekil 4-5'de de görüldüğü gibi projeye uygun olarak tamamlanmıştır.

Şekil 4. Ağız yakası beton kalıbi

Şekil 5. Ağız yakası beton donatısı

Ağız yakası betonu döküldükten sonra, delgi makinesinin üzerinde çalışacağı platform oluşturulması için öncelikle ağız yakası betonu içerisinde dökülecek olan düşük dozajlı betonun yaka betonu ile temasını kesmek için Şekil 6'da da görüldüğü gibi yaka içerisine strafor çakılarak derz oluşturulmuştur.

Şekil 6. Dolgu betonu öncesi derz oluşturma

Sondaj makinesi çalışma platformu için oluşturulan bu dikdörtgen baca, Şekil 7'de de görüldüğü gibi içerisi düşük dozajlı beton ile (C 14) doldurulmuş ve prize bırakılmıştır.

Şekil 7. Dolgu betonu

Beton piriz aşamasında işçilerin gerek baca üzerindeki kapak montaj ve demontaj aşamalarında ve gerekse kazı destekleme aşamalarında kendilerini emniyete alacakları can hatlarının kurulumu tamamlanmıştır.

5 SLOT BOŞLUĞUNUN OLUŞTURULMASI

5.1 Slot Patlatma Deliklerinin Delinmesi

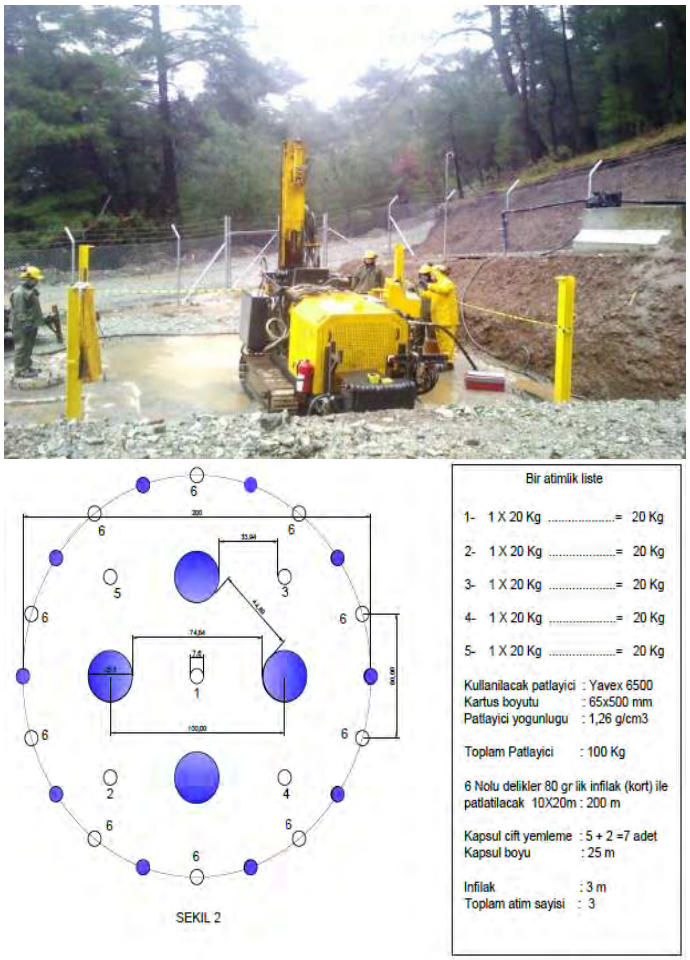
Yaka betonu içerisine dökülen betonun priz almasının ardından sondaj makinesi Şekil 8'de görüldüğü gibi çalışma bölgesine getirilmiş ve oluşturulacak olan slot boşluğunun patlatma delik yerleri topografik olarak işaretlendikten sonra Şekil 8'deki patlatma paternlerine oygun olarak delinip tamamlanmıştır.

Delik boyları 20 m olup, delik çapları ise, orta çekme delikleri için 10 inç olarak delinmiş, diğer tüm delikler 3 inç olacak şekilde Şekil 9'daki gibi tamamlanarak takozlanmıştır.

5.2 Slot Deliklerinin Patlatılması

Slot boşluğunu oluşturmak amacıyla Şekil 8'deki paterne uygun olacak şekilde aşağıdan yukarıya doğru kademeli olmak üzere 3 ayrı patlatma yapılarak (Şekil 10). 2 m çapında slot boşluğu oluşturulmuştur (Şekil 11).

Patlatmalarda, jeologların vermiş olduğu raporlara dayanarak 1,2,3,4,5 nolu deliklerde 1,26 g/cm^3 düşük yoğunluklu yavex 6500, çevre deliklerin patlatılmasında ise 80 g'lık kortlar kullanılmıştır.



Şekil 8. Delgi makinesi ve patlatma paterni

Şekil 9. Deliklerin takozlanması

Şekil 10. Deliklerin doldurulması

Şekil 11. Patlatma sonrası açılan slot boşluk

6 KUYU ÜZERİNDEKİ ÇELİK PLATFORMUN VE PERGEL VİNÇ'İN KURULMASI

Tüprag prosedürlerine göre açılacak olan kuyunun içerisinde çalışacak olan personelin çalışma süresince kesinlikle yeryüzü ile temasının olmaması ve adeta kapalı bir alanda çalışılması gerekiyordu. Bundan dolayıdır ki, kuyu üzerini tamamen kaplayacak ve ihtiyaçlara imkan verecek şekilde (havalandırma, malzeme iniş ve çıkışı, aydınlatma vs) bir çelik konstrüksüyon yapı imal edilmiş ve Şekil 12 ve 13'deki gibi montaj edilerek tamamlanmıştır.

Şekil 12. Çelik konstrüksüyon yapı montajı

Şekil 13. Kuyu üstü konstrüksüyon yapı

6.1 Kuyu Personeli ve Emniyet Gereçleri

Kuyu içerisinde çalışacak olan personelin seçiminde de özen gösterilmiş ve bu personeller kapak montajını takiben kuyu içerisinde çalışmaya başlayacaklarından dolayı, alacakları eğitimlerde göz önünde bulundurularak yaklaşık bir ay öncesinden girişleri yapılmış ve aşağıda sıralayacağımız bu eğitimler tamamlanmıştır.

a-Yerüstü eğitimi
b-Yer altı eğitimi
c-Kapalı alan eğitimi
d-İzolasyon eğitimi
e-Sıcak iş izni eğitimi
f-Yüksekte çalışma eğitimi

Kapak montajının ardından kuyu içerisinde çalışacak personelin çalışma platformunu oluşturabilmesi ve tahkimat elemanlarının uygulanabilmesi açısından, açılan slot boşluğu Şekil 14'de de görüldüğü gibi dışarıdan getirilen ve akışkanlığı daha rahat olan dere çakılı ile doldurulmuştur.

Şekil 14. Slot'un dere çakılı ile doldurulması

Kapak üzerindeki çalışmalarda elemanların kendilerini askıya alacakları yaşam halatları (Şekil 15) ve geri sarmalı emniyet halatlarının bağlandığı galvanizli plakaların montajı tamamlanmıştır (Şekil 16).

Şekil 15. Geri sarmalı emniyet halatı

Şekil 16. Halatın bağlı olduğu galvenizli saç

Kuyu personeli kuyu içerisinde bulundukları süre içerisinde kendilerini bu plakalarda asılı duran 40 m uzunluğu olan geri sarmalı emniyet halatlarına bağlı olarak çalışmaktaydılar (Şekil 17).

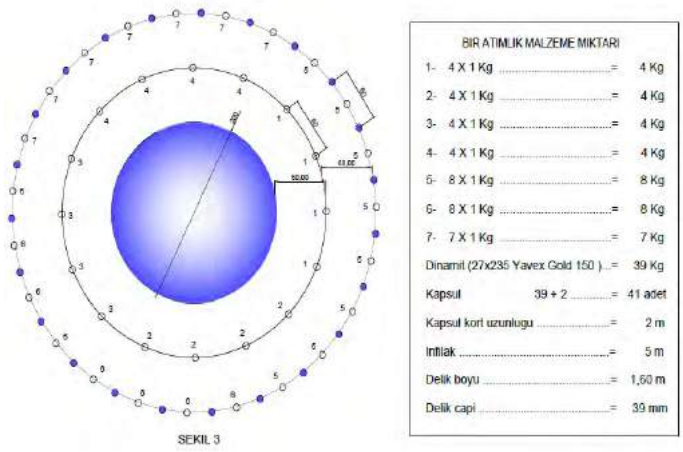
Şekil 17. Emniyet halatına bağlı çalışanlar

7 KUYU İÇERİSİNDE İLERLEME

Kuyu içerisindeki çalışmalarda slot boşluğu, patlatma delgisi, dinamit dolumu ve tahkimat çalışmaları süresince sürekli dolu vaziyette tutularak elemanların hareket kabiliyetleri sağlanmıştır.

7.1 Patlatma Delgisi

Patlatma delgileri Şekil 18'deki paterne uygun olarak havalı el tabancaları ile 39 mm çapında ve 1,60 m derinliğinde olacak şekilde iki sıra delinerek tamamlanmıştır.



Şekil 18. Kuyu içi patlatma paterni

7.2 Dolum ve Patlatma

Delikler paterne uygun delindikten sonra ateşçi kuyu tabanına inerek, delik temizliği yaparak, Şekil 19'daki gibi delikleri doldurmuştur. Dinamit olarak 27X235 yavex gold 150 tipi patlayıcı kullanılmıştır. Dolum tamamlandıktan sonra dikkat edilmesi gereken en önemli şey, patlatma öncesi patlatmadan meydana çıkacak olan pasa miktarı kadar hafriyatın slot boşluğu vasıtası ile bir alt kattan alınmasıdır. Alt kattan hafriyat alındıkça, alınan miktarın doldurduğu mesafe kadar kuyu tabanındaki dolu olan slot ta boşluk oluşturulmuş olur (Şekil 20). Bu işlem esnasında yerüstü ile yeraltı irtibatta olup yeteri derinliğe ulaştığında hafriyat alım işleminin durdurulması gerekir. Diğer bir dikkat edilmesi gereken husus ise, pasa alması esnasında kuyu tabanında kademeli çökme olacağından, ateşçinin bağlamış olduğu kapsül kortlarının bu çökmeden zarar görmeyecek mesafede kuyu cidarına bağlanmış olmasıdır. Aksi halde çökme neticesinde kortlarla beraber kapsüller slot boşluğuna düşerek patlatmanın başarısız olmasına sebebiyet verebilir.

Şekil 19. Kuyu içi deliklerin doldurulması

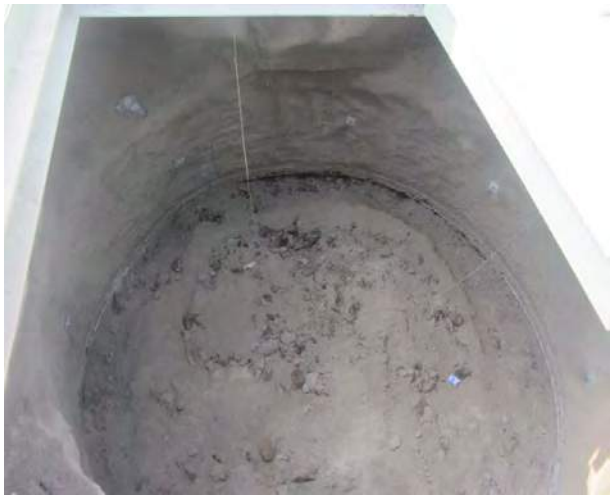
7.3 Tahkimat

Patlatma işlemi sonrası kuyu içi havalandırma tamamlandıktan sonra, kuyu elemanları kuyuya inerek taban temizliği yaparak kuyu cidarında kurtarmayan yerleri şakül yardımı ile tespit edip, havalı kırıcılar ile taramıştır. Diğer taraftan da kurtaran yerlerde ise çift kat çelik hasır montajı yapmışlardır (Şekil 21). Hasır montajını müteakip 20 cm kalınlığında

püskürtme beton uygulaması yapılmıştır. En son olarak da kuyu çevresi, Şekil 1'deki projede gösterildiği paternde 2,1 m'lik rebar delgileri yapılmıştır. Bu deliklere yerleştirilecek olan rebarlar, herhangi bir zaman kaybına neden olmamak ve bir sonraki iş kalemine hemen geçebilmek için, reçineli olarak çakılmış ve akabinde bu rebarlar istenilen değerlerde torklanarak ring tamamlanmıştır (Şekil 22).

Şekil 20. Kuyu içinden pasa alınması

Şekil 21. Çelik hasır montajı



Şekil 22. Kuyu cidarına çakılan rebarlar

7.4 Merdiven Montajı

Kuyuda ilerleme yukarıda anlatıldığı periyotta devam ederken, kuyu çalışanlarının kuyu tabanına inmesi ve çıkabilmeleri için kuyu tabanındaki tahkimat çalışmalarından etkilenmeyecek mesafede 3 m'lik gemici merdivenleri monte edilmiştir (Şekil 23). Merdivenler galvanizli olup sipariş usulü imal edilmişlerdir. Merdivenlerin montaj çalışması esnasında kuyuda başka bir çalışmaya prosedür gereği izin verilmemiştir. Kuyu içerisine malzeme iniş çıkışı ve acil çıkışlar için ayrıca kuyu başında pergel vinç montajı yapılmıştır.

Şekil 23. Gemici merdiven montajı

Tüm bu kuyu içi çalışmaları aynı periyotlarla devam ederek kuyu 20. metrede 592 katıyla birleşmiştir. Kuyunun 592 katıyla olan birleşme kontağında, galeriden gelen tahkimat sistemiyle kuyu tahkimat sistemi birleştirilmiştir (Şekil 24). 592 katına monte edilecek olan egzoz fanların üfleme yönleri kuyuya doğru olduğundan hava akımının daha rahat olması için kuyu bitiş km sinden galeri içine doğru pahlı dolgu ve üzeri çelik hasır ve shotcrete ile desteklenerek eğim verilmiştir (Şekil 25).

Şekil 24. Kuyu ile galeri tahkimatlarının birleştirilmesi

Şekil 25.Kuyu ile galerinin pahlı birleştirilmesi

Şekil 26. Kuyu etrafının kapatılıp izole edilmesi

8 SONUÇ

Kuyu tabanı ve 592 katı içerisindeki çalışmalar tamamlandıktan sonra, daha önce yazımızın başında bahsettiğimiz gibi, çalışma sahamız orman arazisi içerisinde olduğundan dolayı, yer üstündeki tüm çalışma alanı rehabilite edilerek, çalışma öncesi ilk haline dönüştürülmüştür. Etraftaki tüm betonlar kırılmış, şantiye etrafını çevreleyen tel çitler sökülerek sadece kuyu etrafını korumak ve kuyuya giriş çıkışı engellemek amacıyla tel çitler kısıtlı alanda yeniden monte edilmiştir. Kuyu etrafı galvanizli sac plakalar ile çevrilmiş, kuyu ağzı, içerisine herhangi bir canlı ve cansız varlığın girişini engelleyecek şekilde kapatılmıştır (Şekil 26).

Kuyu Kazı Performansının Optimizasyonu ve Kalite Yönetimi
Optimising Shaft Sinking Performance and Quality Management

E. Soyer, S. Topcan
Polyak Eynez Enerji Üretim Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş., İzmir

ÖZET Bu çalışma; Soma linyit kömürü havzasında açılmış iki adet derin maden kuyularının kazı tekniği ve kalite kontrol yönetimi hakkında bilgi vermektedir. Dünya çapında örnek teşkil edecek ilerleme performansının sağlandığı kuyu kazı faaliyetinde, iş akışlarında yerine getirilen optimizasyonların etkisi anlatmaktadır. Söz konusu kömür ocağı, Türkiye'nin en derin linyit kömür işletmesi olacaktır.

ABSTRACT This study presents data regarding sinking method and quality management of the two deep shafts constructed in lignite-bearing Soma basin. The advance rate recorded during shaft sinking operations due to optimisation will set a world-renowned example. The said coal mine will be the deepest underground mine in Turkey.

1 GİRİŞ

İzmir' in Kınık ilçesi Elmadere köyünde bulunan, Polyak Eynez Enerji Üretim Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından linyit kömürü üretimi için bir adet servis kuyusu, bir adet havalandırma kuyusu ve bir adet desandre açılması faaliyetleri sürdürülmektedir. Maden projesine hizmet edecek şekilde, kuyu çapları net 8 m, betonarme olarak tamamlanan kuyu boyları 843 m'dir Proje, Türkiye'nin en derin linyit kömür işletmesi olma özelliğini taşımaktadır. Yapılan pilot sondajlar neticesinde hazırlanan jeolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik raporların değerlendirilmesi sonucu kuyu yeri seçimi yapılmıştır. Kuyu kazı aşamasında yapılan optimizasyonlar sayesinde elde edilen olumlu sonuçlar incelenmiştir.

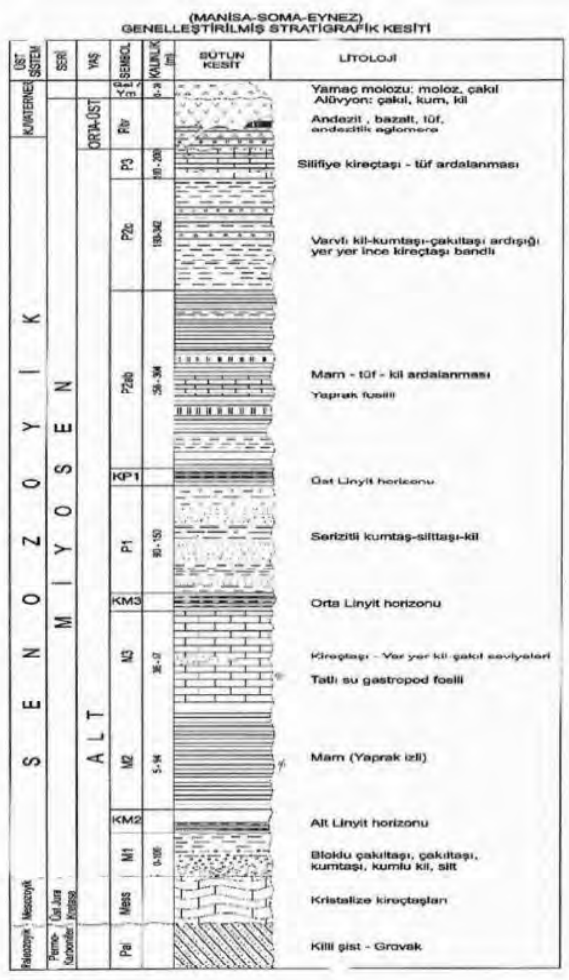
2 ÇALIŞMA ALANI

2.1 Jeolojik durum

Kuyu açma işinin yürütüldüğü ruhsat sahasının kömür jeolojisini araştırmaya yönelik çalışma Tüysüz ve Genç (2013) tarafından yapılmıştır. Saha jeolojisi ile ilgili bilgiler bu çalışmalardan derlenmiştir. Çalışma alanının tabanında Triyas yaşlı zayıf dereceli metamorfik çökel kayaları yer almaktadır (Kınık formasyonu). Temel birimleri üzerinde açısal uyumsuzluk ile Neojen birimleri depolanmıştır. Bunlar başlıca Karasal (gölsel) çökeller ve volkanik birimlerden oluşmaktadır.

Kınık formasyonu çökel kökenli, metamorfizmaya uğramış fliş benzeri bir istiftir. Sleyt, fillat, metakumtaşı litolojilerinden oluşmakta ve değişik boyutlarda Permiyen yaşlı rekristalize kireçtaşı blokları içermektedir. Soma formasyonu inceleme alanı içerisinde mostra vermez. Ruhsat sahasında açılmış olan tüm sondajlarda oldukça kalın kesilmiştir. Şekil1'de verilen çalışma alanına ait jeolojik kesit, aynı zamanda sahadaki litolojiyi

göstermektedir. Soma formasyonu ruhsat sahası içinde açılmış olan sondajlarda, metamorfik kayalar üzerinde diskordan olarak oturan bir taban çakıltaşı ile başlamaktadır. Çakıltaşları gri renkli, ince-orta tane boylu ve kum, silt bağlayıcılıdır. Sondaj loglarında "M1" simgesi ile gösterilmiş taban kırıntılıları üzerinde, kalınlığı 3,5 m ile 30 m arasında değişen bir linyit zonu gelir. Bölge Neojen literatüründe "KM2" olarak bilinen bu linyit zonu genellikle sert, masif, siyah ve parlak bir görünüme sahiptir. KM2'nin alt bölümlerinde linyit kalitesi düşmekte ve kil oranı artmaktadır. KM2 zonunun üzerine mavimsi-gri renkli bir marn seviyesi gelmektedir. M2 olarak tanımlanmış olan bu litolojiyi Brinkmann vd. (1970) istifte daha üstte yer alan kireçtaşları ile (M3) birleştirerek marn ve kireçtaşlarının her ikisini birden "marn-kalker serisi" olarak tanımlamıştır.



Şekil 1. Soma kömür havzası genelleştirilmiş stratigrafik kesit (İnci, 1998)

Deniş Formasyonu Soma formasyonu üzerine gelen kömür ara katkılı kırıntılı bir çökel istifidir. Birim içinde Nebert (1978) tarafından alttan üste doğru 6 alt seri tanımlanmıştır. Bunlar; Kumtaşı-Silttaşı-Alacalı Kil seviyesi (P1), Üst Linyit seviyesi (KP1), Kil-Tüf-Marn seviyesi (P2ab), Kil-Kumtaşı-Çakıltaşı seviyesi (P2c), İnce çakıllı (silisli) kalker seviyesi (P3) ve Tüf-aglomera (P4 veya Pltv) seviyelerini tanımlamıştır.

Deniş formasyonunun en üstünü oluşturan ve P4 seviyesi olarak bilinen tüf ve lav biriminin ana kütlesini piroklastik düzeyler oluşturmaktadır. Bunlar piroklastik döküntü ve akıntı birimleri ile temsil edilir. Genellikle latitik-andezitik bir volkanizmanın ürünü olan piroklastik akıntı birimleri alttaki ince taneli piroklastik ve/veya çökeller üzerine yer yer kazıyarak ve onları deforme ederek oturmaktadır. Diğer grup piroklastikler ise döküntü birimleri olarak muntazam tabakalı, iyi boylanmalı, bolca pumisli ve derecelenmeli olup, Deniş formasyonunun sedimanter kayaları ile uyumlu görünmektedir. Volkanik dizi içerisinde yer alan diğer bir kaya grubu Elmadere köyü ve yakın dolaylarında tipik mostraları gözlenen akma breşleridir. Değişik boyutlarda ve köşeli lav çakılları ile yine aynı lavın bağlayıcı olduğu, kötü ama belirgin, kalın tabakalı litolojilerden oluşmaktadır.

Piroklastik akıntı ve döküntü birimleri latitik, andezitik, nadiren dasitik ince lav düzeyleri ile ara katkılı akma breşi ve lahar düzeylerinden oluşur. Lahar düzeyleri orta-iri boyutta, genellikle yuvarlak ve küresel biçimli andezit, latit, yer yer dasit bileşimli çakıl ve bloklardan oluşmaktadır. Volkanik topluluğa ait lav düzeyleri ise piroklastik birimler arasında yer yer ara katkı konumunda yer almakta ve topluluğun en üst kesimlerini oluşturmaktadır. Lavlar gri, bej-krem, pembe renkli, yer yer sert, bol çatlaklı olup sık sık akma yapısı göstermektedir. Genellikle andezit, trakiandezit ve dasit bileşimindedirler. Çoğunlukla lav akıntıları ile temsil edilseler de bazı alanlarda çökeller ve piroklastikleri kesen dayk ve damar sistemleri de izlenmiştir. Bunun tipik

örnekleri inceleme alanının güney kesimlerinde Kocadere doğu ve batı yamaçları ile Kızkaya civarında görülmektedir.

3 KUYU KAZI AŞAMALARI

3.1 Kuyu Kazı Sisteminin Kurulması

Kuyu kazısını yapabilmek için ilk önce kazı sisteminin kurulması gerekmektedir. Kazı sistemi şovelman, ana ve yardımcı vinç, mini beton santrali, kuyu içinde kullanılacak 3 katlı kazı platformu, kompresör binası, sinyal odalarından oluşmaktadır. Kazı ekipmanları gelmeden önce vinç binalarının temelleri, trafo daireleri, ana ve yardımcı vinçlerin temel betonları, ve şovelman ayakları, kuyu kazı yerleşim planına göre hazır hale getirilmelidir. Söz konusu hazırlıklardan sonra, kuyu kazı sisteminin kurulmasına başlanabilir. Şekil 2'de kazı şovelmanı kurulumu görülmektedir.

Şekil 2. Şovelman kurulumu

Kuyu kazı sisteminin kurulmasına müteakip, kuyu yakasının kazısı ile birlikte kuyu kazı faaliyeti fiili olarak başlar. Kuyu yakası olarak tanımlanan ilk 5 m'lik kısmın kazısı, jeolojik duruma göre delme patlatma ya da ekskavatör ile kazılabilir. Açılacak kuyunun daha sonraki görevine göre, nihai durumda eğer itici sistem yerleştirilecekse, kuyu yakasında yapılacak daha sonraki revizelerin kolaylığı için ilk 2.5 m, betonarme yerine tuğla ile örülmesi yeterlidir. Kuyu kapağı sisteminin kurularak, kazı platformu ve şemsiye delici jumbonun çalışması gerekli olan 25-30 m. ilerleme yapılana kadar, kuyu kazı süreci ağır ve kontrollü olarak yürütülmelidir. Kuyu başındaki çalışmaların hava şartlarından olumsuz etkilenmemesi için şovelmanların 1. Katı ve mini kuyu başındaki beton santrali tamamen kapatılmalıdır (Şekil 3).

Şekil 3. Şovelman, beton santrali kurulum sonrası görünüm

3.2 İş Akış Aşamaları

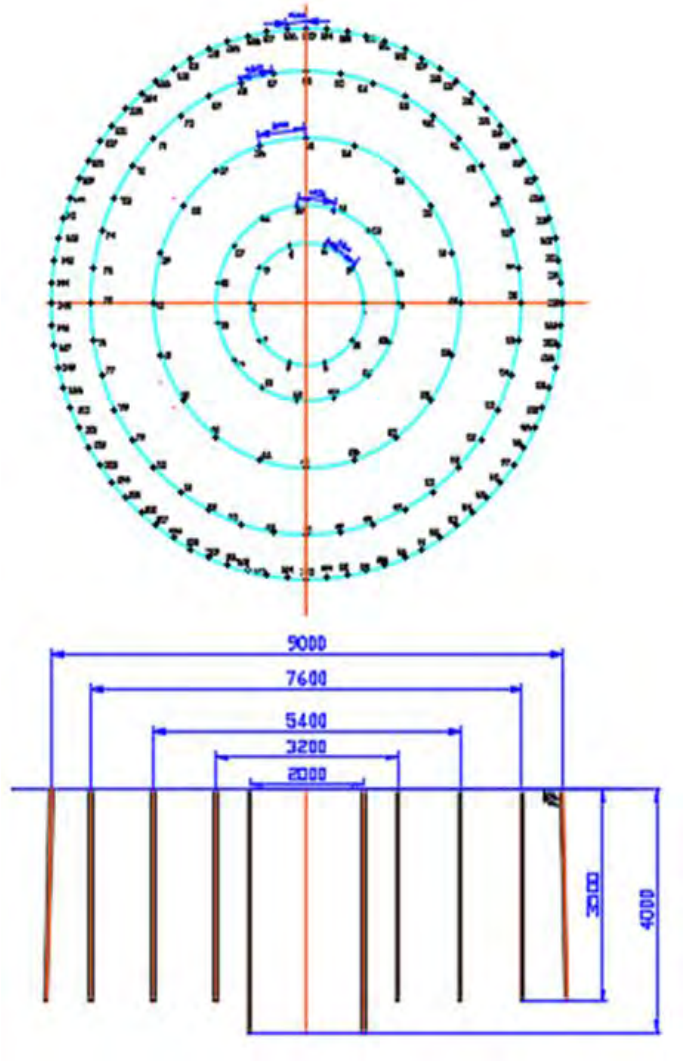
Kuyu kazısında ilk 25-30 m'nin kazısı emek yoğun olarak çalışılmaktadır. Kaktüs kepçelerin, kazı platformunun kurulabilmesi ve şemsiye delicilerin güvenli olarak çalışabilmesi için 25-30 m. kadar kuyu kazısının tamamlanması gerekmektedir. Betonarme kuyu kazılarında, beton kalıbının yüksekliğine göre, her bir kalıbın betonlanması için iş akış döngüsü söz konusudur. İlk 30 m'lik kuyu kazısı için tekrarlanan iş döngüsünde bir beton kalıbının tamamlanma süresi ortalama 36 saattir. Kuyu kazı sistemi tamamlanana kadar ilk 30 m'lik kısım için oluşan bir kalıplık beton döngüsü Şekil 4'te verilmiştir.

Şekil 4. İş akışı döngüsü

3.2.1 Delik delme

Delik delme işlemi şemsiye tipi delici ile yapılmaktadır. Şemsiye delici basınçlı hava ile çalışan, 8 kollu bir jumbodur. Aynı anda 8 adet 4,5-5 m uzunluğunda farklı açılarda delik delme kapasitesine sahiptir. Projedeki kazı çapına göre 6-8-10 kollu şemsiye deliciler delgi işlerinde kullanılabilmektedir. Türkiye'de 6 kollu şemsiye delici ile açılmış 8 m net çaplı kuyu projelerindeki tecrübeler ile 8 kollu şemsiye tipi delicinin kullanılması sağlanarak delik delme süresi 8 saatten 5 saate düşürülmüştür.

Geçilen jeolojik formasyonlara göre ayrı ayrı delik paterni yapılarak, fazla dinamit şarjı sebebiyle patlatılan bölgenin aşırı örselenmesi, gereğinden fazla pasa alımı ve projede ön görülen toleranslardan fazla beton dökülmesi engellenerek ilave zaman ve maliyetin önüne geçilmiştir. Dinamit şarjı yapıldıktan sonra kuyu tamamen boşaltılarak, atım kuyu dışından yapılmaktadır. 9 m kazı çapına sahip kuyu kazısı projesi için örnek patlatma paterni Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Havalandırma kuyu patlatma paterni

3.2.2 Pasa alımı ve kuyu cidarı tarama

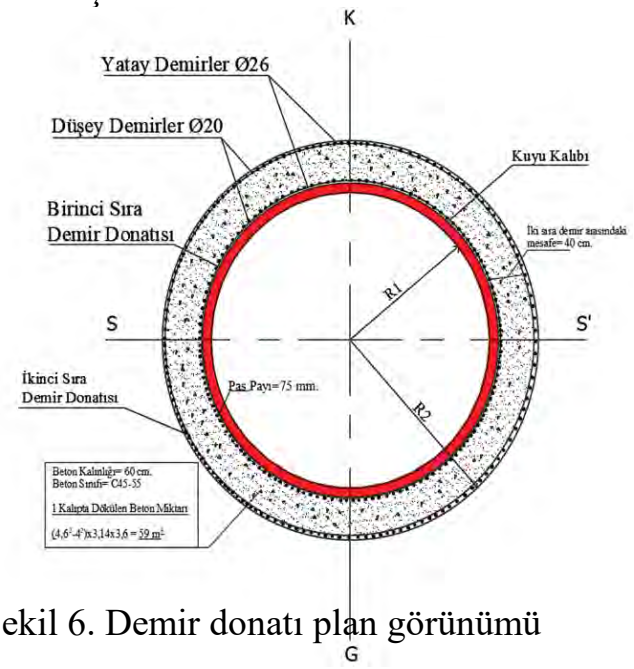
Atım sonrası kuyu içi havalandırılarak, gaz izleme sisteminden takip edilen kuyu içi hava ortamı mevzuatlarda belirtilen değerlere döndükten sonra, pasa alım işi yapılmaktadır. Pasa alımı, kaktüs kepçeler vasıtasıyla 5 m^3'lük pasa kovalarına yüklenerek, şovelmanın 1. katında bulunan tumba sistemi ile kuyu dışına çıkarılarak kamyonlar ile döküm sahasına sevk edilir. Kuyu projesinin kazı çapı ve uzunluğuna göre, pasa alımı işinde kullanılacak kaktüs kepçe bir ya da iki adet olarak kuyu içine kurulabilir. Söz konusu kuyu projesinde her bir kuyuda iki adet kaktüs kepçe kurulması sağlanarak, iki adet pasa kovasına ayrı ayrı yükleme yapılması mümkün kılınarak kuyu içindeki pasanın kesintisiz transferi sağlanmıştır Bu sayede, tek kaktüs kepçeli sisteme göre pas alımı süresi 8 saatten 5 saate düşmüştür. Ayrıca tek kaktüs kepçeli

projelerde kaktüs kepçenin çalışma alanı tüm kuyuyu kapsamak zorunda olduğundan, dar ortamda çalışma durumunda iş güvenliği açısından ayrı bir risk oluşturmaktadır. İki kaktüs kepçeli sistem ile söz konusu risk en aza indirilmiştir.

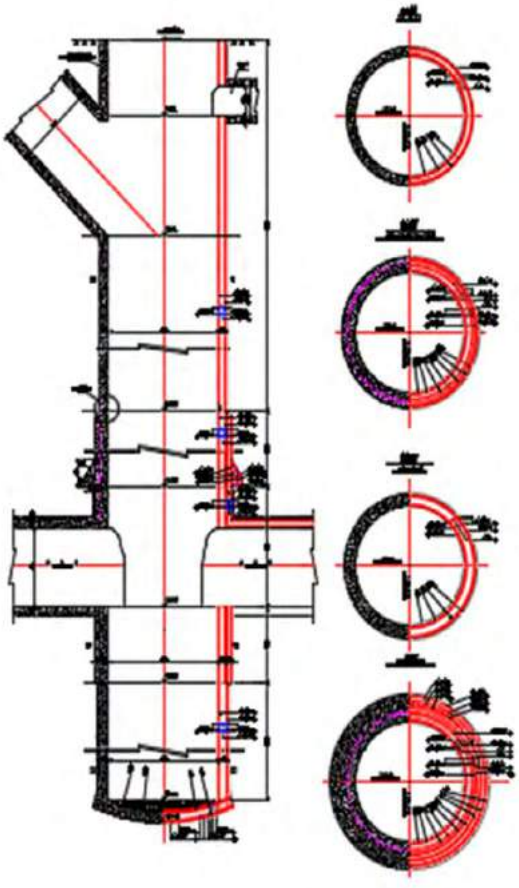
Kullanılan beton kalıbı yüksekliğine göre pasa alımı tamamlandıktan sonra demir örme işlemi yapılmaktadır. Formasyonun zayıf olduğu durumlarda kuyu duvarına 2-3 m' lik kaya saplamaları uygulanmaktadır. Bu sayede kuyu duvarında jeolojik olarak zayıf olduğu bölgelerde akma ya da döküntü yaşanmadığından, ilave pasa alma işi engellenmektedir. Demir örme işi tamamlandıktan sonra, kuyu duvarının akması sebebiyle, zarar gören demir donatının düzeltilmesi sırasında yaşanacak vakit kaybı ve iş kazası riskleri ortadan kaldırılarak, iş akış döngüsünde toplam süreler belirgin düzeyde aşağı çekilmiştir. Kuyu içinin dar olmasından dolayı güvenli çalışma ortamının sağlanması kritik önem taşımaktadır.

3.2.3 Demir örme, kalıp indirme ve ölçü alımı

Kuyu betonarme projesinde yatayda Ø26 mm, düşeyde Ø20 mm ve iki sıra arasında Ø12 mm çapında B420C kalitesinde nervürlü inşaat demiri kullanılmıştır (Şekil 4). Nervürlü demirler 12 m düz olarak sahaya nakledildikten sonra, yatayda kullanılacak demirler kuyu çapına göre kesim ve büküm işlemine tabi tutulur, Düşeyde kullanılacak demirlere bir sonraki kalıptaki demir ile bağlantı için bırakılan filizleri birbirine bindirerek eklemek yerine, ekleme manşonu sistemi ile bağlanmaktadır. Bu sayede demir hazırlama işlerinden çıkacak firelerin önüne geçilerek maliyet düşürülmüş, demir hazırlama süresi kısalmış, demir donatı bağlamada işçilik hataları en aza indirilmiştir. Kuyu'nun 0-650 m arası imalatı tek katman betonarme olarak tamamlanmış olup 650-843 m arası jeolojik birimin zayıf ve akifer içindeki su basıncından çift katman betonarme olarak olarak tamamlanmıştır. Çift katmanlı betonarme sistemin; ilk önce dış katmanlı betonarme kuyu kazısı yukarıdan aşağıya doğru tamamlandıktan sonra, aşağıdan yukarıya doğru iç katman betonlama yapılır. İç katmanlı betonarme, üç katlı kazı platformunun altına ilave platform asılarak, aşağıdan yukarıya doğru demir örme ve bir metre yüksekliğindeki kalıpların üst üste bindirilerek beton dökülmesi şeklinde tamamlanır. Demir donatı plan görünümü Şekil 6 da, kuyu tahkimat planı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Demir donatı plan görünümü



Şekil 7. Havalandırma kuyusu tahkimat planı

Kuyu kalıbı iki parçadır. Demir örme işlemi başlamadan önce, çelik kuyu kalıbının üzerine oturduğu ikinci parça olan çember şeklindeki mahmuz, kuyu tabanına indirilir. Kuyu merkez şakülü ve su terazisi yardımıyla kalıp mahmuzu teraziye alınır. Terazi işi sonrası demir örme işlemi başlar. Demir örme işlemi sırasında ön sıra ve arka sıra demirlerin merkez şaküle göre uzaklıkları ölçülür. Her kalıp için, demir donatı projesine göre pas payları, iki sıra demir arasındaki ölçüler kontrol edilir. Projeye uygun ise çelik kalıp kuyu başındaki dört adet yardımcı vinç vasıtasıyla kalıp mahmuzuna dengeli şekilde indirilerek en az 8 noktadan yarıçap ve istikamet kontrolüne geçilir.

Ölçüm toleransları

Her kalıp ölçüsünde, yarıçap ve merkez şaküle göre istikamet kaçıklığı için ±3 cm ölçüm toleranslarına göre beton dökümüne izin verilir ve ardından beton dökme işlemine başlanılır. Ölçüm sonuçları tolerans dışında ise beton dökülmesine izin verilmez kalıp tolerans düzeyine getirilene kadar beklenilir.

3.2.4 Beton dökülmesi

Ölçüm sonrası beton dökme işine başlanır. Kuyu başında bulunan beton santralinde C55/67 sınıfında beton hazırlanarak, 2,6 m^3 hacimli beton kovaları ile kuyu dibine indirilir ve kazı platformu üzerine montajlanmış olan, hazne içine boşaltılır, sonra hazneden fil hortumlar vasıtasıyla çelik kuyu kalıbı üzerindeki gözlerden beton dökülür. Beton dökümü sırasında kalıp içine betonun homojen bir şekilde yayılması için vibratörler kullanılır. Beton döküm işi tamamladıktan sonra, temizlik yapılır ve pasa alma işlemine geçilir. Beton dökümü sırasında her kalıpta üç adet 150*150*150 mm. boyutlarında küp numune alınır. Numuneler, hava koşullarından etkilenmeyecek ortamda korunduktan bir gün sonra kür havuzuna konulur (Şekil 8). Daha sonra isteğe göre 3,7 ve 28 günlük tek eksenli basınç testine tabi tutulur. Bu testlerin sonucuna göre dökülen beton kalitesi ve reçetesi kontrol edilir. Kuyu betonu için kurulmuş mini beton santrali otomasyonlu ve en az 3 bunkerli şekilde kurulmalı, kuyu içine manuel olarak hazırlanmış beton dökülmemelidir.

Şekil 8. Kür havuzu ve beton kırım presi

Kuyu başındaki beton santralinden beton kovasına beton nakli demir yolu ve trko sistemi yerine bant konveyör ile yapılarak bir döngüdeki beton dökme süresi 5 saatten 2,5 saate düşürülmüştür.

3.2.5 Kuyu içi nakliyat

Kuyu içinde nakliyat iki ana vinç yardımıyla yapılmaktadır. Her bir kuyuda iki adet ana nakliyat vinci bulunmaktadır. Her bir kuyuda 16 adet yardımcı vinç bulunmaktadır. Her bir yardımcı vincin ayrı bir görevi vardır. Örneğin; 6 adet yardımcı vinç sadece üç katlı kazı platformunu taşımaktadır. 4 adet yardımcı vinç kuyu beton kalıbını taşımaktadır. 1 adet yardımcı vinç kurtarma kapsülünü taşımaktadır. Kazı platformu ve kuyu beton kalıbını taşıyan vinçlerin şovelmanın en üst katında bulunan moletlerin altında yük ölçerler konumlandırılmıştır. (Şekil 9). Bunların amacı, kuyu beton kalıbı ve kazı platformunun tüm halatlarının aynı anda hareketini sağlamaktır. Bu sayede kuyu beton kalıbının ve platformun cidara çarpması, yan dönmesi engellenmektedir.

3.2.6 Kuyu içi haberleşme ve sinyalizasyon

Kuyu içi haberleşme, kuyu dibi, kazı platformu, kuyu başı sinyal odası ve vinç binası arasında kurulmuş sinyalizasyon, telefon, telsiz ve kamera sistemi ile yapılmaktadır.

Şekil 9. Molet altı yük ölçer

Kazı platform ve kuyu başında kurulmuş sinyalizasyon sistemi sayesinde, malzeme ve insan nakliyesi birbirine karıştırılmadan güvenli şekilde yapılması sağlanır. Kazı platformu ve kuyu başındaki sinyalcinin ortak sinyaline göre, vinç operatörü nakliyat vincini idare eder. Kuyu başı sinyalcisi, son sinyali vinç operatörüne iletmeden, vinç operatörü vinci hareket ettiremez. Her bir kuyuda iki adet ana vinç için iki adet yer üstü sinyal odası bulunmaktadır. Söz konusu sinyal odaları, her bir vinç binası ile bağımsız olarak sinyalizasyonu sağlamak üzere görev yapar.

4 KUYU İLERLEMELERİ VE MALİYETLERİ

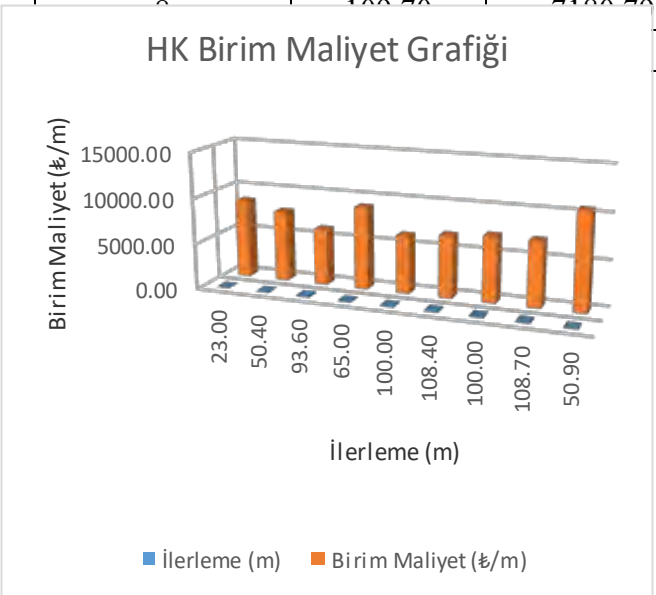
Türkiye'de geçmiş zamanda açılmış kömür madeni kuyularının, kazı çapı ve kuyu boyları değerlendirildiğinde, Polyak Eynez kuyularının aylık ilerleme performansı dünya çapında rekor düzeydedir. Kuyu kazı kesiti 67 m^2'dir. Büyük kazı kesitine rağmen, aylık ilerleme performasının sürdürülebilir olması, yapılan optimizayonların etkisi ile sağlanmıştır. Aylık ilerleme oranlarındaki artış metre maliyetinde görece düşüş meydana getirmiştir. Kuyu kazısı projesi kapsamında, 2016 yılı içinde, iki kuyudaki aylık ilerlemeler ve kazı maliyetine bağlı metre maliyeti Çizelge 1-2 ve Şekil 10-11'de verilmiştir. Söz konusu maliyetlere yüklenici maliyeti ve yüklenicinin kazı ekipmanı maliyeti dahil olmayıp, betornarme sarf malzemeleri, tahkimat malzemesi ve enerji sarfiyatı bedeli dahildir. Dövizden TL'ye çevirim yapılırken, 2016 yılı içindeki ilgili aya ait döviz kuru baz alınmıştır.

Çizelge 1. Havalandırma kuyusu ilerlemeleri ve birim maliyetler

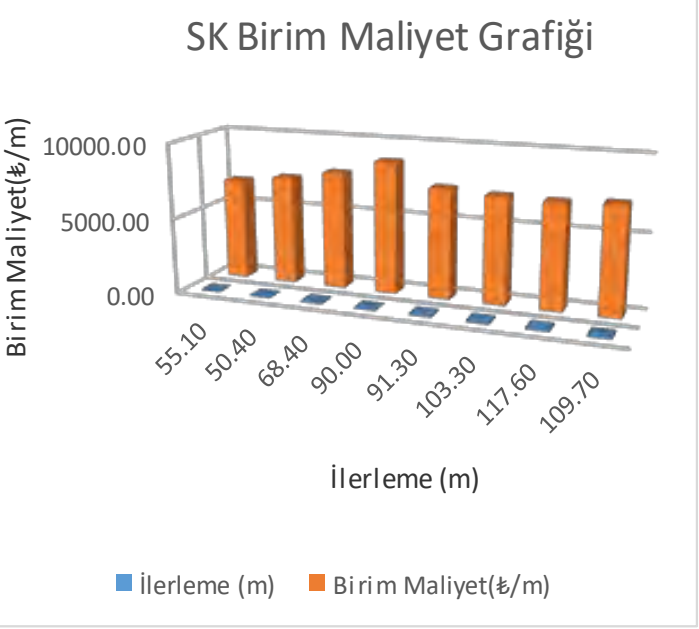
Zaman(Ay)	İlerleme (m)	Maliyet (TL/m)
1	23,00	8627,59
2	50,40	7770,66
3	93,60	6176,86
4	65,00	9030,23
5	100,00	6328,34
6	108,40	6789,81
7	100,00	7173,03
8	108,70	7115,48
9	50,90	10665,08
Toplam	700,00	

Çizelge 2. Servis kuyusu ilerlemeleri ve birim maliyetler

Zaman(Ay)	İlerleme (m)	Maliyet (TL/m)
1	55,10	6757,75
2	50,40	7189,80
3	68,40	7773,85
4	90,00	8764,77
5	91,30	7283,95
6	103,30	7074,66
7	117,60	6990,51



Şekil 10. Havalandırma kuyusu birim maliyet grafiği



Şekil 11. Servis kuyusu birim maliyet grafiği

5 SONUÇLAR

Elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- ✓ Bu bildiri ile, derin maden kuyu kazısı hakkında, ülkemizde bulunan literatür boşluğunun doldurulması hedeflenmiştir.
- ✓ Soma havzasında yürütülen Polyak Eynez linyit kömür üretim projesinde açılan maden kuyuları, havzanın ilk betonarme kuyularıdır.
- ✓ Linyit kömürün işletilmesi ile birlikte Türkiye'nin en derin linyit kömür ocağı faaliyete geçecektir.
- ✓ Yapılan optimizasyonlar sayesinde, kuyu kazısı iş akışında bir kalıp döngüsü 36 saatten 18 saate kadar düşürülmüştür.
- ✓ 67 m^2 kazı çapına sahip kuyu kazı projesinde yurt içi ve yurtdışı madencilik tarihine geçecek düzeyde güvenli ve hızlı ilerleme performansı elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Tüysüz, O., Genç, Ş.C. 2013. *Polyak Eynez (Elmadere) Linyit Sahası Jeolojisi. In: Internal Report for Geological Investigation.*

Inci, U. 1998. *Lignite and carbonate deposition in middle lignite succession of the Soma formation, Soma coal field. Western Turkey, Int J Coal Geology,* Vol.37, pp.287-313.

Kuyu Kazı Çalışmalarında Acil Durumların Yönetimi
Emergency Management for Shaft Sinking

E. Kahraman, Ç. Koçak, E. Soyer
Polyak Eynez A.Ş., İzmir

ÖZET Ülkemiz enerji tüketimi göz önünde bulundurulduğunda, kömürden elde edilen enerji önem arz etmektedir. Ülkemizdeki kömür madenciliği gittikçe derin madenciliğe doğru yönelmektedir. Yeraltı madencilik çalışmalarında derinliğe bağlı olarak, sıcaklık, nem, basınç, nakliye, vb. etkenlerle çalışmalar daha zorlaşmaktadır. Havalandırma, nakliye, vb. problemlerin etkin ve kolay çözümü için kuyu açma çalışmaları önem arz etmektedir. Bu yüzden, önümüzdeki süreçte bir çok kuyu açma çalışması yapılacaktır.

Bütün yeraltı madencilik faaliyetlerinde olduğu gibi, kuyuların açılması/kazısı sırasında acil durumların yönetimi önemlidir. Kuyu kazıları ülkemizde çok bilinen uygulamalar arasında olmadığından riskler tam olarak bilinememektedir. Acil durum planlamasının doğru yapılabilmesi için kuyu kazı faaliyetlerinde risklerin tam bilinebilmesi önem arz etmektedir.

Çalışma kapsamında, kuyu kazı faaliyetlerindeki riskler dikkate alınarak, olası acil durumların meydana gelmemesi için alınacak önlemler sıralanmıştır. Meydana gelen acil durumlarda nasıl davranılması gerektiği ile ilgili kriterler tanımlanarak, uygulamanın sorunlarına yönelik bir rehber oluşturulması amaçlanmıştır.

ABSTRACT While considering the energy consumption in our country, producing energy from coal is very important. Coal mining is going deeper in our country. Depending on the depth of underground mining, it becomes even more difficult due to the factors such as temperature, humidity, pressure, transportation etc. Shaft sinking is very suitable for solving problems about ventilation, transportation etc. Therefore, there will be more shaft sinking process in near future.

Managing emergencies is very important at shaft sinking as in all of underground mining processes. Risks are not well known when sinking a shaft, because methods are not known for shaft sinking in our country. Knowing all of the risks about shaft sinking is very important for true emergency response planning.

Within the scope of this study, risks in shaft sinking operations are considered and emergency responses are sorted. Behaviors and criterions about emergencies are described, aimed guide document for problems operations.

1 GİRİŞ

Bir acil durum, şirket çalışanlarının, şirket sahasında çalışan alt işveren firma personellerinin, ziyaretçilerin veya yakın tesis ya da yerleşim merkezlerinde bulunanların yaralanmasına veya can kaybına neden olabilen, tesisin üretimini kısmen veya tamamen durdurabilen, tesise veya doğal çevreye zarar veren, tesisin finansal yapısını veya toplumdaki imajını tehdit eden planlanmamış olaylardır (URL1). İşyerlerinde işler büyüdükçe ve

karmaşıklaştıkça acil durumlarla karşılaşma riskleri de artmakta, hızlı müdahale ve mücadeleyi zorlaştırmaktadır.

Ülkemizde enerjiye olan gereksinim her geçen gün artmaktadır. TİK verilerine göre, 2005 yılında tüketilen toplam enerji miktarı 51 milyon 398 bin 117 TEP (ton eşdeğer petrol) iken (TİK, 2008), bu miktar 2014 yılı için 100 milyon 734 bin 472 TEP olmuştur (TİK, 2016).

Ülkemizde enerji tüketiminde yakıt bazında yıllık tüketimlere bakıldığında, 2014 yılında en çok doğal gaz tüketilmiş, linyit kömürü 16 milyon 416 bin 93 TEP tüketilirken, üçüncü sırada 15 milyon 981 bin 137 TEP ile taşkömürü tüketimi yer almıştır (TİK, 2016). Tüketimde doğalgaz kullanımı nedeniyle dışa bağımlılığı azaltmak için katı yakıtlardan (linyit, taşkömürü, vb.) kömür madenciliğine yönelim artmış bu durumda yüzeye yakın kömür damarlarının azalmasıyla kömür madenciliğini zorlaştırmaya başlamıştır.

Şekil 1. Toplam enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı (TİK, 2016)

Gittikçe derinleşen kömür madenciliği, açık işletme yöntemiyle üretimi bir tercih olmaktan çıkarmakta, yeraltı üretim yöntemleri ile kömürün üretilmesini zorunlu kılmaktadır. Derin kömür yataklarına ulaşmak amacıyla açılacak yolların (anayollar, hazırlık galerileri, vb.) boyları uzamakta bu durum havalandırma, acil durumlar, vb. için ciddi problemler doğurmaktadır. Aynı zamanda hazırlık süresi ve maliyetler gittikçe artmaktadır. Dolayısıyla, hem iş sağlığı ve güvenliği hem de zaman ve maliyet kazanımları açısından elde edilen avantajları nedeniyle ülkemizde kuyu kazıları ciddi bir alternatif olarak değerlendirilecektir.

Çalışma kapsamında, kuyu açma çalışmalarında karşılaşılabilecek acil durumlar tanımlanarak, alınması gereken önlemlerle ilgili bilgilere yer verilmiştir.

2 KUYU AÇMA ÇALIŞMALARI

2.1 Genel Bilgiler

Kuyu açma; mineral veya gaz üretimi, insan, malzeme ve ekipman nakli, havalandırma, servis (kablo, boru), cevher nakli, yeraltı silosu, güvenlik, vb. amaçlarla istenilen derinliğe düşey veya eğimli bir şekilde erişmek için yapılan yeraltı hazırlık faaliyetleridir.

Kuyu kazı yönteminin seçimi; sahanın jeolojisine, kazılacak formasyonun hidrojeolojik durumuna, kuyunun kazı derinliğine bağlı olarak belirlenir. Kuyu açma faaliyetleri bir yöntemle yapılabildiği gibi, birden fazla yöntemde aynı anda kullanılabilir. Kuyu açma çalışmaları; normal kuyu açma, sürme duvarlı kuyu açma, çelik profil çakma yöntemi, beton perde sondaj yöntemi, vb. (Çizelge 1) gibi birçok yöntem şeklinde uygulanabilmektedir (Köse, vd., 2007).

2.1 Kuyu Kazılarında Kullanılan Ekipmanlar

Acil durumların doğru bir şekilde yönetilebilmesi için iyi bir acil durum eylem planı hazırlanmalıdır. İyi bir plan hazırlanabilmesi için de, kuyu kazı faaliyetlerinde kullanılan ekipmanların ve sistemlerin çok iyi bilinmesi gereklidir.

Normal bir kuyu kazısında (özel durumlar hariç) kullanılan ekipmanlar; kule (şovelman), vinçler, moletler, nakliyat kovaları, çalışma platformları (iskeleler) vb.'dir (Şekil 2).

Kule (Şovelman): Kuyu ekseni üzerinde pasa, personel ve kuyu içine yapılacak bütün malzemelerin nakliyatını gerçekleştirmek amacıyla tesis edilen yerüstü yapılarıdır. Kuleler bir veya daha çok katlı beton, çelik veya her ikisinin kombinasyonunda tesis edilebilirler.

Çizelge 1. Kuyu açma yöntemlerinin teknik uygulama koşulları (Köse, vd., 2007)

Kuyu Açma Yöntemi	Kayaç Durumu	Derinlik (m)	Su Geliri	Tahkimat Cinsi
Normal kuyu açma	Sağlam	Her derinlikte	Az	Ahşap, demir, tuğla, beton, çelik, levha
Sürme duvarlı kuyu açma	Gevşek	25	Her gelirde	Ahşap veya çelik levha
Çelik profil çakma yöntemi	Yumuşak ve gevrek	15-25	Az	Tuğla, beton, çelik levha
Beton perde sondaj yöntemi	Sert	50	Her gelirde	Beton ve beton demirleri
Yarma beton duvar yöntemi	Gevşek	50	Her gelirde	Beton ve beton demirleri
Çakma kuyu yöntemi	Gevşek	30-60	Her gelirde	Tuğla, beton, çelik levha
Basınçlı hava (Caisson) yöntemi	Gevşek	30	Her gelirde	beton, çelik
Su düzeyini indirme yöntemi	Sağlam	10-15	Her gelirde	Ahşap, demir, tuğla, beton, çelik, levha
Suyun dondurulması yöntemi	Her kayaçta	Her derinlikte	Her gelirde	Tuğla, beton, çelik levha+beton tübbing
Çimentolama yöntemi	Sağlam, çatlaklı	Her derinlikte	Her gelirde	Tuğla, beton, çelik levha
Honigmann yöntemi	Gevşek, kumlu	400-600	Her gelirde	Çelik levha
Arama sondajları	Sağlam	100-300	Her gelirde	Beton ve çelik levha

Vinçler: İhtiyaca göre sayıları ve güçleri dizayn edilebilen kuyu içine ve dışına yapılacak bütün nakliyat (personel, pasa, malzeme, vb.) işlemlerini gerçekleştiren kaldırma ekipmanlarıdır.

Şekil 2. Polyak Eynez A.Ş. kuyuları genel görünüm

Moletler: Vinçlerin halatlarının kulelerin üzerinden kuyu içine yönlendirilmesini sağlayan ekipmanlardır.

Pasa boşaltım olukları: Yapılan kazı sonrası çıkan pasanın kovalar aracılığıyla tumba edilmesini sağlayan kulelerin üzerine tesis edilen yapılardır.

Kuyu başı üst kapakları ve muhafazalar: Kuyuların sürekli açık kalmasını önlemek amacıyla kuyuya indirilecek malzemelerin ağırlığını kaldırabilecek özelliklerde pnömatik, hidrolik veya mekanik olarak açılıp kapanabilen ve açıldığında etrafını koruma altına alacak korkuluklar, muhafazaların bütününü oluştururlar.

Acil durum kurtarma vinçleri: Acil durumlar sonrası ana vinçlerin devre dışı kalması durumunda kuyu içinde bulunan personelin yerüstüne nakliyatının gerçekleştirilmesi amacı ile kurulan, ayrı bir enerji kaynağından beslenen kaldırma ekipmanlarıdır.

Enerji ekipmanları: Şalt ve trafo tesisleri içinde bulunan ekipmanlar ve jeneratörlerin bütünüdür.

Kompresörler: Kuyu kazısı esnasında kullanılan bütün pnömatik ekipmanların çalıştırılabilmesi amacıyla tesis edilen basınçlı hava üniteleridir.

Nakliyat kovaları: Kuyu kazısı esnasında personel, malzeme ve pasa nakliyatlarının yapıldığı demirden çeşitli hacimlerde imal edilen ekipmanlardır.

Çalışma platformu: Kuyu içinde kurulan, ihtiyaca göre bir veya daha çok katlı olabilen, kuyu tabanından yaklaşık 15 metre yukarıda bulunan iskelelerdir.

Sekiz kollu Şemsiye tipi delici (Jumbolar): Delme-patlatma ile yapılan kazılarda kullanılan ve patlatma deliklerini delmeye yarayan elektrik veya pnömatik iş makineleridir.

Yükleme makineleri: Kazı sonucu açığa çıkan paşanın nakliyesinin yapılmasını sağlayan ters-düz kepçeli yükleyiciler veya kapma (kaktüs) kepçelerdir.

Beton kalıpları: Nihai beton tahkimatın yapılabilmesi amacıyla kazıyı takip eden pnömatik veya hidrolik olarak açılıp beton işi bittikten sonra kapanabilen veya katlanabilen çelik yapılardır.

3 KUYU KAZI FAALİYETLERİNDE ACİL DURUMLARIN YÖNETİMİ

3.1 Kuyu Kazı Faaliyetlerinde Yaşanmış Kazalara Örnekler

Kuyu kazı faaliyetleri devam ederken meydana gelen kazalar çoğunlukla ağır yaralanma ve ölümle sonuçlanan kazalardır. Bu gibi kazalara dünyanın her yerinde rastlamak mümkündür. Aşağıda kuyu kazı çalışmaları sırasında meydana gelmiş iş kazalarına bazı örnekler verilmiştir:

i. 12 Mayıs 1987 tarihinde Almanya'da Gorleben Exploratory Madeni'nde kazısı devam eden 1 numaralı kuyuda, 7 maden işçisinin 239m derinlikteki kuyu tabanında çalışması esnasında 10m çapında çelik tahkimatın bağlı olduğu 5m yükseklikteki noktadan düşmesi sonucu 3 kişi hafif yaralanmış, 3 kişi ağır yaralanmış ve çalışamaz duruma gelmiş ve 1 kişide kaldırıldığı hastanede birkaç gün sonra hayatını kaybetmiştir (URL 2).

ii. 16 Mart 2013 tarihinde CSA Mine firmasına ait kurşun, çinko, bakır madeninde kuyu kazı çalışmaları esnasında vardiya nezaretçisinin, 12 saatlik gece vardiyasının sonunda 1041m derinlikteki 1 numaralı kuyu tabanından metal kova ile 15m yukarıdaki çalışma platformuna çıkarken kuyu tabanında çalışmaya devam eden kuyu personeline seslenmek için kovadan sarkması sonucu kafası platform ile kova arasına sıkışarak ağır yaralanmış ve kaldırıldığı hastanede hayatını kaybetmiştir (URL 3).

iii. 15 Mart 1991 tarihinde Kanada'da Falconbridge Ltd. firması tarafından yapılan kuyu kazısı çalışması sırasında, kaynak yapılırken eriyik haldeki demir cürufunun yere dökülmüş yağın üzerine düşmesi nedeniyle kuyu tabanında yangın çıkmış, alev daha sonra elektrik kablolarını tutuşturmuş, yangın söndürme cihazları ile yangına müdahale edilmeye çalışılmış fakat yangın söndürme cihazları çalışmamıştır. Bu durum sonucunda hızlı karar verilerek kuyu tabanında bulunan bütün çalışanlar yerüstüne tahliye edilmişlerdir. Olay sonunda yaralanan veya hayatını kaybeden kimse olmamıştır (WSN, 2006).

iv. 28 Haziran 1996 tarihinde Kanada'da Inco Ltd. firması tarafından yapılan kuyu kazı çalışması sırasında, ciddi bir yangın olayı yaşanmıştır. Tam mekanize yapılan kuyu kazısında Jumbo delici ile tabanda delik delinmesi esnasında jumboda spreyleme şeklinde hidrolik yağ kaçağı meydana gelmiş ve çalışanlar tarafından fark edilmemiştir. Kuyu tabanında kullanılan yüksek güçte ve korumasız aydınlatmaların meydana getirdiği ısı yağın parlama sıcaklığına ulaştığında yağ parlamış ve yangına sebebiyet vermiştir. Bu olay sonunda 3 personel yanmış ve 9 personel dumandan etkilenmiştir (WSN, 2006).

3.2 Kuyu Kazılarında Acil Durumlar

Kuyu kazısı devam ederken, kuyularda meydana gelmesi muhtemel acil durumlar aşağıdaki gibidir:

i. Kuyu içinde yangın çıkması,
ii. kuyu içinde ani su geliri ve/veya su baskını,
iii. ani gaz degajı,
iv. gaz, toz patlaması,
v. patlayıcı madde infilakı,
vi. basınçlı ekipmanların patlaması,
vii. kuyu havası içeriğinin zararlı hale gelmesi,
viii. genel iş kazaları,
ix. elektrik kesintisi,
x. iletişim sistemlerinin çökmesi
xi. bilgisayar sistemlerinin çökmesi,

xii. kuyu kazıları esnasında yan duvarların akması, göçük,
xiii. tahkimatı yapılmış alanın deforme olması
xiv. doğal afetler, vb.'dir.

3.3 Acil Durumlara Karşı Alınabilecek Önlemlere Örnekler

Kuyu İçerisinde Yangın Çıkması: Kuyu kazı ekipmanlarının uygun güvenlik donanımlarına sahip olmaması, kuyu içerisinde yapılan sıcak iş çalışmalarında gerekli önlemlerin alınmaması, vb. durumlarda kuyu içerisinde yangın çıkabilir. Kuyu içerisinde yangın çıkmaması için kuyu içerisinde yanıcı madde sokulmaması, kesim-kaynak işlemleri sonrası gerekli önlemlerin alınması, kullanılan elektrikli ekipmanların uygun koruma sistemlerine (ATEX sertifikasyonu, vb.) sahip olması, vb. çalışmalar yapılmalıdır.

Su Baskın Riski: Kuyuda su baskın riski iki türlü olabilir: Kuyunun bulunduğu çalışma alanının yeryüzü kısmında olası sel sularının kuyu içerisine dolması ve/veya kuyu kazısı yapılan formasyonun içerdiği suyun kazı yapılan alan içerisinde ani olarak dolması. Yeryüzünden kuyu içine kuyu ağzından su girişini engellemek oldukça önemlidir. Bunun için kuyunun açılacağı lokasyonda, varsa; şev diplerine drenaj kanalları yapılmalıdır. Şevlere beton atılmalı ve oluşacak yağmur sularının drenaj sistemine aktarılması sağlanmalıdır. Bunun yanında, özellikle kuyu ağız bölgesinin olduğu lokasyonda tabana beton atılmalı, kuyu ağzında şovelmanın üzeri kapatılmalı, ve sahada uygun drenaj sistemi kurulmalıdır. Kuyu kazı faaliyeti sırasında su baskın riski yaşanmaması için kuyu kazısına başlamadan önce gerekli jeolojik etütlerle birlikte, formasyonların su içeriği, suyu geçirme özellikleri, vb. çalışmalar (hidrojeolojik etüt) yapılır. Gerekiyorsa; kuyu kazı faaliyetine başlamadan önce, yerüstünden su drenajı için sondaj yapılır. Bu sondajlar sonucunda uygun su tahliye sistemleri kurularak susuzlaştırma sağlanır. Yine, sondajlar vasıtası ile zemin iyileştirme ve geçirimsizlik sağlamak amacıyla kuyunun açılacağı alan etrafına enjeksiyon çalışması yapılır. Aynı şekilde, kuyu içerisinden kazı sırasında da yapılan sondajların önemi büyüktür. Kazı çalışmaları süresince jeolojik formasyonda göz önünde bulundurularak (*mevcut mevzuat hükümleri de göz önünde bulundurularak*) en az 15 metre topuk bırakılmak suretiyle minimum 25 metre uzunluğunda kontrol sondajları (Resmi Gazete, 2013) yapılır. Su geliri durumuna göre susuzlaştırma çalışmalarına devam edilir.

Ani Gaz Degajı: Ani gaz degajı yaşanmaması için, kuyu ilerleme yönünde (*mevcut mevzuat hükümleri de göz önünde bulundurularak*), en az 15 metre topuk bırakılmak suretiyle minimum 25 metre uzunluğunda kontrol sondajları (Resmi Gazete, 2013) yapılmalıdır. Bu sondajlarda gaz içeriği ölçülmeli ve gerekiyorsa ilave önlemler alınmalıdır.

Gaz/Toz Patlaması: Havasında metan gazı ihtiva eden kuyularda, metan gazının patlayıcı ortamı (grizulu ortam) oluşturması sonucu ısı kaynağı ile bir araya gelmesiyle patlamalar gerçekleşebilir. Özellikle, kömür işletmelerinde kömürün üretildiği bölgelerde gerçekleşen grizu patlamaları sonucu tozla mücadele yeterli olmadığında ikincil patlama olarak kömür tozu patlamaları meydana gelebilir.

Gaz/toz patlaması yaşanmaması için uygun havalandırma dizaynı yapılmalı, yedeklemeli havalandırma sistemleri kurulmalı, toz bastırma sistemleri kurulmalı, kuyu içerisindeki ekipmanlar ATEX sertifikalı seçilmeli, kuyu içerisindeki ocak havası uzaktan gaz izleme sistemi ile düzgün bir şekilde izlenmeli, vb. önlemler alınmalıdır.

Patlayıcı Madde İnfilakı: Kuyu kazılarında ve derinleştirme çalışmalarında genellikle delme-patlatma ile kazı yöntemi kullanılmaktadır. Patlayıcı maddeler kovalar ile kuyu tabanına nakledilmekte ve çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Patlayıcı maddenin kuyu içerisine nakli ve kullanımında alınması gereken önlemler, Patlayıcı Madde Yönergesi ve Nakliyat Yönergesinde belirlenmiş olmalıdır. Patlayıcının kova ile kuyu içerisine nakli sırasında kova ile insan nakli yapılmamalı ve patlayıcı maddeler kova içerisinde özel sandıklarda taşınmalı, kapsüller ile patlayıcı

maddeler aynı kovada taşınmamalıdır. Kuyu içerisinde patlayıcı maddeler gelişigüzel etrafa saçılmamalıdır. Patlayıcı konulacak deliklerin içerisinin basınçlı hava ile temizlenmesi sırasında deliklere patlayıcı madde dolumu yapılmamalıdır. Patlayıcının dolumu ve ateşlenmesi ateşçi tarafından gerçekleştirilmelidir.

Kuyu Havasının İçeriğinin Zararlı ve/veya Hava Miktarının Yetersiz Duruma Gelmesi: Kuyu havalandırmasının yetersiz hale gelmemesi için havalandırma simülasyonu yapılmalı, havalandırma vantilatörleri yedekli olarak çalışabilecek halde dizayn edilmeli, yedek enerji kaynağı olarak jenaratör kurulmalıdır (Resmi Gazete, 2016). Jeneratörün ve vantilatörlerin otomatik devreye girme, vb. testleri periyodik yapılmalıdır.

Genel İş Kazaları: Kuyuda kova ile nakliyat sırasında, kovaya iniş-binişlerde, tahkimat çalışmaları esnasında, vb. iş kazaları yaşanma riski mevcuttur. Haberleşme ve sinyalizasyon sisteminin yedekli ve kesintisiz olması sağlanmalı, halat sistemlerinin, bağlantı elemanlarının, koşum düzenlerinin, vb. seçimine dikkat edilmeli, sistem kurulduktan sonra periyodik kontrolleri dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Yüksekte çalışma için uygun lanyart boyuna sahip emniyet kemerlerinin kullanımı sağlanmalıdır. Personelin KKD kullanımı etkin bir şekilde sağlanmalıdır. Sürekli denetim ve gözetim yapılmalıdır.

Elektrik Kesintisi: Kuyularda meydana gelebilecek elektrik kesintileri sonucunda havalandırma sistemleri duracak, iletişim kesilecek, bilişim sistemleri duracak ve özellikle nakliyat yapılamayacaktır. Bu nedenle, enerji kesintisi meydana geldiğinde bütün sistemi tekrardan devreye alabilecek otomatik olarak devreye girebilen uygun güç ve özellikte yedek enerji kaynağı (jeneratör sistemi) tesis edilmelidir. Ayrıca, ana kaldırma ekipmanlarının devre dışı kalması durumu göz önünde bulundurularak, ayrı bir güç kaynağından beslenen yardımcı kaldırma ekipmanı ve kurtarma kapsülü sistemi kurulmalıdır (Resmi Gazete, 2016).

İletişim Sistemlerinin Çökmesi: Kuyu kazı çalışmaları devam ederken yaşanabilecek en büyük problemlerden birisi iletişim sistemlerinin çökmesidir.

Kuyu tabanı ile yerüstünün bağlantısı iletişim sistemleri ile sağlanabilmektedir. Bu sistemler; sinyalizasyon sistemleri (zil, kampana, ışık, vb.), haberleşme sistemleri (telefon, megafon, telsiz, vb.) olarak iki ana başlıkta incelenebilir. Sinyalizasyon sistemleri sırasıyla; vinç operasyon odaları, kuyu başları, şovelman katları ve kuyu içi platformlarına kurulurlar.

Rutin bir çalışma esnasında daha hızlı ve hatasız bir iletişim sağlanması amacıyla belli kurallar çerçevesinde sinyalizasyon metotları kullanılır. Kuyu içindeki çalışmaların durumu ile ilgili bilgilerin (kovanın indirilmesi/yukarı çekilmesi, diğer malzemelerin taşınması, vb.) platform üzerinde bu iş için görevlendirilmiş sinyalci personel tarafından kuyu başı sinyal odasına ve buradan da vinç odasına bildirilmesi için sinyalizasyon sistemleri kullanılmaktadır. Aynı zamanda platformda bulunan sinyalci acil durumları da sinyalizasyon yöntemlerini kullanarak bildirebilir.

Bu nedenle sinyalizasyon sisteminin çalışamaz duruma gelebileceği göz önünde bulundurularak mutlaka yedek bir haberleşme sistemi kurulmalı ve sinyalizasyon sisteminden bağımsız bir güç kaynağı ile beslenmelidir. Böylece, olası acil durumlarda kuyu tabanı ile iletişimde herhangi kopukluk yaşanmayacak ve gerektiğinde en hızlı müdahale yapılabilecektir.

Bilgisayar Sistemlerinin Çökmesi: Günümüz çalışmalarında bütün sistemler belli bir otomasyon (bilgisayar) sistemi üzerinden kontrol edilmektedir. Madencilik uygulamalarında bilgisayar sistemlerinin en yoğun olarak kullanıldığı alan merkezi izleme sistemidir. Bu sistem üzerinden ekipmanların çalışma durumu ve en önemlisi yeraltı ocak havasının kalitesinin takibi sağlanmaktadır. Bu nedenle olası bilgisayar sistemlerinin çökmesine karşı mutlaka yedekli olarak çalışılmalı, olası bir enerji kesintisi yaşanması durumunda hiçbir duraksama olmadan çalışabilecek özellikte bir sistem dizayn edilmelidir.

Yan Duvarların Akması/Göçük, Tahkimatı Yapılmış Alanın Deforme Olması: Yeraltı

madencilik uygulamalarının en önemli tehlikelerinden biri göçük riskidir. Bu risklerin önüne geçilebilmesi amacıyla öncelikli yapılacak çalışma kazılacak formasyonun tanınabilmesidir. Bu nedenle kazı çalışmalarına başlamadan önce sondajlar vasıtası ile kuyu derinliği boyunca jeolojik yapı incelenmeli, gerekli çalışmalar yapılarak geçilecek formasyonların kaya mekaniği özellikleri hesaplanmalı ve değerlendirilmelidir.

Hesaplamalar sonucunda geçilecek her farklı formasyonun kendini tahkimatsız tutabileceği maksimum yükseklik hesaplanmalı ve yapılan kazılar bu yüksekliği geçmemelidir. Aynı zamanda yapılan bu çalışmalar sonucunda uygun kazı yöntemi, kullanılacak kazı ekipmanları, uygun tahkimat tasarımı, planı ve yönergesi oluşturulmalıdır. Gerekli aletsel ölçümler yapılarak kuyu içerisindeki deformasyonlar sürekli takip edilmelidir. Eğer; sınır değerler üzerinde deformasyonlar meydana gelmişse kuyu tabanında yapılan çalışmalar durdurularak kuyu tamir-bakım çalışmalarına geçilmelidir.

Doğal Afetler: Yaşanabilecek her türlü doğal afete (deprem, sel, heyelan, vb.) karşı önlem amacıyla kurulan tesislerin uygun yerlere yerleştirilmesi, çalışma bölgelerinde gerekli zemin iyileştirme çalışmalarının yapılması, vb. önlemler alınmalıdır.

3.4 Acil Durumların Yönetimi

Acil durum yönetimi, acil durum öncesini ve acil durum sonrasını da içeren ciddi bir süreçtir. Acil durumların doğru yönetilebilmesinin en önemli iki ana faktörü acil durumların doğru bir şekilde planlanması, çalışanların bilgilendirilmesi, tatbikatların yapılması ve bu planlara uygun olarak çalışmaların yapılmasıdır.

Kazısı devam eden kuyular ocak olarak değerlendirilmektedir. Yeraltı maden ocaklarında acil eylem planları hazırlanarak, her altı ayda bir kez revize edilmesi zorunludur. Yine, tatbikatların da altı ayda bir kez yenilenmesi gerekmektedir. Kuyularda meydana gelecek acil durumlar için hazırlanan planlarda mevzuat gereğince, yangın söndürme ekibi, tahlisiye ekibi (arama-kurtarma ekibi), ilkyardım ekibi ve koruma/güvenlik ekibi oluşturulmalıdır.

Acil durum ekiplerinin eğitimi de önemli bir konudur. Tahlisiye ekiplerinin kendi alanında aldıkları özel eğitim içerisinde muhakkak kuyu kazılarında olası acil durumlara müdahale için mutlaka uygulamalı eğitim almaları sağlanmalıdır. İlkyardım ekiplerinin Sağlık Bakanlığı tarafından yetkilendirilmiş eğitim kurumlarından aldıkları eğitimlere ayrı olarak, yeraltında/kuyuda konumlandırılmış ilkyardım çantası içerisindeki malzemelerin ve sedyenin kullanımı, kovaya yaralı yükleme, vb. konularda işyeri hekimi tarafından eğitilmeleri gerekmektedir. Bütün ekipler, acil eylem planı kapsamında acil durumlardaki davranış şekilleri ile ilgili eğitime tabi tutulmalıdır.

Hazırlanmış acil durum planına uygun olarak tatbikat çalışmaları yapılmalıdır. Kuyu kazı sürecinde insan ve malzeme nakliyatı kovalarla yapılmaktadır. Kuyuda iş kazası geçirmiş bir personelin sedye ile kova içerisinde kuyu başına çıkarılması gerekecektir. Yaralının nakliyat kovasından/kafesinden sedye ile çıkarılması hususunda özel tatbikatlar yapılmalıdır. Yine, aynı şekilde tahlisiyecilerin kovaya inme-binme, cihaz kuşanmak suretiyle kuyuda tatbikata katılmaları önem arz etmektedir. Tatbikatların belli bir senaryoya göre yapılması ve tatbikatlarda zaman etütleri yapılması önemlidir (Şekil 3).

Acil eylem planı kapsamında, kuyu ilkyardım ve kurtarma planı hazırlanarak kuyu ağzına, vinç dairesine, vb. çalışanların görebileceği kritik noktalara asılmalıdır (Şekil 4).

Acil durum yönetiminde yeraltı-yerüstü irtibatını sağlayan iletişim sistemleri ve yeraltındaki gazların durumunu yerüstünden izleme merkezinden izlenmesine olanak sağlayan sistemlerin ve yeraltı görüntüleme sistemlerinin önemi büyüktür. Bu sistemlerin her zaman doğru bir şekilde çalışır durumda tutulması gerekmektedir.

Acil durumlarda ilk önce olayla ilgili bilginin doğru bir şekilde izleme merkezine/acil durum yönetim merkezine ulaşması çok önemlidir. Bunun için işletmede acil durumlarda aranılacak ayrı bir acil durum

hattı oluşturulmalıdır. Bu hat/numara çalışanların aklında çok kolay şekilde kalabilecek rakamlardan seçilmelidir.

Şekil 3. Tahlisiye ekiplerinin katıldığı kuyu acil durum tatbikatı

Meydana gelen her acil durumdan sonra, yapılmış olan mevcut acil durum planı gözden geçirilmeli, gerekiyorsa planda revizyonlar yapılmalıdır.

4 SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Çalışma kapsamında yapılan araştırma ve incelemelerden aşağıda belirtilen sonuç ve değerlendirmelere ulaşılmıştır:

i. Kuyu kazı faaliyetleri önemli riskler içeren kazı çalışmalarıdır. Gerçek risk değerlendirmeleri yapılmadığı zaman ciddi acil durumlar ile karşılaşılabilir. Kuyu kazısına başlamadan önce kuyu kazılarındaki bütün acil durumları kapsayacak şekilde bir acil eylem planı hazırlanmalıdır. Acil eylem planı çalışanlarla paylaşılmalıdır.

ii. Kuyu planlaması kuyu kazı sürecinin güvenliğinde en önemli hususlardan biridir. Kuyu kazı faaliyetine başlamadan önce sahada ciddi bir hidrojeolojik etüt yapılmalıdır. Etüt sonucuna göre su deşarj sondajı, beton enjeksiyon uygulaması, vb. önlemler alınmalıdır.

iii. Kuyu kazı faaliyeti süresince, kuyu vinçleri, ana nakliyat halatları, kova koşum elemanları günlük ve haftalık periyotlarda kontrol edilmeli ve raporlanmalıdır.

iv. Kuyu, nihai durumda servis veya üretim kuyusu olarak hizmet edecek ise, halat elektrografi cihazının temini ve eğitimli personelin işletme bünyesinde istihdam edilmesi sağlanmalıdır.

v. Kuyular için jeneratör/yedek enerji kaynağı seçiminde havalandırma sistemine ilave olarak acil durumlarda kuyu vinçlerini de besleyecek güçte olmasına dikkat edilmelidir.

vi. Ana vincin devre dışı kalması hususu göz önünde bulundurularak, bağımsız enerji kaynağı ile çalışan kurtarma vinci (kapsül), kurtarma kapsülü, vb. alternatif önlemler planlanmalıdır.

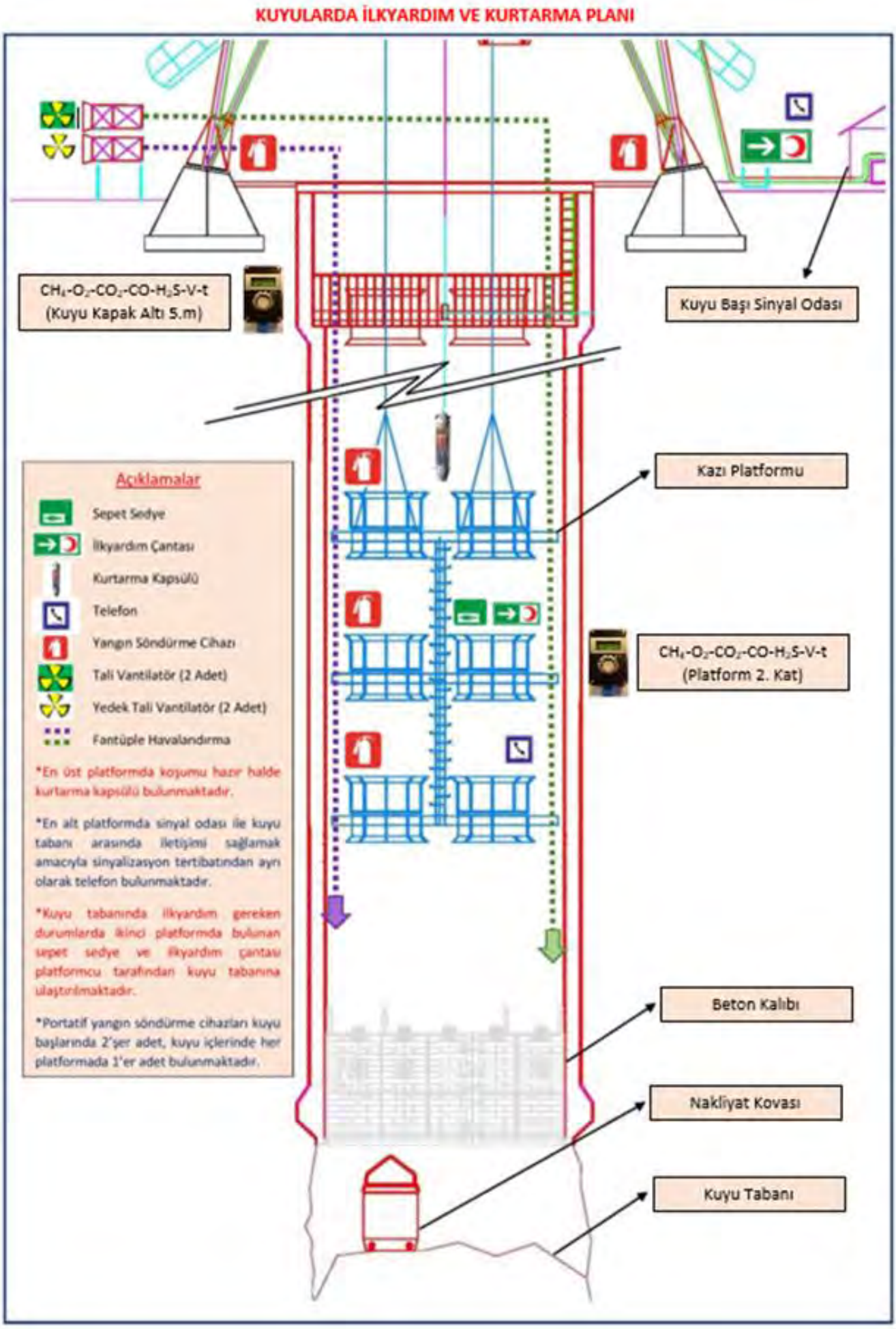
vii. Kuyu ilkyardım ve kurtarma planları oluşturulmalı ve bu plan hakkında çalışanlar periyodik olarak bilgilendirilmelidir.

viii. Bütün acil durumlarla ilgili olarak en geç altı ayda bir defa bütün çalışanları kapsayacak şekilde tatbikatlar yapılmalıdır. Kovadan sedye ile yaralı çıkarma işlemi ile ilgili özel tatbikatlar yapılmalıdır.

ix. Jeneratör sisteminin ana vinci besleyecek kadar güçlü kurulamadığı durumlarda, en az bir defa, kurtarma kapsülü ile kuyudan personel tahliye edilmesi ile ilgili tatbikat yapılmalıdır.

x. Kuyu kazı vinçleri, halatlar, plc ekipmanları gibi kritik malzemeler ve operasyonel tecrübesi olan personelin kazı faaliyeti süresince sahada hazır bulundurulması gerekmektedir.

xi. Kuyu kazı çalışmalarında tahlisiye ekiplerinin de kuyu içinde tatbikat yapması sağlanmalıdır.



Şekil 4. Kuyu İlkyardım ve Kurtarma Planı (Kahraman ve Koçak, 2017)

KAYNAKLAR

URL1, http://docplayer.biz.tr/2455752-Acil-durumlar-yonetim-rehberi.html#show_full_text

Türkiye İstatistik Kurumu, 2008. Sektörel Enerji Tüketim İstatistikleri 2005, Sayı:125.

Türkiye İstatistik Kurumu, 2016. Sektörel Enerji Tüketim İstatistikleri 2014, Sayı:21587.

Kahraman, E., Koçak, Ç. 2017. Polyak Eynez A.Ş. Yeraltı Çalışanları İçin İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitim Kitabı (Teknik Not), İzmir.

Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H., Aksoy, C.O. 2007. Tünel ve Kuyu Açma, DEÜ Yayınları, Yayın No:145, İzmir, s.203-

URL2, http://www.nrc.gov/docs/ML0331/ML033180604.pdf

URL3, http://www.resourcesandenergy.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0018/520470/Fatality-at-Cobar-mine.pdf

Resmi Gazete, 2013. Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, Sayı: 28770, Ankara, http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/09/20130919-3.htm

Resmi Gazete, 2016. İşyerlerinde İşin Durdurulmasına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, Sayı: 29621, Ankara,http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2016/02/20160211.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2016/02/20160211.htm

Workplace Safety North, 2006. Emergency Response Planning For Shaft Sinking, Ontario.

Basınçlı Akifer İçinde Derin Maden Kuyuları İnşaası İçin Yapılmış Susuzlaştırma ve Enjeksiyon Çalışmaları

Pregrouting, Grouting and Dewatering during Deep Shaft Sinking in Pressurized Aquifer Zone

E. Soyer, S. Topcan
Polyak Eynez Enerji Üretim Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş., İzmir

ÖZET Soma havzasında linyit kömürü projesi için büyük hazırlık işleri kapsamında tesis edilen iki adet net 8 m çaplı derin maden kuyularının açılacağı bölgede, kazı öncesi yapılan jeolojik, hidrojeolojik ve jeomekanik incelemeler sonucunda, kuyu tesis edilecek bölgede basınçlı akifer var olduğu tespit edilmiştir. Bu bildiride, kazı öncesi geçirimlilik tayini için yapılan lugeon testleri, kuyu kazı öncesinde ve kuyu kazı süresince uygulanan delgi, enjeksiyon ve susuzlaştırma metedolojisi, kuyu kazı ve enjeksiyon faaliyetleri sırasında çalışma bölgesine gelen su miktarları, basınçlı akifer ile mücadele kapsamında yapılan enjeksiyon miktarları, drenaj pompaları ile yapılan susuzlaştırma ile statik su seviyesi ölçümleri bilgileri yer almaktadır.

Maden kuyuları, ilk 350 m'lik volkanik bölgedeki yüzey suları ve 700-800 m arası basınçlı akifer bölgesinde yaşanan su problemlerine rağmen, enjeksiyon ve susuzlaştırma çalışmaları sayesinde 850 m derinliğe kadar başarı ile tamamlanabilmiştir.

ABSTRACT Geological, hydrogeological and geomechanical studies carried out prior to shaft sinking operations in the area where two shafts (net 8m in diameter) will be created during the development works of the lignite mine project in Soma basin have determined the formation in the subject area is pressurised aquifer. This paper includes various data regarding the pre-shaft sinking lugeon tests to determine permeability of the rock formation, the methodology for drilling, injection and dewatering operations before and after shaft sinking, the amount of water inflow during shaft sinking and injection operations, the amount of injection to combat pressurised aquifer as well as dewatering operations with drainage pumps and static water level readings.

The shafts, despite the surface waters encountered in the first 350 m of the volcanic formation and water inflow problem experienced between 700-800 m of the aquifer zone, have successfully advanced to 850 m depth by means of injection and dewatering operations.

1 GİRİŞ

Kaya kütlesi içinde veya üzerinde oluşturulan yeraltı yapıları üzerinde yeraltı suyunun önemli etkileri bulunur. Bu etki, duraylılık, iş güvenliği veya kazı-tahkimat gibi faaliyetlerini kapsar. Kaya kütlelerinde bulunan süreksizlikler yeraltı suyunun hareketi için imkan sağlar, (Zimmerman ve Bodvarsson, 1996). Su geçirgenliğinin azaltılması, barajlar ve barajların temelleri gibi yer üstü yapıları için de gerekli olmaktadır, (Karagüzel ve Kılıç, 2000). Yeraltı madencilik veya kazı faaliyetlerinde yeraltı suyu varlığının ve davranışının araştırılması gereklidir. Bu araştırmalar neticesinde alınacak önlemler sayesinde

gerçekleştirilecek kazı faaliyetlerinin projelerine uygun şekilde ve zamanında tamamlanması sağlanabildiği gibi iş güvenliği açısından daha emniyetli çalışma ortamı oluşturulabilir.

Bir yeraltı kazı faaliyeti sırasında, beklenmeyecek derecede yüksek miktarda su geliri ile karşılaşılması durumunda, acil su atımına yönelik ekipman alt yapısının hazır olmaması sebebiyle maden ocağının işletme ve yatırım maliyetlerine ilave yük oluşturarak, iş kazaları risklerinide beraberinde getirir.

2 ÇALIŞMA ALANI

2.1 Jeolojik Durum

Soma Havzasındaki kayaçlar yaşlıdan gence şöyle sıralanabilir (Erzenoğlu, 2014):

Temel kayalar:

Grovak ve şistler; Grovaklar meta kumtaşı olup, dayanımlı bir yapı gösterir. Ara seviyelerde yer yer şistlerle birlikte bulunurlar. Karbonifer yaşlıdırlar (280 my).

Kireçtaşları; Rekristalize olup yer yer mermer özelliğine yakın bir yapı gösterirler. Üst jura – alt kretase (70 my) yaşlıdırlar. Genel olarak fosil ve tabaka içermezler.

Neojen formasyonları:

M1; Temel kayaçlar olan grovak ve kristalize kireçtaşları üzerine gelen bu birim genel olarak konglomera, kum, kumtaşı, silttaşı, kiltaşı litolojisinden oluşur. Taban serileri olarak adlandırılırlar.

KM12; Alt linyit damarı. Havzada genel olarak 15-20 m kalınlıktadır. Horizon kalınlığı olarak 30-40 m'ye ulaşabilir. Zaman zaman kavkı fosili ve pirit içerebilir. Ortalama alt ısıldeğeri 2000-5000 kcal/kg'dir. Kükürt oranı %1 dolayındadır.

M2; Orta miyosen yaşlı (10-15 my) marnlar ana linyit damarının tavanını oluşturur. Ortalama kalınlığı 80-100 m'dir. Bol yaprak fosili içerirler. İyi tabakalanma gösterirler. Dayanımlı bir yapıya sahiptirler.

M3; Üst miyosen yaşlı bu birim genel olarak kalkerlerden oluşur. Bol Gastropoda fosili içerirler. Bazı seviyelerinde kireçtaşı mevcuttur. Üst seviyelerine doğru horizon kalınlığı 10-15 m'ye ulaşabilen kil, kireçtaşı ara kesmeli kömür damarı içerir. Bol kavkı fosili içeren bu kireçtaşları genel olarak çatlaklı ve boşluklu bir yapıya sahiptirler. M3 kalker kalınlığı genel olarak 40 – 60 m arasında değişir.

P1; Pliosen yaşlı kabul edilen bu birim genel olarak kumtaşı, silttaşı, kiltaşı, ardalanması şeklinde bir yapı gösterir. Bazı seviyelerinde konglomera bantları da vardır. Kötü tabakalanmalı zayıf dayanımlı kayaçlardır. Genel olarak kahverengi – yeşil bir renk gösterir. Fosil açısından fakirdirler. Genelde 60 – 110 m kalınlık gösterirler.

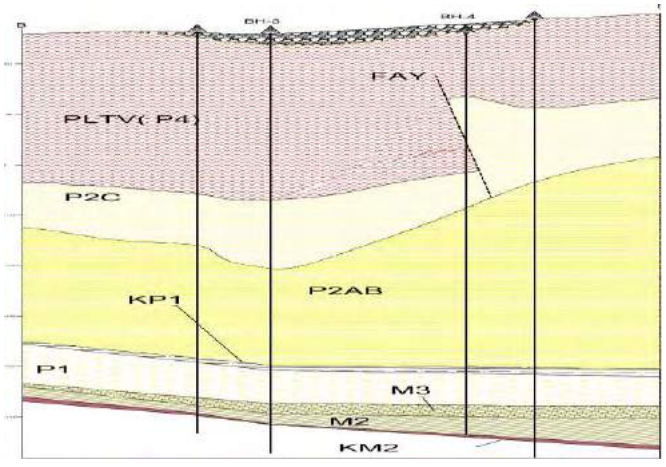
KP12; Üst linyit damarı. 15 – 20 m horizon içinde genel olarak 3 – 5 m kalınlığa sahiptirler. Kalorifik değerleri genel olarak 1500 – 3000 kcal/kg civarındadır. Kükürt oranı %3-4'e kadar yükselir. Soma – Deniş bölümünde işletilmektedir.

P2ab; KP12 kömür damarı üzerine tavantaşı olarak gelir. Marn, tüfit ve killerden oluşur. İyi tabakalanmalı, genel olarak zayıf dayanımlı kayaçlardır. 150 – 300 m kalınlığa erişebilirler.

P2c; Genel olarak çakıl, kum, kil ve marndan oluşur. Dayanımlılığı düşük gevşek tutturulmuş kayaçlardır. Fosil bakımından fakirdirler. Kalınlıkları 120 – 280 m arasında değişmektedir. İyi tabakalanma göstermezler.

P3;Genel olarak silisifiye kireçtaşlarından oluşur. Havzada az rastlanırlar.

Volkanikler; Havzada genel olarak andezit ve bazalt volkanizması görülür. Volkanizma genel olarak miyosen sonrası ve pleistosen (2 my) yaşlıdır. Volkanik kayaçlar bazalt, andezit ve bunların aglomera ile tüflerinden oluşur. Kalınlıkları 600 metreye kadar ulaşmaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı jeolojik kesiti

2.2 Kuyu Bölgesi ve Su Problemi

Kuyu açılacak bölgede, kuyu merkezinden yapılan karotlu pilot sondaj deliğinden, kaya kütlesinin geçirimliliğini ölçmek için basınçlı su veya Lugeon testi olarak adlandırılan test ile, kuyu açılacak bölgenin geçirimsizlik derecesi belirlenmiştir. Bu testte açılan sondaj kuyusuna pakerli test cihazı indirilir ve test aralığı üst ve alttan pakerlerin şişirilmesi ile sınırlanır. Daha sonra kademeli olarak arttırılan su basıncı değerinde ne kadar suyun kaya kütlesine sızdığı ölçülür. En az beş farklı basınç kademsinde sızan su miktarları kaydedilir ve hesaplamalarda kullanılır. Lugeon değeri, <1 ise geçirimsiz, 1-5 aralığında iken az geçirimsiz, 5-25 aralığında geçirimli ve > 25 değerinde ise çok yüksek geçirimli kaya kütlesini belirtir, (Quiñones-Rozo 2010).

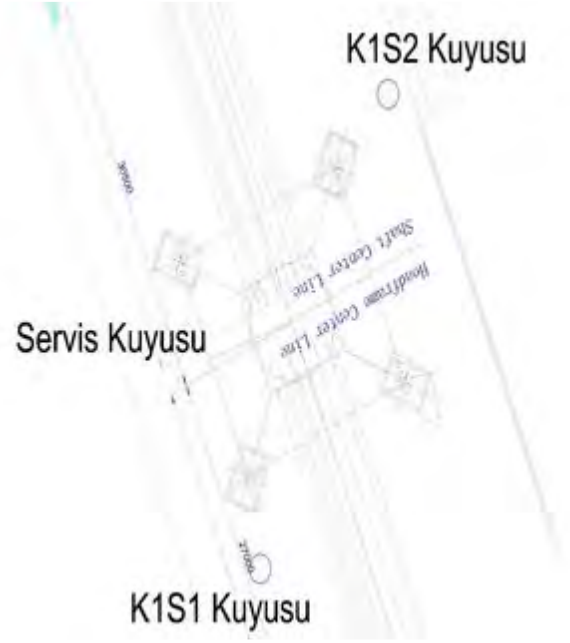
Kuyu açılacak bölgede yapılan karotlu sondajlar süresince yapılan lugeon deneyverileri ile elde edilen geçirimlilik değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Maden kuyularının 93 m batısından GK uzanımlı Karadere geçmektedir. Karaderenin geniş bir drenaj alanı olup, taşkın debisi oldukça yüksektir. Kuyu ağzı kotu (+252,50 m) ile Dere kotu (+239,50 m) arasında 13,00 m'lik fark olup, Karadere'nin taşkın debisinden kuyu ağzının etkilenmesi söz konusu değildir

Su ile mücadele yöntemleri, su geliri miktarına, suyun basıncına ve suyun geldiği yerin deniz seviyesine göre yüksekliği gibi birçok parametreye göre değişkenlik göstermektedir.

Kuyu açılacak bölgenin ilk 350 m'sinde yüzey sularından oldukça etkilenmiş volkanik birim içindeki suyun kazı öncesi susuzlaştırması için birinci yöntem olarak susuzlaştırma kuyularının kullanılması planlanmıştır

Bu kapsamda, servis kuyusu merkezinden 17 m uzaklıkta iki adet (K1S1, K1S2) 350 m uzunluğunda susuzlaştırma kuyusu açılmıştır. Bu kuyulardan K1S1 kuyusundan 40 lt/sn kapasiteli bir adet pompa indirilmiş ve 1 ay süre ile bu kuyudan su deşarjı yapılarak su seviyesindeki düşüm gözlemlenmiştir. Alınan verilere göre, K1S1 pompaj kuyusunun statik su seviyesi 34 m seviyesinden 89,70 m dinamik seviyesine düşmüş olup, gözlem kuyusundaki (K1S2) su seviyesi ilk ölçüm günündeki 30,60 m'den 50 m seviyesine düşmüştür. K1S1 ve K1S2 susuzlaştırma kuyularının lokasyonu Şekil 2'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2. Susuzlaştırma kuyularının lokasyonu

Kuyu kazı faaliyetlerinde, 10m^3/saat su geliri, işe devam etmek için pratik bir üst limit olarak tanımlanabilir.

Susuzlaştırma kuyularından (K1S1, K1S2) elde edilen düşüm seviyeleri kazı planı ve proje termini irdelendiğinde, kuyu açılması için yeterli seviyede susuzlaştırma sağlayamayacağına karar verilerek, kuyu kazı öncesi çimento enjeksiyonu yapılmasına karar verilmiştir.

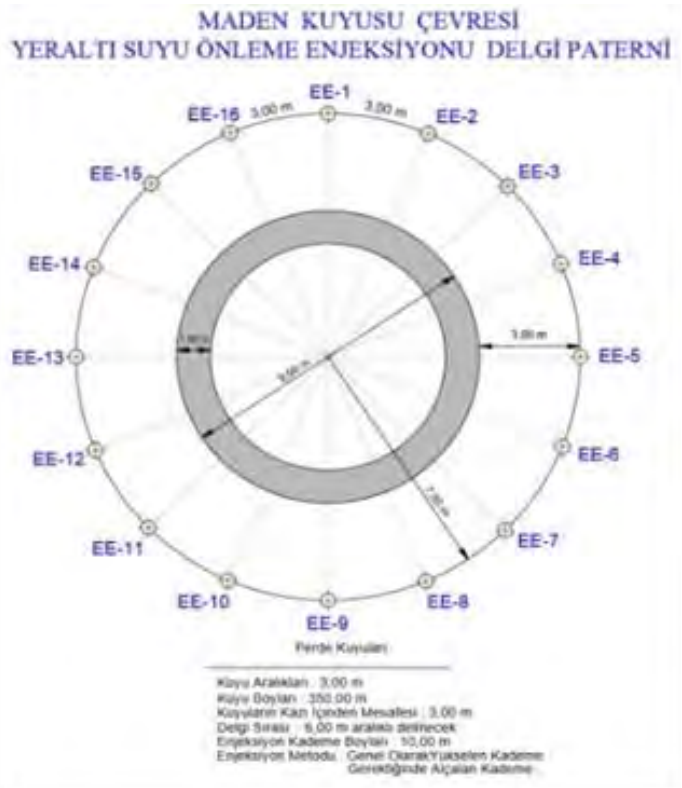
3 KAZI FAALİYETİ ÖNCESİNDE YAPILAN ENJEKSİYON ÇALIŞMASI

Yeraltı suyunun kontrol altına alınması için alınan önlemler çimento şerbeti enjeksiyonu olabildiği gibi, zeminin dondurulması, kimyasal enjeksiyon malzemelerinin kullanılması da uygulanan yöntemlerdendir, (Polozov and Popov 1985, Aksoy 2008). Su geçirgenliği azaltmaya yönelik bu faaliyetler aynı zamanda zeminin iyileştirilmesine de imkân sağlayabilmektedir.

Maden kuyularının betonarme projesine göre kazı çapı 9 m'dir Kuyu kazı sisteminde, delme-patlatma yöntemi ile ilerleme yapıldığından, hem kuyu açılacak bölgenin susuzlaştırmasının sağlanması hemde kuyu ilerlemesi sırasında enjeksiyon perdesinin delme-patlatmadan zarar görmeyecek şekilde enjeksiyonlamanın yapılabilmesine olanak verecek delik lokasyonlarının oluşturulması, enjeksiyon kalitesi için çok kritiktir.

Bu sebeple ilk 350 m'lik oldukça geçirimli volkanik birim içinde açılacak kuyu içine gelecek yeraltı sularının önlenmesi için delik paterni oluşturularak, kuyu kazı öncesi ön enjeksiyon işlemi yapılmıştır.

Başlangıç paterni olarak, kuyu merkezinden 7,5 m uzaklıkta 16 adet enjeksiyon noktası belirlenmiş, her bir enjeksiyon noktası 350 m delinerek, volkanik birimin altındaki geçirimsiz kil bölgesine soketlenmesi sağlanmıştır. Delgiler tamamlandıktan sonra çiftli ve tekli paker sistemi ile kademe boyları 10 m olacak şekilde çoğunlukla yükselen enjeksiyonlama çalışması kazılması planan iki kuyu için yapılmıştır. Uygulanan ön enjeksiyon paterni Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Ön enjeksiyon paterni

3.1 Refü Şartı

Enjeksiyon kuyularında herhangi bir kademenin enjeksiyonuna son verebilmek için o kademede 10 dakikalık bir süre içerisinde 0,5 kg/m/dak refü şartının sağlanması gereklidir. Bu değer 10 m'lik bir kademede 10 dakikada yaklaşık 50 litrelik bir karışımı ihtiva etmektedir. 10 dakika içerisinde refü basıncı altında 50 litreden az bir karışımın gitmesi, refü şartını sağlamaktadır. Çimento enjeksiyonu, her bir delikte en az 10 m aralıklarla bu şarta göre yapılmıştır.

Delgisi tamamlanan delik, su ile yıkandıktan sonra, su-çimento oranı 1-1/2 olacak şekilde hazırlanan çimento şerbeti ile enjeksiyona başlanır, zamana bağlı enjeksiyon miktarı ve enjeksiyon basıncına göre su/çimento oran 1/1 veya 7/5 olacak şekilde refü şartı sağlanana kadar su-çimento oranı ile delik boyunca uygun oranda seçilir.

Enjeksiyon verimi artırmak için CEM IV P32,5 çimento tercih edilmiştir.

Lugeon deneylerinden sonra, yüksek oranda geçirimli çıkan bölgeyi, enjeksiyonla geçirimsiz hale getirmek için, jeolojik biriminde çatlaklı yapısının etkisi ile yüksek miktarda çimento enjeksiyonu yapılacağı belirlenen projelerde, enjeksiyon verimliğini artırmak için, otomasyonlu ve yüksek debili enjeksiyon santrali kullanılmalıdır. Su-çimento oranının manuel olarak insana bağlı ayarlanması, enjeksiyon verimine ve maliyete olumsuz yönde etki edecektir.

Susuzlaştırma çalışması için enjeksiyon yapılacak ortam şartları ve hava koşulları, enjeksiyon verimine doğrudan etki etmektedir. Hava sıcaklığının -5 derecenin altına düştüğü durumlarda, enjeksiyon santralinden çıkan çimento şerbetinin, kuyu içine kadar sağlıklı olarak ilerleyemediği tespit edilerek enjeksiyon çalışması durdurulmak zorunda kalınmıştır. Bu sebeple, yer üstünde çimento enjeksiyonu ile susuzlaştırma yapılacağı zaman, hava koşulları ve mevsim şartları iyi planlanmalıdır.

Başlangıç paterni olarak 16 delikten enjeksiyonlama işlemi tamamlandıktan sonra, kuyu merkezinden delinen pilot delik içinde lugeon testi yapıldıktan sonra, elde edilen

veriler incelendiğinde, lugeon değerlerinin kuyu açılacak bölgenin büyük kısmında <1 seviyesine gerilediği görülmüştür. Lugeon değeri istenen seviyede olmayan kuyular irdelendiğinde, en çok enjeksiyon alan ve en az enjeksiyon alan kuyu bölgeleri seçilerek, bu bölgelerin arasına ilave enjeksiyon delikleri konumlandırılarak, kuyu bölgesinin tamamı susuzlaştırılarak tekrarlanan lugeon testleri ile geçirimsizlik kontrol edilmiştir.

İki kuyunun ön enjeksiyonu için toplam 649, 66 ton çimento kullanılmıştır.

Çimento enjeksiyonu için, makina ekipmanın sahaya mobilizasyonu, saha içi kurulumlar, altyapılar, delgi ve enjeksiyonların tamamlanması ile bir kuyu bölgesinin susuzlaştırılması toplamda 120 gün sürmüştür.

Enjeksiyon çalışmasının başarılı ve zamanında sonuçlandırılabilmesi için, susuzlaştırma yapılacak bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik etüdünün çok iyi yapılması, detaylı olarak projelendirilmesi, delgi ve enjeksiyon tekniğinin belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Aksi halde, delgi ve enjeksiyon süreleri, yeraltı ve yerüstü koşullarından etkilenerek belirlenen süreleri aşacak, maliyetlerin yükselmesi kaçınılmaz olacaktır.

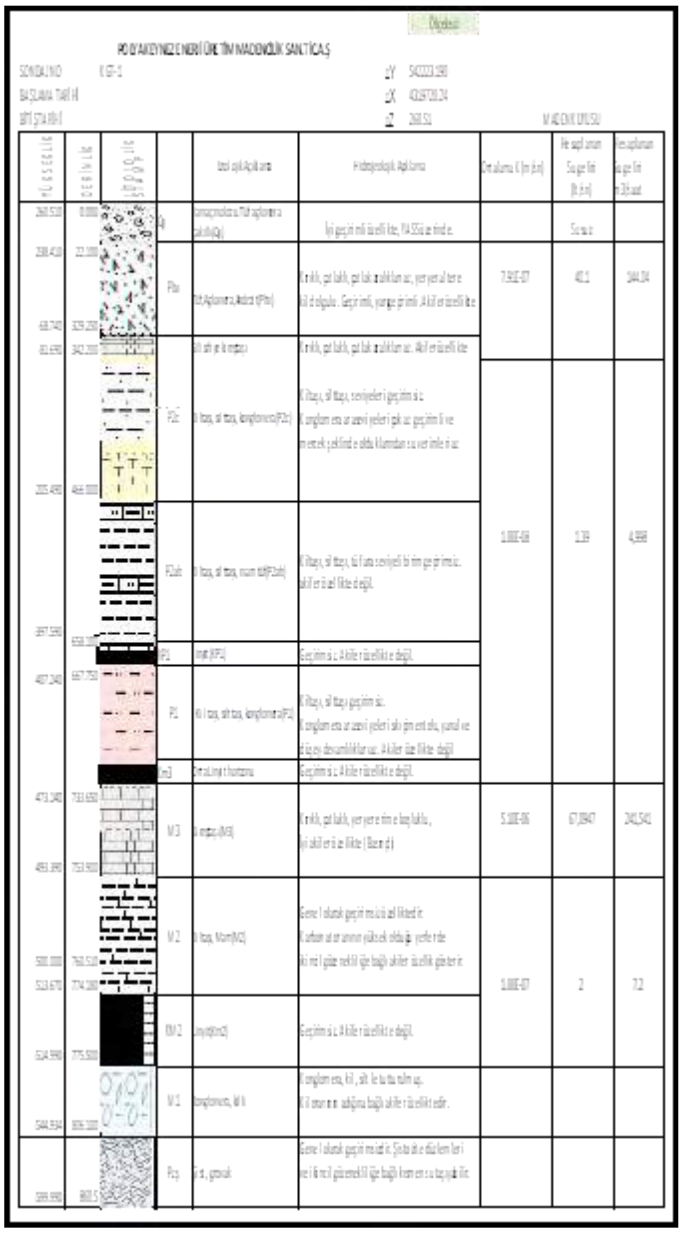
Yapılan ön enjeksiyonlar sayesinde kuyu kazı projesi termininde başlatılmış, kazı başlangıç aşamasında yüzey sularından etkilenmeden belirli seviyeye kadar susuz olarak kazısı yapılabilmiştir.

4 BASINÇLI AKİFER İÇİNDE KUYU AÇILMASI VE ENJEKSİYON İŞİ

Kuyu kazısı yapılacak bölgede, kazı faaliyeti öncesinde yapılan jeolojik ve hidrojelojik çalışma kapsamında yapılan sondajlar, permeabilite, lugeon ve slug testleri ile elde edilen veriler ile, kuyu açılacak bölgenin 733,50-753,90 m arasında yeralan M3 kireçtaşı biriminin akifer özelliği gösterdiği belirlenerek, kuyu kazı seviyesi bu noktaya ulaştığında, kuyu içine 241,541 m^3/saat su gelişi olacağı hesaplanmıştır. Bununla birlikte, akifer içindeki hidrostatik basıncın 70 bar olacağı hesaplanmıştır (Erzenoğlu, 2014).

Kazı faaliyeti öncesinde, kuyu açılacak bölgenin 700 m altında, basınçlı akiferin olması sebebiyle, kuyu yeri seçimi tekrar gözden geçirilmiş, sahanın topoğrafyası, işletme ruhsatı, yasal izinler ve tesis kurulumları için yapılmış fizibilete ve planlama çalışmaları tekrar gözden geçirildikten sonra, linyit kömür üretim projes için kuyu yerinin değiştirilmesinin mümkün olamayacağı düşünülerek akifer ile mücadele kararı alınmıştır

Çizelge 1. Kuyuları litolojisi ve hidrojeolojisi (Erzenoğlu, 2014)



Bu kapsamda, sahaya gelecek kuyu kazı teçhizatı içinde, 250 bar/ 8 m^3/saat kapasiteli enjeksiyon pompaları, su deşarj pompaları kazı sürecinin en başında getirtilerek, olası su

geliri durumunda suyun kuyunun tamamını doldurarak kuyuyu kaybetme, kazı faaliyetini çok uzun süre aksatacak ertelemelerin ve ani su baskını durumunda iş kazası riskinin büyük oranda önüne geçilmiştir.

Kuyu kazı faaliyeti 700 m seviyesine kadar en az 50 m geri bindirmeli ve aylık olarak yapılan kontrol sondajları ile birlikte akifer bölgesi ile belirli bir güvenli topuk mesafesi sağlanacak şekilde tamamlandıktan sonra, akiferin susulaştırılması işlemine geçilmiştir.

4.1 Akifer Enjeksiyonu

Akifer bölgesinin susuzlaştırılması çalışmasında dikkat edilecek en önemli hususlardan biri, yapılacak enjeksiyon delgileri sırasında, akiferin patlatılması sonucunda kuyu içine ani su geliri durumunda, delik ağzının vakit kaybetmeden kolayca kapatılacak vana ve kör tapa sisteminin her bir enjeksiyon deliği için, su ve enjeksiyon basıncına karşı koyabilecek yeterlilikte hazırlanarak, kuyu içine tesis edilmelidir.

Akiferin delinmesi ile ortaya çıkacak su basıncının, kuyu tabanına ve enjeksiyon borularının stabilitesine zarar vermesini önlemek için, kuyu içinde oluşturulacak enjeksiyon boruları, akifer basıncına bağlı olarak belli yükseklikte beton temel içine gömülmelidir. Beton temelin dökülmesi sırasında, kuyu içine gelebilecek suların deşarjını sağlamak için, bir ya da iki adet klavuz boru içine dalgıç pompalar yerleştirilerek temel betonunun bozulmadan dökülmesi sağlanabilir. Temel betonu öncesi, temel yüksekliğine bağlı olarak kuyu tabanına belirli oranda ballast malzeme yerleştirerek kuyu tabanı ile temel beton arasında tutunmayı sağlayacak ara seviyesinin oluşturulması kritik önem arz etmektedir.

Kuyu tabanına dökülen temel betonu sırasında alınacak numuneler ile, priz süresine bağlı ve reçeteye bağlı olarak değişen beton dayanım değeri, enjeksiyona başlama açısından önem arz etmektedir. Enjeksiyona başlamak için, pratik alt limit olarak 7 gün bekleme süresi tavsiye edilir.

Priz alma süresi ve beton numunesi kontrollerinden sonra, projede belirlenen temel beton kalitesine ulaşıldıktan sonra, enjeksiyon delgilerine başlanılır. Enjeksiyon delgileri yapılırken, delgileri tek seferde derin delmekten kaçınılarak, öncelikle, tüm enjeksiyon noktalarından beton temel altındaki balast malzeme seviyesine kadar delinerek, beton temel altı güçlendirilmiş olunur.

Bu güçlendirme sayesinde, enjeksiyonlar yoğun şekilde gönderilmeye başlandığında, ve refü basınçlarının 100 bar seviyesine dayandığı aralıksız 1 günü aşan sürekli enjeksiyon işlerinde, kuyu tabanı temel betonunun kırılması ve enjeksiyon borularının bozularak çalışmanın büyük oranda yarım kalmasının önüne geçilmiş olunur.

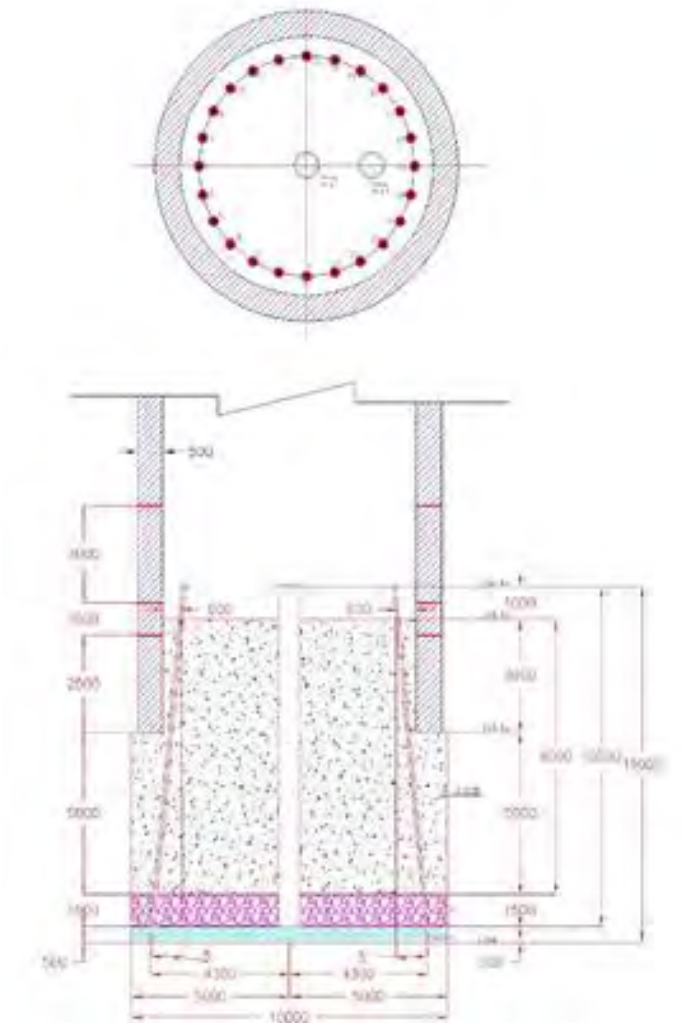
Kuyu içinde oluşturulacak enjeksiyon paterni, su geliri miktarı ve basıncına göre farklılık göstereceğinden, 8 m'lik net çapa sahip bir kuyu için iş güvenliği ve verimli çalışma açısından başlangıç paterni olarak 80-100 cm ara ile 24 adet enjeksiyon borusuna kadar konuşlandırılabilir. Şekil 4'te akifer enjeksiyonu için uygulanan enjeksiyon paterni ile ilgili delik lokasyonları gösterilmiştir.

Akifer enjeksiyonu için yapılan delgilerde, kuyu içine gelen ilk su miktarı 759. m'de 40 bar basınçta 40 m^3/saat olarak ölçülmüştür. Devam eden delgilerde maksimum maksimum su geliri 45 bar basınçta 225 m^3/saat olarak ölçülmüştür.

Yapılan enjeksiyon ve delgiler ile birlikte, akifer içindeki su probleminin sadece M3 birimi ile sınırlı olmadığı, iki kuyu arasında yeralan faylanma ve çatlak sistemi sebebiyle M2 ve KM2 seviyelerine kadar devam ettiği belirlenerek akifer uzunluğunun 100 m seviyesine kadar uzayacağı belirlenmiştir.

Basınçlı Akifer sebebiyle, M3 birimi üstünde yeralan geçirimsiz P1 birimi içinde güvenli topuk mesafesi bırakılarak kuyu kazı faaliyeti durdurulmuş, enjeksiyon düzeni tamamlanarak ilk enjeksiyona bu bölgeden başlanmak zorunda kalınmıştır. P1 birimi, killi yapısı sebebiyle, delik göçmesi problemi ve suyla birlikte şişme davranışı gösterdiğinden, uygulama sırasında, enjeksiyon klavuz borularının içinden, P1 seviyesini geçecek şekilde her bir enjeksiyon noktası için muhafaza borusu sürülmüştür. Bu

sayede hem delgiler akifer seviyesine kadar yapılabilmiş hem de yapılan enjeksiyonların kuyu dibi yerine kuyu taban seviyesinden kuyu cidarının üst bölgelerine giderek kuyu betonuna zarar verilmesi önlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4. Enjeksiyon paterni

Kuyu içi bölgesi, 4 ana bölgeye ayrılarak, delgi ve enjeksiyonlar sırasında ortaya çıkan su ve enjeksiyon miktarına göre en çok su gelen noktalar belirlenerek maksimum delgi ve enjeksiyon mesafesi irdelenmelidir.

Söz konusu enjeksiyon uygulamalarında jeolojik yapıya bağlı olarak maksimum delgi mesafesi 70 m olarak belirlenmiştir. 70 m'den daha uzun yapılan delgilere basılan enjeksiyonun muhafazalı delik delinse dahi, delik dibine kadar kaliteli şekilde ulaşamadığı, enjeksiyon yapılan delgilerin tekrar delinmesi ile belirlenmiştir.

Tüm enjeksiyon borularının delgi ve enjeksiyonları bir tur yapıldıktan sonra, en çok su çıkan ve en çok enjeksiyon yemiş noktalar tekrar delinmeli ve tekrar enjeksiyonlamaldır. Bazı durumlarda, delgi sonrasında görece fazla miktarda su çıkmasına karşın, enjeksiyon miktarı beklenen düzeyde olmamaktadır. Bununla birlikte, su çıkmayan enjeksiyo noktaları beklenenden çok daha fazla miktarda enjeksiyon yemiştir.

Tekrarlı olarak delgi ve enjeksiyonların tamamlanmasından sonra, delik başına 1 m^3/saat ve toplamda 3-4 m^3/saat su geliri seviyesi sağlanana kadar delgi ve enjeksiyona devam edilmeli, kazı faaliyetine başlanmamalıdır.

Refü değerine ulaşıldıktan sonra, kimyasal katkılar ile enjeksiyon şerbetinin hızlı donması sağlanmalıdır.

Delgi ve enjeksiyon sıralaması yapılırken, deliklerin birbiriyle ilişki kurarak enjeksiyon faaliyetinin aksamaması için, çok yakın noktalar yerine birbirine uzak olacak ve acil durumda kuyudan çıkışa engel olmayacak şekilde noktaların lokasyonuna göre saat yönünde döngü yapılarak sıralama yapılmalıdır.

Enjeksiyon faaliyeti başında lugeon testi yapılarak, enjeksiyon öncesi geçirimlilik ile, enjeksiyon tamamlandıktan sonra yapılacak kuyu merkezinden yapılan kontrol deliğinden yapılacak ikinci lugeon testleri sayesinde, geçirimsizliğin sağlandığı mutlaka belirlendikten sonra kuyu ilerlemesine geçilmelidir.

Akifer içinde kuyu ilerlemesinin sağlanabilmesi için yapılan enjeksiyonlara ait bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Havalandırma ve servis kuyularında yapılan akifer enjeksiyonu bilgileri

Kuyu derinliği (m)	Enjeksiyon Süresi (gün)	Çimento Miktarı (ton)
Servis Kuyusu Akifer Enjeksiyonu		
700	201,66	447,328
710,5	107,17	356,00
739,2	99	1137,37
Toplam	407,83	1940,698
Havalandırma Kuyusu Akifer Enjeksiyonu		
700	121,7	445,00
743,5	29	90
768,5	57,8	493,8
Toplam	208,5	1028,765

5 SONUÇLAR

Çalışma kapsamında yürütülen faaliyetler ile ile ilgili sonuç ve değerlendirmeler aşağıda listelenmiştir.

- ✓ Polyak Eynez Soma Havzası linyit kömür üretim projesi kapsamında, açılacak derin maden kuyuları öncesinde yapılan jeolojik, jeomekanik ve hidrojeolojik çalışmalar sayesinde kuyu açılacak bölgede yüzey suları ve basınçlı akifer içinde kuyu içine su gelişi olabileceği belirlenmiştir.
- ✓ Uygulanan enjeksiyon teknikleri ve kontrolleri sayesinde iki adet 8 m net çapta betonarme kuyu, basınçlı akifer zonunu geçerek 843 m derinliğe kadar başarı ile açılmıştır.
- ✓ Söz konusu maden kuyuları Soma Havzasında açılmış ilk ve en derin betonarme kuyuları olma özelliğindedir.
- ✓ Kuyu- galeri kazısı, kömür üretimi gibi madencilik faaliyetlerine fiili olarak başlamadan önce, faaliyetin yapılacağı bölgenin jeolojik, jeomekanik ve hidrojeolojik olarak detaylı araştırılması kritik önem taşımaktadır.
- ✓ Maden planı, kuyu yeri seçimi ve tesisleşme gibi maden işletmesini derinden etkileyecek konularda, su gelirine yönelik önceden yapılan detaylı araştırmalar sayesinde, faaliyetlerin yürütülmesi sırasında, projeleri derinden etkileyecek ilave zaman ve maliyet oluşmasının önlenebileceği gibi, doğru planlama ve uygulamalar sayesinde muhtemel maden kazalarınında önüne geçilmiş olunur.
- ✓ Bu bildirinin konusu olmamakla birlikte, basınçlı akifer bölgesinde su ile mücadele için 4 ay süre ile kuyu içinden 280 m^3/saatlik deşarj yapılarak, gözlem kuyularındaki basıncı düşümü ve oluşturulan düşüm konisi takip edilmiştir. Su dejarjı durdurulduğunda, su basıncında tekrar ani yükselme meydana geldiğinden, su deşarjı ile oluşturulan düşüm konisi ve basınç miktarı, kuyu ilerlemesi için yeterli gelmeyeceği ve 700 m derinlikte deşarj ve kuyu açma işini parallel yürütmenin uygulamada mümkün olamayacağı değerlendirilerek, çimento enjeksiyonu yöntemi ile susuzlaştırma yoluna gidilmiştir.
- ✓ Su geliri riski bulunan bölgelerde kuyu, galeri kazısı gibi büyük hazırlık projelerinin yürütülmesi öncesinde, yeterli kapasitede enjeksiyon ve deşarj pompaları boru-kablo şebekelerinin

KAYNAKLAR

Zimmerman, R.W., Bodvarsson, G.S. 1996. Hydraulic conductivity of rock fractures. Transp. Porous Media 23 (1), 1–30 (Apr 1).

Polozov, J.A., Popov, I.V. 1985. Grouting of porous aquifers during shaft sinking. Int. J. Mine Water. 4 (1), 25–31 (Mar 1).

Aksoy, C.O. 2008. Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent ground settlement induced by groundwater drainage: A case study. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(3), pp.376-383.

Quiñones-Rozo, C. 2010. Lugeon test interpretation, revisited. In Collaborative Management of Integrated Watersheds, 30rd Annual USSD (United States Society on Dams) Conference. US Society on Dams, Denver (pp. 405-414).

Erzenoğlu, Z. 2014. Polyak Eynez (Elmadere) Linyit Sahası Hidrojeoloji Etüdü In: Internal Report for Hydrogeological Investigation, (yayımlanmamış).

İş Sağlığı ve Güvenliği

Occupational Health and Safety

Yeraltı Kazı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliğine Genel Bir Bakış

An Overview of Occupational Health and Safety in Underground Excavation

T. Oral, T. Özer
İstanbul Gelişim Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, İstanbul

ÖZET Ülkemizde 2012 yılında yayınlanan 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) Kanunu ile istihdamın olduğu tüm işletmelerde çalışanların refahlarının sağlanarak sağlıklı ve güvenli bir ortamda çalışmaları amaçlanmıştır. Yeraltı şantiyelerinde çalışanların diğer sektör çalışanlarıyla kıyaslandığında emek yoğunluğunun ve iş yükünün fazla olması nedeniyle ölümlü iş kazası geçirme ihtimalinin yüksek olduğunu göstermektedir. Yeraltı kazı işlerinde işlemler çeşitli makine-teçhizatın kullanılması, tahkimat işleri ve beton donatılarının aktarılması gibi çalışmaların bir arada yürütülmesi birçok sağlık ve güvenlik riskinin oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Bu nedenle İSG uygulamaları ile sahada iş kazası ve meslek hastalığı oluşumuna neden olacak tehlikelerin doğru şekilde belirlenmesi, kaynağında yok edilmesi veya kanunda belirtilen asgari koşulları sağlayacak şekilde ikame edilmesiyle bir yandan çalışanlar korunurken bir yandan da işin devamlılığı sağlanacaktır, tüm bunlar ise toplumsal refahın artmasına katkıda bulunacaktır.

Bu çalışmada, yönetmelik hükümleri ve SGK istatistikleri de referans alınarak kazı işlerinde çalışanların iş kazası geçirme ve işe bağlı hastalıklara yakalanmalarına neden olabilecek riskler değerlendirilerek, çalışanları korumaya yönelik düzenleyici ve önleyici faaliyetlere değinilmektedir.

ABSTRACT With the Law No. 6331 on Occupational Health and Safety (OHS) which was published in 2012 in our country, it was aimed to ensure the welfare of the employees in all enterprises where they are employed and worked in a healthy and safe environment. Compared to other sector employees, workers in underground construction industry are more likely to have a fatal work accident due to labor intensity and workload. The use of various machinery-equipment in underground excavation works, ground support and transfer of concrete equipments together provide a basis for the development of many health and safety risks. For this reason, the employees are protected and the continuity of work is ensured by securing that the health and safety practices and the hazards that might arise as a result of occupational accidents and occupational diseases would be correctly identified and destroyed at the source or provided with the minimum conditions indicated in the law.

This study refers to regulatory and preventive activities to protect employees by taking into account the risks that may result in occupational accidents and work-related diseases in the excavation workers, taking into account the provisions of the regulation and statistics of the Social Security Institution (SSI).

1 GİRİŞ

Ülkemizde her sektörde olduğu gibi yeraltı ve maden işlerinde de iş sağlığı ve güvenliği konusunda gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. İş sağlığı ve güvenliği, kazaları önlemede proaktif ve reaktif yaklaşım olmak üzere iki tür yaklaşım içerir. Ülkemizde proaktif yaklaşım olarak 2013 yılında yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu doğrultusunda iş güvenliği hizmetleri, risk değerlendirme çalışmaları, sağlık gözetimleri, mesleki yeterlilik belgesi, toplu koruma ve kişisel koruyucu donanım kullanımı gibi zorunluluklar getirilmiştir. 4857 sayılı İş Kanunu'nda yeraltı ve maden işlerinde çalışma saatleri günde 7,5 saat ve haftada 37,5 saat belirlenmişken bu süre rutin işlerde günde maksimum 11 saat ve haftada 45 saat olarak belirlenmiştir. Yeraltı çalışma şartlarının diğer işlere göre daha zor olduğu çalışma saatlerinden de belli olmaktadır.

Bu zorunluluklara rağmen SGK istatistiki verilerinin yayınlandığı son 4 yılda (2013-2014-2015-2016) 627 ölümlü iş kazası meydana gelmiştir. İş sağlığı ve güvenliği kapsamında kazaların belirli bir kısmı önlenebilse de kaçınılmaz durumlar mevcuttur. İş kazası sonucu meydana gelen ölümler tamamen yok edilemese dahi olabildiğince aza indirebilir.

Bu çalışmada, yeraltı maden işlerinde iş sağlığı ve güvenliği sorunları dile getirilerek gerekli önlemlerin neler olabileceğine değinilmiştir. Bunun neticesinde iş kazası ve ölüm sayılarında azalma hedeflenmiştir.

2 YERALTI KAZI İŞLERİ

Üretim sürecinin en önemli faaliyetlerinden birini oluşturmaktadır. Basit kazı araçları, patlayıcı madde veya kazı makineleri kullanarak yapılır. Kazı işlemi cevher içinde veya cevhere ulaşmak için kayaç içinde bir boşluk açılması, açılan boşluğun bir tehlike yaratmayacak şekilde tahkim edilmesi, çıkan postanın alınması aşamalarını içerir.

Basit kazı araçları olarak kazma, kürek gibi araçlar kullanılır. Patlayıcı madde kullanımında ise, çeşitli makinelerle deliklerin delinmesi, delinen deliklerin patlayıcı madde ile doldurulması, ateşleme gibi ek çalışmalar yapılır (ETKB, 2006).

Yeraltı kazı işleri, açıkta ve yeraltında yapılacak her türlü zemin ve şartlarda el aletleri, makinalar, patlayıcılar maddeler kullanarak veya kullanmadan yapılan kazıları kapsamaktadır. Bunun yanı sıra,

- Kazı sırasında, kazı yüzlerinin korunmasını ve desteklenmesini,
- Kazı alanının kuruda tutulmasını,
- Kazı malzemelerinin uzaklaştırılmasını,
- Kazıdan çıkan malzemenin korunmasını,
- Kazı yerinde her türlü emniyet önlemlerinin alınması, işlerini kapsar.

Açıkta yapılan kazılar, serbest kazılar, temel kazılar, hendek kazıları ile ocak ve malzeme sahalarında yapılacak kazılardır. Zemin kazıları, zayıf ve oynak zemin kazıları, toprak zemin kazıları ve kaya zemin kazılarıdır. Bunlara ilaveten su kazıları, sanat kazıları ile drenaj ve tahliye kanalı kazıları yapılmaktadır (Akkaya, 2001).

3 İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ TEMEL KAVRAMLAR

Sektörde istihdam edilen çalışanların deneyimi, eğitimi ve fiziksel yeterlilikleri ise 'Tehlikeli Davranış' zemin oluşturmaktadır. Çalışma ortam koşulları, işin yürütümü nedeniyle kullanılan makine ve teçhizatlar, çevresel risk etmenleri iş kazalarının oluşmasına neden olan 'Tehlikeli Durumu' oluşturmaktadır. Tehlikeli davranış ve tehlikeli durumların iş kazası üzerindeki etkilerini inceleyecek olursak, yönetmelikte belirtilen asgari koşulların sağlanması ve yeterli denetimlerin yapılmasıyla iş kazaları ve meslek hastalıklarının %98'i önlenebilmektedir.

3.1 Temel Kavramlar

Gelişen teknoloji ile çalışma hayatında iş sağlığı ve güvenliği kavramı büyük önem arz etmektedir.

İşyerlerinde işin yürütüm sırasında çeşitli nedenlerden kaynaklanabilecek zararlı durumları planlı bir şekilde ortadan kaldırmak amacıyla yapılan sistemli bilimsel çalışmalar bütününe *iş sağlığı ve güvenliği* denir.

Tehlike, işyerinde var olan ya da dışarıdan gelebilecek çalışanı veya iş yerini etkileyebilecek zarar veya hasar verme potansiyelidir. *Risk*, tehlikeden kaynaklanacak kayıp, yaralanma ya da başka zararlı sonuç meydana gelme ihtimalidir. Tehlike bir olayın nedeni, risk ise olayın sonucudur.

Tehlike sınıfı, iş sağlığı ve güvenliği açısından yapılan işin özelliği, işin her safhasında kullanılan veya ortaya çıkan maddeler, iş ekipmanı, üretim yöntem ve şekilleri, çalışma ortam ve şartları ile ilgili diğer hususlar dikkate alınarak iş yeri için belirlenen tehlike grubudur.

6331 sayılı Kanun kapsamındaki, İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği'ne göre işyerleri; "az tehlikeli", "tehlikeli" ve "çok tehlikeli" olarak sınıflandırılmıştır. Sözkonusu tebliğin ekinde yer alan işyeri tehlike sınıfları listesine göre; kazı ve hafriyat işleri (tarımsal arazinin hazırlanması, dinamitleme ve kayaların kaldırılması, inşaat alanların drenajı, hafriyat, kazı, dolgu vb. işleri) çok tehlikeli sınıfta yer almaktadır (6331 (2012), Resmi Gazete, 28602, 29.03.2013).

Çalışma hayatının parçaları işveren ve çalışandır.

İşveren: çalışan istihdam eden gerçek veya tüzel kişi yahut tüzel kişiliği olmayan kurum ve kuruluşlardır. İşveren vekili, işveren adına hareket eden, işin ve iş yerinin yönetiminde görev alan işveren vekilleri, bu Kanunun uygulanması bakımından işveren sayılır.

Çalışan: kendi özel kanunlarındaki statülerine bakılmaksızın kamu veya özel işyerlerinde istihdam edilen gerçek kişidir.

Çalışanların iş sağlığı ve güvenliği konusunda temsil etmek için seçilen kişilere *çalışan temsilcisi* denir. Çalışan temsilcisi ciddi ve yakın tehlikeyle karşı karşıya kalındığı durumlarda işverene başvurarak çalışanları olası bir tehlikeden korur. Çalışanlar yaptıkları işin yanı sıra iş sağlığı ve güvenliği konusunda yardımcı olarak görevlendirilen çalışanlara destek elemanı denir. 6331 sayılı İSG kanununa göre yer altı kazı işlerinde acil durumlarda doğru şekilde müdahale edebilmek için,

- Arama, kurtarma ve tahliye,
- Yangınla mücadele

Konularında eğitimli ve yeterli donanıma sahip her 30 kişiye kadar en az birer destek elemanı görevlendirilmelidir. Aynı zamanda iş kazası geçiren işçilere doğru ilk müdahaleyi yapabilmek için çalışanlar arasında her 10 kişide bir kişi seçilerek ilk yardım ekibi oluşturulmalıdır (6331 (2012), Resmi Gazete, 28681, 18.06.2013).

İşveren seçtiği destek elemanlarının yıllık izin, doğum-ölüm, evlilik izni, hastalık durumu gibi işe devam edememesini göz önünde bulundurarak acil durumlarda acil durum ekibi çalışmasında aksaklık yaşamaması için yedek destek eleman da belirlemesi gerekir.

3.2 İş Kazası Kavramı

5510 sayılı Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanununun 13. Maddesinde İş Kazası,

Bunlar;

1. Sigortalı işyerindeyken,
2. İşverenin yürüttüğü iş yüzünden sigortalı çalışan kendi hesabına ve adına bağımsız çalışıyor ise, yürütülen çalışma ya da iş yüzünden iş yerinin dışında,
3. Herhangi bir işveren adına çalışan sigortalı işçinin, işyeri dışında başka bir yerde çalışması yüzünden, asıl işi dışında başka yerlerde geçirdiği zamanda,
4. Emzirme döneminde olan sigortalı çalışanın, iş mevzuatı gereğince çocuğunu emzirmek için ayırdığı zamanda,
5. Sigortalı çalışanların, işveren tarafından verilen bir taşıt ile iş yapılan yere gidip geldiği zamanlarda.

Bu yasaya göre, bir kazayı iş kazası olarak ön görmek için yukarıda bahsi geçen durumlar arasında en az bir tanesinin meydana gelmesiyle sigortalı çalışanın bedenen ya da ruhen hasara uğraması gerekir (Oral, 2018).

5510 sayılı Kanunun iş kazası tanımı isg kapsamında önleme ve koruma amacıyla değil hukuki açıdan yapılmış bir tanımdır.

İş sağlığı ve güvenliğinin amacı çalışanları korumak, işletme ve üretim güvenliğini sağlamaktır. Bu nedenle kazaların analizi yapıldığında, beş temel etkenin neden olduğu görülmektedir. Bu duruma *kaza zinciri* denmektedir.

Kaza Zinciri:

1-İnsanın doğası gereği fiziksel güç zayıflığı: Kazalara neden olan ilk temel faktördür.

2-Kişisel Kusurlar: Buna neden olan en temel faktörler, dikkatsizlik, stres, yorgunluk.

3-Tehlikeli Hareket-Tehlikeli Durum

4-Kaza Olayı

5-Yaralanma (Zarar veya hasar)

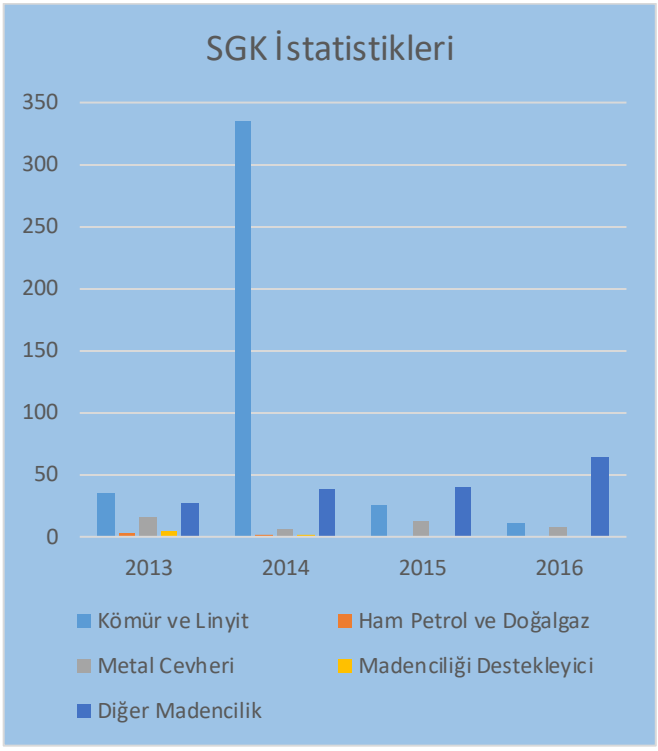
Domino teorisine göre iş kazalarının %88'i tehlikeli hareketlerden, %10'u tehlikeli durumlardan oluşmaktadır. İş kazalarının sadece %2'si kaçınılmazdır. Emniyetsiz çalışma, kişisel koruyucu donanım kullanmadan çalışma, stres, dalgınlık gibi tehlikeli hareketler iş kazalarının en büyük etkeni olarak görülmektedir. Tehlikeli durumlara ise koruyucusuz çalışma, bakım onarım yapılmayan makineler, yetersiz havalandırma örnekleri verilebilir (Heinrich vd., 1980).

İş sağlığı ve güvenliğinde iş kazaları araştırıldığında kazaların %50 si kolayca önlenebilir, %48 i sistemli bir çalışma ile önlenebilir ve % 2 si önlenemez durumlar olduğu sonucuna varılmıştır. Kaza piramidine göre ise her ölümlü kazanın altında 29 uzuv kayıplı bir kaza ve 300 yaralanmalı kaza olduğu söylenmektedir.

Şekil 1. İş kazası piramidi

1-29-300 kuralının önemli bir özelliği; bir işletmede olabilecek kazalar hakkında önceden tahmin yapma olanağını sağlamasıdır.

İSG konusunda iş kazalarını önlemede iki türlü yaklaşım vardır. Reaktif yaklaşım kazaların ve sistem bozukluklarını inceler. Olaylardan sonra önlem almayı esas alır. Proaktif yaklaşım ise, yönetim sistemi kapsamında güvenlik kültürüne önem göstermektedir. Kaza gerçekleşmeden güvenli olmayan durum ve hareketi ortadan kaldırmayı hedeflemektedir.



Şekil 2. Yeraltı kazı işlerinde iş kazası sonucu ölüm sayıları (SGK İstatistikleri, 2013-2016)

6331 sayılı İSG Kanunun 1 Ocak 2013 tarihinde yürürlüğe girmesiyle yayınlanan istatistikler referans alındığında; 2013-2016 yılları arasında yer altı madenlerinden 'Kömür ve Linyit Çıkartılması' işlerinde toplam 408 çalışan, Ham petrol ve Doğalgaz Çıkartılması işlerinde 4 çalışan, Metal Cevheri Madenciliği işlerinde 44 çalışan, Madenciliği destekleyici hizmet faaliyetleri işlerinde 6 çalışan ve Diğer Madencilik ve Taşocakçılığı işlerinde 170 çalışan hayatını kaybetmiştir. Bu nedenle iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları ile saha ortamında ve saha çevresinde iş kazası ve meslek hastalığı oluşumuna neden olacak tehlikelerin doğru şekilde belirlenmesi, kaynağında yok edilmesi veya kanunda belirtilen asgari koşulları sağlayacak şekilde ikame edilmesiyle bir yandan çalışanlar korunurken bir yandan da işin devamlılığı sağlanacaktır, tüm bunlar ise toplumsal refahın artmasına katkıda bulunacaktır (Tozkoparan ve Taşoğlu, 2011).

4 YERALTI KAZI İŞLERİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ İLE İLGİLİ SORUNLAR

Çalışanlara zarar verme potansiyeline sahip durumların kaynağında yok edilmesi, iş sağlığı ve güvenliği uygulama ilkelerinin başında gelmektedir. Yeraltı kazı işlerinde çalışma koşulları nedeniyle risk faktörlerinin kaynağında yok edilmesi oldukça zordur. Bu nedenle sektörde yaşanan iş kazalarını en aza indirebilmek için, bu kazaların artmasına neden olan sektöre özgü özelliklerin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu özellikler aşağıdaki başlıklar altında kısaca özetlenebilir.

4.1 Çalışma Sahasındaki Fiziksel Risk Etmenleri ve Ekipman

Yeraltı kazı işlerinde fiziksel risk etmenlerinin başında gürültü, titreşim ve uygun olmayan iklim koşulları altında çalışmalar gelmektedir. Kazı çalışmaları esnasında kullanılan kesici ve delici aletlerin çalışan üzerinde oluşturmuş olduğu vibrasyon etkisi Beyaz Parmak Sendromu adı verilen titreşime bağlı meslek hastalığına ve makinelerin çıkarmış oldukları tiz seslerde gürültüye bağlı işitme kaybına, yani meslek hastalığına neden olmaktadır (Akkaya, 2001). Kullanılan makinelerin alternatiflerinin kısıtlı olması nedeniyle alınan mühendislik yöntemleri tehlikeyi kaynağında yok etmek için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle çalışma saatleri süresince kullanılmak üzere bütün işçilere kulak koruyucu uygun Kişisel Koruyucu Donanım (KKD), makinelerle birebir temas halinde bulunan çalışanlara ise titreşim sönümleyici uygun KKD verilmelidir.

4.2 Kişisel Koruyucu Donanım Yetersizliği

İş Sağlığı ve güvenliği uygulama ilkelerinin en son basamağında çalışanların tümüne maruz kalabilecekleri risk etmenlerinin etkisini azaltabilmek için Kişisel Koruyucu Donanımlar (KKD) 'ın tümü zimmet formuyla birlikte her çalışana özel olarak teslim edilmeli ve çalışma alanında yapılan denetimler ile birlikte kullanmalarının devamlılığı sağlanmalıdır. Yeraltı kazı şantiyelerindeki tüm çalışanlara uygun yeterlilikte baş koruyucular, kulak koruyucular, solunum koruyucuları, el-kol koruyucuları, ayak koruyucuları ve tüm vücut koruyucuları temin edilmelidir.

Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliği hükümlerine göre çalışma alanında kullanılacak tüm KKD'ler işveren tarafından temin edilmeli ve maliyeti çalışanlara yansıtılmamalıdır. İşveren açısından maliyeti azaltacak pozitif yaptırımların olmaması çalışma alanında kullanılacak KKD'lerin yeterli sayıda temin edilememesine zemin oluşturmaktadır.

4.3 Sürekli Hareket Halinde Olma

Yeraltı kazı işlerinde çoğunlukla birbiri ardına devam eden iş sirkülasyonu nedeniyle hem malzemeler hem de çalışanlar sürekli hareket halindedir. Bu çalışmalar genellikle planlı ve düzenli bir iş akışıyla yürütülememektedir. Yatay düzlemde hareketin yanı sıra iş ekipmanları, mobil ekipman ve araçlar; dönme, kaldırma, taşıma vb. hareketler de yapmaktadırlar. Yeraltı şantiyelerinde bu sürekli hareket halinde olma durumu neticesinde; çalışan ve malzeme düşmesi, çarpma, sıkışma gibi iş kazalarının olma ihtimalini de arttırmaktadır.

4.4 Göçük Sebepleri

Yeraltı kazı çalışmalarında toprağın kayması, parça düşmesi gibi durumlar neticesinde meydana gelen göçükleri etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Gerek çalışma ortamının jeolojik yapısı gerek çevresel etkilerle doğrudan ilgili olan bu durumlar kazı yapılan alanda göçük oluşma ihtimalini arttırmaktadır (Taş, 2015).

Kazının yapıldığı çalışma sahasında zeminin nitelikleri, zeminin nem miktarı, çalışma yapılan toprağın üstündeki hafriyat yığını ve iş makineleri, daha önce yapılan kazı çalışmaları ve kazının açık kalacağı süre ve çevre koşulları göçük oluşma riskini oluşturmaktadır (Taş, 2015). Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda zeminin fiziksel ve jeolojik özellikleri göçük oluşmasında temel sebeplerden biri olmaktadır.

Maden ve yeraltı kazı çalışmalarında işçilerinin güvenli bir çalışma ortamında

bulunmalarını sağlamak için İş Güvenliği Profesyonellerinin iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili risk değerlendirmelerinde sağlık ve güvenlik önlemlerini içeren bölümü şantiye mühendisleriyle entegre bir şekilde hazırlaması önerilmektedir.

4.5 Çalışan Sirkülasyonu ve Mesleki Yeterliliğin Sorgulanması

4857 sayılı İş Kanunu 'nda Maden ve Yeraltı İşlerinde çalışan işçilerin hakları, bazı noktalarda diğer işçilerden farklılık göstermektedir. Yeraltı kazı işlerinde çalışan işçilerin çalışma süresi; günde en fazla 7,5 saat, haftada ise en fazla 37,5 saat çalışabilmektedir. Bu durum yoğun iş temposunda daha fazla çalışan istihdam edilmesini, iş akışının vardiyalı sistemde düzenlenmesini sağlamaktadır. Vardiyalı olarak düzenlenen çalışma saatleri işçi sirkülasyonuna ve iş değişimlerine neden olmaktadır. Dolayısıyla sektörde çalışanların, düzenli ve periyodik bir iş sağlığı ve güvenliği eğitimi, mesleki yeterlilik gibi eğitimleri almaları zorlaşmakta, iş güvenliği açısından kalıcı bir kurum kültürü oluşmasını engellenmektedir.

Yeraltı kazı çalışmalarında özellikle bilhassa baraj, köprü, tünel vb. projelerde doğa ile mücadele zorunlu olmaktadır. Gelişen teknolojiden faydalanarak çalışma koşullarını iyileştirmek ve çalışanların iş yükünü hafifletmek için büyük ve ağır devasa iş makineleri kullanılmaktadır. İş makinalarının hareketlerinden kaynaklanabilecek iş kazalarının yanı sıra patlatma, delme vb. yapılan faaliyetler de tehlikeli durumları oluşturmakta, ayrıca zorlukları ve gerektirdikleri uzmanlık sebebiyle iş sağlığı ve güvenliği yönünden tehdit oluşturmakta ve iş kazalarının artmasında önemli rol oynamaktadır.

Bu nedenle iş kazalarının oluşmasında en büyük etkene neden olan tehlikeli davranışı kontrol edebilmek adına 6331 sayılı İSG Kanunu'na göre çok tehlikeli sınıfta yer alan işyerlerinde istihdam edilen tüm çalışanlara en az 16 saatlik Temel İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) eğitimi verilmelidir. Temel İSG eğitimlerine ek olarak çok tehlikeli sınıfta yer alan mesleklerde çalışanların Mesleki Yeterliliklerinin tamamlanması ve belgelenmesi zorunluluk haline gelmiştir. Böylece istihdam edilen tüm çalışanların yaptıkları işe yönelik tecrübe ve bilgi eksikliklerinin giderilmesi ve kişilerin kusurundan kaynaklı olabilecek iş kazalarının oluşması önlenmiş olacaktır.

5 YERALTI ÇALIŞMALARINDA İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN NELER YAPILMALIDIR?

2012 yılından itibaren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunun yürürlüğe girmesiyle çalışanların sağlığının korunması için güvenli bir çalışma ortamı oluşturulması amaçlanmıştır. Yine iş sağlığı ve güvenliği kanununa göre çalışma sahasında düzenleyici ve önleyici faaliyetlerle iş kazası ve meslek hastalıklarına karşı çalışanların korunması en temel hedeflerden birisidir. Bu nedenle işverene ve çalışanlara belirli yükümlülükler düşmektedir. İş sağlığı ve güvenliği ile ilgili maddi yatırımların tamamı işveren tarafından karşılanması ve çalışanlara yansıtılmaması gerektiğini özellikle vurgulamak gerekmektedir.

1. Yeraltı kazı işlerine başlamadan önce çalışma sahasının girişine İş Güvenliği Uyarı-İkaz Levhaları asılmalı ve sürekliliği sağlanmalıdır.
2. Yeraltı kazı işlerinde çalıştırılacak olan işçiler işe başlamadan önce en az 16 saatlik temel iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerine katılmaları sağlanarak, karşılaşabilecekleri mesleki risklerle ve meslek hastalıkları ile ilgili bilgilendirilmeleri gerekmektedir. Bu eğitimler işe başlamadan önce verilmeli ve her yıl düzenli olarak yinelenmelidir.
3. Çalışanların iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yazılı ve sözlü bildirilen emniyet tedbirlerine uymaları sağlanmalı, çalışma sahasında güvenliği tehdit edebilecek güvensiz hareketlerin oluşması engellenmelidir.
4. Her vardiya başlangıcında ve çalışma esnasında iş güvenliği uzmanları aktif olarak sahayı ve çalışanları sürekli denetlemeli, gerekli durumları yazılı olarak kayıt altına almalıdır.

5. İş güvenliği uzmanları, yeraltı kazı işlerinde çalışanların kişisel koruyucu donanımsız (Baret, Yelek, İş Ayakkabısı, Toz Maskesi) girmesine izin vermemelidir. Ayrıca yapılan işin niteliğine ve kullanılan makine teçhizatlara göre Kulaklık, Eldiven, Emniyet Kemeri, Gözlük, Yüz Siperi gibi tamamlayıcı kişisel koruyucu donanımları vermelidir. Kişisel koruyucu donanımların tamamı çalışanlara özel olmalıdır ve zimmet formu ile kullanılmak üzere teslim edilmelidir.

6. Kazı çalışmaları esnasında oluşabilecek taş düşmeleri, fay kopma ve kaymalarına karşı gerekli tahkimat için uygun ve yeterli malzeme çalışma sahasında bulundurulmalıdır. Bunların stok seviyesinin korunması için daimi olarak takibi yapılmalıdır.

7. Her türlü tahkimat, çatlak, kavlak kontrolü için yapılan çalışmaların sonuçları vardiya rapor defterine veya tahkimat defterine sorumluları tarafından yazılmalıdır. Gerekli bilgilendirmeler iş güvenliği uzmanına da yapılmalıdır.

8. İş makinesi operatörleri ve kamyon şoförleri çalışma sahasında trafik kural ve kaidelerine uymalıdır. Ehliyetsiz kişilerce kamyon ve iş makinesi kullanılması yasaklanmalı ve iş makinelerinden kaynaklanabilecek çalışanların ezilmesi gibi iş kazalarını engellemek için el-kol işaretleriyle operatörü yönlendirebilecek, eğitim almış yönlendirici personel bulundurulmalıdır.

9. Yükleme - boşaltma araçları ve kamyonlar çalışma alanında emniyet sınırları içerisinde 20 km 'den fazla hız yapmamalıdır.

10. Yeraltı kazıları esnasında Pnömokonyoz (akciğer toz) hastalığına neden olabilecek toz oluşumunu önleyebilmek için sulu delme, kesme ve kazı yöntemleri ile birlikte tozu bastırmak için su firketeleri veya hortumla sulama yapılarak işçilerin toz solunumu önlenmelidir.

11. Yeraltı çalışmaları ile ilgili bütün işlerde görevli bulunan başta İş Güvenliği Uzmanı, Vardiya çavuşu, Daimi nezaretçi, Tünel mühendisi birlikte koordine olarak işle ilgili makinaları kontrol etmek ve işin devamı için bakımlarını yaptırmalı tehlikeli gördükleri hallerde tehlike giderilinceye kadar çalışmayı durdurarak gerekli tedbirlerin alınmasını sağlamalıdır.

KAYNAKLAR

Akkaya, C. 2001. Maden Sektöründe Risk Faktörleri, Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi, Cilt 2, Sayı/No. 5, ss. 38-41.

ETKB, 2006. Kazı İşleri Teknik Şartnamesi, Enerji ve Tabii Kaynaklar pss Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara 2006.

Heinrich, H.W., Petersen, D., Roos, N. 1980. Industrial accident prevention (5th Ed.). New York, Mcgraw-Hill. http://isgtedbir.com/yapi-isleri/kazi-isleri/ Erişim Tarihi: 30.07.2018

http://www.gelisimosgb.com.tr/Assets/images/Kanal_Kazisi_Calismalarinda_Is_Sagligi_ve_Guvenligi_20170725_113305.pdf Erişim Tarihi : 30.07.2018

https://emlakkulisi.com/kazi-islerinde-is-guvenligi/198528 Erişim Tarihi: 30.07.2018

https://www.isgturkiye.com/konu/t%C3%BCnel-%C3%87al%C4%B1%C5%9Fmalar%C4%B1nda-al%C4%B1nmas%C4%B1-gereken-g%C3%BCvenlik-%C3%96nlemleri.3275/ Erişim Tarihi: 20.06.2018

İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012. Erişim Tarihi: 03.06.2018, Erişim Adresi: http://www.ttb.org.tr/mevzuat/index.php?option=com_content&view=article&id=923:-salii-ve-guevenl-kanunu&Itemid=28.

İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği, 2012. T.C. Resmi Gazete, 28509, 26 Aralık 2012, Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul ve Esasları Hakkında Yönetmelik. (2013). T.C. Resmi Gazete, 28648, 15 Mayıs 2013.

İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği, 2012. T.C. Resmi Gazete, 28509, 26 Aralık 2012, Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul ve Esasları Hakkında Yönetmelik. (2013). T.C. Resmi Gazete, 28648, 15 Mayıs 2013.

Northcott, J.A. 1973. Madenlerde Kazalardan Korunma Prensipleri, Bilimsel Madencilik Dergisi, Cilt. XII, Sayı/No. 4, 29-31.

Oral, T. 2018. Limanlarda Yük Elleçlemesi Esnasında Karşılaşılan Risklerin Çevre, İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından İrdelenmesi. İstanbul Esenyurt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Öztunç, İ. 2007. Solunabilir Tozla Mücadelede Toz Tutucular ve TTK 'da Uygulama Olanakları, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Bitirme Tezi, Zonguldak.

Personel Dairesi Başkanlığı, Erişim tarihi: 02.06.2018, Erişim adresi:

https://www.csgb.gov.tr/media/6518/2012_hizmeticiegitim.pdf.
SGK İş Kazası İstatistikleri 2013 Yılı Verileri http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari Erişim Tarihi: 30.06.2018.
SGK İş Kazası İstatistikleri 2014 Yılı Verileri http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari Erişim Tarihi: 30.06.2018.
SGK İş Kazası İstatistikleri 2015 Yılı Verileri http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari Erişim Tarih: 30.06.2018.
SGK İş Kazası İstatistikleri 2016 Yılı Verileri http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari Erişim Tarihi: 30.06.2018.
Taş, N. 2015. Altyapı Kanal Kazılarında Göçük Riski Ve Koruyucu Tedbirlerin İş Güvenliği Yönünden İncelenmesi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü Yüksek Lisans Bitirme Tezi, Ankara.
Tozkoparan, G., Taşoğlu, J. 2011. İş sağlığı ve güvenliği uygulamaları ile ilgili işgörenlerin tutumlarını belirlemeye yönelik bir araştırma, Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Cilt. 30, Sayı. 1, ss. 181-209.
WHO. 2009. Global Health Risks: Mortality and Burden of Disease Attributable to Selected Major Risks. Geneva: World Health Organization.

Yeraltı Hazırlık Çalışmalarında İstenmeyen Olayların Önlenmesinde Detaylı Risk Raporu Hazırlamanın Önemi

Importance of Detailed Risk Report Prevention of Understanding Events in Underground Preparation Studies

R. Kocaman, B. Kocaman
Maden İşleri Genel Müdürlüğü, Strateji Daire Başkanlığı, Ankara

C. Doğruöz
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya

ÖZET Yaşadığımız dünyada enerji ve hammaddeye olan ihtiyaç her geçen gün artarak devam etmektedir. Enerji ve hammadde ihtiyacının büyük kısmı madenlerin çıkartılıp üretilmesi ile elde edilmektedir. Ülkemiz açısından yerli enerji kaynaklarının kullanılması ise ayrı bir önem taşımaktadır. Söz konusu yerli kaynaklarımızdan birisi de kömür rezervlerimizdir. Kömür üretimi çok tehlikeli iş kolunda yer aldığı için sürekli istenmeyen olaylar yaşanmaktadır. Hazırlık çalışmalarında risklerin oluşması üretim aşaması kadar geçen süreçte üzerinde durulması gereken çok önemli bir konudur. Tehlikelerden kaynaklanacak istenmeyen olayların önlenmesi bu ihtimallerin ortadan kaldırılması çok önemlidir. Yeraltı maden ocaklarında hazırlık çalışmalarına başlanılmadan önce detaylı risk değerlendirme raporu hazırlamak, istenmeyen olayların yaşanmaması önlemede bize yararı olacaktır. Hazırlık çalışmalarındaki riskleri belirlemek ve önlemlerini almak için tehlike kaynakları, tehlikeler, tehlikenin büyüklüğü, tehlikenin açışa çıkma ihtimalleri, belirsizlikler, istenmeyen olaylar ve kontroller incelenmesi gerekir. Yapılan faaliyetlere göre tehlike kaynakları belirlenerek, tehlikeler ortaya çıkarılarak istenmeyen olayların yaşanmaması için yapılan bir risk değerlendirme çalışması incelenecektir. Bu çalışmada alınması gereken önlemlerle ilgili olarak mevcut kontrollerin durumu, yapılması gereken revizyonlar ile istenmeyen olayları önlemede detaylı risk raporu hazırlamanın önemi vurgulanmaktadır.

ABSTRACT The need for energy and raw materials in the world we live in continues to increase day by day. Much of the energy and raw material needs are derived from the extraction and production of mines. The use of domestic energy sources in terms of our country is of special importance. In other words, one of our domestic resources is our coal reserves. Since coal production is located in a very dangerous business line, there are constantly undesirable events. The formation of risks in preparatory work is a very important issue that needs to be addressed in the process up to the production stage. It is very important to prevent these incidents from being avoided by preventing unwanted incidents resulting from the hazards. Preparing a detailed risk assessment report before starting preparatory work in underground mines will help us in preventing the occurrence of undesirable events. In order to determine the risks and take precautions in preparatory works, the sources of danger, the hazards, the size of the hazard, the possibility of opening the danger, uncertainties, undesirable events and controls should be examined. According to the activities carried out, risk sources will be determined and a risk assessment study will be carried out in order to reveal the hazards and avoid any undesirable events. With regard to the precautions to be taken in this study, it is emphasized that the situation of the existing controls, the revisions to be made and the preparation of a detailed risk report in order to prevent the unwanted events.

1 GİRİŞ

Günümüzde isçi sağlığı ve iş güvenliği bir bilim dalı olarak kabul edilmektedir. Üretim süreçlerinden ve toplum yaşamındaki değişimlerle birlikte gelişim göstermeye devam etmektedir. Çalışanların çalışma yaşamındaki değişiklikler, isçi sağlığı ve iş güvenliği sorunlarının da gündeme gelmesine yol açmıştır. Üretim araçlarında ve üretim yöntemlerindeki değişim ve dönüşümler sonucunda çalışanların sağlık ve güvenlik sorunları da çoğalmış ve giderek önem kazanmaya başlamıştır. Tarih boyunca çalışma yaşamındaki gelişmeler, işçi sağlığı ve iş güvenliği konusundaki gelişmelere de rehberlik etmiştir (Çiçek ve Öçel, 2016).

Bir yeraltı maden ocağındaki hazırlık çalışmaları süresince olabilecek iş kazalarının önceden tahmin edilebilmesi, öngörülebilmesi, (proaktif yaklaşım) ve sonuçlarının oluşturacağı etkilerin büyüklüğü de dikkate alınarak yapılacak önlemler ve iyileştirme faaliyetlerinin öncelik sıralamalarının planlanması gerekir. Risklerin değerlendirilmesi, analizi, yorumlanması ve gözden geçirilmesi istenmeyen olayları önlenmesi çalışmaları gerçekçi yaklaşımlarla yapıldığında iş güvenliği çalışmaları için iyi bir rehber oluşturmaktadır. Hazırlanan risk değerlendirme tabloları bir el kitabı gibi iş güvenliği personelinin çalışmalarına yön verecektir. Risklerin değerlendirilmesi ve önceliklerinin belirlenmesi ile iyileştirme çalışmalarında öncelikli risklere ağırlık verilmesini sağlayacak istenmeyen olayları önlememizi sağlayacaktır. Risklerin Değerlendirilmesi; Bir yeraltı maden ocağı dahilinde tüm faaliyet alanlarını ve ekipman kullanımının sağlık ve güvenlik üzerindeki etkilerinin sistematik olarak incelenmesini içerir [Url-1].

Yeraltı maden ocakları sağlık ve güvenlik açısından çok çeşitli istenmeyen olayların meydana geldiği ortamlardır. Bu sebepten dolayı iş sağlığı ve güvenliği büyük önem arz etmektedir. Madencilik sektörü günümüzde iş kazaları ve meslek hastalıklarının en fazla görüldüğü sektörlerden biridir. İş sağlığı ile ilgili çalışmalarının genel amacı çalışanların sağlığını korumak güvence altına almaktır. İşçi sağlığı ve iş güvenliği, tehlikelerin tanımlanması, istenmeyen olayların belirlenmesi önlem alınmasıyla birlikte risklerin öngörülmesi, değerlendirilmesi, analiz edilmesi ve bu risklerin tamamen ortadan kaldırılmasını (elimine edilmesini) ya da zararların en aza indirmek için yapılacak çalışmaları (ikame, mühendislik çözümler, yönetimsel çözümler, kişisel koruyucu kullanımın) kapsar. Madencilik Sektöründe oluşan iş kazaları analiz edildiğinde kazaların büyük kısmının yeraltı maden ocaklarında (arama, hazırlık, üretim, nakliyat ve cevher hazırlama) evrelerinin her birinde ayrı riskler barındıran risklerin önlenememesi neticesinde oldukça fazla iş kazasının meydana geldiği gözlenmiştir. Bundan dolayı can kayıpları da yeraltı maden ocaklarında daha fazladır. İstenmeyen olayları önlemek ve daha sağlıklı bir çalışma yeri oluşturmak ancak iş sağlığı ve güvenliğine daha fazla önem vermekle mümkündür. Olası riskleri önceden öngörebilmek ve istenmeyen olayları ortadan kaldırmak temel prensip haline gelmelidir. Kömür üretimi çok tehlikeli iş kolunda yer aldığı için sürekli istenmeyen olaylar yaşanmaktadır. Kömür üretimine geçmek içinde hazırlık çalışması yapılması gerekmektedir. Hazırlık çalışmalarında risklerin oluşması üretim aşaması kadar geçen süreçte üzerinde durulması gereken çok önemli bir konudur. Tehlikelerden kaynaklanacak istenmeyen olayların önlenmesi bu ihtimallerin ortadan kaldırılması çok önemlidir. Kazalar, önceden planlanmamış ve istenmeyen olaylar olup, vukuunda, ölümlere, yaralanmalara ve maddi kayıplara neden olmaktadır Özellikle kömür madenciliği, ülkemizde en fazla iş kazasının meydana geldiği iş kolları arasındadır Literatürde kömür madenlerinde gerçekleşen kazalarla ilgili çalışmalar mevcuttur.

Kömür madenlerinde meydana gelen iş kazaları ve meslek hastalıklarına karşı önleyici ve koruyucu tedbirlerin belirlenmesi için oluşabilecek tehlike kaynaklarının, tehlikelerin, istenmeyen olayların belirlenmesi gerekir. Kömür madenlerinde meydana gelebilecek tehlikeler;

- Kömür içerisinde doğal olarak bulunan metan,

- Metan degajı,
- Kömür tozu ve taş tozu patlamaları,
- Kömür yangınları,
- Elektriksel kaynaklı kazalar,
- Su baskını,
- Göçükler veya taş-kavlak düşmeleri,
- Havalandırma eksikliğinden kaynaklanan ortamdaki kimyasal gaz veya buharlar gibi kimyasal tehlikeler, karbon monoksit, karbon dioksit, metan solunması, ağır metaller
- Yetersiz oksijen,
- Yetersiz aydınlatma,
- Yerçekiminden kaynaklı parça düşmeleri
- Termal konfor ve gürültü, titreşim gibi fiziksel tehlikeler,
- Pas, kemirgen hayvanlar, nem, rutubet, bulaşıcı hastalıklar gibi biyolojik tehlikeler,
- Yangın veya patlama tehlikesi,
- Makinelerden veya nakliyat ekipmanlarından kaynaklanan tehlikeler,
- Ergonomik tehlikeler,
- Psikolojik tehlikeler vb. şeklinde sınıflandırılabilir (Fişek,1999).

2 TEHLİKE VE RİSK KAVRAMLARI

Bu kavramlardan ilki ‘tehlikedir. Tehlikenin ve riskin tanımını İş Sağlığı Ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliğine göre aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

Tehlike: İşyerinde var olan ya da dışarıdan gelebilecek, çalışanı veya işyerini etkileyebilecek zarar veya hasar verme potansiyelini, ifade eder. Risk: Tehlikeden kaynaklanacak kayıp, yaralanma ya da başka zararlı sonuç meydana gelme ihtimalini olarak tanımlanmıştır. Günümüzde tehlike ve risk kavramları birbiri yerine aynı anlamda kullanılmaktadır. Buda birçok karışıklığa sebep olmaktadır. Güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturmak için İSG ile ilgili kavramların iyi bir şekilde anlaşılması gerekir. Yine bu kavramlardan tehlikeyi Dünya Sağlık Örgütü (WHO) bir nesne ya da belli koşulların, etkenlerin insan sağlığı ve çevre için olumsuzluk içermesi şeklinde tanımlamaktadır. OHSAS 18001’de (2007) ise insan yaralanması ya da hastalığına neden olabilecek kaynak, faaliyet veya durum olarak tanımlanmıştır. İkinci önemli kavram ise ‘risk’ kavramıdır. Risk Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) tarafından belli bir dönemde veya koşullar altında istenmeyen olayın ortaya çıkma olasılığı, çevre koşullarına göre sıklık ve olasılık olarak tanımlanırken, OHSAS 18001’de (2007) “Tehlikeli bir olayın veya maruz kalmanın meydana gelme olasılığı ve sonuçlarının kombinasyonu” şeklinde tanımlanmıştır. Farklı tanımlamalar da karışıklıklara sebep olmaktadır. Tehlike ile risksin birbirinden ayrılması birbiri yerine kullanılmaması gerekir. Bu kavramların çok iyi anlaşılması risk değerlendirmesi çalışmalarını daha iyi anlamamızı sağlar.

3 RİSK DEĞERLENDİRMESİ

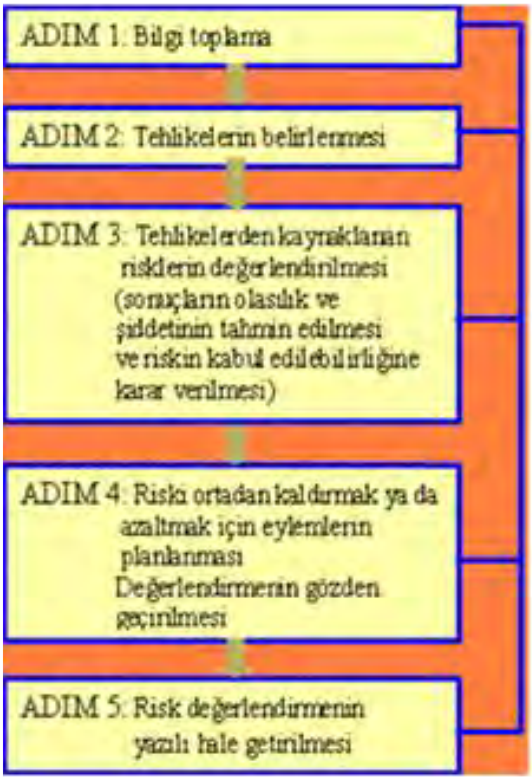
İş Sağlığı Ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliğine göre:

“*Risk değerlendirmesi; tüm işyerleri için tasarım veya kuruluş aşamasından başlamak üzere;*

- *Tehlikeleri tanımlama,*
- *Riskleri belirleme ve analiz etme,*
- *Risk kontrol tedbirlerinin kararlaştırılması,*
- *Dokümantasyon,*
- *Yapılan çalışmaların güncellenmesi ve gerektiğinde yenileme aşamaları izlenerek gerçekleştirilir”*

şeklinde ifade edilmektedir. Buda bize bir yaşam döngüsünü hatırlatmaktadır. Sürekli devam eden güncellemeler ve yenilemelerden dolayı işyeri riskleri aşağıda gösterildiği gibi 5 basit adımla değerlendirilebilir.

Şekil 1. Hazırlık galerisi görünümü



Şekil 2. Risk değerlendirme adımları

İstenmeyen olayların önleyebilmenin en iyi yollarından biri, oluşabilecek tehlike ve riskleri tespit etmek amacıyla risk değerlendirmesinin uygulanmasıdır.

6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve ilgili yönetmeliklerce" *İşveren; çalışma ortamının ve çalışanların sağlık ve güvenliğini sağlama, sürdürme ve geliştirme amacı ile iş sağlığı ve güvenliği yönünden risk değerlendirmesi yapar veya yaptırır."* Şeklinde işyerlerinde risk değerlendirilmesi yapılması zorunlu hale getirilmiştir. İşyerlerinde var olan risklerin tespit edilebilmesi için pek çok risk değerlendirmesi metodu mevcuttur. Bunlar nitel, nicel veya yarı-nicel şeklindedir. Nicel risk analizi, riskleri belirlerken sayısal yöntemlere başvurur. Bunlar ise:

- Temel Risk Değerlendirme Metotları
- Olursa Ne Olur. (What if)
- Tehlike ve İşletilebilirlik Çalışma metodu (HAZOP)
- Hata Türü ve Etkileri Metodu (FMEA)
- Hata Ağacı Metodu (FTA)

Nitel risk analizinde tehdidin olma ihtimali, tehdidin etkisi gibi değerlere sayısal değerler verilir ve bu değerler matematiksel ve mantıksal metotlar ile proses edilip risk değeri bulunarak yapılır. Bunlara örnek ise:

- Matris Metodu,
- Kinney Metodu
- Ridley' in Metod

Yarı nicel yöntemlerde ise sonuç ve olasılıklar için sayısal derecelendirme ölçeklerinden faydalanır ve risk düzeyini belirlemek için formül kullanmak suretiyle bunları bir araya getirilerek yapılır. Ölçekler doğrusal veya logaritmik olabilir ya da başka türden bir ilişki içerebilir. Kullanılan formüller de farklılık gösterebilir. [48]. Aynı zamanda risk değerlendirme metotları tümdengelimli ve tümevarımlar olarak da çeşitlere ayrılabilmektedir. Tümevarım metotları özellikli nedenlerden genel sonuçlara doğru yaklaşan analizleri temsil eder. Tümevarım metodu uygulayan risk değerlendirme metotlarından bazıları:

- Ön Tehlike Analizi (PHA),
- Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA)
- Olay Ağacı Analizi (ETA)'dir [6].

Tümdengelim yaklaşımı ise genelden özele inen bir metottur. Bu yaklaşımdaki amaç sistemi bozan etmenlerin tespit edilmesidir. Kaza araştırmaları tümdengelim metotlarına verilebilecek en iyi örneklerden biridir. Hata Ağacı Analizi (FTA) metodu bir tümdengelim risk değerlendirme metodudur.

4 İSTENMEYEN OLAYLARIN ÖNLENMESİNDE DETAYLI RİSK RAPORLARI

Normal bir risk raporunda Faaliyetler, Tehlike, Risk Skoru, Riski Kontrol Altına Alma Yöntemleri'nden oluşmaktadır (Çiz. 1). Detaylı bir risk değerlendirme raporu ise faaliyetler, alt faaliyetler, tehlike kaynağı, tehlikeler, tehlikenin meydana çıkma şekli, belirsizlikler, istenmeyen olaylar, muhtemel önlemler, ek ilave önlemler yer almaktadır (Çiz. 2). Karşılaştırma yapılabilmesi için çizelgelerde (Çiz.1 ve 2) aynı konu başlıklı sütunlara yer verilmiştir.

Çizelge 1. Normal risk değerlendirmesi raporu

Faaliyet	Tehlike	Risk	Riski Kontrol Altına Alma Yöntemleri
Elektrik çarpması	Personelin kazalanması-ölüm		Elektrik aksamlarının bir elektrikçi tarafından düzenli olarak kontrol edilmesi ve uygun izolasyon yapılması gerekir, motorların gövde topraklaması yapılmalıdır.
Elle yük kaldırma	Düşme – Yaralanma	YÜKSEK Risk Skoru=15	Elle yük kaldırma ve belin korunması Eğitimi, bir kişi tarafından maksimum 25 kg ağırlık kaldırılması, bel destek kemeri kullanılması
Su geliri	Su basması	YÜKSEK Risk Skoru=16	•Su geliri takip edilmeli arma durumunda yetkili personele bilgi verilmeli •Sifonlar yadımı ile su ceplerine alınmalı •Su atım projesi yapılmalı
Metan gazı patlaması	Yeraltı maden ocaklarında gaz birikmesi neticesinde patlaması yaralanma-ölüm	YÜKSEK Risk Skoru=16	•Yeraltında gaz değeri %1 olması durumunda çalışma durdurulmalıdır •Uygun havalandırma sistemi kurularak çalışma alanı uygun koşullara getirilmelidir. •Gaz oranı patlama sınırına yaklaşması durumunda tahlisiye cihazları ile eğitimli kişiler tarafından tedbirler alınmalıdır. •Gaz ölçümü düzenli olarak yapılmalıdır •Uzaktan işleme sistemi ile takip sağlanmalıdır. •Gaz oluşum riski olan bölgelerde uygun havalandırma yapılmalıdır •Kullanılacak tüm ekipmanlar eksproof özellikli olmalıdır Çalışanlara yönelik acil tahliye denemeleri yapılmalı
CO gazı oluşumu durumu	Zehirlenme-ölüm	YÜKSEK Risk Skoru=16	•Gaz ölçümü düzenli olarak yapılmalıdır •Her personele 1 adet düşecek şekilde OFK verilmelidir. •50 ppm geçmesi durumunda çalışma durdurulmalı ve havalandırma yapılmalıdır. •Uzaktan işleme sistemi ile takip sağlanmalıdır.
CO2 gazı oluşumu	Gaza maruz kalma sonucu boğulma - ölüm	YÜKSEK Risk Skoru=15	•Gaz ölçümleri düzenli yapılmalı •Barajları açmadan ya da kapatılmış alanlara girmeden önce ölçümleri yapılı daha sonra havalandırma yapıldıktan sonra girilmeli
Yangın tehlikesi	Personelin kazalanması-ölüm	YÜKSEK Risk Skoru=15	•Makinelerde yangın tehlikesine karşı hemen müdahale edilebilmesi için yangın söndürücüler hazır bulundurulmalıdır
Havalandırma	Personelin kazalanması	YÜKSEK Risk Skoru=15	•Çalışma alanına uygun havalandırma yapılmalı •Gaz oluşumunu engelleyecek şekilde hava ayarlanmalı •Personelin çalışma ortamının termal konfor sağlanmalı
Kömür yanması	Personelin kazalanması	YÜKSEK Risk Skoru=16	•Önlem alınmadan hiçbir şekilde ateşli çalışma yapılmamalıdır, çakmak-kibrit-sigara ile ocak içerisine girilmemelidir, YSC ve yangın topları bulundurulmalıdır, uygun havalandırma yapılmalıdır.
CH4 Oluşumu	Personelin kazalanması-ölüm	YÜKSEK Risk Skoru=16	•Gaz ölçümü düzenli yapılmalıdır, uzaktan izleme sistemi sürekli takip edilmelidir, çalışma alanlarında acil kaçış maskeleri bulundurulmalıdır, gaz değeri %1 olduğunda iş durdurulmalıdır, ocak içerisine çakmak-kibrit sigara ve cep telefonu sokulmamalıdır, exproof elektrik sistemi kurulmalıdır, yangın söndürme cihazları ve yangın

			topları bulundurulmalıdır, uygun havalandırma sistemi kurulmalıdır, kıvılcım çıkartmayan el aletleri kullanılmalıdır
Oksijen yetersizliği	Personelin kazalanması ölüm-baygınlık hali	YÜKSEK Risk Skoru=16	•Oksijen ölçümü düzenli yapılmalıdır, uzaktan izleme sistemi kurulmalıdır, çalışma bölgelerinde oksijen tüplü maskeler bulundurulmalıdır, oksijen değeri %19 un altına düştüğünde iş durdurulup ocak boşaltılmalıdır.
Matropikörü ayağa dize düşürmek	Personelin kazalanması-yaralanma	YÜKSEK Risk Skoru=16	Çelik burunlu iş ayakkabısı ve çelik burunlu iş çizmesi kullanılmalı, büyük martopikör ile yapılan çalışmalar iki kişi ile yapılmalıdır, dikkatli ve yavaş çalışılmalı, iş talimatlarına uyulmalı, kaval kemiği koruyucusu kullanılmalı
Martopikör ile yapılan çalışmalarda parça sıçraması	Personelin kazalanması-yaralanma	YÜKSEK Risk Skoru=16	Çalışmalar sırasında yüz siperliği ya da koruyucu gözlükler kullanılmalıdır. İş talimatları hazırlanıp talimatlara uygun çalışma yapılmalıdır.

Çizelge 2. Detaylı risk değerlendirmesi raporu

Faaliyet	**Tehlike**	**İstenmeyen olay**	**Risk**	**Risk Kontrol Altına Alma Yöntemleri (Mevcut Kontroller)**
Hazırlık	Açık Elektrik	Elektrik Çapması	Orta Risk Skoru=14	Zırhlı kablo kullanımı, kablonun ocağa indirilmeden test edilmesi, kablo eklerinde uygun malzeme kullanımı, otomatik devre kesici, topraklama, kablonun dış etkenlerden korunması, elektrikli ekipmanların gözle kontrolü, eğitim
Hazırlık	Konveyör	Elektrik çarpması	Yüksek Risk Skoru=23	Enerjinin kesilmesi, enerjinin kesildiğinin kontrol edilmesi, Işıklı sesli uyarı sistemi, uyarı levhaları, çalışma talimatları, arıza durumunda yol vericinin sıfıra alınarak
Hazırlık (Elle Kazı)	Kapalı Alanlar	Su Baskını	Olası risk Skoru=9	Kontrol sondajları, drenaj, planlama, su (deniz) analizleri, KKD
Hazırlık (Tahkimat)	Kömür içerisinde doğal olarak bulunan metan	Yanıcı gazların çalışma alanında birikimi (5-15 aralığı) yanıcı gaz patlaması	Yüksek risk Skoru=15	Havalandırma, metan sensörleri, mobil dedektörler, kontrol sondajları, ofk maskesi, suni teneffüs istasyonları, ofk istasyonları, Exproof malzeme kullanımı, otomatik devre kesiciler, merkezi gaz izleme sistemiyle
Hazırlık (Tahkimat)	Metan CH4	Metanın Parlaması	Çok Yüksek risk Skoru=22	Havalandırma, metan sensörleri, mobil dedektörler, kontrol sondajları, ofk maskesi, suni teneffüs istasyonları, ofk istasyonları, Exproof malzeme kullanımı, otomatik devre kesiciler, merkezi gaz izleme sistemiyle
Hazırlık (Destek Hizmetleri)	Karbondioksit (CO_2)	CO'nun solunması	Yüksek risk Skoru=15	Havalandırma, CO2 sensörü, merkezi gaz izleme sistemiyle izleme, OFK maskesi, suni teneffüs istasyonları, mobil dedektörler, ateşleme yapılacak alanda gerekli güvenlik önlemlerinin alınması

Hazırlık (Destek Hizmetleri)	Karbonmonoksit(CO)	CO'nun patlaması	Yüksek risk Skoru=15	Havalandırma, CO sensörü, merkezi gaz izleme sistemiyle izleme, Exproof malzeme kulanımı, bekleme barajları, kömür kesilen yerlerin yalıtımı, OFK maskesi, suni teneffüs istasyonları, uygun mesafelerde OFK istasyonları, mobil dedektörler, ateşleme yapılacak alanda gerekli güvenlik önlemlerinin alınması
Hazırlık (Destek Hizmetleri)	Oksijen (O2) düşmesi	Ortamdaki O2 miktarının düşmesi sonucu solunum yetersizliği	Düşük Risk Skoru=3	Havalandırma, O2 sensörü, merkezi gaz izleme sistemiyle izleme, OFK maskesi, suni teneffüs istasyonları, mobil detektörler
Hazırlık (Destek Hizmetleri)	Arın, Ateş alabilir gaz püskürmesi, Göçük, Su, Gazlar	Ateş alabilir gaz püskürmesi	Çok Yüksek risk Skoru=23	Sondaj çalışmaları, metanın zaman içindeki değişiminin izlenmesi, metan drenajı, Ateş alabilir gaz püskürmesi emeralerinin izlenmesi, KKD
Hazırlık (Destek Hizmetleri)	Elektrik tesisatı ve ekipmanları	Yangın	Yüksek risk Skoru=15	Ekipmanların peryodik kontrol ve bakımları, eğitim ve talimatlar, Yangın söndürme tüpleri, zırhlı kablo kullanımı, exproof malzeme kullanımı, otomatik devre kesici, uygun kablo başlığı kullanımı, kablo başlıklarının dolgu maddesiyle doldurulması,
Hazırlık (Tahkimat)	Kişinin kaldıramayacağı ağırlık ve boyut	Kas ve iskelet sistemi rahatsızlıkları	Çok Yüksek risk Skoru=23	Talimatlara göre çalışma, iskele ve platform kurma, KKD
Hazırlık (Delme-Patlatma (Kömür Taş)	Martoperfaratör, delici-yükleyici, patlayıcı madde	Duyma kaybı, baş ağrısı, kazalanma riskinin artması	Çok Yüksek risk Skoru=23	Kulaklık kullanılması, periyodik sağlık kontrolü
Hazırlık (Delme-Patlatma (Kömür Taş)	Martoperfaratör, martopikör, delici tükleyici, tork tabancası, patlama	Titreşim kaynaklı el ve vucutta meydana gelen rahatsızlıklar	Orta risk Skoru=10	Titreşim önleyici eldivenler, Martoperfaratörün sehpalı kullanımı, peryodik sağlık kontrolü

5 SONUÇ

Bir yeraltı maden ocağındaki hazırlık çalışmaları sürecinde tasarım ve planlama, galeri açılması, taban sürülmesi, delme patlatma işleri, elektrik işleri, hazırlık çalışmalarında bakım onarım işleri, tamir tarama işleri, tahkimat işleri, köpük işleri, ocak havalandırması, destek çalışması vb. işlerin yapılması incelendiğinde. Normal bir risk değerlendirme raporu ile detaylı bir risk inceleme raporu karşılaştırıldığında;

- Hazırlık çalışmalarında her türlü faaliyetlerin yanında ara faaliyetlerde ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunu da ancak detaylı bir risk değerlendirme raporuyla yapabiliriz. Normal bir risk değerlendirme raporunda ana faaliyet yer almaktadır.
- Hazırlanacak risk değerlendirme raporunda kazalar çok iyi irdelenmelidir. TTK Kozlu Müessesesinde -630 lağım hazırlığı yapılırken metan değajı ve Karadon Müessesesinde Kuyu dibi bağlantı yollarının

Şekil 3. Galeri içinden nakliyattan

Şekil 4. Galeri içinden görünüm

sürülmesi esnasında havalandırma eksikliğinden metan patlaması kazaları incelendiğinde bunları hazırlık çalışmalarında meydana geldiği görülmektedir. Bu kazaların iyi incelenmesi için gerekirse bu tür kazalardan sonra ocakların geçici süre faaliyetlerine ara verilerek sebeplerinin ortaya çıkarılması, oluş şekilleri, bir daha yaşanmaması için neler yapılması gerektiği konuları üzerinde durularak hazırlanacak risk değerlendirmesinde bize rehber olmalıdır. Bunu da ancak bir detaylı risk değerlendirme raporu ile yapılabilecektir.

- Hazırlanacak bir risk değerlendirme raporu yaşam döngüsü şeklinde olup sürekli değişikliklere, yeniliklere, planlamalara göre gözden geçirilip yenilenmelidir. Detaylı bir rapor hazırladığımız zaman her türlü değişikliği görebiliriz.
- Ocak içinde ve dışında yapılan her türlü ölçüm otomatik yapılabiliyorsa otomatik yapılması. (gaz ölçümleri, havalandırma ölçümleri, sıcaklık nem ölçümleri, vb.) ölçümlerinde kontrolünün yapılması, (kontrolün kontrolü) yine bunları detaylı risk değerlendirmesinde görebiliriz.
- Normal bir raporda metan patlaması ele alınırken tek bir sonucundan bahsedilmekte iken detaylı bir risk değerlendirme raporunda zincirleme reaksiyonlardan metan patlamasının kömür tozu patlamasına sebep olabileceği, alınacak önlemlerin detaylarından bahsedilmektedir.
- Detaylı bir risk değerlendirme raporunda sütun başlıkları olarak; faaliyetler, alt faaliyetler, tehlike kaynağı, tehlikeler, tehlikenin meydana çıkma şekli, belirsizlikler, istenmeyen olaylar, muhtemel önlemler, ek ilave önlemler yer alırken normal bir risk değerlendirme raporunda ise faaliyetler, tehlike, risk kontrol altına alma yöntemleri yer almaktadır.
- Detaylı risk değerlendirme raporları bize daha çok inceleme, daha çok gözlem yapmayı, daha çok kontrol yapmamızı sağlamaktadır. İlave kontrolleri eklememizi tekrar tekrar gözden geçirmemizi sağlar.

Yapılan faaliyetlere göre tehlike kaynakları belirlenerek, tehlikeler ortaya çıkarılarak istenmeyen olayların yaşanmaması için yapılan bir risk değerlendirme çalışması incelenmiş, Normal bir risk değerlendirme raporu ile detaylı bir risk inceleme raporu karşılaştırılmıştır. Hazırlık çalışmaları süresince alınması gereken önlemler, mevcut kontrollerin durumu, İstenmeyen olayları önlemede detaylı risk raporu hazırlamanın önemi vurgulanmıştır. Yeraltı kömür ocaklarında istenmeyen olayların yaşanmaması için hazırlanacak risk değerlendirme raporlarının ne kadar önemli olduğu aşikardır. Bu sebepten dolayı hazırlanacak risk değerlendirme raporlarında her türlü dataya yer verilmesi gerektiğini düşünüyoruz. İstenmeyen olayların bir daha yaşanmaması temennisiyle.

Bir avuç kömür için canını verenlerin anısına saygılarımla

Şekil 4. Zonguldak Taşkömürü anıtı

KAYNAKLAR

Çiçek., Ö., Öçel, M. 2016. Dünyada ve Türkiye de İş sağlığı ve İş Güvenliğinin Tarihsel Gelişimi, Emek ve Toplum Dergisi Cilt:5, Yıl:5, Sayı:11.

Direk, C. 2016, Bir Yeraltı Taşkömürü Madeninde Göçük ve taş kavlak düşmesi kazalarının kök nedenlerinin araştırılması. *İş sağlığı ve güvenliği Uzmanlık Tezi,* Ankara.

Fişek, A.G. 1999. İsçi Sağlığı İş Güvenliğinde Güncel Değerlendirme, Çalışma Ortamı Dergisi, Sayı 44, Ankara.

Füzün., M. 2008. Ohsas 18001 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Standardı ve Çimento Sektöründen Bir Firmada Risk Değerlendirilmesi Dokuz Eylül Ünv. Yük. Lisans Tezi, İzmir.

Önder., M., Önder. S. 2010. TKİ'ye Bağlı İşletmelerde Yaralanmalı İş Kazalarının Analizi, Madencilik dergisi, cilt, Cilt 49, Sayı 3, Sayfa 3-12

Özkılıç, Ö. 2005. İş Sağlığı Ve Güvenliği, Yönetim Sistemleri Türk-iş yayını, Ankara.

Url-1: http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/12/20121229-13.htm İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği (Erişim Tarihi 15/07/2018).

Url-2: https://www.csgb.gov.tr/media/6422/riskdegerlendirmerehberi.pdf (Erişim Tarihi 29/07/2018).

Yeraltı Kömür Madenciliğinde Sağlık ve güvenlik https://www.csgb.gov.tr/media/4573/kitap04.pdf

Yeraltı Kazı Faaliyetlerinin İş Sağlığı Yönünden Optimizasyonu

Optimisation of Underground Excavation Activities in Terms of Occupational Health

H. Yücel, E. Soyer
Polyak Eynez Enerji Maden Üretim A.Ş., Soma-Manisa

ÖZET Bu bildiride, Polyak Eynez şirketi tarafından Soma havzasında yürütülen, linyit kömürü üretim projesi büyük hazırlık işleri kapsamında açılmakta olan iki adet 8 m çapında derin maden kuyusu ve desandre kazısı sırasında, meydana gelmesi muhtemel iş kazaları ve acil durumlar da kullanılan ilkyardım ekipmanlarının yeraltı şartlarına göre optimizasyonu, eğitim ve tatbikatlar, koruyucu sağlık hizmetleri hakkında bilgiler verilmiştir. Yapılan optimizasyonlar sayesinde kuyu ve galeri kazı faaliyetleri sırasında meydana gelen kazalardan sonra, kazalının yer altı açıklığından sağlıklı ve doğru şekilde hastaneye kadar sevk edilmesi, yer altı kazı faaliyetlerindeki risklere göre oluşturulmuş travma seti ve ilkyardım çantası sayesinde daha az iş gücü kaybı oluştuğu ve verilen eğitimlerle çalışanların kendilerini daha güvenli hissettikleri görülmüştür. Yeraltı çalışanlarına özel kumanya revizyonu irdelenmiştir.

Maden sahaları genel olarak şehirden, hastanelerden ve 112 acil komuta merkezlerinden uzakta, ulaşımı güç alanlarda bulunmaktadır. Buna ek olarak yeraltına inilmesi acil müdahaleyi daha da güç duruma sokmaktadır. Dolayısıyla sağlık hizmetleri yer altı şartlarına uygun olmalı ve profesyonelleşmelidir.

ABSTRACT This paper gives an insight into the occupational accidents and emergencies likely to occur during the sinking of two deep mine shafts, both 8m in diameter, and excavation of a decline within the scope of the extensive development works of the Polyak Eynez lignite mine project in Soma basin and the optimisation of the first aid equipment according to the circumstances in the underground mine as well as the trainings, emergency drills and preventive health services provided. With the optimisation in these areas, safe and proper transfer of the injured personnel from the underground opening to the hospital, trauma and first aid kits put together based on the risks associated with underground operations have proved to reduce the amount of labour loss and help personnel feel safer due to post-accident trainings they received. Special meals for personnel working underground have been reconsidered.

Mine sites are generally located in remote areas away from ambulance service area of state hospitals and 112 ambulance services. Besides that, responding to an emergency in an underground mine is a challenge on its own right. Therefore, health services must conform to underground circumstances and must be provided by professionals.

1 ACİL MÜDAHALE VE SAĞLIK BİRİMİ

1.1 Revir, Revir Personeli ve Ambulans

Basit hastalıklar, ağır iş kazaları, işe giriş/periyodik muayeneler ve kayıtların saklanması konusunda revirin yeterli ekipmana ve büyüklüğe sahip olması hayati öneme sahiptir. Toplumun her kesiminde görülen basit ayaktan tedavi edilebilecek sadece semptomlara bakarak tanı konabilecek hastalıklara uygun ilaçları bünyesinde barındırarak çalışanların sağlık kuruluşlarına gidip gün kaybetmesi önlenmektedir. Acil müdahale gerektiren hastalıkların basit müdahale gerektiren hastalıklardan ayrılmasını sağlayabilecek basit ekipmanları revir bünyesinde bulundurarak ve bu ayrımı yapacak sağlık personelini seçerek (acil servis tecrübesi olan) gereksiz iş gücü kaybının önüne geçilebilir. Bunun yanında acilen hastaneye ulaştırılması gereken hasta/kazalıyı arazi şartlarına uygun ambulans(4*4) ile hastaneye sevk edilmesinin sağlanması gerekmektedir. Ambulansın iç donanımı en ağır hastayı bile stabil hale getirebilecek kırmızı şeritli 112 ambulansları ile aynı donanıma sahip olması kazanın/hastalığın prognozu açısından önem arz etmektedir.

Kazı ya da madencilik faaliyeti yürütülen şantiye sahasında bulunan revir, yataklı olmalı gözlem odası oluşturulmalıdır. Revir içinde ekg cihazı, monitorizasyon, dikiş seti, atel seti, entübasyon aletleri, oksijen tüpleri, otoskop, nebülizatör, organ taşıma kabı, sürekli hazır buz, şeker ölçüm cihazı ve önemli ilaçlar vs. bulundurarak kan tetkikleri veya radyolojik görüntüleme yapmadan birçok hastalığın ayrımını, tanısını ve tedavisini revirde yapabilmek mümkündür. Söz konusu ekipman ve cihazları haftalık kontrollerini yapan nöbetçi personel için form oluşturup her an kullanıma hazır tutulması gereklidir. Ayrıca revire kurulacak bir bilgisayar programı sayesinde istatistiki bilgiler kolaylıkla elde edilecek, hasta kayıtları sağlıklı bir şekilde arşivlenecektir.

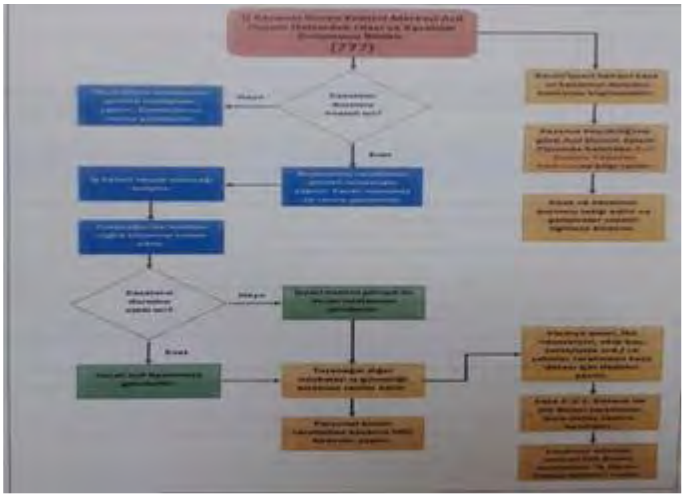
Polyak Eynez işletme sahasında iki adet toplam 8 yataklı revir bulunmaktadır. Bu revirlerde 24 saat nöbetçi sağlık personeli ve ambulans şoförü görevlendirilmiştir.

Ayrıca işletme sahasında bulunan yatakhanede yaşayan yabancı uyruklu personelin bazı durumlarda revirde yatışı yapılarak tıbbi bakımı yapılmış, yolculuk yapabilecek (memleketine dönebilecek) duruma gelene kadar, yakın gözlem ve tıbbi takip altında tutulabilmektedir (Şekil 1).

Şekil 1. Saha reviri

1.2 Acil Durum İş Akış Şeması Oluşturulması ve Operasyonun Havzaya Göre Şekillenmesi

Polyak Eynez işletmesinde iş kazası akış şeması yapılmış ve kaza sonrası yapılacaklar şema haline getirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. İş kazası akış şeması

Kazanın veya acil durumun ilk oluşundan itibaren olaylar zincirinde birçok personel görev alır. Eğer bu zincirde görev dağılımı veya yapılacakların sıralamasında planlama ve uygulama hataları sebebiyle kaos oluşursa, kaza sırasında ve sonrasında, mal ve can kayıplarının yaşanma ihtimalinin yanı sıra

hukuki bir çok problem ortaya çıkacaktır.Bu yüzden kazanın oluştuğu andan itibaren, işletme bünyesinde oluşturulmuş acil durum hattı aranarak, kaza hakkında net ve açıklayıcı bilgiler hızlı ve doğru şekilde kontrol merkezine aktarılmalı, aynı zamanda, kazalı değerlendirilmeli, temel yaşam desteği gerekiyorsa ilk yardım sertifikası olan personel tarafından müdahalesi yapılmalı, temel yaşam desteği gerekmiyorsa, kanama kontrolü, sedyeye alma, boyunluk takma vb. müdahaleler tüm çalışanlar tarafından eğitimlerde gösterildiği şekilde uygulanmalıdır.

Yeraltı kazı bölgesinde oluşacak bir kazadan sonra, kazalının yerüstüne en kısa sürede ve doğru şekilde transferini sağlamak için, öncelikle iyi bir planlama ve organizasyon yapılmalıdır. Bu bağlamda; travma tahtası, sepet sedye, örümcek kemer, baş sabitleyici, ilkyardım çantası, atel seti vb. uygun ekipmanın sahada hazır ve kullanılabilir durumda tutulması, kazalıyı teslim alacak olan sağlık personelinin doğru bilgilendirilmesi (vakanın durumuna göre ön hazırlığını tamamlayarak kazalıyı yeraltı veya yer üstünde en doğru şekilde teslim alması için) gerekmektedir. Sağlık personeli, en hızlı ve en uygun şekilde müdahalesini/transferini yukarıda belirtilen hususların sağlanması halinde yerine getirebilecektir. Kazaya müteakip, gerekli tutanakların tutulması gerekmektedir. Olayla ilgili bilgi aktarımı işletme bünyesinde oluşturulan kontrol merkezi tarafından sağlanarak, öncelikli haber verilmesi gereken sorumlu/görevli listesine göre kaza ve kazalının durumu hakkında bilgi aktarımı sağlanır.

Ayaktan da olsa revire gelen her kazalı kayıt altına alınmalı, işveren temsilcisi veya yeraltı/yerüstü birim sorumlularına sağlık personeli tarafından yazılı olarak kaza ve kazalı hakkında bilgi verilmelidir. Tekrarlanan kazaların işveren vekiline bildirimi ile aynı sebepten kazalanma ya da aynı personelin kazalanması gibi durumlarda, çalışma ortamının ya da personelin işe yetkinliğinin tekrar değerlendirilmesi sağlanmalıdır.

1.2.1 Havzanın hastane ve imkanlarının değerlendirilmesi

Çalışma alanına en yakın hastanenin seçilmesi bazı durumlar için uygun olmakla birlikte vakaya göre hastanenin imkanları göz önünde bulundurulmaması halinde hasta veya kazalı için zaman kaybı oluşturarak hayati tehlike yaratabilmektedir. İzmir-Kınık bölgesinde sürdürülen madencilik faaliyetleri sırasında meydana gelen kazalarda; maden ocaklarıyla olan yakınlığı ve sağlık personelinin tecrübesi sebebiyle Soma Devlet Hastanesi tercih edilmektedir. Bunun yanında özellikle mikrocerrahi gerektiren ve zamanla yarışılan uzuv kopması ve ağır organ yaralanmalarında İzmir EMOT hastanesi tercih edilmekte, Ortapedi müdahalesi gerektiren vakaların Manisa CBÜ Hastanesine, yoğun bakım, plastik cerrahi ve beyin cerrahi gerektiren vakaların İzmir iline bağlı araştırma hastanelerine direk sevk edilmesinin yönetimi ve organizasyonu sayesinde tedavi ve işe dönüş süreleri ciddi oranda kısalmıştır. Bu noktada, kazalının doğru yere hızlı bir şekilde sevk edilmesinin önemi yaşanan olaylarla defalarca kanıtlanmıştır.

Kaza sonrası yaşanacak can ve işgücü kayıplarını en aza indirmek için, işyerinin tam teşekküllü özel dal hastaneleri ile anlaşma yapması ve işyeri hekimine güvenerek tam yetki vermesi çok önemlidir.

1.2.2 Kaza anı ve sonrasında görev dağılımı

Acil durum planı; işletme bünyesindeki İSG birimi, işyeri hekimi ve işveren/yöneticiler ile birlikte detaylı şekilde hazırlanmalı, yapılacak yeraltı ve yerüstü tatbikatlar ile acil durum eylem planı gözden geçirilmeli, kazalının yeraltından hastaneye zamanında ve sağlıklı şekilde sevkinin sağlanması için sürekli iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır. Acil durum planı kapsamında yapılacak eğitim ve tatbikatlarla görev/sorumluluk karmaşası ortadan kaldırılarak, kaza anından itibaren kazalının hastaneye sevkine kadar yaşanacak tüm süreçlerin disiplinli bir şekilde yönetimi ve organizasyonu sağlanmalıdır.

Sağlık personelinin, kazalıyı hastaneden taburcu olana kadar takip edip iletişimi

koparmayarak olayın akışıyla ilgili düzenli bilgi alması ve bu bilgiyi işveren vekili/şirket çalışan temsilcisi ile paylaşması; kazaya ilişkin işyerinde yaşanacak endişe ve merakın giderilmesi sağlayıp, çalışma ve üretim ahenginin devamı korunmaktadır.

Kaza sonrasında kazalı personel işe geri dönüş öncesi mutlaka işyeri hekimine muayene olmalı, işyeri hekimi tarafından muayeneye ilişkin kontrol ve onay formları düzenlenmelidir. (Yücel, 2017) Kontrol sonrasında, kazalının işe dönüşü ile ilgili işyeri hekimi tarafından işveren vekiline gerekli uyarı ve öneriler sunulmalıdır.

2 YERALTINDA İLKYARDIM EKİPMANLARI VE EĞİTİMLER

Sertifikalı ilk yardım eğitimi alan çalışan sayısı yönetmelik gereği her on kişide bir kişi olmak zorundadır. Eğitim kurumları, iş yeri çalışma ortamı hakkında ve yapılacak müdahalenin yeraltı şartları dahilinde olması gerekliliği konusunda yeteri kadar bilgi sahibi olmaması sebebiyle, standart olarak tüm iş kolları için verilen ilk yardım eğitimi maden iş kolu için efektif olmamaktadır.

İlkyardım ekipmanları ise standart ilkyardım çantaları şeklinde değil maden sahasını içinde bulundurduğu risklere özel olarak uyarlanmış malzeme ve ekipmanlardan oluşmalıdır (Şekil 3).

Şekil 3. Yeraltı ilk yardım ekipmanları

2.1 İlkyardım Eğitimleri

Her bireyin bilmesi gereken basit uygulanabilir sertifika gerektirmeyen uygulamaların yanında yeraltına özgü belirtilen risklerin gerçekleşmesi durumunda yapılması gereken ilkyardım uygulamalarını içeren eğitimler verilmelidir. İşe giriş eğitimlerinin bir kısmını bu ilgili hususlar oluşturmaktadır. Aynı zamanda her yıl bu eğitim, tüm çalışanlara tekrar eğitimi adı altında verilmelidir. Fakat bu eğitimlerin hiç biri yeraltında uygulanan tatbikatlar öncesi ve sonrası verilen fiili eğitimin yerini tutmamaktadır. Yeraltı şartları gözetilerek, en sık ve ağır vakaların senaryosu yazılarak, bu senaryolar yeraltında canlandırılarak yapılan eğitimlerin; daha kalıcı, etkili ve samimi olması sağlanmaktadır. Bu bağlamda özellikle yabancı uyruklu çalışanlarda uygulamalı eğitimler ile olumlu sonuçlar alınmıştır. Tertip öncesi yapılan toolboxlara ilkyardım konuları eklenmeli bu sayede iş ve sağlık bütüncül yaklaşımı elde edilmelidir. Uzun vadede verilecek eğitimler ve detaylı tatbikat çalışmaları sayesinde ilkyardım ve acil durum yönetimi ile ilgili bilinç ve kültürün kalıcı olarak sağlanması hedeflenmelidir (Şekil 4).

Şekil 4. Yeraltı eğitim ve tatbikatları

2.2 İlk Yardım Ekipmanları ve Çantaları

Polyak Eynez linyit kömür projesi kapsamında yürütülen derin kuyu açılması ve galeri kazısı faaliyetlerinde, ilkyardıma ihtiyaç duyulması halinde, galeri içinde çalışma alanına yakın yerlerde, kuyuda ise, kazı platformu üstünde ve kuyu ağzında

olmak üzere ilkyardım ekipmanlarının konuşlandırılması sağlanmıştır. İlkyardım çantalarının ve sedyenin dış malzemesi, darbeye dayanıklı olarak seçilmiş olup, su geçirmez kılıflar ile kaplanmıştır. Tüm bu optimizasyonlar yapılırken, kuyu kazı ve çalışma sistemi ile ve yeraltı galerisindeki şartlar göz önüne alınmıştır.

Kuyu kazısı sırasında, personel nakli, 5 m^3'lük kovalar ile yapılması, oluşacak ağır yaralanmalarda, kazalının kuyu içinden tahliyesi için, baş-boyun-omurilik travmasına bakılmaksızın, her vakayı travma tahtası ve sepet sedye ile taşınmasını zorunlu kılmıştır. Söz konusu nakliyat kovasının çapı(1,8m), sedyenin kova içinde yatay olarak taşınmasına müsaade etmediğinden, kova içinde güvenli şekilde eğik/dik durabilmesini sağlayabilmek için, UMKE, AKUT ve acil kurtarma ekiplerinin de kullandığı tipte travma tahtası, sepet sedye, örümcek kemer, baş sabitleyici ekipmanlarından travma seti oluşturularak, galeri ve kuyu içinde uygun görülen lokasyonlara koyulmuştur. (Şekil 5).

Şekil 5. Travma seti

Kuyu ve galeri kazılarında, püskürtme beton ya da çimento enjeksiyonu faaliyetleri işin gereği olarak yoğun miktarda yürütülmektedir. Bu faaliyetler sırasında, çalışan personelin gözüne aşındırıcı ve tahriş edici kimyasal kaçması durumunda, İlkyardım çantalarında bulunan göz duşları (diphoterine) sayesinde zararlı kimyasalların göze kalıcı zarar vermeden gözün kimyasaldan arındırılması sağlanabilmiştir. Diphoterine ile göz lavajı uygulaması öncesi ve sonra Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 6. Diphoterine ile göz lavajı

Kuyu ve galerilerde en sık rastlanılan, vakalar için, kanamayı kontrol edebilecek turnike malzemesi, gazlı bez, steril ped; kırık ve çıkıklarda ağrıyı azaltan iyileşmeyi kolaylaştıran pratik şişme atel setleri, hayati önem taşıyan efektif ve kaliteli boyunluklar ilk yardım çantasında mutlaka bulundurulmalıdır. Uzuv kopması hakkında çalışanlara iş başında eğitimler verilerek, kopan uzvu korumak için gerekli malzemenin olay yerinde doğru şekilde kullanılması sağlanarak, kopan organın tekrar işlevsel hale gelmesi sağlanabilmiştir (Şekil 7).

Şekil 7. Mikrocerrahi sonrası sekelsiz iyileşme

3 KORUYUCU SAĞLIK HİZMETLERİ

3.1 Hijyen Denetimleri ve Çalışma Ortamı Değerlendirmesi

Proje kapsamında, kazı faaliyeti yürütülmesi işinde yabancı uyruklu personel çalışmakta olup 300 kişilik yaşam alanı işletme bünyesinde kurulmuştur. Bu alanlarda dahil olmak üzere yemekhane, soyunma odaları, ortak alanlar, tuvaletler, banyolar en az aylık

olarak kontrol edilmeli, önleyici ve düzeltici faaliyetler raporlanmaktadır. Yabancı uyruklu personelin kültürlerine özgü yaşamlarına çok fazla müdahale etmeden hijyen şartlarını sağlamaları için yönlendirme ve iletişim önemlidir.

Ortak alanlardan daha önemlisi yemeklerin hazırlandığı ve dağıtıldığı alanlarda yapılan denetimlerdir. Bu denetimler yemek hazırlanırken, dağıtılırken ve temizlik yapılırken olmalı, tespit edilen sağlıksız durumlar olay yerinde düzeltilmelidir. Ayrıca çalışanların yemekhanede yedikleri yemek, içtikleri su, ayran vs. ve kumanyalardan numuneler alınarak, Gıda Güvenliği ve Kalitesinin Denetimi ve Kontrolüne Dair Yönetmelik Madde 8/I gereğince bu numuneler 72 saat uygun koşullarda saklanmalıdır. Olası bir toplu hastalık, şikayet durumunda bu numuneler yetkililer tarafından talep edilecektir. Söz konusu numuneler Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8. Gıda numuneleri

Çalışma ortamı değerlendirmelerinde ise meslek hastalığı veya işe bağlı hastalık oluşturabilecek fiziksel, kimyasal ve ergonomik etkenlerin yerinde tespit edilmesi, bu etkenlerin en aza indirilmesi için mühendislik önlemlerinin alınması yönünde tavsiyeleri içermelidir. İşe girişten itibaren hangi çalışanın ne gibi etkenlere maruz kaldığını işini yaparken gözlemleyip kişiye özel sağlık gözetimi yapılması gerekmektedir.Ortam ölçümleri özellikle periyodik muayenelerde meslek hastalığı saptanan veya kronik hastalığı olan çalışanlarda kişisel maruziyet şeklinde tespit edilmelidir (Şekil 9).

Şekil 9. Gürültü maruziyet ölçümleri

Bu sayede henüz tespit edilmemiş dahi olsa fiziksel etkenlerin kronik hastalıklara etkisi öğrenilmiş olacaktır.

3.2 Kumanya, Öğle Yemeği

Ağır işlerde çalışanlar günlük ortalama 4000 kalori almalıdırlar. Ortam sıcaklığı 30 derecenin üzerine çıktığında her bir derecede vücudun enerji gereksinimi %5 artar.(Beyhan Y, 2008) ILO nun araştırmalarına gore enerji miktarında %1 kalorilik artış genel işçi üretkenliğini %2,27 artırmıştır.(2005 Galenson and Pyatt,)

Maalesef ülkemizde sadece kalori hesaplaması yapılmakta bu kalorinin içeriği önemsenmemektedir. Sağlıklı beslenme pek çok parametreden oluşur. Kalori miktarında yeterliliğin yanında çeşitlilik sağlanmalı ve glisemik indeksi düşük gıdalar seçilmelidir. Kumaya ve öğle yemeği içinde aşağıda listelenmiş 4 temel besin grubu yer almalıdır.

-süt ve süt ürünleri (peynir-yoğurt-süt)
-et, yumurta, kuru baklagiller
-sebze ve meyveler
-tahıl ve türevleri (pilav, makarna, bulgur, mısır)

3.2.1 Kumanyanın yer altı çalışanlarına göre revize edilmesi

Şirket bünyesinde yürütülen proje faaliyetleri baz alınarak, iş kazası saatleri incelendiğinde, özellikle dikkatsizlik dalgılık sebebiyle oluşan kazaların, yemek saati sonrasında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Basit şeker kullanımından sonra salınan aşırı insülin kan glikoz seviyesini azaltmakta hipoglisemi oluşmakta ve buna bağlı uyku hali, dalgınlık ve dikkatsizlik gelişmektedir. Yine

karbonhidrat ağırlıklı beslenmede seratonin artışı ve buna bağlı uyku hali olduğu bilinmektedir. (Rakıcıoğlu, 2017) Yeraltında karanlık ve loş ortam bu etkenleri artırmaktadır. Bu sorunları önlemek için şirket içinde kumanya revizyonu önerilmiştir. Ekmek ve poğaça kumanya paketinden çıkarılmalı opsiyonel hale getirilmelidir. Ayrıca bahsettiğimiz gibi dengeli beslenme açısından 4 temel besin gurubunu içine alan menü hazırlanmalıdır. Tabi yine maden şartları gözetilerek yapılacak bu çalışmalarda yeraltında 30 derecenin üzerinde minimum 8 saat dayanabilecek yiyecekler seçilmelidir. Çalışanlar eğitimlerde bahsedildiği gibi kumanyanın hepsi tek seferde değil 2-3 seferde parça parça tüketmelidir.

3.2.2 Yerüstü çalışanlarına yönelik yemekhane revizyonu

Polyak Eynez işletme sahasında ofis çalışanları, atölyelerde çalışanlar ve taşeron işlerde çalışanlar galeri ve kuyu sahasında bulunan iki yemekhanede öğle yemeklerini yemektedirler. Bu çalışanların bir kısmı ofis çalışanı olduklarından fazla efor harcamamakta masa başında çalışmaktadırlar. Bu bağlamda çalışanlarımız da obezite, diyabet, hipertansiyon, kalp damar hastalıkları ile mücadele amacıyla tuz ve ekmeğin kolay ulaşılabilirliğini engelleyip, porsiyonları küçültme aksiyonu aldık. Yapılan obezite/diyabet vb kronik hastalıklar bültenleriyle beslenme alışkanlıklarını sağlıklı yöne çekme çabamız ofis çalışanlarında bir farkındalık yaratarak periyodik muayenelerde vücut kitle endekslerini beraber takip etmemize ve kilo kontrolünü sağlamamızda yardımcı olmuştur. Ayrıca buna ek olarak yönetime işletmemize belli aralıklarla diyetisyen çağırıp kişiye özel diyet programları hazırlama önerisinde bulunduk.

3.3 Sağlık Bültenleri

Endemik bölge ve toplumsal yapı göz önüne alınarak sık görülen veya dönemsel salgın şeklinde görülen hastalıklar hakkında bilgilendirici bültenler hazırlanarak tüm çalışanlara mail atılmalı, tertip panosuna ve işçilerin rahatlıkla görebilecekleri alanlara asılmalıdır. Halk sağlığı bültenleri ve sağlık tarama kampanyaları takip edilmeli çalışanlar bu kampanyalara yönlendirilmelidir. Ayrıca ormanlık alanda doğa ile baş başa çalışılan bu alanlarda akrep, örümcek ve yılan ısırmaları gibi ölümle sonuçlanabilecek durumlara karşı bülten yayınlanmalı çalışanlar periyodik olarak bilgilendirilmelidir.

3.4 Salgın ve Sık Görülen Hastalıklar

Mevsimsel grip, tonsilit, yaz ishalleri vb. hastalıklara karşı salgın olmadan önlemler alınmalı bu sayede ortaya çıkacak istirahat raporlarını ve dolayısıyla iş gücü kaybının önüne geçilmelidir.

Polyak Eynez işletme sahasında toplu yaşam alanları olması, ofis çalışanlarının klima ile ısınması, galeriden veya kuyudan çıkan işçilerin terli olarak yerüstüne çıkmasından dolayı çok sık üst solunum yolu enfeksiyonu görülmektedir. Döneminde yapılacak aşılarla ve basit önlemlerle bu hastalıklar önceden önlenebilmekte iş gücü kaybının önüne geçilebilmektedir.

4 SONUÇLAR

- ✓ Kuyu ve desandre kazı faaliyetleri her türlü iş kazasının meydana gelme ihtimali olan iş yerleridir. Bu yüzden sağlık çalışanlarının tecürebeli ekiplerden seçimesi gerekmektedir.
- ✓ İlkyardım ekipmanlarının çalışma ortamına ve iş koluna yönelik optimize edilmesi gerekmektedir.
- ✓ Kaza anı ve sonrasında tüm akış detaylandırılarak tüm personele, görev dağılımı eksiksiz olarak aktarılmalıdır.
- ✓ Bölgenin sağlık kurumlarına hakim olunmalı ve kazalının durumuna özgü hastane seçenekleri önceden hazırlanmalıdır.
- ✓ Hasta veya kazalı hakkında hastaneden bilgi akışı daimi sağlanmalı iş arkadaşları/işveren bilgilendirilmelidir.
- ✓ İlk yardım eğitimleri iş koluna özgü olmalı kurumlardan alınan eğitimler iş kolunu ve sahayı iyi bilen hekimlerin eğitimleri ile desteklenmelidir.

- ✓ Özellikle madencilik ve kazı faaliyetleri yürütülen iş kollarında eğitimler yeraltında kurgu ve senaryolarla yerinde yapılmalıdır.
- ✓ Şantiye sahasında ve yaşam alanlarında üretilen/tüketilen gıdalardan şahit numune alınmalı 72 saat uygun şartlarda saklanmalıdır.
- ✓ Kumanya ve öğle yemekleri çalışanlara ve çalışma şartlarına özgü, yeterli kaloride aynı zamanda içerik olarak 4 temel besin maddesini içeren tarzda seçilmelidir.
- ✓ Koruyucu sağlık hizmetlerine önem verilmeli; sağlık bültenleri, hijyen önerileri, diyabet/tansiyon/kanser taramaları ve aşılamalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Rakıcıoğlu, N. 2017. İş ve Meslek Hastalıkları Seminer Programı Ankara 6-7.

Yücel, H. 2017. Kömür Madenlerinde İş Sağlığı Gözetimi, *Nefeslik Dergisi*, 3.Sayı, s.26-31.

ÇSGB, Çalışma Yaşamında Sağlık Gözetim Rehberi.

Beyhan, Y. 2008. İşçi Sağlığı - İş Güvenliği ve Beslenme, TC Sağlık Bakanlığı, Beslenme Bilgi Serisi.

ILO, Food At Work, Geneva, 2005. Galenson and Pyatt, 1964.

Madenlerde İş Sağlığı ve İyi Uygulama Örnekleri

Health and Safety in Mines and Examples of Appropriate Applications

B. Coşkun
Tüprag Metal Madencilik Efemçukuru Altın Projesi, Kokarpınar Mevkii, Efemçukuru Köyü, Menderes / İzmir

ÖZET Madencilik birçok tehlikeyi içinde barındıran, dünyanın en zorlu işlerinden biridir. Çalışanın sağlığı, işverenin karşılaşabileceği hukuksal sorunlar ve üretimin devamlılığı için iş sağlığı kavramının iyi anlaşılması gerekir. İş sağlığı denince sadece sağlık anlaşılmamalı, konuya bütüncül yaklaşılarak, çalışanın güvenliği, eğitimi, çalışma alanı birlikte ele alınmalıdır. Bu amaçla kuruluşun İSG politikasının açıklanarak, çalışanların Sağlık, Güvenlik ve Çevre kültürünün geliştirilmesi, farkındalıklarının arttırılarak davranışlara yansıtılması hedeflenmeli, yönetimin desteği sağlanmalıdır. Dünyada İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) profesyonelleri denince, İşyeri Hekimleri, İş Güvenliği Uzmanları, İşyeri Hemşireleri ile İş Hijyenistleri anlaşılır. İSG profesyonelleri, daha sağlıklı çalışma koşullarının oluşturulması, İş kazaları ve Meslek hastalıklarının önlenmesi ve çevrenin korunması için çalışırlar. Madenlerde Toz, Gürültü, Kimyasal Maruziyeti, DPM, Titreşim, Radyasyon ve Ergonomik Zorlanmalar primer tehlikelerdir. Her işletmedeki tehlikelere göre, sağlık ve güvenlik açılarından ayrı ayrı risk değerlendirmeleri yapılarak aksiyonlar alınmalıdır. Ölçmezseniz değerlendiremezsiniz. Bu amaçla biyolojik izlem, kişisel maruziyet ölçümleri ve ortam ölçümlerinin yapılarak, gerekli aksiyonların alınması sağlanmalıdır. Hastalıkları önlemek tedavi etmekten daha kolaydır. Bu nedenle mesleki sağlık gözetimi öncelikle koruyucu hekimlik üzerinde odaklanmalıdır.

ABSTRACT Mining is one of the toughest jobs in the world and involves many hazards. Occupational health concept must be thoroughly understood for the sake of employee health, legal problems that can be experienced by the employer and continuity of production. The concept of occupational health is not limited to medical health but includes employee safety, employee training and work environment in a holistic approach. Occupational Health and Safety (OHS) policy should be explained, Health, Safety and Environment culture of the employees should be developed, awareness should be raised and reflected in practices, and management support should be displayed in this regard. Around the world, references to OHS professionals cover Workplace Doctors, Occupational Safety Experts, Workplace Nurses and Occupational Hygienists. OHS professionals work to ensure healthier work conditions, to prevent work accidents and occupational illnesses, and to protect the environment. In mines, primary hazards include Dust, Noise, Chemical Exposure, DPM, Vibration, Radiation and Ergonomic Strain. Separate risk assessments should be made and appropriate actions should be taken in regard of health and safety in each individual operation. One cannot assess without measuring. Therefore, environmental and personal exposure measurements and medical monitoring tests should be performed and necessary actions should be taken. Preventing illnesses is easier than treating them. Therefore, occupational health monitoring should primarily focus on preventative medicine.

1 GİRİŞ

İş sağlığı denince sadece sağlık anlaşılmamalı, konuya bütüncül yaklaşarak, çalışanın güvenliği, eğitimi ve çalışma alanı birlikte ele alınmalıdır. Bu bağlamda kuruluşların, İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) kavramını politika düzeyinde ele alması, çalışanların Sağlık, Güvenlik ve Çevre kültürlerini geliştirmeyi hedeflemesi ve yönetsel açıdan da destek olması gereklidir. Anayasamızın 56. Maddesinde de belirtildiği gibi "Herkes, sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkına sahiptir. Ülkemizde işyerleri tehlike sınıflarına göre, Çok tehlikeli, Tehlikeli ve Az tehlikeli sınıf olmak üzere üç kategoriye ayrılmıştır. İşyeri Tehlike sınıfına göre de işverenin yükümlülükleri ayrı ayrı belirlenmiştir. İşverenler iş sağlığı ve güvenliğini sağlamak için gerekli her türlü önlemi almak, araç ve gereçleri noksansız bulundurmak ve denetim yapmakla yükümlüdürler. Temel yükümlülükler yerine getirildikten sonra çalışanın sadece sağlığının korunması değil, geliştirilmesi de hedeflenmelidir. **Dünya Sağlık Örgütü s**ağlığı **"**sadece hastalık ve sakatlık durumunun olmayışı değil kişinin bedenen, ruhen ve sosyal yönden tam bir iyilik halidir" diye tanımlar. Hastalıkları önlemek tedavi etmekten daha kolay olduğundan mesleki sağlık gözetimi öncelikle koruyucu hekimlik üzerine odaklanmalıdır. Bu amaçla **çalışma ortamı** ve **çalışanın sağlık gözetiminin** bileşkesi olan **İş Sağlığı gözetimi yapılmalıdır.** İş sağlığı gözetimiyle, işyerindeki tehlikelerin, sağlık ve güvenlik açılarından ayrı ayrı risk analizleri yapılarak, gerekli aksiyonlar alınmalı ve proaktif yaklaşım sergilenmelidir. Madenlerdeki primer tehlikeler, Toz, Gürültü, Kimyasal Maruziyeti, Dizel Partikül Madde (DPM), Titreşim, Radyasyon ve Ergonomik Zorlanmalardır.

2 TANIMLAR

2.1 Meslek Hastalıkları

5510 sayılı Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu'nun 14. maddesine göre; sigortalının çalıştığı veya yaptığı işin niteliğinden dolayı tekrarlanan bir sebeple veya işin yürütüm şartları yüzünden uğradığı geçici veya sürekli hastalık, bedensel veya ruhsal özürlülük halleridir.

2.2 Kaza

Uluslararası Çalışma Teşkilatı (ILO) tarafından "belirli bir zarar ya da yaralanmaya neden olan, beklenmeyen, önceden planlanmayan bir olay" olarak tanımlanmıştır.

2.2.1 İş kazası

5510 sayılı Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu'nun 13. Maddesine göre iş kazası: Sigortalının işyerinde bulunduğu sırada,

İşveren tarafından yürütülmekte olan iş nedeniyle sigortalı kendi adına ve hesabına bağımsız çalışıyorsa yürütmekte olduğu iş nedeniyle,

Bir işverene bağlı olarak çalışan sigortalının, görevli olarak işyeri dışında başka bir yere gönderilmesi nedeniyle asıl işini yapmaksızın geçen zamanlarda,

Hizmet akdi ile bir veya birden fazla işveren tarafından çalıştırılmakta olan emziren kadın sigortalının, iş mevzuatı gereğince çocuğuna süt vermek için ayrılan zamanlarda,

Sigortalıların, işverence sağlanan bir taşıtla işin yapıldığı yere gidiş gelişi sırasında meydana gelen,

ve sigortalıyı hemen veya sonradan bedenen ya da ruhen özüre uğratan olaydır.

3 İŞ SAĞLIĞI GÖZETİMİ

Tüprag Efemçukuru Projesi İşyeri sağlık biriminde, 4 adet işyeri hemşiresi ve bir tam zamanlı işyeri hekimi ile 7/24 hizmet verilmektedir. Ayrıca işyerimizde 1 adet hasta nakil ambulansı da gerekli durumlar için hazır bulunmaktadır. Amacımız, İş Kazaları, Meslek Hastalıkları ve İşe Bağlı Hastalıkların oluşmasını engellemektir. Kurumumuz 2013 yılında, Occupational Health and Safety Standard 18001 (OHSAS 18001) belgesini de alarak, bu alanda gerekli düzenlemeleri yapmıştır.

3.1 Sağlık Gözetimi

İşe girişlerin yapılarak, periyodik muayeneler ve tetkiklerin en geç yılda bir, özel politika gerektiren gruptakilerin ise daha sık kontrollerinin yapılması,

Gece postalarının sağlık gözetiminin yapılması,

Uygun işe yerleştirme(Anayasa 50. Madde: Kimse, yaşına, cinsiyetine ve gücüne uymayan işlerde çalıştırılamaz.)

Bağışıklama,

Milli Eğitim Bakanlığı sertifikalı Hijyen eğitimi verilmesi, portör muayeneleri ve ilgili tetkiklerin yapılması,

Çalışanlara işçi sağlığı konularında rehberlik ve danışmanlık yapılması,

Sosyal çalışma alanlarının kontrolü,

Yemekhanenin denetlenerek aylık menüler ve kalori kontrolünün yapılması,

Yaralanma yönetimi programıyla; İş kazası geçiren çalışanların, tedavilerinin ve rehabilitasyonlarının sağlanması,

İşyerinde sağlığın geliştirilmesi amacıyla; Obesiteyle mücadele, Sigarayla mücadele, Stresle mücadele ve Sağlıklı yaşam gibi kampanyatif uygulamaların yapılması,

İlkyardım ve acil müdahale hizmetlerinin organize edilerek, ilgili kişilerin eğitimlerinin tamamlanması,

Solunum Fonksiyon Testi (SFT) ve İşitme testlerinin(Audiometri) işyeri sağlık biriminde yapılması,

İş sağlığı ve güvenliği mevzuatı kapsamında çalışma ortamındaki kişisel maruziyetler ile çalışma ortamına yönelik fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkenlerle ilgili iş hijyeni ölçümlerinin planlanması, yaptırılması ve değerlendirilmesi,

İşyerinde oluşan iş kazaları ve meslek hastalıklarının araştırılması, düzeltici önleyici faaliyetlerin planlanması,

Çalışanların iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin yapılması,

Yıllık çalışma planının ve yıllık değerlendirme raporunun hazırlanması,

Yapılan çalışmalarda kişisel verilerin korunması.

Alt işveren çalışanlarının yapacakları işe uygunluğunu gösteren sağlık raporlarının ve eğitimlerinin kontrol edilmesi.

3.1.1 Risklerin analizi

İşletmemizde 5*5 Yarı Kantitatif Risk Matrisi, Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (HAZOP), Papyon Analizi (Bow-Tie), Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (REBA), Hızlı Üst Ekstremite Değerlendirmesi(RULA), Hızlı Maruziyet Değerlendirmesi(HMD) yöntemleri kullanılarak Risk Değerlendirmeleri yapılmaktadır. Aşağıda madenlerdeki genel tehlikeleri ve sahamızda nasıl yönetildiğini görebilirsiniz.

4 GÜRÜLTÜ YÖNETİMİ PROGRAMI / İŞİTMENİN KORUNMASI

İnsanlar üzerinde olumsuz etki yapan ve hoşa gitmeyen seslere gürültü denir. Gürültü; insanlarda işitme kayıplarının yanı sıra önemli bir stres ajanı olarak psikolojik, nörovejatatif ve kardiyovasküler sistemleri etkileyerek çeşitli hastalıklara yol açan olumsuz bir etkendir. Gürültü Yönetim Programı ile aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

-Gürültünün kaynakta azaltılması,

-Sahada yaptığımız audiometrik ölçümler ile işitmenin monütorizasyonu,

-Hedef gruba yönelik, kişiye özel yapılan silikon kulak koruyucu ile bu alanda ileri koruma,

- İşitme doğrulama (Ear-fit) testi ile kulak koruyucuların etkinliğinin saptanması,

-Kişisel koruyucu donanımların doğru kulanılmasıyla ilgili eğitim verilmesi

Sahada yapılan gürültü ölçümleriyle işletmenin gürültü haritası çıkarılarak durum tesbiti yapılmıştır. Sahamızdaki gürültü ölçümleri akredite kurumlar tarafından, kişisel maruziyet ölçümü ve ortam gürültüsü olarak yılda bir kez yapılmaktadır. Üretim procesinde ve kullanılan araçlarda değişiklik olduğunda ölçümler tekrarlanmaktadır. Ayrıca İşyeri sağlık birimi de gürültü dozimetresi ile internal ölçümler yapmaktadır.

İşletmemizde process değirmenlerindeki çelik astarların, kauçukla değiştirilmesi sonucu gürültü düzeyi 3 DB aşağıya çekilmiştir ve gürültünün kaynakta azaltılmasına göstereceğimiz iyi uygulama örneği olmuştur.

4.1 Earfit İşitme Doğrulama Testi

Sahada kullanılan baret üstü kulaklıkların , belirtilen Gürültü Azaltma Derecesini(SNR) sağlayıp sağlamadığının kantitatif olarak testini yapan cihazdır.

Test esnasında kulaklık içerisine mikrofon yerleştirilerek çalışanın kulaklığı takması sağlanır. Yine sistem üzerindeki bir hoparlörden mikrofona sesler gönderilerek kulaklık içerisine geçen miktar hesaplanarak, raporlanır. Böylece kulaklığın uygunluk testi yapılmış olur. Şekil 1-3'de sahamızda kullanılan cihazı ve yapılan testin raporunu görebilirsiniz.

Şekil 1. Ear-fit doğrulama sistemi

Şekil 2. Ear-fit test sonuç

Şekil 3. Ear-fit test ekipmanları ve kulak koruyucular

5 SOLUNUM KORUMA PROGRAMI

Partikül büyüklüğü 100 mikrondan daha az olan havada asılı parçacıklar toz olarak adlandırılır. Büyüklükleri >10 mikron olan partiküller burun dahil olmak üzere üst solunum yollarında tutulurlar, 5-10 mikron arasında olan partiküller üst ve alt solunum yollarına, 0.1-5mikron arasında olanlar ise alt solunum yolları ve parankime ulaşırlar. Maruz kalınan tozun, fiziksel ve kimyasal özellikleri, miktarı, büyüklüğü, aerodinamik yapısına bağlı olarak cilt hastalıkları, Akciğerlerin Toz hastalıkları (Pnomokonyoz), allerjik hastalıklar ve mesleki kanserler gelişebilir.

Periyodik olarak Akciğer grafilerinin çekilerek iki farklı Pnomokonyoz okuyucusu tarafından okunması ve İşyeri sağlık biriminde SFT (Solunum Fonksiyon Testi) yapılması ile Akciğer hastalıklarının erken teşhisi mümkün olmaktadır. Pnomokonyoz açısından şüpheli durumlarda Yüksek Çözünürlüklü Akciğer Tomografisi (HRCT) ile kesin tanı konulur. Sahamızda akredite kurumlarca düzenli olarak toz ölçümleri yapılmaktadır. Ölçümleri kontrol amaçlı, kendi bünyemizde de yapabilmekteyiz. Toz ölçüm sonuçları ve Solunum Fit testleri uygun maske tipinin belirlenmesine yardımcı olur. Çalışanlara toz ve meslek hastalıkları konusunda eğitimler verilerek, farkındalık ve bilinç artışı sağlanır.

5.1 Solunum Fit Testi

Solunum maskelerinin kişiye uygunluğunun bir cihaz aracılığıyla test edilmesidir. Sistem, bir pompa setinden, solunum maskesine gönderilen kateter aracılığı ile ortamdaki tozun ne kadarının maskenin içerisine geçtiğini kantitatif olarak ölçmeye yarar. Yani solunum maskesinin çalışanı koruyup korumadığı, kişiye uygun olup olmadığı test edilerek raporlanır ve maskenin doğru kullanımına yönelik eğitim verilir. Şekil 4 ve 5'de solunum fit testi uygulamasını görebilirsiniz.

Şekil 4. Solunum fit testi cihazı

Şekil 5. Solunum fit testi uygulaması

5.2 Toza Karşı Alınan Genel Önlemler

Patlatma kaynaklı tozun bastırılması: Açılan deliklerin içindeki patlayıcı maddelerin üzerine sıkılama maddesi olarak su kartuşları kullanılır. Böylece patlama esnasında oluşan toz bastırılarak, çevreye yayılması engellenir.

Yükleme esnasında oluşan tozun bastırılması amacıyla kaya yığınları yükleme öncesi suyla yıkanır.

Nakliye kaynaklı tozun bastırılması: Ana rampalar ve katlarda pulverize yol sulama tankeriyle tünel yan duvar ve tabanı yıkanmaktadır.

Maden girişlerindeki sabit nossle sistemleriyle yapılan sulama ile dışardan içeriye toz girişi engellenmektedir. Ayrıca toz çıkaran işlemlerde de tozun bastırılması amacıyla sulu sistemler ve toz toplama ünitesi entegre edilmiş araçlar kullanılmaktadır.

Özel Önlemler: Toz çıkaran işlemlerin yapıldığı alanlara toz toplama üniteleri kurulumu yapılmıştır.

6 DİZEL PARTİKÜL MADDE (DPM)

Dizel motorlardaki yanma sonucu egzozla atılan en önemli zararlılar, partikül maddeler, azotoksitler, hidrokarbonlar ve karbonmonoksit'tir. Dizel partikül maddelerin çekirdeğinde karbon atomu vardır ve hidrokarbonlar, metaloksitler, kükürt ile bileşim yapmış şekilde bulunurlar. Solunabilir partikül maddelerin boyutları, 2,5-10 mikron aralığındadır ve bu maddeler sadece akciğerlere girmekle kalmaz, aynı zamanda kan dolaşımına da girerek farklı organlara giderler. Partikül maddelerin insan sağlığı üzerindeki etkileri, maruz kalınan süre ile partikül maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Dizel partiküller akciğer irritasyonu, allerjik reaksiyonlar, astım, kalp-damar hastalıkları ile akciğer kanserine neden olurlar.

DPM yönetiminde öncelikle ortamdaki DPM'in ölçülmesi gereklidir. Ardından maruziyeti azaltmak, değerleri normal seviyeye getirebilmek için aşağıdaki öneriler hayata geçirilmeli ve eğitim verilerek farkındalık sağlanmalıdır. Öneriler;

- Araçlarda Tier 1&2 motor yerine Tier 3&4 motorlara geçilmesi ve düzenli motor bakımı yapılması,
-Yeraltı havalandırma şartlarının iyileştirilmesi,
-Kapalı kabin sistemlerinin kullanımı,
-Tier 4 motorlarda Adblue kullanımı,
-Uygun DPM filtre seçimi.

Şekil 6'da DPM ölçmek için kullandığımız cihazı görebilirsiniz.

Şekil 6. Dizel partikül monitor

7 KİMYASAL YÖNETİMİ PROGRAMI

Kimyasal yönetimi programıyla, kimyasalların tedarik aşamasından, son kullanımına kadar olan süreçte insana ve çevreye en az zararlı ürünlerin seçimi sağlanmıştır. Bu maksatla bir yazılım kullanmaktayız. Sahamızda ilgili kimyasalı kullanmak isteyen bölüm, ürünün Malzeme Güvenlik Bilgi Formunu (MSDS) sisteme girer. Ürün İş Sağlığı Güvenliği ve Çevre (İSGÇ) bölümü tarafından sağlık, güvenlik ve çevre açılarından incelendikten sonra raporlanır ve uygunsa onaylanır. Onaylanan ürünün özet raporu ilgili bölüm yöneticileri ve çalışacak personel ile paylaşılır. Kimyasal kullanılan alanlarda çalışacak personele tam gün süren "Kimyasal Kullanım Eğitimi" verilir. Programın diğer unsurları olan, Kimyasallara özel KKD seçimi (Goggle tip gözlük, kimyasal tulumu, eldivenler, inorganik gazlar için filtreler ve tam yüz maskeleri), acil müdahele ekipmanları, göz yıkama istasyonları ile kazalara karşı proaktif yaklaşım sağlanır.

8 ERGONOMİ

Ergonomi sözcüğü, Yunanca ergon (iş) ve nomos (yasa) sözcüklerinden oluşmaktadır. Yani İş yasası anlamına gelir. Ergonomi, insanların antropometrik özelliklerini ve fiziksel kapasitelerini göz önüne alarak, endüstriyel iş ortamındaki tüm faktörlerin etkisiyle oluşabilecek fiziksel, psiko-sosyal stresler karşısında, sistem verimliliğini arttırmaya ve insan-makine-çevre arasındaki uyumu maksimize etmeye çalışan multidisipliner bir bilim dalıdır.

Sahamızda tüm lokasyonlarda, görev bazlı ergonomik risk değerlendirmeleri yapılmaktadır. Bu amaçla kullandığımız **yazılımla**, Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (REBA), Hızlı Üst Ekstremite Değerlendirmesi (RULA), Hızlı Maruziyet Değerlendirmesi (HMD), gibi yöntemler kullanılarak ergonomik zorlanmalar tesbit edilmekte, raporlanmakta ve aksiyon alınmaktadır.

İyi uygulama örneği olarak ergonomik zorlanmaları azaltmak için sahamızda kullandığımız Vakum Taşıma Sistemini Şekil 7'de görebilirsiniz.

Şekil 7. Vakum taşıma sistemi

9 TİTREŞİM

Titreşim, araç, gereç ve makinelerin oluşturdukları vibrasyon ve salınım hareketleridir. Titreşimi yapan faktörlerden en önemlisi frekanstır ve vücuda etkisi büyük ölçüde şiddetine ve süresine bağlıdır.

Sahamızda titreşim ölçümleri sonucunda, yüksek çıkan değerlerin düşürülmesi için çalışmalar yapılarak, gerekli aksiyonlar alındı. Bu amaçla

-Yeraltı ulaşım yollarının greyderle düzeltilmesi,

-Araçlarda yapılan revizyonlarla süspansiyon kitleri ve koltuklarının değiştirilmesi,

-İş makinalarında yenileştirme,

gibi çalışmalarla titreşim oranları yasal sınırlara çekildi.

Şekil 8'de bu kapsamda sahada yapılan iyileştirmeleri görebilirsiniz.

Şekil 8. Titreşimin önlenmesi

10 SONUÇLAR

İş sağlığı ve güvenliğinin çalışma hayatındaki rolü ve önemi çok büyüktür. İşletmenin ve üretimin devamlılığı, çalışanın sağlığının korunmasına ve alınacak önlemlere bağlıdır. Önlemek ödemekten daha ucuz ve insanidir. Bu kapsamda konunun özünü oluşturan, İş kazaları ve Meslek hastalıklarının olmaması için işletmenin daha kuruluş aşamasında bu konuları gözönünde bulundurması ve sonrasında aynı iradeyi devam ettirmesi gerekir. Yani tehlikelerin kaynağında çözülmesi, proaktif yaklaşımın önemi ve kazaların kader olmadığı artık bilinmelidir. Ayrıca İSG eğitimleri ile çalışanlarda Güvenlik kültürü ve farkındalık sağlanması sorunun çözümünde anahtar rol oynar.

Uygulamada ise yasak savmak için değil, işletmeye artı değer katacak profesyonel yaklaşım sergilenmelidir. Ölçmezseniz değerlendiremezsiniz. Doğru değerlendirmek için de ölçümlerin sağlıklı ve birtakım kaygılardan uzak yapılması, manüplatif olmaması gereklidir. Bu amaçla ortam ölçümleri, kişisel maruziyet ölçümleri ve sağlık gözetimi kapsamındaki testlerin en sağlıklı şekilde yapılarak, gerekli aksiyonların alınması sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

İSGİP Rehberleri / Maden Sektöründe Sağlık Gözetim Rehberi / ÇSGB.

Meslek Hastalıkları Tanı Rehberi / ÇSGB.

Meslek Hastalıkları Gözetimi / ÇSGB.

United States Environmental Protection Agency (EPA) / Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust.

Güvenli Kuyu Açma Çalışmaları: Polyak Eynez Kuyuları Örneği

Safe Shaft Sinking Operations: Example of Polyak Eynez Shafts

E. Kahraman, Ç. Koçak, E. Soyer
Polyak Eynez A.Ş., İzmir

ÖZET Çok fazla iş kazasının yaşandığı madencilik sektöründe, kazalarının engellenmesi her bir sürecin güvenli bir şekilde yönetimi ile mümkündür. Süreçlerin güvenli yönetimi için; her bir süreç öncesi risklerin ve tehlikelerin analiz edilmesi, çalışanların katılımının sağlanması, uygun makine/ekipmanın seçimi, gerekli güvenlik önlemlerinin alınması, vb. çalışmalar yapılmalıdır.

Üretim çalışmalarında, madene kısa yoldan ulaşımın sağlanması, havalandırma verimliliği, malzeme ve insan naklindeki avantajlar, vb. nedenlerden dolayı kuyu açılması tercih edilebilmektedir. Ancak, bu avantajların yanında, kuyu kazı ve nihai montaj süreci ciddi tehlike ve riskler içermektedir. Bu sebeple, kazı faaliyeti başlangıcından sonuna kadar olan süreçte risk yönetimi çalışmalarına önem gösterilmelidir.

Bu çalışmada, Polyak Eynez' de yeraltından linyit kömürü üretimi projesi kapsamında 2 adet derin kuyu kazısı/açılması sürecinin güvenli bir şekilde yürütülebilmesi için yapılan çalışmalar tanımlanmıştır. Kuyu kazı süreçlerinin daha güvenli yürütülebilmesi için bazı önerilerde bulunulmuştur.

ABSTRACT At mining industry, which has too many accidents, preventing accidents is possible by managing all process safely. For managing process safely; must be analysing risks and hazards, taking workers opinions, choosing proper machine/equipment, taking necessary safety measures, etc.

Shaft sinking might be preferred for reaching to ore with shortest way, ventilation productivity, advantages at materials and personnel transportation, etc. at producing operations, due to these reasons. On the other hand, sinking and furnishing shaft include serious hazards and risks with the advantages. Therefore, should attach importance to manage risks from beginning shaft sinking process to end.

In this study, operations are described two deep shaft sinking processes safely within the scope of producing lignite ore from underground project at Polyak Eynez.

1 GİRİŞ

Yeraltı madencilik çalışmaları en fazla iş kazasının yaşandığı faaliyetlerdendir. Çok tehlikeli işler sınıfında olan bu faaliyetlerde derinlere doğru gittikçe tehlike ve riskler artmaktadır. Derin madencilik uygulamalarında risklerin en aza indirilmesi ve verimli çalışmaların yapılabilmesi için kuyu kazılarının yapılması zorunluluk olarak ön plana çıkmaktadır.

Kazı süreci tamamlanmış olan kuyular madenlere hava ulaştırılmasında, insan ve malzeme nakliyatında ciddi avantajlar sağlamaktadır. Bunun yanından kuyu kazı ve

nihai montaj süreci ciddi tehlikeler içermektedir. Faaliyetlerin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için risk yönetimi ön plana çıkmaktadır.

Risk yönetimi için tehlike ve risklerin belirlenerek, analiz edilmesi ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre sürecin yönetilmesi gerekmektedir. Yeraltı kömür işletmelerinde toplu koruma önlemlerinin alındığı ve proaktif İSG yaklaşımının hedeflendiği İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetiminde;

i. maden planlama aşamasına özen gösterilmesi,
ii. üretim/ilerleme hedeflerinin doğru belirlenmesi,
iii. yeraltında uygun ekipman ve malzemelerin kullanılması,
iv. iyi bir iş güvenliği denetim ve organizasyonunun kurulması,
v. eğitimli ve tecrübeli bir ekibin oluşturulması,
vi. iyi bir kontrol merkezi/gaz izleme merkezi kurulumu,
vii. acil durumların iyi bir şekilde yönetilmesi,
viii. çalışanın iş güvenliği sürecine katılımının sağlanması,
ix. yeraltı çalışma ortamına giriş-çıkışların kontrolü, vb. konulara

özen gösterilmelidir (Kahraman, 2017).

Çalışma kapsamında, Polyak Eynez' de yeraltından linyit kömürü üretimi projesi kapsamında kazı süreci tamamlanmış olan Havalandırma ve Servis Kuyularında; planlama sürecinden başlayarak, bütün aşamaların güvenli bir şekilde yapılması için yapılmış İSG uygulamaları tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinden uygulamaya yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.

2 POLYAK EYNEZ' DE GÜVENLİ DERİN MADEN KUYUSU AÇILMASI

2.1 Polyak Eynez A.Ş. Kınık Yeraltı Linyit İşletmesi

Polyak Eynez A.Ş. Kınık Yeraltı Linyit İşletmesi İzmir il merkezine kuş uçuşu 70 km ve Kınık İlçesine yaklaşık 9 km mesafede ve Elmadere Mahallesi' nin yaklaşık 750 metre güneyinde yer almaktadır.

Sahada kazı çalışmalarına 2014 yılında başlanmış olup, mevcut durumda hazırlık çalışmalarına devam edilmektedir. Hazırlık çalışmaları kapsamında yeraltına 3 adet erişim açıklığı (Yıldız Desandresi, Havalandırma Kuyusu ve Servis Kuyusu) planlanmıştır.

-14 derece eğimde Yıldız Desandresi mevcut durumda 3350 metre uzunluğa sahiptir. Havalandırma Kuyusu 8 metre net iç çapa sahip 843,7 metre derinlikte ve servis kuyusu 8 metre net iç çapa sahip olacak şekilde 830,3 metre olarak kazı çalışması tamamlanmıştır. Kuyu sahasının genel görünüşü Şekil 1' de verilmiştir. Kuyu kazı çalışmalarında Çin menşeeli China Coal No:5 firması ile çalışılmıştır.

Şekil 1. Polyak Eynez A.Ş. Kuyu Sahası genel görünüm

İşletmede 2019 yılında üretime başlanması hedeflenmekte olup, mevcut durumda hazırlık çalışmalarına devam edilmektedir.

2.2 Kuyu Kazı Çalışmaları

İşletmede her iki kuyunun kazısı sürecinde yapılan faaliyetlere ilişkin genel iş akış şeması Şekil 2' de verilmiştir.

Kuyu kazı çalışmalarında, önce şemsiye tipi delici ile (*pnömatik delici makine*) delikler delinmektedir. Delikler patlayıcı ile şarj edilerek, patlatılmaktadır. Patlatma işlemi sırasında kuyuda çalışan bulunmamaktadır. Patlatma sonrası yeterli sürede havalandırma yapıldıktan ve gerekli kontroller yapıldıktan sonra, basınçlı hava ile çalışan kapma kepçeler (kaktüs kepçe) ile pasa kovalara doldurulmakta ve kova ile yerüstüne nakledilmektedir.

Şekil 2. Kuyu kazısı iş akış şeması

Kuyu dibi-Kuyu ağzı arası insan ve malzeme nakliyatı nakliyat kovaları ile sağlanmaktadır. Nakliyat kovaları 1,8 metre çapında ve 2 metre yüksekliğindedir. Kuyu içerisinde, kuyu kazısı süresince yoğun şekilde su deşarjı yapılacağından, pompaların daha güvenli konumlandırılabilmesi için 3 katlı platform teşkil edilmiştir.

Kuyu havalandırmasında 2*45 kW fanlar kullanılmaktadır. Bu fanlara yedek olarak 2*45kW gücünde yedek fanlar bulunmaktadır. Yedek fanlarla, çalışan fanlar arasında otomatik devreye giren klape sistemi bulunmaktadır. Buna ilave olarak, fanlar için bağımsız 2x2500 kVA gücünde enerji kaynağı (jeneratör) kurulmuştur. Yedek enerji kaynağı elektrik kesilmesi durumunda otomatik olarak devreye girmekte ve kuyu kazı operasyonuna devam edilmesini sağlayabilecek güçte kurulmuştur. Bu sayede, havalandırma, pesronel nakliyesi ve su atımının kesintisiz olarak yerine getirilmesi hedeflenmiştir. Havanın kuyu içinde iletimi 1000mm çaplı alev yürütmez ve antistatik özellikte vantüplerle sağlanmaktadır.

Kuyu başında ve kuyu dibinde konumlandırılmış gaz izleme sensörleri kuyu havasının nitelik ve niceliği yerüstünden kontrol merkezinden (yerüstü gaz izleme Merkezi) izlenmektedir. Ayrıca, portatif gaz ölçüm cihazları gerekli kontroller yapılmaktadır.

2.3 Kuyu Kazı Faaliyetleri İle İlgili Risk Analiz ve Değerlendirmeleri

Kuyu kazı süreçlerinde yapılan bütün iş ve işlemleri, işyeri bölümlerini kapsayacak şekilde risk analiz ve değerlendirme çalışmaları yapılmıştır. Sürecin doğru yönetimi için farklı risk analizleri kullanılmıştır (L tipi matris yöntemi, iş emniyeti analizi yöntemi, vb.). Alman DMT firmasından kuyu kazısı öncesi risk analiz çalışması için danışmanlık hizmeti ve eğitimi alınmıştır. Kuyuda yeni başlayacak her bir süreçten önce o işi yapacak sorumlu/Çinli personelle iş emniyet analizleri yapılmıştır. Çinli personellerle çalışma yapıldığı için risk analizleri Türkçe/Çince olarak hazırlanmıştır.

Genel olarak risk analiz ve değerlendirmesi yapılan konu başlıkları şunlardır:

- ✓ Polyak Kuyu Açma Çalışması Risk Analizi (DMT)
- ✓ Kuyu kazısı için gerekli olan kuyu açma sistemlerinin kurulması ve montajı öncesi risk analizi,
- ✓ Kuyu kazı faaliyetleri genel risk analizi
- ✓ Kuyu beton santrali risk analizi
- ✓ Kuyu ambar faaliyetleri risk analizi
- ✓ Kuyu yerüstü tesisleri (atölye vb.) ve eklentileri risk analizi
- ✓ Kuyu yerüstü sosyal tesisleri risk analizi
- ✓ Yeraltı kontrol sondajı ve enjeksiyon işleri iş emniyet analizi
- ✓ Sondaj muhafaza borularının kesilmesi iş emniyet analizi
- ✓ Kaktüs kepçe, bakım, onarım ve söküm-montaj çalışmaları iş emniyet analizi
- ✓ Halat uç kesme çalışması iş emniyet analizi
- ✓ İç katman beton çalışması iş emniyet analizi
- ✓ İnset kazısı iş emniyet analizi
- ✓ Kimyasal enjeksiyon iş emniyet analizi
- ✓ Skreyper kullanımı iş emniyet analizi

- ✓ Kuyu kazısı sırasında kömür damarı geçişinde kazı faaliyetleri iş emniyet analizi
- ✓ Kuyu sahası yerüstü sosyal tesisleri risk analizi
- ✓ Kuyu sahası mutfak ve yemekhane risk analizi.

2.4 Kuyu Planlama Süreci

Maden planlama çalışmaları güvenli madencilik için en önemli süreçlerindendir. Polyak Eynez A.Ş.' de kuyu kazılarının güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için gerekli olan bütün çalışmaları yapmıştır. Bu çalışmalar kapsamında; Alman DMT firmasından danışmanlık hizmeti alınmıştır. Projelendirmede kuyu açma işinde tecrübeli Çin menşeeli China Coal No:5 firması ile çalışma yapılmıştır. Kuyular projelendirilmeden önce sahada hidrojeolojik etüt yaptırılmıştır. Kuyu kazısına başlamadan önce gerekli pilot sondajlar/kontrol sondajları yapılmıştır. Tahkimat, nakliyat ve havalandırma ile ilgili süreçler kuyu kazısına başlamadan önce planlanmış ve bu planlara uygun çalışma yönergeleri oluşturulmuştur.

Kuyuda geçilecek formasyonlar dikkate alınarak kazı hızı/kalıp boyu belirlenmiştir. Kuyu içinde yangın ve patlamaya yol açmayacak (ATEX belgeli ekipman, alev yürütmeyen vantüp malzemesi, vb.) ekipman ve malzemeler kullanılmıştır.

Kuyuların bulunduğu yerleşkenin yerüstü kısmında bulunan şevlere püskürtme beton uygulaması yapılmış, şev diplerinde yağmur suları için kanallar yapılmıştır. Kuyu içerisine yeryüzünden su dolmaması için önlemler alınmıştır.

Kuyu kazılarına başlanmadan önce çalışma yönergeleri oluşturulmuştur. Kuyuda kullanılacak halat kayıt sistemi ve kullanılacak halatlarla ilgili çalışmalar yapılmıştır.

2.5 İş Güvenliği Denetim ve Organizasyonu

Anahtar teslimi iş olarak kuyu açma çalışmasını yürüten China Coal No:5 firmasının kendi İSG organizasyon yapısını kurması sağlanmıştır (İş güvenliği uzmanı, işyeri hekimi, Çinli İSG Müdürü, kurul yapısı, çalışan temsilcisi, vb.). China Coal No:5 İSG Müdürü proje süresince sahada bulunmuştur. Polyak Eynez A.Ş. İSG Müdürlüğü ve Kuyu/Maden Başmühendisliği personeli tarafından sahada sürekli denetim ve gözetim faaliyetleri yürütülmüştür.

Kuyularda hava ölçüm çalışmaları düzenli olarak yapılmıştır. İş hijyeni ölçümlerinin akredite kuruluşlara yaptırılması sağlanmıştır. İşyeri hekimi tarafından çalışanların sağlık süreçleri düzenli bir şekilde takip edilmiştir.

Denetim çalışmalarının daha etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için kontrol listeleri oluşturularak, belli zamanlarda bu kontrol listeleri üzerinden denetimler yapılmıştır. İşletme içinde iş körlüğünün engellenmesi için iç denetim mekanizması oluşturulmuştur. Kuyu içinde sıcak iş yapılması, vb. özel izne tabi işlemler denetlenmiştir. Kuyu içinde yapılan sondaj çalışmaları denetlenmiştir/sürece nezaret edilmiştir. Halat kontrollerinin yapılması, halat uç kesimi, kesilen uçların çekme testine tabi tutulması, halatlara röntgen çekilmesi gibi halat yönetimi ile ilgili süreçler denetlenmiştir/organize edilmiştir.

Bu denetimlere ilave olarak, işletme üst yönetimi tarafından belli periyotlarla görevlendirilen özel denetçi firmalara sahada denetimler yaptırılmıştır.

2.6 Eğitimli ve Tecrübeli Bir Ekip Oluşturulması

Sahadaki çalışma Çinli bir firma ile yürütüldüğünden çalışacak personelin sahaya kabulünde hassas bir süreç yürütülmüştür. Personel işe başlamadan önce; çalışma izni, SGK işe giriş bildirgesi ya da muafiyet belgeleri, Çin Halk Cumhuriyeti' nden onaylı mesleki eğitim belgeleri kontrol edilmiştir. China Coal No:5 firmasının iş güvenliği uzmanı ve işyeri hekimi tarafından 2 gün süreli iş sağlığı ve güvenliği eğitimi verilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, Çinli çalışanlar işe başlamadan önce Alt İşveren İSG bilgilendirme eğitimi

kapsamında 1 gün süreli eğitim verilmiştir. Çinli çalışanlar ile iletişim için yeteri kadar Çince/Türkçe tercüman ile çalışma yapılmıştır. Türk çalışanların Çince Temel eğitim ihtiyaçlarını karşılamak için eğitim hizmeti alınmıştır. Çinli çalışanların, Türk Mevzuatına uygun mesleki eğitim ihtiyaçlarının karşılanması için Kınık Halk Eğitimi Merkezi ile İşbirliği kapsamında mesleki eğitim kursları düzenlenmiştir.

Çinli firma çalışan sayısı göz önünde bulundurularak, Çinlilerin temel ilkyardım eğitimi almaları sağlanmıştır. Yemekhane, vb. işyerlerinde görevli Çinli çalışanların hijyen eğitimi almaları sağlanmıştır. Çinlilerin temel yangın söndürme eğitimleri alması için gerekli eğitim hizmeti alınmıştır.

Kuyu işinde tecrübeli Çinli personel ile çalışma yapılmıştır. Yeterli tecrübeye sahip personel ile çalışma yapılmıştır.

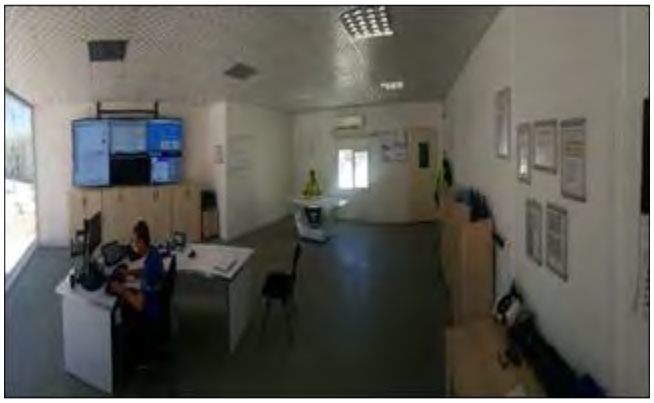
Yeraltı ve yerüstü sahalarına gelen ziyaretçiler/misafirler için eğitim videoları hazırlanmıştır.

2.7 İyi Bir Kontrol Merkezi/Gaz İzleme Sistemi Kurulması

Kuyu havasının nitelik ve nicelik yönünden izlenebilmesi, personel takip sistemi ile kuyuda bulunanların takibinin yapılabilmesi, vb. ideal bir şekilde yürütülebilmesi için kuyu sahasında yerüstünde Çinli personel tarafından takip edilen bir kontrol merkezi (gaz izleme merkezi) kurulmuştur. Buna ilave olarak, bu kontrol merkezinin desandre sahasında bulunan kontrol merkezi ile entegreli olarak çalışması sağlanmıştır. Böylece, her iki kontrol merkezinden de kuyu havası nitelik ve niceliğinin izlenmesi ve bilgi akışı sağlanmıştır.

Kuyu dibi, kuyu başı ve kazı şovelmanlarının birinci katında kurulan kamera sistemi ile 24 saat kesintisiz olarak kazı sürecinin takibi kontrol merkezinden sağlanmıştır.

Kontrol merkezi acil durum yönetim merkezi olarak, acil eylem planında tanımlanmıştır. Kontrol merkezi/gaz izleme merkezi operatörlerine Havalandırma Yönergesi ve Gaz İzleme Yönergesi' ne göre eğitimler verilmiştir.



Şekil 3. Yerüstü kontrol merkezi

2.8 Acil Durum Planlaması/Yönetimi

Acil durum planları yapılarak, 6 ayda bir kez revize edilmiştir. Bütün ekipleri kapsayacak şekilde tatbikatlar yapılmıştır. Tatbikatlarda tahlisiye merkezinin katılımı ile sedye üzerindeki yaralının nakliyat kovasına bindirilmesi, vb. gibi kuyuya özgü riskler de dahil olmak üzere bütün acil durumları karşılayacak şekilde tatbikat çalışmaları yapılmıştır.

2.8 Çalışanların İş Güvenliği Sürecine Katılımlarının Sağlanması

Güvenlik kültürünün yükseltilmesi ve çalışanların iş güvenliği sürecine katılımlarının sağlanması önemsenmiş ve bu konuda ciddi çalışmalar yapılmıştır.

Çalışanlara yeteri kadar İSG eğitimi verilmiştir.

Tehlike ve ramak kala olay bildirimlerinin öneminin kavranması için eğitim verilmiştir. Kuyu açılması sürecinde meydana gelmiş olan 10 adet ramak kala olayla ilgili raporlamalar yapılmıştır. Çalışanlar tarafından yapılan bildirimler önemsenerek, gerekli önlemler alınmıştır.

Yaşanmış olan iş kazalarından, ramak kala olaylardan sonra ya da tehlikeli davranışlar tespit edildikten sonra; çalışanlara bu olumsuz durumlar, uyulacak kurallar ve alınacak önlemlerle ilgili tool-box eğitimler, güvenlik işbaşı konuşmaları yapılmıştır.

İş sağlığı ve iş güvenliği ikazları ile çalışanların güvenlikle ilgili bilgilenmeleri ve/veya uyarılmaları sağlanmıştır.

Aylık İSG bültenleri (Şekil 4) hazırlanarak, çalışanların görüleceği yerlere

asılmıştır. İSG Bültenleri ile eğitimler, iş kazaları, uygunsuz davranışlar, İSG politikası/hedefleri, vb. konularda çalışanların bilgilendirilmesi sağlanmıştır.

Şekil 4. İSG bülteni

Yeni ve farklı bir işe başlanılmadan önce yapılmış olan iş emniyet analizlerine o işi yapacak bütün personelin katılımının sağlanması, sahadaki risklerin yönetiminde çok etkili olmuştur.

2.9 Yeraltı Çalışma Ortamına Giriş-Çıkışların Kontrolü

Personelin ocağa giriş-çıkış kontrolleri, vardiya listeleri, OFK maske ve madenci baş lambası kayıtlarının girildiği ocak/kuyu giriş-çıkış kayıt defteri ve personel takip sistemi kayıtları aracılığı ile yapılmıştır.

Yeraltına sigara, çakmak, vb. madde ile girişlerin engellenmesi için kuyu başlarında belli periyotlarda üst-baş araması yapılmıştır. Yeraltına/kuyulara alkollü olarak girişlerin engellenmesi için alkolmetre cihazı tedarik edilmiş ve belli periyotlarda haberli/habersiz alkol testleri yapılmıştır.

Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği hükümlerince, yeraltına girecek misafirler için izin prosedürü oluşturulmuştur. Bu izin prosedürü kapsamında eğitim ve yazılı izin verilerek, gerekli güvenlik önlemleri alınarak, nezaretçi gözetiminde kuyulara girmeleri sağlanmıştır.

2.10 Diğer Çalışmalar

Yukarıda belirtilenlere ilave olarak;

- Kuyu kapağı açılıp kapanması durumunda sesli ve ışıklı uyarı sistemi kurulması,
- Tumbalarda sesli ve ışıklı uyarı sistemi kurulması,
- Beton santrali ünitesinin çalışma öncesi sesli ve ışıklı uyarı sistemi yapılması,
- Kuyulara oksijen-LPG tüpü indirilebilmesi uygun bir aparat kullanılması,
- Vinç dairelerinde en az 2 operatör bulundurulması ve kuyu içinin kameralarla görüntülenebilmesi,
- Baretlerde çene bandı kullanılması,
- Kuyu tahkimatında kullanılan betonun basınç dayanımlarının sürekli kontrol edilmesi,
- Kuyu vinç binalarında en az iki operatör bulundurulması ve aynı operatörün ara vermeden 5 saatten fazla vinç kullanımına izin verilmemesi
- Kuyu dibi-kuyu içi açıklıklarda deformasyon kontrolünün aletsel yöntemlerle ve bilgisayar programı ile takip edilmesi
- Kuyu diplerinde ilave travma tahtası bulundurulması, vb.

güvenlikle ilgili iyi uygulamalar yapılmıştır.

3 SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Elde edilen sonuç ve değerlendirmeler aşağıda listelenmiştir:

i. İki adet derin kuyu açma çalışması ölümlü iş kazası ve uzuv kayıplı iş kazası meydana gelmeden tamamlanmıştır.

ii. Kuyu açılması sürecinde 312 gün hiç iş kazası meydana gelmemiştir.

iii. Kuyu kazı sürecinin bütün aşamalarını kapsayan risk analiz ve değerlendirme çalışmaları ilgili kişilerle yapılmıştır. Özellikle iş emniyet analizi çalışmalarının ve güvenlik işbaşı konuşmalarının tool-box güvenlik kültürünün gelişiminde aktif rol oynadığı tespit edilmiştir.

iv. Çinli personelin işe başlatılması sürecinde ve sonrasında sağlık, güvenlik ve eğitim konularında sıkı kuralların uygulanması İSG yönetiminde avantajlar getirmiştir.
v. Kuyu açma/kazı çalışmalarında yüksekte çalışma, sıkışık alanda çalışma, nakliyat kovasına inme-binme, vinç halat ve ekipmanlarının kontrolleri, yabancılarla çalışma, platformda çalışmalar, yeraltı suları, vb. yönetilmesi gereken önemli İSG süreçleri bulunmaktadır. Emniyet kemeri kullanılması, nakliyat kovasında iniş-binişlerde merdivenin zorunlu tutulması, platform üzerinde çalışmalar sırasında platform kenarlarında yüksekten düşmelere karşı önlem alınması, vb. gibi uygulamaların çok önemli olduğu görülmüştür.
vi. Ramak kala olaylar sonrası gerekli önlemlerin alınması kuyuda olası iş kazalarını engellemiştir.
vii. Türk Mevzuatında kuyu açma çalışmaları ile ilgili hükümlerin sınırlı olması nedeniyle, ulusal ve uluslararası mevzuat hükümleri ve tecrübeleri dikkate alınarak çalışma yönergeleri ve prosedürleri oluşturulmuştur. Kuyu açılması, vb. süreçlerle ilgili mevzuattaki eksikliğin giderilmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

Kahraman, E. 2017. Yeraltı Kömür Madenciliğinde İş Güvenliği. KTÜ Nefeslik Dergisi, 2017/3.

Tünellerde Araç Yangını Olması Durumunda Jet Fanların Performanslarının İzlenmesi ve Tünel Güvenliğine Etkileri

Monitoring Jet Fan Performances in Case of Vehicle Fire in Tunnels and Effects on Tunnel Safety

U. Yaşa, Ö. Mercan, S. Karaçelebi
Zitron Havalandırma Sistemleri Tic. ve Ltd. Şti, İstanbul

ÖZET Tüneller sayesinde zorlu coğrafyaları daha güvenli ve hızlı olarak aşabiliyoruz. Çetin doğa koşullarını en az, hızlı geçmek kadar güvenli olarak da geçme kaygıları tünelleri daha da çok popüler yapmıştır. Büyük bir talep gören ve çokça kullanılan bir yöntem olan tünellerden geçmek de kendine özgü tehlikeler barındırmaktadır. Bunlardan önemli bir başlık olan tünel içindeki yangınlar çok tehlikeli durumlara yol açabilmektedir. Dünyanın dört bir yanında tünel içindeki araç yangınlarından kaynaklı trajediler yaşanmıştır. Bu trajik kazaların önüne geçme konusunda alınan tedbirler mevcut olduğu kadar sürekli olarak da geliştirilmektedir. Fakat ne olursa olsun, olası bir araç yangınında tünel içinin buna hazır olması gerekir. Bu neden ile de tünel havalandırması hem günlük hem de acil durumlar düşünülerek tasarlanmalı ve buna uygun fanlar ile teçhiz edilmelidir.

ABSTRACT We can overcome difficulties of the physiography by tunnels, safely and fast. To have worry to overcome tough natural conditions safely makes tunnels more popular as much as being fast. Even tunneling is in great demand and widely used, it has specific dangers. One of the very important topic is ‘fire in tunnels’ which can cause very serious situations. Tragedies have occurred all around the World due to vehicle fires in tunnels. Even we have precautions to prevent those tragic accidents; we need to improve them consistently. Under any circumstances, tunnel should be ready for a possible vehicle fire. Therefore the tunnel ventilation must be designed depending on daily needs and emergency cases and the fans must be selected so.

1 GİRİŞ

1.1 Yangın

Yangın fiziksel ve kimyasal bir olaydır. Isı, yakıt ve oksijenin uygun oranda bir araya gelmesi ile başlayan reaksiyona yanma denir. Yanma olayının kontrol dışı gelişimine yangın denilmektedir. Kapalı bir ortam içinde malzeme yanıyorsa yangın gücüne ve yanma hızına etkili olan iki parametre vardır. Birincisi,sıcak gazların tavan kısmında birikmesi sonucunda tavanın ve duvarların ısınması; dolayısıyla bu yüzeylerin ve sıcak gaz katmanının yakıt yüzeyine doğru ışınım yoluyla ısı transferi yaparak yanma hızını arttırmasıdır. İkinci etken ise mekandaki havanın giriş yapabileceği kısımların kısıtlı olması sonucunda yanma için gerekli olan oksijen miktarının elde edilebirliğinin sınırlanmasıdır. Bu nedenle malzemelerin yanma hızı ve çevreye yaydıkları ısı gücü azalmakta ve yanmayan gazların konsantrasyonunda artış olmaktadır. Tünelde çıkan yangınlar kapalı alan yangını olarak sınıflandırılırlar. (Kayılı vd., 2010)

Tünel içindeki bir yangının ısıl gücünün (yangın yükü) aynı malzemelerin kullanıldığı açık hava yangınının ısıl gücünden dört kat fazla olduğu araştırmalar sonucunda tespit edilmiştir. (Beard ve Carvel, 2005)

1.2 Yangın Gelişimi

Yangın dört evreden oluşmaktadır. Yangın sırasıyla; tutuşma, büyüme, tam gelişmiş yangın ve sönme evrelerinden oluşmaktadır. Tutuşma, yangının başlaması için gerekli olan enerjinin verilmesi sonucunda yanma reaksiyonunun başlaması olayıdır. Tutuşma bir alev kaynağından olabileceği gibi ortamdaki sıcaklığın yükselmesiyle de olabilir. Yangının büyüme evresinde ise yangın gelişimi; ortamdaki oksijen miktarına, ortam konfigürasyonuna ve yanma tipine bağlı olarak hızlı veya yavaş olabilir. Çevredeki malzemelerin ortamdaki ısı transferi sonucunda öyle bir an gelir ki ortamdaki cisimlerin birçoğu tutuşma tutuşma sıcaklığına ulaşarak aniden yanmaya başlarlar. Bu evreyi takip eden tam gelişmiş yangın evresinde, ortamdaki tüm yanıcı maddelerin yanmaya başladığı düşünülür. Bu evrede yangının ısıl gücü en yüksek değere ulaşır ve ortamdaki oksijen miktarı azdır. Tam gelişmiş yangın evresinde, yangının büyümesi oksijen miktarı ile sınırlıdır. Sönme evresinde ise ortamdaki yanan malzeme tükenmesi sonucunda ısıl gücü azalmaktadır. Bu evrede artık yangın yakıt kontrollü bir yangındır.

1.3 Yangın Güvenliği

Tünel yangınlarında ölümlerin birçoğu duman solunması sonucunda meydana gelir. Duman ve zehirli gazlar, yangından kaçarken insanların önlerini görmemelerine, bunun sonucunda paniğe kapılmalarına ve zehirlenip boğulmalarına neden olur.

PIARC, tünel kazalarında meydana gelen yangınların nedenleri şu şekilde sıralanmıştır.

i. Elektrik arızaları,
ii. Fren balatalarında meydana gelen ısınmalar
iii. Aracın kendi kendine alev almasına yol açan diğer arızalar

Daha az karşılaşılan kaza nedenleri

i. Çarpışmalar
ii. Tünel ekipmanlarındaki teknik hatalar
iii. Tünellerde yürütülen bakım çalışmaları

Tünelde meydana gelecek olası bir yangının boyutları yangın çıkaran aracın yükü ve tipine bağlıdır.

Avrupa parlamentosu ve konseyi 29 Nisan 2004 tarihinde 2004/54/EC sayılı direktifi ile Trans-Avrupa Karayolu ağı Tünelleri için asgari güvenlik gereksinimlerini belirlemiştir. (Özcan,E).

Karayolu tünellerinde bulunması gereken sistemler ve yapısal gereksinimler tünel güvenliği için çok önemlidir. Bunlar yapısal düzenlemeler, aydınlatma, havalandırma, acil durum istasyonları, yangın söndürme sistemleri, işaretlemeler, kontrol üniteleri, tünel kapatma ekipmanları, haberleşme sistemleri ve yangına dayanıklı malzemelerdir. Ayrıca 3.000 metreden uzun ve şerit başına 2.000 araçtan yüksek trafik hacmine sahip ve kontrol merkezi bulunan tünellerde yangın algılama, olay algılama ve görüntülü izleme de olmalıdır.

1.3.1 Yangın alarmı

Yangın alarmı geldiğinde yangın bölgesi SCADA üzerinde otomatik olarak gösterilir. Yangın bölgesiyle ilgili kamera görüntüsü, büyük monitöre otomatik olarak aktarılır.

Tünelde acil durum butonlarından, doğrusal yangın algılayıcılarından, ısı algılayıcılarından veya duman algılayıcılarından alınan alarm üzerine alarmın gerçekliği izleme sistemi ve tünel işletmesi çalışanları tarafından acil olarak kontrol edildikten sonra itfaiyeye ve eğer gerekli ise ambulans servislerine, jandarma merkezine, otoyol trafik polisine haber verilir. Tünel işletmesinin olabilecek bir yangın esnasında, mevcut yönetmeliğe göre tünel yangın mücadele sistemleri ile olaya müdahale etme ve itfaiye kuvvetlerine genel yardımda bulunma yükümlülüğü vardır.

Alarmın gerçek olmadığı anlaşıldığında jetfanlar manuel olarak devreden çıkartılır (http://www.kgm.gov.tr).

1.3.2 Havalandırma sistemi alarmı

Tünelde bir havalandırma alarmı alındığında tünelin kontrol odası tarafından, trafik işaret ışıkları değişken matris sistemleri ve matris tipi şerit kontrol işaretleri kullanılarak tünel trafiğe kapatılır. Tünel işletmesi havalandırma sisteminin alarm verme sebebini araştırır ve tünelin tekrar trafik

akışına açılması için gerekli kuruluşlardan yardım alır. (Özcan,E)

2 TÜNEL HAVALANDIRMASI

2.1 Tünel Havalandırma Amacı

Devlet ve İl Yollarımızda; 149 adet 500 m. den küçük Tünel, 54 adet 500-1000 m. arasındaki Tünel, 32 adet 1000-2000 m. arasındaki Tünel, 5 adet 2000-3000 m. arasındaki Tünel, 2 adet 3000 m. den büyük Tünel olmak üzere toplam 242 adet ve 196.675 metre uzunluğunda tünel bulunmaktadır.

Havalandırma sisteminin en önemli görevleri, araçlardan yayılan emisyon gazlarını seyreltmek ve tünel içerisinde oluşabilecek yangın gibi acil durumlar sırasında açığa çıkan sıcak gazları ve dumanı tünel kullanıcılarından uzak tutmaktır. Bu iki önemli parametrenin detaylı olarak analiz edilmesi sonucu nihai ve istenen havalandırma sisteminin tasarımına ulaşılmaktadır. Tasarım parametrelerinden ilki, araçlardan açığa çıkan emisyon gazlarının yasal sınırlarla belirlenmiş olan sınır değerlerin altında tutulması için gereken temiz havanın tünel ortamına sağlanmasıdır. Tasarım parametrelerinden ikincisi ise; havalandırma sisteminin yangın gibi acil durumlar sırasında istenilen performansı gösterip göstermediğinin kontrol edilmesidir. Bir kaza anında tünel içerisinde bulunan insanların uzun süre zehirli duman solumasını engellemek ve yüksek ısıya maruz bırakmadan tünelden en kısa zamanda tahliyelerini gerçekleştirmek hayati açıdan çok önemlidir. Bu nedenle yangın sırasında tünel atmosferinin, bilgisayar programı ile detaylı bir şekilde incelenmesi ve yangın konumuna bağlı olarak uygun tahliye yollarının belirlenmesi gerekmektedir. Normal şartlarda tünel içerisindeki havalandırmayı verimli bir şekilde gerçekleştiren havalandırma sisteminin, aynı zamanda yangın sırasında da istenilen performansı göstermesi gerekmektedir.

2.2 Karayolu Tünel İhtiyaçları

Çok kısa tünellerin dışında karayolu tünellerinde bilhassa trafiğin yoğun olduğu zamanlarda havalandırma yapılması esastır. Bir tünelde trafik tek yönlü ve serbest akışında sürüyorsa, 1-2 km'ye kadar uzunluktaki tünellerde trafiğin sağlandığı hava akışı yeterli olur. Fakat, daha uzun ve trafiğin durduğu veya yavaş olduğu hallerde havalandırma yapılması gereklidir. Tabii havalandırma, trafiğin tek yönlü olduğu 800 m.'ye kadar, çift yönlü olduğu 400 m.'ye kadar uzunluktaki tünellerde ve sadece yoğun trafik bulunmadığı taktirde söz konusudur. Daha uzun tünellerde, havalandırma sistemi, ancak aşağıdaki hususların etüdü yapıldıktan sonra seçilebilir (İnuğur, 1995):

-Tünel konstrüksiyonu ve izolasyonu,
-Emniyet, estetik, aerodinamik verimlilik,
-Bakım problemleri,
-Tesis masrafları,
-İşletme masrafları,
-Trafik şekli ve kompozisyonu.

Havalandırma ile istenen başlıca hususlar şunlardır;

1) Zehirli gazları, özellikle karbon-monoksit gazını ortadan kaldırmak,
2) En çok dizel motorlarında olmak üzere egzoz gazlarını ortadan kaldırmak,
3) Araçlardan kaynaklanan ısı enerjisini ortadan kaldırmak,
4) Yangın söndürme ihtiyaç ve çalışmalarına uygun olmak.

Dünya genelinde tüneller için geçerli genel güvenlik kriterleri uygulaması yoktur. Ülkeden ülkeye farklılıklar göstermektedir. COSUF (ITA COSUF - the Committee on Operational Safety of Underground Facilities) ülkeler arasındaki bu farklı kriterlerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Aşağıdaki standart ve öneriler dikkate alınarak karayolu tünellerinin asgari güvenlik gereksinimlerine ilişkin proje ve yapım kriterleri oluşturulmakta, rehber olarak kullanılmaktadır.

a. PIARC (1979,87,91,95,04,05,07)
b. NFPA (14,20,502,13-2003)
c. CIE Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE 88-90, CIE 2004-2)
d. ITA Önerileri
e. EN 12368,12966
f. COSUF Çalışma Grubu Proje, Araştırma ve Geliştirmeleri,

g. UNECE- Karayolları Tünelleri Uzmanlar Grubunun Tavsiyeleri-Nihai Rapor
h. Japonya Tünelleri için Acil Durum Tesisleri Şartnamesi (1997)
i. Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin Trans Avrupa Karayolu Ağı Tünelleri için Minimum Güvenlik Gereksinimleri (29 Nisan 2004)

2.3 Havalandırma Yöntemleri

Havalandırma sistemi planlanmadan önce tünelden geçmesi muhtemel olan trafik kompozisyonu, tünel geometrik özellikleri (uzunluğu-kesiti-eğimi), tünelin bulunduğu bölgenin topoğrafyası-iklim durumu gibi şartlara bakılarak havalandırmanın nasıl yapılacağı için çalışma yapılır. Bu çalışma neticesinde günlük ve acil durum havalandırma yöntemi seçilir.

2.3.1 Doğal havalandırma

Tünel fiziki şartlarına göre herhangi bir ekipman kullanılmadan tünelin havalandırılması doğal olarak da olabilmektedir. Burada kısıtlayıcı koşulları ülkeler farklı farklı değerlendirmektedir. Birkaç ülke için gereklilikler Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Farklı Standartlarda Tünel Havalandırma Gerekliliği

Standart	Havalandırma Gerekliliği
France/ Circ2000-63A2	Şehir içinde 300 m ve şehir dışında 500m'den kısa tünellerde yapılmaktadır.
Germany/ RABT	600 m'den daha kısa tünellerde doğal havalandırma yapılabilir.
UK/ BD78/99	300m uzunluğa kadar, piston etkisinin yeterli havalandırma yapacağı öngörülmektedir.
Netherlands/NL-Safe	250m den kısa tünellerde doğal havalandırma yapılabilmektedir.

2.3.2 Mekanik havalandırma

2.3.2.1 Enine havalandırma

Uzun tünellerin orta kısımları için tam enine havalandırma, şayet tesis ve işletme masrafı yönünden engel teşkil etmezse ideal bir sistemdir. Gerekli hava, bir kanal içerisinden yol kotu seviyesinden çekilir. Havanın veriliş ve çekilişi tersine de yapılabilir. Böylece, trafik alanındaki hava hareketleri tünel uzunluğuna bir sınırlama getirmez. Enine havalandırma sistemine başlıca engel, hem tesis hem de işletme maliyetidir.

2.3.2.2. Yarı enine havalandırma

Tünelin bir kenarı boyunca taze hava temin ederken, kirli egzost havasının tünel boyunca sürüklenerek tünel giriş ve çıkış kapılarından atılacağını varsayar. Bu sistem, göreceli olarak daha kısa tünellerde uygulanabilir. Tünel boyu, kirli havanın kapılardan atılamayacağı uzunluklara çıkar ise, tünel boyunca belli noktalarda egzost şaftları gerekir.
(https://www.tesisatmarket.com/proje/tunel-havalandirmasi-ve-jet-tunel-fanlari)

2.3.2.3. Boyuna havalandırma

Bu üç alternatif metod arasında en ekonomik ve kolay uygulanabilir olanıdır. Tünel içinde herhangi bir kanal uygulamasına gerek yoktur. Aşağıda sıralanan nedenlerle boyuna havalandırma sistemi çoğu zaman ilk tercih edilen çözümdür.

İnşaat ve mekanik maliyetleri en düşük olan sistemdir. Karayolu tünellerinde yapılan bazı analizlere göre, boyuna sistem, yarı enine sistemin yaklaşık 1/10 maliyetine yapılabilmektedir. Direk tünele uygulanabilir. Ayrı bir fan odası / mekanik odaya ihtiyaç yoktur. Güç tüketimi diğer sistemlere göre düşüktür. Sistemde kanal olmadığı için, statik basınç kayıpları oluşmamaktadır. Acil durumda, yangın anında da aynı sistem kullanılabilir (fanların 200-400 ºC ve 1-2 saat'e dayanıklı seçilmesi kaydı ile).

Bu havalandırma sisteminde, tünel içindeki trafiğin piston efekti; tünel kapılarındaki oluşan dış hava şartları, rüzgar ve hava basıncı tünel içinde elde edilmeye çalışılan hava akımına etki eder. Jet tünel fanları ile sağlanan longitudinal (boyuna) havalandırmada, jet

tünel fanlarının havayı itme güçleri (thrust), tünel içindeki hava akışını (hava hızını) sağlar. Hava hareket ederek fandan uzaklaştıkça , oluşturulan Jet etkisinin gücü azalır. Doğru sayıda jet tünel fanın doğru olarak tünel içine yerleştirilmesi, hedeflenen jet hava akımının sağlanmasında büyük önem arz eder.

Genelde tünel içinde montaj yeri olarak fanlar duvar veya tavana bitişik monte edilir. Jet tünel fanları, tünel duvarlarına ve tavanına yakın monte edildikçe, jet tünel fanının verimi azalır. Fanın iterek oluşturduğu jet hava akımı bir kısmı duvar ve tavana sürtünerek kaybolur. Jet tünel fanları genelde 90-120 metre aralıklarla tünel içinde yerleştirilir. (veya yaklaşık 10 tünel hidrolik çapında) bu mesafenin daha kısa tutulduğu uygulamalarda fanların birbiri üzerinde negatif etkisi oluşacaktır.
(https://www.tesisatmarket.com/proje/tunel-havalandirmasi-ve-jet-tunel-fanlari)

3 JET FANLAR

3.1 Çalışma Prensibi

Havalandırma prensip olarak kirlenen havanın yerine temiz havanın getirilmesidir. Bu süreklilik arzeden bir durum olduğu içinde havalandırmanında aksamadan devam ettirilmesi gerekir. Yapılan iş aslında havanın taşınmasıdır. Hava yoğunluğu deniz seviyesi ve 20 ºC de 1,2 kg/m^3 tür. Dolayısıyla 1 m^3 hava, 1,2 kg kütleye karşılık gelir. Bu havanın hareket ettirilmesi de 1,2 kg kütlenin hareket ettirilmesine karşılık gelir. Jet havalandırma hareket eden kütlenin bir "itme kuvvetine" tabi tutulduğunda hız değiştirmesi gerçeği üzerine kuruludur. Bu durum "itme (Thrust)" olarak bilinir.

Geleneksel havalandırma sistemlerinde tüm hava fan ve kanallar vasıtasıyla çekilir. Bu hem sağlanan temiz hava hem de tahliye edilen kullanılmış hava için geçerlidir. Basıncın düşmesinin önlenmesi amacına yönelik olarak havanın akış hızı mümkün olduğunca düşük tutulur. Ancak bu, kanalların nispeten geniş olması gerektiği anlamına gelir ve bu nedenle de büyük bir alan gerektirir.

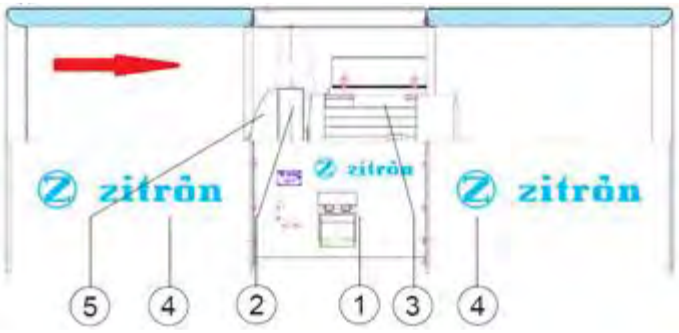
Jet havalandırma sisteminde ise farklı bir yaklaşım kullanılmaktadır. Bu sistemde küçük bir miktar hava bir fan içine emilir ve sonrasında da yüksek hızda atılır. Atılan hava fanın önündeki havaya çarptığında onu ileri doğru iter.

İtme kuvveti yani jet fanların yarattığı kuvvet, Newton [N] cinsinden ifade edilir ve kütle akış hızı ile hızda meydana gelen değişimin ürünüdür. Çıkış güçleri m^3/sn veya Pa cinsinden ölçülen geleneksel fanlardan farklı olarak jet fanlar için kullanılan ölçme birimi budur. http://www.gurvent.com.tr.

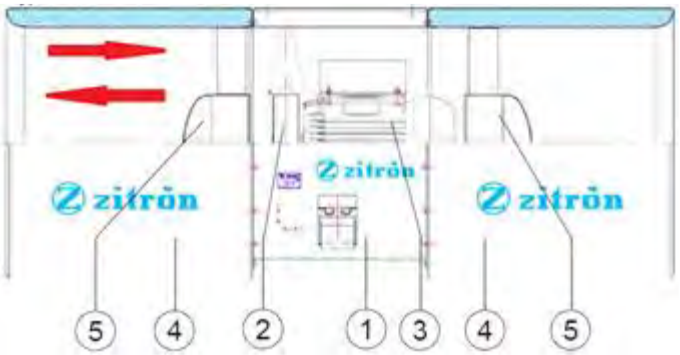
Jet fanlar genellikle tavana monte edilirler. Jet fanların harekete geçirecekleri havanın ortasına yerleştirilmeleri önemlidir. Teoride, çevredeki havanın başlangıç akış hızının sıfır olduğu varsayıldığında, bir jet fanın ürettiği itme kuvveti (N), hacimsel akış hızı (m^3/sn), havanın yoğunluğu (kg/m^3), havanın fan çıkış hızı (m/sn) parametlerine bağlıdır.

3.2 Kurulum ve Özellikleri

Jet fanları iki aralıkta üretilmektedir. Tek yönlü tüneller için önerilen tek jet akış yönü olan fanlar (Şek. 1) ve iki yönlü tüneller için de çift yönlü (ters çevrilebilir) (Şek. 2) fanlar.



Şekil 1. Zitron JZ modeli tek yönlü jetfan



Şekil 2. Zitron JZR modeli çift yönlü jetfan

Tip JZ (www.zitron.com)
1. Fan Muhafazası
2. Pervane
3. Motor
4. Susturucu
5. Yarı küresel giriş muhafazası

Tip JZR (www.zitron.com)
1. Fan muhafazası
2. Pervane
3. Motor
4. Susturucu
5. Aerodinamik merkez (motor kovanı)

Gerekli olması durumunda, 200 ºC, 250 ºC, 400 ºC de sıcak havayı aktarma imkanı sunan, paslanmaz çelikten, yüksek verimli fanlarda üretilmektedir.

Fan korumaları haddelenmiş çelikten yapılır. Susturucuyu sabitlemek için flanş bağlantıları ve elektrik motorunu yerleştirmek için de iç kısımda konsol mevcuttur.

Süspansiyon tertibatını sabitlemek için üst kısımda köşebentler bulunur. Pervane etrafında kanatlar/bıçaklar olan bir merkezden oluşur. Döküm alüminyumdan imal edilir. Tek yönlü fanlarda kanat profilleri asimetriktir. Çift yönlü olanlarda ise simetriktir. Pervanelerin statik ve dinamik olarak balansları yapılır.

3.3 Fan/Motor ve Susturucular

Her durumda kullanıcı tarafından seçilecek gerilim, koruma,yalıtım sınıfları mevcuttur. Sincap kafes rotor, asenkron ve üç fazlı elektrik motorlarına sahiptirler. Rulmanlar 40.000 saatlik çalışma ömrüne göre yağlanmaktadırlar.

Fanın giriş ve çıkışında susturucular bulunur. Çok yüksek verimlidirler. Bu susturucular tüp şekillidirler. Havanın giriş alanı aerodinamiktir. Haddelenmiş çelik sacdan harici bir kapak, yanmaz susturucu malzeme, delikli çelik sacdan bir iç kapak, çift yönlü olması durumunda aerodinamik merkez-tek yönlü olması durumunda yarı küresel bir giriş muhafazasından oluşurlar.

3.4 Jet Fanların Diğer Parça ve Özellikleri

Fanın ve susturucuların tüm metal parçaları sıcak daldırma galvaniz ile korozyona karşı korunur. Daha sonra galvanizli astarlama için özel boya kaplaması uygulanır ve son olarak son kat boya yapılır.

Tüneldeki fanın sabitlenmesi, her durumda sahanın özel koşullarına göre yapılmalıdır. Süspansiyon tertibatı, titreşim emici elemanları ile elastiktir ve ayrıca yüksek düzenleyici sistem ile donatılmıştır.

Jet fanlar uygun test mekanizmalarında test edilmelidir. Aerodinamik olarak yapılacak testlerin gerçekleştirilmesi kullanım öncesi çok önemlidir. Yapılan bu testler ile birlikte hava akışı (m^3/sn), Gerçek eksenel itme (Newton) ve Akustik güç seviyeleri (dB (A)) görülmüş olur. Saha uygulamasından önce olası süprizler bertaraf edilmiş olur.

Tüm bu emek ve testler ile ortaya çıkan ürünün ISO 9001 standardına (UNE 66901) göre uygunluk belgelerini almış olmalıdır.

4 JET FAN SEÇİM

Rapor edilen birçok karayolu tünel kazasında araç tipleri açık olarak belirtilmemiş olmasına rağmen eldeki veriler incelendiğinde en fazla kazaya karışan araç türünün kamyonlar olduğu göze çarpmaktadır (Krausmann ve Mushtag, 2005).

Çift yönlü trafik akışının olduğu tünellerde tek yönlü trafik akışı olanlara oranla %40 daha fazla kaza meydana geldiği görülmektedir. Birçok tünelde acil durum şeridinin olmaması trafik üzerinde negatif bir etki yaratmaktadır. Eğimi %2,5'in üzerinde olan tünellerde meydana gelen araç arızalanmaları, eğimi %2,5'dan daha az olanlara oranla 5 kat daha fazladır. Uluslararası istatistikler incelendiğinde; araçlarda çıkan yangının nedeninin, çarpışmalardan daha çok; aracın hatalı elektrik sisteminden, aşırı ısınmış motordan vb. bir sebepten kendiliğinden alev alma şeklinde kaynaklandığı görülür. Buna rağmen dünyada en kötü sonuçları olan 14 tünel yangını incelendiğinde 12'sinde yangının kaza sonucu meydana geldiği görülmektedir, (United Nations Economic And social Council, 2001).

Çizelge 2. PIARC tarafından kabul edilen araç tipleri ve yangın kapasiteleri (PIARC World Road Association, 1999)

Araç Tipi	Tipik Yangın Yükü (MJ)	Tipik Yangın Gücü (MW)	Notlar
Otomobil	3.000-3.900	2,5-5	Finlandiya'da yangın testlerinde kullanılan yüklerdir.
Otobüs	41.000	20	EUREKA(A pan - European network for market-oriented, industrial R&D) tarafından yangın testlerinde kullanılmıştır.
Yüklü Kamyon	65.000	20-30	
Ağır Yük Taşıyan Araç	88.000	30	
50 m3 Benzin Taşıyan Tanker	1.500.000	300	Büyük boyuttaki yangınlar için Hollanda'da kabul edilen değerlerdir.

Bu bilgiler ışığında aşağıdaki hesaplamalar da yangın yükü 200 MW olan bir tanker yangını temel alınmıştır.

4.1 Fan Seçimi Hesapları İçin Gerekli Olan Veriler

Buradaki örnek çalışmada 3500 metre uzunluğunda olan bir karayolu tüneli için gerekli olan fan seçimi yapılmıştır. Tünel ortasında yangın yükü 200 MW olan bir tanker yangının bertaraf edilmesi için hangi güçte ve kaç adet olması gerektiği diğer verilerin de dikkate alınmasıyla hesaplanmıştır.

Tünele ait veriler 3 başlık altında toplanmaktadır. Geometrik veriler, olay yeri verileri ve trafik şartladır.

a. Geometrik veriler
   - Tünel Boyu …m
   - Tünel Eğimi …%
   - Yol şerit sayısı …
   - Tünel kesiti …m^2
   - Kesit çevresi …m
   - Kesit yüksekliği …m
   - Tünel kotu …m.a.s.l
   - Hava yoğunluğu …kg/m^3
   - CO kabul edilebilir seviye …ppm
   - NO_x kabul edilebilir seviye …ppm
   - Görünürlük seviye …m^{-1}
   - Sürtünme katsayısı …
   - Rüzgar hızı …km/h
   - Rüzgar atak açısı …derece

b. Olay yeri verileri
   - Yangın Termal Gücü …MW
   - Özgül ısı …J/kg.K
   - Ortam sıcaklığı … ºC
   - Bloke olan araçlar …%

c. Trafik Şartları / Trafik Kompozisyonu
   - Benzinli hafif araçlar …%
   - Dizel hafif araçlar …%
   - Ağır araçlar …%
   - H.Araç hava sürtünme k.sayısı …
   - Araç kesitleri …m^2
   - Kamyon hava sürtünme k.sayısı…
   - Kamyon kesitleri …m^2
   - Trafik hacmi zirve değeri …saat başına

4.2 Fan Seçimi Hesap Adımları

Yukarıda da belirtilen parametrelerin örnek hesaplama için değerleri şöyledir (Çiz. 3).

Çizelge 3. Fan seçimi için örnek hesaplama tablosu

	Geometrik Veriler						Durum
FAZ 1	L (m)	Eğim (%)	Hmax (m)	S (m^2)	Ç (m)	Şerit sayısı	Giriş
	2200	2,0	7,6	92,0	38,0	3,0	
	Geometrik Veriler						
FAZ 2	L (m)	Eğim (%)	Hmax (m)	S (m^2)	Ç (m)	Şerit sayısı	Çıkış Rüzgar
	1290	-1,3	7,6	92,0	38,0	3,0	

Araç hızlarına ve görme mesafesine bağlı olarak ihtiyaç duyulan hava miktarları aşağıdaki tabloda olduğu gibidir. Tünelin farklı eğimdeki bölümü için de yine bu değerler hesaplanmıştır. Dizayn değerleri olarak en yüksek değerler seçilmiştir (Çiz. 4).

Çizelge 4. Araç hızı ve görme mesafesine bağlı hava miktarı hesaplama tablosu

Araç Hızı (km/h)	Q_{CO} (m^3/sn)	Q_{NOx} (m^3/sn)	Q_{vis} (m^3/sn)	Q_{dizayn} (m^3/sn)
0	12,8	74,43	29,77	74,4,
5	26,01	101,92	65,35	101,92
10	18,5	70,26	55,14	70,26
20	13,05	53,65	47,84	53,65
30	10,79	47,53	45,06	47,53
40	8,71	43,27	45,85	45,85
50	7,01	39,54	45,27	45,27
60	5,74	37,43	45,6	45,6
70	4,93	39,95	44,02	44,02
80	4,57	37,72	42,77	42,77
90	4,83	40,32	44,8	44,8
100	3,02	14,51	30,25	30,25
110	3,29	16,68	32,62	32,62
120	3,59	18,71	34,55	34,65

4.3 Basınç Kayıplarının Belirlenmesi

İki faz durumu içinde basınç kayıpları hesaplanmıştır. (Normal durum için) (Çiz. 5).

Çizelge 5. Örnek basınç kayıbı hesaplama tablosu

V araç (km/h)	V hava (m/sn)	ΔH Fr (Pa)	ΔH Giriş (Pa)	ΔH Rüzgar (Pa)	ΔH araç (Pa)	ΔH B.etk (Pa)	ΔH Kesit (Pa)
0	1,28	6,74	0,59	-	12,95	-12,95	-
5	1,62	10,67	0,94	-	0,37	-12,95	-
10	1,07	4,67	0,41	-	-11,26	-12,95	-
20	0,8	2,65	0,23	-	-43,58	-12,95	-
30	0,76	2,34	0,21	-	-73,8	-12,95	-
40	0,77	2,41	0,21	-	-103,28	-12,95	-
50	0,76	2,34	0,21	-	-132,83	-12,95	-
60	0,76	2,36	0,21	-	-161,92	-12,95	-
70	0,73	2,21	0,19	-	-193,65	-12,95	-
80	0,71	2,09	0,18	-	-223,28	-12,95	-
90	0,74	2,26	0,2	-	-252,11	-12,95	-
100	0,6	1,46	0,13	-	-284,47	-12,95	-
110	0,54	1,18	0,1	-	-317,68	-12,95	-
120	0,56	1,3	0,11	-	-343,59	-12,95	-

Benzer şekilde acil durum senaryosuna göre de Kritik hız, Basınç kayıpları ve ilave olarak bloklanan trafikten kaynaklı basınç kayıpları da hesaplanır.

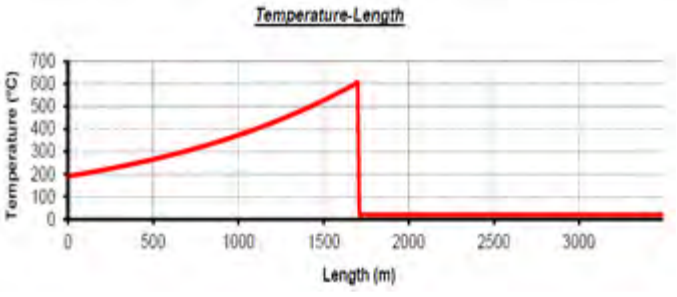
4.4 Fan Seçimi

Tüm bu çalışmaların ardından 45 kW gücünde 1,2 m çapında fan seçimi yapılmıştır. Seçilen fanın itme kuvveti 1487 N'dur. Fandan hava çıkış hızı 33,8 m/sn, hava akımı 38,2 m^3/sn'dir.

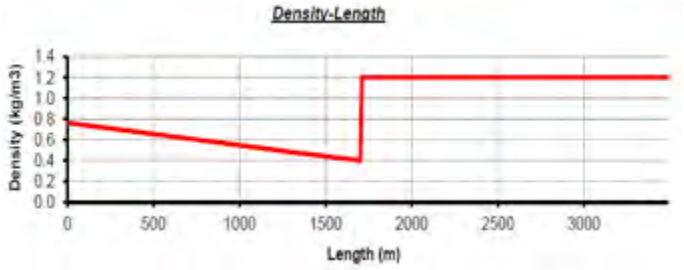
Jet fan tavana asılacağı için kurulumdan kaynaklı olarak da bir verim kaybı olacaktır. Bu nedenle 0,8 kurulum katsayısı ile de düzeltme yapılmıştır. Çift olarak kurulacak olan fanların tünel girişinden olan mesafesi tünel hidrolik çapının 12 katından fazla olmalıdır. Tünel içinde kurulacak olan fan çiftleri arası mesafede tünel hidrolik çapının 10 katından fazla olmalıdır. Örnek tünel için 56 adet fan önerilmiştir.

Tünel ortasında 200 MW yangın yüküne sahip tankerin yanması sonucu bu bölgedeki hava sıcaklığı 606 ºC olacaktır. Sıcaklığın etkisi ile de hava yoğunluğu 0,4 kg/m^3 değerine kadar düşecektir. Yanan araçtan, tünel çıkışına kadar olan tünelde hem zamana bağlı hem de km'sine bağlı olarak sürekli değişen değerler oluşacaktır. Tünel içerisinde kurulu olan ilgili fanların devreye girmesi ile birlikte ilk çalışan fanın olduğu bölgede hava hızı 9,2 m/sn geri kalan bölgedeki fanların da katkısıyla hava 4,85 m/sn hız ile tünelden çıkıyor (çıkan havanın sıcaklığı 190 ºC).

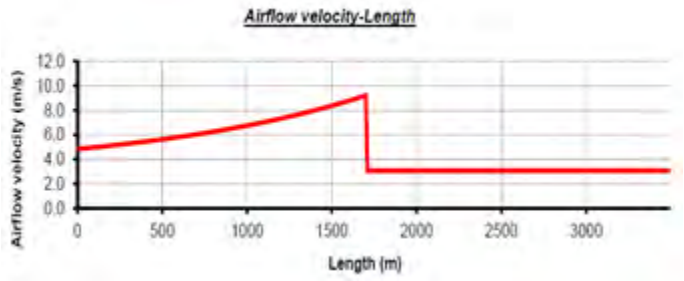
Seçilmiş olan Jet Fanların hava üfleme hassasiyetlerinin tünel boyuyla ilişkilendirilmiş grafikleri aşağıdaki gibidir:



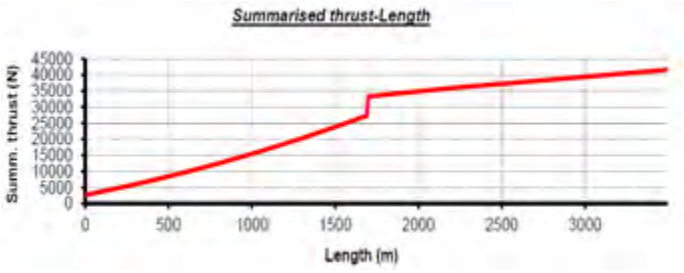
Şekil 3. Sıcaklık – tünel boyu



Şekil 4. Yoğunluk – tünel boyu



Şekil 5. Hava hızı – tünel boyu



Şekil 6. Küm. itme kuvveti – tünel boyu

5 SONUÇ

Mekanik, elektrik ve kurulum-inşa avantajları sağlayan jetfan sistemi hızlı sonuç almayı sağlayan güvenilir, düşük enerjili ve çevre dostu bir havalandırma ve duman tahliye sistemidir.

Günlük havalandırma hesapları yapılır iken tünel içindeki havanın hızına etki eden ve onu kirleten tüm etmenler doğrudan dikkate alınmalı ve hesaplamalara katılmalıdır.Acil durum havalandırmasında ise tünel içindeki yangın büyüklüğü ve yeri konusunda da oluşabilecek en tehlikeli senaryonun seçilmesi ağır kayıpların yaşanmasını önleyebilecektir.

Tünellerde kullanılacak havalandırma sisteminin yangın durumunda uluslar arası standartlarda önerilen ve yangında güvenlik için gerekli bütün şartları sağlamasına dikkat edilmelidir.

Tünel içinde yangın sırasında açığa çıkan sıcak gazlar, jet fanların havayı tahliye etmeye başlaması ile tünel içinde genel hatları görece homojen olarak dağıtılabilmektedir. Bu sayede sıcaklık tek bir bölgede toplanmamakta ve tünel içerisinde destekleme sistemlerine daha az zarar verilmiş olmaktadır.

KAYNAKLAR

Kayılı, S., Köktürk, T., Eralp, C. Tünel Yangınlarının ve Yangın Güvenliği İçin Kullanılan Havalandırma Sistemlerinin Özellikleri, Mühendis ve Makine Cilt 51 Sayı 604

Beard, A., Carvel, R. 2005. The Handbook of Tunnel Fire Safety, Thomas Telford Publishing.

Özcan, E. Tünellerde Yangın Algılanması İçin Kullanılan Teknolojiler, Mavili Elektronik A.Ş. Uygulama Notları.

İnuğur,Ö.1995

https://www.termodinamik.info/makale/tunel

https://www.tesisatmarket.com/proje/tunel-havalandirmasi-ve-jet-tunel-fanlari

http://www.gurvent.com.tr

www.zitron.com

United Nations Economic And social Council, 2001.Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels final report, Trans/AC.7.9, 16, 32, December 2001.

PIARC World Road Association, 1999. Fire and Smoke Control in Road Tunnels, PIARC Committee on Road Tunnels, Paris, pp. 39-51.

Kapalı Alanlardan Kuyu-Temel Çalışmalarında İş Sağlığı ve Güvenliği

Occupational Health and Safety in Closed Mediums

S. Akyıldız
Soner Temel Mühendislik İnşaat ve Ticaret A.Ş., İstanbul

ÖZET İş kazaları ve meslek hastalıklarını önlemek ve risklerle mücadele edebilme amacının merkezinde yüzyıllardan beri insan faktörü ön plandadır. Ülkelerin gelişmişlik düzeyi, yaptığı üretim düzeyinin yanında kendi insanına verdiği değerle de doğru orantılıdır. Bu yüzdendir ki gelişmiş ülkeler seviyesine ulaşabilmek için çalışanlarımızı en iyi şekilde bilinçlendirip, insan onuruna yaraşır bir sistem meydana getirmeliyiz. Bunu yaparken de işe uygun insan değil, insana uygun iş rotasıyla hareket ederek iş sağlığı ve güvenliği konusuyla ilgili her türlü çalışma ve disiplini en iyi şekilde yerine getirmemiz gerekmektedir.

Kapalı alanlarda yapılacak olan çalışmalarda iş sağlığı ve güvenliği konusunu doğrudan kapsamaktadır. Bu alanlarda karşılaşılabilecek olası tehlike ve risklerin önceden tespit edilerek gerekli önlemlerin alınması ve faaliyetlerin sistematik bir şekilde yürütülmesi oldukça önemlidir. Yapılan çalışmalar da kapalı alanlarda yürütülen işlerde çalışanlardan hayatını kaybedenlerin yarıdan fazlasını kişileri kurtarmak amacıyla alana girenlerin oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu oran çalışmalar da izlenecek olan koordinasyon ve bilincin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Hazırlanan bu çalışmada nerelerin kapalı alan olarak nitelendirilebileceği, bu kapsamda yer alan ve giderek artan şehirleşme nedeniyle arsa fiyatlarının ve rantın hızla artması, depreme daha dayanıklı, daha fazla kullanım alanı için kuyu temel istinat perdesi kaçınılmaz hale geldi. Günümüzde, çevreye, doğaya, tarihe zarar vermeden bir binanın temel çukurunu 10 metre, 20 metre veya 30 metre kazmanın şekli kuyu temel uygulamasıdır. Kuyu temel sistemiyle yürütülen çalışmalarda ne tür tehlike ve risklerle karşı karşıya kalınabileceği irdelenerek, bu gibi durumlarda işçilerin sağlık konusunda ne gibi problemler yaşayacağı konusuna değinilecek ve ayrıca çalışanların güvenliğini en üst düzeye çıkarabilmek için muhtemel risklerin asgariye çekilebilmesi ve eğer mümkünse ortadan kaldırılması amacıyla hangi çalışma yöntemlerinin izlenmesi gerektiği analiz edilecektir.

1 GENEL OLARAK KAPALI ALANLARIN ÖZELLİKLERİ VE BARINDIRDIĞI TEHLİKELER

1.1 Kapalı Alan Nedir?

Kapalı alan en dar tanımıyla; olumsuz şartlardan ya da tehlikeli maddelerden kaynaklanabilecek ciddi yaralanma veya ölüm riskinin olduğu etrafı çevrili vaziyette bulunan, sınırlı yer olarak nitelenebilir (Health and Safety Executive, 2011).

Aşağıdaki durumlardan en az birisine uyan alanlar da kapalı alan olarak sınıflandırılabilir:

- Giriş ve çıkış için sınırlı bir açılış alanına sahip olan yerler,
- Havalandırma durumu elverişsiz olan yerler,

- Tasarımı, sürekli iş yapmak için planlanmamış (geçici süre çalışılan) yerler (International Association of Classification Societies. 2007).

Potansiyel olarak yeteri kadar sınırlı alanı olan işçilerin çalıştığı yapılar kapalı alan olabilir. Kapalı alan tanımıyla bağdaşmayan bazı yerler de işçilerin o an için yaptığı çalışma ile bağlantılı olarak kapalı alan gibi düşünülebilir. Örneğin; elindeki boya tabancası ile bir odada püskürtme işlemi ya da kaynak işlemi yapan bir işçinin bulunduğu bölüm yaptığı iş itibariyle kapalı alan olarak nitelendirilir (Health and Safety Authority. 2001).

1.2 Özellikleri Bakımından Kapalı Alanlar

Bir yerin kapalı alan olarak nitelenebilmesi için sınırlı bir giriş ve çıkış alanının olması gerekir. Bir işçinin girip çalışabileceği kadar yeterli büyüklükte bulunan kapalı alanlar kimyasallardan, atık ya da lağımlardan ve bazı olumsuz çevre koşullarından kaynaklanabilecek tehlikeli atmosfer şartları ihtiva edebilir. Bunlara ek olarak bu tip yerlerde göçme ya da çökme sonucu sıkışma ve boğulma ihtimali de bulunabilir (Occupational Safety and Health Service, 2001).

Kapalı alanlar kısmen açık olabileceği gibi tamamıyla kapalı da olabilir. Örneğin; depolama tankları, silolar, reaksiyon tankları, kapalı tanklar ve kanalizasyon boruları genellikle tamamıyla kapalı olan sistemlerdir. Bunun yanı sıra, üstü açık odalar, tekneler, kalorifer kazanlarındaki yanma hazneleri, kanal sistemleri ve havalandırılmayan odalar da yapıları gereği kapalı alan olarak nitelendirilmektedir.

Tasarım, ulaşım ve yapılacak olan çalışma türüne göre kapalı alanlar değişiklik gösterebilir. Su tesisatının bulunduğu kısımlar, tamir ve bakım odaları, tavan araları ve kargo konteynerleri yapıları itibariyle potansiyel birer kapalı alandır. Bir yerin kapalı alan olup olmadığının tespiti için şekil 1'de izlenecek yol faydalı olabilir. Buna göre şekildeki sorulara evet ya da hayır şeklinde verilecek cevaplarla çalışma alanının kapalı alan olarak değerlendirilip değerlendirilmeyeceği kolaylıkla tespit edilebilir.

2 KAPALI ALAN TEHLİKELERİ

Kapalı alanlar yapı itibariyle temelde üç tür tehlikeyi barındırırlar.

2.1 Atmosferik Tehlikeler

Kapalı ortam havasının sağlık ve güvenliği olumsuz etkileyecek nitelikte olmasıdır. Bu tehlikeler;

- Yetersiz hava, düşük oksijen seviyesi (%19), oksijeni yüksek hava (%23,5),
- Parlama ve patlama oluşturacak oranlarda gaz ve toz,
- Ortamda, tehlike oluşturacak oranlarda, zehirli ve zararlı seviyede her türlü gaz, toz, duman ve buhar bulunma ihtimali.

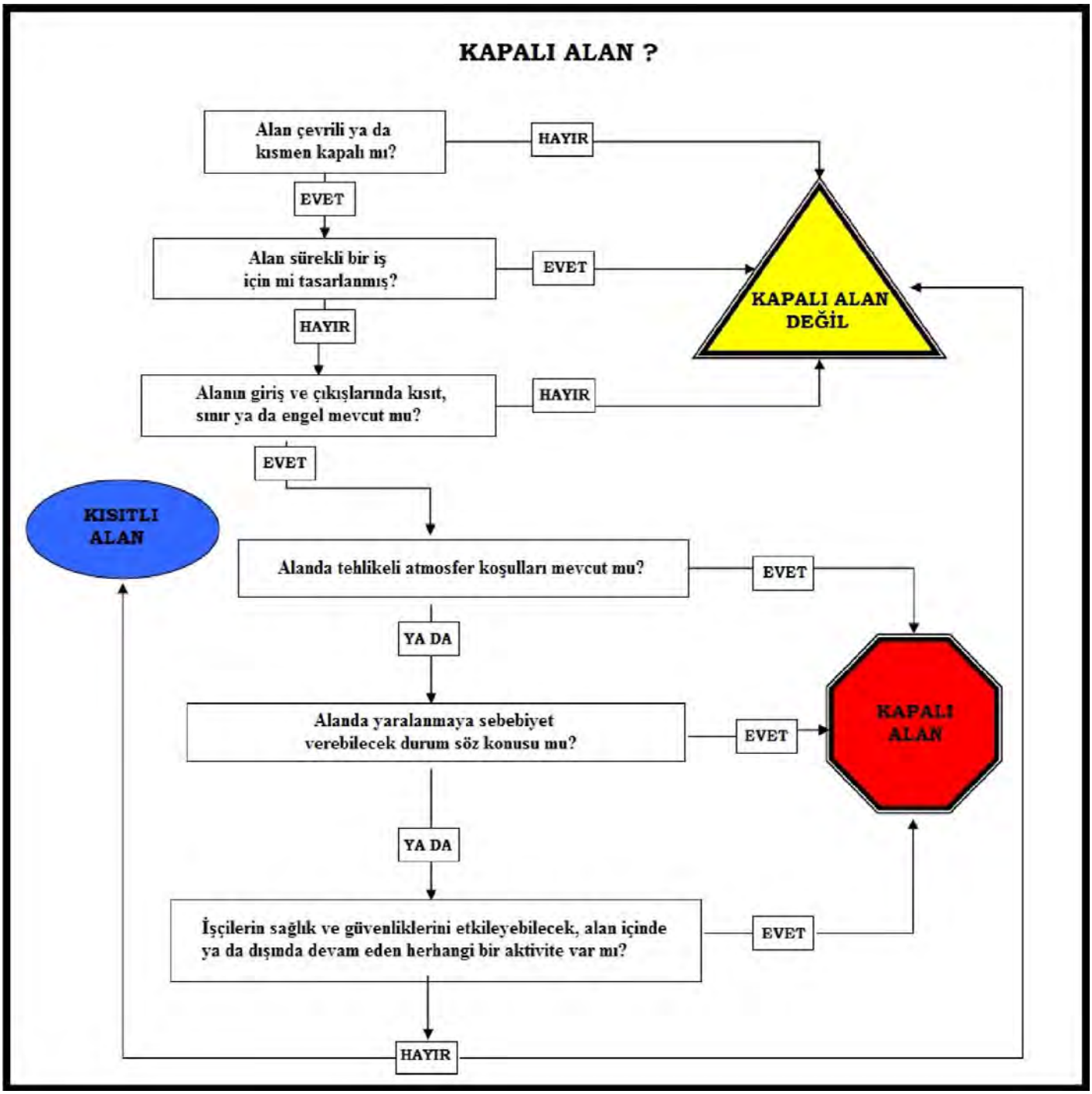
2.1.1 Kapalı alanlarda bulunma ihtimali olan gazlar

a) **Basit Boğucu Gazlar:** Karbondioksit (CO_2), Metan (CH_4), Etan (C_2H_6), Propan (C_3H_8), Bütan (C_4H_{10}), Hidrojen (H_2), Asetilen, Azot (N_2).

b) **Kimyasal Boğucu Gazlar:** Bu gazların boğucu etkisi yanında toksik etkileri de vardır. Örneğin; Karbonmonoksit (CO), Hidrojen sülfür (H_2S), Hidrojen siyanür (HCN).

c) **Yanıcı, Parlayıcı, Patlayıcı Gazlar:** Bu gazlar, yanıcı, parlayıcı, patlayıcı özellikte olmalarının yanısıra boğucu ve zehirleyici de olabilirler. Örneğin; Metan (CH_4), Etan (C_2H_6), Propan (C_3H_8), Bütan (C_4H_{10}), Asetilen (C_2H_2), Hidrojen (H_2), Hidrojen Sülfür (H_2S), Karbon monoksit (CO)

d) **Tahriş Edici Gazlar:** Asidik özellikleri ve suda çözünürlükleri sebebiyle, solunum sistemleri üzerinde tahriş edici etki gösterirler. Amonyak (NH_3), Kükürtdioksit (SO_2), Fosgen($COCl_2$), Klor (Cl), Ozon (O_3), Azot oksitler (NOx) ve asit buharları bu gruba girerler.



Şekil 1. Bir yerin kapalı alan olup olmadığının tespit edilmesi (Government of Alberta Employment and Immigration, 2009)

2.2 Fiziksel Tehlikeler

Fiziksel tehlikeler:

- Elektrik,
- Yetersiz aydınlatma,
- Çarpma, düşme ve kayma,
- Yüksek gürültü,
- Yüksek ve düşük sıcaklık,
- İçine çekecek ortamlar,
- Burgu tipi dönen helezonlar,
- Muhafazasız tamburlar,
- Hareketli parçalar,
- Dönen ekipmanlar,
- Muhafazası olmayan kayışlar vb,
- Aşırı sıcak ve soğuk ortam,
- Titreşim,
- Yapıdan kaynaklanan tehlikeler,
- İçinde bulunabilecek aşındırıcı, oksitleyici maddeler.

2.3 Diğer Tehlikeler

Kapalı alanlar, çoğunlukla insanların çalışacağı alanlar olarak tasarlanmadıkları

için başka türde tehlikeler de barındırırlar. Genel olarak bu gruba giren tehlikeler şu şekilde sıralanabilir:

- Atmosfer şartlarndan kaynaklanabilecek bilinç kaybı, sakatlanma, yaralanma ya da ölüm ihtimali.
- Yaralanmış ya da baygın vaziyetteki kişinin tedavi edilmesi ya da kurtarılması sırasında yaşanabilecek zorluklar.
- Oksijen yetersizliğinden kaynaklanan ya da su, kum, hububat vb. maddelerin yoğun birikintisi içerisinde kalarak gerçekleşebilecek boğulma olasılığı.
- Sürüngenler, böcekler (yılan, akrep, vs)
- Biyolojik tehlikeler (bakteriler, virüsler, vs)
- Kimyasal tehlikeler (oksitleyici maddeler vs)
- Psikolojik etkiler (klostrofobi, fiziksel yetersizlik vs.)

3 KUYU TEMEL NEDİR, NASIL YAPILIR?

Yapı İşleri kapsamında tipik bir kapalı alan çalışması olan kuyu temel faaliyetleri, uygulama olarak daha çok madencilik sektörü pratikleriyle yürütülmektedir.

İksa yöntemlerinden biri olan kuyu temel çalışmaları genelde bitişik nizam yapılarda yer kaybını en aza indirgemek için yapılan uygulamalardır. Yerinde oluşturulan, çapı büyük ve derin temellerdir. Binaların temel çukurunu 10-20 -30 metre kazabilme imkanı tanır. Özellikle bitişik nizam yapılarda, kazık makinalarının çalışamayacağı, proje alanının kısıtlı olduğu durumlarda kuyu temel uygulamasına başvurulur.

Derin kazılarda zemin kayma problemlerine engel olmak, mevcut yapıları bozmadan bodrum kat yüksekliklerini arttırmak veya yeni bodrum katları inşa etmek için geliştirilmiş bir çalışma teknolojisidir. Kuyu temel zannedildiği gibi basit uygulamalar değildir. Bitişik nizam yapılarda hafriyat gelme ihtimaline karşı uygulanan bir tür istinat duvarıdır. Yapıda hafriyat alınmadan önce kuyu temel uygun görülen yer maden ocağı gibi kazılarak iksalarla takviye edilip, belli aralıklarla bir boş, bir dolu şeklinde açılır. Asıl binanın temelinin altında kalacak şekilde mütemadi temeller oluşturulup üzerinden perde duvar çıkılır. Ardından arada kalan dolu kısımların da hafriyatı alınıp, aynı şekilde kuyu temelleri oluşturulur.

Şekil 2. Kuyu-Temel çalışmasının genel görünümü

Şekil 3. Göçme ve çökmeye karşı alan tahkim edilerek güvenlik sağlanması

Kuyu temel inşaat projesinin hafriyat çalışmasından önce komşu parselleri yolların toprak kaymasını önlemek için iksa perdesi bunun yanı sıra yapılacak kuyu temel perdenin binanın ana taşıyıcı perde görevini yapması diğer iksa çalışmalarında fore kazık, mini kazık gerek kalmaz ve değerli olan arsanızın m^2 yer kaybını önlenmiş olur. İksa çalışması fore kazık veya mini kazık olduğunda hafriyat çalışmasından sonra tekrar yapılacak betonarme perde ek bir maliyet işçilik ve malzeme gideriniz olacaktır. Kuyu perde ve kuyu temel uygulamasında proje içindeki iksa ve ana taşıyıcı perde imalatı yapılarak maliyet en az

indirilir. Kuyu temel istenilen projelerde statik mühendisi zemin etüt analiz sonuçlarına bakarak proje içerisindeki kolon aplikasyonlarını gözden geçirerek kuyu ano ebatlarını ve sıralarını numaralandırılır. Genelde kuyu ölçüleri 3 m x 2 m, 3 m x 1,5 m, 3 x 1 m, 2 x 1 m gibi olsa da her projede ölçüler değişebilir. Örneğin; 15 m uzunluğunda bir cephede 3 m'lik 5 adet kuyu oluşturmak gerekir. Yapılacak kuyulara 1, 2, 3, 4, 5 şeklinde sıra numarası verilir. İlk önce 1, 3, 5 kazılır, daha sonra 2, 4. Kuyu kazı esnasından kullanılan iksa kerestesi kaset haline getirilir ve kamalar çakılır. Kazılan taşı-toprağı çıkarmak için inşaat (gırgır) vinç kullanılır. Kova ile çekilir, el arabasına boşaltılarak kuyu çevresinden uzaklaştırılır. Kuyu temel kazısı el aletleri ile devam eder. Zemin yapısına bağlı olarak her 80-120 cm derinlikte tekrar iksa kerestesi ile kaset çevrilerek tahkim edilir ve böylece istenilen - nihai kazı koduna kadar göçme, akmaya karşı güvenlik alınarak çalışma devam eder. İstenilen - kod seviyesine ulaştıktan sonra inşaat statik projesindeki yapılması istenilen ø8-32 kalınlıkta demir donatı bağlanarak demir işçiliği son bulur. Sıradaki 2 numaralı kuyu için tevzi demir filizler istenilen belli aralıklarla bırakılarak kalıp çakılır, ardından beton dökülerek birinci kuyu bitirilir ve üçüncü kuyuya başlanır. Sıralamadaki 1,3,5 kuyuları tamamlanıp, beton döküldükten sonra diğer sıralamadaki 2, 4 kuyuları kazılır, tevzi demir filizleri donatıları bağlanarak betonarmenin sürekliliği sağlanarak, yükün aktarımına yardımcı olunur.

4 KUYU TEMEL ÇALIŞMALARINDA ALINMASI GEREKEN İSG ÖNLEMLERİ

Ülkemizde son zamanlarda artan kentsel dönüşüm projelerinde oldukça fazla kullanılmaya başlanan kuyu temel sistemi inşaat sektöründe işçiliğin en tehlikeli boyutlarda yapıldığı ve emeğin en bol olduğu işler arasında yer almaktadır. Projelerde can ve mal kaybını önlemek adına yapılan bu çalışmada alınması gereken önlemleri genel olarak şu şekilde sıralayabiliriz.

- Kuyu temel işlerine başlamadan önce risk değerlendirmesi yapılmalı, bulunan risklere karşı önlemler belirlenmelidir.
- Çalışma alanı kontrol altına alınmalı, bölge makine - ekipman ve malzemelerden arındırılmalı, uyarı levhaları konmalı, çevre reflektif şeritlerle işaretlenmelidir.
- Çalışma alanının üstü bitişik yapılar ya da civardan düşebilecek malzemeler için sundurma ile örtülmeli, kazı alanının etrafı insan, malzeme veya cisim düşmesine karşı az 1 metre yüksekliğinde, 125 kg yüke dayanabilecek korkuluklarla çevrilmelidir (Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, 2013).
- Kazı işine başlanmadan önce çalışma alanında yer altı kabloları, gaz boruları, su, kanalizasyon ve diğer dağıtım sistemlerinin yerleri belirlenmeli ve bunlardan kaynaklanabilecek tehlikeleri asgariye indirmek için gerekli olan tedbirler alınmalıdır.
- Çalışanlar vücut bütünlüğü yönünden bu işe uygun kişilerden seçilmeli, kapalı alan, derinlik ve yükseklik korkusu, yüksek tansiyon, şeker hastaları ve aşırı kilosu olanlar bu tür işlerde çalıştırılmamalıdır.
- Meslek erbabı, deneyimli ve belgeli çalışanlar istihdam edilmelidir.
- Kazı işlerinde kullanılan el aletleri bakımlı ve ergonomik açıdan uygun olmalıdır. El aletlerinin bakımlı ve sağlam malzemeden yapılmış olması gerekmektedir.
- Çalışmalar ehil bir gözetmen tarafından takip edilmelidir.
- Gözetmen kuyu içinde oluşabilecek acil durumlarda ilk müdahale, iletişim, koordinasyon vb. görevleri ve gaz ölçümlerini yapmakla görevlidir.
- Kuyu içinde çalışan işçiler ile gözetmen arasında sesli iletişimi sağlanmalı, sözlü iletişimin sağlanamayacağı yerlerde sinyal ipleri kullanılmalıdır.
- Çalışan tüm işçilerin, gerekli kişisel koruyucu ekipmanları (baret, fosforlu yelek, emniyet ayakkabısı, paraşüt tipi

emniyet kemeri, maske, koruyucu gözlük vs.) kullanımı sağlanmalıdır.

- Kuyu temel çalışmalarında işçilerin çalışma alanına ulaşmaları için destek ve setlerin iniş ve çıkış için kullanılması yasaktır. İniş-çıkış için merdivenler kullanılmalı, paraşüt tipi emniyet kemerlerini mutlaka kullanmalı, kemerler düşey tutucu sisteme (düşey yaşam hattı) bağlı olmalıdır.
- Yağmurlu havalarda kesinlikle kuyu içlerinde çalışma yapılmamalıdır.
- Kuyu içleri, işçilerin rahat çalışabileceği şekilde aydınlatılmalı, açık alevli aydınlatma ve cihazları kullanılmamalı, sigara içilmemelidir.
- Kapalı ortamlarda yürütülecek çalışmalarda öncelikle ortamın atmosferinin kontrol altına alınması gerekmektedir. Gaz ölçümleri sürekli olarak ve özellikle de sabah işe başlarken yapılmalıdır. Zira, kuyu üstünün atmosfere açık olması ve genellikle enerji olarak basınçlı havan kullanılması, atmosferik koşulları kontrol etme açısından sistemin avantajıdır. Yine de risk değerlendirmesinde belirlenen aralıklarla gaz ölçümleri yapılarak, atmosferik uygunluğun sürüp sürmediği kontrol edilmelidir.
- karşı tahkim edilmeli, formasyon özelliklerine göre kasa dikme boyları 1,20 m uzunluğunu geçmemelidir.
- Kuyuda, metal, mekanik veya ahşap iksalar yapılmalı, bağlar arasına uygun sayıda fırçalar yerleştirilerek kamalama yapılmalıdır.
- Tahkimatta bağlantı ağızları (kurt ağzı çinti vb.) oluşturularak bağlantılar sağlam bir şekilde gerçekleştirilmeli, ağaçlar 20 cm çapında, çatlaksız ve budaksız olmalı, çinti derinliği ağaç yarıçapını geçmemelidir.
- Kuyu bölgesinde ekstra yükler bulundurulmamalı, kazıdan çıkan malzeme kazı kenarından en az 2 m uzağa boşaltılmalıdır.
- Kazı yapılan yer göçme ve çökmeye

Şekil 4. Kurt ağzı çinti

- Çalışanların gürültüye maruziyetini azaltmak amacı ile çalışanlara kulak koruyucu temin edilmelidir.
- Kazıdan çıkan toprağın kuyudan çıkarılması amacı ile kullanılan gırgır vinç, caraskal vb. ekipmanların periyodik kontrolleri yapılmalı, her yer değiştirmede ve devamlı kullanırken en az haftada bir kez kontrol edilmelidir.
- Gırgır vinç ile yapılan çalışmalarda emniyet kemeri kullanılmalı, kemer vinç elemanlarının dışında bir yere bağlanmalıdır.
- Kovanın veya malzemenin yukarıya çekilmesi sırasında alt tarafta hiçbir işçi bulunmamalı, kova veya malzeme uzaktan gözlenmeli, içine konacak her türlü malzemenin yüksekliği kova üst düzeyini aşmamalıdır.

- Kancanın kovadan kurtulmaması için, mandal, kilitli mandal veya bağlama gibi uygun tertibat bulunmamalıdır.
- Vincin tespit edildiği kolon ahşap ise, kesiti 20 x 20 santimetreden küçük olmamalı ve kolon, sağa sola yalpa yapmayacak şekilde tespit edilmelidir.
- Vincin elektrik motoru topraklanmış, şalteri otomatik olmalı, vinç kovasının belirli bir yüksekliğe çıkması halinde otomatik şalter devreyi kesmelidir.
- Vinç tambur yuvası çelik telin uzunluğu ile orantılı olarak seçilmiş olmalı, çelik halatın tamburdan dışarı fırlaması önlenmeli, çapı 12 milimetreden az olmamalı, sağlam ve özürsüz tellerden yapılmış olmalıdır.
- Kova kancasına takılacak çelik halatın uç kısmı yüksüklü olarak kancaya takılmalı ve serbest kalan uç kısmı uzun kısma en az 3 adet u klemensi ile uygun şekilde tespit edilmelidir.
- Hareket sırasında alabora olmaması için kova sapı kenarında kilitli mandal kullanılmamalıdır.

Şekil 5. Kazılan pasa gırgır vince bağlı kovalarla yeryüzüne çıkartılarak, yeterli uzaklığa boşaltılmalı

- Kazı çalışmalarında kompresör kullanılması halinde kompresörün periyodik muayenesi yapılmalı, patlamaya dayanıklı bir kafes içine yerleştirilmeli ya da çalışanlardan en az 10 m uzağa konmalıdır.
- Elektrik kaçaklarına karşı kaldırma ekipmanının gövde topraklaması yapılmalıdır.

4.1 Acil Durum Planı ve Tatbikatı

Tipik bir kapalı ortam faaliyeti olan kuyu-temel çalışmalarında risk değerlendirmesi sonucunda olası kaza durumlarını öngörüp, acil durum ve müdahale planlarınızı oluşturmak buna rağmen bir olumsuzluk yaşanması ihtimaline karşı hazırlıklı olmak en önemli durumdur. Zira kısıtlı bir alandan ve farklı kodlardan ve en kısa sürede kazazedeye müdahale etmeniz, bir an önce güvenli bölgeye ulaştırmanız gerekmektedir. Genel olarak acil durumlar için yapılması gerekenler şunlardır:

- Öncelikle bunun için gerekli müdahale malzeme ve ekipmanın sahada hazır bulundurulması, müdahale ekibinin oluşturulması, ekipmanları kullanımı dahil gerekli eğitimlerin verilmesi gerekir.
- İş öncesi tatbikatlar yaparak zamana karşı yürütülen bu mücadelede uygulama alışkanlığı kazandırmak böylece, yaşanacak bir olumsuzluğun etkilerinin en aza indirilmesini sağlanmalıdır.
- Kuyuda çalışanların çalışma süresince paraşüt tipi emniyet kemeri üzerlerinde olmalı, bir an önce ortamı terk etmelerini sağlayacak, kurtarma donanımlarının (dikey yaşam hattı, tripot vs.) sahada her an kullanıma hazır bulundurulmalıdır.

Şekil 6. Tripot ile kuyuya iniş

5 SONUÇ

Son yıllarda özellikle büyük kentlerdeki arsa değerlerinin alabildiğine artması nedeniyle arsaların optimum kullanımı gereği ve eski yapıların yenilenme, güçlendirme ihtiyacı için en ekonomik çözüm olarak ortaya çıkan ve giderek daha yaygın kullanım alanı bulma potansiyeli taşıyan, tipik bir kapalı alan olma özelliğindeki kuyu-temel çalışmalarında, gerek emek-yoğun bir çalışma yöntemi olması ver gerekse imalat yöntemi nedeniyle pek çok tehlikeyi barındırmaktadır. Bu nedenle bu tür çalışmalar kendine has korunma tedbirleriyle yürütülmelidir. Bilinmeyen bir tehlike için önlem almak ta düşünülemez. Bu nedenle bu çalışmada amacımız, özel bir çalışma yöntemi olan kuyu-temel faaliyetlerinde yaşanabilecek tehlikelere karşı alınması gereken önlemleri belirleyip, ülkemizde oldukça sık yaşanan iş kazaları-meslek hastalıklarının azaltılmasını sağlamaya yönelik bir katkı koymak çabasıdır.

6 REFERANSLAR

Health and Safety Executive. 2011. Safe Work in Confined Spaces, United Kingdom, s. 1.

International Association of Classification Societies. 2007.Confined Space SafePractice,Revision2, s.3.

Health and Safety Authority. 2001. Code of Practice for Working in Confined Spaces, Ireland, s. 5.

Occupational Safety and Health Service, 2001. Safe Working in a Confined Space, New Zealand, s. 2.

Government of Alberta Employment and Immigration. 2009. Guideline for Developing a Code of Practice for Confined Space Entry, Publication No. CS001, Canada, p. 3.

Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği. 2013. (05.10.2013), Ek 4 (A) Md.6.

Madencilik ve Tünelcilikte Son Gelişmeler

Recent Developments in Mining and Tunneling

Tünelcilik Eğitiminde Artırılmış ve Sanal Gerçeklik Uygulamaları

Augmented and Virtual Reality Practices in the Tunneling Training

İ.S. Büyüksağiş, M. Gürsoy
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

ÖZET Bu çalışmada; genel olarak tünelcilik ve günümüzde tünel açmada en çok kullanılan yöntemlerden biri olan Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin (NATM) öğrencilere arttırılmış-sanal gerçeklik (AG-SG) ortamında pratik olarak öğretilmesi amaçlanmıştır. Tünelcilik ve NATM'in gerekli aşamalarının işlem algoritması oluşturularak ve kullanıcının tasarım parametrelerini değiştirerek tünel açma yöntemlerini, seçtiği koşullara göre belirlemesini öğrenmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmanın asıl amacı daha uzun sürede verilen temel bilgilerin daha kısa zamanda ve daha detaylıca öğrenciye aktarılabilmesi ve saha da karmaşık durumlarda dahi doğru kararı kısa zamanda verme konumuna getirebilmektir. Eğitim içerisinde sanal gerçeklik gözlüğü takan kullanıcıdan tünel açma yöntemlerinden her hangi birini seçmesi istenir. Kullanıcılar işlem adımlarını sanal ekranda seçerek ilerlemekte ve her bir ayrı işlem adımında dikkat edilmesi gereken parametreleri detaylıca irdeliye bilmektedirler. Diğer taraftan, arttırılmış gerçeklik uygulaması ile her aşamada bir sonraki adımın nasıl görünmesi gerektiği de gösterilerek, yapılacak işlemlerde hata olması önlenebilecektir.

ABSTRACT In this study, it is aimed to practically teach the New Austrian Tunnelling Method (NATM), which is one of the most used methods in tunnelling today and tunnelling in general, via an augmented-virtual reality (AR-VR) environment. It is aimed to learn how to determine the tunnel opening methods according to the condition selected by modifying the design parameters of the user by creating a processing algorithm of the necessary steps of Tunnelling and NATM. The main purpose of this study is to be able to transfer the basic knowledge given in the longer period in classical education to AR-VR aid students in a shorter time and in more detail, and to bring the correct decision to the level of short time even in complex situations. In the training, the user who is wearing the virtual reality glasses is asked to select any of the tunnel opening methods. Users will progress by selecting the action steps on the virtual screen and will examine the parameters to be considered in each one process step in detail. On the other hand, with the augmented reality application, it is possible to avoid mistakes in the operations by showing how each step should look next.

1 GİRİŞ

Arttırılmış-Sanal Gerçeklik kavramları günlük yaşamın bir parçası olmaya başlamış, oyun, eğitim, ticaret, mühendislik, askeri, turizm, spor, tıp, gıda tüketim vb birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır.

Eğitim alanında kullanımları ise hızla yaygınlaşmakta ve oynarken öğren kavramını desteklemektedir. Özellikle birçok ticari alanda ve mühendislik uygulamalarında "Ciddi Oyunlar" olarak isimlendirilerek, yeni iş gücünün eğitiminde tercih edilmeye başlanılmıştır. Mühendislik eğitimi alan öğrencilere, teorik derslerde aldıkları temel konuların, AG-SG (veya İngilizce kısaltmasıyla AR-VR) ortamında daha kısa sürede ve daha ileri seviyede pratik uygulamalarının verilebilmesi yanı sıra, gelişen teknolojilerle birlikte farklı fiziksel laboratuvar donanımlarının sürekli yenilenmesi yerine uygulama yazılımları yoluyla aynı pratik eğitim çok daha ucuza detaylı şekilde verilebilmektedir. Yeni nesiller bilgisayar-tablet ve telefon ekranlarını daha sık kullanmakta, bilgisayar oyunları veya telefon uygulamalarına daha yatkın yetişmektedirler. Onların bu yeteneklerini sanal/arttırılmış gerçeklik uygulamaları yoluyla mühendislik eğitiminde geliştirmek, daha kısa sürede çok farklı koşullarda daha fazla sayıda tekrarlar yaparak tecrübe kazandırmaktadır. Sadece mevcut koşulları öğrenmekle kalmayıp benzer ve farklı durumlarda çözüme ilişkin yeni yaklaşımlar getirmelerini de kolaylaştırmaktadır.

Genel olarak madenciliğin yeraltı ve açık ocak tasarımı, iş makinelerinin kullanımı, tehlikeli çalışma ortamlarında iş güvenliği, birçok alanında AG-SG uygulamalarına dair çalışmaların uzun süredir araştırıldığı görülmektedir (Çizelge 1). Bu çalışmalar öğrencilerin ve halen meslekteki profesyonellerin eğitimi, kazadan sakınma ve kaçma, iş makinesi operatör eğitimi, mekanların görselleştirilmesi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Bu çalışmada ise Tünelcilik eğitiminin arttırılmış-sanal gerçeklik yardımıyla öğretilmesinde temel konulara ilişkin parametreler için algoritmaların oluşturulmasını ve bunun nasıl uygulanacağını açıklamaktadır.

Çizelge 1. Madencilikte AG-SG Uygulamaları Geliştiren Kuruluşlar ve Alanları (Mallet ve Unger, 2007'den düzenlenmiştir.)

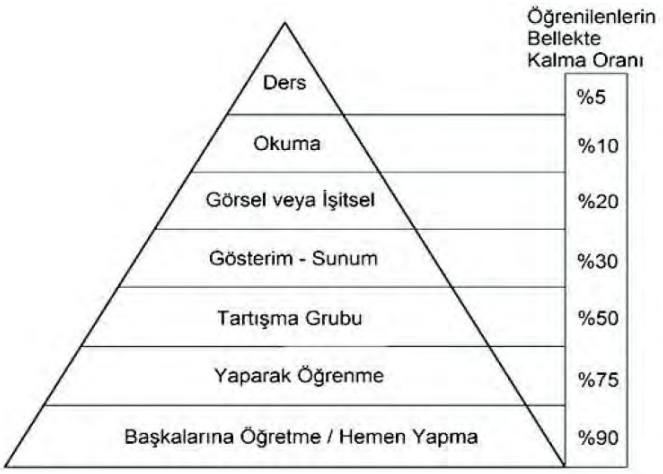
Ülke	Kuruluş	Alan*
Avustralya	CSIRO (Avustralya Ulusal Kamu Bilim ve Araştırma Örgütü)	3,2,4
	New South Wales Uni.	2,3
	Queensland Uni.	1,2,3
	Batı Avustralya Sanayi ve Kaynaklar Birimi	1,3
Almanya	Deutsche Monatan Technologie GmbH	2,3,4
	Deutsche Steinkohle	2,3,4
Güney Afrika	Pretoria Uni.	2,3
İspanya	AITEMIN (Doğal Kaynaklar Araştırma ve Sanayi Geliştirme Birliği)	4,2,3
İngiltere	Uni. Of Nottingham	1,2,3,4
ABD	NIOSH (Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Kurumu)	2,1,3
	PennState Uni.	1,2
	Missouri Science&Technologie Uni.	2,4
	Virginia Polytechnic Uni.	2,3,1
	West Virginia Uni.	N/A
Türkiye	Hacettepe Uni	1,2,
	İstanbul Uni.	2,3
	Afyon Kocatepe Uni	2,1,5
*1)Kaza Araştırmaları 2)Maden İşçisi/Öğrencisi Eğitimi 3)Veri Görselleştirme 4)Ekipman Benzetimleri; 5)Genel		

2 ARTIRILMIŞ VE SANAL GERÇEKLİĞİN EĞİTİM BOYUTU

Sanal Gerçeklik kavramı, insanı gerçek yaşam ortamından alarak bir ekran-gözlük-oda aracılığı ile sanal bir ortama sokarak oradaki ortamla etkileşimi ve ortamı değiştirebilmesine olanak tanımaktadır. Arttırılmış Gerçeklik kavramında ise gerçek ortam ile sanal görüntülerin bir ekran veya gözlük aracılığı ile birleştirilerek kullanıcının bilgilenmesi, yönlendirilmesi ve ortamı kontrol etmesi sağlanabilmektedir. Gerçek ve sanal ortam ile arttırılmış-sanal gerçeklik kavramlarının birleştirilmesinden Birleş(ik)tirilmiş/Karışık Gerçeklik kavramı geliştirilmiştir (Şekil 1).

Şekil 1. Birleşik gerçeklik kavramının bileşenleri (Milgram vd, 1995)

Gelecekte yaygın olarak gerçeklik ve sanallığın bir arada kullanımının yaygınlaşacağı ve insan beyni ile doğrudan etkileşeceği öngörülmektedir. Uygulamalı eğitimin diğer eğitim öğretim yöntemlerine göre daha akılda kalıcı olduğu bilinmekte ve eğitim süreçlerinin bellekte kalma oranları Şekil 2'de gösterilmiştir. Buradan yaparak öğrenme, başkalarına öğretme/hemen yapmanın daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.



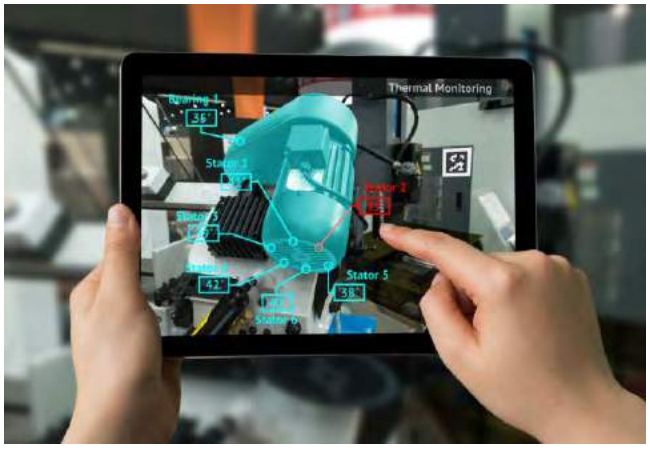
Şekil 2. Öğrenilenlerin bellekte kalma oranları (Kıllıoğlu, 2013)

Sanal Gerçeklikle hazırlanan algoritmalar ile öğrenme uygulamalarına dair temalar Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre konuların gerçekçi yaşantı içinde kalıcı, eğlenceli, kolay öğrenilir olduğu ve sanal ortamda algı farklılığının oluştuğu görülmektedir.

Eğitimde AG uygulamaları üzerine yapılan bazı çalışmalarda, bireyler üzerinde motivasyon artırıcı bir etki oluşturacağı (Wojciechowski ve Cellary, 2013, Guiterrez ve Fernandez 2014, Zhang vd. 2015, Çakır vd. 2015), AG uygulamaları ile eğitim alan grupların derslerinde daha başarılı oldukları (Redondoa vd. 2013, Ibanez vd. 2014, Sommerauer ve Müller 2014; Chiang vd. 2014, Gutierrez vd. 2015), AG uygulamaları ile eğitim alan öğrencilerin görsel becerilerinde anlamlı derecede bir artış görüldüğü bildirilmektedir (Gavish vd., 2015, Demir vd., 2017). Şekil 4'te sanal gerçekliğin eğitimde kullanımı ve Şekil 5'te artırılmış gerçekliğin eğitimde kullanımı ile ilgili görseller verilmiştir.

Şekil. 3 Sanal gerçeklikle öğrenme temaları (Demir vd, 2017)

Şekil 4. Sanal gerçekliğin eğitimde kullanımı



Şekil 5. Arttırılmış gerçekliğin eğitimde kullanımı

3 AG-SG ORTAMINDA TÜNELCİLİK-NATM EĞİTİMİ

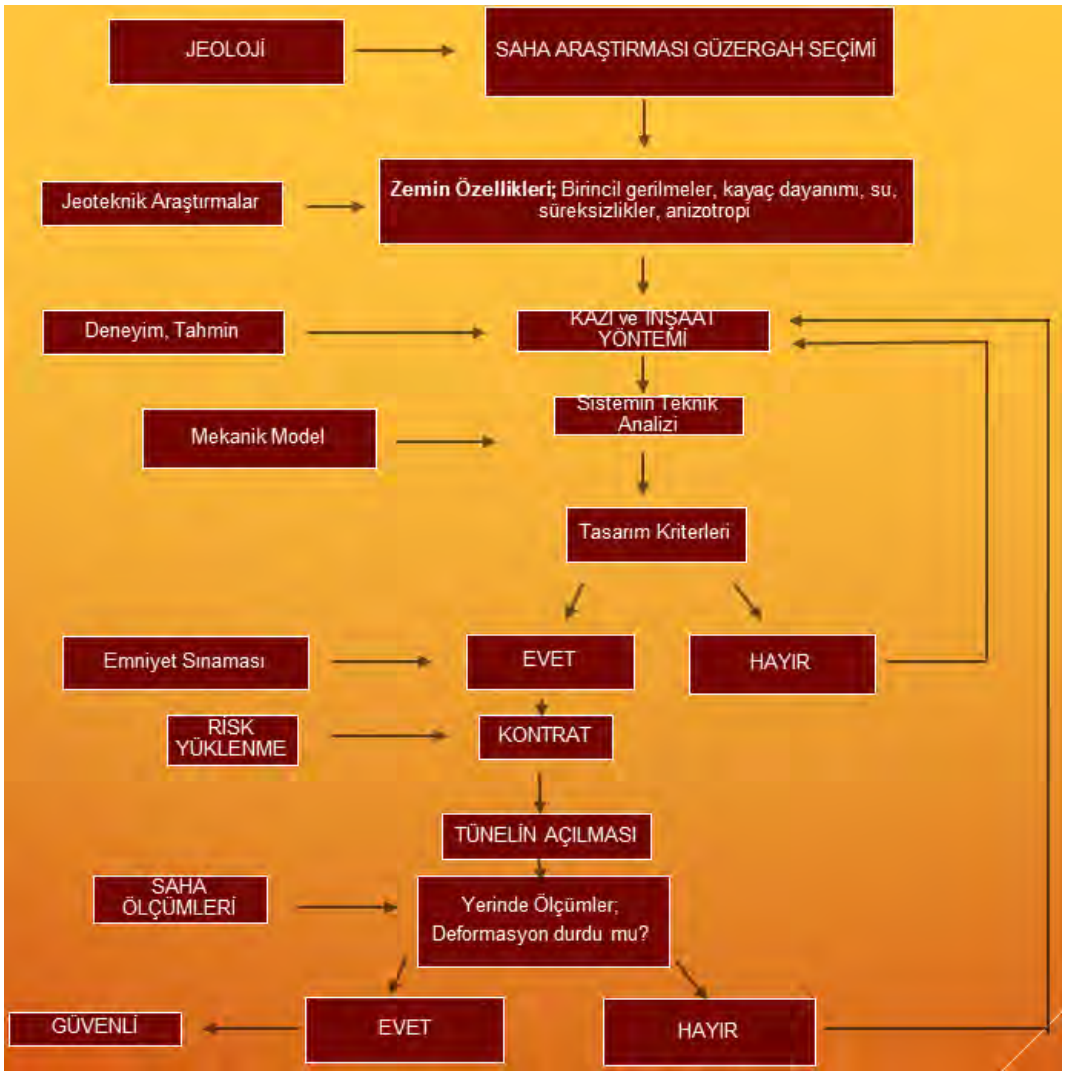
Tüneller insanlığın kentleşme, sanayileşme, modernleşmesinde önemli yere sahip olup ulaşım, akışkan nakli, madenlerin üretimi, depolama vb alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Yeraltında açılan tünel gibi yapıların kazısı ve uzun süreli ayakta kalması ana problemleri oluşturmaktadır. Tünelcilik oldukça tecrübe gerektiren, detaylı ve akılcıl planlamalar sonunda büyük yatırımlarla hayata geçirilen projelerdir. Yetkin ve tecrübeli eleman bulmak madenciliğin her alanında olduğu gibi tünelcilikte de her zaman sorun olmaktadır. Özellikle yeraltını tüm boyutları ile görmeyen veya çalışma koşullarına hakim olmayan yeni iş gücü (öğrenci/çalışan) ister teorik isterse iş başı eğitimi de alsalar, sadece temel ve dar alandaki konuları öğrenebilmekte, bazen konuları tüm boyutları ile kavrayamamakta, farklı koşullarda çözüm için nasıl bir yaklaşım getireceklerini bilememektedirler. Bu sorunların çözümü ise AG-SG ortamında eğitim verilmesi ile daha kısa zamanda kolayca aşılabileceği öngörülmektedir. Zira sanal ortamda yeni iş gücüne güven içinde yeraltında bulunuyormuş gibi hissettirerek, etrafı detayları ile görmeleri, ortamın jeolojisi, kayaç özellikleri, su geliri durumu gibi detay bilgileri tünel kesiti boyunca görebilmeleri, kullanılan iş makinelerinin çalışmaları ve detaylı bileşenleri ile kullanımları ve tamirlerini öğrenmeleri, mevcut iş kazası riski olan noktaları ile bunlardan sakınma ve kaçma yöntemlerinin eğitimi sağlanabilir.

Bu çalışmada, genel olarak temel tünelcilik bilgileri ile özellikle son yıllarda tam cephe galeri açma makinelerinin kullanılamadığı veya tam mekanize kazının tercih edilmediği yerlerde sıklıkla uygulanılan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)'nin, AG-SG yöntemi ile yeni iş gücüne daha basit ve kısa zamanda nasıl verilebileceğine ilişkin algoritmalar oluşturularak görselleştirilmeye hazır hale getirilmiştir. Bu çalışmanın sonrasında görsel sahneler hazırlanarak algoritmaya göre döngüler çalıştırılacak ve AG-SG ortam donanımları ile etkileşimli hale getirilecektir.

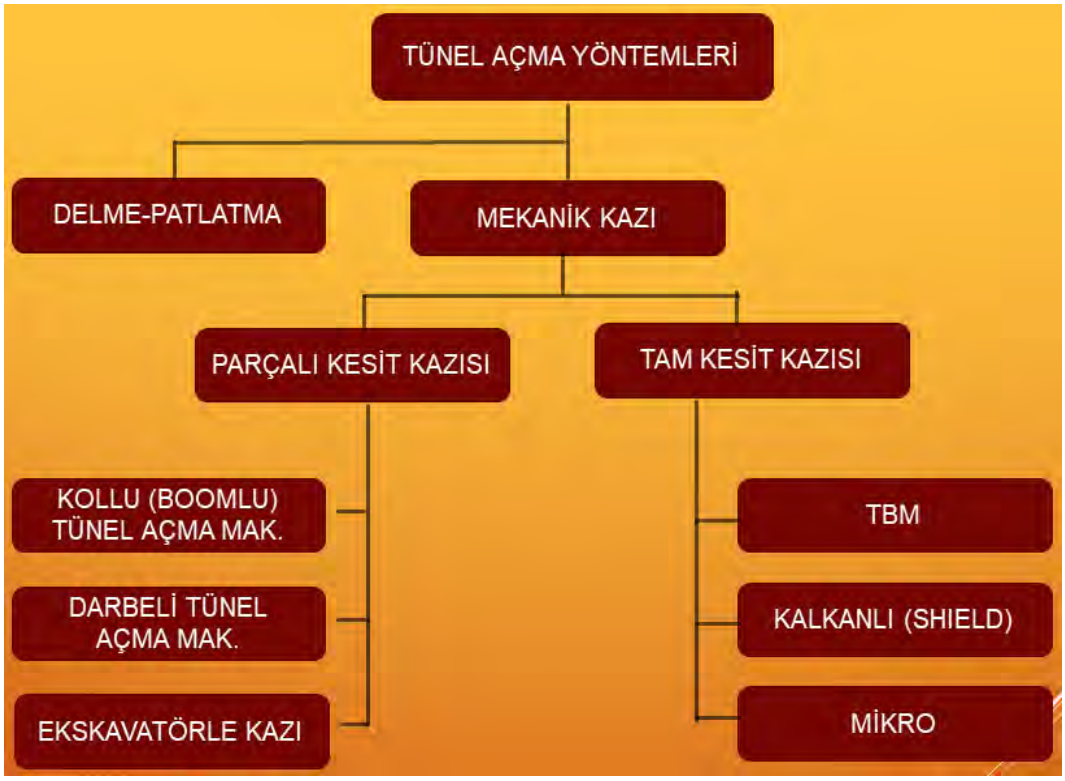
3.1 Genel Tünelcilik Bilgilerinin Tanıtımı

Tünel açma işleminde başlangıçtan bitime kadar yapılması gereken işlemler aşağıdaki gibi özetlenebilir ve buna ilişkin algoritma Şekil 6'da verilmiştir (Bell 1994; Köse vd, 2012).

1. Saha çalışmaları ile bölge jeolojisi belirlenmeli, buna bağlı olarak da tünel güzergahı, derinliği ve konumu tespit edilmelidir.
2. Zemin etütleri ve kaya mekaniği etütleri ile zemin özellikleri, kayaç dayanımı, süreksizlikler, faylar, su durumu belirlenmelidir.
3. Deneyime ve hesaplamaya dayalı olarak, kazı kesiti, kazı yöntemi, kullanılacak makine, zemin susuzlandırma ve tahkimat elementleri tespit edilmelidir.
4. Yapısal bir model hazırlanmalı.Kazı işinin her aşaması, ön veya nihai tünel kaplaması için farklı zemin koşullarında farklı modeller hazırlanmalıdır.
5. Gerilme deformasyonlara bağlı olarak sistem güvenliği kontrol edilmelidir.
6. Bazı durumlarda sadece tecrübe yeterli olabilmektedir.
7. Risk yüklenme
8. İn-situ ölçümler, tünel açımına başlandıktan hemen sonra başlamalıdır. Deformasyon zamana bağlı olarak artmıyorsa sistem emniyetlidir.
9. Tünel Açma Yöntemleri incelendiğinde kazılan kayacın dayanım ve sertliğine bağlı olarak Mekanik kazı veya Delme Patlatma yöntemi kullanılmakta olup Şekil 7'de uygulanan yöntemler verilmiştir.



Şekil 6. Tünel açılması sırasında yapılacak işler (Bell, 1994)



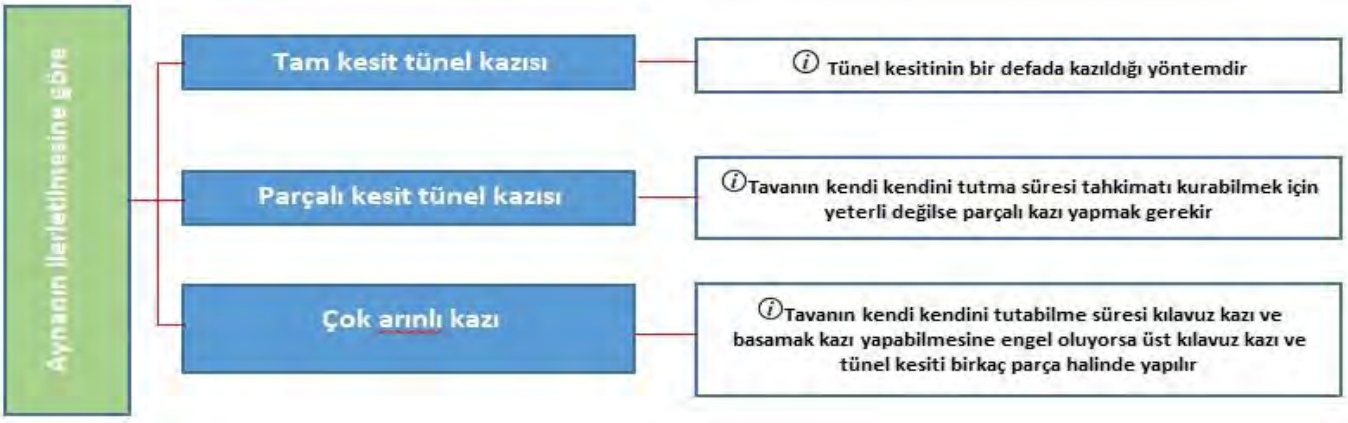
Şekil 7. Tünel açma yöntemleri

Başlıca tünel açma yöntemleri kazının yapılış şekline ve aynanın ilerletilmesine göre iki başlık altında incelenebilir, bunlar Şekil 8 ve 9'da verilmiştir (Köse vd, 2012).

Tünel açma yöntemini seçerken göz önünde bulundurulması gereken faktörler Şekil 10'da verilmiştir.

Tünel açma yöntemleri genel olarak parçalı ve tam kesit yöntemleri olarak ikiye ayrılır. Bunlara ait sınıflandırmalar ve bunların özellikleri Şekil 11'de ve 12'de verilmiştir (Köse vd, 2012).

Şekil 8. Kazının yapılış şekline göre kazı çeşitleri ve özellikleri



Şekil 9. Aynanın ilerletilmesine göre kazı çeşitleri ve özellikleri

Şekil 10. Tünel açma yöntemini seçerken göz önüne alınması gereken faktörler

Şekil 11. Parçalı kesit tünel açma yöntemleri ve özellikleri

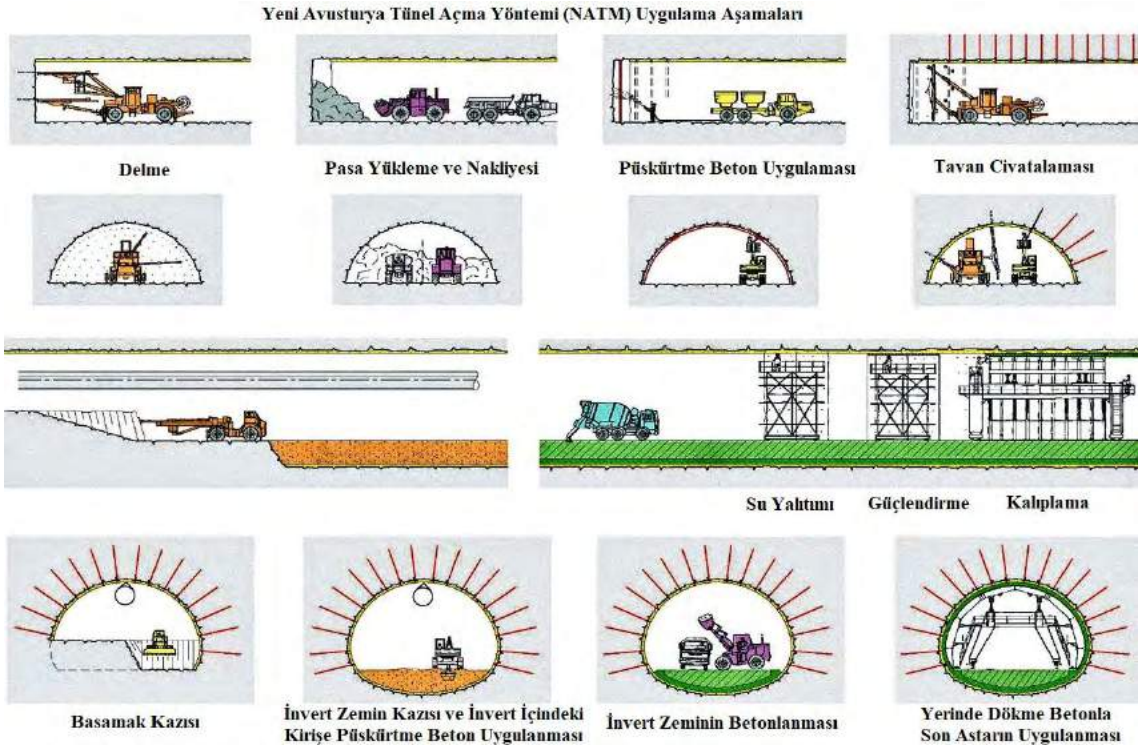
Şekil 12. Tam kesit tünel açma yöntemleri ve özellikleri

3.2 NATM Tanıtımı

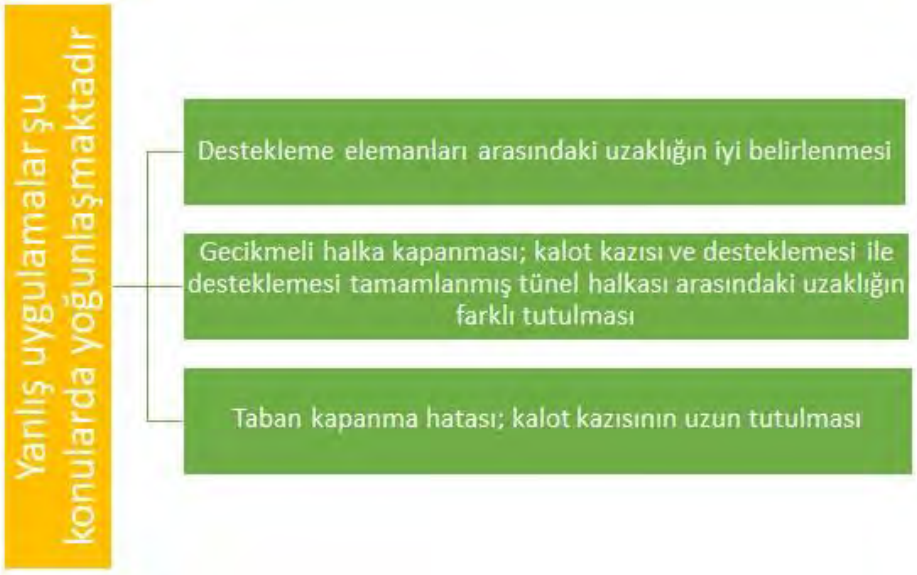
Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) tünelin, içinde açıldığı kaya ortamına kendi kendini taşıtma ilkesine dayanır. Yöntemin prensibi, en uygun kazı ve sağlamlaştırma yöntemleri kullanılarak kazı sonrası oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların, kaya yapısının stabilesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlamlığını olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturulmasıdır. Yöntemde kayacın yük taşıma kapasitesi kullanılır hale getirilerek kayaç yük oluşturulan ortamdan yük taşıyıcı ortama dönüştürülür.

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) genel olarak parçalı kesit yöntemi ile açılmakta (Şekil 13) ve kazı ve uygulama aşamaları Şekil 14'te verilmiştir. Ayrıca, yanlış uygulama konuları Şekil 15'te, NATM yönteminin özellikleri de Şekil 16'da görülmektedir.

Şekil 13. NATM kazısı genel görünüşü



Şekil 14. NATM uygulama aşamaları (Ilf Inc. Cons'den uyarlanmıştır)

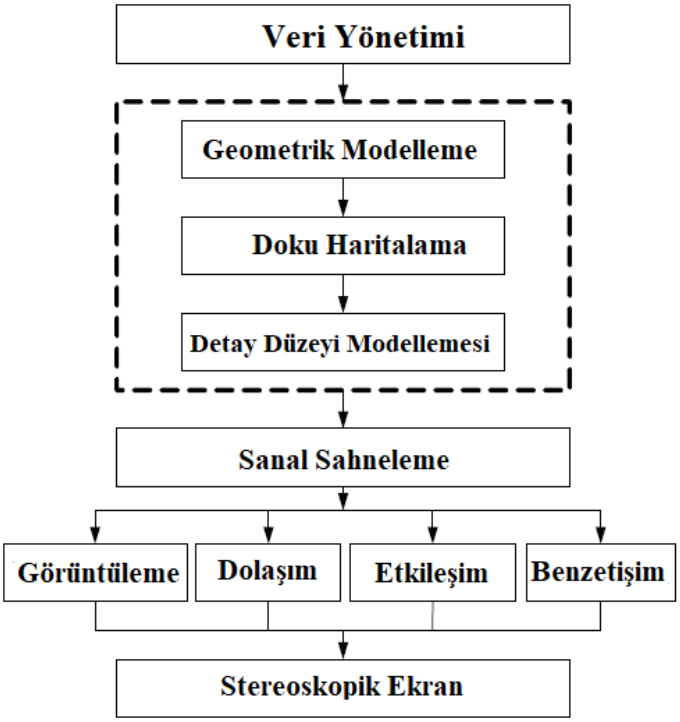


Şekil 15. NATM'de yanlış uygulama konuları

Şekil 16. NATM yönteminin özellikleri

4 SG SİSTEM GELİŞTİRME SÜRECİ

Yeraltında tünelcilik projesi SG simülasyon sisteminin geliştirme süreci Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17. SG Simülasyon sistemlerinin geliştirilmesi süreci (Zhou ve Guo, 2011)

4.1 Veri Yönetimi

Tüm sanal sahne için hazırlanan veri yönetimi, SG simülasyon sisteminin temelidir. Arazi, tünel ve madencilik ekipmanlarını modellemek için birçok veri, arazi verileri, jeolojik veriler, ve tünel verileri, ekipman verileri hazırlanmaktadır. Kontur haritaları, geliştirme sistemi planları, ekipman yapı diyagramları vb. dahil olmak üzere CAD tasarımı gelmektedir. Dijital kamera ve yüksek çözünürlüklü uydu tarafından alınan görüntü verileri ve dokuyu, benimsenen 3 boyutlu geometrik model üzerinde haritalamak için kullanılır. Arazi fotoğrafları, kayalar ve madencilik ekipmanları resimlerinden oluşan doku, resim işleme yazılımı ile düzeltilmeli ve .JPEG ve .RGBA formatlarına dönüştürülmelidir. Sanal tünel sahnesinin daha inandırıcı olabilmesi için, tünel sahası stereo ses ve madencilik ekipmanları gibi ses verilerini sanal tünel sahnesine eklemek gerekir. Sesler kayıt ekipmanı ile kaydedilir ve profesyonel yazılımlarla kırpılır. Öznitelik verileri, geliştirme projesinin adı ve coğrafi

koordinatlarını, madencilik ekipmanının yerini, tünel kesiti büyüklüğünü ve şeklini içerir (Zhou and Guo, 2011).

4.2 Sahne Modelleme

Sahne modellemesi, SG simülasyon sistemi için çeşitli modeller oluşturmak için kullanılır. Tüm sistemin kurulmasındaki temel adımdır ve SG simülasyon sisteminin başarısını kontrol etmektir.

Tünelcilik sahne modellemesinin özellikleri üç açıdan takip edilmektedir:

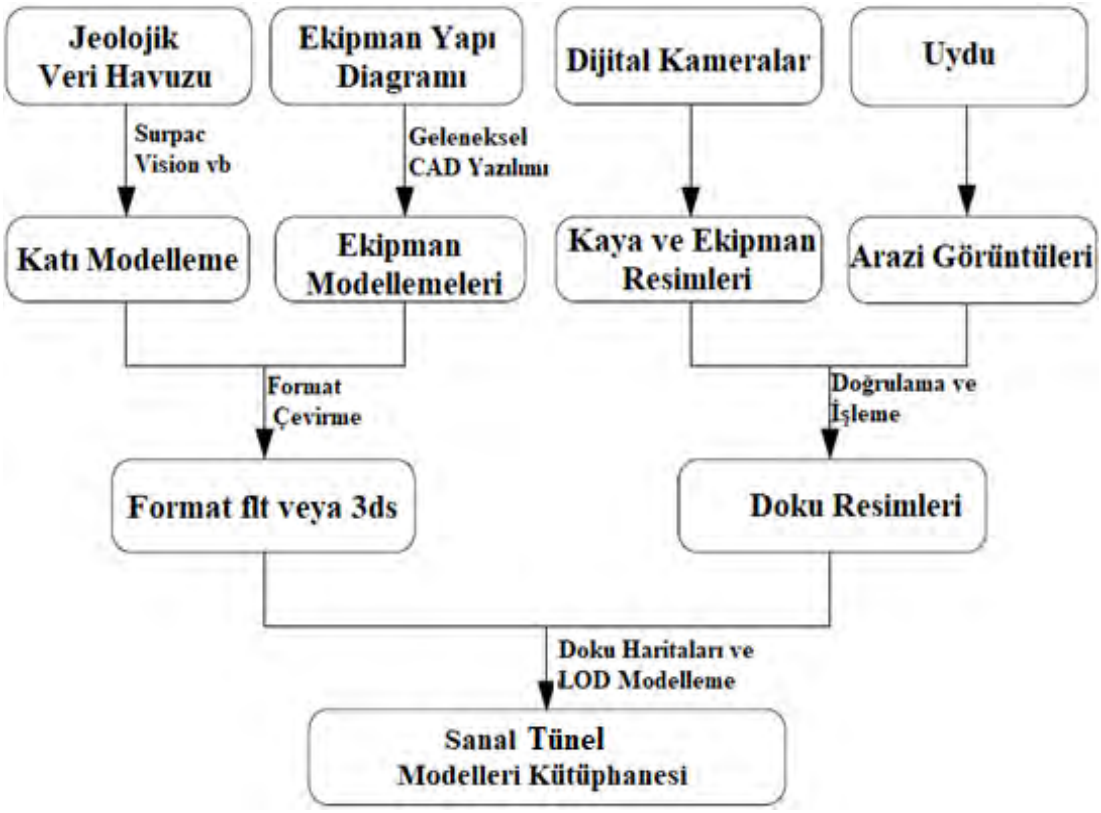
(a) Tünelcilik sahnesine ait modellerin şekilleri ve çeşitleri farklı ve zengindir ve çoğu düzensizdir. Dolayısıyla, birçok karmaşık ve tamamen farklı modellerin inşa edilmesi gerekmektedir.

(b) Sanal tünel sahnesinin nesneleri iki kategoriye ayrılır: statik nesneler ve dinamik nesneler. Tünelcilik projesi SG simülasyon sisteminde, arazi modelleri, tünel modelleri vb vardır, bu düzensiz modeller statik nesnelere aittir. Ana dinamik nesneler, loko -LHD ve jumbo modelleri gibi madencilik ekipmanları vb modelleridir.

(c) Arazi modeli ve tünel modelleri çok büyüktür. Dolayısıyla, projenin ve görsel duyunun gerekliliklerini yerine getirme öncülüğünde, SG sisteminde modellerin görüntü hızını artırmak için modellerin düzgün bir şekilde sadeleştirilmesi gerekmektedir. Sahne modelleme süreci geometrik modelleme, doku haritalama ve LOD (Detayların Seviyesi) modellerinin üç adımını içerir. SG simülasyon sisteminin modelleme süreci Şekil 18'de gösterilmiştir (Zhou and Guo, 2011).

4.2.1 Geometrik Modelleme

Piyasada, geometrik modelleme gereksinimleri için birçok ticari yazılım mevcuttur. Tünelcilik proje yazılımları (Surpac Vision, DataMine, Mircomine, 3DMine ve DiMine gibi) modelleme alanında jeolojik veri tabanına dayalı güçlü modelleme araçları ve modülleri sağlar. Surpac Vision yazılımında DTM arazi modeli doğrudan doğruya oluşturularak, tünel modelleri oluşturulmaktadır.



Şekil 18. SG Simülasyon sistemi modelleme süreci

Geleneksel CAD yazılımı (AutoCAD, 3DMax ve Maya gibi) kullanımı kolay, sezgisel, öğrenmesi kolay, modelleri gerçekçi kılan özelliklere sahiptir. Bu nedenle, sofistike ve gerçekçi olması gereken madencilik ekipmanı modelleri üretmek için kullanılır. Son olarak, tüm modeller, profesyonel sanal gerçeklik yazılımında (Multigen Creator gibi) doku haritalama ve LOD modelleri üretimi için .3ds veya .flt veya .x veri formatına dönüştürülmelidir. Unutulmamalıdır ki format, modeller arasındaki dönüşümü en aza indirgemek ve böylece modelin ciddi bir distorsiyona (modelleme eklemlerin birbirinden ayrılabilmesi) sahip olması gereklidir. Çizelge 2, ortak SG yazılımını ve platformunu ve destekledikleri veri formatını listeler (Zhou and Guo, 2011).

Çizelge 2. Genel SG yazılımı ve platformu ve destekledikleri veri formatı (Zhou and Guo, 2011)

Tür	İsim	Veri Formatı	
		Giriş Veri Formatı	Çıkış Veri Formatı
Büyük Madencilik Program Yazılımları	Surpac	.dwg, .dxf, .dtm, .dm	dwg, .dxf, .dm, .dtm, .wrl
	3DMine	.dwg, .dxf, .dtm, .dm, 3dm, .shp	.dwg, .dxf, .dm, 3dm, .stl
Geleneksel CAD Yazılımları	AutoCAD	.dwg, .dxf	.dwg, .dxf
	3DMax	.3ds, .dwg, .dxf, .obj, .stl , .shp, .wrl	.3ds, .dwg, .dxf, .obj, .stl., .wrl
Profesyonel SG Yazılımları	MultiGen Creator	.3ds, .dxf, .obj, .stl	.flt, .dxf, .obj, .stl, .wrl
3D Model Dönüşüm Yazılımı	Deep Exploration	.3ds, .obj, .geo, .flt, .x, .stl, .wrl, .ma, .mb, .dwg, .dxf	
SG Sistemi	InTouch	.dwg, .dxf, .dtm, .dm, .x, .shp	
	CyberMaker	.3ds, .obj, .geo, .flt, .osg, .ive	
SG Geliştirme Platformu	OSG	.3ds, .obj, .geo, .dae, .shp, .flt, .osg, .ive	

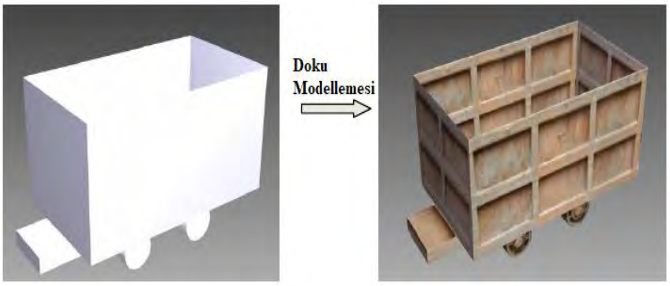
4.2.2 Doku Haritalaması

Doku eşleme, 2D görüntü bitmap'lerinin piksel değerini, 3B katı modellerin karşılık gelen zirvesine eşleyen bir teknolojidir. Gerçekçi modelleri geliştirmek ve katı modellerin karmaşıklığını azaltmak için kullanılır. Bu sistemde üç çeşit doku haritalama teknolojisi kullanılmaktadır bunlar (Zhou and Guo, 2011);

1. Projeksiyon doku haritalaması: Modellerin yüzey dokusu koordinatlarını elde etmek için üç boyutlu geometrik model üzerine doğrudan doku görüntüsü yansıtılır, madencilik ekipmanları modelleri bu teknoloji kullanılarak haritalanır, tramvay modellerinin doku haritalaması Şekil 19'da gösterilmiştir (Zhou and Guo, 2011).

2. Şeffaf doku haritalaması: Doku teknolojisi ve entegrasyon teknolojisi ile elde edilir. Bu teknolojinin avantajı, hızın hızlı olması ve düzlemde gözlemlediğinizde görsel efektlerin iyi olmasıdır. Dezavantajı, bülten

panosu alanının etrafındaki hızlı rotasyonda, yüzeyin sırayla görülebilmesi ve görsel efektlerin yüksek irtifadan kötü görünmesidir. Bülten tahtası teknolojisi sayesinde, dolaşım sistemi kullanıcılara bitki verilerini etkileşimli olarak eklemelerine olanak tanır. Bu düşünceye dayanarak ana zamanda rakamı arttırabilir, aynı zamanda bu şekil resimlerinin şeffaf hava teknolojisi tarafından ele alındığı ve bitki dokusu görüntüleriyle değiştirildiği de olabilir (Zhou and Guo, 2011).



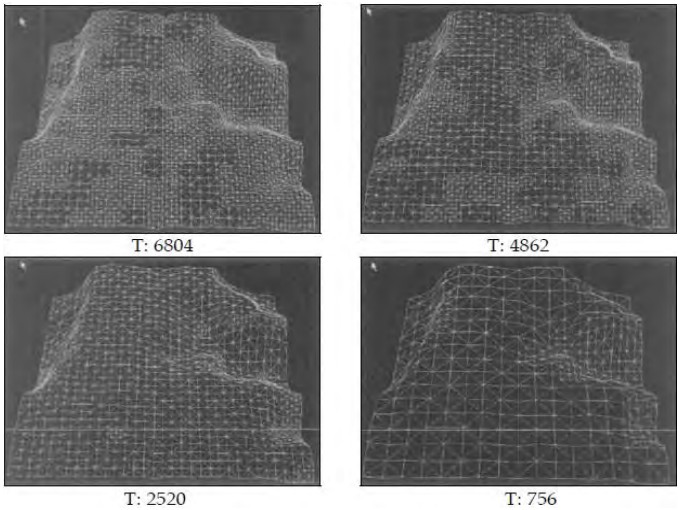
Şekil 19. Vagon modellemesi (Zhou and Guo, 2011)

3. Opak tek taraflı doku haritalama: Basit ve kullanışlı, gökyüzü topu ve arazi esas olarak dokuları haritalamak için bu yöntem kullanılır.

4. Doku yapıştırma: doku, küçük bir parça temsili ve yeniden birleştirme ünitesi olan bir temel eleman ekleme ünitesi ile sürekli ve tekrar tekrar eklenir. Kuyu modelleri, tünel modelleri ve rampa modelleri bu şekilde alınmıştır (Zhou and Guo, 2011).

4.2.3 LOD modeli

LOD (detay seviyesi) teknolojisi, sadece sanal görüntünün görsel etkisini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sahnenin çerçeve oluşturma hızını artırır ve sahnenin karmaşıklığını gerçek zamanlı olarak değiştirebilir. Bakış açısı nesnelere yaklaştığında, nesne modelleri basitten karmaşığa değişir. Ana zamanda, ayrıntı düzeyindeki mutasyonu azaltmak için yumuşatma teknolojisini de katmak önemlidir. Tünelcilik projesi sanal gerçeklik simülasyon sistemi geliştirmede LOD modeli üretmek için iki ana yöntem vardır ve bir tanesi benzer geometrik modelleri sürekli olarak yaklaştırmakta, diğeri ise doku çözünürlüğünü azaltmaktadır. Tünelcilik ekipmanı modelleri ve arazi modeli (Şekil 20'de gösterildiği gibi) ilk yönteme alınmış, ikinci yöntemde, kuyu ve tünel modelleri kullanılmıştır (Zhou ve Guo, 2011).



Şekil 20. LOD arazi modeli ("T" üçgenin sayısı) (Zhou ve Guo, 2011)

4.3 Sanal Sahne

Sanal sahne, tüm sanal gerçeklik simülasyon sisteminin çekirdeğidir ve sistemdeki tüm görsel nesnelerin toplanmasıdır. Sanal gerçeklik teknolojisinin desteğiyle, sahne görselleştirme ve etkileşimi, derin daldırma ve yüksek etkileşime sahip sanal tünel sahnesini oluşturmak için kullanılır. Sanal tünel kesinlikle karmaşık bir sistemdir, bu nedenle sanal gerçeklik simülasyon sistemi, nesne tabanlı programlama metodu ile OSG ve VS 2008 platformunda geliştirilir (Zhou ve Guo, 2011).

4.3.1 Görselleştirme

Görselleştirme, derin dalmalara sahip bir sanal tünel ortamı oluşturulmasından sorumludur. Işık, materyaller, geometri değişiklikleri, şeffaf ekran ve bakış açısı eki gibi fonksiyonları gerçekleştirmek için kullanılır. Sanal sahne, ışık ve materyalleri doğru bir şekilde ayarlamalıdır.

Geometri değişimi çevirme, döndürme, ölçekleme ve diğer geometrik işlemleri içerir. Şeffaf ekran, kullanıcılara aynı anda birçok nesneyi gözlemleme yolu sunabilir. Örneğin, tüneller yarı saydam ise, bir yandan tünellerin var olduğunu gösterirken, öte yandan madencilik ekipmanlarının nakliye planlamasını da temsil edebilmektedir. Bakış açısı eki ise kullanıcılar tünellerde gezindiğinde, kullanıcıların gerçek madende araba kullanma hissine sahip olmasını sağlayabilir (Şekil 21) (Zhou ve Guo, 2011).

Şekil 21. Tünelde dolaşma (Zhou ve Guo, 2011)

4.3.2 Sahne dolaşımı

Sahne dolaşımı, kullanıcıların sanal tünel sahnesinde serbestçe gözlemlenmesine izin verebilir. Gezinme, üç boyutlu animasyon üretmek için sürekli olarak bakış açılarını hareket ettirme veya görüş hattı yönünü değiştirme işlemidir. Sanal gerçeklik simülasyonunda iki tür dolaşım yolu vardır (Zhou ve Guo, 2011).

1. Elle (manuel) dolaşım: Bakış açısının yeri ve yönü, fare ve klavye kullanılarak kontrol edilir.

2. Otomatik dolaşım: Otomatik dolaşım, kullanıcılar için sanal tünel sahnesini görüntülemek üzere sabit bir dolaşım yolu sağlar. Yol, yol bilgisinin enterpolasyona uğradığı bir notepad dosyasına kaydedilir ve ardından yol izlenir. Her şeyden önce, ilk bakış açısı, dönme açısı ve görme çizgisinin Z ekseni etrafındaki yükseklik ve benzeri kaydedilmesi önemlidir. Daha sonra, her bir sürekli klavye çalıştırma komutu, dolaşım komut dizisi olarak tüm manüel dolaşım sürecinin yorumlanması amacıyla "hareket tipi, başlangıç pozisyonu, artan hareket, süre ve hareket ivme" formatıyla kaydedilir; Üçüncü olarak, notepad dosyalarından başlangıç parametreleri okunur ve sistem bu parametreler kullanarak ayarlanır. Sonunda, manüel dolaşım operasyonu komut dizisini okunur ve işlem için ilgili komut işleme fonksiyonları aranır (Zhou ve Guo, 2011).

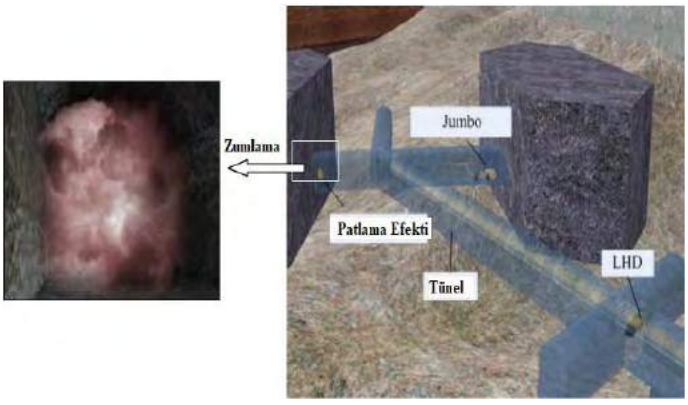
4.3.3 Etkileşim operasyonu

Sistemde, etkileşim operasyonu esas olarak madencilik ekipmanlarının programlanması için fare kullanılarak kontrol edilir. Madencilik ekipmanları modelleri yönetim modülünde, araç sağ-fare menüsünden seçilebilir ve süspansiyon, açma ve geri çalıştırma ile etkileşime girebilir. Aynı zamanda, araba nesneleri sanal maden sahnesine eklenebilir. Ayrıca, kullanıcı dostu bir insan-makine arayüzü geliştirmek önemlidir. Sistem, sistem kontrol programı arayüzüne ve tünel sanal gerçeklik simülasyon programı arayüzüne ayrılmıştır. Sistem kontrol programı arayüzü, tek kanallı ve çok kanallı mod ve paralaks, pencere boyutu, render düğümleri ve üç boyutlu mod parametreleri ayarlamak için kullanılır. Tünel sanal gerçeklik simülasyon programı arayüzü, menü ve panelden oluşmaktadır. Menü simülasyonu, dolaşım yönetimi, görünüm ve yardım menüsü; Simülasyon programının ana çalışma fonksiyonuna sahip olan panel, model yönetimi, bakış açısı yönetimi ve emniyet yönetimini içermektedir (Zhou ve Guo, 2011).

4.3.4 Simülasyon

Tünelcilik projesi simülasyonu sadece statik bir sahne simülasyonu değil, aynı zamanda yeniden üretim için dinamik bir tünelcilik çalışma ortamıdır. Delme-patlatma ile

tünelcilikte dört adım vardır: delik delme, patlatma ve havalandırma, pasa yükleme ve nakliye, tahkimat ilerletme. Bu nedenle tünelcilik proje simülasyonu esas olarak delici jumbo, kaya patlatma simülasyonu, pasa yükleme işlemi, delme simülasyonu dahil loko ve vagonlar, LHD'nin pasa çıkarma, tünel yüzeyine püskürtme beton uygulaması simülasyonu bulunmalıdır. Tünelcilik sürecini simüle etmenin iki yolu vardır, biri manuel simülasyon, diğeri otomatik gösteridir. Kullanıcılar, manuel sahneleme yolu ile sanal sahnede delme ve pasa çıkarma işlemini kontrol etmek için madencilik makinelerini kullanabilirler. Otomatik gösteri, sistem saatini ayarlamak için OSG'nin çift tampon teknolojisini kullanır, daha sonra animasyonu tüm tünelcilik sürecini oluşturmak için zamana göre birlikte sipariş eder. Ayrıca, çarpışma tespit sistemi sınırlama kutusunun seviyesine dayanır ve patlatma simülasyonu OSG platformunun osgParticle isim alanına dayanır. Tünelcilik prosesi simülasyonunun sonucu Şekil 22'de gösterilmiş olup, patlama uygulama prosedürleri aşağıdaki gibidir (Zhou ve Guo, 2011).



Şekil 22. Tünelcilik süreci simülasyonu (Zhou ve Guo, 2011)

4.4 Stereoskopik Ekran

Stereoskopik ekran stereoskopik görsel performans ve stereoskopik ses performansına bölünür. Stereoskopik görsel performans, profesyonel DLP projektör gibi sanal gerçeklik ekipmanları kullanılarak, sol göz ve sağ göz için ayrı ayrı iki görünüm sahnesi sağlayabilir, sol göz ve sağ göz video görüntülerini sırasıyla üç boyutlu çizim yaparak, sol göz ve sağ göz kullanıcıların beyinlerinde son olarak gözlük ve üç boyutlu manzara oluşturur. Stereoskopik ses performansı, stereo ses ve video görüntüsünü eşzamanlı olarak üç boyutlu ses cihazı ile gönderebilir. Bu VR simülasyon sisteminde, OSG platformunda OpenAL API kullanılarak stereoskopik ses elde edilmiştir. Her şeyden önce, bir tampon oluşturulur. İkinci olarak, WAV verileri yüklenir. "CreateBufferAndLoadWav" üye işlevi, bir arabellek oluşturmak ve WAV verilerini yüklemek için "COpenALBuffer" örnek üye işlevini çağırır. "CreateSource" üye işlevinde, kaynak oluşturulur ve "COpenALSource" örnek üye işlevi çağrılarak arabellek alanı ilişkilendirilir.

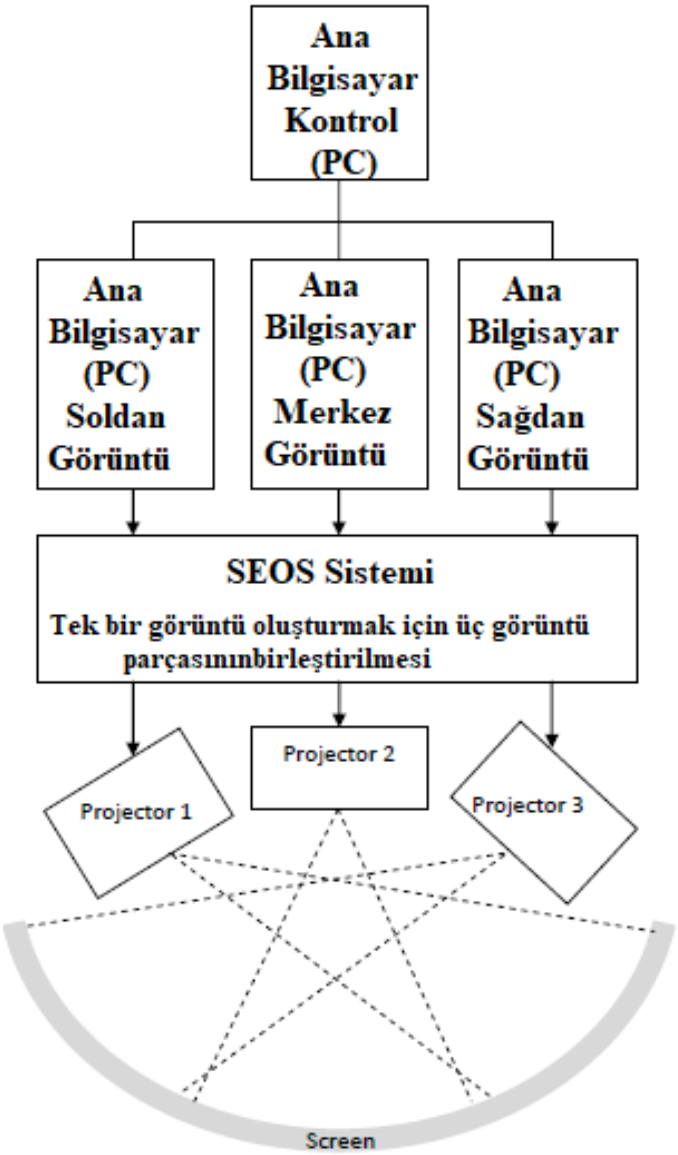
Stereoskopik görsel performans ve stereoskopik ses performansının bir araya getirilmesi, sanal tünel sahnesi için çok önemli derin bilgileri destekler ve böylece doğruluğunu, gerçekliğini ve daldırmasını geliştirir. 3D Stereoskopik ekran modulü Şekil 23'te gösterilmektedir (Zhou and Guo, 2011).

3D VR tünel modeli Şekil 24'te, VR Tünel yer değiştirme vektörü ve jeolojisi de Şekil 25'te görülmektedir (Chmelina, 2010).

5 SONUÇLAR

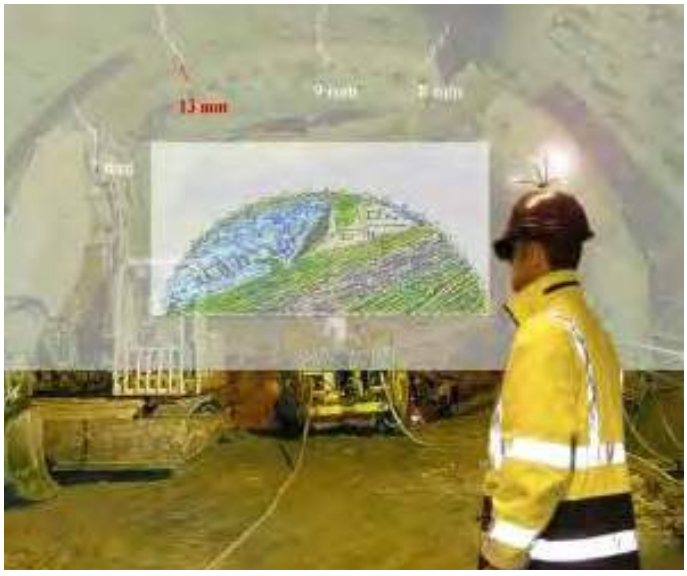
Bu çalışmada AG-SG uygulamaları yardımıyla tünelcilik eğitiminde önemli noktaların öğrencilere daha kolay aktarılmasına çalışılmıştır. Bu amaçla genel tünelcilik ve NATM yönteminin dikkate alınması gereken konuları tanımlanarak, bunlar için oluşturulan algoritmalar yardımıyla AG-SG görsellerine dönüştürülmeye hazır hale getirilmiştir.

Ayrıca, tünelcilik eğitimi için gerekli sistem geliştirme süreçleri de adımlar halinde verilerek, hem donanımsal hem de yazılım aşamaları anlatılmıştır.



Şekil 23. 3D stereoskopik ekran modeli

Şekil 24. 3D VR Tünel modeli (Chmelina, 2010)



Şekil 25. VR tünel yer değiştirme vektörü ve jeolojisi (Chmelina, 2010)

Yakın gelecekte hem eğitim kurumlarında hem de sektördeki firmalar yeni iş gücü eğitimlerinde AG-SG uygulamalarından daha fazla yararlanacaklar, daha kısa zamanda daha detaylı bilgi ve uygulama tecrübesine sahip, farklı koşullarda daha kolay çözüm getiren yetkin personeller yetiştirilecektir. Ayrıca, özellikle yeraltında olası potansiyel iş kaza riskleri daha erken öngörülerek iş kazaları engellenebilecek ve kazadan sakınma-kaçma için kullanılabilecektir.

AG-SG için yapılacak görece daha az bir yatırımla aynı anda birden fazla kişi veya grubun eğitilmesi mümkün görülmektedir. Ayrıca, eğitim sırasında tecrübesiz kişilerin çevresine ve kendisine zarar vermesi de önlenecek, daha düşük bakım onarım masrafları oluşturacağı da ön görülmektedir. Yapay zekanın bu alanda geliştirilmesi ile insanın yeraltında fiziken bulunması yerine, otonom araçların çalıştığı ortamları AG-SG teknolojileri yardımıyla kontrol ve kumanda edecek daha verimli ve güvenli çalışma koşulları elde edilebilecek gözükmektedir. Bu çalışma özellikle ülkemiz madencilik ve tünelcilik alanında bu konuya dikkat çekilerek şimdiden yatırımların başlanmasına işaret etmek amaçlı da hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

Chmelina, K. 2010. A Virtual Reality Visualiation System for Undergorund Construction, Technology Innovation in Underground Construction,498 page, Taylor&Francis, UK

Chiang,T.-H.C., Yang, S.J.H., Hwang, G.J. 2014. An augmented reality-based mobile learning system to improve students' learning achievements and motivations in natural science inquiryactivities.*EducationalTechnology&Society,17*(4),352–365.

Çakır, R., Solak, E., Tan, S.S. 2015. Artırılmış Gerçeklik teknolojisi ile İngilizce kelime öğretiminin öğrenci performansına etkisi. *Gazi Eğitim Bilimleri Dergisi,1*(1),45-58.

Demir, D., Cevahir, H., Özdemir, M. 2017. Sanal Gerçeklik Teknolojisi İle Hazırlanmış Bir Algoritma Öğrenme Uygulamasının Kullanılabilirliğine Yönelik Öğrenci Görüşleri., 5th International Instructional Technologies & Teacher Education Symposium, S 35-45, Izmir.

Gavish, N., Gutiérrez, T., Webel, S., Rodríguez, J., Peveri, M., Bockholt, U., Tecchia, F. 2015. Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. Interactive Learning Environments, 23(6), 778-798.

Gutierrez, J.M., Dominguez, M.G., Gonzalez, C.R. 2015. Using 3D Virtual Technologies to trainspatial skills in engineering. *International Journal of Engineering Education*,*31*(1),323-334.

Ibanez, M.B., DiSerio, A., Villaran, D., DelgadoKloos, C. 2014. Experimenting with electro magnetismusing augmented reality: Impact on flow student experience and educational effectiveness. *Computers & Education*, 71,1-13.

Ilf Inc., Consultation, İnternet kaynağı http://www.dot.ca.gov/dist4/dslide/images/devils%20slide_3updated.pdf

Kıllıoğlu, S.Y. 2013. Sanal Gerçekliğin Türkiye Madencilik Endüstrisinde Kullanılabilirliği, Hacettepe Üni. FBE Yüksek Lisans Tezi, 71 syf, Ankara.

Mallet, L., Unger, R. 2007. Virtual Reality in Mine Training, SME Annual Meeting and Exhibit, February 25-28, Denver, Colorado.

Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., Kishino, F. 1995. Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum, Telemanipulator and Telepresence Technologies; Proceedings, Volume 2351.

Redondo, E., Fonseca, D., Sanchez, A., Navarro, I. 2013. New strategies using hand held augmented reality and mobile learning-teaching methodologies,in Architecture and Building Engineering Degrees.*Procedia Computer Science, 25*,52-61.

Sommerauer, P., Müller, O. 2014. Augmented reality in informal learning environments: A field experiment in a mathematics exhibition. *Computers & Education, 79*, 59-68.

Sung Y.T., Chang K.E., Liu, T.C. 2015. The Effects of Integrating Mobile Devices with Teaching and Learning on Students' Learning Performance: A Meta-Analysis and Research Synthesis, Computers & Education.

Zhou, K., Guo, M. 2011. Virtual Reality Simulation System for Underground Mining Project, Virtual Reality Book, Intech Open, 627-644, Doi:10.5772/12903.

Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde Jeoteknik Modelleme, Değerlendirme ve Üretim Pano Tasarımı

Geotechnical Modelling, Assessment and Stope Design in Tüprag Efemcukuru Gold Mine

M. Berber, İ. İleri
Tüprag Metal Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş., İzmir

ÖZET Yeraltı madenciliğinde üretimin güvenli ve verimli yöntemler ile sağlanması için jeoteknik değerlendirmeler dikkate alınmalıdır. Üretim yöntemlerinin belirlenmesi, üretim sıralamalarının yapılması, hazırlık galerinin maden ömrü boyunca takibi ve risklerin değerlendirilmesi gibi konular jeoteknik değerlendirmelerle sağlanmaktadır. Jeoteknik yöntemlerin tümüne bağlı yapılacak yorumlar, güvenli çalışma adına sağlıklı kararlar vermeyi sağlar.

Efemçukuru yeraltı altın madeninde uygulanan tüm jeoteknik çalışmalar veri toplama, planlama, uygulama, gözlem ve değerlendirme çalışmaları olarak sıralanabilir. Planlama sürecinde temeli sondajlar oluşturmaktadır. Sondaj verileri yeraltı planlamasında kılavuz görevi görmektedir. Planlama surecinde Jeoteknik yorumun hassasiyeti sondaj sıklığı ile orantılıdır. Az sondaj veya seyrek sondaj aralıkları üretim yönteminin belirlenmesi için yeterli veri sağlamamaktadır. Sondaj sıklığı arttıkça litoloji değişimleri, üretim metodu, üretim pano uzunlukları, stabil üretim kesitleri, planlı kirlenme, kaya kalitesine bağlı tahkimat tasarım değişiklikleri gibi konular hakkında yorum yapmak ve doğru sonuçlara ulaşmak mümkündür. Yeraltı çalışmaları ile yapılan değerlendirmelerin doğruluğu takip edilir. Çalışmalar sırasında gerekli jeoteknik müdahaleler yapılır.

ABSTRACT In underground mining, geotechnical evaluations should be taken into account in order to ensure production is sourced from safe and efficient mining methods. Geotechnical assessments are required for mining method and production sequence selection, ground support design, monitoring of mine development during mine life and assessment of risks for stability of mine openings. he geotechnical studies applied at Efemcukuru underground gold mine includes data collection, planning, implementation, observation and evaluation. It forms foundation drilling in the planning process. The geotechnical data gathered from geotechnical drilling and resource drilling serves as a guide in underground mine planning and design. The precision of geotechnical interpretation and analysis in planning process is initially proportional to the frequency of drilling and geotechnical data collection. Insufficient drilling or wide drilling intervals do not provide sufficient data to determine the mine production method and stope designs. As the drilling frequency increases, it is possible to make geotechnical assessment for lithology changes, production method, production panel lengths, stable development and stoping spans, estimates for planned dilution, and design changes due to rock quality. The validity of geotechnical design is monitored by field observations and back analysis of field monitoring using geotechnical instrumentation.

1 TÜPRAG EFEMÇUKURU ALTIN MADENİNDE JEOTEKNİK ÇALIŞMALAR

1.1 Planlama

Planlamada ilk değerlendirme, üretim methodu ve üretim için hazırlık ilerlemeleridir. Değerlendirme cevher geometrisine, ekonomik analizlere ve jeoteknik verilere bağlı olarak yapılmaktadır. Bu doğrultuda ekonomik olan üretim alanlarının detay jeoteknik değerlendirmesi yapılmalıdır. Uzun dönem ve kısa dönem planlamada üretim sıralamasının jeoteknik veriler ile yönlendirilmesi verimli ve emniyetli üretim yapabilmek için önemlidir.

Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde kes-doldur (drift and fill), katlarası uzun delgi üretim (Long Hole) ve kör uzun delgi üretim (Blind Hole – Up Hole / Down Hole) yöntemleri uygun görülmüştür ve uygulanmaktadır.

Kes doldur üretim yöntemi, atım başına 3.5 – 4m olacak şekilde, planlanan kesit doğrultusunda cevherin üretilmesi ve üretilen panonun doldurulması şeklindedir.

Katlararası delgi üretim yöntemi, üst üste kes doldur yöntemi ile üretilen panolar arasında kalan cevher diliminin uzun delgiler ile patlatılarak üretilmesidir.

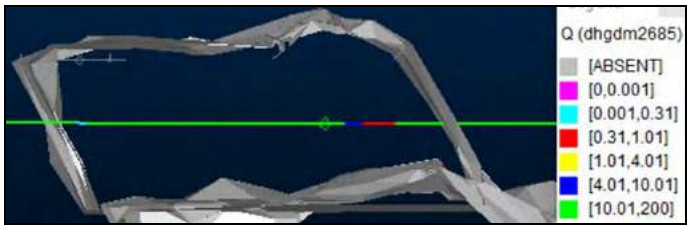
Kör delgi üretim yöntemi, kes doldur yöntemi ile üretilmiş bir panonun altında veya üstünde planlanan cevher diliminin uzun delgiler ile patlatılarak üretilmesidir.

Üretim yöntemlerinin belirlenmesinde ve üretim alanının kendi içerisinde detay değerlendirmesinde cevher geometrisi ve sondaj verileri kullanılmaktadır. Sondaj verilerinin sıklığı üretim çalışmalarını detaylandırmayı sağlar.

Sondaj verileri üzerinden yapılan işlemler, loglama, kaya birimlerinin fiziksel analizleri, modelleme, tahkimat ve üretim pano tasarımı, katlararası delgi üretim tasarımı ve kirlenme miktarının öngörülmesidir. Sondaj verilerinden yapılan jeoteknik loglamalar diğer işlemlerin temelini oluşturmaktadır. Sondajda görülen numuneler ile yeraltında görülen görselin zihinde eşleştirilebilmesi, pano tasarımında karşılaşılabilecek zorlukları öngörmede bizi bir adım öteye taşıyabilir.

a)

b)



Şekil 1. (a) Ayna yüzeyi ve (b) log değerleri

Madenimizde kaya birimlerinde loglama ve fiziksel analizlerinin yapılması üzerine oluşturulan tahkimat standartları, yeraltı çalışmaları ile desteklenerek geliştirildi. Gelişim sürecinde tüm jeoteknik uygulamalar ve materyaller için standartlar ve talimatlar oluşturulmuştur. Standartların oluşturulması dışında, kısa ve uzun dönem planlama çalışmalarına jeoteknik değerlendirmeler doğrudan etki etmektedir. Değerlendirmeler, jeoteknik loglar, loglar üzerinden oluşturulan model, jeoteknik yazılım ve yöntemler ile yapılmaktadır.

1.1.1 Loglama

Sondaj numuneleri üzerinde jeolojik ve jeoteknik değişimler baz alınarak, seçilen kaya sınıflama sistemine göre değerlendirme yapılmasıdır. Çalışma amacına ulaşmak için uygun kaya sınıflama sisteminin belirlenmesi önemlidir. Karot numuneleri üzerinde jeolojik ve litolojik değişimlerden ayrılan alanlar için ayrı ayrı, seçilen kaya sınıflama sistemi parametreleri değerlendirilir. Böylece, her bir alanın kendine has jeoteknik değeri ortaya çıkar. Her bir sondaj kendi içinde değerlendirilirken hepsi arasında korelasyon sağlanır.

Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde, araştırma sondajlarında RMR ve Q sistem kullanılmıştır. İki sistem arasında madenimize özel bağıntı kurulmuştur. Detay çalışmalar için yapılan yeraltı sondajlarında ise Q sistem ile loglama çalışmaları sürdürülmektedir.

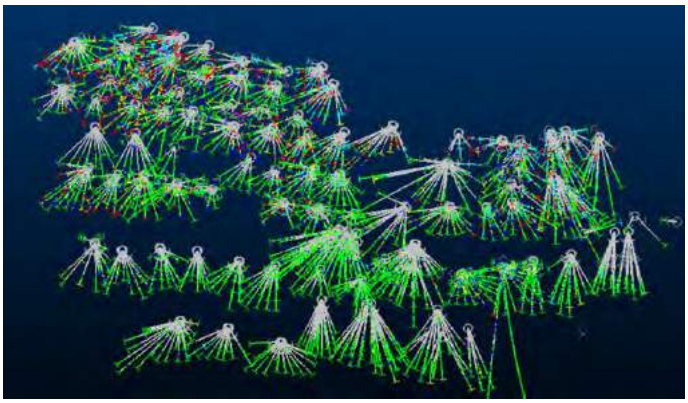
Yeraltı kazılarına ait çok sayıda tarihsel durumun değerlendirilmesine dayanarak, Norveç Jeoteknik Ensititüsü'nden Barton, 1974 yılında yaptığı çalışmasında kaya kütle karakteristikleri ve tünel destek gereklilikleri için Tünel Kalite Endeksi'ni (Q) önermiştir. Endeks, Q'nun rakamsal değeri logaritmik ölçekte 0.001'den maksimum 1000'e kadar değişkenlik gösterir. Loglamada her bir alan için kaya kütle ve süreksizlik özelliklerine ait parametreler saptanır ve aşağıdaki formülde yerine konarak Q değeri bulunur.

Q = (RQD/Jn) * (Jr/Ja) * (Jw/SRF)

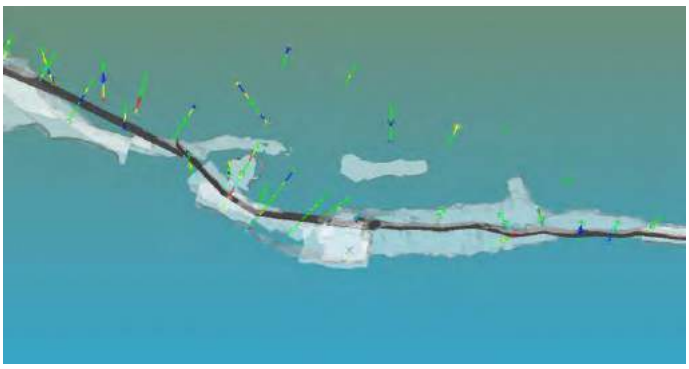
- RQD Kaya Kalite Tayini (karot uzunluğu >100mm)/(mesafe uzunluğu)
- Jn Süreksizlik seti sayısı
- Jr Yüzey pürüzlülük değeri
- Ja Süreksizlik alterasyon değeri
- Jw Süreksizlik su indirgeme faktörü
- SRF Stres indirgeme faktörü

Loglamada, sondaj içerisinde jeolojik ve jeoteknik değişimlerde ayrımlar yapılarak jeoteknik alanlar oluşturulmaktadır. Her alan için litolojik tanımlamalar yapılmaktadır. Bu tanımlamalar ve Q parametreleri üzerinden yapılan filtrelemeler ile yeraltında karşılaşılacak zayıf zonlar tanımlanmaktadır. Q sistem ile yapılan loglar bilgisayar ortamında değerlendirme için doğrudan kullanılabilir. Tek tek cevher üzerindeki jeoteknik durum incelendiği gibi birbirleri ile eşleştirilerek zayıf Q alanlarından fay çizimi ve tanımı yapılabilir.

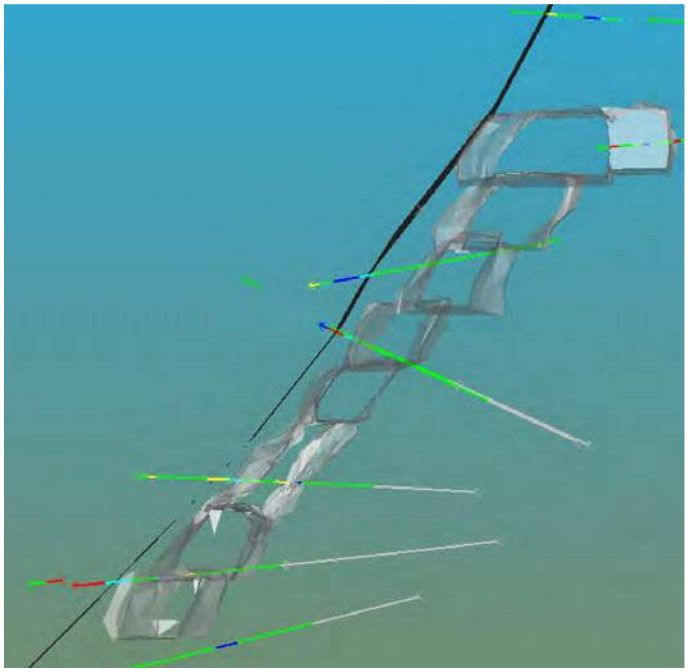
Tüm bu uygulamalar, planlanan tasarım üzerinde iyileştirmeler yapabilmeyi sağlar. Cevhere göre çizilecek tasarıma olası fazla açılmalar eklenerek planlı kirlenmeye dahil edilebilir. Pano geometrisi de loglar üzerinden çizilebilir. Katlararası delgi üretim yöntemi belirlemesinde loglar kullanılır. Katlararası delgi üretimine karar verildiği takdir de tavan taşı ve taban taşında log değerleri (Q' değeri) kullanılır. Q değerinin belirlenmesinde Q içerisinde bulunan Jw ve SRF değerleri kullanılmaz.



Şekil 2. Loglanmış yeraltı sondajları



Şekil 3. Loglar üzerinden fay çizimi plan görünümü



Şekil 3. Loglar üzerinden fay çizimi kesit görünümü

Madenimizde Q sistem üzerinden yapılan çalışmalarda tahkimat standartları tanımlanmıştır. Mathew's Stability Graph kullanılarak üretim metodu belirleme ve değerlendirmesi yapılabilmektedir. Ayrıca, Q üzerinden elde edilen maksimum pano genişliği formülü ile bir grafik oluşturuldu. Bu grafik ile Q üzerinden stabil pano genişlikleri tanımlanabilmektedir.

Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde yapılan loglamalar ve yeraltı çalışmalarına göre Q değerleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Q < 0.3 : Aşırı Zayıf Kaya / Fay zonları, aşırı altere zonlar
0.3 < Q <1 : Çok Zayıf Kaya / Çok sık süreksizlik içeren altere alanlar
1 < Q < 4 : Zayıf Kaya / Sık Süreksizlik içeren küçük ve çok bloklu alanlar
4 < Q < 10 : Orta Kaya / Süreksizlik kontrollü bloklu alterasyon içermeyen alanlar
10 < Q : İyi Kaya / Süreksizlik çeşidi az ve seyrek, masif alanlar

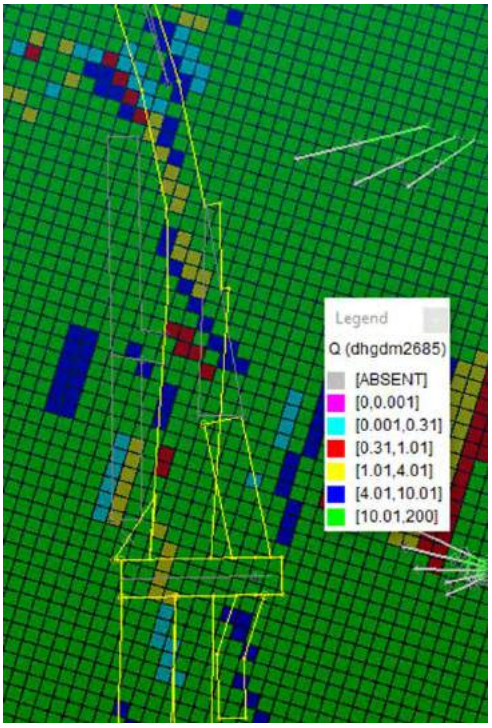
1.1.2 Modelleme

Loglama verilerinin bilgisayar ortamına aktarılması sonrasında üretim ve üretim etki alanı içerisinde Q loglarına göre yapılan blok modellemedir. Oluşturulan Q blok modelde blok boyutları, kayaç içeresindeki sağlam ve zayıf zonların arasındaki geçişleri ve tasarım boyutları dikkate alınmıştır. Efemçukuru kayaç yapısında sağlam ve zayıf kaya kalitesi arasında keskin geçişler olmaktadır. Zayıflıkların kalınlıkları da göz önünde bulundurulduğunda maksimum 2m x 2m lik bloklar yaratılmıştır. Blok model üretim planları üzerine yerleştirilir ve üretim içindeki kaya tipi ve yan kaya tipi hakkında fikir sunmamıza yardımcı olmaktadır. Kör delgi ve katlararası delgi üretim yapılacak bölgelerde değerlendirmelere dahil edilir. Kes doldur üretim yönteminde de tasarım boyunca karşılaşılacak kalite hakkında bilgi edinmemizi sağlar.

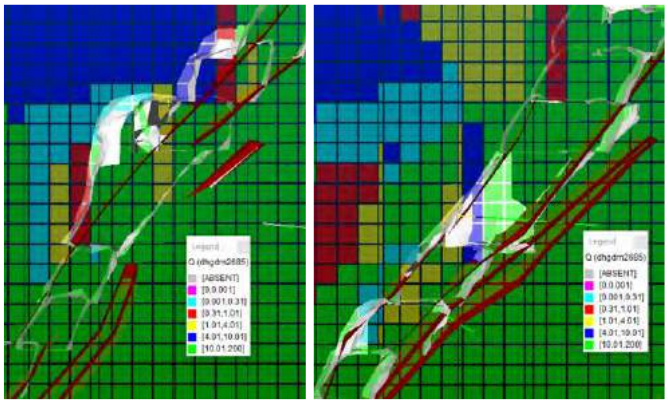
Çalışma sonrasında blok model ve gerçekleşen durum karşılaştırılabilir. Bunun üzerine bir takım yorumlar ile çalışmalarda iyileştirmeler yapmak mümkündür. Katlararası delgi ve kör delgi yöntemi ile üretim yapılmış yerlerde benzer koşullarda tavan taşının yenik düşmesi ve ayakta kalması arasındaki farklar değerlendirilebilir.

1.1.3 Jeoteknik yazılım ve yöntemler

Jeoteknik değerlendirmelerde en sağlıklı yaklaşımı yapabilmek önemlidir. Tüm yazılım ve yöntemler üzerinden değerlendirmeler yapılmalıdır. Genellikle, üretimi tamamlanmış yerlerin altında yapılacak üretimler, kör delgi üretim ve katlararası üretim yöntemlerinde eldeki yazılım ve yöntemler kullanılmaktadır.



Şekil 4. Pano tasarımı plan görünümü üzerinde jeoteknik blok model



Şekil 5. Benzer 2 koşulda katlararası delgi üretiminde duraylı ve duraysız durumlar

Kes doldur üretim yöntemi üzerinden maksimum pano açıklığı grafiği kullanılabilir. Bu grafik, maksimum tahkimatsız kazı açıklığı formülü baz alınarak oluşturulmuştur.

$$Wmax = 2(ESR) * Q^{0,4}$$

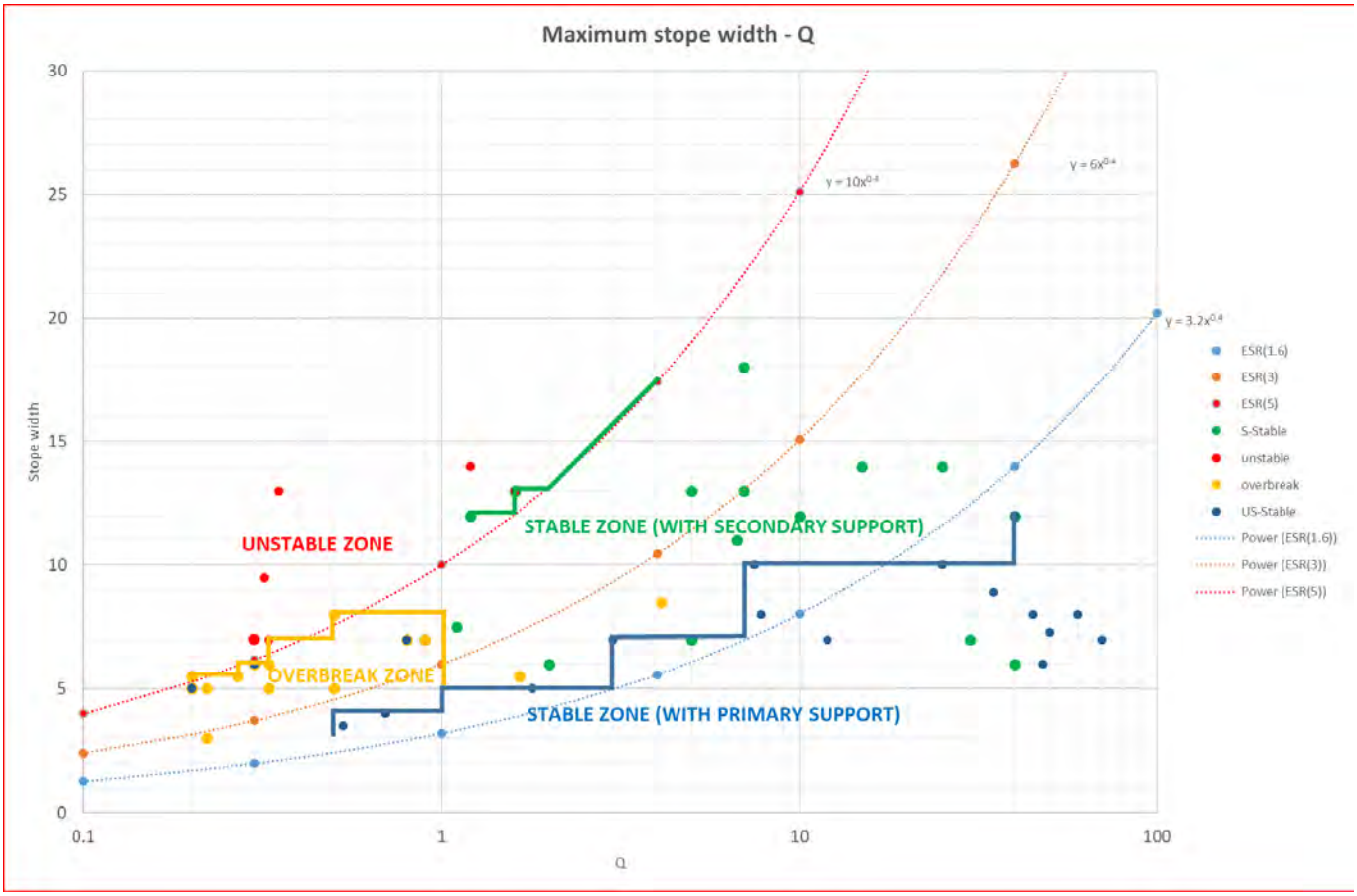
ESR değeri 1.6, 3 ve 5 alınmıştır. Kazı amacı olarak geçici kazı açıklıkları için 3 – 5 değerleri, kalıcı kazı açıklığı için 1.6 değeri kullanıldığı bilinmektedir. Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde baz aldığımız Q sınır değerlerini formülde kullanarak grafik üzerinde logaritmik çizgiler elde edilmiştir. Yapılmış olan kazı çalışmalarının genişlikleri ve mevcut durumlarına göre sınıflandırmalar yapıldı. Q değerine göre kazı genişlikleri yorumlanmaktadır.
Grafik üzerinde birincil tahkimat (sadece split set kullanımı olan panolar) ve ikincil tahkimat (çelik halat tipi saplama kullanımı olan panolar) ile yapılan maksimum açıklıklar, stabilitesi üzerinden Q değerlerine göre tanımlanmıştır. Tanımlamaları referans alarak pano genişlikleri tasarlanabilir. Bu grafik maden özelinde mevcut tahkimat tipi ve gerçekleşen durumlar yansıtılarak elde edilmiştir.

Katlararası üretim ve kör delgi üretim yöntemlerinde kazı ebatları belirlemek için Mathew's Stability Graph kullanılır. Loglar üzerinden elde edilen Q' değerleri kullanılarak grafikten kazı duvarları için ayrı ayrı stabilite değerlendirmesi yapılır. Q' dışında A, B ve C faktörler kazı duvarları için belirlenir. Bu parametreler kullanılarak N' değeri,

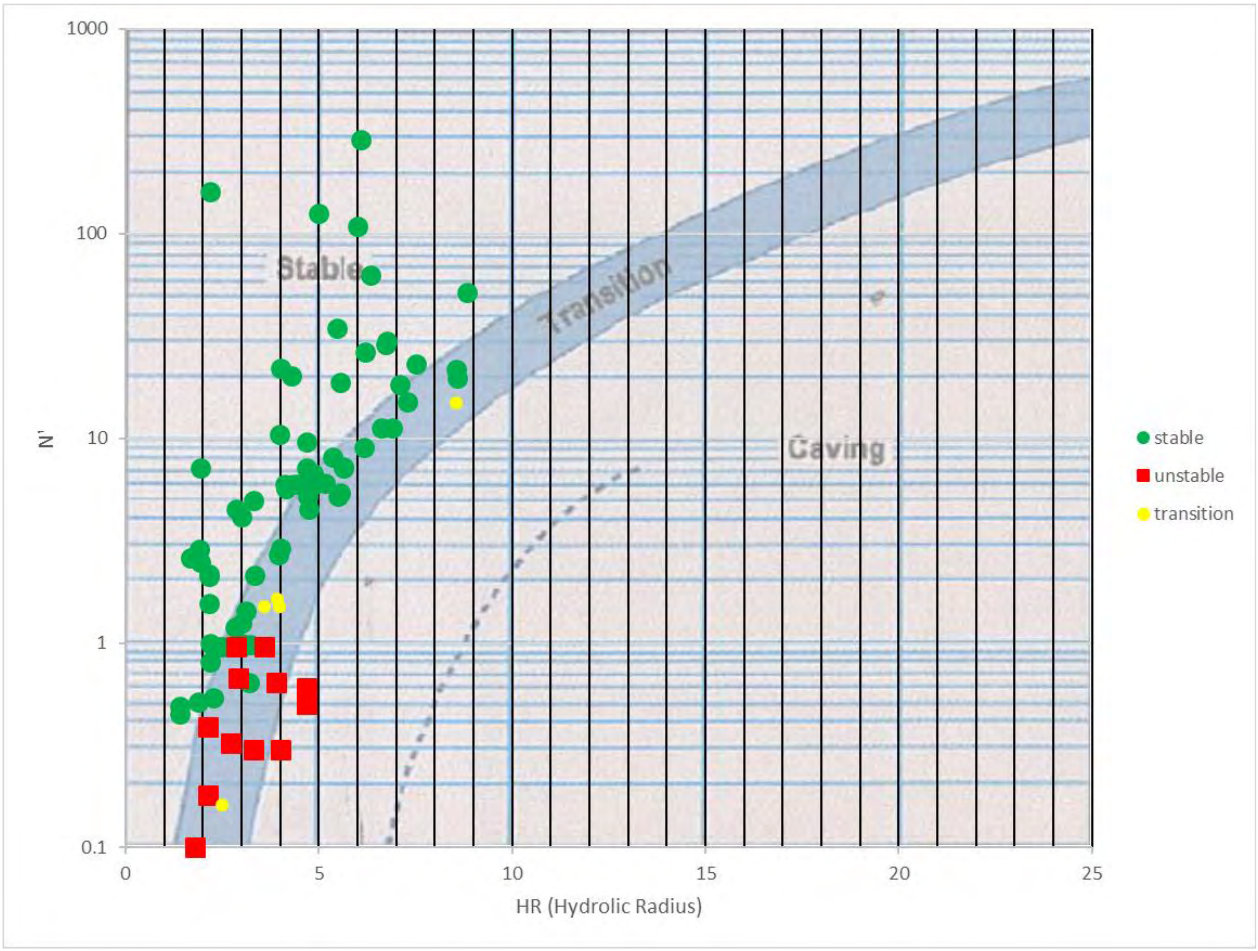
$$N' = Q' * A * B * C$$

Formülü ile bulunur. Grafik üzerinde yapılan değerlendirmede tahkimatsız stabil yüzey alanı,

s-stable – çelik halat tahkimatlı stabil
us-stable – sadece split set ile stabil
unstable – stabil olamayan alanlar
overbreak – fazla açılmalar



Şekil 6. Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde duraylı maksimum pano genişliği – Q değeri ilişkisi



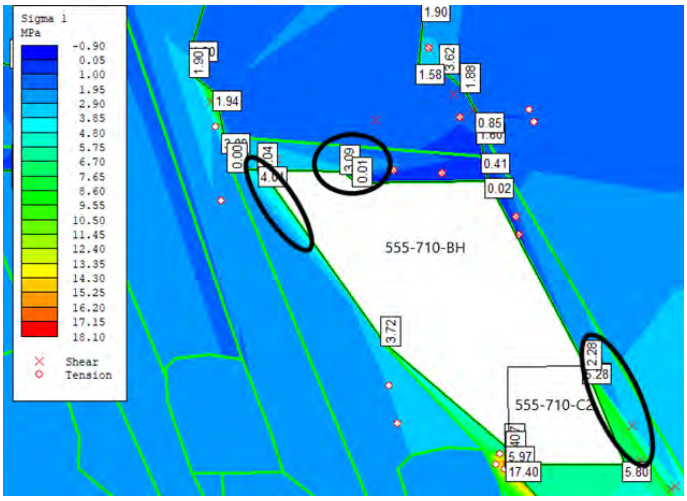
Şekil 7. Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde Mathew's Stability Graph

Hydrolic Radius HR=(H*L)/ (2*H)+(2*L))

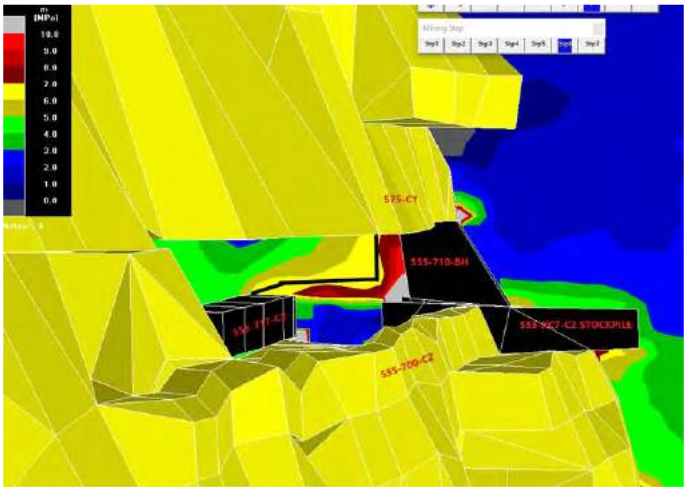
formülü ile belirlenebilir. Tahkimat kullanılarak yada tahkimatsız stabil maksimum yüzey alanı hesapları grafik üzerinde yorumlanır. Sonuç olarak katlararası delgi ve kör delgi üretim yöntemlerinde kazı ebatlarını sınırları bu grafik üzerinden belirlenebilir.

Katlararası delgi üretim ve kör delgi üretim yöntemleri üzerinde Phase2 ve Map3D yazılımları kullanılmaktadır. Bu programlar üzerinden gerilme analizleri gerçekleştirilir. Üretim sırasında adım adım karşılaşılabilecek durumlar dikkate alınır. Tasarım üzerinde gerekli değişikler veya önlem alınması gereken kısımları belirlemede destek olur.

Mevcut maden çalışmalarının yarattığı veya yaratacağı etkiler göz önünde bulundurularak çalışma alanındaki deformasyon ve tavanda oluşan yükün takibi yapılır. Takip ekstensometreler ile yapılır. Zamana bağlı deformasyon ve yük değişimi grafik üzerinde yorumlanır. Ekstensometreler hareketin derinliğini bulmakta ve tahkimat paterninin yeterliliğini belirlemekte kullanılır. Elde edilebilecek bu veriler kullanılarak hareketin mekanizması modellenebilir. Ortaya çıkacak koşullar kat içindeki üretim çalışmalarında değişiklikler veya eklemeler yapmayı gerektirebilir.



Şekil 8. Phase 2 görseli



Şekil 9. Map3D görseli

1.1.4 Tasarım

Kayaç yapısı, jeoteknik veriler ve kazı ebatları üzerinden ilk değerlendirmede belirlenen standart tahkimat tasarımı birincil tahkimat olarak adlandırılır. Kazı amacı, ebatları ve ömrü ile ilişkili olarak uzun ömürlü tahkimat tasarımı ise ikincil tahkimat olarak adlandırılır. Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde süreksizlik verileri, kayaç özellikleri ve kaya kalitesi değerleri kullanılarak birincil tahkimat standartları çeşitlendirilmiştir. İkincil tahkimat tasarımında ise rampa ve ulaşım galerilerinde aynı veriler ile standartlar oluşturulmuştur. Cevher içerisinde aynı veriler ışığında açılacak kazı ebatlarına göre oluşabilecek kamalanmalar ve yenilme kriterleri oluşturulur. Bu koşullar doğrultusunda kamalanmayı ve yenilme kriterlerini önleyebilecek ikincil tahkimat tasarımı yapılır. Tüm yeraltı üretim ve ilerleme çalışmaları için verilen talimatlar üzerinde standart birincil tahkimatlar belirtilmektedir.

Belirlenen standart tasarımlar ve ikincil tahkimat tasarım çalışmaları dışında pano tasarımı çalışmalarında da jeoteknik veriler kullanılmaktadır. Toplanan ve yaratılan tüm jeoteknik veriler doğrultusunda üretim metodu belirlenebilir. Üretim metodu ve cevher kabuğu üzerinden jeoteknik veriler ile planlı kirlenme, maksimum stabil ve verimli üretim tasarımı yapılır. Tasarımın geometrisi jeoteknik öngörülere göre belirlenir. Yaratılan kazı tasarımları sonrasında kat içerisinde çoklu pano üretimi gerekiyorsa, kat içi pano üretim sıralaması belirlenir. Çoklu pano üretimlerinde belirlenen dolgu tipi takvimsel sıralamayı etkiler. Dolgu dayanımı jeoteknik değerlendirmelerde çoklu panolar için önem arz eder. Kat genişliği düşünülerek gerek görülmesi halinde dolgu yapılacak kısımda tahkimat eklentileri yapılabilir. Dolgu tipi macun dolgu ise dayanımın yanı sıra pirizlenme süresi, yanına girmeye uygun dayanıma ulaşma süresi değerlendirilir. Madenimizde genel olarak macun dolgu çalışması uygulanmaktadır. Her pano geometrisi baz alınarak, yan pano üretimi için istenilen dayanım hesaplanmaktadır. Bu dayanıma ulaşma süresine göre yan pano tasarımı üretime dahil edilmektedir.

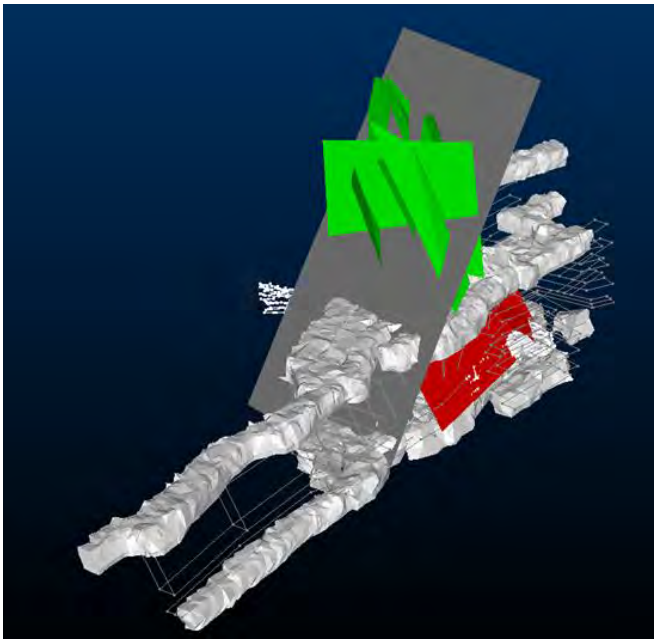
1.2 Yeraltı Çalışmaları

Planlama çalışmalarının sonucunda oluşturulan standartların ve tasarımların uygulanması yeraltında kontrol edilmektedir. Tüm tahkimat elemanlarının kalite kontrolü belirli aralıklarla yapılır. Hazırlık ilerlemelerinde fay ve süreksizlikler haritalanır. Cevher içerisinde loglar ile oluşturulan faylar kontrol edilir ve bu faylar ile etkin olabilecek süreksizlik yapıları haritaya eklenir. Yeraltında gözlenen riskli koşullar için gerekli kontroller ve değerlendirmeler yapılır. Tüm bu çalışmalar yeraltı jeoteknik çalışmalarıdır.

1.2.1 Haritalama

Yeraltında sondaj çalışmaları cevher kısmı için yapıldığından hazırlık ilerlemelerinde kaya kalite değerlendirmesi yapılamamaktadır. Hazırlık galerilerinde litolojik değişimler ve süreksizlik haritalaması takip edilmektedir. Sahada litolojilere ait fiziksel özellikler bilinmekte olup kalite standartları tanımlanabilmektedir. Buna ek olarak süreksizliklerin takibi ile tahkimat önerileri çeşitlendirilir. Süreksizlik haritalamasında yeraltı su geliri de takip edilmektedir. Su içerdiği öngörülen süreksizlikler ve yeraltı su seviyesinin tanımlandığı yerlerde kılavuz delgileri yapılır. Olası su gelirinde enjeksiyon planlanır. Cevher içersinde yapılan süreksizlik haritalamaları ile kamalnma tipi

ortaya çıkarılır. Bu yapılar kazı ebatları ve amacı ile yorumlanır. Gerekli görüldüğü takdirde ikincil tahkimat tasarımı yapılır.



Şekil 10. Süreksizlik haritalamasının 3D program görseli

1.2.2 Jeoteknik uygulamalar ve kalite kontrol

Yeraltı çalışmalarında, jeoteknik ekipmanlarının uygulanması ve kalite kontrolünün yapılması gereklidir. Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde kullanılan tahkimat malzemeleri üzerinde kalite kontrol testleri yapılır. Malzeme ile ilgili olası sorunlar test ve bazı yöntemlerle takip edilir.

Yüzey tahkimatı olarak kullanılan püskürtme beton için reçete kontrolü, elek analizi, malzemenin beton santrali çıkışlı ve spraymac çıkışlı dayanım testleri yapılır. Olası yaşanan sorunlar reçete üzerinde yapılan değişiklikler ile kontrol altına alınır. Kaya saplamalarında birincil tahkimat olarak split set kullanılır. İkincil tahkimat olarak ise pasa ilerlemelerinde standart olarak rebar, cevher ve pasa kavşaklarında ise çelik halat saplaması kullanılmaktadır. Bu malzemeler üzerinde uygulama prosedürleri ile kalite kontrol sağlandığı gibi split set ve rebarlarda çekme testleri yapılmaktadır.

Ayrıca, Tüprag Efemçukuru Altın Madeninde dolgu çalışmaları genel itibariyle macun dolgu ile yürütülmektedir. Macun dolgu için talep edilen kalite değerleri lokal ve genel kapsamda tanımlanmaktadır. Macun dolgu kalite kontrolü laboratuvar ortamında yeraltı koşulları sağlanacak bir ortam yaratılarak yapılmaktadır. Macun dolgu reçetesi, kazı amacına bağlı dayanımı üretim çalışmaları için gereken piriz sürelerinin belirlenmesi ve takibi jeoteknik çalışmalar ile yürütülmektedir.

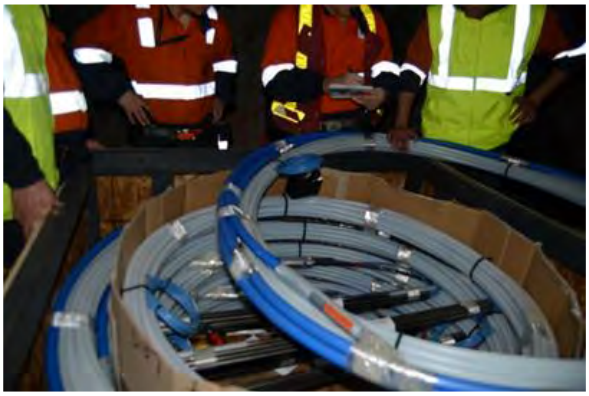
Jeoteknik uygulama olarak deformasyon ölçümleri de çeşitli yöntemler ile yürütülmektedir. Jeoteknik değerlendirmelerde belirlenen lokasyonlar için topoğraflar ile tavan ve duvarlarda deformasyon ölçümleri alınmaktadır. Ayrıca, ekstensometreler ile yeraltında deformasyon ölçümleri yapılmaktadır. Ekstensometre olarak smart cable ve smart MPBX kullanılmaktadır. Smart cable, çelik halat saplaması olup üzerinde bulunan referans noktalarından gelen ölçüm değerlerine göre zamana bağlı deformasyon ve yük miktarlarını gösterir. Smart cable çelik halat saplaması paterninin kontrolünü sağlamak için kullanacağı gibi, hareket mekanizmasını saptamak için belirli lokasyonlara uygulanması mümkündür.

Şekil 11. Smart Cable rulo görseli

Smart MPBX ise 100m ye kadar istenilen uzunlukta referans noktalarından gelen ölçüm değerlerine göre zamana bağlı deformasyon miktarlarını gösterir. Smart MPBX jeoteknik değerlendirmeler sonucu belirli yerlere, uzun mesafede hareketin yerinin ve miktarının tanımlanmasını sağlar. Bu iki ekipmanın kullanımları ile muhtemel hareket modellemesi yapılabilir. Zamana bağlı alınan ölçümler ile elde edilen grafik üzerinden çalışmaların risk analizleri

yorumlanır. Gerekli görüldüğü takdirde çalışmaların durdurulması ve plan değişiklikleri yapılmasını sağlar.

Şekil 12. Smart Cable açık görseli



Şekil 13. Smart MPBX rulo görseli

Şekil 14. Smart MPBX açık görseli

2 JEOTEKNİK DEĞERLENDİRME

Tüm toplanan jeoteknik veriler maden içerisinde lokal ve genel jeoteknik değerlendirmeler yapılmasını sağlar. Kes doldur üretim yönteminin kullanıldığı yerlerde tasarım ve üretim sıralaması çalışmaları ile değerlendirmeler yapılır. Katlararası delgi ve kör delgi üretim yönteminin değerlendirmesinde metodun belirlenmesi, projelendirilmesi ve raporlandırılması gereklidir. Ayrıca, yeraltı çalışmalarında karşılaşılan jeoteknik sorunların değerlendirmesi de raporlama ile yapılmaktadır. Raporlamalarda jeoteknik tüm yöntemler kendi içerisinde değerlendirilir. Sonuç olarak tüm yöntemler ışığında öngörüler ve öneriler ortaya çıkar.

Jeoloji, cevher geometrisi, mevcut maden durumu, Q logları, blok model, Mathew's Stability Graph, stres analizleri, macun dolgu kalitesi, lokasyona bağlı deformasyon ölçüm sonuçları değerlendirme başlıklarını oluşturur. Başlıkların yaratabileceği sonuçlar ile alınacak önlemler belirlenir. Ayrıca, yaşanacak olumsuzluklara göre izlenecek adımlar planlanır ve sunulur.

3 SONUÇ

Efemçukuru altın madeninde jeoteknik değerlendirmeler üretimin emniyetli ve verimli bir şekilde gerçekleşmesi için planlamanın vaz geçilmesi bir parçasıdır. Maden üretime geçtiği ilk günden beri jeoteknik bilgi ve değerlendirmeler ışığında emniyetli ve verimli bir şekilde faaliyetlerini sürdürmektedir.

TESEKKÜR

Tüprag yönetimine bu makaleyi sunmak için verdikleri teşvik ve destken dolayı teşekkür eder Efemçukuru maden ve teknik ofiste jeoteknik çalışmalarda emeği gecen mesai arkadaşlarımıza şükranlarımızı sunarız.

KAYNAKLAR

Barton, N., Lien, R., Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, Vol. 6, No. 4, pp. 189-239.

Mathews, K.E., Hoek, E., Wyllie, D.C., Stewart, S.B.V. 1981. Prediction of stable excavations for mining at depth below 1000 metres in hard rock, CANMET Report DSS Serial No. OSQ80-00081, DSS File No. 17SQ.23440-0-9020. Ottawa: Dept. Energy, Mines and Resources.

Efemçukuru Altın Madeninde Wi-Fi Kullanımı ve Yeraltı Sinyalizasyon Sistemi ile Nakliye Verimliliğinin Arttırılması

Wi-fi Use and Increase of Productivity with Underground Signalization System in Efemcukuru Gold Mine

H.S. Ercan
Tüprag Metal Madencilik San. ve Tic. A.Ş. Efemçukuru Altın Madeni, İzmir

ÖZET Trafik yönetimi, kamyonlar ile nakliye yapan her maden işletmesi için önemli bir konudur çünkü bu sektörde kullanılan araçlar oldukça büyük boyutlardadır ve yanlış kullanımlarda ciddi hasarlara ve yaralanmalara sebep olabilirler. Diğer taraftan ise kötü yönetilen trafik, iş akışını yavaşlatarak üretkenliği ciddi boyutlarda düşürür ve maddi zararlara yol açar. Nakliye verimliliğinin arttırılması ve kazaları önlemek amacıyla Efemçukuru Altın Madeninde bir sinyalizasyon sistemi kurulmuştur. Sistem Wi-Fi temellidir ve personel takip sistemi ile paralel olarak çalışmaktadır.

ABSTRACT Traffic management is a significant issue for all mines that haul the material with trucks because the vehicles used in this industry are quite large and in case of wrong use they can cause serious damages and physical injuries. On the other hand, underground traffic which is mismanaged slows down the mining operations and decreases the productivity, so financial loss becomes inevitable. In order to increase the productivity and to prevent the accidents, an underground signalization system was built in Efemcukuru Gold Mine and this system works correspondingly with underground personnel tracking system.

1 SİNYALİZASYON SİSTEMİ

2017 yılında Efemcukuru Altın Madeni'nde yapılan araştırmalar ile yeraltı trafiğinin üretime ve üretim maliyetlerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sekiz saatlik bir vardiyada yeraltı kamyonlarının diğer araçlar ile karşılaşmaları sebebiyle, önemli zaman kayıplarına maruz kaldıkları ve üretim rakamlarının doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. Kazı yapılan aynadan cevher silolarına ilerleyen bir kamyonun ana rampa üzerinde diğer araçlar ile karşılaşması sonucu yaptığı manevralar planlanan iş süreçlerinde kayıplara sebep olmaktadır. Bu ise işletmede maddi kayıp anlamı taşımaktadır.

Sinyalizasyon sistemi kapsamında ana rampalar üzerinde her üretim katı önünde aşağı ve yukarı yönlü trafik ışıkları konumlandırılmıştır. Madenimizde Trafik Sinyalizasyon ve Yönetim sistemi yazılımı algoritmaları ile kamyonlar en öncelikli ekipman olarak belirlenmiştir. Herhangi bir erişim noktasından geçen yeraltı kamyonu, ilerlediği yöndeki 2 katta ışıkları kırmızıya çevirmektedir. Karşısından gelen bir araç kamyona 2 kattan daha fazla yaklaşamamaktadır. Kırmızı ışığı gören araçlar, uygun bir noktada kamyon geçişini bekleyerek, ışıkların tekrar yeşile dönmesini beklemektedirler. Trafik Sinyalizasyonu ve Yönetim sistemi yazılımı sayesinde Kamyonlar, sahip olduğu öncelik ile cevher silolarına ya da pasa döküm sahasına hiç duraksamadan ulaşabilme imkanına kavuşturulmuştur.

Cevher ya da pasa taşıyan kamyonlar yeraltı sinyalizasyon ve yönetim sistemi sayesinde hem daha verimli çalışacaktır hem de yaşanabilecek kazalar çok önceden önlenecektir.

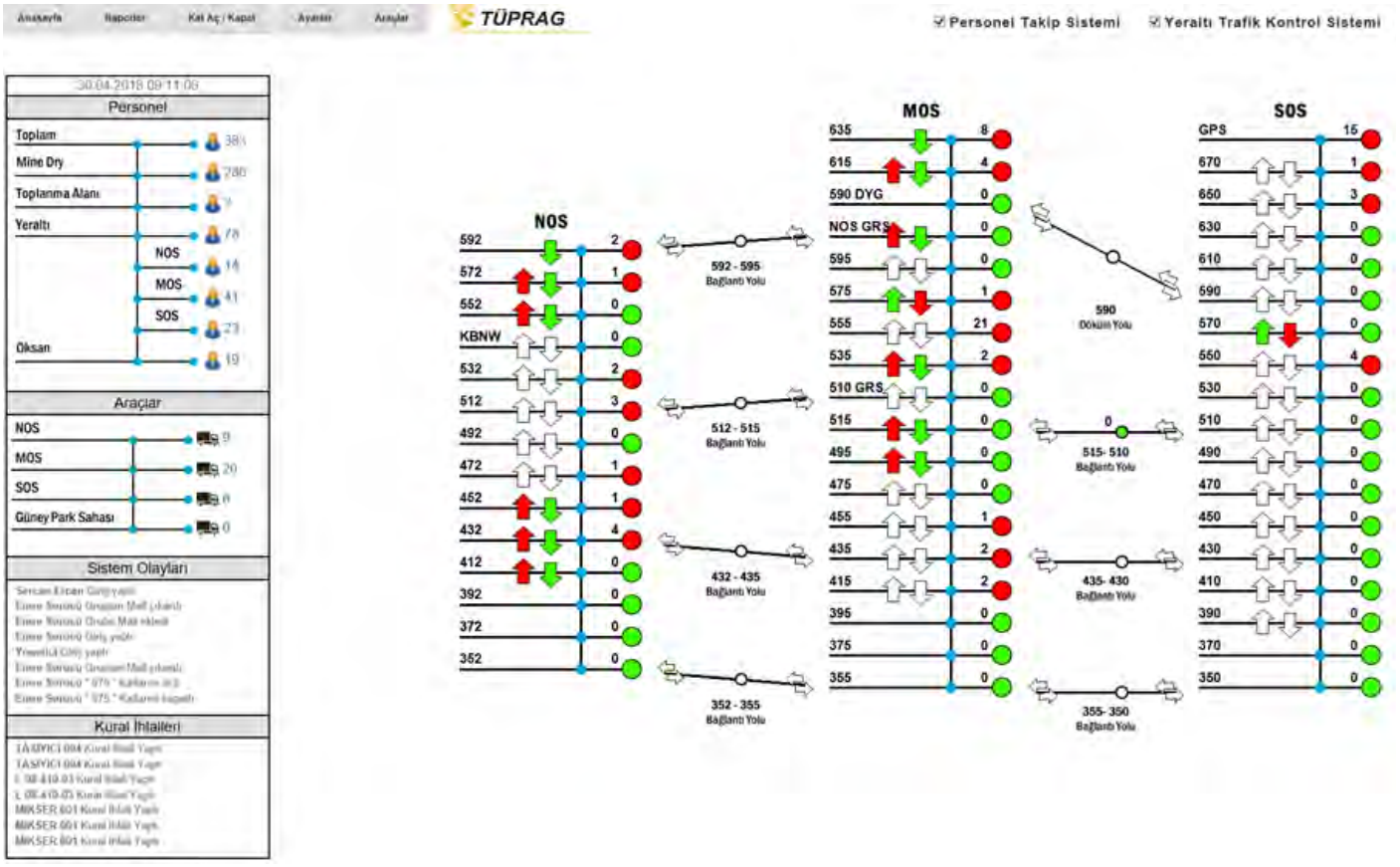
Birçok kör noktası bulunan yeraltı ekipmanlarının ana rampalar üzerinde birbiriyle karşılaşmasından kaynaklanabilecek tüm olumsuz durumların önüne geçmeyi hedefleyen bu proje sadece kamyonlar ile sınırlı değildir. Yeraltına giren tüm araçlara Wi-Fi takip cihazları monte edilerek, tüm araçlar sisteme tanımlanmıştır. Kamyonlar hareket ettiği yöndeki iki katı kapatırken, diğer araçlar ise hareket ettiği yöndeki bir katı kırmızı ışıkla kapatmaktadırlar.

Sistemin modüler olması ve her açılan yeni kat için eklenti yapılabilmesi, en büyük avantajlardan biridir. Bu sayede Trafik Sinyalizasyon ve Yönetimi sistemi işletmelerdeki süreklilik ilkesinin bir fonksiyonu olarak işletmeye uyum sağlamaktadır. Sistem için kolay ve anlaşılır bir ara yüz tasarlanmıştır. Oluşturulan ara yüz de aşağıdaki bilgilere çok kısa sürede ulaşılabilmektedir

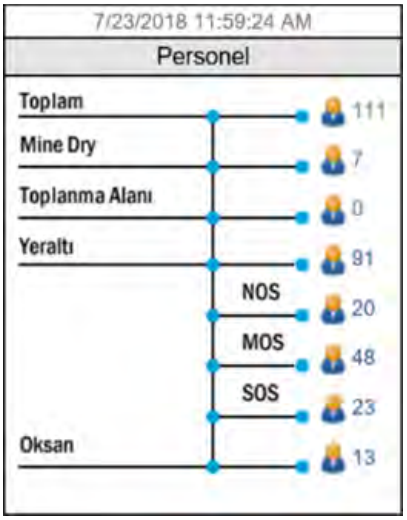
- Personelin konumu
- Araçların konumu
- Araçların yaktıkları trafik ışıkları
- Rampa ve kat detaylarına göre araçların ve personelin konumları
- Yazılımı kullanan tüm kullanıcıların yaptıkları hareketlerin anlık izlenmesi
- Katlarda yapılan kırmızı ışık ihlallerinin anlık izlenmesi
- Kullanıcı ekleme, silme ve düzenleme
- Raporlama (kat, bölge, araç, personel vb. filtreleme)
- Katlarda yapılacak çalışmalar için manuel kat kapatma ve açma

2 PERSONEL KONUMU VE TAKİBİ

Madenimiz personellerinin konumları Kat ve Bölge ayırımı yapılarak ara yüz üzerinde birden farklı listede kolay bir şekilde görüntülenebilir.



Şekil 1. Trafik yönetimi ve personel takip sistemi arayüzü



Şekil 2. Gerçek zamanlı personel konum listesi

Grafiksel gösterim yetkili kullanıcılara, maden personelinin, yeraltındaki tüm kat ve bölge ayrımlarını, web penceresinde listeleyerek gösterir. Açılan web penceresinde kat bilgileri göster veya gizle butonları sayesinde yetkili kullanıcı istediği personeli kolayca görüntüleyebilmektedir.

Ara yüz üzerindeki kat ve bölgelere tıklayarak maden personelinin nerede bulunduğunu listeleyerek kullanıcının yeraltı durumundan haberdar olmasına yardımcı olur.

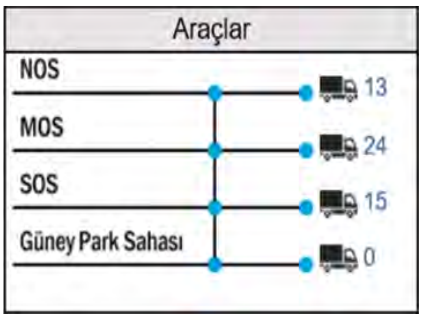
Şekil 3. Detaylı personel konum arayüzü

Şekil 4. Katta bulunan personeller listesi görünümü

Ara yüz üzerindeki kat ve bölgelere tıklayarak madenimiz personelimizin nerede bulunduğunu en ince detayına kadar listeleyerek kullanıcının yeraltı durumundan haberdar olmasına yardımcı olur.

3 ARAÇ KONUMU VE TAKİBİ

Yeratına giriş yapan tüm araçlar takip cihazı bulundurmak zorundadır. Yeraltında ve araç park sahasında bulunan tüm araçlar anlık olarak izlenebilmektedir.



Şekil 5. Maden sahasında gerçek zamanlı ekipman dağılımı görünümü

Şekil 6. Yeraltında merkez ana rampa üzerinde bulunan araçların anlık görünümü

4 RAPORLAMA

Sistemin maden ile ilgili; personel, araç, kat, bölge, kural ihlali ve benzer bilgilerinin kaydedildiği bir veri tabanı bulunmaktadır. Yetkili kullanıcılar veri tabanında bulunan tüm bilgileri tarih aralığına ve girilen veri grubuna göre listelemek isteyecektir. Oluşturulan raporlama sayfası tasarımında; sorgulama türü (personel, araç, kural ihlali, kat durumları), filtre adı (ad, sicil, model, kat, bölge), veri grubu, başlangıç ve bitiş tarihlerinden oluşan 5 adet filtreleme kriteri kullanılarak listelenmektedir.

Raporlama sayfasında girilen kriterlere göre listelenen bu tabloyu isteğe bağlı bir biçimde Excel ve Pdf formatındaki belgeleri dışarı aktarabilir veya mail olarak başka bir personele gönderebilmekteyiz.

4.1 Log Kayıtları

Raporlamadaki amaç aranan bilgilerin mümkün olabilecek en kısa sürede listelenmesi olduğu için sorgu yapısında kullanılan algoritma şeması ile bu süre en aza indirgenmiştir. En yakın tarihten en uzak tarihe doğru sıralanan log kayıtları tablosunu, Excel ve Pdf formatındaki belgeler olarak dışarı aktarabilir veya mail olarak başka bir personele gönderebilir.

5 KAT AÇ / KAT KAPAT FONKSİYONU

Amaçlanan madende bulunan katları web ara yüzü üzerinde açık katlar, kapalı katlar ve trafiğe kapalı katlar olmak üzere bölgelere ayırıp, kullanıcıların katların durumlarına hâkim olmalarını sağlamaktır. Açık katlar bölümünde yeraltında trafiğe açık katlar görünmektedir ve kapatacağımız katı veya katları seçip kat kapat butonuna tıklandığında seçilen kat veya katlar, trafiğe kapalı katlar bölümüne geçer veya trafiğe kapatacağımız katları seçip katı trafiğe kapat butonuna tıkladığımızda seçilen kat veya katlar, trafiğe kapalı katlar bölümüne geçecektir. Özellikle patlatma saatlerinde, kat girişlerinde bulunan lambalar uzaktan kırmızıya çevrilerek, standart barikatlama uygulaması desteklenmiştir. Bulunan tümünü işaretle kutusuna tıklayarak tüm katlara aynı anda işlem yapabilmekteyiz.

6 KULLANICI İŞLEMLERİ

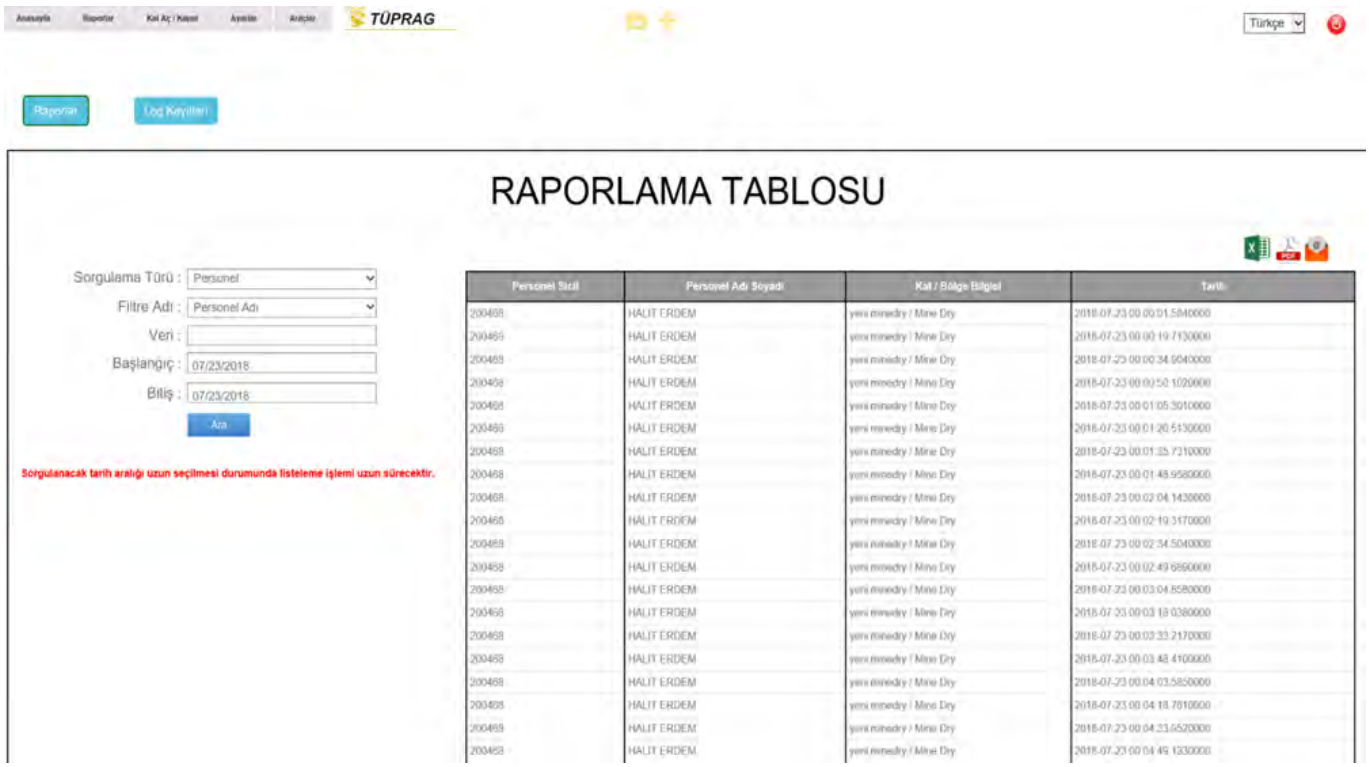
Yeraltı sinyalizasyon sistemi ve personel takip sistemi anlık olarak sahada bulunan tüm personeller tarafından izlenebilmektedir. Yetkileri belirlenen Personeller hazırlanan web arayüzünde istedikleri an istedikleri veriye ulaşabilirler.

7 ARAÇ TAKİBİ

Yeraltında bulunan tüm araç konumları ve yönleri anlık olarak takip edilebilmektedir.

8 SONUÇ

Yeraltında nakliye aşamasında kamyonların trafik sebebiyle yaptığı manevraları önleyerek hem üretim verimliliğini arttırmak hem de iş kazalarını önüne geçebilmek amacıyla başlayan yeraltı sinyalizasyon projesi 2018 yılı itibariyle devreye alınmıştır. Devreye alınmasından sonra yeraltında trafik yoğunluğunun azaldığı, kamyon operatörlerinin gereksiz manevralar yapmak zorunda kalmadıkları gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Personelin lokasyon bilgisini gösteren rapor tablosu

Şekil 8. Kat açma/kapama ekranı

Şekil 9. Kullanıcı işlemleri arayüzü

Şekil 10. Araç takibi arayüzü

Bakım Fonksiyonu Performans Ölçüm Çerçevesi ve Göstergelerinin Geliştirilmesi

Development of Maintenance Function Performance Measurement Frame and Indicators

O. Erkuş

Tüprag Metal Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. Efemçukuru Altın Madeni, İzmir

ÖZET Günümüz şartlarında, teknolojik gelişimlere paralel olarak üretim yapan firmaların en önemli girdileri makina ve otomasyona dayalı ekipmanlarıdır. Yatırım ve işletim maliyetlerinin paralel olarak artması, bakım faaliyetlerinin önemini daha da ön plana çıkarmış; bu durumun fonksiyonu olarak da planlama ve performans değerlendirme stratejisi kavramları oluşmuştur.Bu stratejilerle ilgili ölçüm yöntemlerine oluşan ihtiyaç; bakım performansı göstergeleri kavramını doğurmuştur. Bakım fonksiyonunun performansının ölçümüne ilişkin yapılandırılmış bir yaklaşım geliştirmek için, kurumsal ve üretim stratejisine dayanan, iyi formüle edilmiş bir bakım stratejisine sahip olmak kaçınılmazdır.Bu çalışmada ortaya konulan bakım performansı kavramsal çerçevesi, üretim amaçlarının talep ettiği performansın sağlanmasına yönelik, maliyet çerçevesi de göz önünde bulundurularak; bakım fonksiyonunu harekete geçiren kilit elemanları ve süreçleri tanımlamayı hedeflemiştir.

ABSTRACT The most important inputs of the companies making manufacturing in today's conditions in parallel to the technological developments are the machinery and automation-based equipment. The parallel increase in investment and operating costs has made the maintenance activities even more important; and as a function of this situation, the concepts of planning and performance assessment strategy have been emerged. The need for assessment methods for these strategies has created the maintenance performance indicators. It is inevitable to have a well-formulated maintenance strategy based on a corporate and production strategy in order to develop a structured approach for the performance assessment of the maintenance function. The conceptual framework of the maintenance performance that is analyzed in this study aims at identifying the key elements and processes that trigger the maintenance function in order to ensure the performance demanded by the production objectives, considering the cost framework.

1 TARİHÇE

1738 yılında Lewis Paul ve John Wyatt tarafından Birmingham'da tarihte ilk patentlenmiş Makaralı İplik Makinası'nın yapılması sonrası 1743'de Northampton'da 50 adet makinayla seri üretime başlanarak, bugünkü otomasyon sistemlerine gelene kadar yaşanan süreci dört bölümde inceleyebiliriz.

Dünyada bakıma gereksinim duyan fiziksel varlıkların sayısının ve de çeşitliliğinin artması, daha karmaşık tasarımlar haline dönüşmeleri yeni bakım teknikleri ile ölçülebilirliğinin gerekliliğine neden olmuştur. Birinci kuşak 1950'lere kadar olan dönemi kapsar. Bu dönemde sanayilerde

makineleşme yoğunluğunun düşük olması nedeniyle makineleri duruş süreleri sorun olarak görülmüyor; dolayısıyla, arızaların önlenmesi öncelikler arasında yer almıyordu. 1950'lerden 1970'lere kadar olan dönem ikinci kuşaktır. İkinci Dünya Savaşı sonrası mallara olan talep artarken, sanayiye insangücü arzı önemli ölçüde düşmüştür.Sanayide ortaya çıkan ve giderek artan makine bağımlılığı, duruşlara odaklanılmasına; bununla beraber olarak da önleyici bakım kavramının gelişmesine yol açmıştır. 1960'larda önleyici bakım olarak, belirli zaman aralıklarında donanımlarda revize bakımlar yapılmaktaydı. Bu dönemde üretim maliyetlerinin yanı sıra, giderek artan bakım maliyetleri, bakım planlaması ve kontrolünün gelişmesine neden olmuştur. 1970'lerin ortalarından itibaren başlayan üçüncü kuşak da ise, artan
beklentilere cevap vermek için, daha yüksek donanım kullanılabilirliği ve güvenilirliği, daha fazla emniyet, daha iyi ürün kalitesi, çevreye zarar vermeme, daha uzun donanım ömrü,daha fazla maliyet etkinliği kavramları bakım stratejilerinin oluşmasına sebep olmuştur. Bu gelişmeler:

- Bakım karar destek teknikleri (Risk Analizleri, arıza türü ve etkileri analizi, uzman sistemler vs.)
- Yeni bakım teknikleri (durum esaslı bakım vs.)

Güvenilirliğe ve bakım yapılabilirliğe dayalı donanım tasarımları organizasyonel ve sistematik düşünme maddeleri altında özetlenebilir.2000'li yıllardan itibaren ise, dördüncü kuşak bakım tanımlaması yapılmıştır. Bir önceki kuşakta arızaların öngörülmesine, önlenmesine ve sonuçlarından sakınılmasına odaklanırken; dördüncü kuşakta amaç tamamı ile arızanın ortadan kaldırılmasına yöneliktir.Bu odaklanma ölçme ve değerlendirmenin bir fonksiyonudur.

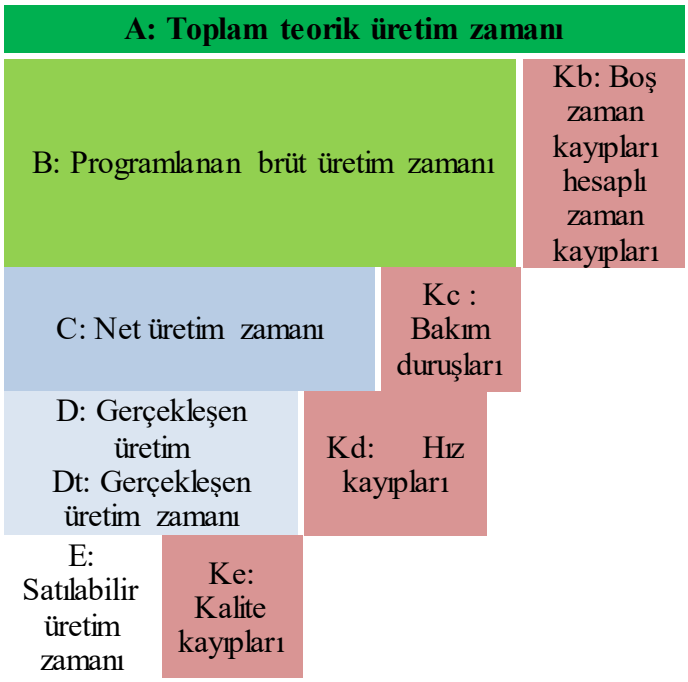
2 MAKİNE PERFORMANSLARI

Performans ölçümü, temel bir yönetim ilkesidir. Performans ölçümü de, bakım fonksiyonunun yönetiminde önemli bir unsurdur.İyi tanımlanmış performans göstergeleri potansiyel olarak, güncel ve arzu edilen performans arasındaki performans boşluklarının tanımlanmasını destekleyebilir ve boşluğun kapatılmasına yönelik ilerleme göstergesi sağlayabilir. Yaygın olarak kullanılan sınıflandırma öncü ve artçıl göstergelerdir. Öncül göstergeler, sonuçlara götürecek görevlerin yerine getirilip getirilmediğini gözlemler. Diğer taraftan, artçıl göstergeler, sonuçların veya çıktıların başarılıp başarılmadığını gözlemler. Bu nedenle, hem öncül hem de artçıl göstergeler, bakım fonksiyonu performansının yönetilmesinde önemlidir. Ayrıca, öncül göstergeler, istenmeyen durumların meydana gelmesini önleme potansiyeline sahip olduğundan, artçıl göstergelere göre daha da önemlidir.

Bu inceleme, literatürde ortaya konulmuş farklı bakım performansı ölçüleri ve çerçevelerini gösterir. Farklı ölçü kategorileri, hem uygulamada hem de literatürdeki bakım performansında farklı ilgi alanlarını gösterir.

Çizelge 1'de performans ölçümleri için kullanacağımız referans zamanlar bulunmaktadır.

Çizelge 1. Referans zamanlar



Çizelge 1 için hesaplamaların formülleri şöyledir:

A: Toplam Teorik Üretim Zamanı:
365 gün X 24 saat/day = 365x24=8760 saat

B: Programlanan Brüt Üretim Zamanı;
Üretim için ayrılan (programlanan) brüt zaman.

B = A-Kb (1)
Kb: Boş Zaman Kayıpları (Programlanmış Üretim Duruşları)
Tesis talep olmadığı için veya tesisin kontrolu dışındaki faktörler nedeniyle çalışamadığı zamanlar. Hammadde olmaması, iklim şartlarından dolayı elektrik kesintisi nedeni ile üretim yapılamaması gibi zaman kayıpları. (Kb)

C: Net Üretim Zamanı:
Üretim için çalışılan net zaman. Ekipmanın faal olarak çalışabileceği zaman.

C = B-Kc (2)
Kc = Planlı ve plansız bakım duruşlarıdır. Bu duruşa; vardiya veya üretim değişikliğinden kaynaklanan ekipman hazırlama ve vardiya değişim hazırlıkları dahil edilir.

D: Gerçekleşen üretim için kullanılan zaman

D = C-Kd (3)
Kd: Performans kaybıdır. Altı dakikanın altındaki küçük ekipman duruşları, tasarlanan hız veya kapasite altında çalıştığında gerçekleşen performans kayıpları.

E: Satılabilir Üretim Miktarı

E= D-Ke (4)
D: Gerçekleşen Üretim Miktarı
Ke: Kalite Kayıpları;
Hurda kaybı, kusurlu ürün, maden cevherindeki kirlenme, verim kaybı veya proses geçiş kayıpları.

2.1 Ekipman Kullanılabilirliği

Ekipman uygunluğu ölçümü ekipman performansını değerlendiren en önemli temel istatistiklerden biridir.

Bakım bölümü tarafından ekipmanın ne kadar çalışmaya hazır halde tutulabildiğinin bir göstergesidir. Dolayısı ile bakım bölümü için son derece önemli bir performans göstergesidir.

Aşağıdaki belirtilen hususlar bu değerin düşmesine sebep olur;

•Bakım bölümündeki yetersiz ekipman,
•Bakım bölümde yetersiz kalifiye eleman,
•Bakım bölümde modern bakım tekniklerinin yeterince uygulanmaması.
•Bakım elemanları için yeterli eğitim sağlanmaması,
•Yetersiz operatörlerin makinaya hasar ve arıza verdirmesi,
•Yetersiz yedek parça temini (yetersiz stok)
•Yetersiz bakım yönetimi vb.
•Yetersiz Yetkili Servis desteği
•Makine Kalitesi (Makinanın garanti süresindeki beklenmedik arızası)

Ekipman kullanılabilirliği aşağıdaki gibi formule edilir(5);

Av(%)= 100xC/B (5)
Av(%)= 100x(B-Kc)/B (5)

Av: (%), Ekipman kullanılabilirliği

2.2 Ekipman Kullanım Oranı

Ekipman kullanımı ölçümü, ekipman performansını değerlendiren başka bir önemli temel istatistiklerden biridir.

Üretim bölümünün faal bir ekipmanı ne kadar kullanabildiğini gösterir. Doğal olarak üretim bölümünün planlama ve planladığını uygulama başarısının bir göstergesidir. Aşağıdaki şartlar bu verimin düşmesine neden olur;
•Yetersiz,yanlış veya fazla ekipman,
•Seçilen üretim metodundaki olumsuzluklar,
•Üretim yönetimindeki yetersizlikler bu verimin düşmesine neden olur.

Ekipman kullanım oranı, aşağıdaki gibi formüle edilir (6);

Ue=100*Dt/C (6)
Ue=100*(C-Kd)C (6)
Ue=100*(C-Kd)/(B-Kc) (6)
Ue: (%), Ekipman kullanım yüzdesi
Dt: (zaman), Gerçekleşen üretim için kullanılan zaman. Hesaplanan zaman aralığında ekipmanın işte (Üretimde) çalıştığı zaman.

B: (zaman), Programlanan Brüt Üretim Zamanı; Hesaplanan zaman aralığında ekipmanın çalışabileceği toplam brüt zaman.
C: Net Üretim Zamanı ,**C=B-Kc**
Kc: (zaman), Hesaplanan zaman aralığında ekipmanın bakım faaliyetleri nedeni ile çalışamadığı zaman. Bu süre rutin bakım, tamir ve yedek parça temini için harcanan zamandır.

Çizelge 2'de bu iki hesaplama sonucu oluşturulmuş dönemsel bir değerlendirme bulunmaktadır.

Çizelge 2. Kullanılabilirlik ve kullanım

Kullanılabilirlik	**Toplam**	91,21
Delici Grup 1	**Kullanılabilirlik**	89,69
Delici Grup 2	**Kullanılabilirlik**	94,15
Sondaj	**Kullanılabilirlik**	94,62
Loderler	**Kullanılabilirlik**	87,77
Kamyonlar	**Kullanılabilirlik**	89,08
İnşaat Grubu	**Kullanılabilirlik**	92,62
Diğer	**Kullanılabilirlik**	90,54
Kullanım	**Toplam**	**35,45**
Delici Grup 1	**Kullanım**	35,15
Delici Grup 2	**Kullanım**	11,54
Sondaj	**Kullanım**	37,69
Loderler	**Kullanım**	40,46
Kamyonlar	**Kullanım**	63,62
İnşaat Grubu	**Kullanım**	23,23
Diğer	**Kullanım**	36,46

2.3 Ekipman Etkinliği

Ekipman verimliliği ekipmanın işte çalışma süresinin çalışmaya uygun toplam zamana olan yüzdesidir. **E** bir ekipmanın üretim potansiyelinin hesaplanması için uygun bir göstergedir.

Kısaca Ekipman Verimliği için "Bir işletmenin bir ekipmanı ne kadar üretimde kullandığının bir göstergesidir." diyebiliriz.

Ekipman Verimliği açık ocak madenleri için %85 olabilir ancak yeraltı madenlerinde işin daha kompleks olması nedeni ile ancak %60-75 olabilir.

Aşağıdaki gibi formule edilir (7);

E= Av x U veya E= Dt x 100 / B (7)

Ue: (%), Ekipman kullanım yüzdesi
Av: (%), Ekipman kullanılabilirliği
Dt: Hesaplanan zaman aralığında ekipmanın işte çalıştığı zaman. Gerçekleşen üretim için kullanılan zaman.
Tt: Programlanan Brüt Üretim Zamanı: Hesaplanan zaman aralığında ekipmanın çalışabileceği toplam zaman.

2.4 İşgücü Kullanımı

Bakım etkinliğini değerlendirmek için kullanılan temel istatistiklerden biridir. Bakım personelinin bir ekipman üzerinde fiili olarak çalıştığı sürenin, kullanılabilir iş gücüne oranıdır (8).

İKO= İşlere harcanan toplam zaman / Kullanılabilir toplam zaman (8)

İşlere harcanan süreyi hesaplarken ulaşım, bekleme (parça, takım, ekipman), kataloglardan bilgi araştırma, iş güvenliği önlemleri, puantaj ve doküman doldurma gibi süreler göz önüne alınmaz.

İş gücü kullanım oranının düşüklüğü aşağıdakileri işaret eder:
•Uygun kontrollerin eksikliği,
•Yetersiz organizasyon,
•Yetersiz ekipman,
•Çalışma sahasına yetersiz malzeme temini
•Bakım atölyesinin sahaya çok uzak olması
•Maden trafiğinin yetersiz oluşu vb.

Yeraltı metal madenlerinde; işin kompleks olması nedeniyle; bu değer %38-43 olabilmektedir. Dünya sınıfı hedef seviyesi ise %60 üzeridir.

3 BAKIM PERFORMANS GÖSTERGELERİ

Bakım sürecini yönetmek için, her bir adım performans göstergelerinin tanımlanması gereklidir. Bakım süreçleri, bakım çıktıları ve sonuçlarının belirleyicisi olduğu için, bakım süreci ile ilgili göstergelere öncül göstergeler olarak atıfta bulunulur.

Bakım süreçlerinin tamamlanmasından sonra, belirli bir döneme ait bakım sonuçlarının gözlemlenmesi gereklidir. Sonuçlar, ekipmanın durumu ve performansı ile birlikte bakım maliyeti ve bakım kaynaklarının etkili kullanımı açısından ölçülür. Performans boşluklarının tanımlanmasını ve dolayısıyla da ekipman

performansının sürekli iyileştirilmesini desteklediği için, bakım sonuçlarının titizlikle analiz edilmesi önemlidir. Performans analizi, ulaşılan sonuçların hedeflerle karşılaştırılmasını, geçmiş verilerle karşılaştırılmasını, eğilimlerin analiz edilmesini ve bakım faaliyetlerinin maliyetlerinin incelenmesini kapsar.

Bakım sonuçları ile ilgili göstergelere, belirli bir süre geçtikten sonra veya olaylar meydana geldikten sonra bilinir hale geldikleri için, artçıl göstergeler olarak atıfta bulunulur.

Öncül performans göstergeler iş tanımı,iş planlama, iş programlama ve de işi uygulama kategorilerine ayrılır.

Artçıl performans göstergeleri ise donanım performansı ve de maliyet performansı olarak iki ayrı kategoriye ayrılır. Çizelge 3'de bu göstergeler görülmektedir:

Çizelge 3. Bakım performans göstergeleri

BAKIM PERFORMANS GÖSTERGELERİ			REFERANS DEĞERLER	
KATEGORİ		İNDİKATÖR	Referans	
			Tavsiye Hedefler	Dünya Klası Hedefler
Öncül Performans Göstergeleri	İş Tanımı	Proaktif iş yüzdesi	% 70-80	% 75-80
		Reaktif iş yüzdesi	% 10-30	% 10-15
		Geliştirilen iş yüzdesi	% 10-15	% 5-10
		Iş Talebini karşılama oranı	80%	80%
	İş Planlama	Planlama yoğunluğu %	95%	95%
		Planlama kalitesi %	<%3	< 2 to 3%
		Planlama tepkiselliği %	80%	80%
	İş Çizelgeleme	Çizelgeleme yoğunluğu %	80%	80%
		Programlama kalitesi %	< %2	< %3-5
		Program gerçekleştirme oranı %	95%	95%
	İşi Uygulama	Programa Uyum	> % 90	> % 90
		Ortalama Tamir Süresi,(MTTR)	-	x
		Iş gücü kullanma oranı %	> 80%	x
		Iş gücü etkinliği	> 85%	x
		Iş emri dönüş hızı %	-	x
		Karşılanamayan iş hacmi	-	x
		Uygulama kalitesi %	< % 3	< % 3
Artçıl Performans Göstergeleri	Donanım Performansı Ölçütleri	Arıza sayısı	-	x
		Arıza sıklığı	-	x
		Arızalar arası ortalama süre(MTBF)	-	x
		Kullanabilirlik %	-	x
		Toplam donanım etkinliği OEE	-	x
	Maliyet Performansı Ölçütleri	Doğrudan Bakım Maliyeti	-	x
		Duruşun önem derecesi	-	x
		Bakım masraf yoğunluğu	-	x
		Bakım maliyeti yüzdesi (%)	-	< %10-15
		Donanım Değiştirme Değeri (ERV)	%18-36	%2-9
		Bakım Stok Devir Hızı	-	x
		Personel Maliyeti Yüzdesi	-	x
		Taşeron maliyeti yüzdesi	-	x
		Malzeme maliyeti yüzdesi	-	x

Bu göstergeler ise aşağıda tanımlanmıştır:

3.1 İş Tanımı

3.1.1 Proaktif iş yüzdesi

Proaktif (Planlı) İşlerin Yüzdesi = Proaktif (Planlı) İşler için harcanan iş gücü / Toplam işgücü (9)

Bakım bölümünün ne kadar planlı çalışabildiğini gösterir, bu nedenle son derece önemli bir göstergedir (9). Planlı işlerin ve plansız işlerin belirlenen oranda gerçekleştirilmesi, bakım bölümünün kalitesini belirtmekle beraber kullanıcıların makine kullanma kabiliyetlerini de gösterir.

Bakım işgücünün dağılımını dünya klası ölçülerine göre %75-80 planlı işlere, % 10-15 ise iş geliştirmeye ve %10-15 de plansız (reaktif) işlere ayrılmalıdır.

Metal madenlerinde iş gücü dağılımının %70 ini planlı işlere, % 30 unu plansız işlere göre ayırmak pratikte kabul görmüş bir değerdir.

3.1.2 Reaktif(plansız) iş yüzdesi

Plansız İşlerin Yüzdesi = Plansız işler için harcanan iş gücü / Toplam işgücü (10)

Makina operatör hataları, yanlış makine seçimi ,plansız üretim, yetersiz bakım plansız işlerin artmasına neden olacaktır. Bu oranın dünya klasındaki değerlerde gerçekleşmesi, iyi bir işletmenin göstergesidir. Dünya sınıfı hedef seviyesi %10-15 dir.

3.1.3 Geliştirilen iş yüzdesi

Ar-ge ve modifikasyonlar için harcanan iş gücüdür (11).

Ekipmanların çalışmaları izlenerek olumsuzluk yaratan yönleri belirlenir ve bunları ortadan kaldırmak için iş geliştirme çalışmaları yapılır.

Üreticilerin yetersiz dizaynı, kulanıcıların yanlış ekipman seçimi, yapılacak işin çok kompleks olması gibi nedenlerden dolayı zaman zaman ekipmanlar beklentileri istenen şekilde karşılamaz. Bu da makina performanslarını ve üretimi olumsuz etkiler. Bu durumlarda kullanıcılar ekipmanlar üzerinde ufak değişikler yaparak olumsuzlukları gidermeye çalışır. Bu iyileştirmeler mutlaka mühendislik çalışmaları yapılarak dizayn edilmelidir ve yönetimin onayı alınmalıdır.

Dünya sınıfı hedef seviyesi %5-10 dur.

Geliştirilen iş yüzdesi = İş Geliştirmelerine ve Modifikasyonlarına harcanan işgücü / Toplam işgücü (11)

3.1.4 İş talebini karşılama oranı

Arıza, modifikasyon, ar-ge ya da bakım için ekipmanda yapılması istenen tüm gerekliliklerin; bakım bölümüne bildirildikten sonra, taleplere reaksiyon oranıdır (12). Bakım bölümünden kendisine gelen iş taleplerini 5 gün içinde işleme alması beklenir. Müşteri memnuniyeti sağlamak açısından önemli bir göstergedir.

Dünya sınıfı hedef seviyesi %80 dir.

İş Talebini Karşılama oranı = 5 günden daha kısa sürede talep olarak kalan iş sayısı / Toplam iş talep sayısı (12)

3.2 İş Planlama

3.2.1 Planlama yoğunluğu

Planlama tarafından belirlenen süreç içerisinde programa dahil edilmiş işlerin; yapılmış işlere oranıdır (13). Bakım prosesinin ilk aşaması bakım planlama olduğu için bu aşamada yapılacak çalışmalar bakım bölümünün performansına direkt etki eder. Bu nedenle maksimum bakım verimi, yüksek planlanmış işler yüzdesi gerektirir. Bakım bölümü yöneticileri için bölümlerinin özenle üzerinde durması gereken bir göstergedir. Dünya sınıfı hedef seviyesi %95' dir.

Planlama Yoğunluğu = Planlı yapılan işler / Toplam yapılan işler (13)

3.2.2 Planlama kalitesi

Planlama nedeniyle malzeme yetersizliğinden dolayı bekleyen işlerin izlenmesini sağlar (14). Yetersiz malzeme bekleyen planlanmış iş emirleri programlama aşamasına geçemez. Dünya sınıfı hedef seviyesi <%3 dür.

Planlama Kalitesi = Planlamadan dolayı yeniden yapılması istenen iş emri sayısı / Toplam iş emri sayısı (14)

3.2.3 Planlama tepkiselliği

Arıza, modifikasyon, ar-ge ya da bakım için ekipmanda yapılması istenen tüm gerekliliklerin; bakım bölümüne bildirildikten sonra, 5 gün içerisinde programa alınma oranıdır (15).

Dünya sınıfı hedef seviyesi %80 dir.

Planlama Tepkiselliği = 5 günden daha kısa sürede "Planlama" durumunda olan iş emir sayısı / Toplam iş emri sayısı (15)

3.3 İş Programlama

3.3.1 Programlama yoğunluğu

Programlama Yoğunluğu = Programlanan işgücü / Toplam kullanılabilir işgücü (16)

Bir işin programlanması için gerekli tüm ihtiyaçların (işcilik, malzeme, servis, vb) sağlanması ve işin yapılacağı zamanın belirlenmesi gerekir (16).

Dünya sınıfı hedef seviyesi > %80 dir.

3.3.2 Planlama kalitesi

Proglama kalitesi = Programlama nedeni ile geciken, ertelenenen iş emirleri / Tüm iş emirleri (17)

Malzeme ve işgücü nedeni ile geciken, ertelenenen iş emirlerinin, aynı süreç için programlanan toplam iş emirlerine oranıdır(17).

Dünya sınıfı hedef seviyesi < %2 dir.

3.3.3 Programlama gerçekleştirme oranı

Programlama gerçekleştirme oranı = Yapılması gereken tarihe (veya daha önce) programlanması tamamlanan iş emirleri / Toplam iş emirleri (18)

Dünya sınıfı hedef seviyesi > %95 dir.

3.4 İşi Uygulama

3.4.1 Programa uyum

Programa Uyum = Son bitiş tarihinden önce programlanan sürede tamamlanan iş emirleri sayısı / Toplam programlanan iş emirleri sayısı (19)

Bu gösterge bakım bölümü için son derece önemlidir. Yüksek programa uyum yüzdesi hem iyi bir programlamanın yapıldığını hem de bakım atölyesinin işleri beklendiği gibi yapılabildiğini gösterir (19). Kısaca bakım bölümünün performansını gösteren en önemli ölçümlerden biridir.

Dünya sınıfı hedef seviyesi > %90 dir.

3.4.2 Ortalama tamir süresi (MTTR)

Ortalama Tamir Süresi = Toplam Duruş Süresi / Arıza Sayısı (20)

Bakım kabiliyeti genellikle ortalama tamir süresi (MTTR) ile ifade edilir(20).Tamir için harcanan net zamandır. Onun için de bazen "anahtar zamanı" olarak isimlendirilir.

Düşük bir MTTR, tamirlerin kolay yapıldığını gösterir. Bu da bakım bölümünün performansının iyi olduğunu gösterir.

3.4.3 İş gücü kullanma oranı

İş Gücü Kullanma Oranı = İşlere harcanan toplam zaman / Kullanabilir zaman (8)

Kullanabilir zamanı ücreti ödenen zaman olarak da açıklayabiliriz. Bakım etkinliğini değerlendirmek için kullanılan temel istetistiklerden biridir. Bakım personelinin bir ekipman üzerinde fiili olarak çalıştığı sürenin kullanılabilir işgücüne oranıdır. İşlere harcanan süreyi hesaplarken ulaşım, bekleme (parça, takım, ekipman), kataloglardan bilgi araştırma, işgüvenliği önlemleri, puantaj ve döküman doldurma gibi süreler göz önüne alınmaz (Bkz. Madde 2.4)

3.4.4 İş gücü etkinliği

İş Güçü Verimi = İşlere harcanan zaman / İşlere tahsis edilen zaman (19)

Bakım bölümünün iş yapabilme becerisini gösterir (19). Programlanan işlerin uygulamada ne kadar farklı zamanda yapıldığını gösterir. Atölye imkanları düşünülmeden planlama yapılmış olması, yapılan işlerin eksik yapılması, bakım talimatlarının tekniğine uygun olarak hazırlanmaması gibi nedenler bu verimin düşmesine neden olur.

İş makineleri bakım atölyeleri için hedef değer >%85 tavsiye edilir referanstır.

3.4.5 İş emri dönüş hızı

İş emri dönüş sayısı = Tamamlanan iş emri sayısı / Alınan iş sayısı (20)

Eldeki yapılması gereken işlerin ne kadarının yapıldığının göstergesidir. Gerek bakım bölümündeki gerekse üretim bölümündeki ani değişikler öncelikleri değiştirebilir ve yapılacak işlerin ertelenmesine ya da vazgeçilmesine neden olabilir (20). Bazen de programlamadaki hatalar işin yapılması için gerekli şartları sağlayamadığından iş yapılamaz.

Düşük iş emri dönüş hızı bir süreklilik gösteriyorsa işletmede planlı çalışma kültürünün oluşmasında önemli eksiklerin olduğu anlamına gelir.

Dünya sınıfı hedef seviyesi > %95 dir.

3.4.6 Karşılanamayan iş hacmi

Bekleyen işler yüzdesi = Bekleyen görev sayısı / Alınan görev sayısı (21)

Bakımları gerçekleştirmeden sorumlu olan Atölye, çeşitli nedenlerle iş emirlerini yapamaz. Buna genellikle; üretim bölümünün plansız talepleri (özellikle ekipmanın bakıma hazır edilememesi gibi, beklenmeyen iş gücü kayıpları, Atölye ekipmanların bozulması, dış servislerdeki gecikmeler, beklenmedik mevsim şartları vb. gibi sebepler neden olur (21).

3.4.7 Uygulama kalitesi

Uygulama Kalitesi = Yeniden yapılması gereken işler / Toplam yapılan işler (22)

Bakımlar yetersiz kalitede yapıldığında, bekleneni karşılayamazsa; yeniden yapılması gerekir. Kalitesiz malzeme, orjinal olmayan yedek parça, yetersiz takım, eğitimsiz personel, iyi projelenmemiş değişiklikler nedenlerden bazıları olarak karşımıza çıkar(22).

Dünya sınıfı hedef seviyesi <%3 dür.

3.5 Donanım Performansı Ölçütleri

3.5.1 Arıza sayısı

Sonuçlarına göre sınıflandırılmış arıza sayılarıdır. (Operasyonel, operasyonel olmayan, emniyet vb.) Arızaların sayılması bir çok bakım faaliyetinin değerlendirilmesinde kullanılır.

Ekipman başına düşen arıza sayıları, operator hatalarından oluşan arızalar gibi bir çok alanda arıza sayıları takip edilebilir.

3.5.2 Arıza sıklığı

Arıza Sıklığı = Arıza sayısı / Ölçüm zaman aralığı (23)

Birim zamandaki arıza sayısıdır (23). Bir güvenirlik ölçüsüdür.

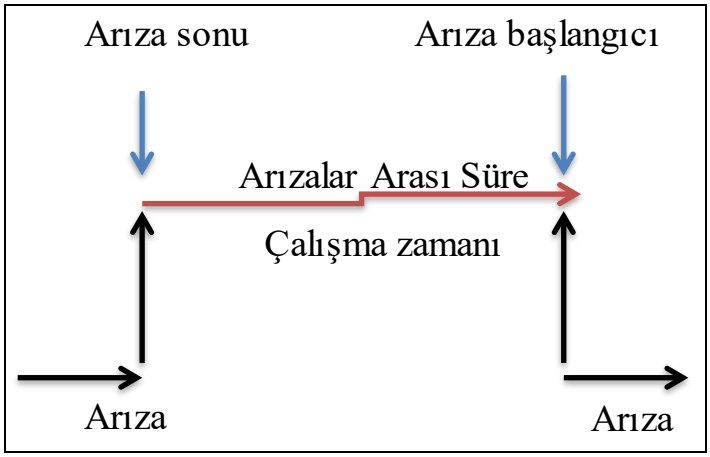
3.5.3 Arızalar arası ortalama süre (MTBF)

MTBF = Toplam çalışabilirlik süresi / Arıza sayısı (24)

MTBF ekipman güvenirliliğin temel bir ölçümüdür.Ortalama çalışabilirlik süresi veya arızalar arası ortalama süre olarak ifade edilir (24).

Arızalar arasındaki süre; iki plansız arıza arasındaki süre olup bir tamirden sonra

başlayıp bir sonraki arıza başlangıcına kadar devam eder. Şekil 1'de aralıklar ifade edilmektedir.



Şekil 1. Arıza zaman ilişkisi

MTBF değeri ne kadar büyükse, ekipmanın o kadar güvelinir olduğunu gösterir.

MTBF trendi en az bir yıllık bilgilere göre hesaplanan ortalama çizgisine göre izlenmelidir.

3.5.4 Kullanabilirlik(Av)

Ekipman Kullanabilirlik ölçümü ekipman performansını değerlendiren en önemli temel istatisliklerden biridir (Bkz. 2.1).

Ekipman kullanılabilirliği yukarıdaki anlatımı dışında şu şekilde de formüle edilebilir (25):

Av= MTBF / (MTBF + MTTR) (25)

MTBF = Ortalama çalışabilirlik süresi (24)
MTTR = Ortalama Tamir Süresi
MTTR = Toplam Duruş Süresi / Arıza Sayısı

şeklindedir.

3.5.5 Toplam donanım etkinliği(OEE)

OEE (%) = Kullanabilirlik x Performans Oranı x Kalite Oranı (26)

OEE (%) = Av x S x Q (26)

S= Gerçekleşen üretim miktarı / Planlanan Üretim Miktarı

Q= (Gerçekleşen üretim miktarı - Reddedilen miktar) / Gerçekleşen üretim miktarı

OEE Toplam Verimli Bakım staratejisi için önemli bir göstergedir. OEE üretim verimini ölçer (26). TEEP ise gerçek iş veriminin ölçülmesini sağlar.OEE hesaplanırken planlanan üretim zamanı esas alınır, yani planlanan üretimin ne kadarının gerçekleştiğinin bir ölçüsüdür. OEE hesaplarında duruşlar, performans hız kayıpları ve kalite kayıpları göz önünde bulundurulur. TEEP ise ilaveten takvim gününde çalışılmayan günleri de hesaba katar ve çalışma süresini yılda 365 gün olarak kabul eder.Bu nedenle TEEP bir tesisin gerçek üretim verimidir.

Toplam Donanım Etkinliği, donanımın üretimde yarattığı katma değerin bir ölçüsüdür.Yapılan araştırmalara göre, dünya standartlarında üretim yapan firmaların toplam donanım etkinliği oranının en az %85 olması gerektiği belirlenmiştir.

Çeşitli endüstrilerde üst seviye OEE ve TEEP değerleri Çizelge 4'de verilmiştir:

Çizelge 4. Endüstride OEE ve TEEP değerleri

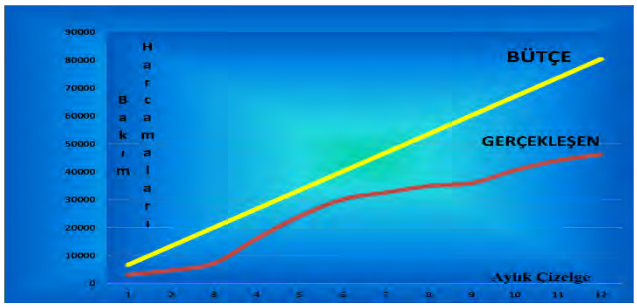
Endüstri	OEE	TEEP Toplam OEE
İmalat	%85	%60
Proses	>%90	>%68
Metalurji	%75	%55
Kağıt	%95	>%70
Çimento	>%80	%60

3.6 Maliyet Performansı Ölçütleri

3.6.1 Doğrudan bakım maliyeti

Toplam Düzeltici ve Önleyici Bakım Maliyetleridir. Hazırlanan bütce değeri kıyaslanarak takip edilir. Doğrudan bakım maliyetlerinin takibi bütcenin aşılmaması için önemlidir.

Doğrudan bakım maliyetleri alt maliyet gruplarına göre de takip edilebilir. Her ekipman için ayrı bakım masrafı, masraf merkezine bakım masrafı vb. gibi. Şekil 2'de örnek bir takip görülmektedir.



Şekil 2. Bakım maliyetinin trendi

3.6.2 Duruşun önem derecesi

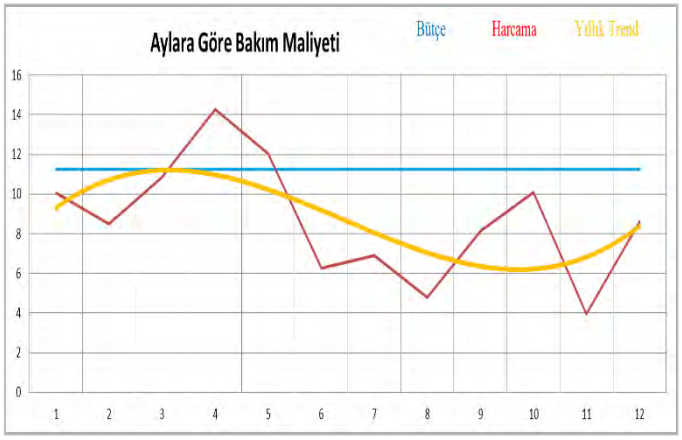
Duruşun önem derecesi = Duruş Maliyeti / Doğrudan Bakım Maliyetleri (27)

Bir ekipmanın arızası sebebiyle oluşturduğu maliyetin, doğrudan bakım maliyetleri içerisindeki oranıdır (27). Özellikle pareto analizlerinde kullanılır.

3.6.3 Bakım masraf yoğunluğu

Bakım masraf yoğunluğu = Bakım Maliyeti / Toplam Üretim Miktarı (28)

Belirli bir dönemde üretilen ürünlerin birim başına bakım maliyetidir (28). Üretim maliyetinin aşılmaması için bakım maliyetleri şirketlerin satış politikalarını doğrudan etkiler, bu nedenle bakım masraf yoğunluğunun takibi son derece önemlidir. Şekil 3'de örnek bir birim maliyet karşılaştırması bulunmaktadır.



Şekil 3. Bütçeye göre bakım masraf yoğunluğu

3.6.4 Bakım maliyeti yüzdesi

Bakım Maliyeti yüzdesi = 100 x Bakım Maliyetleri /Toplam Üretim Maliyeti (29)

Bakım maliyetlerinin toplam maliyetlerdeki oranıdır (29). Bütçe belirlemede önemli bir veridir.

Dünya sınıfı hedef seviyesi <%10-15 dir.

3.6.5 Donanım değiştirme değeri(ERV)

ERV= Ekipman bakım masrafları / Yeni ekipman değeri (30)

Bir ekipmanın toplam bakım maliyetlerinin, yenisiyle değiştirme maliyetine oranıdır (30). En iyi uygulama kıstası dünya sınıfı hedef seviyesi %2-9 olarak kabul edilir.Bir maden firmasının 11 ayrı bölgesinde yapılan araştırmaya göreyse, ERV değeri %18-36 arasında gerçekleşmiştir. Bu değerde maden sektörü, daha gerçekci görünmektedir.

3.6.6 Bakım stok devir hızı

Bakım Stok Devir Hızı = Bakım faaliyetlerinde kullanılan stok malzemelerin maliyeti / S_{ort} (31)

S_{ort}= (Dönem başı stok miktarı + Dönem sonu stok miktarı) /2

Bir dönem (periyot) içerisinde stoktan kullanılan malzemelerin maliyetinin oranıdır. Bakım Stoğu devir hızı belirli bir hesap dönemi için yapılır.Bakım Stoğu Devir Hızının yüksek olması faydalıdır ancak genelde <2 kabul görür.

3.6.7 Personel maliyeti yüzdesi

Personel Maliyeti Yüzdesi = Personel Maliyeti / Toplam Bakım Maliyeti (32)

Bakım bölümünde çalışan personelin işçilik maliyetlerinin toplam bakımdaki yeridir(32).

3.6.8 Taşeron maliyeti yüzdesi

Taşeron maliyeti yüzdesi = Taşeron Maliyeti / Toplam Bakım Maliyeti (33)

3.6.9 Malzeme maliyeti yüzdesi

Malzeme maliyeti yüzdesi = Malzeme Maliyeti / Toplam Bakım Maliyeti (34)

4 TEEP HESAPLARI

Yukarıda anlatılmış olan bakım performans göstergeleri ve de zaman çizelgesini kullanarak yapılan hesaplamalar haricinde; şirket karlılığını doğrudan ilgilendiren toplam etkin ekipman performansıdır. OEE'nin bir fonksiyonu olan TEEP hesabı şu şekilde formüle edilmiştir (35):

OEE (%): Toplam Ekipman Etkinliği
OEE = Av x S x Q (35)
Av: Kullanabilirlik,
S: Performans Oranı,
Q: Kalite Oranı

TEEP: Toplam Etkin Ekipman Performansı
TEEP= P x OEE (36)

S= Performans Oranı =100*(C-Kd)/ C
S = 100*(Net Üretim Zamanı – Hız Kayıpları) / Net Üretim Zamanı
S= 100*Dt/C
S= 100*(Gerçekleşen Üretim için kullanılan zaman / Net Üretim Zamanı)
P:Planlama Göstergesi
P(%)= 100*B/A= 100*(A-Kb)/A
P = 100*(Toplam Teorik Üretim Zamanı – Programlanmış Üretim Duruşları) / Toplam Teorik Üretim Süresi
Q: Kalite Oranı
Q = 100*E/D
Q=100*(Satılabilir Üretim Miktarı / Gerçekleşen Üretim Miktarı)
Q= 100*(D-Kd)/ D
Q= 100*(Gerçekleşen Üretim Miktarı – Kalite Kayıpları) / Gerçekleşen Üretim Miktarı

5 YÖNETİCİLER İÇİN GÖSTERGELER

Yöneticiler için öncelikli olarak izlenmesini tavsiye ettiğimiz anahtar performans göstergeleri, üç ayrı yönetim noktası için aşağıdadır:

5.1 İşletme Yöneticisi

•Toplam birim üretim masrafı
•Toplam tesis/ekipman etkinliği, (OEE)
•Toplam etkin tesis/ekipman performansı (TEEP)
•Toplam üretim miktarı (Bütceye göre kıyaslamalı)

5.2 Üretim Yöneticisi

•Toplam birim üretim masrafı
•Toplam tesis/ekipman etkinliği, (OEE)
•Toplam üretim miktarı (Bütceye göre kıyaslamalı)
•Ekipman kullanım oranı
•Ekipman verimliliği
•Bakım masraf yoğunluğu
•Ekipman değiştirme değeri (ERV)
•Toplam tesis için MTBF (Duruşları Arası Ortalama Süre)
•Bekleyen işler yüzdesi (Üretim bölümünün bakım bölümüne yaptığı talepler için)

5.3 Bakım Yöneticisi

•Ekipman kullanabilirliği
•Bakım masraf yoğunluğu
•Bakım maliyeti yüzdesi
•Doğrudan bakım maliyeti (Bütceye göre kıyaslamalı)
•Ekipman değiştirme değeri (ERV)
•Proaktif ve Reaktif iş yüzdesi
•Planlama tepkiselliği
•Programlama yoğunluğu
•Programa uyum
•Ortalama tamir süresi (MTTR)
•Arızalar arası ortalama süre (MTBF)
•Bekleyen işler yüzdesi
•Uygulama kalitesi (Yeniden yapılan işler yüzdesi)
•Bakım stokları devir hızı

6 DEĞERLENDİRME

Bakım yönetimi için günümüz teknolojisi ve artan üretim taleplerini karşılayabilmenin en önemli fonksiyonlarından birisi de artık, ölçme ve değerlendirmedir. Ölçme için elimizde her ne kadar referans değerler bulunsa da; sektörel baz da ya da mikro değerlendirme için firma bazında ölçüt değerler değişkendir. Bu noktada firmalar kendileri için en doğru referans değerleri yaratmalıdır. Verimli bir bakım sistemi oluşturmak isteyen firmalar bu konuda iyi bir planlama ve bunun fonksiyonu olarak da performans değerlerini sağlıklı olarak ortaya koyabilme üzerine profesyonellik kazanmalıdır. Günümüz dünya şartlarında rekabetçi olabilmek için, artan ihtiyaçlardan birisi de zamandır. Bakım performanslarının artması, doğrudan üretim performansına etki eder ki; bu da firmalar adına potansiyel verimliliği arttırır.

Ölçmediğin şeyi kontrol edemezsin; kontrol edemediğini de yönetemezsin" Drucker P.

KAYNAKLAR

Gulati, R. (2.versiyon), 2012. *Maintenace and Reliability Best Practice*, Industrial Press Inc., New York, s.283-308.

Smith, R., Mobley, R.K. 2008. *Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers*, Butterworth Heinemann, Burlington, s.89-104.

Uzun, A. 2011. *Bakım Planlaması Teknikleri ve RCM*, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, s.118-123.

Muchiri, P. 2010. *International of Production Economics* ,Elsevier. s.10-1016

Wauters, F., Mathot, J. 2002. Overall Eqipment Effectiveness (3BUS094188R0001 ABB Inc.), s.1-26, Ohio.

Tüprag Efemçukuru Yeraltı Altın Madeninde Havalandırma Takip ve Kontrol Sisteminin Otomasyonu

Tuprag Efemcukuru Underground Gold Mine Ventilation Automation of Tracking and Control System

G. Cingöz, İ. İleri
Tüprag Efemçukuru Altın Madeni, İzmir

ÖZET Yeraltı madenciliğinde güçlü ve kontrollü bir havalandırma sisteminin bulunması; personelin emniyetli ve güvenli bir ortamda çalışmalarını sağlamaktadır. Kaliteli bir havalandırma sistemi için gerekli tüm veriler eksiksiz bir şekilde toplanarak gerekli ekipman ve havalandırma sistemi oluşturulmalıdır. Uygun kalite ve miktarda hava sağlamak için öncelikle maden içerisinde havanın hareketli hale getirilmesi, sonrasında kurulan havalandırma sisteminin takip edilip sonuçlarının raporlanması gerekmektedir. Bu sistematik ile birlikte madenler için kritik öneme sahip havalandırma sistemleri emniyetli bir şekilde yönetilmiş olacaktır. Günümüzde bu amaçla karmaşık havalandırma şebekelerinin çözümünde bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Gerekli yere, gerekli zamanda, gerektiği kadar havayı yönlendirme prensibine dayanan Talep Kontrollü Havalandırma (TKH) sistemlerinin yeraltı metal madenciliğinde kullanımı oldukça yeni olup, enerji maliyetlerinde ciddi bir düşüş sağlama potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir. Bu bildiride, Efemçukuru Altın Madeni mevcut havalandırma sisteminin bilgisayar yazılımı ile analizi ve oluşturulan acil durum simülasyonları ile yeraltında kullanılan tali fanlara TKH sisteminin uygulanması ve otomasyonu hakkına bilgiler verilmiştir.

ABSTRACT A powerful and controlled ventilation system in underground mining ensures that the personnel work in a safe environment. All the required data for a quality ventilation system must be collected precisely to build the ventilation system and to obtain the required equipment. In order to provide high quality and correct amount of air flow, primarily it is required to make the air move inside the mine and then to observe the ventilation system and report its results. With this method, ventilation systems that have critical importance for all mines will be managed securely. Today, for this purpose, different software tools are used to manage complex ventilation networks. It is known that Demand-Controlled Ventilation (DCV) systems, which are based on the principle of air guidance as needed, are quite new to use in underground metal mining and have a potentially significant reduction in energy costs. In this study, analysis of Efemcukuru Underground Gold Mine ventilation with computer software, using DCV on secondary fans with emergency simulations are presented.

1 GİRİŞ

Yeraltında çalışan personelin sağlıklı ve emniyetli operasyonlarını yürütebilmesi için mevcut havalandırma sisteminin stabil çalışması ve takibi gereklidir. Bu sebeple yeterli kaynak tahsisi yapmak her maden için geçerlidir.

Havalandırmadaki temel şart olarak istenen yasal standartların yerine getirilmesinin yanı sıra, havalandırmada kullanılan ekipmanlar kullanım amaçlarına

uygun olmalıdır. Diğer bir deyişle, havalandırmada kullanılan herhangi bir ekipman veya malzeme, onaydan geçmiş olmalı ve imalatçı firmanın tavsiyeleri doğrultusunda kullanılmalıdır. Havalandırma ile ilgili görevlerini ifa eden personel, yeterli düzeyde eğitimden geçmiş olmalı ve havalandırma ekipman ve malzemelerinin doğru kullanımına haiz olmalıdır. Bunun yanı sıra, işletme de spesifikasyonların belgelenmesi, havalandırma ekipmanı ve malzemelerinin kulanılması için kaynak tahsis etmeli ve talimatları geliştirmelidir. Akabinde, yetkin eğitmenler sağlayarak operatörleri bu talimatların kullanımıyla ilgili eğitmek ve değerlendirmeye tabi tutmak işletmelerin sorumluluğundadır.

Sağlam bir havalandırma stratejisinin uygulaması için, uygun ve yüksek kaliteli verilerin toplanması esastır. Havalandırma çalışmalarında kullanılmak üzere hangi tür verinin toplanabileceği veya toplanması gerektiğini belirlemeye zaman ayrılmalıdır.

Risk kavramı, havalandırma stratejisinde bütünleyici bir bölüm teşkil eder ve stratejinin uygulanması sürecinde personel ve ekipmana yönelik risklerin azaltılması hep göz önünde bulundurulur. Havalandırma yönetimi sistemleri, mümkün olduğunca en yüksek tehlike kontrolü uygulamasıyla birlikte öğretilmelidir.

Planlama aşaması aşağıdaki faaliyetlerden oluşur:

- Maden dizaynı ve üretim planına ait verileri toplamak;
- Madencilik yöntemi ve ekipman opsiyonlarını belirlemek;
- Üretime bağlı hava miktarını belirlemek;
- Havalandırma sistemini tasarlamak, yardımcı ekipmanları tanımlamaktır.

Madencilik dinamik bir işlemdir ve bu yüzden yapılan uygulamaların stabil kalması beklenemez. Şartların değişmesi ya da yeni yöntemler veya ekipmanların devreye girmesi durumunda havalandırma planları tekrardan gözden geçirilmeli ve varsa gerekli değişiklik ve düzenlemeler yapılıp konu hakkında personel eğitilmelidir.

Havalandırmanın kalitesi için kontroller operatörler ve amirler tarafından her çalışma alanına girildiğinde yapılmalıdır. Karşılaşılan sorunlar ilgili amirlere bildirilmeli ve sorunlar en kısa süre içerisinde düzeltilmelidir. Vardiya başlarında ve toplantılarda sistem hakkında konuşulmalı gerekli eksiklikler tespit edilmeli düzeltmeler yapılmalıdır.

2 VENTSIM MODELLEME

2.1 Maden Hava İhtiyacı

Ventsim yazılım modellemesinin ilk adımı ihtiyaç analizidir. Maden ömrü boyunca yapılacak üretimin planlarına göre kaynaklar (diesel ekipmanlar) belirlenmelidir. Belirlenen bu kaynaklar motor sınıflarına göre ve kapasitelerine (güçlerine) göre sınıflandırılmalıdır. Tüm bu kaynakların maksimum ve kullanım oranlarına göre hava ihtiyacı belirlenir. Toplam ve senaryolara göre belirlenmiş hava ihtiyaçlarına göre modellemeler ve analizler yapılır.

İlgili düzenlemelere göre, Efemçukuru Altın Madeni'nde kullandığımız motor tiplerinde (tier3-tier4) 1 kW'lık motor gücü 0,04-0,06 m^3/s hava gerektirir. Buna göre Çizelge 1'de gösterildiği gibi Efemçukuru'nda bir üretim vardiyasında kullanılan ekip ve ekipman için gerekli hava ihtiyacı ortalama 100,15 m^3/sn maksimum 250 m^3/sn kadardır. Bir çalışma lokasyonunda en fazla (nakliye esnasında) 15 m^3/sn hava gerekmektedir.

2.2 Tasarım ve Modelleme

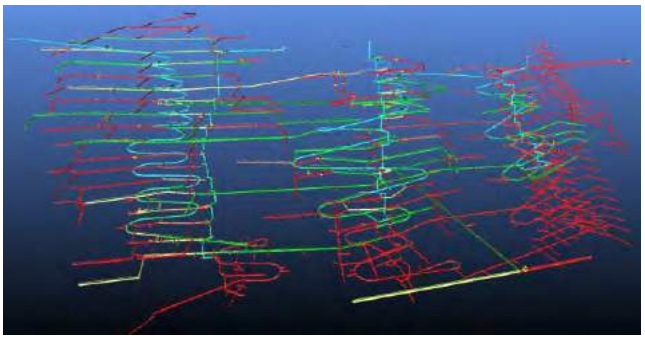
Tasarım ve modellemede istenen miktarda havanın, geometrisi belli galerilerde akışını sağlamak esastır. En temel metot istenen debi için toplam sistem basıncı hesaplanarak gerekli mekanik seçimlerinin yapılmasıdır. Sistem basıncı bulunduktan sonra değerlere uygun seçim yapılır, en uygun ekipmanı bulana kadar devam edilir. Modelleme aşamasında tüm veriler VENTSIM yazılımı kullanılarak önce 3 boyutlu modellenir. Ardından mekanik seçimler dahil tüm parametreler ilgili programa girilerek (Şekil 1, 2, 3, 4, 5, 6) sayısal modelleme yapılır. Tali havalandırma içinde aynı çalışma söz konusudur.

Çizelge 1. Maden hava ihtiyacı

	Ortalama	Verim	Gereken Havalandırma	Gereken Toplam Havalandırma
EKİPMAN TANIMI	**ROE %**	**Kw**	**m3/sn**	**m3/sn**
Atlas Copco H282 D18 Jumbo (motor) 1	11	120	7.2	0.79
Atlas Copco H282 D18 Jumbo (motor) 2	11	120	7.2	0.79
Atlas Copco H282 D18 Jumbo (motor) 3	8	120	7.2	0.58
AYNA DELİCİ EKİPMAN				
Atlas Copco Simba H1254	4	65	3.9	0.16
KATLAR ARASI DELİCİ EKİPMAN				
Sandvik LH410 UG Kepçe	52	220	13.2	6.86
Sandvik LH307 Kepçe	19	150	9	1.71
Sandvik LH307 Kepçe 06	42	150	9	3.78
Sandvik LH410 UG Kepçe 2	60	220	13.2	7.92
YERALTI YÜKLEYİCİLER				
Sandvik TH 30SX Kamyon 2	65	240	14.4	9.36
DUX DT-33N Dump Kamyon 3	60	400	24	14.40
Sandvik TH 430 Kamyon 4	30	315	18.9	5.67
Sandvik TH 430 Kamyon 5	44	315	18.9	8.32
Sandvik TH 430 Kamyon 6	39	315	18.9	7.37
YERALTI KAMYONLARI				
Normet Spraymec 1050 WPC	25	110	6.6	1.65
Sandvik DS 421 CABLE BOLTER	4	110	6.6	0.26
Normet Utimec MF 500 Transmikser	38	110	6.6	2.51
TAHKİMAT				
Normet Charmec 1605B Anfo	33	110	6.6	2.18
Normet RBO 4x4 Servis Aracı 2	26	96.5	5.79	1.51
PATLAYICI ARACLARI				
Normet Multimec MF 100 Taşıyıcı 1	25	110	6.6	1.65
Normet Multimec MF 100 Taşıyıcı 2	24	110	6.6	1.58
Normet Multimec MF 100 Taşıyıcı 3	44	110	6.6	2.90
Normet Multimec MF 100 Taşıyıcı 4	3	110	6.6	0.20
Normet Utilift MF 540 Platform 1	34	110	6.6	2.24
Normet Utilift MF 540 Platform 2	41	110	6.6	2.71
Manitou MT 1440 1	26	101	6.06	1.58
Manitou MT 1440 4	20	101	6.06	1.21
Komatsu WB93R-5 Backhoe 4	20	74	4.44	0.89
Komatsu WB93R-5 Backhoe 5	26	74	4.44	1.15
Manitou JCB	7	101	6.06	0.42
Normet Grayder-001	38	110	6.06	2.30
JCB 540-170 LOADALL	25.7	81	4.86	1.25
Manlift 001	8	81	4.86	0.39
Normet RBO 4x4 Servis Aracı-2	24	96.5	5.79	1.39
YERALTI SERVİS				
Normet MF 404 CABLE REEL	12	110	6.6	0.79
Normet RBO 4x4 Servis Aracı 1	18	96.5	5.79	1.04
Normet RBO 4x4 Servis Aracı 4	11	96.5	5.79	0.64
MOBİL BAKIM EKİPMANLARI				
TOPLAM GEREKLİLİK				100.15

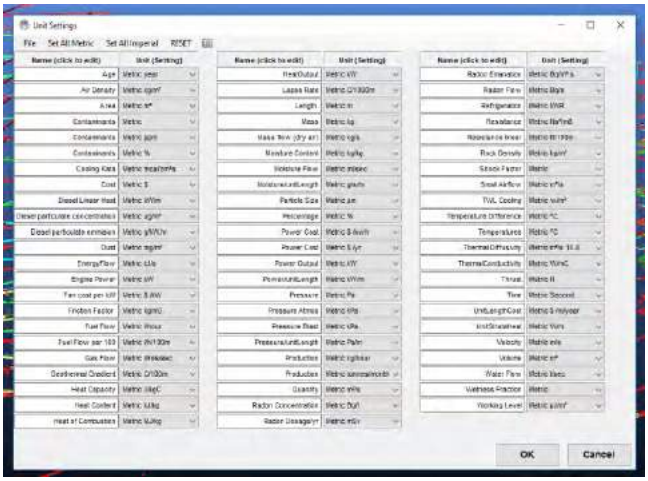
2.2.1 VENTSIM nümerik modelleme ve veri girişi

Birinci adım olarak maden dizaynı model yapılacak yazılım olan VENTSIM yazılımına atılır ve 3 boyutlu hale getirilir.

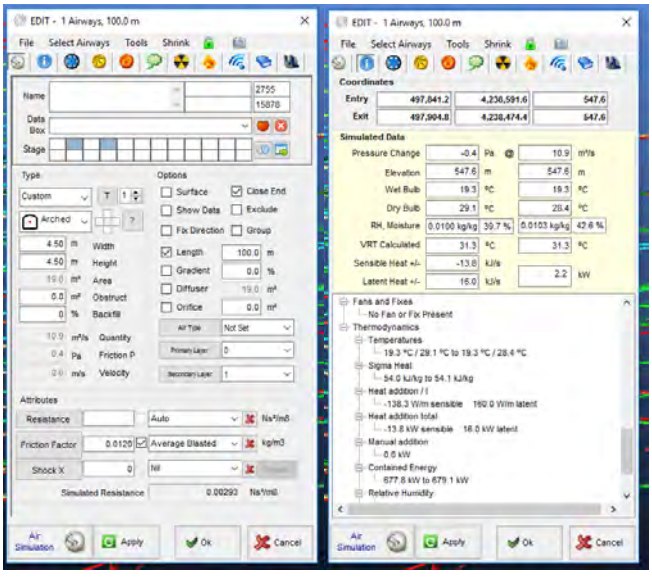


Şekil 1. Efemçukuru Altın Madeni Ventsim Modellemesi

İkinci adım olarak havalandırma için gerekli olan toplanmış veriler yazılıma girilir.

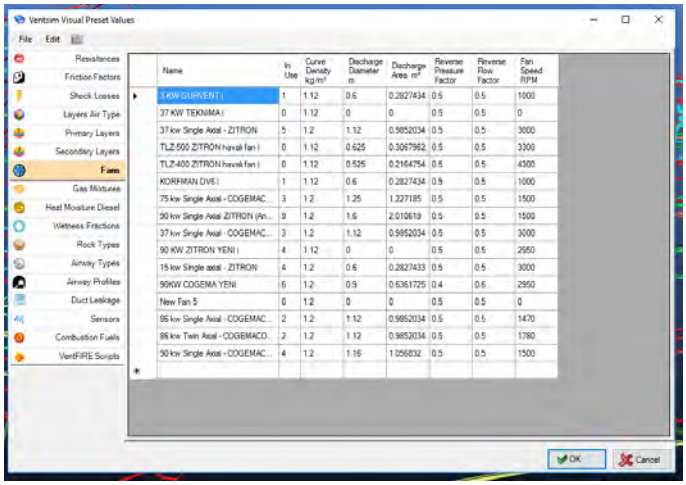


Şekil 2. Ventsim veri girişi

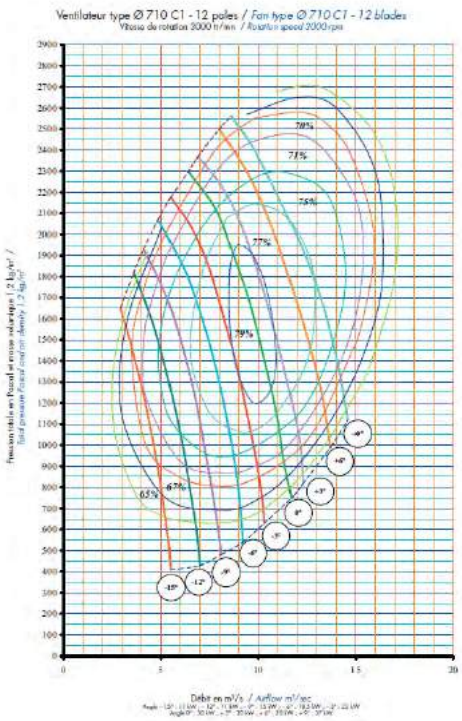


Şekil 3. Ventsim veri girişi

Üçüncü adım olarak ihtiyaca göre yapılan mekanik seçimler yazılıma girilir.

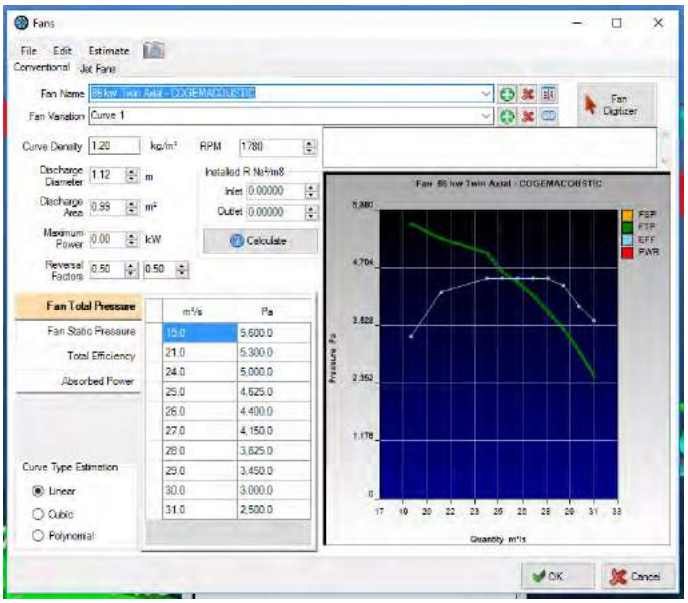


Şekil 4. Ventsim mekanik veri girişi

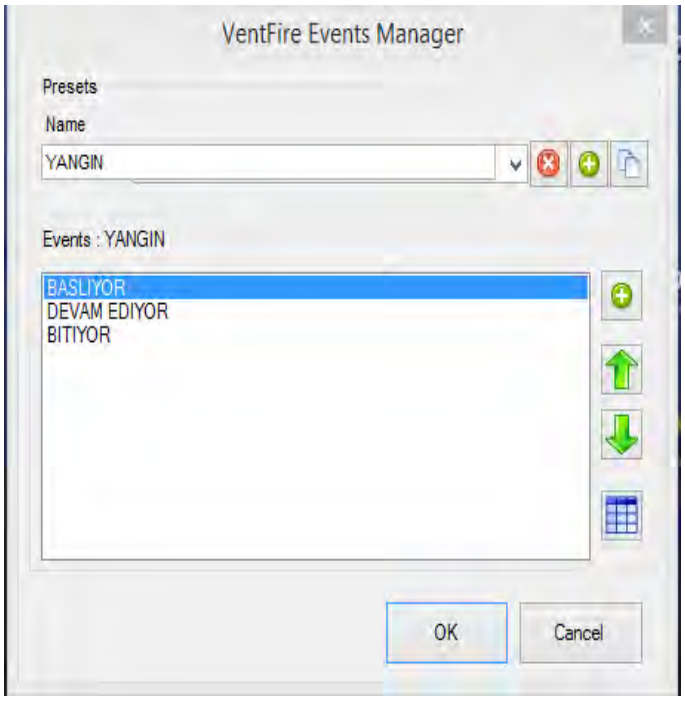


Şekil 5. Fan eğrisi

Tüm bu parametrelerin girilmesi ardından sistem çalıştırılarak model tamamlanır. Maden ömrü için havalandırma tasarımı yapılmış fan seçimleri doğrulanmış olur. Nihayete ulaşan stope dizaynlarına göre benzer çalışmalar sadece küçük ölçekte yapılır. Maden ömür planında üretim metotları ve yaklaşık stope geometrileri belli olduğundan bu kabullere göre ikincil havalandırma hesaplamaları aynı metotlar kullanılarak yapılır, kullanılacak fanlar ve çeşitleri belirlenir.



Şekil 6. Ventsim fan veri girişi



Şekil 7. Ventsim simulasyon veri giriş alanları

2.3 Acil Durum Simülasyonları

Acil durum simülasyonları maden acil durum kaçış planlarının temelini oluşturur, havalandırma merkezli (yangın vs) tüm acil durumların risk analizlerinin de temelini yine yangın simülasyonları oluşturmaktadır.

A- Yangın yüklerinin hesaplanması;

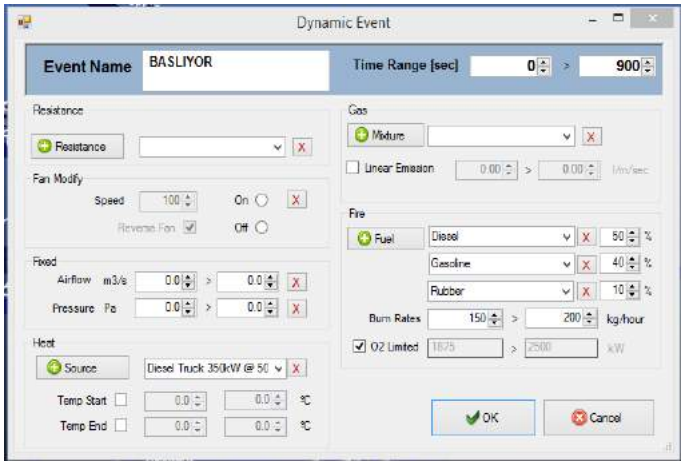
Olası en büyük senaryolarda toplam yükler hesaplanır, bu hesaplar için bazı tanımların ve kabullerin yapılması gerekir, bunlar;

- Yanıcı maddelerin cinsleri (hidrolik, kauçuk, diesel)
- Yanıcı Maddelerin miktarları (Örneğin LH410 kepçe üzerindeki miktarları)
- Kg/m²-sn cinsinden emisyon değerleri (Uluslararası kabul görmüş emisyon değerleri)
- Yangının geometrisi (3 aşamada gerçekleşen bir yangın ve lokal yanma miktarları)

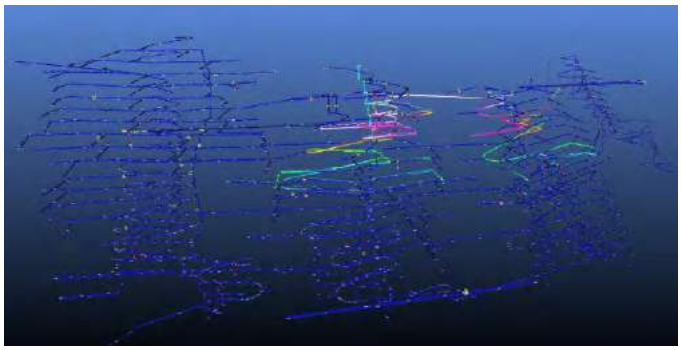
B- Simüle edilmesi;

Öngörülen geometride belirlenen cinsler, miktarlar ve değerler kullanılan yazılıma girilerek simülasyon yapılır. (Şekil 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13)

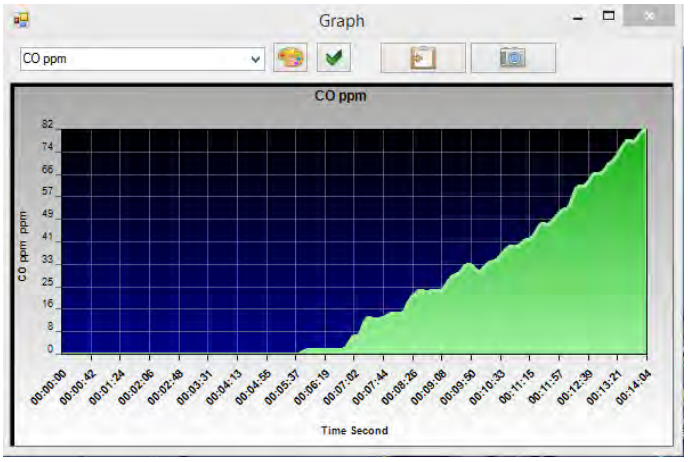
Simülasyonda kullanılan tüm izleme noktalarında ilgili veriler alınmaya ve kaydedilmeye başlanır;



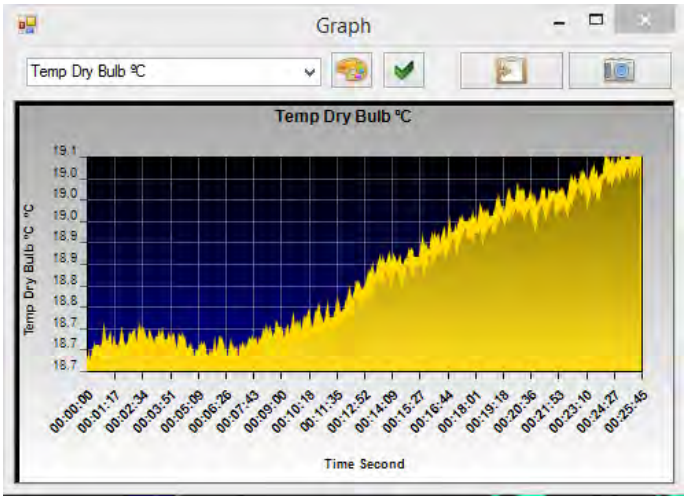
Şekil 8. Ventsim simulasyon veri giriş alanları



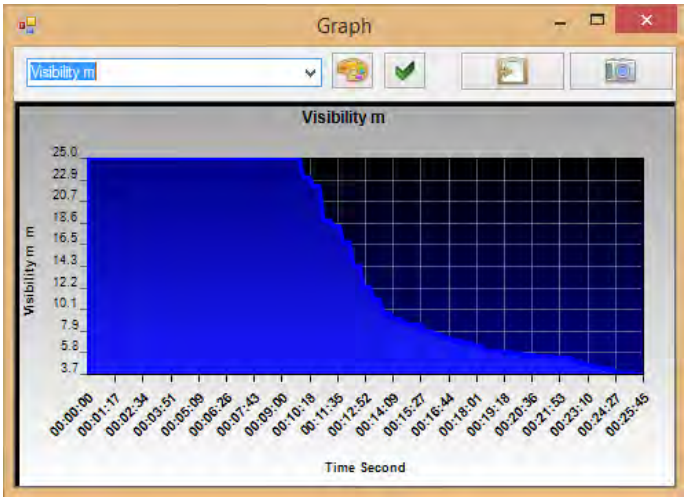
Şekil 9. Ventsim yangın simülasyonu



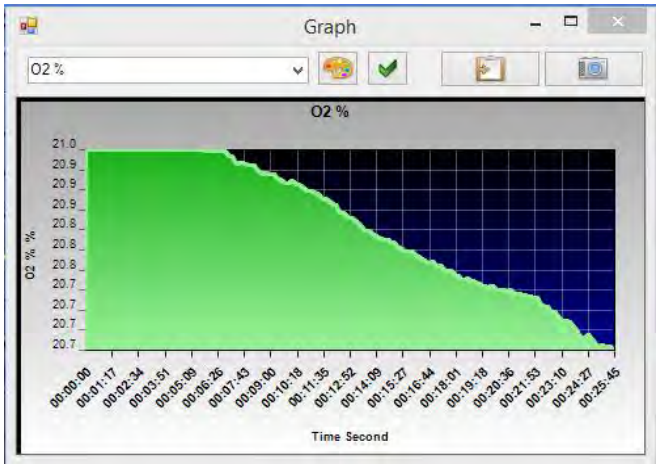
Şekil 10. Yangın simulasyonu izleme değerleri (CO değerleri)



Şekil 11. Yangın Simulasyonu İzleme Değerleri (Sıcaklık değerleri)



Şekil 12. Yangın Simulasyonu İzleme Değerleri (Görüş mesafe değerleri)

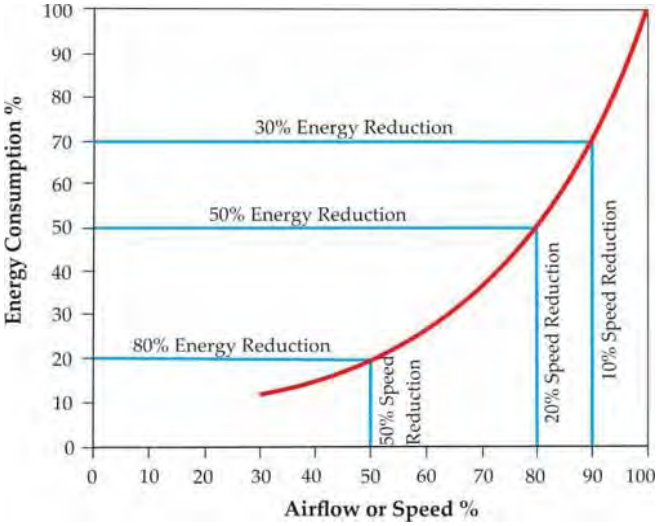


Şekil 13. Yangın simulasyonu izleme değerleri (O2 değerleri)

3 FANLARIN OTOMASYONLA KONTROLÜ (2306 KW)

Dünya üzerinde yenilenebilir enerji teknolojileri her ne kadar önemliyse üretilen enerjinin de ihtiyaçlara göre en verimli şekilde kullanılması toplumsal bir görevdir. Fanlar ve çalışma prensiplerinde TKH için kapasite değiştirilmesi parabolik olarak enerji tasarrufu sağlamaktadır. (Şekil 14, A. Gönen, DEU, 2018)

Bu kapsamda Tüprag Efemçukuru Yeraltı Altın Madeni'nde kurulu güç 2306 kW olan fanlar için talep kontrollü havalandırma sistemi'ne geçilmesi karar verilmiştir.



Şekil 14. Fan kapasite ve enerji tüketim eğrisi

Verilen karar sonrası projelendirme yapılmış olup Efemçukuru Altın Madeni'nin farklı galeri tipi ve farklı ekipmanlar için tali fanların otomatik olarak devreye girip

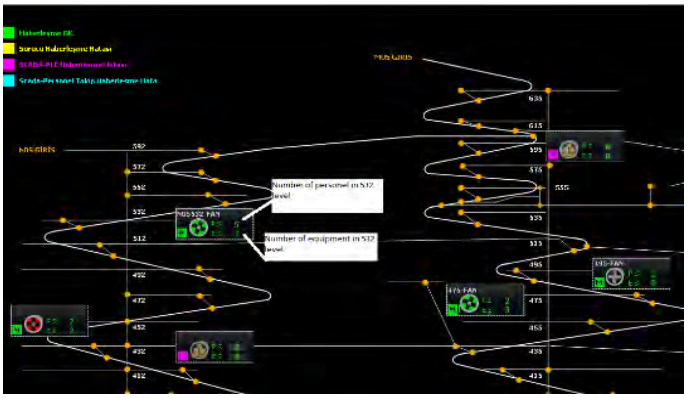
durması amaçlanmıştır. Hava debisi, galerilerde çalışan personel sayısına, araçların ve ekipmanların çeşidi ve sayısına göre değişmektedir.

Personelden, araçlardan ve ekipmanlardan gerçek zamanlı veri yakalamak için Wi-fi veya RFID alyapısı gereklidir. Efemçukuru Altın Madeni'nde sınırsız kapsama alanı için Wi-fi tercih edilmiştir. Bununla birlikte fiber optik alt yapısı madenin büyük bir bölümünü kaplamaktadır. Yeraltında çalışan tüm personel, araç ve ekipmanlar üzerinde izleme cihazları bulunmaktadır.

Proje kapsamında Cogema ve Zitron markalı değişik kapasite fanların panoları tekrar revize edilmiştir. Fan besleme panolarında fanın istenilen kapasitede çalışmasını sağlayan değişken frekanslı tahrik cihazları (VFD) ve fandan istenilen bilgiyi almaya yarayan PLC makinalar bulunmaktadır.

Fanların otomasyonlu kontrolü ve yönetiminde ise SCADA WinCC yazılımı şirket ağında mevcut durumda çalışmaktadır. VFD ve PLC üzerinde otomasyon algoritması kurularak denemeler yapılmıştır.

Denemeler sonrası personel, araç ve ekipman ihtiyaçlarına göre fanların çalışma kapasiteleri hesaplanmıştır. Kritik düzeyde motor gücü yüksek ekipmanlar için fanlar %100 kapasitede, servis ve delgi ekipmanları için %80 kapasitede, hafif araçlar için %50 kapasitede, personel araç veya ekipman olmaması durumunda ise fanlar duracak şekilde hesaplamalar sonucu algoritma güncellenmiştir.



Şekil 15. Fanların kontrol arayüzü

SCADA üzerinden kontrolü sağlanan yazılımda (şekil 15) kat içerisinde kaç personel ve ekipman çalıştığı görülmekte ve ikincil fanları çalışma durumları gözlenebilmektedir. Ayrıca manuel olarak fanlar bu arayüzden kontrol edilebilmektedir.

Otomasyon sistemi bir personel, araç veya ekipman kata giriş yaptığında Cisco Erişim noktasıyla üzerlerinde bulunan izleme cihazı iletişime geçmektedir. Cisco erişim noktası almış olduğu bilgiyi SCADA'ya gönderir. PLC verileri işler ve çalışma değerini fan üzerindeki VFD cihazına gönderir. Sisteme girilen algoritmaya göre fan kapasitesini ayarlar. Personel, araç veya ekipman kat içerisinde kaldığı sürece fan asla durmaz. Ancak kat içerisinde izleme cihazından veya cihazlarından veri alınamadığı anda fan çalışmayı durdurur. Wi-fi sisteminde veya SCADA siteminde sorun olması durumunda fanlar otomatik %100 kapasitede çalışmaya devam eder.

Hedef olarak yeraltında kurulu yük olarak kullanılan 2306 kW enerjinin yapılan testler sonucunda min. %25 iyileştirilmesi beklenilmektedir.

4 SONUÇ

Simülasyonlar yapılır, kritik bölgelerdeki kayıtlar irdelenir ve değerlendirmeye ihtiyaç duyulan tüm veriler incelenir, bu incelemelerden çıkan sonuçlar tüm acil durum ve havalandırma stratejilerine temel oluşturur.

Uzun ve kısa dönem planlamalara göre havalandırma ve acil durum planları oluşturulur. Belirli bir oluşturulma periyodları olmamakla birlikte ocak havalandırmasını ve acil durumları değiştirebilecek durumlarda güncellenmesi esastır. Bu planlarda esas üretim önceliklerine tüm emniyet önlemlerine riayet edecek şekilde hizmet etmesidir. Tüm hesaplamalar ve veri analizleri sonucunda verimli olarak kullanılmayan enerji otomasyon sistemleri ile daha kullanılabilir hale dönüştürülür.

Proje kapsamında Hedef olarak yeraltında kurulu yük olarak kullanılan 2306 kW enerjinin yapılan testler sonucunda min. %25 iyileştirilmesi beklenilmektedir (Çiz. 2).

Çizelge 2. Yeraltında kullanılan fan enerji tüketimleri ve beklenen tasarruf

KAT	FAN KW	FAN VERİM KW	HAFTALIK ÇALIŞMA SAATİ	TAM KAPASİTE HAFTADA HARCANAN	FAN KAPATILIRSA ÇALIŞMA SAATİ	TÜKETİM KW	FARK TL/YIL
670	37	35.89	168	2050	120	4307	30458
650	15	14.55	168	831	168	2444	0
630	90	87.3	168	4987	100	8730	104956
590	37	35.89	168	2050	168	6030	0
550	90	87.3	168	4987	120	10476	74086
530	90	87.3	168	4987	168	14666	0
510	37	35.89	168	2050	144	5168	15229
430	90	87.3	168	4987	72	6286	148173
410	15	14.55	168	831	168	2444	0
370	90	87.3	168	4987	168	14666	0
590	37	35.89	168	2050	168	6030	0
595	86	83.42	168	4765	1	83	246303
555	75	72.75	168	4155	1	73	214799
555	15	14.55	168	831	168	2444	0
535	15	14.55	168	831	168	2444	0
495	86	83.42	168	4765	100	8342	100291
475	90	87.3	168	4987	100	8730	104956
435	37	35.89	168	2050	1	36	105967
375	90	87.3	168	4987	168	14666	0
355	90	87.3	168	4987	120	10476	74086
552	37	35.89	168	2050	168	6030	0
532	75	72.75	168	4155	50	3638	151774
KBNW	90	87.3	168	4987	168	14666	0
452	90	87.3	168	4987	168	14666	0
432	90	87.3	168	4987	168	14666	0
412	172	166.84	168	9530	168	28029	0
NOS	180	174.6	168	9973	168	29333	0
MOS	180	174.6	168	9973	168	29333	0
SOS	180	174.6	168	9973	168	29333	0
	2306	2236.82	4872	**21,295 $**	3785	298236.2	**228,513 $**

Effect of Microwave Treatment on Strength of Igneous Rocks

S. Kahraman, A.N. Canpolat, A. Çolak, Ş.A. Yurdacan
Hacettepe University, Mining Engineering Department, Ankara, Turkey

M. Fener
Ankara University, Geological Engineering Department, Ankara, Turkey

ABSTRACT Cutting very hard rocks has some problems such as low penetration rate and high wear rate of cutting tools. These problems can be solved by the microwave treatment of rock during cutting very hard rocks. In this study, the effects of microwave treatment were investigated on the strength of nine different igneous rocks. First, the uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength tests were carried out for each rock type. Then, the strength tests were carried out on the microwave treated samples. The strength decreases generally with increasing microwave power and increasing treatment duration. The evaluation of the test results showed that the strength loss was different for each rock type treated by microwave. Fracturing and/or melting were observed on some samples treated by microwave at some power and duration values. The results showed that microwave treatment has important effects on the strength of igneous rocks.

1 INTRODUCTION

The mechanical excavation of rocks has been increasing in mining and civil engineering projects. Although the rock cutting technology has evolved quickly in the last century, the low penetration rate and the high cutter wear are still important problems for the excavation of hard and abrasive rocks. A concrete solution has not been found yet although there are some research studies on this topic. In order to increase cutting rate and decrease wear rate during cutting very hard rocks, recently, the studies on some innovative methods such as microwave assisted rock breakage have been drawing attention.

Microwave heats rocks according to the properties of its intrinsic minerals. Since the different minerals have different dielectric constants, their heating degrees and thermal expansions will be different after microwave treatment. The differential thermal expansion of minerals leads to internal stresses that cause micro-cracks or macro-cracks within the rocks and therefore decrease rock strength.

Some researchers have investigated the effects of microwave treatment on the mechanical properties of rocks for possible application in the microwave assisted rock excavation. However, these studies are limited and mainly carried out on basalt. In this study, the effects of microwave treatment were investigated on the mechanical properties of nine different granitic rocks.

2 PREVIUOS STUDIES

Several researchers have studied the effects of microwave treatment on the rock strength. The aim of these researchers is to provide a base for possible application of microwave assisted rock cutting. The summary of these studies are as follows:

Znamenackova et al. (2003) investigated the influence of microwave on andesite samples. They showed that samples were

completely melted after being exposed to 1350 W of power at a frequency of 2.45 GHz for 10 minutes in a multi-mode cavity. X-ray diffraction analyses indicated that that the basic chemical composition of andesite remained the same without any losses in weight, but the structure of andesite turned amorphous after melting.

Satish (2005) and Satish et al. (2006) exposed basalt samples to the microwave irradiation of 750 W in a multi-mode cavity. They found that longer exposure (180 and 320 seconds) to microwave radiation causes the sample to spall and chip off locally under point load test. Some rock samples even presented visible macro-cracking and even splitting for the longest exposure duration. They observed a reduction in the strength of the rock with increasing time exposure.

Motlagh (2009) investigated the effects of microwave treatment on the mechanical properties and abrasivity of different hard rocks. In the study, the core specimens were exposed to the microwave energy in three power levels, 800, 1250 and 3000 W, within 0, 15, 30, 60, 120 and 240 seconds time of exposure. It was shown that the uniaxial compressive strength values of almost all samples were decreased about 30 % after microwave treatment. The tensile strength of some samples reduced significantly. For example, up to 80% reduction in tensile strength was observed for basalt samples. The Cerchar abrasivity index of almost all samples showed a reduction of about 30%.

Peinsitt et al. (2010) investigated the effect of the microwave heating on the uniaxial compressive strengths and ultrasound velocity of sandstone, granite, and basalt in a 3 kW microwave oven at 2.45 GHz. They performed the tests on both dried and water-saturated samples. They observed that the saturation with water enhanced the weakening particularly in sandstone, had a little effect in granite, and had negligible effect in basalt.

Hassani and Nekoovaght (2011) studied the microwave irradiation on the strength of basalt, norite, and granite samples. The samples were exposed to the microwave energy of 1.2, 3 and 5 kW for 10, 65 and 120 seconds in a multimode cavity. It was shown that a significant reduction of tensile strength and a slight reduction in the uniaxial compressive strength of the rock samples (the specimen size effects influence the results of the tests). Moreover, the longer the specimen is exposed and the higher the microwave power is, the higher the reduction rate of mechanical properties of rocks.

Nejati et al. (2012) studied the influence of microwave treatment on the fracture toughness of basalt specimens. In the study, semi-circular basalt specimens with 50 mm diameter and 15 mm thickness were exposed to microwave radiations for 5 to 30 seconds at power level of 1-5 kW. The study revealed that both power level and exposure duration to microwave illumination lead to fracture toughness reduction and increase of fracture density. However, applying higher powers in shorter durations caused more fracture density and fracture toughness reduction.

Hassani et al. (2016) conducted comprehensive laboratory tests to investigate the influence of microwave radiation on temperature profiles and strength reduction in hard rocks such as norite, granite, and basalt. The test results indicated that tensile and uniaxial compressive strengths were reduced with increasing exposure time and power level. It was seen that the size of the specimen influenced the heating rate: smaller disc-shaped specimens were heated more rapidly than larger cylindrical samples. Some norite and granite samples cracked, some basalt specimens showed surface spalling, bursting or melting. They stated that microwave treatment looked as if a very good method for use in rock breakage and comminution applications, especially at a high power level.

3 SAMPLING

Nine different igneous rocks were used in this study. The samples consisted of six granites, two syenites and one gabbro as shown in Table1.

Table 1. Rock types used in the tests and strength values

Rock type	Location	Tensile strength (MPa)	Uniaxial compressive strength (MPa)
Granite (Rosa Well)	Spain	6.86	115.01
Granite (Rosa Minho)	Spain	8.43	129.13
Granite (Steppe Yellow)	Egypt	8.22	152.70
Granite (Nublado)	Spain	8.68	131.46
Granite (Kaman Rosa)	Turkey	4.38	95.51
Granite(Kozak Granit)	Turkey	10.06	141.32
Siyenite (Volga Blue)	Ukraine	8.64	116.32
Siyenite (Jungle Green)	Egypt	10.82	204.89
Gabbro (Nero Turka)	Turkey	12.98	197.70

4 EXPERIMENTAL STUDIES

The core specimens were prepared from the block samples collected from the site. The uniaxial compressive strength (UCS) and the Brazilian tensile strength (BTS) tests were carried out according to the ASTM standards. The summaries of the test results are given in Table 1.

Microwave treatment was applied in the second stage of the experiments. A 6 kW industrial microwave oven at the frequency of 2.45 GHz was used for the irradiation of the samples (Fig. 1). The microwave powers of 1, 2 and 6 kW were applied at different durations ranging from 60 s to 420 s. Then, the strength tests were carried out on the microwave treated samples. Three samples were tested for each case.

5 RESULTS AND EVALUATION

During microwave treatment of the test specimens, macro-cracks and local meltings were observed in some specimens depending on the applied power level and the exposure time (Figs. 2-7).

As show in Figure 2, Granite (Rosa Well) specimens cracked after the treatment at 6kW power for 360 s. Both intergranular and transgranular cracks were observed. These results are similar to those of Walkiewicz et al. (1988) and Kingman et al. (1998). It was interesting that the transgranular cracks were dominant. The local melting was also observed in one specimen due to metallic mineral.

Some of the Siyenite (Jungle Green) specimens cracked and after the treatment at 6 kW power for 360 s. The extrusion of metallic mineral was also observed in these specimens (Fig. 3).

Disc specimens of Siyenite (Volga Blue) cracked after the treatment at 6 kW power for 60 s, which was significantly lower than that of Granite (Rosa Well) specimens (Fig. 4). Melting and extrusion of metallic mineral were observed in some syenite discs at 6 kW power for 120 s (Fig. 5).

Some of the Gabbro specimens cracked after the treatment at 6 kW power for 120 s and 180 s (Figs. 6 and 7).

Figure 1. A 6 kW microwave oven used in the study

Figure 2. Cracking and melting in Granit (Rosa Well) after the treatment at 6 kW power for 360 s

Figure 3. Cracking and extrusion of metallic mineral in Syenite (Jungle Green) after the treatment at 6 kW power for 360 s

Figure 4. Cracking in Siyenite (Volga Blue) after the treatment at 6 kW power for 60 s

Figure 5. Cracking, melting and extrusion of metallic mineral in Siyenite (Volga Blue) after the treatment at 6 kW power for 120 s

Figure 6. Cracking in Gabbro (Nero Turka) after the treatment at 6 kW power for 180 s

Figure 7. Cracking in Gabbro (Nero Turka) after the treatment at 6 kW power for 120 s

The UCS and BTS values of granites did not change much for the treatment at 1 and 2 kW powers compared to the strengths of the untreated samples. But, their strength values decreased significantly at 6 kW power for especially 180 s and 60 s (Figs. 8 and 9). On the other hand, the strength values of syenites and gabbro decreased significantly at 1 or 2 kW powers for 60 s (Figs. 10 and 11). At 6 kW power for 180 s and 360 s, some of the syenites and gabbro samples cracked or melted as explained above.

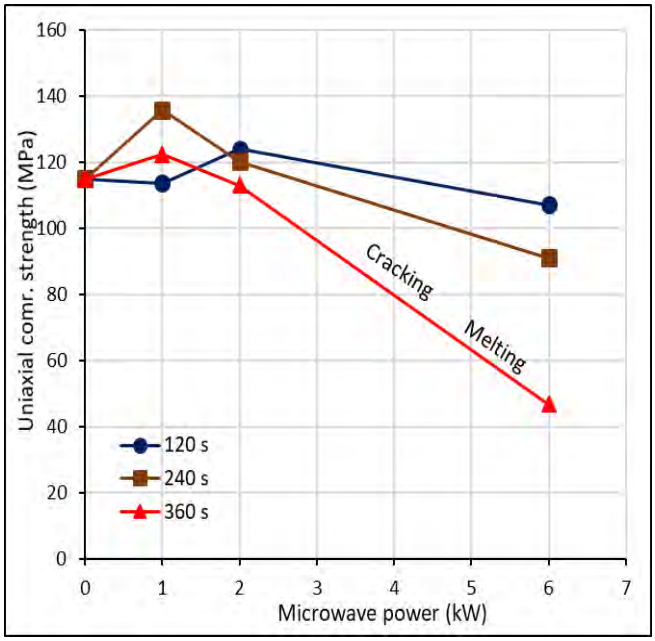


Figure 8. Uniaxial compressive strength of Granite (Rosa Well) as a function of microwave power for different exposure time

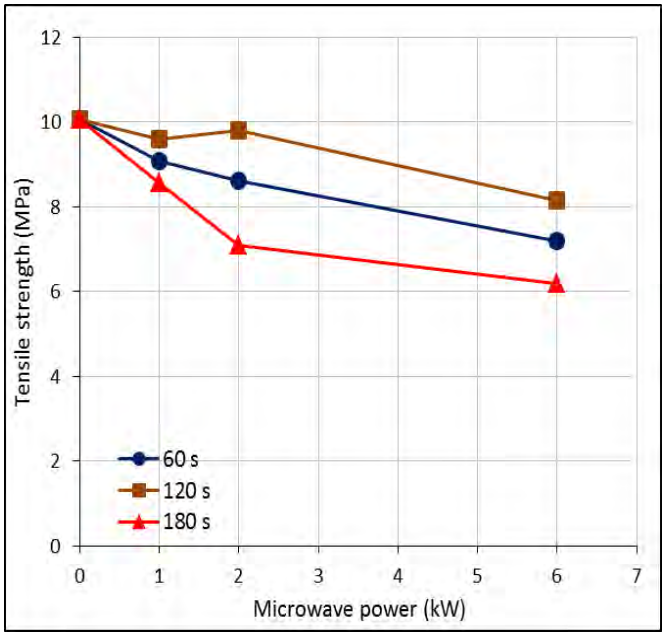


Figure 9. Tensile strength of Granite (Kozak granite) as a function of microwave power for different exposure time

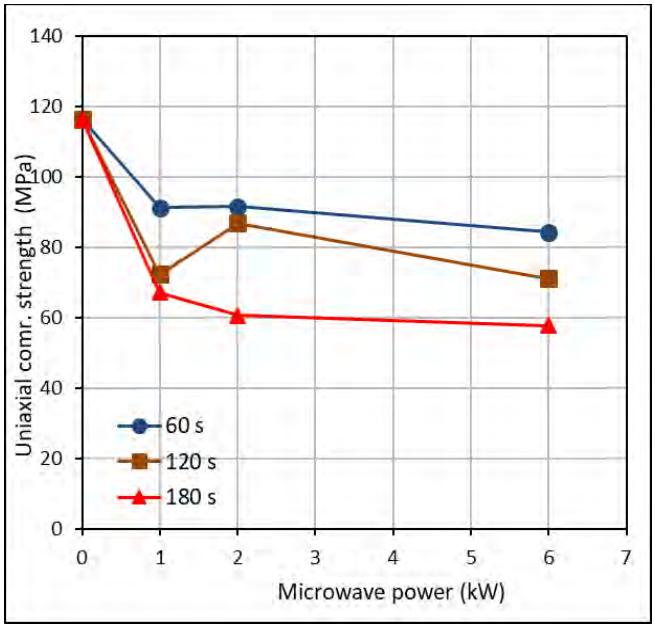


Figure 10. Uniaxial compressive strength of Syenite (Volga blue) as a function of microwave power for different exposure time

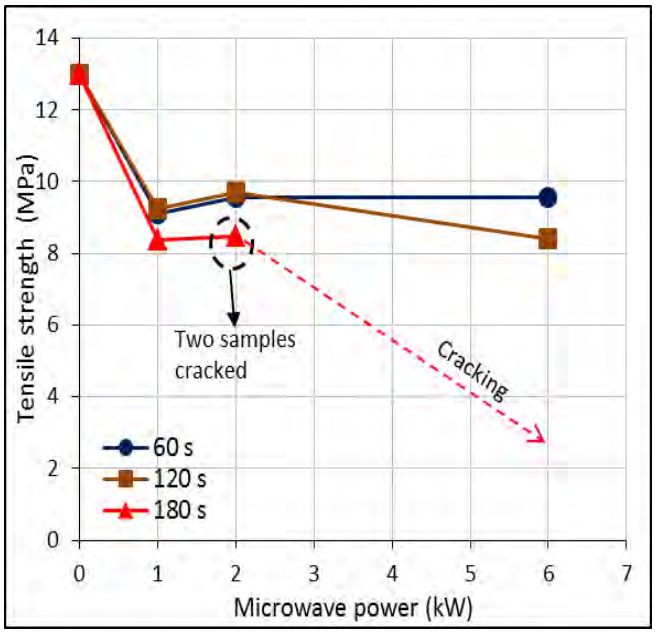


Figure 11. Tensile strength of Gabbro (Nero Turka) as a function of microwave power for different exposure time

An important point is that the data points for different microwave powers or exposure durations fluctuate. Moreover, the strength differences between the three samples tested for each case are usually large. This is probably due to the heterogeneity of the mineral composition the specimens. During microwave treatment, the heating degree of a specimen mainly depends on its mineral percentages. If the mineral percentages of two specimens are different from each other, their heating degrees will also be different.

The strength loss due to microwave treatment increases generally with increasing microwave power and increasing exposure duration. The strength losses were also calculated for each rock type, for 6 kW power (Table 1). The UCS loss of granites ranges from 13.2% to 59.3% for the exposure durations of 360 s. The UCS loss of Siyenite (Volga blue) is 50.4% for the exposure durations of 180 s. The BTS loss of granites ranges from 11.4% to 38.4% for the exposure durations of 180 s. The BTS loss of Siyenite (Jungle Green) is 47.6%. The samples of Siyenite (Volga Blue) and Gabbro (Nero Turka) cracked and melted at the exposure duration of 180 s.

Table 1. The strength loss due to microwave treatment for each rock type

Rock type	Strength loss due to microwave treatment (%)	
	Uniaxial compressive strength*	Brazilian tensile strength**
Granite (Rosa Well)	59.3 (Cracking and melting)	12.0
Granite (Rosa Minho)	22.9	11.4
Granite (Steppe Yellow)	44.9	19.4
Granite (Nublado)	15.1	23.4
Granite (Kaman Rosa)	13.2	23.7
Granite (Kozak Granit)	24.9	38.4
Siyenite (Volga Blue)	50.4**	Cracking and melting
Siyenite (Jungle Green)	45.3 (Cracking and melting)	47.6
Gabbro (Nero Turka)	21.8** (Cracking)	Cracking

* 6 kW, 360 s; ** 6 kW, 180 s

6 CONCLUSIONS

Influences of the microwave treatment were investigated on the uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength of nine different igneous rocks. The following conclusions can be drawn from the study:

- The strength of igneous rocks decreases generally with increasing microwave power and increasing treatment duration.
- The strength loss are different for each rock type treated by microwave power.
- Cracking and/or melting were observed on some samples treated by microwave at some power and duration values.

It is concluded that microwave treatment has important effects on the strength of igneous rocks. However, further research should be carried out on the other igneous rock types.

The effects of the higher microwave power at low exposure durations should be also investigated.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) for the support of the project (Project No. 216M003).

REFERENCES

Hassani, F., Nekoovaght, P. 2011. The development of microwave assisted machineries to break hard rocks, *Proceedings of the 28th ISARC*, pp. 678–684.

Hassani, F., Nekoovaght, P.M., Gharib, N. 2016. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave assisted underground excavation, *J. Rock Mech. Geotech. Eng*., 8, 1-15.

Kingman, S.W., Rowson, N.A. 1998. Microwave treatment of minerals. *Minerals Engineering*, 11(11), 1081 - 1087.

Motlagh, P.N. 2009. *An investigation on the influence of microwave energy on basic mechanical properties of hard rocks*, MSc Thesis, Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University.

Nejati, H., Hassani, F., Radziszewski, P. 2012. Experimental Investigating of Fracture Toughness Reduction and Fracture Development in Basalt Specimens under Microwave Illumination, in: Earth and Space 2012, *Proc. the 13th ASCE Aerospace Division Conf. on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, California, April 15-18, pp. 325-334.

Peinsitt, T., Kuchar, F., Hartlieb, P., Moser, P., Kargl, H., Restner, U., Sifferlinger, N.A. 2010. Microwave heating of dry and water saturated basalt, granite and sandstone, Int. *J. Mining Miner. Eng*., 2, 18-29.

Satish, H. 2005. *Exploring microwave assisted rock breakage for possible space mining applications,* Masters of Engineering Thesis, Mechanical Engineering, McGill University.

Satish, H., Ouellet, J., Raghavan, V., Radziszewski, P. 2006. Investigating microwave assisted rock breakage for possible space mining applications, *Mining Technology,* 115(1), 34-40.

Walkiewicz, J.W., Kazonich, G., McGill, S.L. 1988. Microwave heating characteristics of minerals and compounds, *Minerals and Metallurgical Processing,* 39, 39-42.

Znamenackova, I., Lovas, M., Hajek, M., Jakabsky, S. 2003. Melting of andesite in a microwave oven, *Journal of Mining and Metallurgy,* 39(3-4)B, 549 - 557.

Püskürtme Betonda Farklı Sentetik Lif Kullanımının Ultrasonik Dalga Hızına Etkisi

Effect of Different Synthetic Fiber Using Shotcrete on Ultrasonic Pulse Velocity

G. Külekçi
Gümüşhane Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bil. Fak., Maden Müh. Bölümü, 29100 Gümüşhane

ÖZET Kalıp ve diğer ağır işçilik gerektirmeyen püskürtme beton maden ve inşaat sektöründe uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Genel olarak püskürtme beton tahkimata yardımcı olarak ve yüzey pürüzlülüğünü gidermek amaçlı kullanılmaktadır. Lif kullanımı püskürtme betonun mekanik özelliklerinden eğilme direnci ve enerji absorbsiyonunun artırılması amacı ile ilk kez 19. yüzyılda kullanılmıştır. Püskürtme beton teknolojisinin birçok sektörde kullanılması ve ihtiyaçlara cevap verebilmesi açısından püskürtme betonda lif kullanımı hızlı bir şekilde yayılmıştır. Sentetik liflerin beton içerisinde dağılımı çekme ve eğilme direnci açısından önem teşkil etmektedir.

Yapılan çalışmada iki farklı firmadan temin edilen sentetik lifler kullanılmıştır. Kullanılan lifler eşit boyda, farklı şekil ve farklı ham maddeden oluşmaktadır. Üretilen sentetik lif katkılı 10x20 cm boyutunda 24 adet silindirik numune üzerinde ultrasonik dalga hızı ve tek eksenli basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda farklı liflerin beton içerisinde oluşturduğu boşluk miktarları değerlendirilmiştir.

ABSTRACT It is a method that shotcrete has been used for many years in mining and construction sectors, which does not require molding and other heavy workmanship. In general, shotcrete is used as an aid to improve surface roughness. The fiber has been used for the first time in the 19th century with the aim of increasing the bending resistance and energy absorption properties of shotcrete. The use of shotcrete fiber has spread rapidly in terms of the ability of shotcrete technology to be used in many sectors and to respond to the needs. Distribution of synthetic fibers in concrete is important in terms of tensile and bending resistance.

Synthetic fibers supplied from two different companies were used in this study. The fibers used are of equal size, different shapes and different raw materials. Ultrasonic wave velocities and uniaxial compression durability tests were performed on 24 cylindrical samples of 10x20 cm size with synthetic fiber. As a result of the experiments, the amount of voids formed by different fibers in the concrete was evaluated.

1 GİRİŞ

Püskürtme beton; agrega, çimento, su ve bazı kimyasalların oluşturduğu katı karışımının boru hattı içerisinde tazyik ile taşınıp, püskürtülerek yapılan beton olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel betona göre kalıp gerektirmeden yerleştirilmesi ve özel katkılar yardımıyla hemen dayanım kazanarak taşıyıcılığını yerine getirmeye başlaması gibi özellikleriyle yeraltı mühendislik yapılarında ve maden mühendisliği uygulamalarında yaygın kullanım alanı bulunmaktadır. Püskürtme betonun uygulandığı alan ve şekline göre

farklı karışımlar kullanılır. Püskürtme beton karışımında kullanılan malzemeler (agrega, su, bağlayıcı, kimyasal katkılar, lifler) püskürteme betonun basınç, yapışma, kayma dayanımı gibi mekanik özelliklerini direk etkilemektedir. Bu yüzden püskürtme betonun karışımında kullanılan bütün malzemelerin özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. 1970'lerin sonlarında püskürtme betonda lif kullanılmaya başlanmıştır. Tarih içerisinde gelişim sürecinde liflerin püskürtme betonda kullanımı çelik hasır takviyeli yönteme bir seçenek olarak piyasaya sunulmuştur. lifle güçlendirilmiş püskürtme betonun çelik hasır takviyeli yönteme göre en büyük avantajı daha kısa sürede uygulanabilmesi olmuştur. Ayrıca darbelere karşı direnci de fazla şiddetli olmayan yer değiştirmelerde arttırılmıştır. Püskürtme betonun mekanik özelliklerinden eğilme direnci ve enerji absorbsiyonunun artırılması amacı ile 1800'lü yılların sonlarına doğru kullanılmaya başlanmıştır. Püskürtme beton teknolojisinin birçok sektörde kullanılması ve ihtiyaçlara cevap verebilmesi açısından püskürtme betonda lif kullanımı hızlı bir şekilde yayılmıştır (Külekçi, 2018).

Lifsiz betonların eğilme ve çekme değerleri çok düşüktür. Çekme ve eğilme özelliklerini iyileştirmek için beton ve püskürtme betonda değişik miktarlarda çelik, plastik ve cam elyaf gibi değişik malzemelerden oluşan farklı tip ve boyutlarda lif kullanılmaktadır. Kullanım alanına uygun özellik ve miktarda kullanılan lif yeraltı madenciliğinde çekme ve eğilme özelliklerini önemli derecede artırmakta ve tahkimat amaçlı kullanılan çelik hasır gereksinimini ortadan kaldırmaktadır (Malmgren vd., 2005).

Püskürtme betonda uygulama yeri ve şekline göre genel olarak kullanılan liflerin uzunlukları 12.7-63.5 mm arasında, 0.45 mm – 1.0 mm çapında dairesel kesitli veya eni 0.25 - 0.90 mm kalınlığı ise 0.15 ile 0.41 mm boyutlarında kare veya dikdörtgen kesitli lifler kullanılmaktadır (Arıoğlu ve Yüksel, 2002). Püskürtme betonda ve normal betonda en yaygın kullanılan lifler ve özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Değişik lif tiplerine ait mekanik büyüklükler (DSİ, 1994)

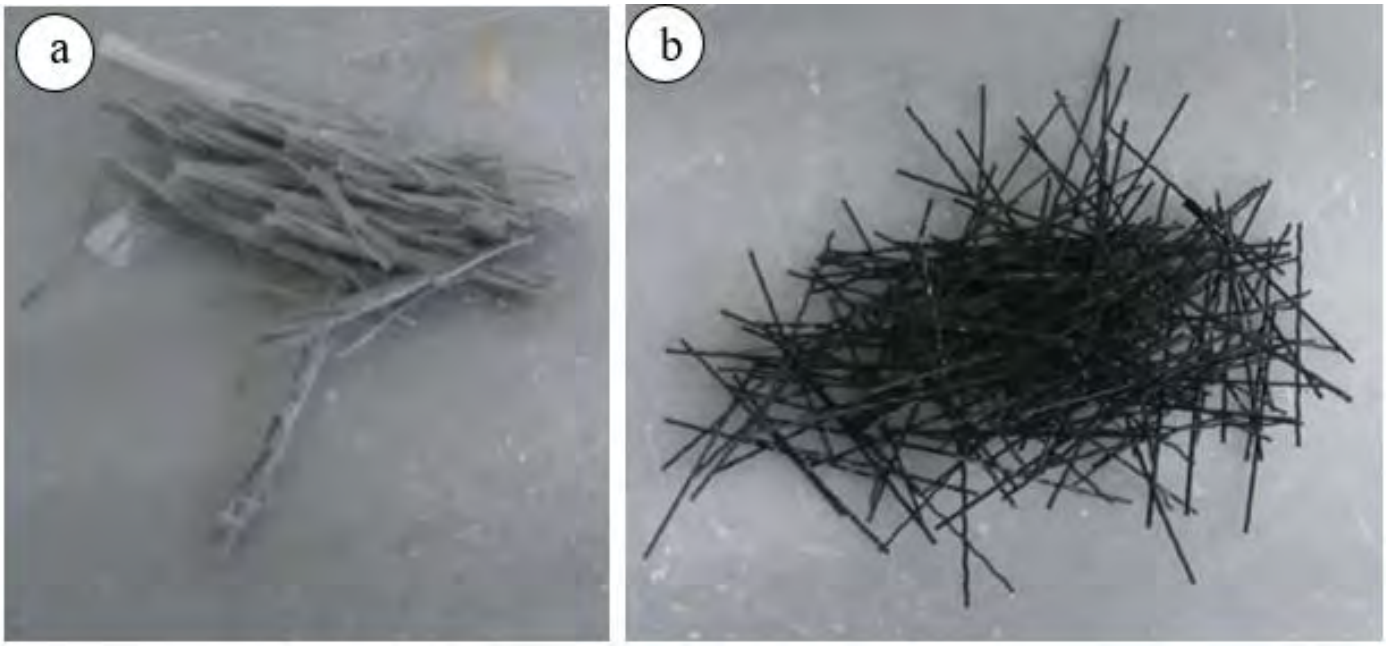
Lif cinsi	Çekme dayanımı MPa	Elastisite modülü GPa	Maksimum şekil değiştirme, %	Yoğunluk ton/m^3
Çelik	1100-2760	200	0,5-35	7,8
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,9
Akrilik	207-414	2,1	25-45	1,1
Asbestler	552-966	83-138	0,6	3,2
Pamuk	414-690	4,8	3-10	1,5
Cam	1035-3795	69	1,5-35	2,5
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,1
Polyester	724-863	8,3	11-13	1,4
Pamuk-Yün	414-621	6,9	10-25	1,5

Yapılan çalışmada aynı boyda iki farklı sentetik lif kullanılmıştır. Farklı sentetik lif kullanımının ultrasonik ses geçiş hızı (UPV) üzerinde etkisi incelenerek, püskürtme betonda boşluk yapısı, basınç dayanımı ile ilişkilendirilmiştir.

2 YAPILAN ÇALIŞMALAR

Birçok işletme yeraltında kullanılan püskürtme beton tahkimat amaçlı kullanmaktadır. Tahkimat amaçlı kullanılan püskürtme betonun erken kür dayanımı ve boşluk oranı önemli bir etmendir. Püskürtme betonun dayanımını uygulama şekli ile birlikte kullanılan bağlayıcı oranı ve agrega ile etkileşimi büyük oranda etkilemektedir.

Yapılan çalışmada iki farklı şekle sahip sentetik lif kullanılmıştır (Şek. 1).
Kullanılan sentetik liflerin marka isimleri Forta-Ferro (FF), Meyco Fıb SP 540 (MF), olup lifler farklı firmalardan temin edilmiştir. Kullanılan liflerin boyları, hammaddeleri ve renkleri farklıdır. Çalışmada kullanılan sentetik liflerin firma isimleri ve teknik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan sentetik lifler , a) Forta-Ferro (FF), b) Meyco Fıb SP 540 (MF)

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan fiberlerin teknik özellikleri

Lif cinsi (marka)	**Forta-ferro (FF)**	**Meyco fib sp 540 (MF)**
Hammadde	%100 saf kopolimer pp/pe	Polipropilen
Şekil	Sarmal	Dalgalı
Uzunluk	24 mm	24 mm
Çekme gerilmesi	550- 750 MPa	560-900 MPa
Elastisite modülü	5,75 GPa	-
Yüzey dokusu	Deforme edilmiş yüzey	-
Fiber sayısı	220.000 parça / kg	-
Yoğunluk	0,91 g/cm^3	0,92 g/cm^3
Erime noktası	162-168 °C	150- 170 °C
Yanma noktası	398 °C	-
Su emilimi	Sıfır	Sıfır
Asit / alkali direnci	Mükemmel	Mükemmel
Renk	Beyaz	Siyah

2.1 Silindir betonların numune dökümü

Püskürtme beton da en fazla önemsenen çekme dayanımını, püskürtme betonun uygulama şekli ve karışımda kullanılan bağlayıcı oranı, lif cinsi ve şekli büyük oranda etkilemektedir. Lif cinsinin püskürtme beton üzerinde oluşturduğu etkiyi belirlemek amacı ile bu çalışmada 2 farklı lif kullanılarak 10x20 cm boyutlarında 24 adet silindir numune dökülmüştür (Şek. 2). Dökülen numuneler kür havuzuna konularak 3, 7, 14 ve 28 gün sonunda UPV analizleri yapılarak tek eksenli basınç dayanımları ölçülmüştür. Dökümde kullanılan karışım oranları Çizelge 3 de verilmiştir.

2.2 Ultrasonik sismik hız tayini

Kür tankından çıkarıldıktan 24 saat sonra 10x20 cm boyutlarındaki silindir numuneler tek eksenli basınç dayanım deneyleri yapılmadan önce ASTM C 597 (2016) standartlarına uygun olarak 0,1 µs hassaslıkta sinyal süresine ve 24-500 kHz sinyal frekansına sahip Pundit Lab+ model test cihazı ile UPV ölçümleri yapılmıştır (Şek. 3). Aşağıdaki hız formülü kullanılarak p dalgası geçiş hızları hesaplanmıştır.

$$V=Lxt \quad (1)$$

Şekil 2. Silindir numunelerin dökülmesi ve kür tankına yerleştirilmesi

Çizelge 3. Hazırlanan lif katkılı püskürtme beton numuneleri

Numune Sayısı, adet	Numune Boyutu, cm	Agrega Tipi	Agrega Oranı, %	Lif tipi	Lif ilave oranı, kg	Bağlayıcı oranı, ağ. %	Kullanılan kimyasal türü	Kimyasal Miktarı, %*	Kür süresi, gün
3	10x20	KA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	3
3	10x20	KA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	7
3	10x20	KA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	14
3	10x20	KA	100	Polipropilen	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	28
3	10x20	KA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	3
3	10x20	KA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	7
3	10x20	KA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	14
3	10x20	KA	100	Kopolimer	2	7,0	PH/AKŞ	8/1	28
Toplam 24									

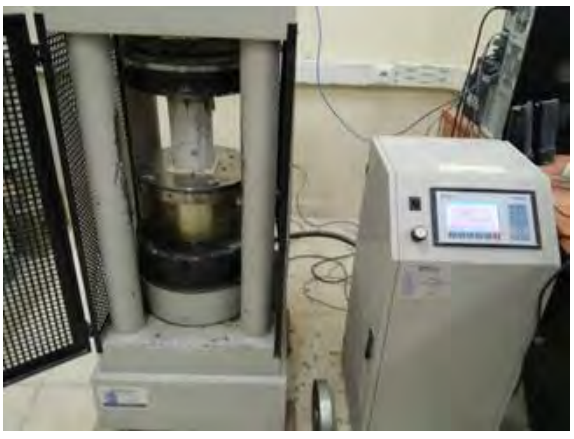
KA: Kırmataş agrega, PH: Piriz hızlandırıcı, AKŞ: Akışkanlaştırıcı *kimyasal miktarları çimento miktarının % si'dir

Şekil 3. Ultrasonik sismik hız tayini

Formülde;
L = Ölçüm yapılan numunede problar arası mesafe, mm
t = Okunan süre, µs
V = Geçiş hızı, mm/ µs

2.3 Tek eksenli basınç dayanımı

Yapılan çalışmada farklı şekilli sentetik liflerim püskürtme betonda dayanım üzerindeki etkisini belirlemek amacı ile tek eksenli basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla TS EN 12504 standardına göre önceden hazırlanmış 10x20 cm boyutlarında 24 adet numuneler 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresince kür tanklarında bekletilmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler BESMAK marka 200 tonluk pres makinesi ile tek eksenli basınç dayanım testleri yapılmıştır (Şek. 4).



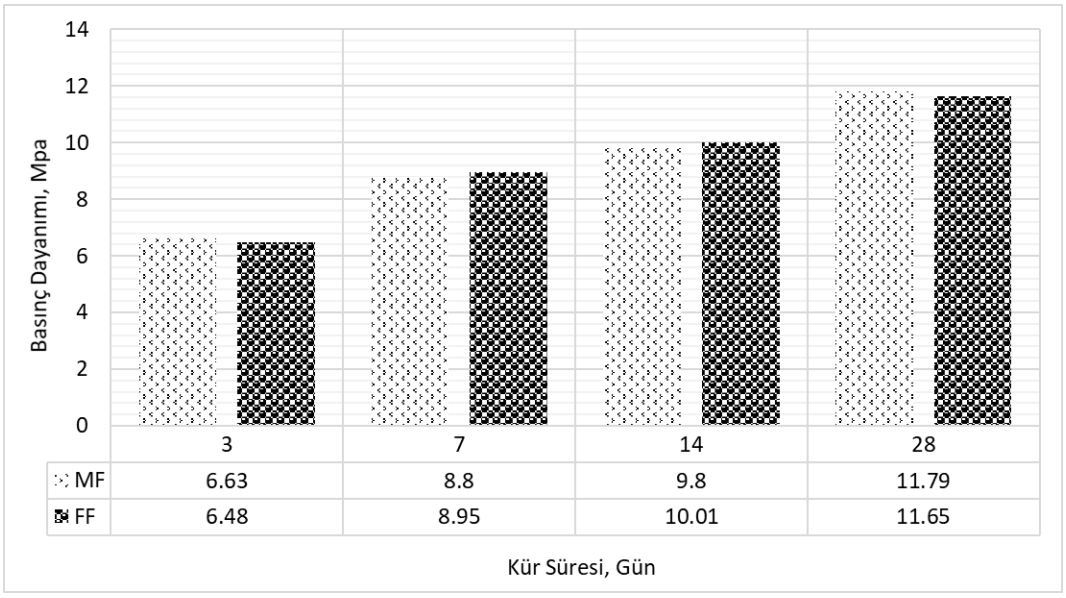
Şekil 4. Tek eksenli basınç dayanım testi

3 BULGULAR

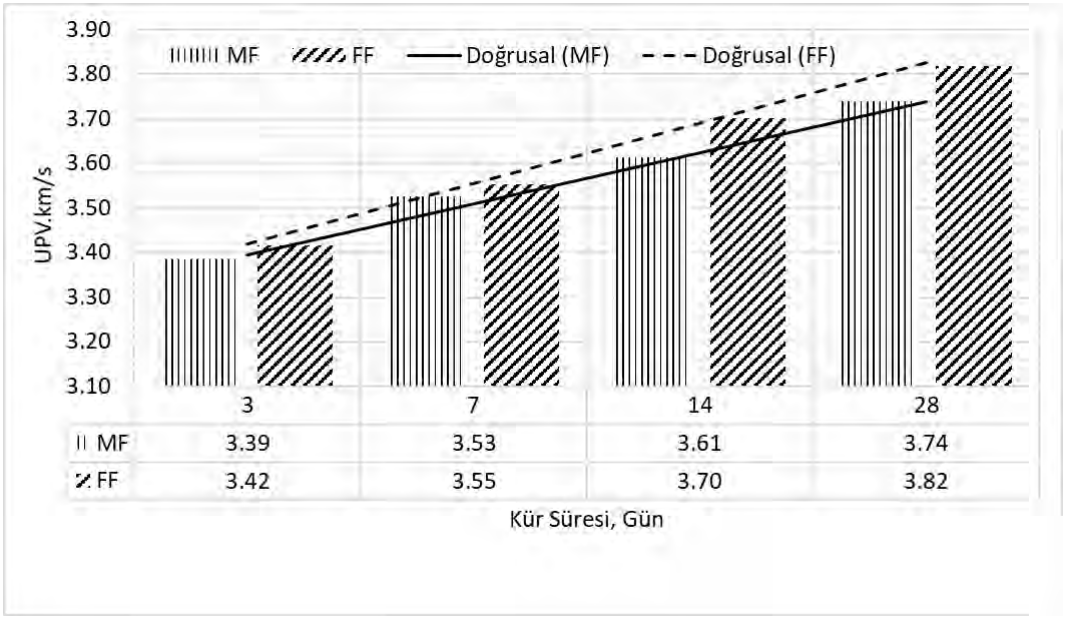
Çalışma kapsamında 10x20 cm boyutlarında ki silindir numunelerin tek eksenli basınç dayanımları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonrasında farklı liflerin tek eksenli basınç dayanımına etkisinin çok düşük olduğu belirlenmiştir (Şek. 5). 28 gün sonunda Meyco Fıb SP 540 (MF) katkılı betonların dayanımları 11,79 MPa bulunurken, Forta-Ferro (FF) lif katkılı beton dayanımları 11,65 MPa olarak ölçülmüştür.

Silindir numuneler üzerinde yapılan UPV analizlerinde, UPV hızının kür süresi ile doğru orantılı olarak arttığı ve 28 gün sonunda MF katkılı betonların hızlarının %2,1 daha düşük çıktığı belirlenmiştir (Şek. 6).

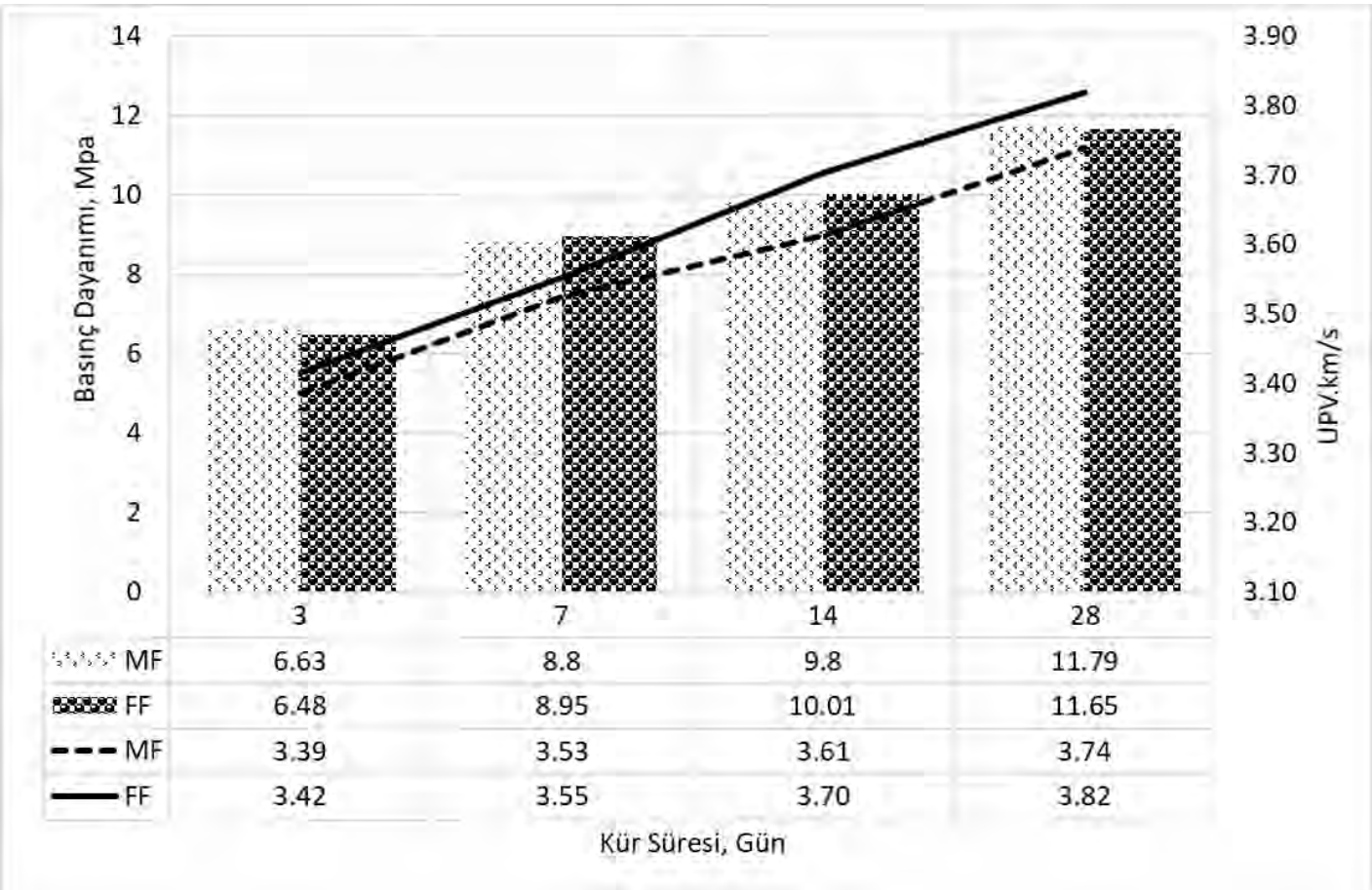
Silindir betonların basınç dayanımları ile UPV hızları karşılaştırıldığında basınç dayanımı ile UPV'nin orantılı olarak arttığı, FF katkılı betonların dayanımlarının ve UPV'lerinin daha yüksek çıktığı belirlenmiştir (Şek. 7). Çalışma kapsamında dökülen 24 adet 10x20 cm boyutlarında silindir numuneler üzerinde yapılan regresyon analizi anlamlı sonuç vermiştir. Analiz sonucunda MF lif katkılı betonlar için f_c=14,4×UPV-42,093 denklemi türetilmiştir. FF lif katkılı betonlar için ise fc=12,191×UPV-34,886 denklemi geliştirilmiştir (Şek. 8). Bu denklemde UPV km/s ve fc MPa birimindedir.



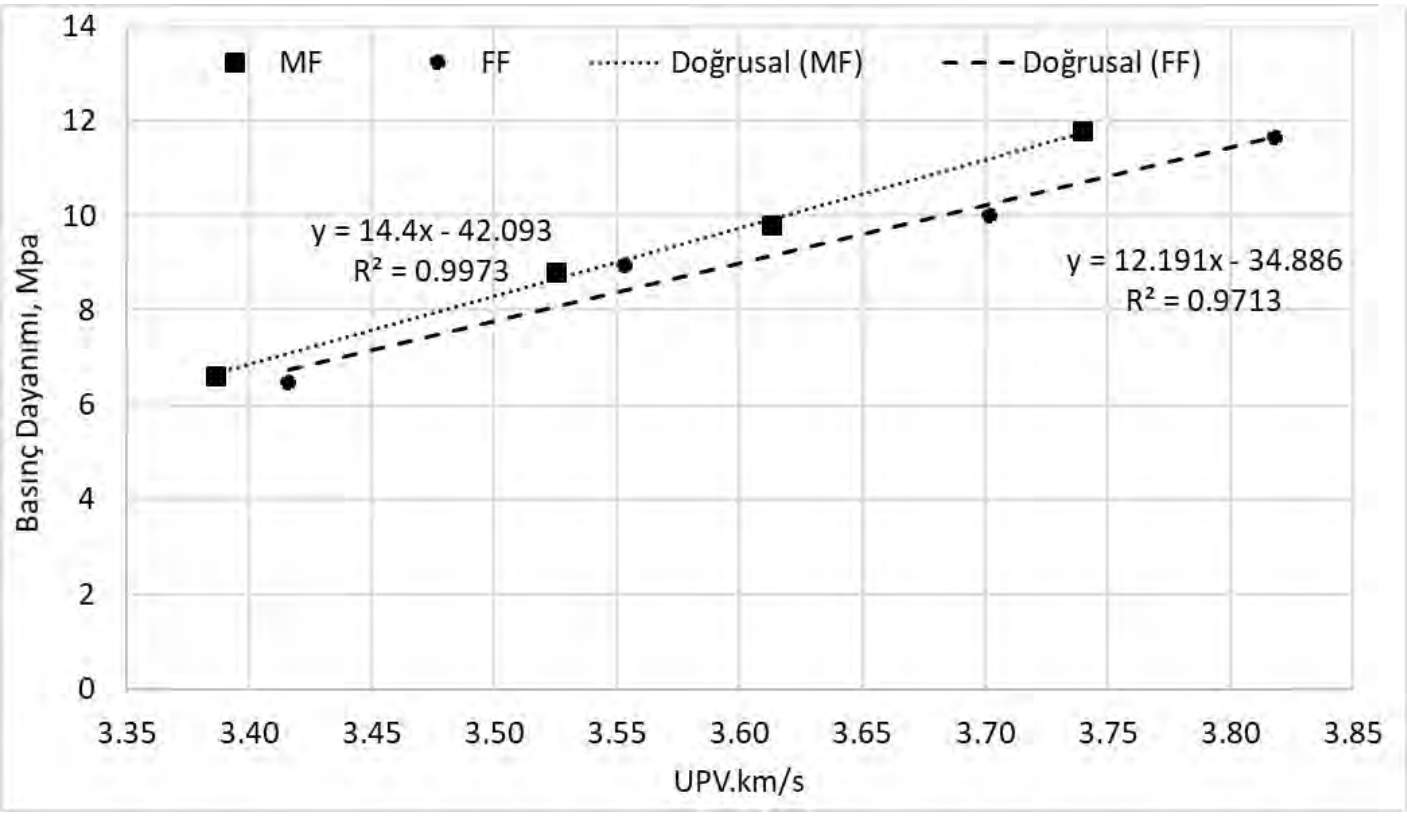
Şekil 5. Silindir numunelerin tek eksenli basınç dayanımları



Şekil 6. Silindir betonların UPV sonuçları



Şekil 7. Tek eksenli basınç ve UPV karşılaştırılması



Şekil 8. Basınç dayanımı ve UPV ilişkisi

4 SONUÇLAR

Püskürtme betonda, farklı liflerin tek eksenli basınç dayanımını ve UPV üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile yapılan çalışmada, kopolimer ve polipropilen ham maddelerinde üretilmiş, siyah ve beyaz renklere sahip farklı şekillerde, 2,5 cm boyutlarında sentetik lifler kullanılmıştır. Yapılan tek eksenli basınç dayanımı ve UPV analizleri sonucunda kopolimer ham maddesinden üretilen Forta-Ferro (FF) sentetik fiberinin beton içerisinde daha iyi dağıldığı, boşluk oluşturmadığı ve sarmal yapısından dolayı UPV değerlerinin yüksek çıktığı belirlenmiştir.

Lif cinsinin değiştirilmesinin tek eksenli basınç dayanımına önemli bir etkisinin olmadığı ortaya konulmuştur. Ayrıca yapılan çalışma sonucunda 24 adet örnek üzerinde tek eksenli basınç dayanımları ve UPV değerleri arasında yapılan regresyon analizinin anlamlı sonuç verdiği, üretilen formüller yardımı ile ultrasonik hız değerinde basınç dayanım tahmini yapılabileceği saptanmıştır.

KAYNAKÇA

Arıoğlu, E., Yüksel, A. 2002. *Yeraltı Yapılarında Püskürtme Beton*, İstanbul: TMMOB Maden Müh. Odası Çalışma Raporu.

ASTM C 597-16, 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.

DSİ, 1994. *Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton MLZ-878,* Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi, 9-75, Ankara.

Külekçi, G. 2018. Karadeniz Bölgesi`ndeki İnşaat Yıkıntı Atıklarının Agrega Yerine Kullanılabilirliğinin ve Madencilikte Kullanım Alanlarının Araştırılması, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Malmgren, L., Nordlund, E., Rolund, S. 2005. Adhesion strength and shrinkage of shotcrete, *Tunneling and underground space technology*, 20, 1, 33-48.

Assessment of Analytical Solutions for Time-Dependent Behavior of Unlined Tunnels

E. Kabwe, M. Karakus, E.K. Chanda
School of Civil, Environmental and Mining Eng., University of Adelaide, 5005, Australia

ABSTRACT Time-dependent deformation associated with creep behaviour occurs after construction of a tunnel and affects the support system installed. In this paper, we aim to improve the closed form by including a fractional derivative component to explicitly capture irrecoverable deformations in the tertiary creep stage. The proposed analytical solution captures the time-dependent response of an unsupported circular tunnel by substituting the Newtonian dashpot in the Burgers and a visco-plastic component with a fractional order derivative element. The proposed solution is illustrated through an actual unsupported tunnel case. Estimates obtained from the proposed analytical solution displays close agreement with the CVISC model up to a certain point. Thereafter, it displays an increased strain rate attributed to the irrecoverable deformations in the tertiary creep stage.

1 INTRODUCTION

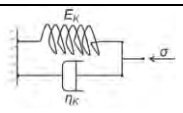
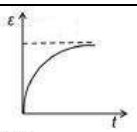
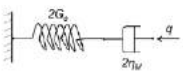
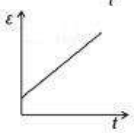
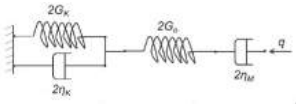
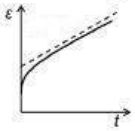
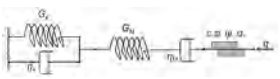
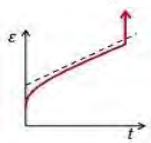
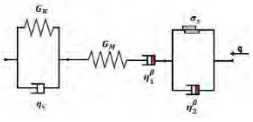
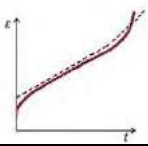
During tunnel excavation, the convergence and ground pressure acting on the tunnel boundary increases with time. This is because of the time-dependent response of the surrounding rock mass and the tunnel advancement (Panet, 1993). In this study, the time-dependent deformation considered is squeezing which is essentially associated with creep (Barla, 1995). There are three commonly used methods in describing the time-dependent deformation associated with creep in tunnels including analytical solutions (Gnirk and Johnson 1964, Ladanyi and Gill 1984), empirical solutions (Sulem et al. 1987, Panet 1993, Ladanyi 1995) and numerical solutions. In addition, the analytical solutions are based on the CCM, a two-dimensional approach that can be employed to simulate three-dimensional problem in tunnels. The CCM approach involves the GRC (Ground Reaction Curve), LDP (Longitudinal Displacement Profile) when coupled with the SCC (Support Characteristic Curve) provides information essential for the support load relative to the position of the tunnel face and tunnel wall convergence (Karakus 2007, Sadeghiyan et al. 2016, Oke et al. 2018, Paraskevopoulou ve Diederichs 2018, Yan et al. 2018). Fahimifar et al. (2010) suggested an approach implemented in the CCM to capture the time-dependent response of the visco-elastic surrounding rock medium. Furthermore, Gschwandtner and Galler (2012) presented a new method employing the CCM while considering the time-dependent behaviour of the support elements in tunnels. However, the CCM does not explicitly capture the time-dependent response of the rock mass deformation associated with creep. This time-dependent response related to creep can lead to unexpected squeezing phenomenon. Tunnelling under squeezing ground conditions is frequently associated with rehabilitation, rock reinforcement and support element failure. Depending on the

severity of the squeezing mechanism, significant investment in support installation and time-consuming rehabilitation is required to sustain the serviceability of tunnels (Potvin and Hadjigeorgiou 2008, Varden and Woods 2015, Karampinos et al. 2015a,b, Roache 2016). In this paper, an analytical solution is proposed to capture the time-dependent response of an unsupported circular tunnel by replacing the Newtonian dashpot in the Burgers and a Visco-plastic component with a fractional order derivative element.

2 TIME DEPENDENT BEHAVIOUR

The ability for rocks and rock masses to undergo time-dependent deformation upon being subjected to a constant state of stress is referred to as creep. During tunnel excavation, this time-dependent behaviour can be an instantaneous or a steady increase of wall convergence towards the tunnel centre. This instantaneous or steady increase of the wall displacement is due to the rock mass rheological properties, its ability to undergo creep and tunnel advancement (Pan and Dong, 1991). In their study, Sulem et al. (1987) concluded that the time-dependent behaviour can account for about 70% of the total tunnel wall convergence. Hence, it is cardinal to take into consideration the aspect of the creep phenomenon during the design and excavation of tunnels. Creep phenomenon is characterized by three stages namely: primary, secondary and tertiary. Panet (1979), Sulem et al. (1987), Malan (1999, 2002), Barla et al. (2008) and Debernardi and Barla (2009) proposed analytical formulations and constitutive laws to capture creep related time-dependent behaviour. These suggested analytical solutions for estimating the time-dependent material behaviour around tunnels are based on either the Kelvin and Maxwell rheological models or a combination of both (Burger's model). However, these models are only able to describe the time-dependent behaviour up to a certain creep stage. The Kelvin and the Maxwell can only describe the primary and secondary stage respectively while the Burgers model describes the secondary and primary creep stage. The existing model able to describe the three creep stages is the visco-elastic plastic (CVISC) developed by Itasca (2006) composed of a Burger's model attached with a plastic slider characterized by the Mohr-Coulomb failure criterion. However, the plastic slider is independent of time because it is not attached to a viscous dashpot. Hence, plastic yielding in the tertiary creep stage captured using this model is only dependent on stress. Examples of the models and their analytical solutions in use for circular tunnels in response to the time-dependent radial convergence are presented in Table 1. It is deduced that the existing models fail to describe all the three creep stages in a simple and reasonable manner (Paraskevopoulou and Diederichs 2013, 2018). Paraskevopoulou (2016) in her study suggested that the CVISC model behaved visco elastically until the yielding state, thereafter behaved plastically. Paraskevopoulou (2016) further concluded that the CVISC model failed to simulate the time dependency of plastic shearing in the tertiary creep stage

Table 1 Existing and proposed models with their analytical solutions for circular tunnels

Rheological model	Schematic analogue	Strain time relation
Kelvin-Voigt		
Maxwell		
Burgers		
CVISC		
Proposed model		

Therefore, this paper presents an analytical solution that will be implemented in the CCM which will be able to simulate the time-dependent behaviour of the three creep stages by introducing a fractional derivative component to replace the Newtonian element in the Burgers and an Elasto Visco-plastic models.

3 DETERMINATION OF UNSUPPORTED TUNNEL CONVERGENCE DUE TO CREEP

Kirsch (1898) presented stress distribution calculation around a circular tunnel in a hydrostatic stress field. Gnirk and Johnson (1964) further suggests that if this stress distribution is symmetrical with respect to a tunnel's axis at 90° and the $r-\theta$ plane, then the stress components are independent of the angle and dependent on the radius. The analysis of stress and displacement around a tunnel face is considered to be a three-dimensional problem. However, Sulem et al. (1987) assumes that a section behind a tunnel face is a two dimensional plane strain problem. In their analysis, the tangential (σ_θ) and radial (σ_r) stresses are computed by;

$$\sigma_1 = \sigma_\theta = \left(1+\lambda\frac{r^2}{b^2}\right)\sigma_0 \tag{1}$$

$$\sigma_3 = \sigma_r = \left(1-\lambda\frac{r^2}{b^2}\right)\sigma_0 \tag{2}$$

Where σ_1 is the major principle stress, σ_3 is the minor principle stress, σ_0 is the in-situ stress, r is the radius of a tunnel, b is the center to wall radial distance and λ is the face location. Panet and Guenot (1983) suggested an empirical formulation to take into account the face advance effect;

$$\lambda(d) = 0.28 + 0.72\left[1-\left(\frac{D}{D+d}\right)\right] \tag{3}$$

Where d is the distance of the point under study to the face position, D=0.8, the parameter λ ranges from 0.0-1.0, if the parameter is 1 then the position is far from the tunnel face. In this analysis, we assume the parameter not equal to 1. The mean stress a section under consideration is computed by;

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_\theta + \sigma_z + \sigma_r}{3} \tag{4}$$

While the radial deviatoric stress is expressed as;

$$\sigma_r^{dev} = \left(1-\lambda\frac{r^2}{b^2}\right)\sigma_0 - \sigma_0 = -\lambda\sigma_0\left(\frac{r}{b}\right)^2 \tag{5}$$

and the radial strain is expressed by;

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r^{dev}}{2G} \tag{6}$$

Where ε_r is the radial strain and G is the shear modulus. Fahimifar et al., (2010) proposed an expression to quantify radial convergence in a Visco Elastic material using the Burger's model given by;

$$u_r = -\lambda\sigma_0\left(\frac{r}{b}\right)^2\left\{\frac{1}{2G_0}+\frac{t}{2\eta_M}+\frac{1}{2G_k}\left[1-exp\left(-\frac{t}{T_k}\right)\right]\right\} \tag{7}$$

Where u_r is the radial convergence, assuming a case of no stress relaxation and further tunnel advancement the value of the radial stress is constant, but the radial strain increases due to creep. Hence the radial stress in the tunnel wall at a given section will be given by;

$$\sigma_r = (1-\lambda)\sigma \tag{8}$$

While the time-independent radial convergence is calculated using $U_r = \frac{\lambda\sigma_0 r}{2G}$ substituting Equations (5) in (6) (Panet and Guenot, 1983). However, Pan and Dong (1991) further suggests that if a tunnel is assumed to be in an elastic medium with an initial state of stress the radial convergence as a function $F(x)$ is given by;

$$U_r = F(x)\frac{\sigma_0 r}{2G} \tag{9}$$

3.1 Derivation of an Analytical Solution for a Circular Tunnel in an Elastic Visco-Plastic Medium

Owen and Hilton (1980) proposed the following relation to illustrate an elasto viscoplastic model by taking $\sigma(t)=\sigma$ (constant stress) given by;

$$\sigma_v = \eta\dot{\varepsilon}^p \tag{10}$$

Where σ_v is the viscous stress, η is the viscosity coefficient and $\dot{\varepsilon}^p$ is the plastic strain rate. Given that the total stress σ_0 is the sum of viscous stress σ_v, the initial yield stress σ_Y and hardening stress $R(\varepsilon^p)$ as shown;

$$\sigma_0 = \sigma_v + \sigma_Y + R(\varepsilon^p) \tag{11}$$

Substituting Equation (10) into (11) and differentiating for reduces to;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 - \sigma_Y - R(\varepsilon^p)}{\eta} \tag{12}$$

The total strain is the sum of the elastic strain and the plastic strain this is given by;

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \varepsilon^p \tag{13}$$

Where E is the young modulus, assuming no isotropic hardening $R(\varepsilon^p)$ then integration of Equation (12) with respect to time gives the total strain as;

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0 - \sigma_Y}{\eta}t \tag{14}$$

Viscoplastic model without hardening assumes that the material behaves elastically below the yield stress σ_Y level and viscoplastic above the σ_Y and it is given by;

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \dfrac{\sigma_0}{E} & \sigma_0 < \sigma_Y \\ \dfrac{\sigma_0}{E} + \dfrac{\sigma_0 - \sigma_Y}{\eta}t & \sigma_0 \geq \sigma_Y \end{cases} \tag{15}$$

Considering linear isotropic hardening $R(\varepsilon^p) = k\varepsilon^p$, where k is the hardening modulus, differentiating Equation (12) gives;

$$\dot{\varepsilon}^p = \frac{\sigma_0 - \sigma_Y}{\eta} - \frac{k}{\eta}\varepsilon \tag{16}$$

Integrating Equation (12) with respect to time gives $\varepsilon(t)$ in the Elastic viscoplastic material with hardening as;

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0 - \sigma_Y}{k}\left[1 - exp\left(-\frac{k}{\eta}t\right)\right] \tag{17}$$

Combination of the proposed analytical formulation for the Burgers material (Fahimifar et al., 2010) and the Elastic viscoplastic material without hardening gives;

$$u_r = \begin{cases} \dfrac{\sigma_0 r}{2}\left\{\dfrac{1}{G_0} + \dfrac{t}{\eta_M} + \dfrac{1}{G_k}\left[1 - exp\left(-\dfrac{t}{T_k}\right)\right]\right\} & \sigma_0 < \sigma_Y \\ \dfrac{\sigma_0 r}{2}\left\{\dfrac{1}{G_0} + \dfrac{t}{\eta_M} + \dfrac{1}{G_k}\left[1 - exp\left(-\dfrac{t}{T_k}\right)\right] + \left(\dfrac{\sigma_0 - \sigma_Y}{\eta_B}t\right)\right\} & \sigma_0 \geq \sigma_Y \end{cases} \tag{18}$$

Where η_B is the visco-plastic component viscosity coefficient, the theory of hardening behavior can be a justification for the deferred plastic deformation developed during creeping at both low stress levels below the σ_Y and high stress levels. The combination of the Burgers and Elastic Visco-plastic with hardening material's analytical formulations gives;

$$u_r = \begin{cases} \dfrac{\sigma_0 r}{2}\left\{\dfrac{1}{G_0} + \dfrac{t}{\eta_M} + \dfrac{1}{G_k}\left[1 - exp\left(-\dfrac{t}{T_k}\right)\right] + \left(\dfrac{\sigma_0 - \sigma_Y}{\eta_B}t\right)\right\} & \sigma_0 < \sigma_Y \\ \dfrac{\sigma_0 r}{2}\left\{\dfrac{1}{G_0} + \dfrac{t}{\eta_M} + \dfrac{1}{G_k}\left[1 - exp\left(-\dfrac{t}{T_k}\right)\right] + \left(\dfrac{\sigma_0 - \sigma_Y}{k}\right)\left[1 - exp\left(-\dfrac{k}{\eta_B}t\right)\right]\right\} & \sigma_0 \geq \sigma_Y \end{cases} \tag{19}$$

The main influences of tunnel convergence extent are tunnel advancement and time-dependent behaviour effects related to creep (Fahimifar et al., 2010). Hence, the creep related tunnel wall convergence is obtained by (Panet and Guenot, 1983);

$$C_c(t) = 2\left[U_r(t) - U_0\right] \tag{20}$$

Where $U_r(t)$ is the tunnel wall convergence at a given time period and U_0 is the time independent tunnel wall convergence. Thus considering equations 18 and 19, the unsupported tunnel wall convergence due to creep can be represented by;

$$C_c(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_0 r}{2}\left\{\frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{G_k}\left[1 - exp\left(-\frac{t}{T_k}\right)\right] + \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_Y}{\eta_B} t\right)\right\} \\ \frac{\sigma_0 r}{2}\left\{\frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{G_k}\left[1 - exp\left(-\frac{t}{T_k}\right)\right] + \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_Y}{k}\right)\left[1 - exp\left(-\frac{k}{\eta_B} t\right)\right]\right\} \end{cases} \tag{21}$$

3.2 Time-Dependent Fractional Derivative Solution

The fractional derivative component implemented in this study is characterized by a constitutive relation computed using fractional order derivative creep model theory. The constitutive relation denotes the Abel dashpot and it is set as;

$$\sigma(t) = \eta^{\beta} \frac{d^{\beta}\left[\varepsilon(t)\right]}{dt^{\beta}} \qquad (0 \le \beta \le 1) \tag{22}$$

Where η^{β} is the Abel viscosity coefficient and β is the fractional derivative order. When β = 1.0 the Abel dashpot represents the Newtonian dashpot and when β = 0.0 it represents a solid element (Xu and Chen 2013, Li et al. 2014, Li et al. 2014, Su et al. 2017). Hence, the Abel dashpot can simulate a component amid an ideal Newtonian dashpot and an ideal spring this reduces the limitation of both components (Zhou et al. 2013). Taking $\sigma(t) = \sigma$ (constant stress) and applying the fractional order calculus attributed to Reimann-Liouville operation (Bagley and Torvik, 1983), the creep strain rate represented by the Abel dashpot is given by;

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{\eta^{\beta}} \frac{t^{\beta}}{\Gamma(1+\beta)} \qquad (0 \le \beta \le 1) \tag{23}$$

Where Γ is the gamma function $\left(\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} x^{\beta-1} e^{-x} dx\right)$ and t is the time. Considering Equation (19) setting initial condition as ε = 0 and t = 0, the general solution with the Abel dashpot substitution is given by;

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0 - \sigma_Y}{\eta^{\beta}} \frac{t^{\beta}}{\Gamma(1+\beta)} \tag{24}$$

Therefore Equation (18) befits;

$$u_r = \frac{\sigma_0 r}{2}\left\{\frac{1}{G_0} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{G_k}\left[1 - exp\left(-\frac{t}{T_k}\right)\right] + \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_Y}{\eta_2^{\beta}} \frac{t^{\beta}}{\Gamma(1+\beta)}\right)\right\} \tag{25}$$

Implementing the Abel dashpot in the Maxwell component of Equation (25) gives an elasto visco plastic relation expressed by;

$$u_r = \frac{\sigma_0 r}{2}\left\{\frac{1}{G_0} + \frac{t^{\beta}}{\eta_1^{\beta}\Gamma(1+\beta)} + \frac{1}{G_k}\left[1 - exp\left(-\frac{t}{T_k}\right)\right] + \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_Y}{\eta_2^{\beta}} \frac{t^{\beta}}{\Gamma(1+\beta)}\right)\right\} \tag{26}$$

When the Abel dashpot is linked in parallel with a plastic slider it can adequately represent the time-dependent deformation in the tertiary creep stage. The Abel dashpot employs Γ function that represents a continuous extension of the factorial function defined for non-negative numbers and displays a concave response for positive real numbers. The use of Γ in the analytical solution provides an accurate representation of the tertiary creep visco plastic strain increment due to its power law and exponential function characteristic.

4 VERIFICATION OF THE ANALYTICAL SOLUTION

Verification of the proposed closed-form analytical solution (Eq. 26) is performed using the existing CVISC model. As an example, a tunnel at the Nchanga Underground Mine in Zambia is considered. The tunnel is circular with a radius of 6 m,

driven at a depth of 700 m, the isotropic stress σ_0 is 23.3 MPa and the rock mass mechanical properties are presented in Table 2.

Table 2. Nchanga rock strength parameters used for the analysis

ν	c	ϕ	σ_{cm}	GSI	m_i	m_b	s	a
0	1.28	26	35	40	8	0.9	0.001	1

Note: ν = Poisson ratio, c = Cohesion (MPa) ϕ = Friction angle in degree, σ_{cm} = Intact uniaxial compressive strength, GSI = Geological strength index.

The creep parameters used in this study are adopted from Sterpi and Gioda (2009) given in Table 3. These creep parameters are employed to evaluate the suggested analytical solution for a time span of 1800 (≈ 5 years) and 20000 (≈ 54 years) days after tunnel excavation. The proposed solution composed of the Burgers model connected in series with a visco plastic component's dashpot substituted by a fractional derivative element is compared with the Burgers and the CVISC. The fractional derivative element substituted in the visco plastic component employs different β values (Table 3) and results from the verification are illustrated in Figures 1 and 2.

The time-dependent behaviour of the surrounding rock mass employing the proposed solution, Burgers and CVISC models are compared to justify their variance over a time span of five years (Fig. 1).

The variance between the CVISC and Burgers models is attributed to the immediate plastic deformation captured by the CVISC. Beyond a certain point, the strain rate between these models is almost the same and the proposed solution, on the other hand, captures the same strain rate with the CVISC model up to a certain stage. It is observed that the range between 0.5–0.9 of fractional derivative coefficients has an influence on the time-dependent behaviour.

In Figure 2, the tunnel radial response and deformation represented by the three solutions (Burgers, CVISC and Proposed) are compared on a time span of 54 years, the proposed solution is in close agreement with the CVISC model. Afterwards, as the time-dependent irreversible deformation increases the proposed solution has an increased strain rate. This is attributed to the visco plastic irrecoverable deformations in the tertiary creep stage which the CVISC fails to explicitly capture. The proposed solution is able to capture the irreversible radial convergence above the CVISC solution. Hence, the solution can accurately capture the time-dependent radial convergence.

Table 3. Creep parameters of rock (Sterpi and Gioda, 2009)

Parameters	Values
η_K (MPa.d)	49470
η_M (MPa.d)	478972.2
G_k (MPa)	23390
G_0 (MPa)	2714
K_H (MPa)	5880
η_B (MPa.d)	4800
η_1^β (MPa.d)	4789720.2
	4800
β	05-0.9

Note: η_1^β = Abel viscosity coefficient in the Burgers model and η_2^β = Abel viscosity coefficient in the Elastic Visco-plastic model.

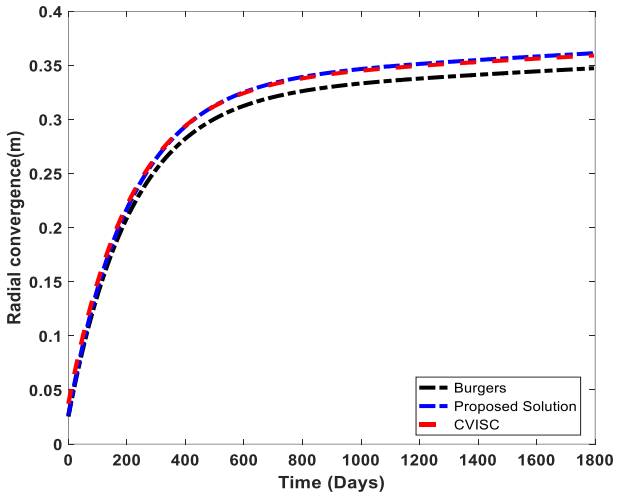


Figure 1. Comparison of models for the time-dependent strain and radial displacement

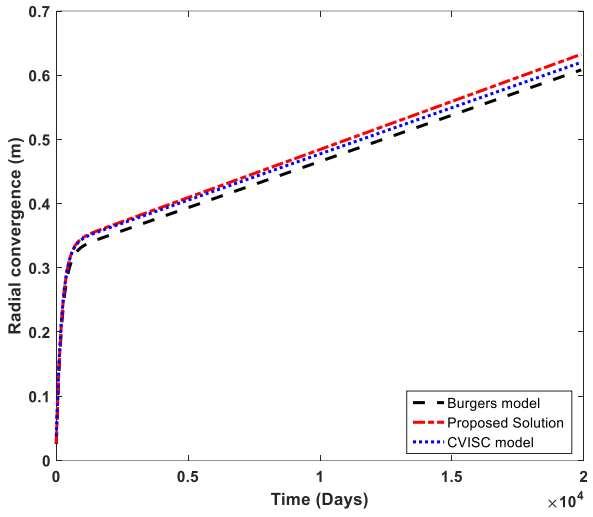


Figure 2. Comparison the models for the time-dependent convergence

5 CONCLUSION

In this study, an analytical solution is proposed for the estimation of radial elasto-viscoplastic convergence in tunnels. The proposed solution is based on a combination of the Burgers model and a visco plastic component with a substituted fractional derivative element. Employing the Γ in the analytical solution represents the delayed deformation concisely in the tertiary creep stage as compared to the exponential function implemented in the existing models. The presented analytical solution to quantify the time-dependent radial convergence is verified using the CVISC model. The comparative analysis between the tunnel radial deformation of the Burgers, the CVISC and the proposed solution shows that the proposed solution is able to describe the elastic, plastic and visco plastic radial deformations. Furthermore, the results display a close agreement between existing models with the proposed analytical solution.

REFERENCES

Bagley, R.L., Torvik, P.J. 1983. A theoretical basis for the application of fractional calculus to viscoelasticity. *Journal of Rheology*, *27*(3), 201-210.

Barla, G. 1995. Squeezing rocks in tunnels. *ISRM News Journal*, *2*(3), 44–49.

Barla, G., Bonini, M., Debernardi, D. 2008. Time Dependent Deformations in Squeezing Tunnels. *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, 1–6.

Debernardi, D., Barla, G. 2009. New viscoplastic model for design analysis of tunnels in squeezing conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *42*(2), 259–288.

Fahimifar, A., Tehrani, F.M., Hedayat, A., Vakilzadeh, A. 2010. Analytical solution for the excavation of circular tunnels in a visco-elastic Burger's material under hydrostatic stress field. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *25*(4), 297–304.

Gnirk, P.F., Johnson, R.E. 1964. The deformational behavior of a circular mine shaft situated in a viscoelastic medium under hydrostatic stress. In *The 6th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.

Goodman, R.E. 1989. *Introduction to rock mechanics* (Vol. 2). Wiley New York.

Gschwandtner, G.G., Galler, R. 2012. Input to the application of the convergence confinement method with time-dependent material behaviour of the support. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, *27*(1), 13–22.

Karakus, M. 2007. Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis.*Tunnelling and Underground Space Technology*, *22*(1), 47-56.

Karampinos,E., Hadjigeorgiou,J. 2015. Management of squeezing ground conditions at LaRonde mine. In *13th ISRM International Congress of Rock Mechanic*. International Society for Rock Mechanics.

Karampinos, E., Hadjigeorgiou, J., Turcotte, P., Mercier-Langevin, F. 2015. Large-scale deformation in underground hard-rock mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, *115*(7), 645–652.

Kirsch, E.G. 1898. The theory of elasticity and the need of the strength of materials (trans.). *Journal of the Association of German Engineers*, *42*, 797–807.

Ladanyi, B. 1995. Time-dependent response of rock around tunnels. In *Analysis and Design Methods* (pp. 77–112). Elsevier.

Ladanyi, B., Gill, D.E. 1984. Tunnel lining design in a creeping rock. In *Design and Performance of Underground Excavations: ISRM Symposium—Cambridge, UK* (pp. 19–26). Thomas Telford Publishing.

Li, H., Zhang, Q., Niu, L., Xu, Y. 2014. Fractional Order Derivative Nishihara Model of Artificial Frozen Soil, (Icmce), 876–880.

Malan, D.F. 1999. Time-dependent Behaviour of Deep Level Tabular Excavations in Hard Rock.

Rock Mechanics and Rock Engineering, *32*(2), 123–155.

Malan, D.F. 2002. Manuel Rocha medal recipient simulating the time-dependent behaviour of excavations in hard rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *35*(4), 225–254.

Oke, J., Vlachopoulos, N., Diederichs, M. 2018. Improvement to the Convergence - Confinement Method : Inclusion of Support Installation Proximity and Stiffness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-25.

Owen, D.R.J., Hinton, E. 1980. *Finite elements in plasticity*. Pineridge press.

Pan, Y.W., Dong, J.J. 1991. Time-dependent tunnel convergence-I. Formulation of the model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *28*(6), 469–475.

Panet, M. 1979. Time-dependent deformations in underground works. In *4th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.

Panet, M. 1993. Understanding deformations in tunnels. *Comprehensive Rock Engineering*, *1*, 663–690.

Panet, M., Guenot, A. 1983. Analysis of convergence behind the face of a tunnel: Tunnelling 82, proceedings of the 3rd international symposium, Brighton, P197–204. Publ London: IMM, 1982. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 20, p. A16). Pergamon.

Paraskevopoulou, C. 2016. Time-dependency of rocks and implications associated with tunnelling. (Doctoral dissertation).

Paraskevopoulou, C., Diederichs, M. 2013. Long term behaviour in tunnelling : limitations in using creep parameters. *Canadian Geotechnical Symposium GeoMontreal on Geoscience for Sustainability*.

Paraskevopoulou, C., Diederichs, M. 2018. Analysis of time-dependent deformation in tunnels using the Convergence-Confinement Method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *71*, 62–80.

Roache, B. 2016. Mining in extreme squeezing conditions at the Henty mine, 0–13.

Sadeghiyan, R., Hashemi, M., Moloudi, E. 2016. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Determination of longitudinal convergence profile considering effect of soil strength parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *82*, 10–21.

Sterpi, D., Gioda, G. 2009. Visco-Plastic behaviour around advancing tunnels in squeezing rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *42*(2), 319–339.

Su, X., Chen, W., Xu, W. 2017. Characterizing the rheological behaviors of non-Newtonian fluid via a viscoelastic component: Fractal dashpot. *Advances in Mechanical Engineering*, *9*(10), 1–12.

Sulem, J., Panet, M., Guenot, A. 1987. An analytical solution for time-dependent displacements in a circular tunnel. In International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts 24(3),155-164. Pergamon.

Xu, Z., Chen, W. 2013. Fractional-order modeling of linear viscoelastic creep in hami melon. *13th International Conference on Fracture 2013, ICF 2013*, *6*, 1–7.

Yan, Q., Li, S.C., Xie, C., Li, Y. 2018. Analytical Solution for Bolted Tunnels in Expansive Loess Using the Convergence-Confinement Method. *International journal of geomechanics*, *18*(1), 1–16.

Zhou, H.W., Wang, C.P., Mishnaevsky, L., Duan, Z. Q., Ding, J.Y. 2013. A fractional derivative approach to full creep regions in salt rock. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, *17*(3), 413–425.

Demiryolu Menfezlerinin Hat Esnekliği ve Hat Üzerine Uygulanan Tekerlek Kuvvet Değerleri Üzerine Etkisi

Effects of Railroad Culverts on Railway Track Stiffness and on Train Wheel Forces

N.Ö. Bezgin
İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar, İstanbul

ÖZET Demiryolları üzerinde tren hareketi esnasında ortaya çıkan ve tekerlekler tarafından hat üzerine aktarılan düşey kuvvet değerleri, tekerleklerin durağan hallerinde hat üzerine uyguladıkları düşey kuvvet değerlerinden daha büyüktürler. Trenin hareket hızına ve demiryolu üzerinde veya tren tekerleklerinde bulunan düzensizliklerden kaynaklanan etkilere bağlı olarak ortaya çıkan bu kuvvetler, kısa bir süre etki ederek demiryolu üstyapısını ve altyapısını ivmelendirirler ve bu nedenden dolayı da dinamik darbe kuvvetleri olarak anılırlar.

Sunulacak bu çalışma içerisinde, yazarın demiryolları üzerinde dinamik darbe kuvvetlerini tahmin etmek üzere geliştirdiği yeni bir yöntem ile teorik olarak kurgulanmış ve menfez içeren bir demiryolu üzerinde oluşabilen farklı esneklik değerlerinden kaynaklanan ve hat üzerine etki eden dinamik darbe yükleri değerlendirilecektir.

ABSTRACT The wheel forces exerted on railway tracks by a moving train are typically higher than the wheel forces exerted when the train is at a stand-still. These forces that arise as a result of train speed and irregularities of the track or the train wheels act for a short period of time and accelerate the track and therefore named as dynamic impact forces.

Through a theoretical setup of a railway with a culvert this study will present the generation of dynamic impact forces on railway tracks due to variation of track stiffness over a culvert through the application of a method developed by the author.

1 GİRİŞ

Demiryolu hat esnekliğinde meydana gelebilen değişimler bir demiryolu düzensizliği türü olup dinamik darbe kuvvetlerinin oluşumuna neden olurlar. Hat esneklik değişimi, hat türünün balastlı hattan, raylı levha türü hatta dönüştüğü bölgelerde, tünel veya köprü gibi yapılara girişlerde ve bu yapılardan çıkışlarda veya hat üst yapısının gerilme etki alanına yakın inşa edilmiş menfez bölgelerinde meydana gelirler. Bununla birlikte, hat üst yapısı ile alt yapısının su muhtevasındaki ani değişimler ile donma ve çözülme etkileri ile özellikle balastlı hatlarda görülen balast kirliliği, esneklik değişiminin diğer nedenleri arasında gösterilebilirler.

Menfez öncesinde ve sonrasında hat üst yapısının drenaj özellikleri değişebilmekte ve menfez bölgelerinde hat üstyapısı içerisinden su tahliyesi zorlaşabilmektedir. Ayrıca, demiryolu hat üstyapılarında gözlenen yapısal hasarın %50'si, hat esnekliğinin değiştiği bölgelerde gözlenmektedir. (Wang vd., 2017). Menfezler hat esnekliğinin değişim gösterebileceği bir altyapı unsurudur.

Menfezler, demiryolu hattını farklı açılarda kesen ve hattın altından muhtelif amaçlar için geçişin sağlanması için inşa edilen yapılardır. Çoğunlukla hattın altından su geçişi için kullanılan menfezler, hattın altından bir başka demiryolu hattının veya bir başka ulaşım hattının geçmesi için de kullanılabilirler.

Menfezler, yerinde üretim veya ön-üretim ile inşa edilebilen, dörtgen, daire ve kemerli şekillerde olabilen, betonarme, kâgir, çelik veya kompozit malzemelerden üretilebilen yapılardır. Menfez yapısı, demiryolu hat üst yapısını doğrudan taşıyabileceği gibi, demiryolu hat üst yapısının altında, belirli bir derinlikte de yer alabilir. Şekil 1'de hat üst yapısını doğrudan taşıyan betonarme bir menfez yapısı görülmektedir. Şekil 2'de hat üst yapısının bir miktar altında yer alan metal bir menfez yapısı görülmektedir.

Şekil 1. Bir demiryolu menfezi (www.trenhaber.com, 15.12.2017)

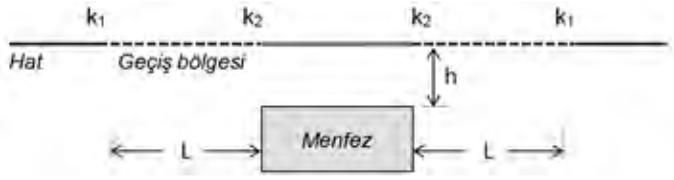
Şekil 2. Demiryolu menfezi (Beben, 2014)

Yapım tekniği itibariyle menfezler, inşa edilmelerinin ardından üzerlerine örtülen dolgu toprağın üstüne demiryolu hat üst yapısının inşa edilmesi ile gerçekleşebileceği gibi, işlek demiryolu hatlarında, tren seferlerini engellememek için demiryolu altyapı dolgusunun hat eksenine gereken açıda kazılması ile de gerçekleştirilebilirler. Özellikle, değişen hidrolojik şartlar ile artan debileri karşılamak için artırılması gereken menfez kesitlerine ihtiyaç duyulduğunda, mevcut menfezin bir veya her iki yanına farklı niteliklerde yeni menfezlerin yapılması gerekebilmektedir. Şayet ilgili hattın, gereken menfez inşaatı için geçici olarak kapatılması söz konusu değilse, mevcut menfezin içerisinde yer aldığı dolguda, yeni menfezler için kazı işlemi gerekli hale gelebilir.

Bu bağlamda menfezler, tüneller gibi doğal zemin içerisinde yer almayıp, sıklıkla insan yapısı dolgu toprak zeminler içerisinde yer almaktadırlar. Dolayısı ile menfezler, bir yer altı veya yer içi yapıları olmaktan ziyade, üzerlerinden geçen ulaşım hattının bir altyapı unsurunu oluşturmaktadırlar. Parçası oldukları hattın üst yapısına yakınlıkları ve çevrelerini örten farklı düzeylerde sıkıştırılmış zeminin özelliklerine bağlı olarak menfezlerin dikkatle tasarlanmaları ve etkilerinin dikkatle incelenmesi gerekir. Balastlı bir hattın 30 cm genişliğe sahip traversleri tarafından taşınan düşey yükün oluşturduğu gerilmeler travers altında 90 cm derinliğe kadar azalarak ulaşmaktadırlar (Lichtberger, 2011). Şayet demiryolu hattı, raylı-levha (slab-track) bir yapıya sahipse, 250 cm genişliğinde bir raylı-levha altında oluşan gerilmeler, 500 cm derinliğe kadar azalarak ulaşabilirler. Menfezlerin, hattın uyguladığı bu etkin gerilme derinlikleri içerisinde yer almaları, demiryolu hat esnekliği üzerinde menfez etkisinin önemli nedenlerindendir.

Uygulamada, 10 metre açıklığa kadar olabilen bu yapıların esneklikleri, çevrelerinde yer alan oluşturulmuş zemine göre farklılık gösterirler. Menfez üzerinde yer alan üstyapıya uygulanan düşey kuvvet

altında meydana gelen sıkışma, menfezin yanında ve yakınında yer alan doğal veya oluşturulmuş zeminin üzerinde yer alan üstyapının aynı düşey kuvvet altında kaldığı zaman meydana gelecek sıkışma değerinden çoğu zaman daha düşük kalır. Tren hareketi esnasında, sıkışma değerleri arasında meydana gelen bu fark, tren tekerleklerinin menfez bölgelerinde üst yapı üzerine dinamik darbe kuvveti uygulamasına neden olur. Şekil 3'de, bir demiryolu hattının, bir menfez üzerinden geçiş yapmadan önce geçiş bölgesi uzunluğunu (L) ve menfezin hatta göre konumunu (h) gösteren bir eskiz görülmektedir. Eskiz üzerinde k_1 ve k_2 ile tasvir edilen değişken, hattın esneklik değerleridir.



Şekil 3. Bir demiryolu hattının altından geçen menfezin boy kesit eskizi

Demiryolu hat esnekliğinin değişiminden kaynaklı dinamik darbe yükü oluşumu demiryolu mühendisliğinin önemli araştırma alanlarındandır (Briaud vd. 1997, 2017, Stark vd. 2016, Dinqing vd. 2005). Demiryolu esnekliğinin değişimi ile ortaya çıkan dinamik darbe yüklerinin iki temel nedeni vardır. Bu nedenlerden birincisi hat boyunca esneklik değişimi nedeniyle statik tekerlek yükleri altında meydana gelen statik hat sehimlerinde oluşan farktır. İkinci neden ise farklı esnekliğe sahip hattın, zati ağırlığı ile farklı miktarlarda oturmasıdır. Ancak demiryolu hatları üzerinde, hat düzensizlikleri nedeniyle oluşması muhtemel dinamik darbe kuvvetlerinin kesin olarak tespiti, hattı oluşturan çokça unsurun birbiriyle etkileşimi nedeniyle oldukça zordur. Bu nedenle, dinamik darbe yüklerinin yaklaşık olarak tespiti için ampirik denklemlerden veya matematiksel modellerden yararlanılır.

Kurgulanan matematiksel modeller, çoğunlukla sonlu elemanlar yöntemi ile yüksek kapasiteli bilgisayarların kullanımını gerektirir. ANSYS®,SIMULIA®, SimPack®, Vampire®, Universal Mechanism® gibi programlar, vurgulanan matematiksel modellerin kullanımını sağlayan araçlara örnek verilebilirler. Bu programlar, sağlanan verilerin doğruluğu ile orantılı olarak farklı tren hızlarında ortaya çıkan dinamik darbe yükleri için gerçek değerine yakın sonuçlar verebilmektedirler. Ancak bu programlar, her zaman mevcut olmayabilirler ve bu durumda bir demiryolu hattı üzerinde oluşması muhtemel dinamik darbe yüklerinin değerlendirilmesi için ampirik denklemlere başvurulur.

1900'lerin başından itibaren günüme kadar birçok araştırmacı, deneysel çalışmalara dayalı denklemler önermişlerdir (Talbot vd. 1919, Eisenmann 1969). Bu denklemler, belirli hatlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile tren hızı ile trenin ve/veya hattın mekanik bazı özellikleri üzerine kurgulanmışlardır ve verdikleri sonuçlar, sıklıkla ölçülen sonuçların üzerinde kalmaktadırlar. Bu bağlamda ampirik denklemlerin her hat için eşit derecede geçerli sonuçlar verecek bir şekilde uygulanamayacakları söylenebilir.

Gerek bilgisayar programlarının mevcudiyetince yaşanabilen güçlükler, gerekse ampirik denklemlerin yetersiz kalabilmeleri nedeniyle, her hat için uygulanabilir, açık ve basit bir matematiksel yöntemin geliştirilmesi gerekmiştir. Bu amaç doğrultusunda yazar, 2017 senesinde enerjinin korunumu yasası, kinematik ilkeler ve kendisinin önerdiği "darbe kuvveti azaltma katsayısı (f) (impact reduction factor)" adı verilen yeni bir kavramdan yola çıkarak, profilinde alçalan yönde bir düzensizlik içeren bir demiryolu hattı üzerinde oluşması muhtemel dinamik darbe kuvvetlerinin tespiti için bir denklem geliştirmiştir (Bezgin 2017, 2018a). Önerilen bu denklem ile sıklıkla kullanılan bazı

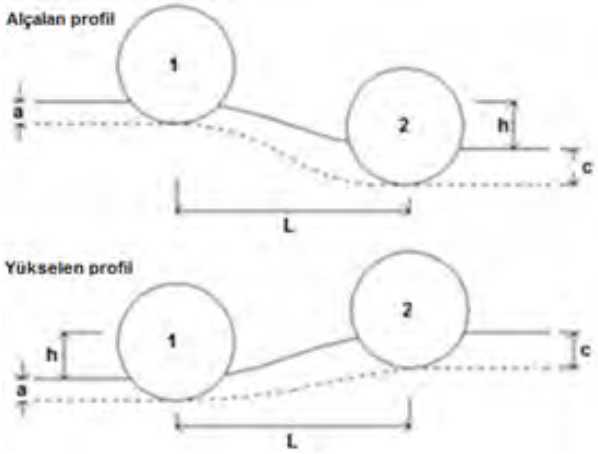
ampirik denklemlerin tahmin sonuçları arasında görülen kuvvetli uyum ile yazar, geliştirdiği bu yöntemi, artan yönde değişen hat profilleri, azalan yönde değişen hat esneklikleri ve artan yönde değişen hat esneklikleri sonucu ortaya çıkan dinamik darbe kuvvetlerinin tahmini için üç denklem de daha geliştirmiştir (Bezgin 2018a,b,c). Güncel sonuçları, konuyla ilgili olarak bir dergide yayınlanan ve uluslararası dört kongrede sunulan bu çalışma, bugün de ilerlemektedir. Geliştirilen yöntem ile demiryolu mühendisliğine, hat düzensizlikleri nedeniyle oluşması muhtemel dinamik darbe yüklerinin tespitine dair basit ve açık bir hesap yöntemi kazandırılmıştır.

Sıradaki bölüm, önerilen yönteme dair kısa bir bilgilendirme sunarak yöntemi, demiryolu hat esnekliğinde menfezlerden kaynaklı değişimler sonucu ortaya çıkan dinamik darbe kuvvet değerlerinin tahmini için kullanacaktır.

2 DİNAMİK DARBE KUVVETLERİNİN TAHMİNİ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM

Geliştirilen yöntemin üç temel hipotezi vardır: 1. Demiryolu hat profilinde meydana gelen değişimler, tren tekerleği tarafından taşınan zati tren kütlesinin potansiyel enerjisinde değişimlere yol açar. 2. Tekerlek tarafından taşınan kütlenin potansiyel enerjisinin birim zamanda değişim değeri tekerlek tarafından hatta uygulanan dinamik darbe kuvvetini üretir. 3. Belirli bir düzensizlik durumu için hat üzerine etki eden dinamik darbe kuvveti, hat esnekliği ile doğru orantılıdır. Yapılan çalışmalar, tren hızına, hat düzensizliğinin değerlerine ve hat esnekliğine bağlı olarak dinamik darbe kuvvetlerinin değiştiğini göstermektedirler. (Bezgin, 2018a,b,c)

Şekil 4'te belirli bir "L" mesafesinde, "h" kadar alçalarak veya artarak değişen iki demiryolu hattı profili görülmektedir. Şayet tren, bu L mesafesinde oluşan h yükseklik farkını içeren bölgeyi çok yavaş kat edecek olursa, tekerleğin hat üzerine uyguladığı kuvvet, statik değerine çok yakın olacaktır. Bir başka durumda ise, belirli bir tren hızı için "L" çok yüksek veya "h" çok küçük ise, bu düzensizliğin meydana getirdiği dinamik darbe kuvveti yine tekerleğin statik kuvvet değerinden farklı olmayacaktır. Tekerleğin statik kuvvet değeri altında "a" değerinde sehim yapan demiryolu hattı, tekerleğin düzensizlik içeren bölgeyi kat-etmesini takiben artan dinamik darbe kuvveti nedeniyle daha yüksek "c" değerinde sehim yapabilecektir.



Şekil 4. Alçalan ve yükselen hat profilleri

Hat düzensizliği nedeniyle ortaya çıkan potansiyel enerji farkının, hatta aktarılan kısmının temsili için Eşitlik 1'de sunulan "darbe kuvveti azaltma katsayısı (impact reduction factor)" adı verilen bir değer önerilmiştir. Bu değer, tren tekerleğinin "L" mesafesini kat etmesi için gereken süre ile "h" yüksekliğinden düşmesi için gereken süreyi ilişkilendiren bir değerdir.

Eşitlik 2'de sunulan şartlı önermelerde ise "f" değerinin alabileceği değerler görülmektedir. Eğer tren son derece yavaş ilerliyorsa veya ortaya çıkan düzensizlik çok uzun bir mesafede ve çok düşük bir profil sapması olarak ortaya çıkıyorsa "f" değeri 1'e yaklaşmaktadır. Tren hızı yükseldikçe ve/veya "L" değeri azalıp "h" değeri arttıkça "f" değeri önce sıfır'a yakınsamakta ve ardından eksi değerlere geçebilmektedir.

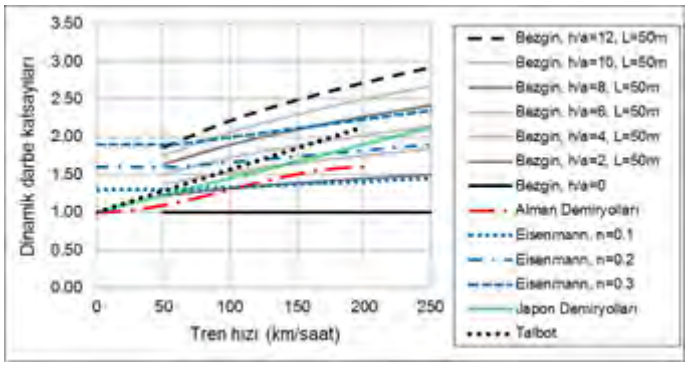
$$f = 1 - \frac{t_{düşüş}}{t_{geçiş}} \quad (1)$$

$$\text{Eğer} \begin{Bmatrix} t_{düşüş} < t_{geçiş} \\ t_{düşüş} = t_{geçiş} \\ t_{düşüş} > t_{geçiş} \end{Bmatrix} \text{ o halde } \begin{Bmatrix} 0 < f \leq 1 \\ f = 0 \\ f < 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Alçalan yönde değişen hat profili nedeniyle oluşan dinamik darbe kuvvetlerini tahmin etmek üzere geliştirilen denklemin detayları burada tekrarlanmayacaktır ancak kaynaklarda mevcuttur (Bezgin 2017, 2018a). Geliştirilen $K_{B,d}$ denklemi Eşitlik 3 ile sunulmuştur.

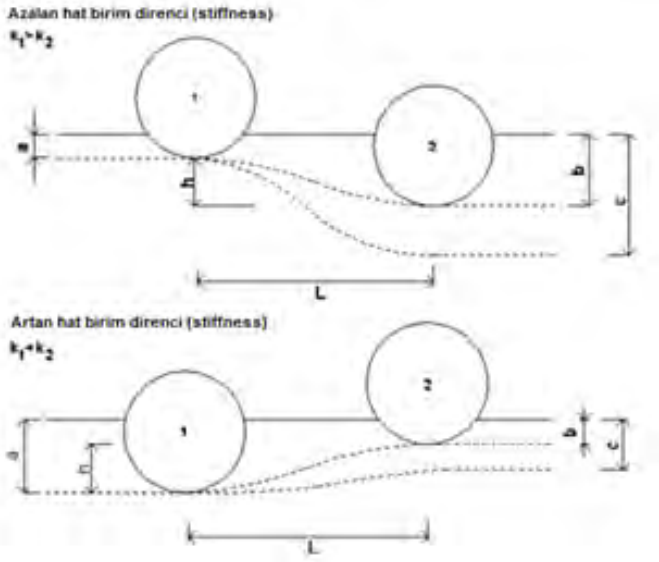
$$K_{B,d} = 1 + \sqrt{\frac{2h}{a}(1-f)} \quad (3)$$

Şekil 5'te, geliştirilen denklem ile dinamik darbe kuvvet katsayılarının tahmin edilmesi için geliştirilen ve sıkça kullanılan mevcut diğer ampirik denklemlerin kıyaslanmaları görülmektedir. Bezgin tarafından geliştirilen denklem, farklı hat esneklik değerleri sonucu ortaya çıkan farklı statik sehim değerlerini dikkate alabilmekte ve farklı h/a oranları için dinamik darbe kuvvet katsayıları için tahminlerde bulunabilmektedir ve bu tahminler, diğer ampirik denklem tahminlerini de içermektedir.



Şekil 5. Geliştirilen denklem sonuçlarının kıyaslanması

Geliştirilen bu denklem ile ortaya çıkan faydayı takip eden süreç içerisinde, alçalan hat profili nedeniyle oluşan dinamik darbe kuvvetlerine ek olarak, artan hat profili, azalan hat esnekliği ve artan hat esnekliği nedenleriyle ortaya çıkan dinamik darbe kuvvet katsayılarının tahmini için üç denklem daha geliştirilmiştir (Bezgin, 2018b,c). Şekil 6'da, azalan ve artan hat esnekliği ile oluşan statik ve dinamik sehim değerleri görülmektedir. Hat esneklik değerlerinin k_1 ve k_2 olduğu bölgelerde statik hat sehim değerleri sırasıyla a ve b ile temsil edilmektedir.



Şekil 6. Azalan ve artan demiryolu hat esneklikleri

Eşitlik 4, 5 ve 6'da sırasıyla yükselen hat profili ($K_{B,a}$), azalan hat esnekliği (K_{B1}) ve artan hat esnekliği (K_{B2}) nedenleriyle ortaya çıkan dinamik darbe kuvvetlerinin tahmini için geliştirilen denklemler sunulmaktadır.

$$K_{B,a} = 2.\sqrt{\left[\frac{h}{2a}.(1-f)+1\right]} - 1 \quad (4)$$

$$K_{B1} = \left[1 + 1.414\sqrt{1 - f + \frac{a}{b}.(f-1)}\right] \quad (5)$$

$$K_{B2} = \left[1.414\sqrt{1 + f + \frac{a}{b}.(1-f)} - 1\right] \quad (6)$$

Bu bölümde özeti sunulan çalışmanın mevcut tüm detayları kaynaklarda bulunabilir (Bezgin 2017, 2018a,b,c). Sıradaki bölümde, bu bölümde sunulan yöntemin, teorik bir menfez üzerinde hat esnekliğinde meydana gelen değişim nedeniyle ortaya çıkması muhtemel dinamik

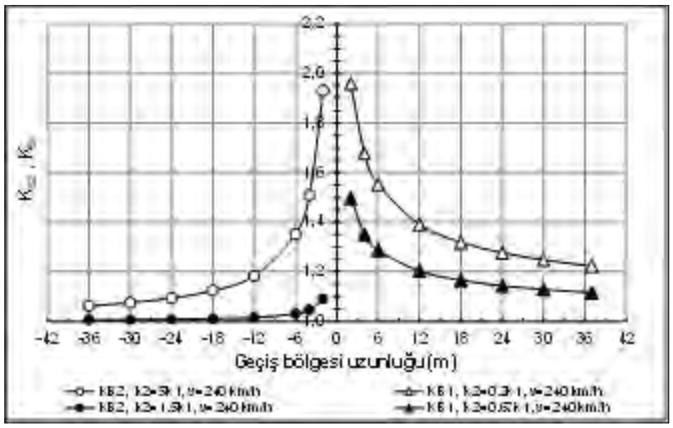
darbe kuvvet değerlerini tahmin etmek üzere bir uygulaması sunulacaktır.

3 HAT ESNEKLİK DEĞİŞİMİ NEDENİYLE DİNAMİK DARBE KUVVETİNİN OLUŞUMU

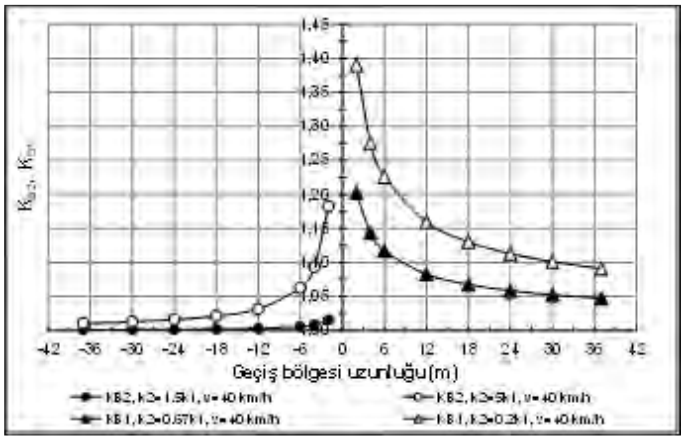
Bu bölümde, bir demiryolu hattında yer alan menfez nedeniyle ortaya çıkan esneklik değişiminin oluşturacağı dinamik darbe kuvvetlerinin muhtemel değerleri irdelenecektir. Kurgulanan teorik durumda, hat esneklik değeri tekerlek altında k_1=50 kN/mm olarak kabul edilmiştir. Bu değer, demiryolu hatları için optimum kabul edilen değer aralığındadır (Sussman vd., 2001), (Teixeira vd., 2006). Hat üzerinde hareket eden trenin statik dingil kuvveti 180 kN ve statik tekerlek kuvveti ise F_s= 90 kN olarak kabul edilmiştir. Bu statik kuvvet değeri bir yolcu trenini temsil etmektedir. Bu kuvvet altında hattın tekerlek altında statik sehim değeri a= 90 kN/50 kN/mm = 1.8 mm olmaktadır.

Hat esnekliğini menfez üstüne geldiği zaman sırasıyla 1,5 kat ve 5 kat arttığı teorik bir durum düşünülmüştür. Dolayısı ile tren menfeze geldiğinde sırasıyla k_2=1,5k_1 ve k_2=5k_1 oranlarında bir esneklik artışı ile karşılaşacaktır. Tren menfez üzerinden tekrar hatta geçtiğinde ise bu sefer k_2=0,67k_1 ve k_2=0,2k_1 oranlarında bir esneklik azalışı ile karşılaşacaktır. Dikkate alınan bu esneklik değişimlerinin sırasıyla L=4 m, 6 m, 12 m, 18 m, 24 m, 30 m ve 36 m'de meydana geldiği durumlar dikkate alınmıştır. Hat esnekliğinin oluştuğu mesafe arttıkça belirli bir hızda meydana gelen dinamik darbe kuvvetinin azalması beklenmektedir. Yapılan değerlendirmede v=40 km/saat ve v=240 km/saat olmak üzere iki hız değeri dikkate alınmıştır.

Esneklik farkından ortaya çıkan statik sehim farkına göre teorik düşme zamanının ve "L" ile belirtilen geçiş bölgesini belirtilen hızlarda kat etmek için gereken sürelerden yola çıkarak Denklem 1'de sunulan "f" değerleri tespit edilmektedir. Ardından, tespit edilen "f" değerlerinin de kullanımı ile menfez bölgesine giriş anında Denklem 6'dan K_{B2} değerleri, menfez bölgesinden çıkış anında ise Denklem 5'in kullanımı ile de K_{B1} değerleri tespit edilmektedir. Şekil 7 ve 8'de sırasıyla v=240 km/saat ve v=40 km/saat hız değerleri için, dikkate alınan esneklik oranları ve geçiş bölgesi uzunluk değerlerine bağlı olarak ortaya çıkabilecek dinamik darbe kuvvet katsayıları görülmektedir.



Şekil 7. 240 km/saat tren hızında menfez bölgesine giriş ve menfez bölgesinden çıkış anlarında oluşması muhtemel dinamik darbe kuvvet katsayıları



Şekil 8. 40 km/saat tren hızında menfez bölgesine giriş ve menfez bölgesinden çıkış anlarında oluşması muhtemel dinamik darbe kuvvet katsayıları

Elde edilen sonuçlar, artan ve azalan hat esneklik değerleri sonucunda farklı dinamik darbe kuvvet değerlerinin ortaya çıktığını göstermektedir. Bu bulgu, kapsamlı bilgisayar programları ile oluşturulan

demiryolu hattı modellerinin, yüksek kapasiteli bilgisayarlarda çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar ile desteklenmektedir (Wang vd., 2017). Elde edilen sonuçlara göre özellikle yüksek 240 km/saat hızlarda, esneklik değişiminden kaynaklı dinamik darbe kuvvetleri, statik kuvvet değerinin 2 katına ulaşabilmektedir.

Esneklik değişimine ek olarak, bu değişimin meydana geldiği bölgelerde sıklıkla profil farklılıkları da oluşmaktadır (Briaud 2017, Wang vd. 2015). Bu nedenle esneklik değişiminin olduğu bölgelerde sadece esneklik değişiminden değil, bu değişimin meydana getireceği farklı oturma değerlerinden kaynaklı dinamik darbe kuvvetleri de oluşacaktır. Ancak bu çalışmada sunulan kurgusal demiryolu hattı üzerinde sadece esneklik değişimden kaynaklı dinamik darbe kuvvet değerleri değerlendirmeye alınmıştır.

4 SONUÇLAR

Demiryolu hatları, hat üzerinde seyreden tek seferde yüksek miktarda ağır yük ve yüksek sayıda yolcu taşıyabilme kapasitesi ve hat işletme ilkelerine bağlı olarak saatte sefere çıkarılabilecek tren sayısına bağlı olarak ulaştırma ağının çok önemli bir parçasıdır. Bugün, sanayi devrimini gerçekleştirmiş tüm ileri ülkelerin kapsamlı demiryolu ağlarını kurdukları ve özellikle hammadde ve bitmiş ürün nakillerinde bu ağlardan önemli yararlar sağlamış oldukları görülmektedir.

Ulaştırmanın tek cümle ile özetlenebilecek felsefesini : "İnsanın ve/veya eşyanın belirli bir yerde, belirli bir zamanda ve belirli bir sayıda ve/veya miktarda var olabilmesi" gerçekleştiren bir ulaşım yöntemi olan demiryolları bugün, ülkemizde 2000'li yılların başından itibaren artan şekilde kullanılmaktadır.

Demiryollarının artan kullanımı ile birlikte, demiryolu hattının mekanik davranışlarının doğrulukla anlaşılması ve bu davranışların doğrulukla tahlil edilebilmesi gerekmektedir.

Bununla birlikte, birbiri ile etkileşim içerisinde çokça yapısal unsur barındıran demiryolları davranışının çözümlenebilmesi için elle uygulanabilir nitelikte ve matematiksel olarak kesin ve basit yöntemler sayıca azdır. Günümüzde gelişen teknoloji ile birbiri ile etkileşim içerisinde çokça denklemi aynı anda çözebilen programlar sayesinde demiryolu modelleri kurgulamak ve çözmek mümkün hale gelmiştir. Ancak bu programları kullanmak ile bu programlara muhtaç olmak arasında da bir fark vardır.

Buradan yola çıkarak geliştirilen basit analitik yöntem ile demiryolu hat esneklik değişiminden kaynaklı tekerlek kuvvetlerinin değişimini yorumlamak mümkün hale gelmiştir.

Alışılmış tünel ve yer altı yapılarına kıyasla menfezler, yer üstüne çok yakın ve sıklıkla da insan yapısı yığma toprak içerisine inşa edilen alt yapı unsurlarıdır. Ancak gerek taşıdıkları yapının, niteliği itibariyle sürekli olarak hareket halinde olan ve hareket halinde kalması gereken trenleri taşıyan demiryolları olabilmesi, gerekse de trenlerin oluşturdukları gerilmelerin etkin oldukları sığ derinliklerde bulunmaları nedeniyle tasarım ve etki değerlendirmeleri özen ister. Özellikle işletme altında bulunan hatların altına kazılacak menfezlerin inşaları, inşaat payhadlerinin (tolerans) az olması nedeniyle özenle gerçekleştirilmelidir.

Sunulan bu çalışma ile demiryolu hatlarından kaynaklı düzensizlikler ile ortaya çıkan dinamik darbe kuvvetlerinin değerlendirilmesine yönelik yeni bir yöntem tanıtılmıştır. Menfezlerin, hat esnekliğini artırıcı etkileri vurgulanmış ve artış nedeniyle de artabilen tekerlek kuvvetleri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, sadece demiryolu hat esneklik değeri dikkate alınmıştır ancak hat esnekliğine ek olarak trenin tekerlek ve boji aksamına ait esneklik unsurlarını da dikkate alan yeni denklemlerin geliştirilmesine devam edilmektedir.

KAYNAKLAR

Beben, D. 2014. Corrugated Steel Plate Culvert Response to Service Train Loads. Journal of Performance of Constructed Facilities Volume 28 Issue 2 - April.

Bezgin, N.O. 2017. Development of a new and an explicit analytical equation that estimates the vertical impact loads of a moving train. Procedia Engineering, Vol. 189, pp. 2-10, May.

Bezgin, N.O. 2018a. Application of a new concept and a method to estimate the vertical impact forces on railway tracks due to track stiffness variations. 97th Transportation Research Board Meeting, Washington DC, Paper No.: 18-00407. Received August 1, 2017, presented and published January 8, 2018.

Bezgin, N.O. 2018b. Application of a new concept and a method to estimate the vertical impact forces on railway tracks due to track profile irregularities. 97th Transportation Research Board Meeting, Washington DC, Paper No.: 18-00407. Received August 1, 2017, presented and published January 8, 2018.

Bezgin, N.O. 2018c. Proposal of a new analytical method to estimate the vertical impact forces on railway tracks due to changes in track profile and track stiffness ", 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA 2018, Zadar, Croatia, 17-19 May 2018, pp. 837-845.

Briaud, J. L., James, R. W., Hoffman, S.B. 1997. Settlement of Bridge Approaches (The Bump at the End of the Bridge). Transportation Research Board, Washington, D.C.

Briaud, J.L., Tafti, S.R. 2017. High Speed Train Geotechnics: What is a Tolerable Bump?. Procedia Engineering. Volume 189, pp. 186-192. Elsevier.

Dinqing, L, Davis, D. 2005. Transition of Railroad Bridge Approaches. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering. Vol. 131, No.11, ASCE.

Eisenmann, J. 1969. Stresses in Rail Acting as a Beam Special excerpt from ETR Eisenbahntechnische Rundshau, Vol.8, Hestra, Darmstadt.

Lichtberger, L. 2011. Track Compendium. Eurail Press.

Stark, T.D., Wilk, S.T., Rose, J.G. 2016. Design and Performance of Well-Performing Railway Transitions. Transportation Research Board 95th Annual Meeting. TRB 16-5926.

Sussman, T.R., Ebersöhn, W., Selig, E.T. 2001. Fundamental Non-linear Track Load-Deflection Behavior for Condition Evaluation. Transportation Research Record 1742, Paper No: 01-2916.

Talbot, A.N. et al. 1919. Stresses in Railroad Track, Report of the Special Committee to Report on Stresses in Railroad Track, First Progress Report, AREA Proceedings, Vol. 19, 873-1062.

Teixeira, P.F., Lopez-Pita, A., Casas, C., Bachiller, A., Robuste, F. 2006. Improvements in High-Speed Ballasted Track Design. Transportation Research Record, No: 1943, P43-49.

Wang, H., Markine, V.L., Shevtsov, Dollevoet, R. 2015. Analysis of the Dynamic Behaviour of Railway Track in Transition Zones with Differential Settlement. Proceedings of the 2015 Joint Rail Conference – JRC 2015, San Jose, CA, USA. March.

Wang, H., Silvast, M., Markine, V., Wiljanen, B. 2017. Analysis of the dynamic wheel loads in railway transition zones considering the moisture condition of the ballast and subballast. Applied Sciences. 1208. Received October 28, 2017, published November 23.

www.trenhaber.com, 15.12.2017.

Duble Yol Projesi İnşaatı RN09: Kherrata Boğazları Düzenleme Çalışmaları

Construction Project of Road Duplication RN09: Kherrata Gorges Rehabilitation Works

T. Özdemir, C. İlker, S. Taşatan
Özgün İnşaat Taahhüt Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, İstanbul

ÖZET Kherrata boğazlarının eski yolunun genişletilmesi, Bejaia ve Setif'i biribirine bağlayan bütünsel duble yol projesinde yer almaktadır. Bu proje, RN09 karayolunu 2'ye 2 çift yönlü bir anayola dönüştürecektir.

Bir hayli dağlık bir çevredeki Agrioun Deresi tarafından bölünen vadideki Bordj Mira ve Kherrata arasındaki RN09'u genişleten proje, ağır vasıtaların güvenli geçişi için olan standartlar tarafından belirlenen boyutlara ulaşmak için, 150 yıllık bir yolun genişletilmesini kapsamaktadır.

Yolun güzergahının yeniden tanımlanması, mümkün olduğu kadar eski güzergahı ve 1863 ile 1925 yılları arasında inşa edilen tarihi yapıları koruma amacında gerçekleştirilmiştir. %84,55'lik kısım, istinat duvarlarından (%12,65), estakatlardan (%35,20) ve yarım-köprülerden (%7,5) oluşmaktadır. Bu yapılar, eski güzergahı koruma düşüncesiyle dizayn edilmiştir. Yapıların geriye kalan%29,20'si, köprülerden (%5,80) ve tünellerden (%23,40) oluşmakta; bunlar da eskiye nazaran yeni güzergahı kısmen saptırmaktadır

ABSTRACT The widening of the ancient road of Kherrata Gorges is included in the global project of the duplication road linking Bejaia and Setif. This project is going to transform the national route RN09 into a 2 by 2 lane highway.

The project for the upgrading of the RN09 between Bordj Mira and Kherrata in the valley crossed by the Agrioun Wadi, in a highly mountainous environment consists in widening a 150 years old road to reach the dimensions established by the standard for the safe passage of heavy vehicles.

The redefinition of the alignment has been carried out in the object of preserving as much as possible the old alignment and the historic structures built between years 1863 and 1925.

Of this 84.55%, 55.35%consists of walls (12.65%), cantilever beams (35.20%) and semi-bridges (7.50%). These structures are designed with the idea of preserving the old alignment. The remaining 29.20%of the structures consists of bridges (5.80%) and tunnels (23.40%) these partially deviating the new alignment from the ancient one.

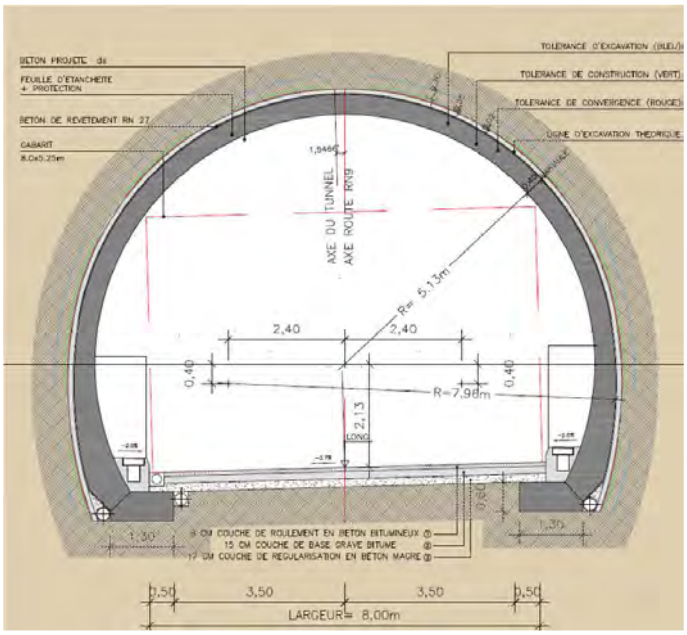
1 TÜNELLER

Kherrata boğazlar güzergahı, yüksek derecede stabil olmayan alanlarını elemek ve ayrıca büyük miktarda kaya eğimi takviyesinden kaçınmak için 4 tüneli kapsamaktadır. Tünellerin kullanımı, aynı zamanda dar yarıçap eğrilerinin ihtiyacını önleyen güzergaha esneklik sağlar.

Toplam tünel uzunluğu 1583 metredir :

- Tünel 1: km 1 + 460 – km 1 + 975, 515 m
- Tünel 2: km 3 + 680 – km 3 + 920, 240 m
- Tünel 3: km 5 + 112 – km 5 + 515, 403 m
- Tünel 4: km 6 + 170 – km 6 + 595, 425 m

Şekil 1'de, bu tüneller için kullanılan kesit görülmektedir.



Şekil 1. Tüneller enkesit

Şimdiye kadar T4 tüneli üzerindeki çalışmalar tamamlanmışken, diğer 3 Tünel hâlâ inşa edilme aşamasındadır.

T4 tünelinde, tünel astarı (kaplaması) 6 + 177 km ile 6 + 588 km (L = 411 m) arasındaki alanı kapsamaktadır. Bütün tünel kazı alanı, projenin km 6 + 191.2 ve km 6 + 582 (L = 390,8 m) arasındaki kesitler içerir. 425 m'lik toplam tünel uzunluğunu tamamlayan tünel bağlantılarını tanımlamak için yardımcı bir yapı tasarlanmıştır (Şekil 2).

Şekil 2. Tünel 4 (425 m)

2 PROJE

2.1 Güzergah

Cezayir'deki yollar için tasarım kriterleri, proje tasarımında uygulanan Cezayir Bayındırlık Bakanlığı tarafından yayınlanan "B40 Karayolu Gelişimi Teknik Standartları" belgesinde belirtilenlerdir (Şekil 3-4).

Şekil 3. Eski yol; duvar işleri ve dikey falezler

Şekil 4. Eski yol; duvar işleri ve dikey falezler

2.2 Yatay Güzergah

Güzergahın toplam uzunluğu 6636 m'dir. RN09 yolu, tipik bir E3 çevresinde kategori 1 olarak sınıflandırılmıştır.

Sarp dağlık araziyi hesaba katarak (ortalama %4'ten daha yüksek ortalama kümülatif yükseklik farkı) ve önemli bir kıvrımlık (s > 0,3) ile karakterize edilirken, referans hız (Vref), güzergahın çeşitli

bölümlerinde 60 km/s'ye kadar da artabilen 40 km/s olarak kabul edilir. Bu kriterler ile mevcut standartların izin verdiği minimum yarıçap Çizelge 1'deki gibidir.

Çizelge 1. Referans hızına göre minimum yarıçap

V_{ref} / R (m)	60 km/s	40 km/s
Mutlak Minimum	125	50
Normal Minimum	250	125

Yatay hizalamanın bu parametreleri, km 4 + 883'te tekil bir nokta hariç, güzergah boyunca dikkate alınır. Bu noktada, çok sıkı bir eğrinin zaten mevcut olduğu, 30 km/s'lik bir referans hızıyla 40 m'lik bir yarıçap yansıtılmıştır.

2.3 Dikey Güzergah

Dikey güzergah ile ilgili olarak, B-40 standardı zor bir ortamda Kategori 1 ve 2 yol için maksimum %6 eğim önermektedir. Bununla birlikte, standartlar, önemli ve yerelleştirilmiş yükselmeler için maksimum değerin %2 oranında artmasına izin vermektedir. Benzer şekilde, ARP zor arazi yolları için%8'e kadar değerlere izin verir.

Projenin mevcut yolun profilini takip ettiği ve bu nedenle mevcut profilin çok belirgin olduğu vurgulanmalıdır. Genel olarak, güzergah, yaklaşık %7,50'ye kadar arttırıldığı bazı noktalar haricinde ortalama %4'lük bir eğime sahiptir.

BN40'da öngörülen dikey bağlantılar Çizelge 2'deki gibidir.

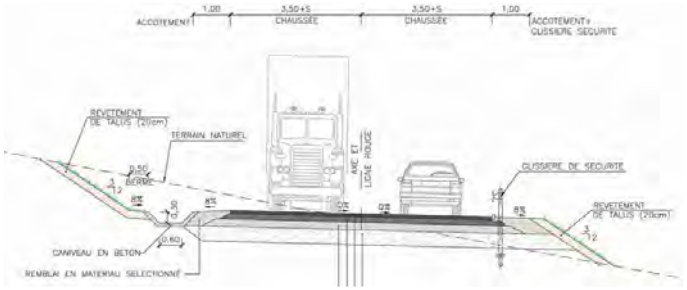
2.4 Enkesit

Standartlar, bu yol kategorisine 3,50 m genişliğinde iki şeritli bir taşıma yolunu önermektedir. Önerilen minimum banket 2,00 m olmasına rağmen, yolun yerleştirildiği dik ortamı göz önünde bulundurarak 1,00 m'ye düşürmek mantıklı görünmektedir. Aslında, zorlu yollara yönelik ARP (Ana Yolların Düzenlemesi), mümkünse 1,0 m veya 0,75 m genişliğindeki sapmış minimum bir şerit öngörmektedir.

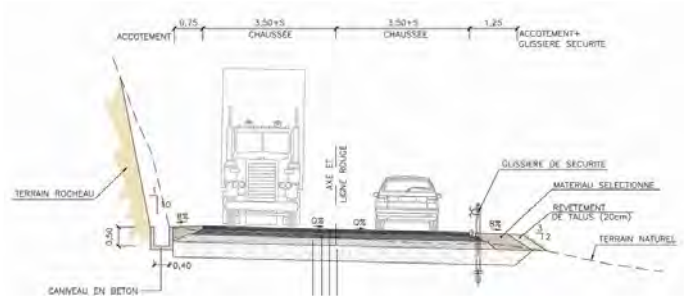
Çizelge 2. Referans hızına göre dikey bağlantı

Dikey bağlantılar		Referans hızı 60 km/s	Referans hızı 40 km/s
Mutlak minimum	Dış açı	1.500	500
	Dar açı	1.200	500
Normal minimum	Dış açı	4.500	1.500
	Dar açı	2.400	1.200

Planlanan gelişme için olan banketler, daha kayalık kısımlardaki dağ tarafında 0,75, daha az dağlık alanlarda (kazılmış yan ve dolgu kenarı) 1,00 ve Kherrata boğazlarının daha kayalık alanlarındaki nehir kenarında 1,25 m olarak kabul edilmiştir (Şekil 5-6).



Şekil 5. Enkesit, gevşek zemin kesiti



Şekil 6. Enkesit, kaya kesit

3 YAPILAR

Daha önce açıklandığı gibi Kherrata boğazlarının dik topografisi, güzergahın büyük bir kısmının (%84,55), nihai taşıt yolu genişliğini elde etmek için yapıların tasarımını gerektirdiğini ifade eder.

Tüm yapılar, Cezayir Standartlarına (D.T.R.) uygun olarak tasarlanmış ve ayrıca Eurocodes kriterlerini karşılamaktadır.

Sismik faaliyet, RPOA (“Règles parasismiques au domaine des Ouvrages d'Art” : ‘’Sanat Yapıları Hususunda Parasismik Kurallar’’) 2008'de açıklandığı gibi dikkate alınmıştır.

Aşağıdaki paragraflar, bu projede kullanılan farklı yapı tipolojilerini açıklar.

Estakatlar (“Estacades”):

Bu yapısal çözüm, nehir kenarı tarafından genişlik kazanmasına ve dikey kaya yamaçlarının kazılarının en aza indirilmesine izin veren 2.3 kilometreden fazla bir alanda uygulanmaktadır.

Genel olarak, estakat sistemi, pistin tüm üstyapısını destekleyen bir beton döşemeyi tutan güzergahın eksenine dik bir dizi kiriş tarafından tanımlanır. Bu kirişler, ucunda (dağ tarafı) zemine ve kirişin bir ara noktasında, mikrokazıklar vasıtasıyla bağlanmıştır(ankre edilmiştir).

Orta destek noktasının göreceli konumu, topoğrafyaya bağlıdır ve estakat uzunluğunu ve de onun tipolojisini belirler.

Estakatların statik konsepti Şekil 7’de görülmektedir.

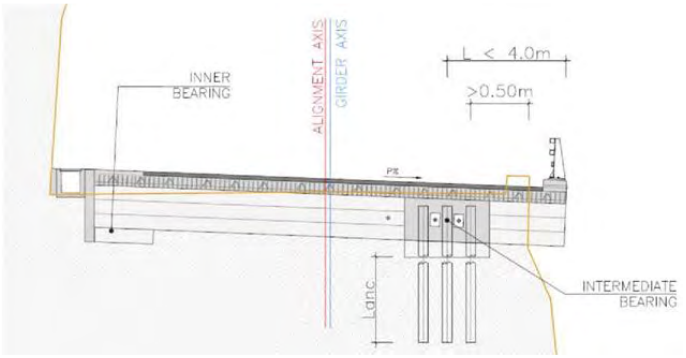
Şekil 7. Estakat statik konsepti

Üç tip kiriş hesaplanmıştır: Tip 1 ve Tip 2 kirişler öngermeli kirişlerdir; ve 3 kirişler, karışık beton ve çelik çözümüne yanıt verir. Tip 3 estakatlarda, çelik ile beton bölüm arasındaki bağlantı, artgerme çubukları kullanılarak yapılır.

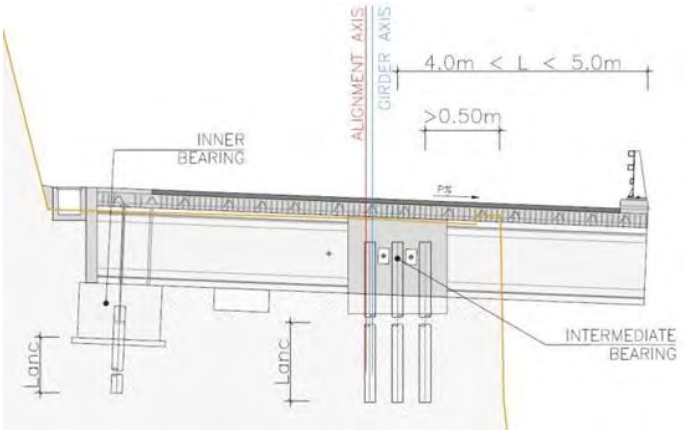
Aşağıda belirtildiği gibi, bir tipolojiyi veya başka bir tanesini tayin etmek için benimsenen kriterler:

Tip 1 kirişler: Kirişler maksimum 4.00 m ile ayrıldıklarında ve estakat uzunlukları, 3.00 m'den az olduğunda (Şekil 8);

Tip 2 kirişler: Kirişler maksimum 4,00 m ile ayrıldıklarında ve estakat uzunluğu, 5,00 m'den az olduğunda (Şekil 9);

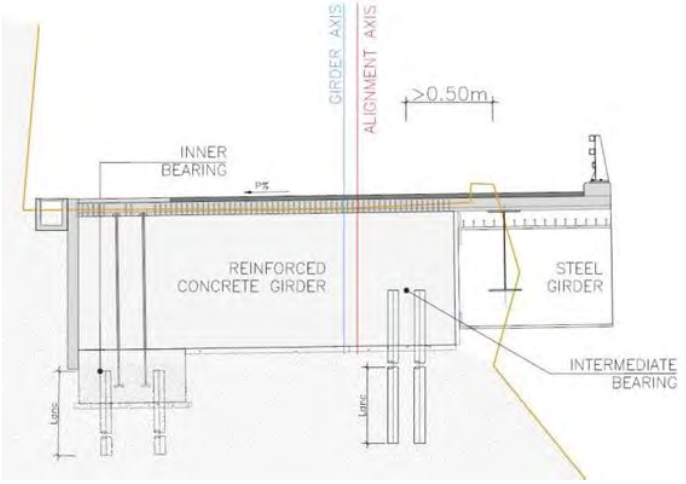


Şekil 8. Tip 1 kirişler



Şekil 9. Tip 2 kirişleri

Tip 3 kirişler: Diğer tüm durumlarda, örneğin, kirişler 4.00 m'den daha büyük bir mesafe ile ayrıldığında veya estakat, 5,00 m’den daha uzun olduğunda. Bu durumda, kirişler arasındaki ayrım 4,00 m'den daha büyük olduğu için, sıkıştırma plakası tarafından iletilen kuvvetlere dayanacak şekilde bir bağlantı kirişi düzenlenir (Şekil 10).



Şekil 10. Tip 3 kirişleri

Çizelge 3. Estakat kirişleri tipleri

	Tip 1	Tip 2	Tip 3
Kirişler arası mesafe	S ≤ 4 m	S ≤ 4 m	S ≥ 4 m
Estakat uzunluğu	L ≤ 3 m	3 m < L ≤ 5 m	L ≤ 6.5 m
Kiriş enkesit	0.90 m x 0.4 m	1.40 m x 0.70 m	2.50 m x 1.50 m ve 1.9 m I Çelik kesit

Şekil 11. Tip 3 estakatları kesiti

Estakat kirişlerinin temeli, mikrokazıklar ile gerçekleştirilir. Nehir tarafı mikrokazıkları, mevcut duvardan en az 0,50 m mesafede bulunmaktadır. Mikrokazıkların toplam çapı 200 mm'dir ve çerçeveyi oluşturan ve 9 mm kalınlığa sahip metal tüplerin çapı 127 mm'dir. Servis sırasında gerilme reaksiyonları meydana gelebileceğinden; iç temel için, mikrokazık bazlı çözüm, Tip 2 ve Tip 3 kirişler için kullanılır. Tip 1 kirişler için, iç mesnet her zaman sıkıştırma altındayken; yüzeysel bir temel kullanılmıştır.

Reaksiyonları doğru bir şekilde iletmek için gerekli olan mikrokazık sayısı, estakat açıklığına, kiriş ayrılmasına ve toprak özelliklerine bağlı olarak her bir noktaya bağlıdır.

Son olarak, yol üst yapısını desteklemek için 25 cm'lik bir betonarme döşeme kullanılmıştır. İnşaat süreci ve özel olarak bu tür bir topografide kalıp montajının zorluğu göz önüne alındığında, sıkıştırma plakası, döşemenin üst kısmı ile kesme bağlantısını sağlayan takviye edici çelik hasırlardan oluşan 7 cm'lik prefabrik beton döşemeler kullanılarak tasarlanmıştır. Düzgün bir şekilde döşenen prekast döşemelerde, 25 cm kalınlığında bir nihai sıkıştırma plakasının elde edilmesi için 18 cm'lik beton dökülecektir (Şekil 12-13-14).

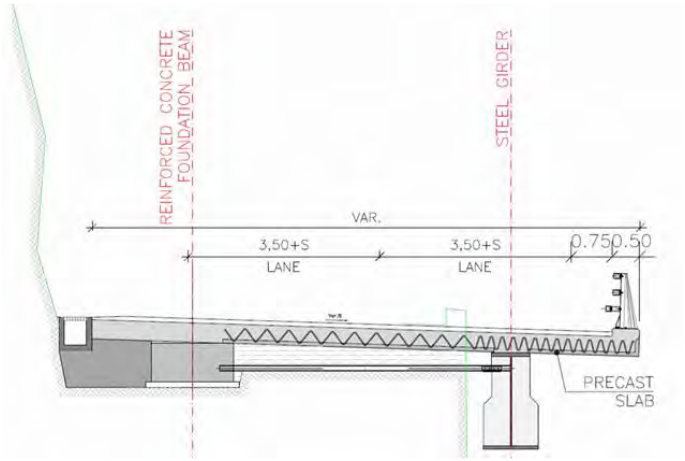
Şekil 12. Tip 2 prekast döşemeler

Şekil 13. Tip 2 estakat kirişleri

Şekil 14. Tip 3 estakat kirişleri

3.1 Yarım-köprüler (“Semiponts”)

Yarım-köprü tasarımındaki çalışmalar, boylamasına tek bir çelik kirişin ve enkesitin iç kısmındaki bir iç beton kiriş temelin üzerinde duran bir tabliyeden oluşur (Şekil 15).



Şekil 15. Yarım-köprü enkesiti

Bu çözüm, estakat açıklığı veya olası temeller ekseni arasındaki mesafe nedeniyle, çoğunlukla eski yol platformunun dar olduğu ve estakatın kullanılmasının mümkün olmadığı bölümlerde uygulanır. Bu, daha ziyade olarak güzergah bölümlerinde ortaya çıkar ve bu çözüm, yarıçapın yatay hizalanmasını sağlar.

Proje, ana kirişe bağlı olarak, üç tip yarım-köprü içermektedir:

- Yarım-köprü tipi SP30: maksimum kiriş açıklığı 30 m
- Yarım-köprü tipi SP40: maksimum kiriş açıklığı 40 m
- Yarım-köprü tipi SP60: maksimum kiriş açıklığı 60 m

Her üç tipte tabliye kesiti, beton temel kirişe de bağlı olan bir beton sıkıştırma levhasına bağlı çelik kiriş ile birleşik bir kesit olarak tasarlanmıştır. Betonarme kemer ayakları, mikrokazık temeller ile tasarlanmıştır. İç temeldeki germe reaksiyonlarına da mikrokazıklar kullanılarak direnç gösterilir.

Yapıyı kaya kütlesine bağlayan betonarme ankrajlar, enine sismik etkileri dizginlemek için tasarlanmıştır.

Çizelge 4'de, 3 yarım-köprü tipinin ana özellikleri özetlenmektedir.

Sıkıştırma plakası, sabit kalınlıklı güçlendirilmiş betonarme bir döşemedir. Estakat kirişlerinde olduğu gibi, kalıp montajının zorluğu, her tipolojideki toplam döşeme kalınlığına ulaşmak için yerinde dökülen artık betonu sağlayacak 7 cm kalınlığında prekast beton döşemelerin kullanılmasına yol açmıştır (Şekil 16-18).

Çizelge 4. Yarım-köprülerin geometrisi

	SP30	SP40	SP60
Çelik kiriş açıtı	L ≤ 30 m	30 m < L ≤ 40 m	40 m < L ≤ 60 m
Çelik kiriş yüksekliği	1.20 m	1.75 m	2.50 m
Beton döşeme yüksekliği	0.30 m	0.35 m	0.40 m

Şekil 16. 52.5 m yarım-köprü; Tip SP60

Şekil 17. Prekast döşemeler

Şekil 18. Çelik kiriş kesiti

Proje, Çizelge 5'de belirtildiği gibi bölünmüş 13 adet yarım-köprüyü içeriyor.

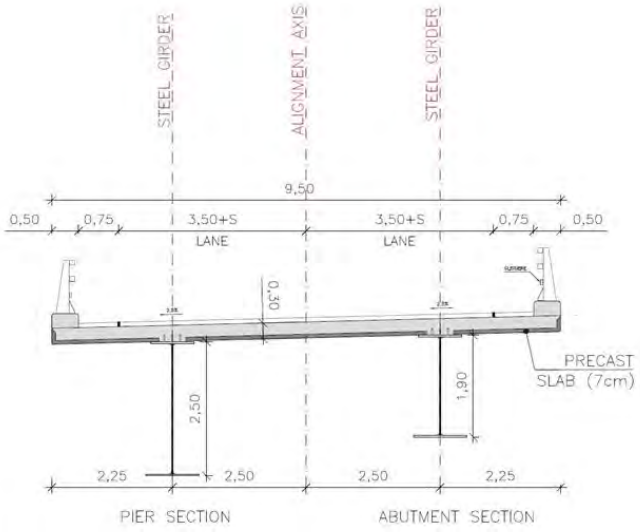
Çizelge 5. Yarım-köprüler projesi

SP30	SP40	SP60
4 birim	5 birim	4 birim

3.2 Köprüler

Köprüler, yol güzergah ekseninin mevcut yola nazaran büyük bir değişiklik gerektirdiği ve boğazların topografyasının köprü ayaklarının ve temellerin uygulanmasına erişime izin verdiği bölümlerde sağlanır.

Proje, 3 kompozit köprü içermektedir. Her üçünde de enkesit, kiriş eksenleri arasında 5m'lik 2 çelik kirişten oluşur. Toplam tabliye genişliği 9,50 m ve takviye betonarme döşeme 30 cm kalınlığındadır (Şekil 19).



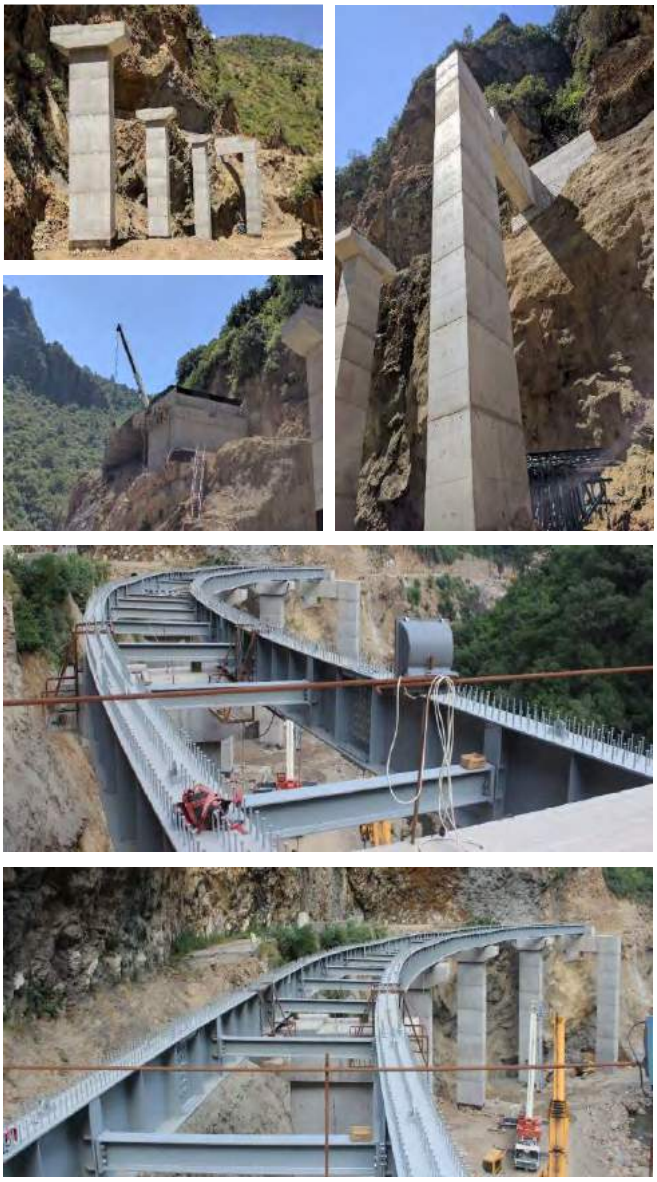
Şekil 19. Değişken yükseklikli kirişler için enkesitler

Açıklık düzenlemesine bağlı olarak 2 köprü tipi vardır. Üçü de, elastomerik mesnetler kullanarak betonarme köprü ayakları ve kemer ayakları üzerinde desteklenen sürekli köprüler olarak tasarlanmıştır.

Köprülerin sismik konseptine istinaden, enine doğrultuda sismik çabalar, eğimli köprünün kısıtlanmayan 1 ve 4 numaralı ayakları hariç, hem köprü ayakları ve hem de kemerlerinde dirençle karşılaşırken; yapı, merkezi köprü ayaklarına uzunlamasına bağlanmıştır (Şekil 20-23). Çizelge 6'da, köprü özellikleri özetlemektedir.

Çizelge 6. Köprülerin geometrisi

	OA2.7	OA3.4	OA4.0
Uzunluk	130m	125m	125m
Açıt düzenlenmesi	20-30-30-30-20	35-55-35	35-55-35
Tabliye tipi	Kompozit (duble I)	Kompozit (duble I)	Kompozit (duble I)
Çelik kiriş yüksekliği	1.50 m	Değişken 1.90-2.50 m	Değişken 1.90-2.50m
Döşeme yüksekliği	0.30 m	0.30 m	0.30 m
Güzergah	Kavisli	Düz	Düz



Şekil 20. 2.7 Sanat Yapısı

Şekil 21. 3.4 Sanat Yapısı

Şekil 22. 4.0 Sanat Yapısı podyumları

Şekil 23. 4.0 Sanat Yapısı Hanouz Köprüsü

Tahkimat Tasarımında Yeni Bir Yaklaşım: Deformasyona İzin Vermeyen Tahkimat Sistemi

A New Approach in Support Desing: Non-Deformable Support System

C.O. Aksoy
Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir-Türkiye
COA AR-GE Ltd. Şti. İzmir-Türkiye

ÖZET Yoğunlaşan nüfus, artan trafik nedeniyle şehirlerde, yüzeye yakın hammaddelerin azalması nedeniyle yeraltı yapılarının önemi artmaktadır. Yeraltı yapılarında en önemli unsurlardan birisi tahkimat sistemleridir. Literatür incelendiğinde, tahkimat tasarımında kullanılan birçok yöntem ile karşılaşılmaktadır. Bu yöntemler de kaya kütlesinin zamana bağlı davranışının dikkate alınmadığı görülmektedir. Ek olarak, bu yöntemlerin birçoğu, 2 boyutlu çözümlemeler içermektedir. Bu çalışmada, tahkimat tasarımı konusunda geliştirilmiş olan ve 3 boyutlu sayısal çözümlemeyi esas alan yeni bir yaklaşım ve bilimsel temeli hakkında bilgi verilecektir.

ABSTRACT Due to the increasing traffic in cities and the decrease of the near-surface raw materials, the importance of underground structures is increasing. One of the most important elements in underground constructions is support systems. When the literature is examined, many methods used in support design are encountered. In these methods, it is seen that the time-dependent behavior of rock mass is not considered. In addition, many of these methods involve 2D analysis. In this study, a new approach, based on 3D numerical analysis, scientific basis developed for support design will be given.

1 GİRİŞ

Tünelcilikte tahkimat tasarımı en önemli hususlardan birisidir. Tahkimat tasarımı 3 boyutlu bir çok kompleks bileşeni olan bir çözümleme sürecidir. Bu 3 boyutlu kompleks bileşenlerin bilgi ile birlikte değerlendirilmesi sonucunda doğru çözümler üretilebilir (Feng ve Hudson, 2008).

Tahkimat tasarımında değişik yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler içerisinde konverjans kısıtlama metodu (Einsenstein ve Branco, 1991), pasif tahkimat yöntemi (Barla ve Bonini, 2011; Cantieni ve Anagnostou, 2009), olabilirlik analizleri (Chen vd., 1997), kaya-tahkimat etkileşim analizler (Shin vd., 2011), yarı ampirik ve ampirik (Singh vd., 1995) yöntemleri en çok bilinenlerdir ve kendilerini önemli projelerde ispatlamışlardır.

2 YENİ TAHKİMAT TASARIM YAKLAŞIMI: DEFORMASYONA İZİN VERMEYEN TAHKİMAT SİSTEMİ

Bu yeni yaklaşım, adından anlaşıldığı üzere "sıfır deformasyon" prensibi ile çalışmamaktadır. Ana amaç, zamana bağlı olarak yapılan sayısal modelleme çözümlemeleri sonucunda elde edilen deformasyon miktarından daha fazla deformasyona izin vermemektir. Bu nedenle, yüksek tecrübe ve bilgi gerektirmektedir.

Tahkimatın maruz kaldığı eğilme momenti, kesme kuvveti ve eksenel

kuvvetler gibi bileşenler tahkimatın performansını önemli şekilde etkiler. Tünel aynasının hareketi ve ayna önünde oluşan gerilmeler ile oluşan bu etkilere karşı alınacak önlemlerin başarısı ancak 3 boyutlu analizler sonucu değerlendirilebilir (Aksoy ve Onargan, 2010; Aksoy et., al., 2012; Aksoy et. al., 2009; Aksoy et. al., 2014). Bu karmaşık yapıyı 2 boyutlu tasarlandırmak, birçok problemi de beraberinde getirmektedir. 3 boyutlu ampirik yada yarı-ampirik çözümler çok uzun zaman almaktadır. Günümüzde 3 boyutlu çözümün en kolay yapıldığı yöntem nümerik modellemedir.

3 YENİ TAHKİMAT TASARIM YAKLAŞIMININ TEMELİ

Tahkimat tasarımında en önemli gelişmeler, kayaların farklı yükler altında zamanla nasıl deformasyona maruz kaldığı ile doğrudan ilgilidir. Kayaların, matematiksel olarak zaman-yük-deformasyon (ZYD) karakteristiklerini belirlemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Farklı yükler altındaki kayaların zamana bağlı deformasyon davranışı, kaya yapılarının dengesiz koşullarının belirlenmesi için önemlidir. Öte yandan kayanın dayanımı da ayrı bir öneme sahiptir. Bu nedenledir ki, yeni yaklaşım zaman-yük-deformasyon-dayanım gibi dört değişkene sahiptir. Kısaca zaman-yük-deformasyon (ZYD) için geliştirilen üç bileşenli yüzeylerden yola çıkarak, zaman-yük-deformasyon-dayanım (ZYDD) dört bileşenli bir hiperyüzey oluşturulmuştur. ZYDD hiperyüzeylerinin özellikle kayaç yapı analizinin nümerik modelleme çalışmalarına katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Kayaçların zamana bağlı deformasyon davranışını etkileyen bazı özellikler aşağıda verilmiştir,

-Kaya malzemesinin özellikleri,
-Kaya kütlelerindeki süreksizlikler ve özellikleri,
-Kaya kütlesi tipi (bloklu, çok bloklu, şişen vb.),
-Yeraltı suyu hareketleri,
-Fayların, kırıkların ve tektonizmanın etkileri.

Brace vd. (1966) ve Bieniawski (1967) deforme bir kayacın gerilme-deformasyon davranışını ortaya koymuş ve kayaçtaki deformasyon adımlarını şu şekilde sınıflandırmıştır,

1-Çatlakların kapanması (1. aşama)
2-Doğrusal elastik deformasyon (2. aşama)
3-Karalı kırık yayılımı (3. aşama)
4-Kararsız kırık yayılımı (4. aşama)
5-Yenilme ve yenilme sonrası davranış (5. aşama)

Kaya mühendisliği tasarımının en önemli kısmı, kayaçların deformasyon ve dayanım özelliklerini, tasarımın yapıldığı yerde en uygun biçimde temsil etmektir. kaya kütlelerinin parametrelerini belirlemek için bir çok farklı yöntem kullanılmaktadır. Yerinde yapılan deneyler hem çok pahalı hem de çok zaman alıcı bir yoldur ve deneylerden elde edilen sonuçlar deneyden deneye farklılık göstermektedir (Palmström, 2001). Bu nedenle, geliştirilen formüller ile kaya kütlesinin deformasyon modülünüm belirlenmesi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 1'de, araştırma kapsamında çalışmaların yapıldığı sahalara ait ve şu an kaya kütlesi deformasyon modülünün belirlenmesinde kullanılan ampirik formüllerde bir parametre olan E_i değerinin ve kaya kütlelerinin özellikleri verilmektedir.

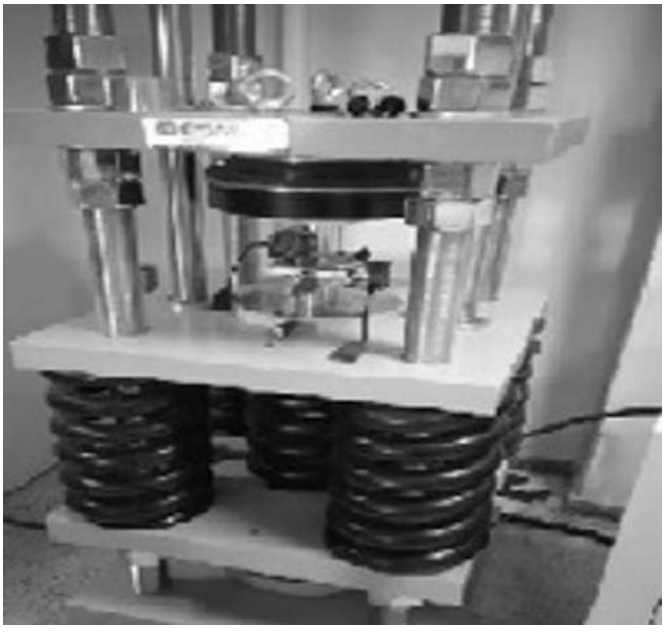
Çizelge 1. Çalışmada kullanılan kayaçların E_i değerleri

Numune	Ei (MPa)
Afyon Konglomera-1	1180
Afyon Konglomera-2	2050
Eynez Marn	1910
Tuncbilek Kiltaşı	3210
Isıklar Marn	1560
Isıklar Konglomera	8360
Isıklar Kiltaşı	4900
Isıklar Kireçtaşı	4420
Mesudiye Marn	1740
Eynez Şist	2090
Topcam Kumtaşı-1	4440
Topcam Kumtaşı-2	12020

Kaya mühendisliği çalışmaları incelendiğinde, zaman-yük-deformasyon ve dayanım gibi parametrelerin kağıt üzerinde hesaplandığı gibi olmadığı görülür. Kaya kütlelerinin zaman-yük-deformasyon-dayanım (ZYDD) davranışı, bu araştırma kapsamında tanımlanmaya çalışılmıştır.

3.1 ZYDD Davranışının Belirlenmesi

Kayaçların deformasyon davranışlarını tanımlarken, yük, yükün maruz kalma süresi, maruz kalma süresi boyunca oluşan deformasyon ve bu deformasyon miktarının yenilmeye neden olup olmadığı önemlidir. Bahsedilen bu dört değişken, kaya yapılarının istikrarı üzerinde ayrı ayrı etkili olsa da, bunların işlevleri bir bütün olarak kaya malzemesinin davranışını tanımlar. Geliştirilen hiperyüzeyler, bu dört değişkeni tanımlayarak oluşturulmuştur ve hiperyüzey denklemleri için 12 farklı yeraltı açıklığı üzerinde çalışılmıştır. Sabit yük altında kayaçların zamana bağlı deformasyon davranışını araştırmak için kullanılan servo-kontrollü hidrolik bir yükleme düzeneği Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Kayaçlara sabit yük uygulanmış laboratuar ekipmanı

Hidrolik yükleme ekipmanı ile çeşitli kaya türlerine farklı sabit yükler uygulanmıştır. Uygulanan yükleri seçerken kaya kütlesinin tek eksenli basınç dayanımı (UCS) dikkate alınmıştır. Aynı kayacın tek eksenli basınç dayanımının %50, %60, %70 ve %80 değerleri kaya üzerine sabit yük olarak yüklenmiştir. Deneyler sırasında numunelerin deformasyon miktarları düzenli olarak ölçülmüştür (Şekil 2). Örneklerin iki gün boyunca herhangi bir deformasyona uğramadığı aralık genellikle 7-10 gün arasında bir zamana tekabül etmiştir. Sabit yük altında, numunelerde zamana bağlı olarak farklı elastik modül ve farklı poison oranları değerleri gözlenmiştir.

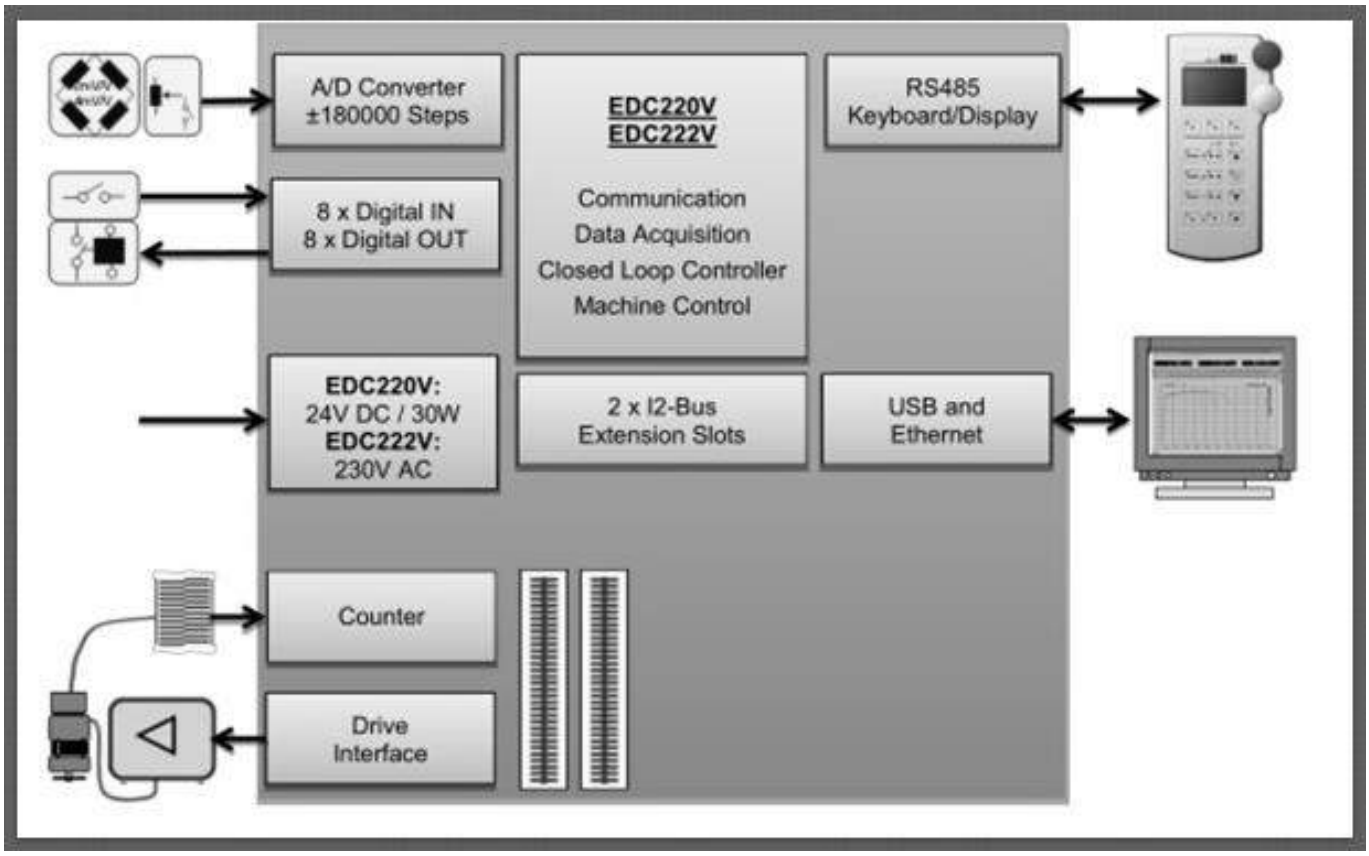
Bu araştırmanın temel amacı farklı sabit yükler altında farklı kayaç çeşitlerinin zaman içindeki deformasyonları hakkında bir tahmin yapmaktır. Deneyler sırasında test ortamının sıcaklığı ve nemi sabit tutulmuştur. Zaman içindeki deformasyon değişiklikleri farklı yeraltı açıklıklarından gelen kaya türlerine çeşitli sabit yükler vererek analiz edilmiştir. Deneyden elde edilen E_i değerlerindeki değişimler Şekil 3'de ve sonuçların bir örneği Şekil 3'de verilmiştir (Afyon Konglemera 1-2).

Bu verilerden yola çıkarak geliştirilen formül sayesinde kayaçlarda zamana-yüke bağlı oluşan E_i ve Poisson Oranı için yüzeyler geliştirilmiştir. Bu yüzeyler yine aynı örnekler için Şekil 4'de verilmektedir.

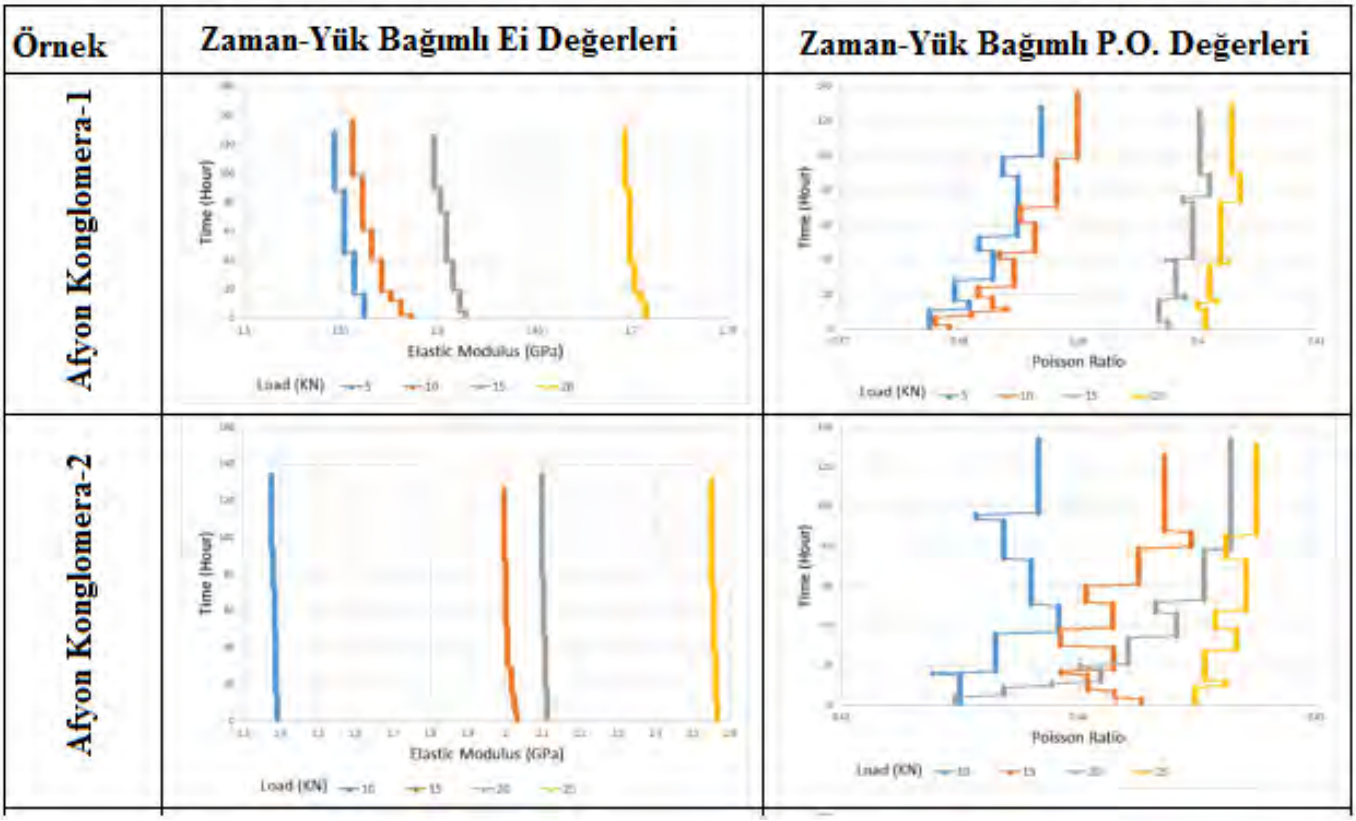
E_i değeri kaya kütlesi deformasyon modülü belirlemede kullanılan bir parametredir. Çizelge 2'de bu ampirik formüllerden bazıları verilmektedir.

E_i değerlerinin zaman içinde, yük altında değişim gösterdiği kabul edilirse, bu formüllerden hesaplanan E_{mass} değerleri de değişiklik gösterecektir. Çizelge 3'de geliştirilen formül ile hesaplanan E_{mass} değerleri verilmektedir.

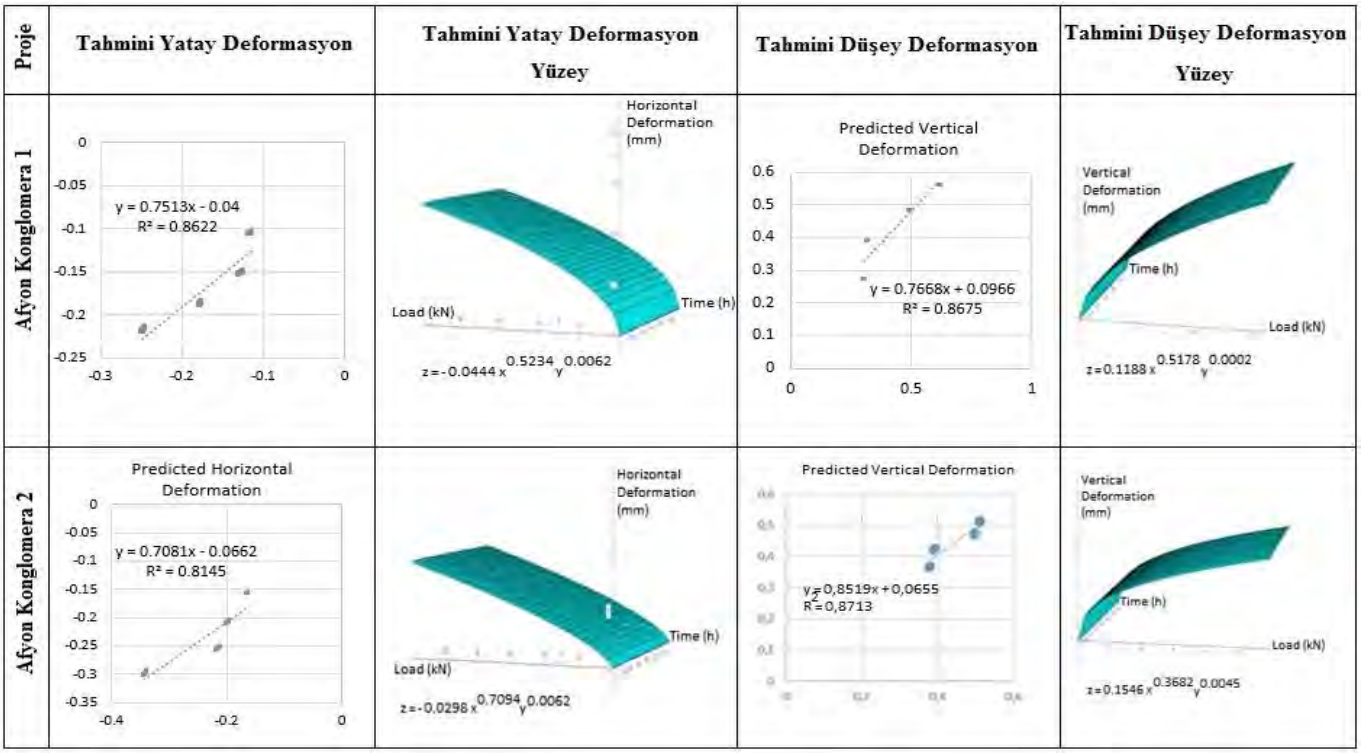
Bu durumda, kaya kütlelerinin maruz kaldıkları yüke ve zamana bağlı olarak E_{mass} değerlerinde farklılık olmaktadır. E_{mass} değeri ise sayısal modellemede kullanılan ana parametrelerden birisi olduğuna göre, sabit bir değer yerine zamana ve yüke bağlı olarak değişen değerleri kullanmak daha hassas sonuçlar verecektir. Bu nedenle, zaman, yük, deformasyon ve dayanımı için alan bir hiperyüzey oluşturmak ve sayısal modelleme çözümlemelerinde bu hiperyüzeyleri kullanmak daha hassas sonuçlar üretecektir.



Şekil 2. Deformasyon kayıt sistemi



Şekil 3. Şekil 3. Sabit yük altındaki kayalardaki zamana bağlı Ei ve Poisson Oranı değişimi (Afyon Konglomera 1-2)



Şekil 4. Tahmini yatay ve düşey deformasyonların belirlendiği yüzeyler

Çizelge 2. Kaya Kütlesi deformasyon modülünün belirlenmesinde kullanılan bazı ampirik formüller

Araştırmacılar	**Formül**	**Notlar**
Bieniawski (1978)	$E_{mass} = 2\,RMR - 100 \quad (GPa)$	RMR>50
Serafim ve Pereira (1983)	$E_{mass} = 10^{(RMR-10)/40} \quad (GPa)$	RMR<50
Nicholson ve Bieniawski (1990)	$E_{mass} = \frac{E_i}{100}\left[0.0028RMR^2 + 0.9\exp\left(\frac{RMR}{22.82}\right)\right]$	
Mitri vd. (1994)	$E_{mass} = E_i\left[0.5\left\{1-\cos\left(\pi\frac{RMR}{100}\right)\right\}\right]$	
Palmstrom (1996)	$E_{mass} = 5.6\,RMi^{0.375} \quad (GPa)$	1>RMi>0,1, orta eylemli kaya kütlesi
Palmstrom ve Sing (2001)	$E_{mass} = 7\,RMi^{0.4} \quad (GPa)$	1<RMi<30, orta eylemli kaya kütlesi
Hoek and Brown (1997)	$E_{mass} = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\,10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (GPa)$	σ_{ci}<100MPa
Read et al. (1999)	$E_{mass} = 0.1\left(\frac{RMR}{10}\right)^3 (GPa)$	
Barton (2002)	$E_{mass} = 10\,Q_c^{\frac{1}{3}} \quad Q_c = Q\,\sigma_{ci}/100$	

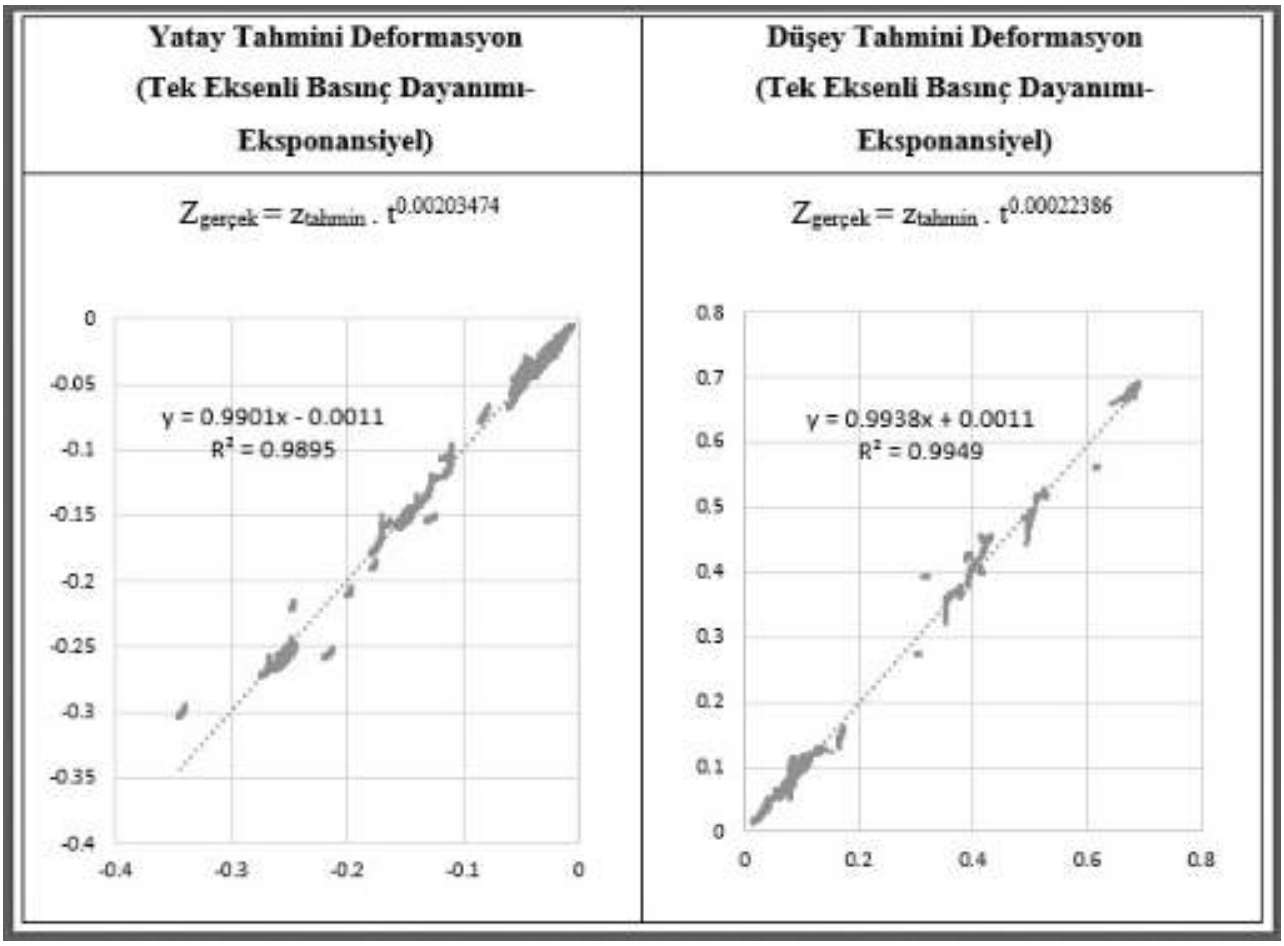
Kayabasi vd. (2003)	$E_{mass} = 0.135\left[\dfrac{E_i(1+RQD/100)}{WD}\right]^{1.1811}$	
Gokceoglu vd. (2003)	$E_{mass} = 0.001\left[\dfrac{(E_i/\sigma_{ci})(1+RQD/100)}{WD}\right]^{1.5528}$	
Sonmez vd. (2004)	$E_{mass} = E_i(s^a)^{0.4}$ $s = \exp[(RMR-100)/9]$ $a = 0.5 + 1/6[\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3))]$	
Sonmez vd. (2006)	$E_{mass} = E_i 10^{[((RMR-100)(100-RMR)/4000\ \exp(-RMR/100))]}$	
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_{mass} = E_i\left(0.02 + \dfrac{1-D/2}{1+e^{(60+15D-GSI)/11}}\right)$	

RQD : kaya kalite dizaynı
RMR : kaya kütle derecesi
RMi : kaya kütle indeksi
Q : kaya kütle kalitesi
GSI : Jeolojik stres indeksi
σ_{ci} : numuıne UCS

E_i : Numune def. modülü
E_{mass} : Kaya kütle.def. mod.
MR : modül oranı
WD : ayrışma derecesi
D : bozulma faktörü
s, a : Kaya kütle sabiti (H&B)

Çizelge 3. Kullanımda olan formüllerle hesaplanmış Emass değerleri ve yeni geliştirilen yaklaşım kapsamında hesaplanan Emass değerleri

		*Hoek and Diederichs (2006)				**Nicholson and Bieniawski (1990)				***Ramamurthy (2004)			
Örnek		**Afyon Konglomera-1**											
Formüllerden hesaplanan Emass (MPa)		**800**				**813**				**919**			
Load (kN)		5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
Emass (MPa)	Max	754	772	793	805	768	769	782	810	779	803	907	952
	Ave.	752	771	791	802	767	768	781	808	777	799	902	949
	Min	752	770	788	799	766	767	780	806	775	795	896	945
Örnek		**Afyon Konglomera-2**											
		1200				**1251**				**1727**			
Load (kN)		10	15	20	25	10	15	20	25	10	15	20	25
Emass (MPa)	Max	1071	1124	1167	1197	1092	1115	1185	1242	1269	1525	1753	1940
	Ave.	1070	1122	1165	1195	1090	1112	1184	1241	1265	1517	1749	1936
	Min	1068	1119	1163	1191	1087	1111	1182	1239	1261	1509	1745	1932



Şekil 5. Ölçülen ve tahmini deformasyon arasındaki ilişki

Bu bölümde çok değişkenli foknsiyonlar ; $z = f(x,y)$ ve $u = h(x,y,z)$, $\Re^3$ ve $\Re^4$ üzerinde tanımlanmıştır. Yüzey $z = f(x,y)$, $\Re^2$'de (x_i, y_j) tarafından gridlenmiş bölgeye bir yaklaşım olarak kabul edilir ve $z_{ij} = f(x_i, y_j)$ verileri, x'in yük (kN), y'nin zaman (saat) ve z'nin yatay veya düşey deformasyon olduğu diktörtgen bölgedeki farklı noktalardaki iki değişkenin durumu için belirtilmiştir. Diktörtgen bölgenin yaklaşık bir yüzeyi $z = g(x,y) = ax^b y^c$ verildiğinde, bu $z_{ij} = g(x_i, y_j) = ax_i^b y_j^c$ dikdörtgen bölgesindeki her noktadan geçer. Bağımsız değişkenlerin yük ve zamana sahip doğrusal olmayan bir yüzeyin sırasıyla x ve y olarak adlandırıldığını ve bağımlı değişkenlerin, yatay ve düşey deformasyonların z_h, z_v olarak adlandırıldığını varsayalım. $z_h = a_h x^{b_h} y^{c_h}$ ve $z_v = a_v x^{b_v} y^{c_v}$ formüle edilebilir ve tanımlanan yüzeyler minimum hata ile verilen verileri kullanarak cevap verebilir. Son olarak a_h ve a_v parametrelerini belirlemek için en küçük kareler yönteminde b_h, c_h, b_v ve c_v katsayıları kullanılabilir. Bu yüzeyler aşağıdaki gibi doğrusal formlara dönüştürülebilir,

$$u_h = k_h + b_h X + c_h Y$$

$$u_v = k_v + b_v X + c_v Y$$

$u_h = Lnz_h$, $u_v = Lnz_v$, $k_h = Lna_h$, $k_v = Lna_v$ olduğunda, $X = Lnx$ ve $Y = Lny$'dir. Doğrusal model X, , süreç değişkenleri ve logaritmik deformasyonlar u_h ve u_v arasında $u_h = k_h + b_h X + c_h Y + \varepsilon_h$ ve $u_v = k_v + b_v X + c_v Y + \varepsilon_v$, ε_h ve ε_v hata terimleri ve a_h, a_v, b_h, c_h, b_v ve c_v katsayılarını uygun bir ilişki içinde belirleyip geliştirmek için en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Deneysel süreçte her kayanın yatay ve düşey deformasyon değerlerini içeren yaklaşık 500 gözlem yapılmıştır. Problem;

$$\sum_{i=1}^{n} \left(k_h + b_h X_i + c_h Y_i - u_{h_i}\right)^2 = \sum_{i=}^{n} \left(\varepsilon_{h_i}\right)^2 \qquad \text{ve}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \left(k_v + b_v X_i + c_v Y_i - u_{h_i}\right)^2 = \sum_{i=}^{n} \left(\varepsilon_{v_i}\right)^2$$

olarak verilerin kullanılması için formüle edilmiştir. Bu formüllerde n her kayacın deneysel sayısıdır. Açıkcası yukarıdaki denklemlerin karesini asgariye indirilirse lineer sistem,

$$nk_h + b_h\sum_{i=1}^{n} X_i + c_h\sum_{i=1}^{n} Y_i = \sum_{i=1}^{n} u_{h_i}$$
$$k_h\sum_{i=1}^{n} X_i + b_h\sum_{i=1}^{n} (X_i)^2 + c_h\sum_{i=1}^{n} X_iY_i = \sum_{i=1}^{n} X_iu_{h_i} \quad \text{ve}$$
$$k_h\sum_{i=1}^{n} Y_i + b_h\sum_{i=1}^{n} X_iY_i + c_h\sum_{i=1}^{n} (Y_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} Y_iu_{h_i}$$

$$nk_v + b_v\sum_{i=1}^{n} X_i + c_v\sum_{i=1}^{n} Y_i = \sum_{i=1}^{n} u_{v_i}$$
$$k_v\sum_{i=1}^{n} X_i + b_v\sum_{i=1}^{n} (X_i)^2 + c_v\sum_{i=1}^{n} X_iY_i = \sum_{i=1}^{n} X_iu_{h_i}$$
$$k_v\sum_{i=1}^{n} Y_i + b_v\sum_{i=1}^{n} X_iY_i + c_v\sum_{i=1}^{n} (Y_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} Y_iu_{h_i}$$

olarak elde edilir.

Normal denklemler olarak adlandırılan bu doğrusal sistemler, aşağıdaki gibi matris gösterimi kullanılarak yeniden yazılmıştır,

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} X_i & \sum_{i=1}^{n} Y_i \\ \sum_{i=1}^{n} X_i & \sum_{i=1}^{n} (X_i)^2 & \sum_{i=1}^{n} X_iY_i \\ \sum_{i=1}^{n} Y_i & \sum_{i=1}^{n} X_iY_i & \sum_{i=1}^{n} (Y_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_h \\ b_h \\ c_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} u_{h_i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_iu_{h_i} \\ \sum_{i=1}^{n} Y_iu_{h_i} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} X_i & \sum_{i=1}^{n} Y_i \\ \sum_{i=1}^{n} X_i & \sum_{i=1}^{n} (X_i)^2 & \sum_{i=1}^{n} X_iY_i \\ \sum_{i=1}^{n} Y_i & \sum_{i=1}^{n} X_iY_i & \sum_{i=1}^{n} (Y_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_v \\ b_v \\ c_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} u_{v_i} \\ \sum_{i=1}^{n} X_iu_{h_i} \\ \sum_{i=1}^{n} Y_iu_{h_i} \end{bmatrix}$$

Açıkça görülmektedir ki, katsayı matrisleri aynıdır ve bu nedenle aynı matris denklemi olarak ifade edilmektedir. Öncelikle nx3 katsayı matrisi (1) ve (2)'de tanımlandığı gibi

$$A = [1 \quad \mathbf{X} \quad \mathbf{Y}]$$

$1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}$ ve $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}$ nx1 vektörleri.

Matrix denklemi ise,

$$[1 \quad \mathbf{X} \quad \mathbf{Y}] \begin{bmatrix} k_h & k_v \\ b_h & b_v \\ c_h & c_v \end{bmatrix} = [\mathbf{U_h} \quad \mathbf{U}_v],$$

$AT = C$, $T = \begin{bmatrix} k_h & k_v \\ b_h & b_v \\ c_h & c_v \end{bmatrix}$ ve

$C = [\mathbf{U_h} \quad \mathbf{U}_v] = \begin{bmatrix} u_{h1} & u_{v1} \\ u_{h2} & u_{v2} \\ \vdots & \vdots \\ u_{hn} & u_{vn} \end{bmatrix}$ olduğu zaman bir matris

olarak adlandırılabilir. $L = (AT - C)^t(AT - C)$ fonksiyonu T matrisin katsayı elemanlarına göre en aza indirgenir. En küçük kareler yöntemi normal denklemi ($A^tAT = A^tC$) basitleştirirken, T'yi sağlamlaştırır ($\frac{\partial L}{\partial T} = -2A^tC + 2A^tAT = 0$). Burada A^t, A matrisinin transpozudur. A matrisi tam sütun sıralamasına sahip olduğunda, Moore-Penrose denklemindeki A'nin tersi A^+ ve normal denklemin eşsiz çözümü $T = (A^tA)^{-1}A^tC = A^+C$ formunda elde edilir. Burada , A'nın Moore-Penrose tersi A^+ olduğunda, $A^+ = (A^tA)^{-1}A^t$ 'dır.

Hiperyüzey modeli, farklı yükler altında kaya kütlelerindeki mühendislik yapılarının zamana bağlı deformasyon davranışını tanımlamak ve kaya kütlesindeki gerilme miktarına bağlı olarak yapıların kararlılığını sorgulamak için geliştirilmiştir. Kaya kütlesi deformasyonunun zamana ve yüke bağlı karakterizasyonu 12 farklı kaya mühendisliği projesinde yapılan araştırmaların bir sonucu olarak tespit edilmiştir. Üç değişkenli karakterizasyonlar, tüm kaya türlerini içeren bir denklemde belirlenmiştir. Kayaçların zamana ve yüke bağlı mekanik davranışını temsil eden yüzey örneği Şekil 3'te verilmiştir. Tanımlanan yüzeyler üstel fonksiyon formülü ile belirtilmiştir (Şekil 3). Genel anlamda yüzey formülü;

$$z = a.x^b.y^c$$

şeklindedir. Burada (z) deformasyonu, (x) yükü, (y) zamanı temsil eder. (a), (b) ve (c) ise sabit sayılardır. Bu formülle tanımlanan ZYD ilişkisi, kayacın dayanımı ile ilişkilendirilmiş ve dört değişkenli

hiperyüzeyler elde edilmiştir. Hiperyüzeyleri tanımlayan yeni formül aşağıdaki gibidir;

$$z_{measured} = \underbrace{a.x^b.y^c}.t^d$$

$$z_{measured} = z_{predicted} t^d$$

Burada, (t) tek eksenli basınç dayanımını temsil eder ve (d) ise sabit sayıdır. Gerçek deformasyon ile geliştirilen model sonucunun tahmini deformasyonu Şekil 4'te verilmiştir.

Geliştirilen bu hiperyüzeylerin kullanıldığı bir alt yazılım oluşturulmuş ve bir sayısal modelleme yazılımına entegre edilmiştir. Bu entegrasyon sonucu yapılan sayısal modelleme çözümlemelerine yönelik elde edilen sonuçlar, aynı örnekler için Şekil 5'de verilmektedir.

4 SONUÇ

Kaya kütlelerinin deformasyon modüllerinin zamana ve yüke bağımlı davranışını analiz eden ve sayısal modelleme çözümlemelerine dayanan yeni bir tahkimat tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Birçok tasarım yönteminden farklı olarak, kaya kütlelerinin maruz kaldığı ve mühendislik işlemi ile değişen gerilme ortamını dikkate alan bu yaklaşım önemli bir mühendislik tecrübesi ve deneyim gerektirmektedir. Bu yaklaşım kapsamında yapılan araştırmalarda 12 farklı yeraltı yapısında (tünel ve yeraltı kömür madeni) çalışılmıştır. Geliştirilen matematiksel bağıntılar ve bunlara bağlı üretilen hiper yüzeyler vasıtası ile üretilen bir alt yazılım, sayısal modellemede kullanılan bir yazılıma entegre edilmiştir. Entegrasyon ile yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçların sahada yapılan ölçümlerle çok yüksek oranda benzerlik gösterdiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

Aksoy, C.O., Oğul, K., Topal, İ., Özer, S.C., Özacar, V., Posluk, E. 2012. Numerical Modeling of Non-Deformable Support in Swelling and Squeezing Rock", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 52: 61-70.

Aksoy, C.O., Oğul, K., Topal, İ., Poşluk, E., Gicir, A., Kucuk, K., Aldas, G.G. 2014. Reducing Deformation Effect of Tunnel with Non-Deformable Support System by Jointed Rock Mass Model, Tunnelling and Underground Space Technology 2: 218-227.

Aksoy, C.O., Onargan, T. Guney, A. 2009. Numerical Modeling for the Determination of Umbrella Arch and Face Bolt Effects on The Ground Settlement Induced by Urban Shallow Tunneling, BALKANMINE; 371-378.

Aksoy, C.O., Onargan, T. 2010. The Role of Umbrella Arch and Face Bolt as Deformation Preventing Support System in Preventing Building Damages, Tunneling and Underground Space Technology.

Barla, G., Bonini, M., Semeraro, M. 2011. Analysis of the behaviour of a yield-control support system in squeezing rock, Tunnelling and Underground Space Technology 26:146–154.

Bieniawski, Z. T. (1967b). Mechanism of brittle fracture of rock: Part II--experimental studies. Int J of Rock Mech Min Sci Geomech Abs, 4(4), 407-423.

Brace, W.F., Paulding, B.W., & Scholz, C. (1966). Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophysics. Res*., *71*, 3939–3953.

Cantieni, L., Anagnostou, G. 2009. The interaction between yielding supports and squeezing ground. Tunnelling and Underground Space Technology 24: 309–322.

Chen, G., Li, H., Zhou, W. 2007. Analysis of block removability in rock excavation by probabilistic approach, Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, Edited by Erik Eberhardt, Doug Stead and Tom Morrison, Taylor & Francis, 159-166.

Eisenstein, Z., Branco, P. 1991. Convergence-Confinement Mehtod in Shallow Tunnels. Tunnelling Underground Space Technology 6 (3): 343-346.

Feng, X.T., Hudson, J,A. 2008. Specifying the required information for rock engineering modeling and design. Int J Rock Mech Min Sci 47:179–94.

Palmström, A., Singh, R. 2001. The deformation modulus of rock masses-comparisons between in situ tests and indirect estimates; Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 115 - 131.

Shin, Y., Song, K., Lee, I., Cho, G. 2011. Interaction between tunnel supports and ground convergence–consideration of seepage forces. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 48: 394-405.

Singh, M.N., Samadhiya, N.K., Sandeep, A. 1995 Semi-Empirical Method for the Design of Support Systems in Underground Openings', Int. Tunnelling and Underground Space Technology.

Tünellerde Kaya Sınıflaması ve Tahkimat Uygulamaları, Gümüşhane Çevre Yolu Tünel Örneği

Classification of Rock and Support Applications for Tunneling, Sample of Environmental Road in Gümüşhane

G. Külekçi
Gümüşhane Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bil. Fak., Maden Müh. Bölümü, 29100 Gümüşhane

A.O. Yılmaz
Karadeniz Teknik Üniversitesi., Müh. Mim. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

ÖZET Stratejik ve ticari önemi olan Trabzon limanını iç kesimlere bağlayan en kısa yol Zigana geçidi ile Gümüşhane üzerinden geçen karayoludur. Uluslararası bir yol olan Trabzon-Gümüşhane karayolunun coğrafi olarak en zor kısımlarından biri Gümüşhane üzerinden geçen kısmıdır. Coğrafi zorlukları kaldırmak için Trabzon-Gümüşhane arasına irili ufaklı 15 in üzerinde delme patlatma yöntemi kullanılarak tünel açılmaktadır. Bu çalışma kapsamında Gümüşhane çevre yolunun Km: 0+410,000- 11+239,323 arasında yapılacak olan 5 adet tünelin kilometre artışına göre ikinci büyük tünel durumunda olan ulaşım tüneli çalışılacaktır. Bu tünel Km: 4+700'de başlayıp Km: 5+310'da biten toplam 610 metre uzunluğundadır ve çift tüp olması planlanmaktadır.

Tünel güzergahı boyunca Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) uygulanacaktır ve kazı işlemi delme-patlatma yöntemi ile gerçekleştirilecektir. Çalışma konusu tünel şehir merkezinden geçtiği için çalışma alanında çok sayıda yerleşke bulunmaktadır. Bu çalışmada tüneldeki farklı kaya kütle sınıflarına göre delme patlatma tasarımı yapılmıştır.

ABSTRACT The shortest route linking the Trabzon port with its strategic and commercial importance is the highway passing through Zigana Passage and Gümüşhane Passage. One of the most difficult geographical parts of Trabzon- Gümüşhane highway, which is an international road is the part passing through Gümüşhane. In order to remove the geographical difficulties, a tunnel is opened between Trabzon and Gümüşhane using fifteen piercing blasting methods. Within the scope of this study, 5 tunnels to be constructed between Gümüşhane and Km: 0 + 410.000 - 11 + 239.323 will be operated with the second tunnel, which is the second largest tunnel according to the increase in kilometers. This tunnel is planned to be a double tube with a total length of 610 meters starting from Km: 4 + 700 and ending at Km: 5 + 310.

New Austrian Tunneling Method (NATM) will be applied along the tunnel route and excavation will be carried out by drilling-blasting method. Because the work is through the tunnel city center, there are many campuses in the study area. In this study, drilling-blasting design was made according to different rock mass classes in Tunnels.

1 GİRİŞ

Gümüşhane çevre yolu projesi kapsamında Km: 0+410,000- 11+239,323 arasında boyları 2490 m ile 550 m arasında değişen toplam 5 adet tünel yapılacaktır. Çalışma kapsamında incelenecek olan tünel Gümüşhane çevre yolunda yapılacak olan tüneller içerisinde uzunluğa göre üçüncü tünel durumundadır. Gümüşhane çevre yolu 2x3 şeritli olduğundan çift tüp olarak projelendirilmiştir. Km: 4+700'de başlayıp Km: 5+310'da biten tünel toplam 610 m uzunluğunda olacaktır.

Yapılan çalışma güzergâhının kuzeyde Trabzon, doğuda Bayburt, batıda Giresun ve güneyde Erzincan ile Erzurum arasında sınırlanmış bir bölgede Gümüşhane'nin kuzey yamaçlarındadır. Çalışma konusu Tüneli'nin giriş taban kotu 1232 m ve çıkış taban kotu 1245 m olmak üzere %-1,38 eğimle devam etmektedir. Eksen'de Km: 5+155'de maksimum 76 m örtü yüküne sahiptir. Çift tüp olarak tasarlanan tünel toplam 610 m uzunluğa sahiptir.

Yapılan çalışmada tünel güzergahı boyunca alınan karot verileri kullanılarak RMR ve Q kaya sınıflama sistemi kullanılarak NATM belirlenmiş ve bu yönteme uygun patlatma dizaynı önerilmiştir.

1.1 Çalışma Alanı ve Çevresinin Genel Jeolojisi

Dağlık bir yapıya sahip olan Gümüşhane bölgesinde değişik formasyonlar görmek mümkündür. Gümüşhane fiziki coğrafya özellikleri bakımından sınıflandırılacak olursa Kuzeyden Zigana - Trabzon Dağları (Çakır Göl Tepesi 3063 m), Güneyden Çimen Dağları (Akdağ 2710 m), Batıdan Giresun Dağları (Sarıyer Tepeleri 2919 m) ile Kelkit ve Harşit Çayı vadilerinin daralma bölgeleri, doğudan ise Pulur Dağları ve Soğanlı Dağları ile bu iki değişik kitlenin birbirine yaklaştığı kesimdeki eşiklerle çevrili olduğu gözlenir. Çalışmanın yapılacağı tünel güzergâhında Berdiga formayonu, Çatak formasyonu, Kızılkaya formasyonu, Çağlayan formasyonu, Çayırbağ formasyonu, Kabaköy formasyonu, taraça, yamaç molozu ve alüvyon gibi yapılar görülmektedir görülmektedir (Şekil 1).

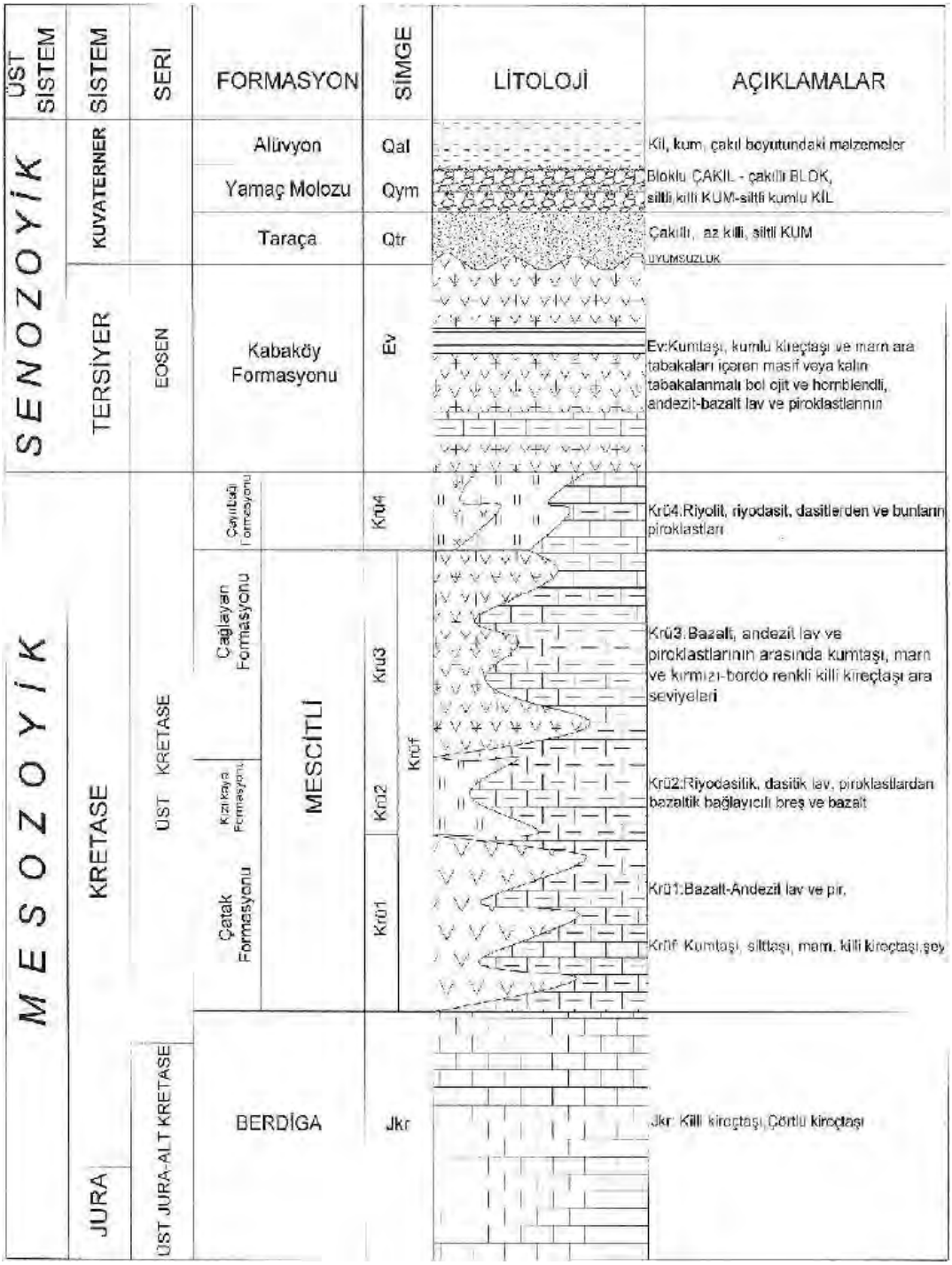
Tünel hattında, tünelin giriş portal kesiminde kalınlığı 3-5 metre olacağı tahmin edilen kahverenkli, iri bloklu, çakıllı, siltli, killi Kum – kumlu birimlerinden oluşan Çakıllar ve bloklar; yarı köşeli - köşeli, tamamen ayrışmış Granitlerden oluşmaktadır. Tünel güzergahı bu kesimden itibaren çıkış kesimine kadar Çatak Formasyonuna ait Granitler içerisinde devam etmektedir. Çıkış kesiminde yer alan Granitler orta – çok ayrışmış, zayıf - çok zayıf yer yer aşırı derecede zayıf dayanımlı, dağılgan, yer yer kırıklı -çatlaklıdır.

Çatak formasyonu başlıca bazalt, andezit lav ve piroklastları ile kumtaşı, silttaşı, marn, şeyl ve kırmızı - bordo renkli killi kireçtaşı düzeylerinin ardalanmasından oluşur. Doğu Pontidlerin Kuzey Zonunda yer alır. Birimin lav, tüf ve breşlerden oluşan volkanik seviyeleri koyu gri, yer yer siyah renkli, ayrıştığında kahve renklidir. Lavlar genel olarak kırıklı, çatlaklı ve boşluklu olup etkin şekilde ayrışmış ve kloritleşmiştir. Breş ve aglomeralar içinde tortul kaya çakıl ve bloklarda bulunabilir. Kurşuni gri renkli kumtaşı, marn ve şeyller düzenli ince tabakalanmalıdır. Bazı kesimlerde kırmızı-bordo renkli mikritler ve rekristalize kireçtaşları yaygındır. Asidik karakterli lavlardan oluşan Kızılkaya formasyonu ile uyumlu olarak örtülen Çatak formasyonu tektonik hareketliliğe bağlı olarak parçalanan ve aktivite kazanan karbonat platformu üzerinde çökelmiştir.

2 YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tünel güzergâhında uygulanacak olan patlatma paterninin belirlenmesi gerekmektedir. Tahkimat ve üretimin problemsiz yapılması adına NATM yöntemi belirlenmelidir. NATM yönteminin belirlenmesi için giriş portalı, 1. Eksen, 2. Eksen, 3. Eksen ve çıkış portalı olmak üzere 4 ana hatta RMR, Q-Sistemi ve GSI Tabanlı kaya kütle değerlendirmesi yapılmıştır. Yapılan bu değerlendirmelerin hesaplamaları aşağıda ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Bu bölümde yapılan çalışma da Km: 4+700-4+730 arasında kalan ve yaklaşık ≈20.0 m et kalınlığının olduğu giriş portalı ekseninde alınan veriler sunulmuştur. Kaya kütlesi sınıflamaları, kaya kütlesi elastisite modülü vb. parametrelerin hesaplanmıştır. Hesaplamalar da kullanılan girdi parametreleri Çizelge 1 'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanının genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti

2.1 Tünel Giriş Portali Ekseni RMR Değerlendirmesi

Bieniawski (1989) tarafından son hali verilen değerlendirme ölçütleri kullanılarak belirlenen kaya kütle değeri (RMR) sunulduğu gibidir. Tabloda kullanılan tüm ölçütler için saha, laboratuvar ve ofis çalışmaları doğrultusunda belirlenen değerlendirme ve değerleme kriterleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Çizelge 2'de verilen veriler değerlendirildiğinde tünel giriş portali ekseninde nihai RMR 33 olarak bulunmuştur. Yapılan sınıflama sistemine göre "*zayıf kalite kaya*" sınıfında olduğu görülmüştür.

2.2 Q- Sınıflama Sistemi

Giriş portal ekseninde yapılan Q sınıflama sisteminde kullanılacak olan parametreler tünel açımında karşılaşılacak olan birimlere ait kaya kütle sınıflama puanları Barton,2000' e göre hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 1. Tünel giriş portalı ekseninde yapılacak olan hesaplama girdileri

Özellik	Değer
RQD ,%	7
Tek eksenli sıkışma dayanımı ort. (σ_c), MPa	30
Kaya kütlesi birim hacim ağırlığı (ɣrm), kN/m^3	25
Hacimsel eklem takım sayısı (Jv)	32,7
Elastisite modülü ortalaması (Ei), GPa	22
Poisson oranı, (υ)	0,30
Süreksizlik aralığı, cm	50
Süreksizlik açıklığı	kısmen açık- açık, 0.25- 2.5 mm
Süreksizlik pürüzlülüğü	Az ayrışmış kısmen açık-açık süreksizliklerin az pürüzlü
Süreksizlik ayrışması	İri kristalli ve az ayrışmış/ayrışmamış magmatik kaya
Süreksizlik devamlılığı / düzlemselliği	10-20.0 metre (orta yüksek derecede) civarında olup dalgalı-kavisli
Süreksizlik su durumu	Yüksek su girişimleri, basınçlı süreksizlik su boşalması beklenmemektedir

Çizelge 2. Tünel giriş portali eksen kesimi için RMR kaya kütle sınıflandırması

Parametre	Min. Değer/	Tanım Puan
TEBD, MPa	30	4
Kaya Kalite Göstergesi RQD (%)	<25	3
Süreksizlik Aralığı (mm)	60-200	8
Devamlılık (m)	10-20	1
Açıklık (mm)	0,1-1,0	4
Pürüzlülük	Az pürüzlü	3
Dolgu (mm)	Sert Dolgu, <5	4
Bozunma	Bozunmuş	1
Yeraltı Suyu	Yok	15
Temel RMR		**43**
Süreksizlik Yönelimi		-10
Nihai RMR		**33**

Yapılan hesaplamalar sonucunda giriş portal ekseninde Q sınıflamasına göre NATM sınıfı C2 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3. Portal kesimi Q sistemi tablosu

Q Parametre	Değer
RQD	10
Jn (Eklem Takım Sayısı)	30
Jr (Eklem Pürüzlülük Sayısı)	3
Ja (Eklem Yüzeyi Araştırma Sayısı)	2
Jw (Eklem Su Azaltma Faktörü)	0,85
SRF (Gerilim Azaltma Faktörü)	5
ESR (Kazı Destekleme Oranı)	1,0
Q =(RQD/J_n) x(J_r/J_a) x(J_w/SRF)	0,084
NATM	**C2 (baskılı)**

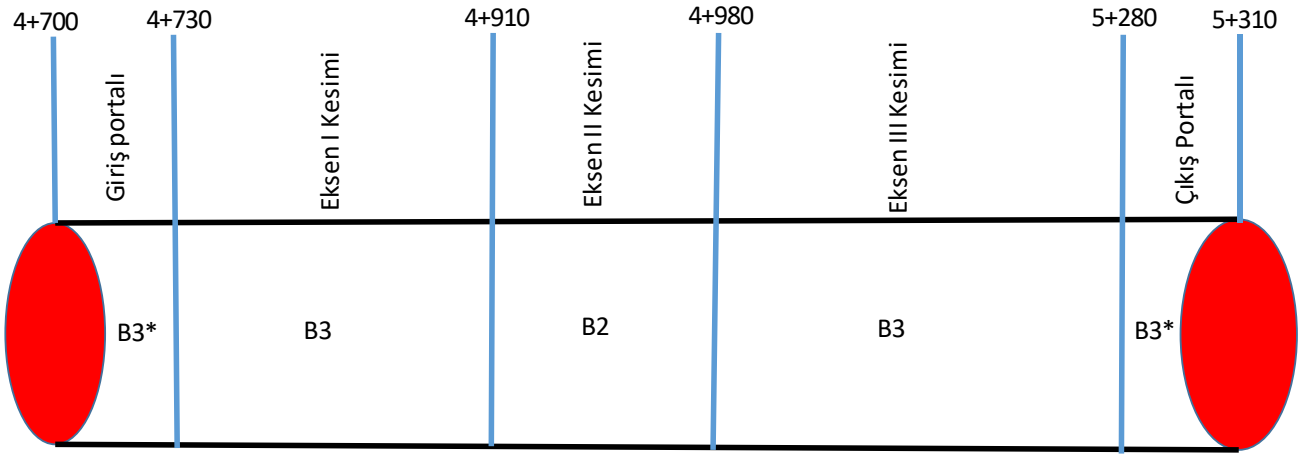
Tünel düzergahı boyunca yapılan analizler ve hesaplamalar sonucunda sonucunda NATM sınıflamasına bağlı olarak 3 farklı kaya sınıfına rastlanmaktadır. B2, B3 ve B3 özel kaya sınıfları, kazı sırasının başlamasından önce tünel kazı aynasında ortaya çıkan kaya görünüşü, tecrübe ve gözlemler, benzer kaya şartlarındaki jeoteknik ölçüm sonuçları ve deformasyonlara bağlı olarak yapılmıştır.
Portal sınıfı kaya kütlesi, esas olarak kaya kütlesinin jeoteknik özelliklerinden kısmen bağımsız olup tünelin giriş ve çıkış kısımlarında düşey basınçların yanı sıra yatay basınçların da karşılanmasına yönelik olarak yapılması gereken çalışmaları içerir. Akyazı tünelindeki farklı tipteki kaya sınıflarının miktarları Çizelge 4 ve Şekil 2'de verilmiştir.

2.3 Kazı ve Delme Patlatma Tasarımı

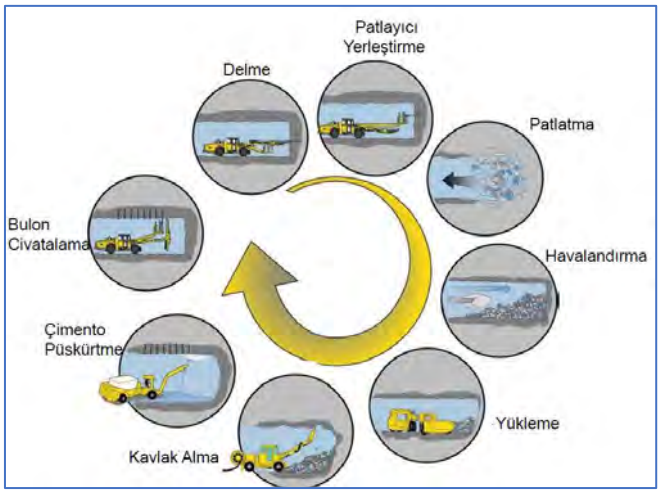
Yapılmakta olan Gümüşhane çevre yolunda ki kazı işlemleri NATM yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde kazı aynasındaki delikler delici Jumbo makinesi ile delindikten sonra patlayıcı şarjı, patlatma, havalandırma, kavlak alma, pasa nakli ve tahkimat işlemleri yapılmaktadır. Tünelde yapılan bu çalışmalar bir döngü halinde devam etmektedir (Şekil 3). Bu çalışma planının en önemli aşamasını oluşturan patlatma işlemi, kayacın kazısının yapılabilmesi için çok önemlidir. Çünkü patlatma sonrası bir takım çevresel etkilerin oluşması mümkündür. Bu etkiler taş savrulması, hava şoku ve yer sarsıntısı şeklinde sıralanabilir.

Çizelge 4. Tünel kaya sınıfı ve uzunlukları

Kesit	Giriş Portalı	Eksen I Kesimi	Eksen II Kesimi	Eksen III Kesimi	Çıkış Portalı
Km Aralığı	4+700 - 4+730	4+730 - 4+910	4+910 - 4+980	4+980 - 5+280	5+280 - 5+310
Q Değeri	0,084	0,424	1,444	0,6375	0,1275
RMR Değeri	33	33	60	40	40
NATM Sınıfı	B3*	B3	B2	B3	B3*



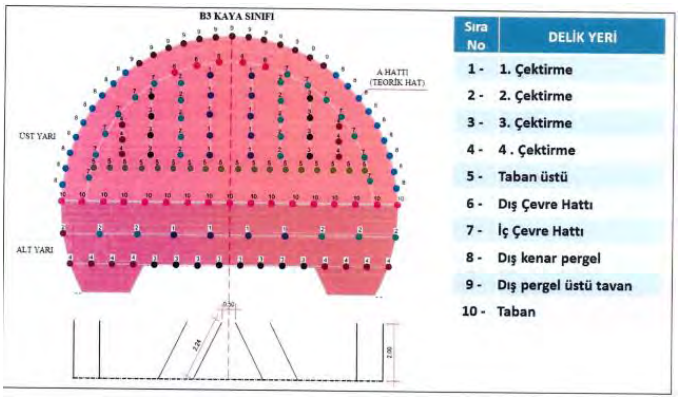
Şekil 2. Tünel de yer alan kaya sınıfı ve uzunluklarının şematik gösterimi



Şekil 3. NATM tünellerindeki genel çalışma döngüsü

Tünelin açılacağı formasyon orta sert ve sert dayanıma sahip olup, delik çapı 45 mm, delik boyu 3-3,5 m önerilmektedir. Tünelde uygulanacak delik paterni Şekil 4'de verilmiştir. Üst yarı kazısında delikler toplam 10 ayrı sıra halinde patlatılacaktır. İlk olarak orta çekme için 1 nolu delikler patlatılmak, bunu diğer delikler takip edecektir. Alt yarı kazısında delikler toplam 4 ayrı sıra halinde patlatılacaktır.

Patlayıcı madde kullanılmasında kaynaklanan titreşim ve yer sarsıntıları, patlatma işlemi dikkatli yapılmaz ise ciddi sorunlar oluşturabilmektedir. Kontrolsüz patlatmalarda titreşimimin büyüklüğü bazı yapılarda kalıcı hasarlar oluşmasına neden olabilmektedir. Çünkü kazı çalışmalarında patlayıcı madde kullanıldığında, etrafa değişik dalgalarda titreşim yayılmaktadır. Bu titreşim civarda bulunan en yakın yerleşim birimlerinden itibaren yapı ve konutlar üzerinde çatlak, sarsıntı gibi birtakım etkiler meydana getirilirken çeşitli şikayetlerin ortaya çıkmasına neden olmakta ve titreşimin büyüklüğüne göre de binalarda ve yapılarda kalıcı hasarlar meydana gelebilmektedir. Küçük titreşim değerleri, yerleşim birimlerinde veya yapılar üzerinde kalıcı bir hasır meydana getirmezken, gereğinde fazla patlayıcı kullanıldığında ortaya çıkan titreşim ve gürültünün etkisi daha kötü sonuçlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, özellikle patlatma kaynaklı titreşimlerin büyüklüğü, yerleşim yerine olan mesafeye ve patlatılan patlayıcı maddenin miktarına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 4. Çalışma tünelinin delik paterni

3 SONUÇLAR

Gümüşhane çevre yolunda yapılması planlanan hattın 3. büyük tüneli olacak olan tünelde yapılan çalışmalar sonucunda; Tünelin Km:4+700 - 5+310 arasında Çatak Formasyonuna ait Granitler içerisinde, açılacağı ve tünel giriş ve çıkış portali kazılarının ayrışmış altere granitler içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Tünel beş kesime ayrılarak giriş portali, eksen I, Eksen II, Eksen III ve çıkış portali olarak incelenmiştir. RMR ve Q sınıflamaları yapılarak NATM destek sınıfı tünelin giriş portali, eksen I, Eksen III ve Çıkış portalinde B3 destek sistemi ile Eksen II Kesiminde ise B2 destek sistemi ile geçileceği belirtilmiştir.

Tünelde farklı kaya sınıfları ve deformasyon özelliklerine bağlı olarak kullanılan tahkimat elemanlarının cinsi, miktarı ve yerleştirilme zamanları da farklılık göstermektedir Tahkimat elemanları olarak püskürtme beton, kaya bulonu, çelik hasır, önsüren ve çelik iksa kullanılmıştır. Projenin tamamlanmasıyla, trafikte bir rahatlama sağlanacağı, önemli bir zaman kazanımı elde edileceği ve kaza riskinin azalacağı düşünülmektedir. Tünel güzergahında alınan ölçümlerin yüzeyden yapıldığı göz ardı edilmemeli ve kayma olasılığı olan yerlerde süreksizlikler yapım aşamasında kontrol edilmelidir.

Yapılan patlatma tasarımında yapılacak patlatmanın çevreye zarar vermemesi için formasyona en uygun patlatma paterni ve şarj miktarı önerilmiştir. Tünelde üst yarı ve alt yarı şeklinde kazı yapılacaktır. Formasyon tam cephe kazı yapmaya uygun değildir. Tünel inşasında üst yarı kazı işleminde formasyona bağlı olarak kazı aynasında ortalama 80-100 delik ve yaklaşık 175-200 kg kadar patlayıcı madde kullanılması, tünel hattı boyunca kayaç formasyonun dayanımına, süreksizliklerin varlığına ve yerleşim yerlerine olan konumuna göre delik çapı 45 mm, delik boyu 1,5-2 m ve 3-3,5 m delinmesi gerektiği, tünel hattının geçtiği kayaç formasyonun sert olması durumunda, en fazla gecikme başına düşen patlayıcı miktarı tavan ve taban üstü deliklerinde 40 kg, tünel hattının geçtiği kayaç formasyonun kırıklı çatlaklı olması durumunda ise 25 kg olarak sınırlanması gerektiği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Barton, C. 2000. Getting Even Again: A Reply to Davis. International Journal of Applied Philosophy. vol. 14,

Bieniawski, Z.T. 1989, Mühendislik kaya kütle sınıflandırmaları: tam bir kılavuz maden, sivil ve petrol mühendisliği mühendisleri ve jeologlar: New York, Wiley, xii, 251 pp

Bilgin, H.A. 2003. Patlatma mühendisliği semineri seminer notları, TMMOB Maden Müh. Odası yayınları, Ankara.

Bilgin, H.A., Çakmak, B.B. 2010. Çok yakın çevresinde binalar bulunan bir doğaltaş maden ocağı için çevresel etki değerlendirmesi ve titreşim analizine dayalı güvenli patlatma tasarımı, VI. Delme Patlatma Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.

Calzia, J. 1969. Les Substances explosives et leurs nuisances, Dunod (ed.), Paris.

Erkoç, Ö.Y., 1990. Kaya Patlatma Tekniği, Çeliker Matbaacılık, 164s.

NACS (North American Commission on Stratigraphy), 1983. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 67(5) 841-875.

Olofson, S.O. 1988. Applied explosive technology for construction and mining, 302 s.

Özer, Ü. 2001. Patlatma kinematiğinin araştırılması ve patlatılma simülasyonu, FBE, Doktora tezi, Çukurova üniversitesi Adana.

Sönmez, H., Ulusay, R. 2002. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. International Jornal of Rock Mechanics and Mining Science, 35 (2), 219-233.

Yılmaz, Y., Tüysüz, O. 1988. Kargı masifi ve dolaylarındaki Mesozoyik tektonik birliklerin düzenlemeleri sorununa bir yaklaşım: T.P.J.D. Bülteni, 1(1), 73-86.

Dizel Araç ve Ekipman Emisyonlarının Tünel Hava Kalitesine Etkileri

Effects of Emissions of Diesel Vehicle and Equipment on Tunnel Air Quality

S. Karaçelebi, U. Yaşa, Ö. Mercan
Zitron Havalandırma Sistemleri Tic. ve Ltd. Şti., İstanbul

ÖZET Temiz hava, insan sağlığının ve konforun temel ihtiyacı olarak değerlendirilmektedir. Özellikle dizel motorlardan kaynaklanan hava kirleticileri, insan ve çevre sağlığı için ciddi risk oluşturmaktadır. Buna rağmen, yer altı tünellerindeki kazı faaliyetlerinde, değişik dizel makine ve ekipman kullanımı gereklidir. Son on yılda, egzoz emisyon standartlarıyla egzoz emisyon sınır değerleri %90 azaltılmıştır ve önümüzdeki yıllarda da azaltılmaya devam edecektir.

Tünellerde, hava kirleticilerini makul sınırlarda tutmak için gerekli olan hava ihtiyacını belirlemek son derece önemlidir. İyi bir havalandırma sağlanmadığında iş güvenliği riskleri oluşur, üretim hedefleri tutmaz ve muhtemelen de maliyetler artar. Bu nedenle havalandırma mühendisleri, bu konunun üzerinde titizlikle dururlar.

Bu yazımızda tünel kazılarında çalışan dizel ekipmanların ortama verdikleri kirleticilerin neler olduğunu ve bunların seyreltilmesi için gerekli hava ihtiyaçlarını irdeleyeceğiz.

ABSTRACT Fresh air is regarded as the basic necessity of human health and comfort. Especially air pollutants caused by diesel engines pose a serious risk for human and environmental health. However, the use of different diesel machines and equipment is necessary for underground tunnel excavation activities. Exhaust emission limits have been reduced by 90% with exhaust emission standards in the last decade, and will continue to be reduced in the coming years.

In the tunnels, it is crucial to determine the air requirement to keep air pollutants at reasonable limits. When good ventilation is not provided, job safety risks arise, production does not hold up, and possibly costs increase. For this reason, the ventilation engineers keep a close eye on this.

In this article, we will examine what the pollutants that diesel equipment working in tunnel excavation give to the environment and the air requirements for their dilution.

1 DİZEL EKİPMANLARDAN GELEN KİRLETİCİLER

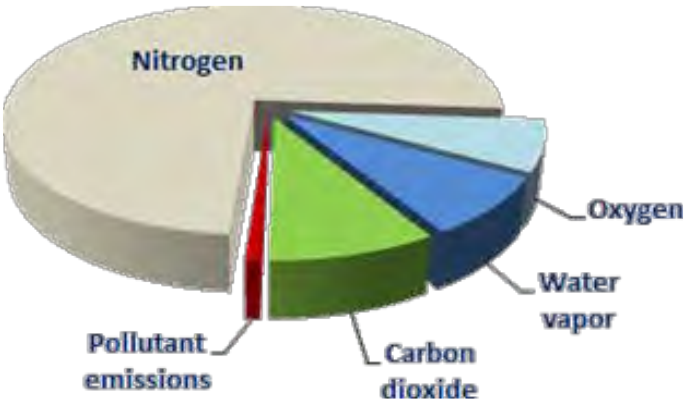
1.1 Egzoz Gazları ve Dizel Partikül Madde

Dizel motorlarda fosil kökenli yakıtın (HC) yanması sonucu egzoz gazları ve partikül maddeler oluşur. Egzoz gazlarının ana bileşenleri: karbondioksit (CO_2), su buharı (H_2O), oksijen (O_2), Azot (H_2) ve egzoz kirleticileridir. Egzoz kirleticileri; yanmamış hidrokarbonlar (HC), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve dizel partikül madde (dpm) dir.

Egzoz gazların yaklaşık yüzdelik dağılımları aşağıdaki gibidir (Majewski, 2012):

CO_2 : 2 ... 12%
H_2O : 2 ... 12%
O_2 : 3 ... 17%
N_2 : Kalanı
Egzoz kirleticileri : % 0,2
Egzoz kirleticileri: HC, CO, NO_x ve dpm lerin etkileri, yazımızın 4. maddesinde açıklanmıştır.

Şekil 1'de (Majewski, 2012) egzoz gazı bileşenlerinin göreli oranları görülmektedir.



Şekil 1: Egzoz gazı bileşenlerinin göreli oranları

1.1.1 Dizel araçların egzoz emisyon standartları

Emisyon standartları, egzoz gazlarındaki zararlı kirleticiler olan karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC), azot oksitler (NO_x) ve dizel partikül madde (dpm, diesel particulate matter) için sınır değerleri belirtmektedir.

Bu sınır değerler, gelişen teknolojiler ve oluşan çevre bilinci nedeni ile gittikçe daha da aşağıya çekilmektedir. Emisyonların sıkı uygulanmasında, ABD, Avrupa Birliği (AB) ve Japonya başı çekmektedir. Ülkemizde zaman dilimlerinde bazı değişiklikle AB Emisyon Standartları referans alınmaktadır.

AB Emisyon Standartlarına bakıldığında, yirmi (20) senede Faz I'den Faz V'e kadar emisyon değerlerinde önemli azalmalar olmuştur. Bu azalmalar, yaklaşık olarak CO'de %30, HC'da %85, NO_x'de %95 ve PM'de %97 oranında olmuştur (110 kW $\leq$ P $\leq$ 560 kW arasındaki motorlar için). Bazı ülkeler, yer altı madenlerinde dizel ekipmanların egzoz ucundan ölçülen karbon monoksit emisyonu için ppm olarak bir sınır koyar. Örneğin; Kanada Yasasına göre yer altı madenlerinde egzoz ucundaki (seyreltilmemiş egzozda) karbon monoksit miktarının, 600 ppm'den az olması gerekmektedir (Ontario Reg, 1990).

1.1.1.1 Yol dışı motorlar için, Avrupa Birliği (AB) Emisyon Standartları

Avrupa Birliği Emisyon Standartları, şimdiye kadar 5 kademeli emisyon standardı yayınladı (Faz I-V). Yol dışı mobil ekipmanlar için emisyon standardı, 16 Aralık 1997 de yayınlandı. AB Emisyon Standartları, geçersiz kalan Faz I ve Faz II hariç, Çizelge 1'de verilmiştir (Dieselnet).

Faz V de, parçacık sayısı (PN) emisyonu ile yeni bir limit getirildi. PN sınırı, etkilenen tüm motor kategorilerinde yüksek verimli parçacık kontrol teknolojisinin kullanılmasını sağlamak için tasarlanmıştır (Örneğin duvar akışlı partikül filtreleri).

1.1.1.2 Türkiye'de karayolu dışındaki (yol dışı) dizel motorlar için emisyon standartları

Yol dışı dizel motorlar için Türkiye'de geçerli olan egzoz emisyon değerleri (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2015), Çizelge 2 ve Çizelge 3'de (geçersiz kalan Faz I ve Faz II hariç) verilmiştir.

1.1.1.3 Havadaki dizel partikül madde standartları

Egzozdaki PM emisyon değerlerinin yanı sıra, dünyanın birçok ülkesinde, çalışma ortamı havasındaki dpm miktarı için bazı sınırlar uygulanmaktadır. Türkiye'de henüz yasal bir sınır belirlenmemiştir.

Ama bazı yer altı madenleri bu konuyu gündemlerine almışlardır. Öyle görünüyor ki bizde de yer altı madenleri için bir dpm değeri belirlenecektir. Bu süreçte MSHA değerleri rehber alınabilir. Madencilik sektöründe gelişmiş olan bazı ülkelerde uygulanan dpm sınırları (Ping ve Guang, 2017) Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 1. Yol dışı motorlar için, Avrupa Birliği (AB) Emisyon Standartları, Faz IV ve Faz V

Motor Kategorisi	Ateşleme Şekli	Net Güç kW	Tarih	CO g/kWh	HC g/kWh	NOx g/kWh	PM g/kWh	PN 1/kWh
Faz IV								
Q		130 ≤ P ≤ 560	2014.01	03.May	0.19	0.4	0.025	
R		56 ≤ P < 130	2014.10	5.0	0.19	0.4	0.025	
Faz V								
v/c-1	Sıkıştırmalı	P < 8	2019	8.00	7.50a,c		0.40b	-
v/c-2	Sıkıştırmalı	8 ≤ P < 19	2019	6.60	7.50a,c		0.40	-
v/c-3	Sıkıştırmalı	19 ≤ P < 37	2019	5.00	4.70a,c		0.015	1×10^12
v/c-4	Sıkıştırmalı	37 ≤ P < 56	2019	5.00	4.70a,c		0.015	1×10^12
v/c-5	Hepsi	56 ≤ P < 130	2020	5.00	0.19c	0.40	0.015	1×10^12
v/c-6	Hepsi	130 ≤ P ≤ 560	2019	3.5	0.19c	0.40	0.015	1×10^12
v/c-7	Hepsi	P > 560	2019	3.5	0.19d	3.5	0.045	-

a HC+NOx
b 0,60 Elle çalıştırılabilen, hava soğutmalı direkt enjeksiyonlu motorlar için
c A = 1.10 gaz motorları için
D A = 6.00 gaz motorları için

Çizelge 2. Türkiye'de, yol dışı dizel motorlar için emisyon değerleri, Faz III A/B

Sabit devirli motorlar hariç, Uygulamalarda kullanılan motorlar
(İç su yolu tekneleri, lokomotifler ve demiryolları araçlarının tahriki dışında)

Kategori: Net güç (P) (kW)	Karbon monoksit (CO) (g/kWh)	Hidrokarbonlar ve azot oksitlerin toplamı (HC+NOx) (g/kWh)	Parçacıklar (PT) (g/kWh)	Fazın Başlama Tarihi	Satış Tarihi
Faz III A					
H: 130 ≤ P ≤ 560	3,5	4	0,2	31.12.2009	01.01.2011
I: 75 ≤ P < 130	5	4	0,3	31.12.2009	01.01.2011
J: 37 ≤ P < 75	5	4,7	0,4	31.12.2009	01.01.2011
K: 19 ≤ P < 37	5,5	7,5	0,6	31.12.2009	01.01.2011

	Karbon monoksit (CO) (g/kWh)	Hidrokarbonlar (HC) (g/kWh)	Azot oksitler (NOx) (g/kWh)	Parçacıklar (PT) (g/kWh)	Fazın Başlama Tarihi	Satış Tarihi
Faz III B						
L: 130 ≤ P ≤ 560	3,5	0,19	2,0	0,025	01.01.2018	01.01.2011
M: 75 ≤ P < 130	5	0,19	3,3	0,025	01.10.2018	01.01.2012
N: 56 ≤ P < 75	5	0,19	3,3	0,025	01.10.2018	01.01.2012

		(HC+NOx) (g/kWh)			
P: 37 ≤ P < 56	5	4,7	0,025	01.10.2018	01.10.2018

Çizelge 3. Türkiye'de, yol dışı dizel motorlar için, emisyon değerleri, Faz IV

Kategori: Net güç (P) (kW)	Karbon monoksit (CO) (g/kWh)	Hidrokarbonlar (HC) (g/kWh)	Azot oksitler (NOx) (g/kWh)	Parçacıklar (PT) (g/kWh)	Fazın Başlama Tarihi	Motorların piyasaya arz tarihi
Q: 130 kW ≤ P ≤ 560 kW	3,5	0,19	0,4	0,025	31.12.2017	01.01.2019
R: 56 kW ≤ P < 130 kW	5	0,19	0,4	0,025	30.09.2018	01.10.2019

Yer altı madencileri için, MSHA (ABD)'ın 0,160 mg/m³ olan toplam karbon (TC) sınır değeri dikkat çekmektedir. Kanada Mesleki Kanser Araştırma Merkezi (OCRC) dpm için kişisel maruz kalma değerinin 0,02 EC mg/m³'a düşürülmesini önermektedir (IARC, 2012). MSHA'ın 0,160 TC mg/m³ değeri, kanseri önlemek için beklenen değerden yaklaşık 10 misli fazla!

Yapılan bir araştırmada, iki yer altı altın madeninde çalışanların maruz oldukları dizel partikül madde ölçümleri yapılmıştır (Maximilien ve ark, 2017) ve bu ölçüm sonuçlarının bazıları Çizelge 5'de verilmiştir. Bu çizelgeden Jumbo, kepçe ve kamyon operatörlerinin 0,160 TC mg/m³ sınır değerlerini aşan ortamlarda çalıştığı anlaşılıyor.

Çizelge 4. Ülkelere göre dizel partikül madde (dpm) sınır değerleri

Ülke	Dpm sınırı	Uygulama
Avustralya (AIOH)[1]	0,1 mg/m³, EC*, TWA (8 saat)	Yer altı madenleri
USA (MSHA)[2]	0,160 mg/m³, TC***, TWA (8 saat)	Metal ve Metal olmayan madenler
Almanya (BAuA)[3]	0,3 mg / m³ †	Kömür dışı yer altı madenleri
Almanya (BAuA)[3]	0,1 mg / m³	Yerüstü İş yerleri
Kanada (CANMET)[a]	0,4 - 1,5 mg/m³, RCD#	Bölgeye göre değişir
Kanada (CANMET)[a]	0,75 mg/m³, RCD	Yer altı madenleri
Kanada-Quebec (CANMET)[a]	0,6 mg/m³, RCD	Yer altı madenleri
1 AIOH: Australian Institute of Occupational Hygienists		* EC: Element karbon
2 MSHA: Mine Safety and Health Administration		** TWA: Zaman ağırlıklı ortalama
3 BAuA: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin		*** TC: Toplam karbon
a CANMET: Canadian Center for Mineral and Energy Technology		†: 0,1 mg/m³'den itibaren çalışmaya yalnızca solunum koruma ekipmanıyla izin verilir.
# RCD: Respirable combustible dust (Solunabilir yanıcı toz)		

Çizelge 5. Yer altı çalışanlarında yapılan dpm ölçüm değerleri

Yer altı çalışan grupları	Ölçülen dpm miktarı(mg/m³)
Jumbo operatörü	220
Kamyon operatörü	210
Tahkimat (Bolter) operatörleri	76
Kepçe operatörü	230
Çimento kamyon operatörü	150
Mekanik	100
Madenci	150
Elektrikçi	87

1.2 Dizel Ekipmanlardan Gelen Isı

Dizel motorlu ekipmanlar iş yapmak için harcadığı enerjinin önemli bir kısmını dışarıya ısı olarak atar. Isı, ekipmandan egzoz gazlarıyla; ekipman gövdesinden radyasyonla ve soğutma sistemiyle dışarıya atılır. Dizel ekipman mekanik işin (kW) 3 katına kadar ısı (kW) yayabilir. Ayrıca egzoz gazlarındaki su buharı nedeniyle de ortama gizli ısı verilir. Her litre yakıt için 3-10 litre su tüketilir. Bu ısılar uygun bir havalandırma ile dışarı atılmazsa, ortam sıcaklığı artacağından insanların çalışma konforları bozulabilir. Isı şoklarına kadar varan ciddi sağlık problemleri meydana gelebilir. Ortama atılan ısı aynı zamanda ekipmanların da performanslarını olumsuz etkiler (yetersiz soğutma, güç kaybı vb.) (Stinnette ve Souza, 2013).

Galeri kazısında delici ve kazıcı makinelerin verdiği ısı, havanın kazandığı toplam ısının %20-50'sine ulaşabilir ve 6-22 °C sıcaklık yükselmesine neden olabilir (Yalçın, 2017). Dizel motorlardan gelen ısının hesabı, yazımızın 2.4.2 başlığında incelenmiştir.

1.3 Toz

Dizel motorlar doğrudan mineral toz üretmezler. Fakat dizel motorlu araçlar, yürüyüşleri sırasında ve yaptıkları işlerden dolayı (Delme, kazıma, nakliye vb.) tozların üretilmesine ve yayılmasına neden olmaktadırlar. Dizel ekipmanların neden olduğu tozlar, geleneksel maden havalandırma hesaplarında göz önünde bulundurulur. Yer altı ocak havasında 5 µm den küçük tozların çökmesi neredeyse imkânsızdır. Bu nedenle tozu hava ile dışarıya taşımak gerekir (Yalçın, 2017). Oluşan tozların hava ile dışarıya taşınabilmesi için, tünel içindeki hava hızı 0,2-1,2 m³/sn'den az olmamalıdır (Ayvazoğlu, Ökten, Tuncel).

Toz oluşumuna göre gerekli havanın hesabı için aşağıdaki formüller kullanılabilir:

1.Yöntem (Yalçın, 2107):

$$Q = (E_d / K_d) * P / 3600 \quad (1)$$

Q: Gerekli hava miktarı, m³/sn
E_d: Solunabilir tozun oluşum oranı, mg/ton
P: Saatteki cevher üretimi, Ton/saat
K_d: Ocak havasında müsaade dilen toz konsantrasyonu artış oranı, mg/m³

2.Yöntem (Yalçın, 2107):

$$Q = (E_d / K_d) \quad (2)$$

Q: Gerekli hava miktarı, m³/sn
Ed: Solunabilir tozun oluşum oranı, mg/sn veya mg/dk
K_d: Ocak havasında müsaade dilen toz konsantrasyonu artış oranı, mg/m³

3.Yöntem (Ayvazoğlu, Ökten, Tuncel):

$$Q = A / (Np - No) \quad (3)$$

Q: Gerekli hava miktarı, m³/sn
A: Toz oluşum miktarının endeksidir. Sulu kazıda ve delmede 500-1000, sulu yüklemede 150-200 ve kuru yüklemede 300-525 seçilir.
Np: Hava dönüş yolundaki toz konsantrasyonudur ve 400 tane/cm³-hava kabul edilebilir.
No: Çalışma yerine ulaşan havadaki toz konsantrasyonudur, 25-100 tane/cm³-hava alınabilir.

Ocaklarda yapılan işe göre ortamın toz konsantrasyonu değişir. Ölçüm sonuçlarına göre işin cinsine göre toz konsantrasyonları Çizelge 6'da belirtilmiştir (Yalçın, 2017).

2 DİZEL MOTORLU EKİPMANLARIN HAVA İHTİYACI

Yer altı ortamlarında çalışan dizel ekipman için hava ihtiyacının belirlenmesinde ülkeler, farklı değerler ve yöntemler kullanmaktadır. Bazen firmadan firmaya da değişebilmektedir. Bunları; Ekipman gücüne göre havalandırma oranı kullanma, doğrudan motor testi, ampirik hesaplama yöntemi, ve önerilen yeni bir yöntem başlıkları ile inceleyeceğiz (Stinnette ve Souza, 2013).

2.1 Ekipman Gücüne Göre Havalandırma Oranı Kullanma

Yer altında çalışan dizel ekipmanların hava ihtiyacının belirlenmesi için en çok kullanılan ve kabul gören modeldir. Ekipman gücünün

bir havalandırma oranı ile çarpılarak kW başına hava miktarı belirlenir. Birim olarak m³(hava)/sn.kW kullanılır. Ekipmanın gücü (kW) bu değerle çarpılarak ekipmanın hava ihtiyacı m³/sn olarak belirlenir. Çoğu maden havalandırma planlamacıları, bu değeri 0,06 – 0,08 m³/sn.kW olarak kabul etmektedir (Yalçın, 2017).

Çizelge 6. Değişik işler için ölçülmüş vardiya ortalama toz konsantrasyonları

İşin cinsi	Ortalama konsantrasyon (tane/cm³-hava)
Kuru delik delme	1050
Ateşlemeler	710
Arka göçertmesi	600
Potkapaç göçertmesi	540
Ayak içinde delme	400
Oluklardan doldurma	310
Tumba	300
Ana nakliyat yolu	137

Dünya madenciliğinde önemli yeri olan ülkelerin kabul ettiği ekipman gücüne göre havalandırma oranları Çizelge 7'de verilmiştir (Stinnette ve Souza, 2013). Bu yöntemde ekipmanın gücü dikkate alınmıştır. Aynı marka, aynı model ve aynı güçteki bir makinenin, dünyanın değişik bölgelerinde niye farklı bir hava ihtiyacı olduğunu açıklamaz. Ayrıca yukarıda değindiğimiz gibi son 20 yılda egzoz emisyonlarında büyük azalmalar olmuştur. CO de %30, HC da %85, NOx de %95 ve PM de %97 oranında azalmalar olmuştur (110 kW ≤ P≤ 560 kW arasındaki motorlar için). Bu yöntemde egzoz emisyonlardaki bu azalmaları, nasıl hesaba katacağımız belli değildir.

Daha temiz emisyonlu motorun hava ihtiyacı ile daha eski motorun hava ihtiyacının aynı olmaması beklenir. Daha doğru hava hesaplamaları için dizel araçların emisyonlarının da gözönünde bulundurulması gerekmektedir.

2.2 Direkt Motor Testi

Kanada ve Amerika'da her bir motor için, egzoz çıkışındaki (Tail-pipe) ucundaki kirleticileri yasal sınır değerlerine inceltmek için gerekli olan havalandırmayı belirlemek için kapsamlı laboratuar testleri geliştirilmiştir. Bu testlerle her bir motorun hava ihtiyacı belirlenir ve belgelenir.

Çizelge 7. Dizel maden ekipmanlarında havalandırma oranları

Ülke	Yasal havalandırma oranları
Avustralya	en az 0,06 m³/sn.kW
Kanada	0,045 - 0,092 m³/sn.kW, İllere göre değişir, en yaygını en az 0,06 m³/sn.kW'dır.
Şili	en az 2,83 m³/dk. Efektif BHP* (0,063 m³/sn.kW'e eşdeğer)
Çin	0,067 m³/sn.kW
Güney Afrika	en az 0,063 m³/sn.kW (en iyi uygulama olarak)
ABD	Kirleticilerin, belirlenen egzoz borusundaki seviyelere seyreltilmesi için gerekli havalandırma miktarının verildiği MSHA sertifikasını temel alır.

* Effective brake horsepower

2.2.1 NRCan (Kanada), egzoz kalite indeksi yöntemi

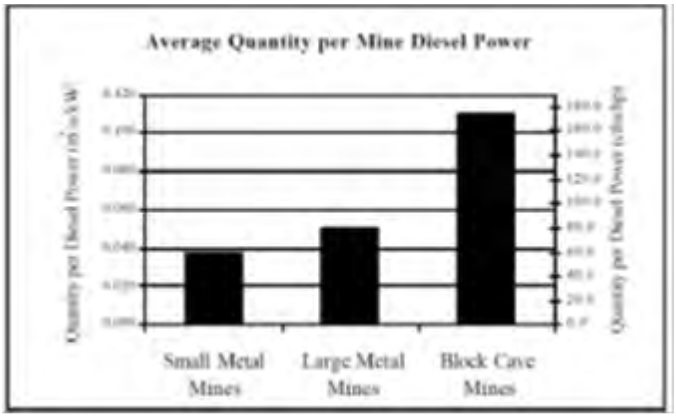
Kanada Standartlar Birliği (Canadian Standards Association) yer altı madeninde çalışacak motorlara onay verir. NRCan (Natural Resources Canada)'da, bu onaylanmış motorların egzozların seyreltmesi için gerekli miktarlarını belirlemekten sorumlu devlet kurumudur, motorların hava miktarları belirler ve onaylar. NRCan, Egzoz Kalite İndeksi (EQI) belirlemiştir ve bunu aşağıdaki eşitliğe göre hesaplar:

$$EQI = (CO / 50) + (NO / 25) + (DPM / 2) + 1,5*[(SO_2 / 3) + (DPM / 2)] + 1,2*[(NO_2 / 3) + (DPM / 2)] \quad (4)$$

Burada, DPM (mg/m³) ve gaz konsantrasyonları (ppm) olarak, ham egzoz gazlarında ölçülür. Test, motor tamamen tekrarlanabilir 18 modlu çalışmayla yapılarak gerçekleştirilir. Testlerde EQI değeri 3'e düşürüldüğünde motorun onaylanmış hava miktarı belirlenmiş olur.

2.2.2 MSHA (ABD) yöntemi

MSHA'da motor testinde, her motorda motor egzoz gaz bileşenlerini (CO'yu 50 ppm'e, CO2'yi 5000 ppm e, NO'yu 25 ppm'e ve NO2 ila 5 ppm'e) seyreltmek için gereken hava miktarı belirlenir. Ayrıca, her motor için "Partikül İndeksi" (PI) hesaplar. PI, bir motorun partikül emisyonlarını 1 mg/m³'e seyreltmek için gerekli olan hava miktarına eşittir.



Şekil 2. Değişik madenlerdeki havalandırma oranları (Stinnette ve Souza, 2013)

2.3 Ampirik Hesaplama Yöntemi

Ampirik yöntem, dizel ekipmanların hava ihtiyacını belirlemede en doğru ancak en zor yöntemdir. Ampirik yöntemler, önemli pratik tecrübelerden sonra belirlenir. Önemli miktarda dataya ve deneyime ihtiyaç duyulur. Bu nedenle ampirik yöntemleri, iyi havalandırma danışmanlık firmalarının ve büyük maden şirketlerinin belirleme kabiliyetleri vardır. Ampirik hesaplamaları kullanırken hangi şartlar için yapıldığının (Üretim şekli, cevher yapısı, kullanılan ekipmanlar, mekanize maden, metal maden, kömür madeni vb.) bilinmesi çok önemlidir. Metal madeninde kullanılan bir havalandırma hesabı, kömür madeninde faydalı olmayabilir. Şekil 2'de 2001 yılında madenlerde yapılan bir araştırmada, değişik maden türleri için havalandırma miktarlarını karşılaştırılması verilmiştir. Burada değişik maden tipleri arasında belirgin farklar olduğu görülmektedir. Ancak bu şekil, genel bir kural yaratmaz, hiçbir şekilde iyi uygulama veya yasal uyumluluğun göstergesi değildir.

Dizel araçların gücüne bağlı olarak gerekli hava hesabı belirlemek için birkaç firmanın önerisine bakalım;

Mine Ventilation Services kW başına 0,080 m³/sn değerini kullanmayı önerir (Stinnette ve Souza, 2013).

Kanada havalandırma danışmanlık şirketi AirFinders, kW başına 0,063 m³/sn lik bir değer kullanır (Stinnette ve Souza, 2013).

Climaz Molybdenum'un Henderson Madenindeki kıdemli havalandırma mühendisi, dizel ekipman hava ihtiyaçlarını belirlemek için kW başına 0,095 m³/sn lik bir değer kullanmaya başladı (Stinnette ve Souza, 2013).

2.4 Dizel Ekipmanların Hava İhtiyacını Belirlemek İçin Önerilen Yeni Bir Yöntem

Bu yöntemde, ekipman filosuna dayanan toplam hava akışının belirlenmesinde, zehirli egzoz gazları, dpm, atık ısı ve tozu dikkate alınacaktır (Stinnette ve Souza, 2013).

2.4.1 Egzoz gazları ve DPM için hava ihtiyacı

Haney Çevre Danışmanlığından (Haney Environmental Consulting) Robert Haney, motor tiplerine göre gerekli havalandırma miktarı ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada EPA emisyonlarına dahil olmayan ve EPA I-IV emisyonlarına sahip motorlar incelenmiştir. Bulgularının bir özeti Çizelge 8'de yer alır.

MSHA'daki PI miktarı, dpm in 1.0 mg/m³ değerine seyreltilmesi için gerekli hava miktarıdır. ABD'de metal ve metal olmayan yer altı madenlerinde, yasal dpm sınırı ise 0,160 mg/m³ dir. Bu yasal değeri karşılamak için MSHA'ın PI miktarının yaklaşık 5 katından daha fazla hava ihtiyaç olduğuna dikkat edelim.

Bu çalışmanın gösterdiği en önemli bulgularından biri, eskiden beri kullanılan havalandırma oranları (en yaygın olanı 0,063 m³/sn.kW) ile geçmişteki, EPA emisyonlarına dahil olmayan, motorlarda modern standartları karşılaması gerekenler arasında büyük farktır. Ayrıca Faz IV (Tier IV) motorlarında gerekli olan havalandırma oranlarında büyük azalma olduğu dikkat çeker.

Çizelge 8. Dr. Haney'in çalışmasının bulguları

Table 2 – Historic Ventilation Rates for Approved MSHA Engines (Haney, 2012)

EPA Tier	Number of Engines Tested	Gaseous Vent Rate $m^3/s/kW$ (cfm/hp)	PI $m^3/s/kW$ (cfm/hp)	PI X 5 $m^3/s/kW$ (cfm/hp)
Non EPA Compliant < 73 kW (99 hp)	21	0.05 ± 0.057 (79 ± 90)	0.119 ± 0.088 (188 ± 139)	0.595 ± 0.438 (942 ± 693)
Non EPA Compliant > 73 kW (99 hp)	41	0.038 ± 0.008 (60 ± 12)	0.059 ± 0.024 (94 ± 38)	0.297 ± 0.119 (324 ± 120)
Tier I/II < 73 kW (99 hp)	73	0.03 ± 0.0095 (60 ± 15)*	0.041 ± 0.015 (65 ± 24)	0.206 ± 0.076 (324 ± 120)
Tier I/II > 73 kW (99 hp)	141	0.035 ± 0.008 (55 ± 12)*	0.012 ± 0.01 (31 ± 15)	0.098 ± 0.047 (156 ± 74)
Tier III < 73 kW (99 hp)	27	0.032 ± 0.004 (50 ± 7)**	0.028 ± 0.015 (44 ± 23)	0.139 ± 0.071 (219 ± 113)
Tier III > 73 kW (99 hp)	47	0.025 ± 0.003 (39 ± 5)**	0.025 ± 0.009 (39 ± 14)	0.123 ± 0.046 (194 ± 72)
Tier IV	2	0.025 ± 0.003 (39 ± 5)**	0.002 (3.2)***	0.010 (16)***

*Based on NO **Based on CO_2 ***Based on a PI of 0.01 gm/hp-hr

Gelecekte NRCan ve MSHA'ın motorlar için belirlenen hava ihtiyaçları, *ısı ve toz için gereken hava miktarlarını da hesaba katarak kullanılabilir bir yöntem olabilir.*

Daha genel hesaplamalar için ve kesin ekipmanın bilinemediği durumlarda (yani, kavramsal veya ön fizibilite tasarımları*), gaz kirletici maddelerin seyreltmek için gereken hava akışını belirlemek için kW başına 0,028 m³/s'lik bir değer ve DPM için (bu sayılar Kademe IV motorlar için ölçülen ortalama değerlerin % 10'luk bir güvenlik faktörü içerir) kW başına 0,011 m³/s kullanılabilir.*

Tier IV motorlar daha yaygın hale geldiğinde bu sayılar ampirik olarak doğrulanabilir, gerektiğinde yer altındaki gerçek koşulları daha iyi yansıtacak şekilde değiştirilir.

2.4.2 Ortama verilen motor ısısı için gerekli hava ihtiyacı

Dizel motorlu bir makineden ısı üretiminin hesaplanması, aşağıdaki gibi pratik olarak hesaplanabilir. İlk olarak toplam ısı, yakıt tüketim oranına göre belirlenir:

$Q_T = (f_c / C_d) / 3600$ (5)
Q_T = Toplam ısı, kW
f_c = Yakıt tüketimi, litre/saat
C_d = Dizel yakıtın ısıl enerjisi, kJ/litre

Daha sonra, gizli ısı hesaplanır:

$Q_L = V_{H2O} * L_{H20} / 3600$ (6)
Q_L = gizli ısı, litre/saat
V_{H2O} = su üretim miktarı, litre/saat
L_{H20} = suyun buharlaşma gizli ısısı, kJ / kg

Oluşan hissedilir ısı, toplam ısı ile gizli ısı arasındaki farktır:

$Q_S = Q_T – Q_L$ (7)
Q_S = hissedilir ısı, kW
Q_T = toplam ısı, kW
Q_L = gizli ısı, kW

Makine üzerindeki ortam havasındaki ilişkili sıcaklık artışı, hava akış hızının bir fonksiyonudur:

$\Delta T = Q_S / (\dot{m}_{air} * C_p)$ (8)
ΔT = sıcaklık değişimi, K
Q_S = hissedilir ısı, kW
$\dot{m}air$ = kütle hava debisi (kg /sn)
C_p = kuru havanın özgül ısısı (kJ / kgK)

Çoğu zaman, bu eşitlik, makine üzerindeki sıcaklık artışını belirli bir maksimum değere sınırlamak için gerekli havalandırma oranı için ya da koşulların durma sıcaklığı için tasarım kriterlerine ulaşmadığından emin olmak için hafifçe değiştirilir. Hava debisi, diğer havalandırma oranlarına uygun bir karşılaştırma yapılabilmesi için hava yoğunluğunu kullanarak bir hacim akış oranına dönüştürülmesi gerektiğini unutmayın:

$$VR = v_{air} / P_{machine} \quad (9)$$

VR = havalandırma oranı (kW başına hava miktarı), $m^3/sn.kW$

v_{air} = havalandırma miktarı, m^3/sn

Pmachine = makine gücü, kW

Artık hem maden ortamına eklenen ısının hesaplanması hem de dizel ekipman filosunun diğer kirletici ürünlerine dayanarak değerlendirme ve karşılaştırma kriterleri oluşturmak mümkündür.

2.4.3 Mineral toz için hava ihtiyacı

Dizel motorlu araçların yarattığı tozu gidermek için gerekli hava akışı miktarının incelenmesi önemlidir. Yer altı madenlerinde malzemenin kırılması, taşınması ve nakliyesi için mekanik ekipman kullanıldığı sürece, mineralin bozulduğu bölgelerde toz oluşacak ve bu tehlikenin yer altı ortamından elimine edilmesi, en aza indirilmesi veya ortadan kaldırılması, bu alanlarda bulunan insanlar açısından önemli olacaktır.

Havalandırma, yer altı ortamından mineral tozu seyreltmek ve uzaklaştırmak için en yaygın kullanılan yöntemdir. Solunabilir (mikron altı) toz, seyreltme yoluyla kontrol edilmelidir. Daha büyük partiküller söz konusu olduğunda, toz parçacıklarının hava akımında sürükleneceği mesafeyi ve zamanı belirleyen hava akış hızıdır. Hava akış hızının çok artırılması, çökmüş haldeki tozun girdaplaşma nedeniyle yeniden ocak havasına karışmasına neden olur (Yalçın, 2017).

Toz konsantrasyonu ve hava akımı hızı arasındaki ilişkiyi bakıldığında, havadaki toz konsantrasyonlarının en aza indirildiği zamanki hava akış hızının yaklaşık 2,2 m/sn olduğu görülebilir. Dizel ekipmanın çalıştığı alanlarda, minimum hava akış hızı yaklaşık 1 m/sn'nin üzerinde düşünülür. Fakat 1 m/sn hava hızının bir faydası da, penetrasyon derinliğinin artmasıdır.

Uygun hava akış hızlarının seçilmesi, dizel ekipmanın çalıştığı madeni girişlerdeki egzoz gazlarının ve solunabilir tozların tabakalaşmasını da önleyebilir. Homotropal havalandırma, yer altındaki zararlı mineral tozunun üretimini ve çoğalmasını en aza indirgemek için nakliye yolları boyunca da düşünülmelidir.

Sonuç olarak, toz kontrolü için tek başına minimum hız gereksinimini kullanmak, havalandırma ihtiyacının fazla tahmin edilmesine yol açabilir. Aynı zamanda, hava akış hızına bağlı bir seçim, galeride çalışan çok sayıda araç olduğunda yeterli olmayabilir. Bu nedenle, asgari hız, yalnızca başka toz kontrol önlemlerinin olmadığı ve yalnızca birkaç dizel ekipmanın çalışmasının beklendiği durumlarda kullanılmalıdır.

2.4.4 Hava akış gereksinimlerinin belirlenmesi için yöntemlerin karşılaştırılması

Dizel ekipman filoları için gerekli olan hava akışını belirleyen baskın yöntemler ana hatlarıyla çizilmiştir. Yükleyici için gerekli toplam hava akışı, Direkt motor test ve ampirik türev yöntemlerinin mevcut yöntemlerini kullanarak egzoz gazları, DPM, Isı ve toz için ayrı ayrı belirlenmiştir. Seçilen yükleyici kepçe, bir Volvo TAD1361VE 285 kW Tier IVi motoruyla çalışan Sandvik marka LH517'dir. Bu kepçe 7 m3'lük bir kova ile 17.200 kg'lık bir kapasiteye sahiptir ve NRCan tarafından CSA M424.2-90 (Gazlı olmayan Madenler) altında yer altında kullanım için onaylanmıştır. Bu yükleyicinin çalışabilmesi için minimum galeri boyutları 5mX6,5m'dir.

Çeşitli hesaplama yöntemlerini kullanarak kepçe testi için gerekli hava ihtiyacı tayininin sonuçları Çizelge 9'da gösterilmiştir. Bu örnek, yalnızca hesaplama yöntemleri arasındaki farklılıkları açıklamakla kalmayıp, bu durumda, tasarım kriterleri olarak ısı ve tozun eklenmesiyle oluşan toplam hava akış

tayinindeki büyük değişiklikleri de göstermektedir. Diğer tasarım özelliklerinin (örneğin su spreyleri) söz konusu alana ilave edilmesi şartıyla, toz kontrolü için gerekli hava akışında bir azalmayı haklı göstermek mümkün olsa da, ısının (bir sonraki en yüksek hava akışı gereksinimi) azaltılması bir endişe kaynağı olmaya devam edecektir ve hatta yerel ortama su eklenmesiyle (nem oranını ve nihayetinde ıslak termometre sıcaklığını yükselterek) daha da şiddetlenir.

Kademe IV motorunun, egzoz gazı ve DPM emisyonlarında yapılan önemli düşüşlere rağmen, gerekli olan genel hava akışı önemli ölçüde değişmemiştir. Isı ve tozun daha önce hesaba katılmadığı durumlarda bile hava ihtiyacı artabilir.

Çizelge 9. Yükleyici hava ihtiyacının hesaplama metotlarının karşılaştırılması

Hava ihtiyacını belirleme metodu	Toplam hava akışı m^3/sn	Havalandırma oranı $m^3/sn.kW$	En büyüğe göre yüzdesi %
Direkt Motor Testi*	5,9	0,021	18%
Ampirik Hesaplama	18,0	0,063	55%
Önerilen Metot, Egzoz gazı	8,0	0,028	25%
Önerilen Metot, DPM	3,1	0,011	10%
Önerilen Metot, Isı	21,4	0,075	66%
Önerilen Metot, Toz	32,5	N/A	100%

*NRCan, 2011

Test Değerlendirme Sonuçları:

Faz IV (Tier IV, ABD) dizel motorları ile ilgili emisyonlardaki % 90'lık azalmanın bir sonucu olarak maden hava akışı gereksinimlerinin % 90 oranında azalmayacağını dikkate almak önemlidir. Daha muhtemel olan diğer parametrelerin öncelik kazanması, gelecekte hava akışı hesaplarının biraz daha karmaşık hale gelmesi ve her bir madene özgü faktörler kombinasyonuna dayanmasıdır. Tier IV dizel motorlu motorların, toplam hava akış-ihtiyacı hesabı yöntemlerinin değiştirilmesi ve tutarlı yeni bir yöntemin ortaya çıkması, daha uzun bir zaman alacaktır (Stinnette, 2013).

3 EGZOZ EMİSYON DEĞERLERİNİN PPM OLARAK HESAPLANMASI

Bilindiği gibi, dizel egzoz emisyon standartları, emisyon değerlerini ağır araçlar için g/kWh, birimlerinde vermektedir. Oysaki tipik gaz analizörleri ppm ve yüzde hacim olarak okuma yaparlar. Ağır vasıtaların egzoz emisyonları için, g/kWh ile ppm arasındaki ilişkiler aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir (Pilusa vd., 2012):

$$CO\ (g/kWh) = 3{,}591 * 10^{-3} * CO\ (ppm) \quad (10)$$

$$NO_x\ (g/kWh) = 6{,}636 * 10^{-3} * NOx\ (ppm) \quad (11)$$

$$HC\ (g/kWh) = 2{,}002 * 10^{-3} * HC\ (ppm) \quad (12)$$

$$CO_2\ (g/kWh) = 63{,}470 * 10^{-3} * CO_2\ (\%) \quad (13)$$

4 EGZOZ GAZLARINDAKİ ZARARLI KİRLETİCİLERİN ETKİLERİ.

Bu bölümde emisyon standartlarının sınır koyduğu egzoz gazındaki kirleticileri; yanmamış hidrokarbonlar (HC), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve dizel partikül madde (dpm)'i inceleyeceğiz.

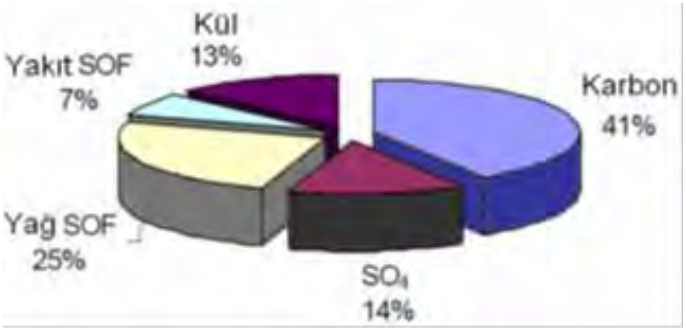
4.1 Dizel Partikül Madde (dpm)

Dizel Partikül madde, dizel motorlarda yanma esnasında yeterli miktarda oksijen bulamayan yakıt damlası içerisindeki karbon moleküllerinin yanma olayına katılmadan egzozdan atmosfere atılması sonucu oluşan emisyonlardır. Karbon, karbon-hidrojen bağları, kükürt dioksit ve sülfürik asit gibi bileşenleri bünyesinde ihtiva etmektedir (Kelen, 2014).

Partikül madde bileşenlerinin yüzdelik oranları Şekil 3'de verilmiştir. Solunabilir toz boyutları 0,1 ila 5,0 mikron arasındadır. Dizel partikül maddelerin boyutları ise 0,05 ila 1 mikron arasında olduğundan solunabilir tozlar grubunda yer alırlar.

5 mikrondan küçük çapa sahip tozların ciğer alveollerinde tutulduğu ve depolandığı

kabul edilmiştir (Yalçın, 2017). Havadaki dizel partikül maddeler insan sağlığı için ciddi riskler oluşturmaktadır. Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC), Haziran 2012'de de egzoz emisyonlarını 1. Sınıf Kanserojen olarak sınıflandırmıştır (IARC, 2012).



Şekil 3. Dizel partikül maddenin bileşenleri (Kelen, 2014)

Bazı ülkelerde uygulanan dpm maruz kalma değerleri Çizelge 4'de verilmiştir. Bu çizelgede yer altı madencileri için, MSHA'ın 0,160 mg/m³ toplam karbon(TC) sınır değeri dikkat çekmektedir.

Kanada Mesleki Kanser Araştırma Merkezi (OCRC) dpm için kişisel maruz kalma değerini 0,02 mg/m³ element karbon (EC)'a düşürülmesini önermektedir (OCRC, 2018). MSHA'ın 0,160 TC mg/m³ değerine baktığımızda dünyadaki en sıkı dpm sınırı, kanseri önlemek için beklenen değerden yaklaşık 10 misli fazla!

4.1.1 Karbon monoksit (CO)

Renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Yoğunluğu, 1,255 kg/m³, havaya göre özgül ağırlığı 0,97 dir. Yoğunluğu havanınkine çok yakın olduğundan, her tarafa yayılmış şekilde bulunur. Çok düşük konsantrasyonda bile zehirleyicidir Bu nedenle yer altı kazısı ile uğraşanların korkulu rüyasıdır.

CO %13 -75 sınırlarında patlar. En tehlikeli patlama sınırı %30 dur. CO'nun asıl tehlikesi zehirli olmasıdır. Çünkü kandaki hemoglobininin CO'e olan ilgisi, oksijene kıyasla 250-300 kez fazladır. Bu nedenle solunan havada çok az CO bulunsa bile, kan CO'i absorbe eder. Oksihemoglobin yerine karbonsihemoglobin oluşur ve kan dolaşımında yer alır. Türkiye'deki yönetmeliklere göre, yer altı madenlerinde CO %0,005 (50 ppm)'den çok olamaz (ÇSGB, 2015). İçten yanmalı motorların egzozlarında hacimce %3,5-7 CO içerebilir. Havadaki karbon dioksit (CO) konsantrasyonunun artmasının insanlara etkisi Çizelge 10'da verilmiştir (Yalçın, 2017).

Çizelge 10. Karbonmonoksitin etkileri

CO * konsantr. %	Solunum Süresi	Zehirlenme Derecesi
0,0016	Birkaç saat	Çok az zarar
0,048	1 saat veya daha az	Hafif zehirlenme
0,128	30-60 dakika	Ciddi zehirlenme
0,4	Çok kısa zaman	Ölüm

* 10°C ve 760 mmHg de % olarak

4.1.2 Azot oksitler (NO_X)

Kırmızı-kahverengi duman, asidik koku ve tadı vardır. Suda kolay çözünür, zehirlidir. Sınır değeri ≤ %0,003'tür. Türleri Azot oksit (NO), azot peroksit (N_2O) ve azot dioksittir (NO_2). N_2O hariç tüm azot oksitler zehirlidir. Ciğerlerde toksit oluşturduğundan yapay solunum veya temiz havanın faydası yoktur (Yalçın, 2017). Etkisi hemen değil bir süre sonra ortaya çıktığından, 20-30 saat sonra ölümler olduğu görülmüştür. Bu yüzden azot oksitlerin solunması kesinlikle önlenmelidir.

Azot oksidin (NO_2) havadaki oranına göre insanlara etkisi: 40 ppm'de hafif koku duyulur; 60 ppm'de genizde tahribat; 100 ppm'de öksürük; 150 ppm'de şiddetli rahatsızlık, akciğerlerde yanma ve 200 ppm'de, koma ve ölüm meydan gelir.

4.1.3 Hidrokarbonlar (HC)

Hidrokarbon emisyonları, silindir duvarlarında meydana gelen yetersiz sıcaklık sonucu oluşan yanmamış yakıtlardan oluşur. Hidrokarbonlar hafif yükte çalışan araçlarda meydana gelir. Hidrokarbon, motordaki ani hız değişikliği, püskürtme sisteminde düzensizlik vb. durumlardan da kaynaklanır.

Hidrokarbonlar motor karterinde ve yakıt sistemindeki yakıt buharlaşmasıyla da oluşur. Toplam hidrokarbonların %50-60'ı egzoz borusundan çıkan gazlardan kaynaklanırken %20-25'i karterden, %15-25'i yakıt buharlaşmasından kaynaklanır (Reşitoğlu, vd., 2014).

Hidrokarbonlar çevre ve insan sağlığı üzerinde zararlı etkilere sahiptir; solunum yolu tahrişi ve kansere yol açar.

5 SONUÇ

Egzoz emisyon standartları önemli kısıntılar getirse de dizel egzoz emisyonları, 2012'den beri insanlar için 1. Grup Kanserojen olarak tanınmaktadır (IARC, 2012). Dünyadaki en düşük dpm (dizel partikül madde) sınırı, yer altı madenleri için 0,160 mg/m^3 (Çizelge 4) iken, Kanada Kanseri Araştırma Merkezi kanserin önlenmesi için bu değerin 0,02 mg/m^3 düşürülmesini tavsiye etmektedir (OCRC, 2018).

Egzoz emisyonlarındaki %90'lara varan azalmalara rağmen, yer altında çalışan dizel ekipmanlar için gerekli hava ihtiyaçları azalmamıştır. Yer altı dizel ekipmanlarının hava ihtiyaçlarını hesaplamak için kullanılan değer genellikle 0,063 m^3/sn.kW'dır. Bazı yerlerde 0,095 m^3/sn.kW değeri (bkz. 2.3) kullanılmaya başlanmıştır (bkz. 2.4). Fakat bu sabit katsayılar, sadece motor gücünü hesaba alır, egzoz emisyon değerlerini ve motordan ortama atılan ısıyı hesaba katmamaktadır.

Daha spesifik ve doğru hesaplar için yeni bir yöntem önerilmektedir (bkz. 2.4). Buna göre: Egzoz gazlarına göre motor hava ihtiyacı, egzozdaki dpm'e göre motor hava ihtiyacı, motordan ortama atılan ısıyı göre motor hava ihtiyacı ve mineral tozun seyreltilmesi için gerekli hava ihtiyacı, hesaplanmalıdır.

Bu dört farklı hava ihtiyaçları göz önünde bulundurularak dizel ekipmanların hava ihtiyaçları daha güvenilir bir şekilde hesaplanabilir. Bu yönteme göre yapılan bir hesaplamanın çarpıcı sonuçları Çizelge 9'da görülmektedir.

KAYNAKLAR

Ayvazoğlu, E., Ökten, G., Tuncel, Z. 2015. *Yer altı kazılarında havalandırma uygulamaları*. İstanbul.

ÇSGB. *Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği*. Resmi Gazete, 10.03.2015, sayı 29291.

Dieselnet https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php

IARC, 2012. Engine exhaust carcinogenic. WHO International Agency for Research on Cancer, No 213, Lyon.

Kelen, F. 2014. Motorlu Taşıt Emisyonlarının İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerine Etkileri, . 8, Van 100.Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.

Majewski, W.A. 2012. *What are diesel emissions,* https://www.dieselnet.com/tech/emi_intro.php.

Maximilien, D., et al. 2017. Diesel engine exhaust exposures in two underground mines, Table 3, International Journal of Mining Science and Technology.

Ontario Reg, 1990. *Regulation 854*, 182 (5), https://www.ontario.ca/laws/regulation/900854

OCRC, 2018. http://www.occupationalcancer.ca/wp-content/uploads/2018/06/OCRC-Response_2018-OEL-Update.pdf.

Pilusa, T.J., Moltagee, M.M., Muzenda, E. 2012. *Reduction of vehicle exhaust emissions from diesel engines using the Whale concept filter*, Aerosol and Air Quality Research.

Ping, G. 2017. *A review of the health effects and exposure-responsible relationship of diesel particulate matter for underground mine,* International Journal of Mining Science and Technology.

Reşitoğlu, Altınışık, Keskin, 2014.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2015. *(97/68/AT)* Resmi Gazete, 26.06.2015, sayı 293398, Madde 3 ve Ek-1 Madde 4.1.2.

Stinnette, J.D., Souza, E.D. 2013. *Establishing total airflow requirements for underground metal/non-metal mines with tier IV diesel equipment*

Yalçın, E. 2017. *Yeraltı Havalandırması*, DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, No: 336.

Effect of Mineralogy on Microwave Heating of Igneous Rocks

A.N. Canpolat, S. Kahraman,
Hacettepe University, Mining Engineering Department, Ankara, Turkey

M. Fener
Ankara University, Geological Engineering Department, Ankara, Turkey

A. Çolak, Ş.A. Yurdacan
Hacettepe University, Mining Engineering Department, Ankara, Turkey

ABSTRACT The low penetration rate and the high cutter wear are the important problems for the excavation of hard and abrasive rocks. Some researchers have investigated the effects of microwave heating of rocks for possible application in the microwave assisted hard rock cutting. In this study, the effect of mineralogy was investigated on the microwave heating of nine different igneous rocks. First, the mineral contents and percentages of each rock were determined. Then, the microwave treatment was applied on the samples at different microwave power levels and different durations. The surface temperatures of each microwave treated sample were also measured by infrared gun. The test results show that the temperature increases generally with increasing microwave power and increasing exposure time. The surface temperatures are different for each rock type treated by microwave. As a result, the mineralogy has important effects on the microwave heating of igneous rocks.

1 INTRODUCTION

The mechanical excavation of rocks has been increasing in rock engineering projects due to its advantages compared to drilling and blasting. The cutting rate is low and the cutter wear is high during the excavation of hard and abrasive rocks. There are some preliminary studies on the microwave assisted hard rock breakage. The objective of these studies is to decrease the rock strength by microwave energy before cutting, and therefore to increase cutting rate.

Materials can be classified as conductors, insulators (transparents), and absorbers. Conductors reflect microwaves. Microwaves pass through insulators with no effect. Absorbers absorb a part of the microwaves and produce heat. The materials absorbing microwaves are called dielectric materials. When the microwaves are absorbed by the dielectric materials, microwaves induce molecular motion by migration of ionic species and/or rotation of dipolar species. Microwave heating of a material depends primarily on its dissipation factor, which is the ratio of the dielectric loss or loss factor to dielectric constant of the material. The dielectric constant is a measure of the ability of the material to retard microwave energy as it passes through. The ability of the material to dissipate energy is called loss factor. In other words, loss factor represents the amount of input microwave energy that is lost in the material by being dissipated as heat. Therefore, the material with high loss factor is easily heated by microwave energy (Metaxas and Meredith, 1983).

Minerals and rocks are dielectric materials and, the dielectric constant and loss factor of a rock totally depends on its mineralogy and petrography. Each mineral has its own dielectric properties, whereas the complex of several minerals together results in completely new dielectric properties. Some other parameters, such as grain size, mixture percentage, water content, ambient

temperature, and the applied microwave frequency reflect the final dielectric properties of the rock (Santamarina 1989, Peinsitt et al. 2008).

Microwave energy heats rocks depending on the dielectric constants of their inherent minerals. Because each type of mineral has different dielectric constants, their heating degrees and thermal expansions will be different after being exposed to microwave radiation. The differential thermal expansion of minerals causes to the interior stresses in the mineral skeleton, which leads to micro- and/or macro-cracks within the rock body.

Several researchers have studied the influence of microwave irradiation on the rock strength for possible application in the microwave assisted rock cutting. Nevertheless, the current studies are limited and mostly carried out on basalts. In this study, the effect of mineralogy was investigated on the microwave heating of nine different igneous rocks.

2 PREVIUOS STUDIES

The influences of microwave irradiation on the rock samples were investigated by several researchers. The summary of those are given in the following paragraphs:

The influence of microwave on andesites was studied by Znamenackova et al. (2003). The specimens were heated in a 900 W microwave oven. The temperature of an andesite specimen was reached the range of 1260-1280ºC and melted after 30 minutes.

Satish (2005) and Satish et al. (2006) studied the effect of low power microwaves (150 W) on basalt in a multi-mode cavity. They observed that some specimens showed cracking after 180 and 360 s of microwave exposure. The temperatures of some samples reached 115ºC when exposed for 360 s.

Motlagh (2009) exposed different hard rocks to microwave energy at a power level of 800-300 W for the durations ranging from 0 to 240 s, and measured the strength and abrasivity reduction. He stated that the uniaxial compressive strength values of almost all samples were decreased about 30% after microwave treatment. The Cerchar abrasivity index of almost all samples showed a reduction of about 30%. He observed that the surface temperature of basalt specimen reached 750ºC after the microwave treatment for 240 s at 1250 W.

Peinsitt et al. (2010) applied microwave energy to the samples of sandstone, granite, and basalt with a 3 kW microwave oven at 2.45 GHz. After the microwave irradiation, they performed the uniaxial compressive strength and ultrasonic velocity tests on both dried and water-saturated samples. They stated that the saturation with water enhanced the weakening particularly in sandstone, had a little effect in granite and negligible effect in basalt. The temperatures of the specimens were considerably increased. For example, the surface and inner temperatures of a basalt sample were 580°C and 1220°C, respectively at the irradiation time of 260 s.

Nejati et al. (2012) investigated the effect of microwave treatment on the fracture toughness of basalt specimens. In the study, basalt specimens were exposed to microwave radiations for 5 to 30 s at power level of 1 to 5 kW. The study revealed that both power level and exposure duration to microwave illumination lead to fracture toughness reduction and increase of fracture density. The temperature of a specimen raised to 415ºC after the microwave treatment for 25 s at 3 kW.

Comprehensive laboratory tests were performed by Hassani et al. (2016) to investigate the influence of microwave radiation on temperature profiles and strength reduction in hard rocks such as norite, granite, and basalt. The samples were exposed to the microwave energy of 1.2, 3 and 5 kW for 10, 65 and 120 seconds in a multimode cavity. The results showed that the strengths of the tested rocks reduced with increasing exposure time and power level. Some norite and granite samples cracked, some basalt specimens showed surface spalling, bursting or melting. They showed that the surface temperature of some basalt samples reached about 270°C after 120 s exposure to microwaves at 3 kW power.

3 SAMPLING AND MINERALOGY

Nine different igneous rocks from different countries were included to this study. The samples consisted of six granites, two syenites and one gabbro (Table 1). The six granite samples have different mineralogical content and different grain size.

The NQ (47.6 mm) size cylindrical and disc specimens were prepared from the block samples collected from the site. Cylindrical specimens were 95 mm high and disc specimens were about 24 mm high.

Table 1. The rock types used in the tests

Rock code	Rock type	Location
1	Granite (Rosa Well)	Spain
2	Granite (Rosa Minho)	Spain
3	Granite (Steppe Yellow)	Egypt
4	Granite (Nublado)	Spain
5	Granite (Kaman Rosa)	Turkey
6	Granite(Kozak Granit)	Turkey
7	Siyenite (Volga Blue)	Ukraine
8	Siyenite (Jungle Green)	Egypt
9	Gabbro (Nero Turka)	Turkey

Thin sections were prepared from each rock type in order to detect mineralogical components of them and mineral types were determined as percentages under the polarizing microscope. A point-counting device was mounted to the polarizing microscope for this purpose and mineral percentages were determined with precision. The mineral types and the percentages of each mineral are given in Table 2.

4 EXPERIMENTAL STUDIES

A 6 kW industrial microwave oven at the frequency of 2.45 GHz was used for the treatment of the specimens (Fig. 1). The microwave powers of 1 kW, 2 kW, and 6 kW were applied at different exposure durations ranging from 60 s to 420 s. The surface temperature of each specimen was measured with an infrared gun before the microwave irradiation and immediately after removing the sample from the oven. Three samples were tested for each testing case and the results were averaged.

Table 2. The mineral contents and percentages of the specimens

Mineral type	Rock codes and mineral contents (%)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Quartz	15	27	23	19	28	12	---	---	---
Orthoclase	45	26	36	28	41	25	70	35	13
Plagioclase	11	12	18	15	18	32	---	8	27
Microcline	4	3	---	15	---	---	---	---	---
Biotite	9	12	8	11	9	16	12	8	7
Hydrobiotie	5	---	---	---	---	---	3	---	---
Muscovite	---	---	---	8	---	---	---	---	---
Amphibole	---	---	3	---	---	13	---	---	4
Sericite	4	9	---	4	---	---	4	3	---
Chlorite	4	8	2	---	4	2	---	2	4
Titanite	2	---	---	---	---	---	---	---	---
Pyroxene	1	---	4	---	---	---	6	---	42
Epidote	---	3	4	---	---	---	---	---	3
Nepheline	---	---	---	---	---	---	---	32	---
Tourmaline	---	---	---	---	---	---	---	6	---
Granate	---	---	---	---	---	---	---	6	---
Calcite	---	---	2	---	---	---	---	---	---
Pyrite	---	---	---	---	---	---	3	---	---
Magnetite	---	---	---	---	---	---	2	---	---

Figure 1. A 6 kW microwave oven used in the study

5 RESULTS AND DISCUSSION

During exposing the specimens to microwave irradiation, the surface temperatures of the specimens were generally increased with the applied power and the exposure time. Macro-cracks and meltings were observed in some specimens depending on the applied power level and the exposure duration.

The temperature of some specimens was increased too much and some of them were melted. For example, the temperature of a granite (Rosa Well) specimen reached 670.5ºC and melting was observed after the treatment at 6 kW power for 360 s (Figures 2 and 3). The temperature of a syenite (Volga Blue) specimen raised to 916.5ºC melting was occurred after the radiation at 6 kW power for 120 s (Figures 4 and 5). The temperature of a gabbro (Nero Turka) specimen raised to 744.5ºC and cracking was occurred after the radiation at 6 kW power for 180 s (Figures 6 and 7).

The average temperatures of the tested rocks are given in Table 3 for the microwave illumination at 6 kW power for 120 s. Although the granites are mainly composed of quartz and feldspar absorbing microwave energy less (Chen et al. 1984, Walkiewicz et al. 1988), their temperature reached considerable level at 6 kW power for 120 s. For higher exposure time such as 360 s, the temperature of some granites raised above 500ºC as shown in Figure 3.

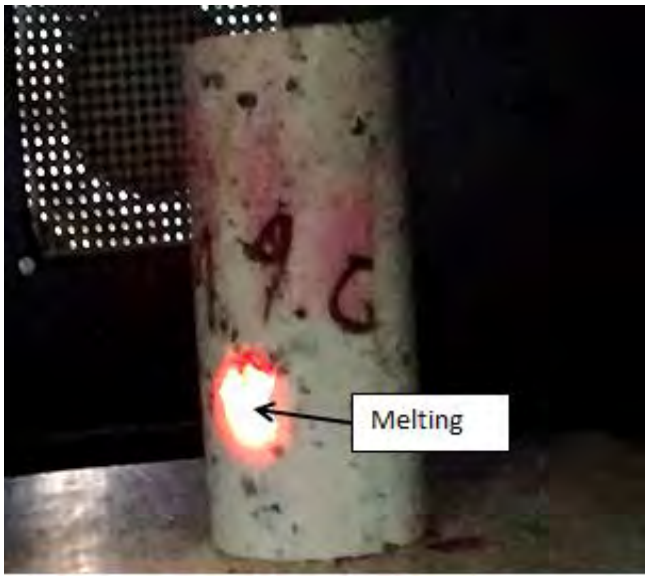


Figure 2. Melting in granit (Rosa Well) after the treatment at 6 kW power for 360 s

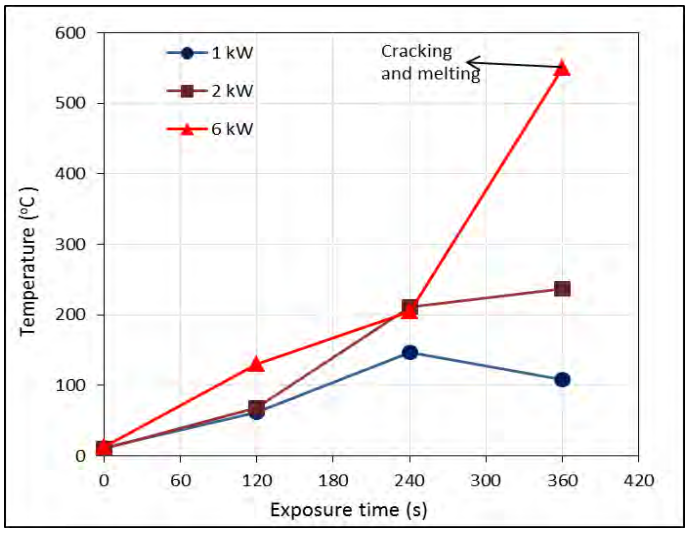


Figure 3. The temperature of granite (Rosa Well) as a function of exposure times for different microwave powers

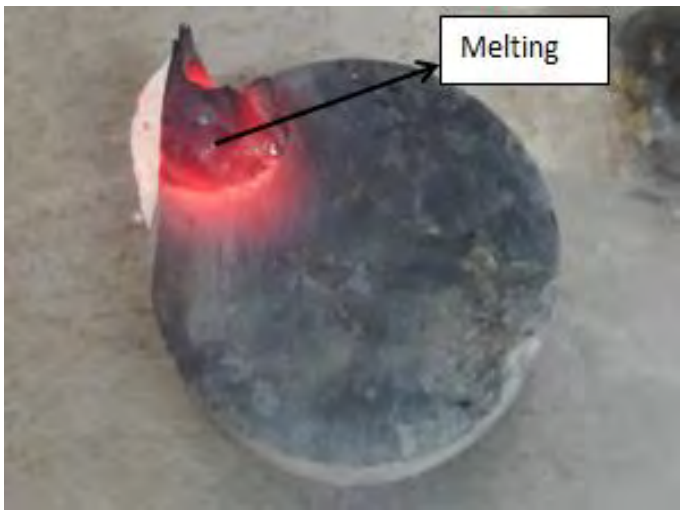


Figure 4. Melting in syenite (Volga Blue) after the treatment at 6kW power for 120 s

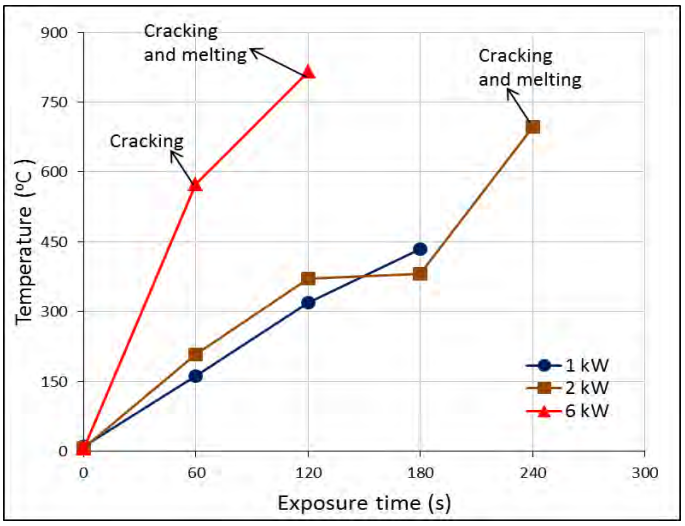


Figure 5. The temperature of syenite (Volga Blue) as a function of exposure times for different microwave powers

Figure 6. Cracking in Gabbro (Nero Turka) after the treatment at 6kW power for 120 s

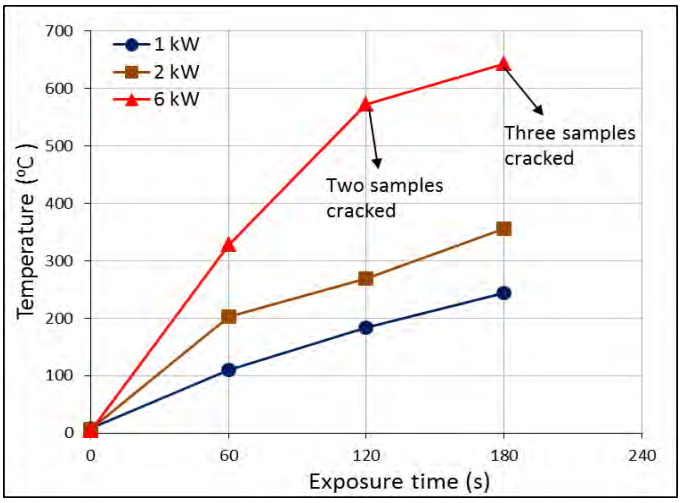


Figure 7. The temperature of gabbro (Nero Turka) as a function of exposure times for different microwave powers

Table 3. The temperatures of the tested rocks for the treatment at 6kW power for 120 s

Rock code	Average temperature (°C)	
	Cylindrical sample	Disc sample
1	130.4±39.8*	133.8±46.4*
2	242.5±163.3	87.3±14.6
3	266.2±31.0	158.0±73.4
4	166.7±52.6	84.3±7.5
5	172.4±22.4	135.0±25.6
6	259.3±54.8	190.3±17.5
7	409.3±119.6	814.5±154.7
8	170.2±25.1	116.1±18.2
9	440.7±59.4	571.6±89.7

*Standard deviation

The temperature of syenite (Volga Blue) reached above 400°C for the microwave radiation at 6kW power for 120s. Moreover, the temperature of some syenite (Volga Blue) disc specimens increased above 800°C. Even for the treatment at 1kW power for a few minutes, the temperature of syenite (Volga Blue) and gabbro (Nero Turka) raised to significant levels (Figure 5 and7). That the temperature of syenite (Volga Blue) increased to high level is due to the fact that it has metallic minerals such as pyrite and magnetite, which are strong absorbers of microwave radiation (Walkiewicz et al., 1988). Although the percentages of metallic minerals in syenite (Volga Blue) are too low, they increased the temperature much. On the other hand, the temperature of siyenite (Jungle Green) is low because of the high percentage (32%) of nepheline, which is weak absorber of microwave radiation (Anonym, 1990).

The temperature of gabbro (Nero Turka) also raised above 500°C for the microwave radiation at 6 kW power for 120 s. This is due to the presence of high percentages of pyroxene (42%), which is a strong microwave absorber (Hartlieb et al., 2016)

It is interesting that some data points fluctuate as shown in Figure 3. The standard deviations of the temperature measurements are generally too high. It is probably due to the fact that the heating degree of a specific

specimen mainly depends on its mineral percentages, not depends on the average mineral percentages of the rock type. If the mineral percentages of two specimens belonging to the same rock type are different from each other, their heating degrees will also be different.

6 CONCLUSIONS

Nine different igneous rocks such as granite syenite, and gabbro were tested in order to reveal the effect of mineralogy on the microwave heating. The following conclusions were obtained thorough this study:

- The heating degrees by the absorption of the microwaves and the response to microwave energy of the tested rocks are different depending on the mineral contents.
- The heating degree of each specimen belonging to the same rock type may differ largely from each other due to the differences of mineral percentages.
- Even if the percentages of metallic minerals in a rock body are too low, they increase much the temperature of the rock.

Concluding remark is that the mineral type and percentages significantly affect the heating degree of igneous rocks. Further study should be carried out on the different igneous rocks having different mineralogy.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) for the support of the project (Project No. 216M003).

REFERENCES

Anonym, 1990. *Microwaves and minerals*, Industrial mineral background paper, Queen's Printer for Ontario, 77p.

Chen, T.T., Dutrizac, J.E., Haque, K.E., Wyslouzil, W., Kashyap, S., 1984. Relative trasparansy of minerals to microwave radiation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 23(3), 349-351.

Hartlieb, P., Leindl, M., Kuchar, F. Antretter, T. Moser, P. 2012. Damage of basalt induced by microwave irradiation, *Minerals Engineering*, 31, 82–89.

Hassani, F., Nekoovaght, P.M., Gharib N. 2016. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave assisted underground excavation, *J. Rock Mech. Geotech. Eng*., 8, 1-15.

Metaxas, A.C., Meredith, R.J. 1983. *Industrial Microwave Heating*. Peter Peregrinus, 1st Edition.

Motlagh, P.N. 2009. *An investigation on the influence of microwave energy on basic mechanical properties of hard rocks*, MSc Thesis, Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University.

Nejati, H., Hassani, F., Radziszewski, P. 2012. Experimental Investigating of Fracture Toughness Reduction and Fracture Development in Basalt Specimens under Microwave Illumination, in: Earth and Space 2012, *Proc. the 13th ASCE Aerospace Division Conf. on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, California, April 15-18, pp. 325-334.

Peinsitt, T., Kuchar, F., Moser, P., Kargl, H., Restner, U., Sifferlinger, N. 2008. Microwave heating of rocks with different water content, *Proc. Microwave Techn. in Minerals Eng. (Microwave Technology 08)*, November 11-12, Cape Town, South Africa.

Peinsitt, T., Kuchar, F., Hartlieb, P., Moser, P., Kargl, H., Restner, U., Sifferlinger, N.A. 2010. Microwave heating of dry and water saturated basalt, granite and sandstone, Int. *J. Mining Miner. Eng*., 2, 18-29.

Santamarina, J.C. 1989. Rock excavation with microwaves; A literature review. *Foundation engineering: current principles and practices proceedings*, Evanston, Illinois, 459 – 473.

Satish, H. 2005. *Exploring microwave assisted rock breakage for possible space mining applications,* Masters of Engineering Thesis, Mechanical Engineering, McGill University.

Satish, H., Ouellet, J., Raghavan, V., Radziszewski, P. 2006. Investigating microwave assisted rock breakage for possible space mining applications, *Mining Technology,* 115(1), 34-40.

Walkiewicz, J.W., Kazonich, G., McGill, S.L. 1988. Microwave heating characteristics of minerals and compounds, *Minerals and Metallurgical Processing,* 39, 39-42.

Znamenackova, I., Lovas, M., Hajek, M., Jakabsky, S. 2003. Melting of andesite in a microwave oven, *Journal of Mining and Metallurgy,* 39(3-4)B, 549 - 557.

Tam Mekanize Kazı Yapılabilirliğinin Yapay Sinir Ağları ile Değerlendirilmesi

Evaluation of the Feasibility of Fully Mechanized Excavation by Artificial Neural Networks

M.C. Özyurt, A. Karadoğan
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET Ülkemiz madenciliğinde maden makineleri ve mekanizasyonun üretimdeki uygulaması gün geçtikçe artmaktadır. Her maden yatağının, geometrik şekline ve kaya kütlesi özelliklerine bağlı özel şartları mevcuttur. Bu şartlardan ötürü, bir işletmede verimli ve etkin olarak kazıda tam mekanizasyon sağlanabilirken, başka bir işletmede bu mümkün olmayabilir. Dolayısıyla, yatırım yapmadan önce bu özel şartların iyi değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, Yapay Sinir Ağları (YSA) ile kazıda tam mekanizasyon değerlendirilmiştir. Bu kapsamda; "syntax" program dili kullanılarak, literatürdeki dogmatik bilgiye dayalı ve ilgili problemin büyük bir kısmını ifade edebilecek kalitede 10166 adet sanal örnek hazırlanmış ve bu örnekler ile YSA eğitilmiştir. Eğitim tamamlandığında, çok düşük bir performans fonksiyonu (0,0005) ve çıkışlar ile hedefler arasında çok yüksek korelasyonlu (R=0,99) bir ilişki elde edilmiştir. Bunun sonucunda, kazıda mekanizasyonun değerlendirilmesinde uzman bir YSA geliştirildiği anlaşılmıştır.

ABSTRACT The application of mining machinery and mechanization in production is increasing day by day in our country's mining sector. Each mineral deposits has special conditions depending on their geometric shape and rock mass properties. Because of these conditions, a fully mechanized excavation can be provided efficiently in an operation, but this may not be possible in another operation. Therefore, these special conditions need to be well evaluated before investing.

In this study, fully mechanized excavation was evaluated with Artificial Neural Networks (ANN). In this scope; using the "syntax" program language, 10166 virtual samples were prepared based on the dogmatic knowledge in the literature and capable of expressing a large part of the related problem, and an ANN model was trained with these examples. When the training was completed, a very low performance function (0.0005) and a very high correlation (R = 0.99) between outputs and targets were achieved. As a result, it was understood that an expert ANN model was developed in the evaluation of the fully mechanized excavation.

1 GİRİŞ

Ülkemiz madenciliğinde maden makineleri ve mekanizasyonun üretimdeki uygulaması gün geçtikçe artmaktadır. Her maden yatağının, geometrik şekline ve kaya kütlesi özelliklerine bağlı özel şartları mevcuttur. Bu şartlardan ötürü, bir işletmede verimli ve etkin olarak kazıda tam mekanizasyon sağlanabilirken, başka bir işletmede bu mümkün olmayabilir. Dolayısıyla, yatırım yapmadan önce bu özel şartların iyi değerlendirilmesi gerekmektedir.

Kazıda mekanizasyonun değerlendirilmesi için geleneksel yöntemler ve/veya akıllı sistemlerden yararlanılabilir. Ancak, bilgide eksikliğin olduğu problemlerde geleneksel yöntemler verimli bir çözüm yöntemi olmamaktadırlar. Ayrıca, geleneksel algoritmalar gelişen teknolojiyi, bilimsel çalışmalarda ve mühendislik uygulamalarında elde edilen yeni bulguları göz önünde bulundurmadan çözüm sunmaktadır. Tüm bu bilgiler ışığında, geleneksel yöntemlerin, ilgili problemin çözümü için yetersiz kalabilecekleri anlaşılmıştır. Bu nedenle, akıllı sistemlerin kullanımı daha önemli hale gelmektedir.

Akıllı sistemlerden biri olan Yapay Sinir Ağları (YSA), örneklerdeki neden-sonuç ilişkilerini çalışarak, benzer veya daha önce karşılaşılmamış olaylar hakkında tahminler yapabilmektedir. Eksik bilgi ile çalışabilmesi ve öğrenmenin dinamik olması gibi özellikleri nedeniyle YSA'nın ilgili problem için uygun bir yöntem olduğu öngörülmüştür.

Birçok araştırmacı, madencilik kapsamına giren problemleri çözebilmek için yapay sinir ağlarını kullanmıştır. Adeli ve We (1998) bir kazı faaliyetinin ekonomik sonuçlarını tahmin etmiş; Leu vd. (2001) tahkimat sisteminin gerilmeler karşısındaki davranışını, Ambrozic ve Turk (2003), Yılmaz (2009) ve Lee vd. (2012) göçük riskini, Düzgün (2005), Zhang vd. (2007) Guo vd. (2009), He vd. (2009), Hu (2010) ve Liu (2014) metan konsantrasyonundaki değişimi, Singh vd. (2004), Singh ve Singh (2005), Sawmliana vd. (2007), Singh vd. (2008) ve Mohammad (2009) ise patlatma ve çevresel çıktılarını modellemiş; Cheng vd. (2005) bir yeraltı işletmesinin havalandırma sistemini optimize etmiş; Özyurt (2018) ise bir yeraltı maden yatağı için en uygun üretim yöntemini seçmiş, havalandırma, mekanizasyon ve tavanın kontrol altına alınması ile ilgili değerlendirmeler yapmıştır.

Bu çalışmada, Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak tam mekanize kazının uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

2 GENEL BİLGİLER

2.1 Kazıda Mekanizasyon

Bir maden yatağının kazısında mekanizasyonun sağlanabilmesi için, ilgili maden yatağının aşağıdaki ön koşulları sağlaması gerekmektedir;

- Gelişen teknoloji ile beraber yatay, orta eğimli ve dik damarlar için kazıda tam mekanizasyon sağlanabilir hale gelmiştir. Dolayısıyla günümüzde damar eğimi mekanizasyonu etkileyen bir ölçüt olarak değerlendirilmemektedir.
- Kazı makineleri için yeterli kazı boşlukları açılmalıdır. Örneğin, mekanize kazı yapan makinelerin en kısa boyutlu olanı 0,5 m, tam mekanize kazı yapan makinelerde ise 1,1 m'dir.
- Tavan taşı, şartları hemen tahkimat gerektirmemeli, kendiliğinden göçmemelidir.
- Taban taşı, ağır makinelerin ağırlığı altında çökmeyecek kadar sağlam olmalıdır.
- Panoda jeolojik arızalar olmamalıdır. Kazı arınına dik faylarsa sahip yatakların geçilmesi çok zor, paralel faylar ise bazı özel yöntemlerle geçilebilir.
- Kazı cephesi için uygun tahkimat sistemi seçilmelidir.
- Mekanizasyon işlemleri, çok miktarda toz oluşturur. Bu nedenle, tozun kontrol altına alınması zorunludur.
- Yeraltı suyu, özellikle tam mekanize kazıyı olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, kazı öncesi hidrolik analizler yapılmalıdır (Bilgin, N. 1989, Yavuz vd. 2003, Karpuz ve Hindistan 2008, Tatar ve Özfırat 2016).

2.2 Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay sinir ağları; biyolojik sinir ağlarını taklit eden, örneklerden veya geçmiş çalışmalarda elde edilen bulguları çalışarak, benzer veya daha önce karşılaşılmamış örnekler hakkında yeni bilgiler türetebilme veya bulabilme gibi kabiliyetleri, kendi kendine yapabilmek için geliştirilen bilgisayar programlarıdır (Rajasekaran ve Pai 2005, Öztemel,2016).

2.2.1 YSA'nın eğitilmesi

YSA'da kullanılan eğitim algoritmaları, danışmanlı öğrenme ve danışmansız öğrenme başlıkları altında 2 ana grupta incelenir. Danışmanlı öğrenme kuralları en uygun değeri bulma (eğri uydurma) ve sınıflandırma problemlerinde, danışmansız öğrenme kuralları ise kümeleme problemlerinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada, ilgili problemler eğri uydurma ve sınıflandırma kapsamına girdiğinden danışmanlı öğrenme kuralları, bu kurallardan da hatayı minimize etmede en etkili çözümleri sunan geri yayılım öğrenme kuralları kullanılmıştır.

Geri yayılım öğrenme kuralları ile hem doğrusal, hem de doğrusal olmayan problemler çözülebilmektedir. Levenberg-Marquadt (LM), Bayes (BR) ve ölçekli eşlenik indirgeme (SCG) algoritmaları bu kurallara girer. BR en yavaş, SCG ise en hızlı sonuç veren geri yayılım algoritmasıdır (Mathworks, 2017).

Bu çalışmada, sınıflandırma problemleri SCG ile eğitilmiş ağlar en başarılı sonuçları vermiştir.

2.2.1.1 Ölçekli eşlenik indirgeme (SCG)

Møller (1993), SC ile LM algoritmalarını kombine ederek Ölçekli Eşlenik İndirme Algoritması (SCG)'nı geliştirmiştir (Eşitlik 1).

$$S_k = \frac{E(w_k+\sigma_k p_k)-E'(w_k)}{\sigma_k} + \lambda_k p_k \quad (1)$$

Burada; S yaklaşık Hessian matrisi, E toplam hata fonksiyonu, E' iyileştirme miktarı, p_k arama yönü, λ_k ve σ_k ölçekleme faktörleridir. Bu faktörler başlangıçta $0 \leq \lambda_k \leq 10^{-6}$ v $0 \leq \sigma_k \leq 10^{-4}$ arasında değer alır (Baghirli, 2015).

β_k faktörü, yeni arama bölgesinin belirlemek üzere kullanılan bir parametredir. Eşitlik 2 ile hesaplanır.

$$\beta_k = \frac{(g_{k+1})^2-g_{k+1}^T g_k)}{g_k^T g_k} + \lambda_k p_k \quad (2)$$

Yeni arama bölgesi Eşitlik 3 ile belirlenir. Burada g_k dik iniş yönüdür.

$$P_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_k P_k \quad (3)$$

3 ÇALIŞMA SAHASI

Kiremitçiler Madencilik Ltd. Şti'nin yeraltı linyit madeni, Edirne İli, Uzunköprü İlçesi Kırköy Mahallesi sınırları içerisinde bulunmaktadır.

Günümüz itibari ile üretim açık işletme şeklindedir (Şek. 1). Ancak, 60 m'den daha derinde yataklanmış linyitin üretilmesinde yeraltı işletmesine geçilmesi ve üretimin uzunayak üretim yöntemi ile yapılması için projelendirme çalışmaları başlamıştır.

Şekil 1. Yeraltı linyit madeninin açık işletmesinin fotoğrafları (Özyurt, 2018)

İnceleme alanında danişment formasyonu hâkimdir. Kahve gri ve sarı renkli olarak izlenen formasyon, kumlu killi ve siltli birimlerden oluşmaktadır. Danişment Formasyonu sahil boyunca geniş bir alanı kaplamış ve kıyı şeridinde yer yer üzerine güncel denizel sahil dolgu malzemesi ve alüvyon çökelleri kaplamıştır. Zengin kömür yatakları içeren Danişment Formasyonu yer yer tüf arakatkılıdır (Mutlu, 2017).

Damarın mostra verdiği iki bölgede ölçümler yapılarak damar kalınlığı, eğimi ve süreksizlik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, maden yatağının kaya kütlesi özelliklerini tayin etmek için, kaya mekaniği deneyleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular Çizelge 1'de sunulmuştur.

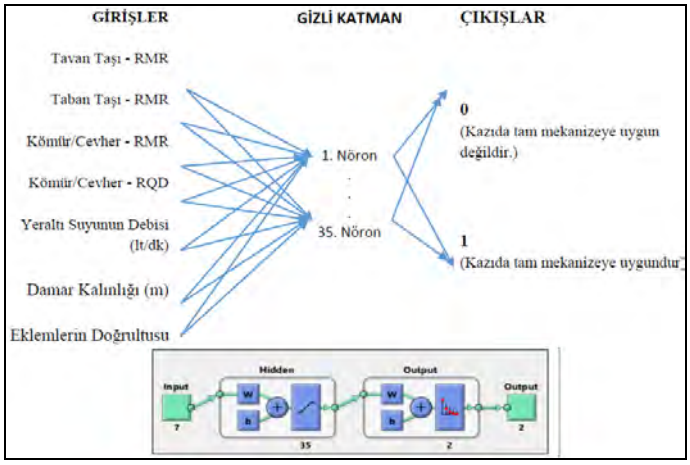
Çizelge 1. Maden yatağının teknik özellikleri (Özyurt, 2018)

Seçim Ölçütü	Değer
Maden Türü	Linyit
Yantaş Türü	Kiltaşı
Yatak Şekli	Levha
Damar Eğimi	10°
Damar Kalınlığı	3,5-6,5 m (Ort. 4 m)
Derinlik	16-180 m
Cevher ve Yantaşın Bağlantısı	Belirgin
Yeraltı Suyu	Yok
Tavan Taşının Kütle İndeksi	59
Linyitin Kalite Belirteci (RQD)	% 72,6
Süreksizliklerin Pürüzlülüğü	Az Pürüzlü
Süreksizliklerin Sertliği	Sert
Eklemlerin Doğrultusu	Panoya Paralel
Eklemlerin Yönü	İlerleme Yönü
Eklemlerin Açısı	Yatay
Linyitin Kütle İndeksi (RMR)	52
Taban Taşının Kütle İndeksi (RMR)	53

4 YSA MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Yeraltı madeninde tam mekanize kazıyı değerlendiren ağın giriş katmanında; kaya kütlesi indekslerini (RMR), kömür/cevherin kalite belirtecini (RQD), damar kalınlığını, yeraltı suyunun debisini ve eklemlerin doğrultusunu ifade eden 7 nöron, çıkış katmanında ise mekanize kazı yapılabilirliğini temsil eden 2 nöron yer almaktadır (Şekil 2).

Geliştirilen ağı eğitebilmek için, problemin büyük bir kısmını ifade edebilecek aralıkta ve kalitede örneklere ihtiyaç duyulmuştur. Maden yataklarının teknik özellikleri, şirket içi özel bilgi olmalarından dolayı firmalardan temin edilememekte, temin edilen bilgilerin ise güvenilirliği veya uygulamaların doğruluğu bilinmemektedir. Bununla birlikte, YSA'nın sadece firmalardan temin edilen ve/veya edilebilecek bilgiler ile eğitilmesi sonucunda, literatürdeki dogmatik bilgi yerine uygulayıcıların kararları baz alarak çıkışlar sunan bir model geliştirilmiş olacaktır. Keza, maden yataklarının tüm teknik bilgileri, yüksek bir güven aralığında temin edilebilse dahi, bu bilgiler problemin sadece bir bölümünü ifade edebilecektir. Ayrıca, firmalar ülkemiz yasaları ve yönetmeliklerine uygun şekilde üretim yaptığından, örnek setleri sadece "UYGUN" koşullardan oluşacak, "UYGUN OLMAYAN" veya "UYGULANAMAZ" koşullar YSA'ya öğretilmeyecektir. Tüm bu nedenlerden dolayı; tüm yeraltı madenleri için yüksek bir güven aralığında çözüm sunabilecek bir modelin, sadece firmalardan alınan bilgiler ile geliştirilemeyeceği anlaşılmıştır. Sonuç olarak, "syntax" program dili kullanılarak, literatürdeki dogmatik bilgiye dayalı ve problemin büyük bir kısmını ifade edebilecek kalitede, toplam 10166 adet örnek hazırlanmıştır. Örneklerin %80'i eğitim, %20'si ise test işlemi için kullanılmıştır. Doğrulama işlemi ise, ağın performans fonksiyonu minimize edilmeden eğitimin durdurulmasına neden olabilme ihtimali nedeniyle tercih edilmemiştir.



Şekil 2. Geliştirilen YSA modeli (Özyurt, 2018)

Problemin girişlerine karşılık gelen çıkışlar incelendiğinde, söz konusu problemin sınıflandırma kapsamına girdiği anlaşılmıştır. Ağın çıkışı, yeraltı madeninde tam mekanize kazı yapılabiliyorsa 1, yapılamıyorsa 0 olacaktır. Dolayısıyla, Ölçeklenmiş Konjüge Gradyen geriyayılım öğrenme algoritmasının ve Tanjant Hiperbolik aktivasyon fonksiyonunun kullanıldığı bir patternnet (sınıflandırma ağı) oluşturulmuştur.

Uzman bir sistem ortaya çıkarmak adına farklı mimarilere sahip ağlar eğitilmiş, en düşük performans fonksiyonu, en yüksek

korelasyonlu çıkış-hedef ilişkisi ve en düşük hata, 35 nörona sahip bir gizli katmanın bulunduğu ağ mimarisi ile elde edilmiştir.

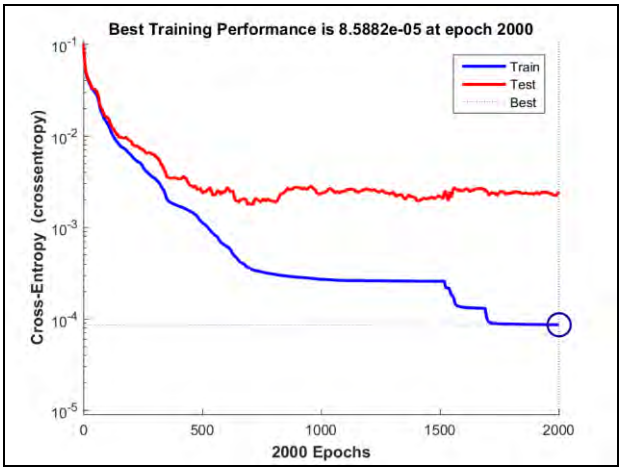
Ağın yapısı Şekil 3'daki gibidir. Ağın performans bilgileri Çizelge 2'de verilmiştir. Eğitim, daha fazla iyileştirme yapılamadığı noktada, 2000 iterasyon neticesinde tamamlanmıştır (Şek. 3).

Çizelge 2. Ağın performans bilgileri (Özyurt, 2018)

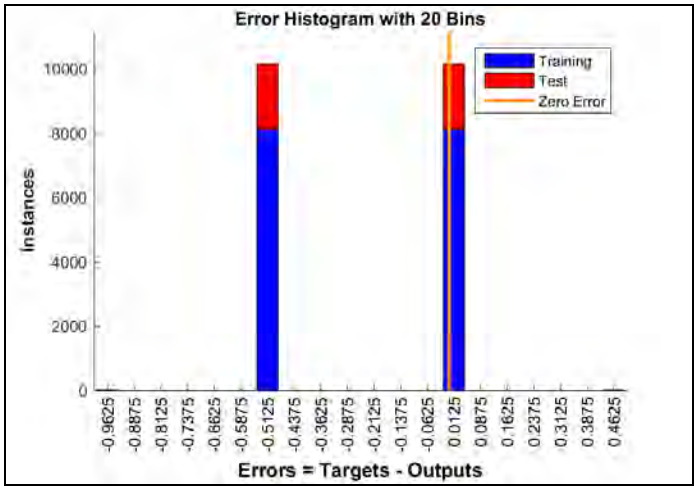
Parametre		**Değer**
Eğitim Algoritması		SCG
Aktivasyon Fonksiyonu		Tansig
Gizli Katmandaki Nöron Sayısı		35
İterasyon		2000
Performans Fonksiyonu		8,58 x 10^{-5}
Karşılaştırma	Eğitim	%100
	Test	%99,3
Cross-Entrophy	Eğitim	10^{-4}
	Test	$10^{-2,5}$

Ağın çıkışları incelendiğinde, sınıflandırmanın 0 ile 1 yerine 0,5 ile 1 şeklinde yapıldığı görülmüştür. Bu da hatanın -0,96 ile 0 arasında değişmesine neden olmaktadır (Şek. 4). Bu nedenle, 0,5 civarında değer alan tüm çıkışlar 0'a dönüştürülmüştür.

Ağın eğitimde hiç hata yapmadığı, testte ise %0,7 hata yaptığı görülmüştür (Şek. 5). 10166 adet örneğin 17 tanesinde yanlış sonuç elde edilmiştir. Bu sonuç, ağın ezberleme yapmadan öğrendiğini göstermiştir.



Şekil 3: Ağın performans grafiği (Özyurt, 2018)



Şekil 4. Ağın hata histogramı (Özyurt, 2018)

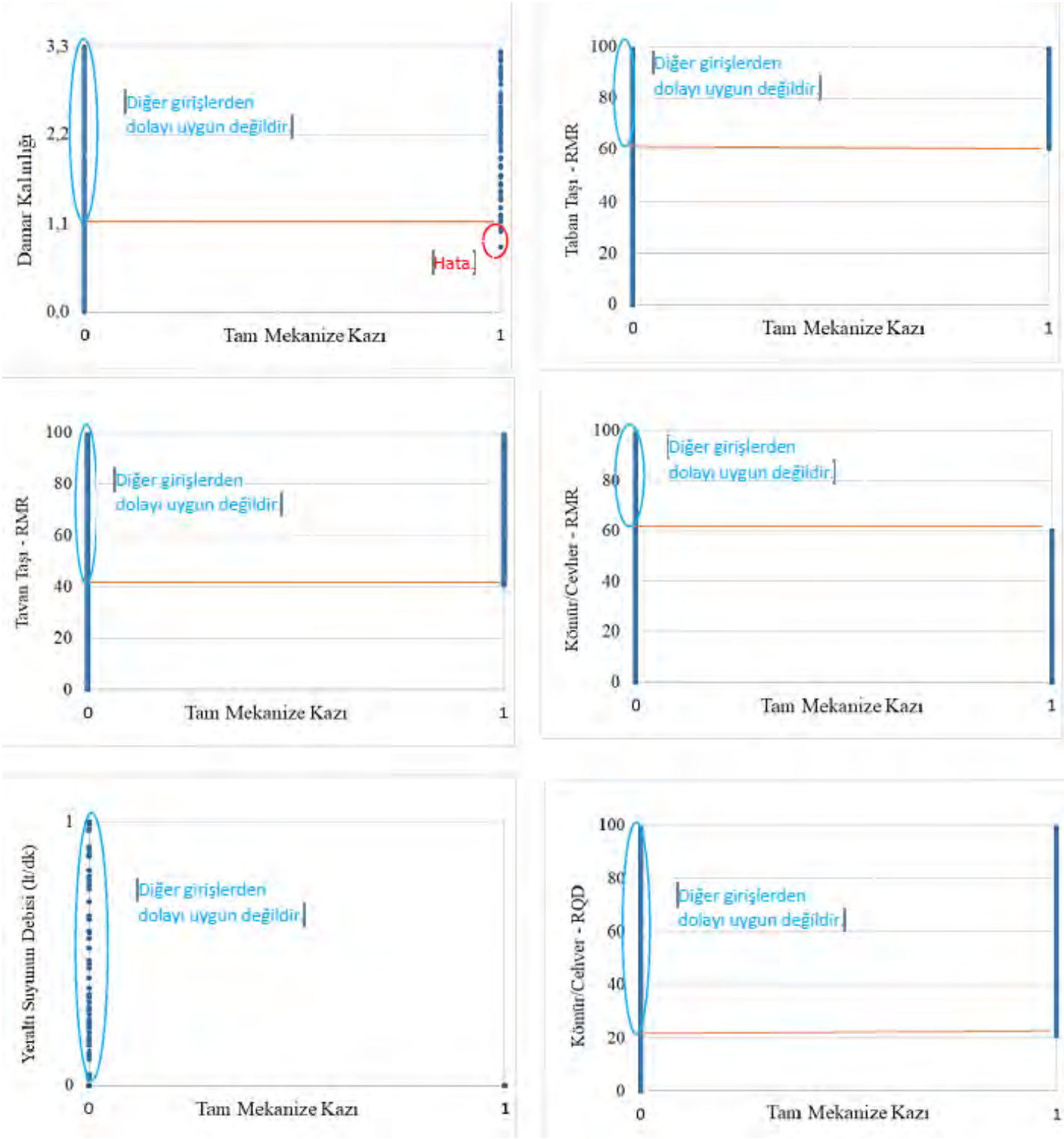
Şekil 5. Ağın hedefleri ve çıkışlarının karşılaştırıldığı matris (Özyurt, 2018)

Ağın, tam mekanize kazı için tüm ön koşulları göz önünde bulundurduğunu teyit etmek için, her bir giriş ile çıkış arasındaki ilişki incelenmiş, tüm ön koşulların öğrenildiği anlaşılmıştır (Şek. 6).

Ağın, tam mekanize kazı ön koşullarını değerlendirmesi amacıyla eğitilmesi için hazırlanmış 10166 adet örneğin girişlerinin, hedeflerinin, çıkışlarının ve hatalarının bir bölümü Çizelge 3'te verilmiştir.

5 YSA MODELİNİN ÇALIŞMA SAHASINA UYGULANMASI

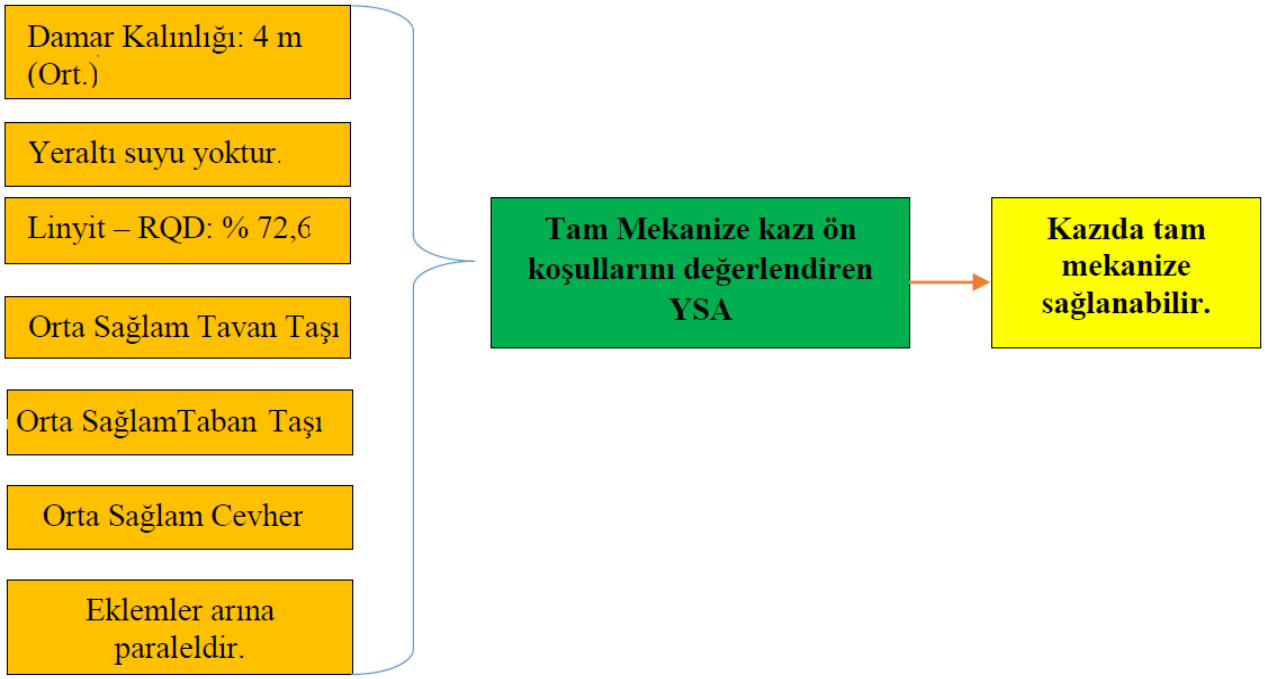
Geliştirilen model, kaya kütle indekslerini, linyitin kalite belirtecini (RQD), damar kalınlığını, yeraltı suyunu ve eklemlerin doğrultusunu, mekanizasyon koşullarını değerlendiren ağlara sunmuş ve ilgili linyit madeninde tam mekanize kazının sağlanabilir olduğu sonucuna varmıştır (Şek. 7).



Şekil 6. Ağın girişleri ile çıkışları arasındaki ilişkiler (Özyurt, 2018)

Çizelge 3: Örneklerin bir bölümü (Özyurt, 2018)

Girişler									
Damar Kalınlığı (m)	**Yeraltı suyunun debisi (lt/dk)**	**Tavan Taşı - RMR**	**Taban Taşı - RMR**	**Kömür/ Cevher - RQD**	**Kömür/ Cevherdeki Eklemlerin Doğrultusu**	**Kömür/ Cevher- RMR**	**Hedef**	**Çıkış**	**Hata**
25,3	0	95	75	89	2	5	1	1	0
51,0	0	91	76	67	2	20	1	1	0
4,2	0	94	91	55	1	1	1	1	0
2,0	0	93	76	71	2	47	1	1	0
2,6	0	76	91	60	2	57	1	1	0
10,8	0	57	95	71	2	11	1	1	0
22,5	0	60	95	67	2	10	1	1	0
96,8	0	62	97	82	2	1	1	1	0
86,0	0	52	77	90	2	67	0	0	0
18,3	10	98	74	44	2	89	0	0	0
0,4	0	52	78	41	1	0	0	0	0
86,6	0	47	92	31	1	35	0	0	0
21,9	11	90	94	84	2	92	0	0	0
11,7	0	64	85	55	2	65	0	0	0
20,9	25	81	49	91	1	80	0	0	0



Şekil 7. YSA Modelinin Çalışma Sahasına Uygulanması (Özyurt, 2018)

6 SONUÇLAR

Bu çalışmada, Yapay Sinir Ağları (YSA) ile kazıda tam mekanizasyon değerlendirilmiştir. Bu kapsamda; "syntax" program dili kullanılarak, literatürdeki dogmatik bilgiye dayalı ve ilgili problemin büyük bir kısmını ifade edebilecek kalitede 10166 adet sanal örnek hazırlanmış ve bu örnekler ile YSA eğitilmiştir. Eğitim tamamlandığında, çok düşük bir performans fonksiyonu (0,0005) ve çıkışlar ile hedefler arasında çok yüksek korelasyonlu (R=0,99) bir ilişki elde edilmiştir. Bunun sonucunda, tam mekanize kazının uygulanabilirliğinin değerlendirilmesinde uzman bir YSA geliştirildiği anlaşılmıştır.

Geliştirilen YSA'nın eğitiminin sürekli kılınması durumunda, uzmana ve detaylı bir literatür araştırmasına ihtiyaç duyulmadan, teknolojik gelişmeleri ve yeni bulgular göz

önünde bulundurularak çözümler sunabilecektir. Dolayısıyla, belirli periyotlar ile yeraltı madenciliğinde elde edilen yeni bulguların, bu çalışma kapsamında geliştirilen ağ modeline öğretilmesi çok önemlidir. Bu sağlandığı takdirde, sadece geliştirildikleri dönemin bilgi düzeyine ve teknolojisine dayalı çözümler sunan mevcut yaklaşımlar karşısında, geliştirilen model daha avantajlı olacaktır.

Geliştirilen modelin bir diğer katkısı ise bilgide eksiklik olması durumunda da tahminler yapabilmesidir. Mevcut yaklaşımlar, bilgide eksiklik olması durumunda çözüm sunmamaktadır. Yapay sinir ağlarının, bilgide eksiklik olması durumunda da çalışması, bu problemin önüne geçmiştir. Ancak, bilgide eksiklik olması durumunda ağın verdiği çıkışlar tahminlerden ibarettir. Ağın doğru ve net çıkışlar sunabilmesi için eksik bilginin tamamlanması gerekmektedir.

Geliştirilen modelin, ülkemizdeki değişik yeraltı maden yataklarında kullanılması ile bölgesel sonuçlar elde edilebilir. Bir başka deyişle, bir bölgede yataklanmış madenlerin üretilmesinde mekanizasyonun sağlanıp sağlanamayacağı belirlenebilir. Bu da, madenlerce zengin olan ülkemiz için madencilik faaliyetlerinde izlenebilecek bir yol haritası oluşturulabileceği anlamına gelmektedir.

KAYNAKLAR

Adeli, H., Wu, M. 1998. Regularization neural network for construction cost estimation. Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 124, Issue 1.

Ambrozic, T., Turk, G. 2003. Prediction of subsidence due to underground mining. Computers & Geosciences, Vol. 29, Issue 5.

Baghirli, O. 2015. Comparison of Lavenberg-Marquardt, Scaled Conjugate Gradient and Bayes Regularization Backpropagation algorithms for multistep ahead wind speed forecasting using multilayer perceptron feedforward neural network. Thesis, Ippsala University Department of Earth Sciences, Campus Gotland.

Bilgin, N. 1989. İnşaat ve maden mühendisleri için. uygulamalı kazı mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul,

Düzgün, H.S.B. 2005. Analysis of roof fall hazards and risk assessment for Zonguldak coal basin underground mines. Int. Journal of Coal Geology 64.

Guo D.Y., Wang Y.B., Wei X.J., Wang X.Y. 2009. Early warning of coal and gas outburst by GIS and neural network, J Univ Sci Technol Beijing 2009;31(01):15–24.

He, G.J., Liu S.Y., Sun Y.B. 2009. Theory and practice of coal mine accident hidden danger monitoring and early warning. J China Coal Soc 2009;34(2):212–7.

Hu, D.H. 2010. Analysis on coal mine safety accident causes and forewarning management research. Beijing: China University of Geosciences; 2010.

Karpuz, C., Hindistan, M.A. 2008. Kaya mekaniği ilkeleri, uygulamaları, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.

Khandelwal, M., Singh, T.N. 2006. Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: a neural network approach. J Sound Vib, 289.(4–5):711–25.

Lee, S., Park, I., Choi, J.K. 2012. Spatial prediction of ground subsidence susceptinility using an artificil neural network. Environ Manage, Feb;49(2):347-358. Epub 2011 Oct 18

Leu, S., Chen, C., Chang, S. 2001. Data mining for tunnel support stability: neural network approach. Automation in Construction, Vol. 10, Issue 4, pp. 429-411.

Liu, L. 2014. Modeling and evaluation of the safety control capability of coal mine based on system safety. Journal of Cleaner Production 84.

Mathworks, 2017. Matlab Documentations.

Mohammad, M.T. 2009. Artificial neural network for prediction and control of blasting vibration in Assiut (Egypt) limestone quarry. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 46, pp. 426–431.

Møller, M. 1993. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. Neural networks, Volume 6, Issue 4, Pages 525-533.

Mutlu, E.N. 2017. Edirne ili Uzunköprü ilçesi Kirköy mevkii Kiremitçiler Madencilik Ltd.Şti'ne ait kömür ocağında yapılan şev stabilite raporu. Mart 2017.

Öztemel, E. 2016. Yapay sinir ağları. Papatya Yayıncılık, 4.Basim, 230s.

Özyurt, M.C. 2018. Yeraltı Üretim Yöntemi Seçiminde Yapay Sinir Ağları ve Oyun Teorisinin Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Rajasekaran, S., Pai, G. 2005. Neural networks, fuzzy logic and genetic algorithms: synthesis and applications. New Delhi: Prentice Hall.

Sawmliana, C., Roy, P., Singh, R.K., Singh, T.N. 2007. Blast induced air overpressure and its prediction using artificial neural network. International Journal of Mining Technology, 116, pp. 41–48.

Singh, T.N., Dontha, L.K., Bharadwaj, V. 2008. A study into blast vibration and frequency using ANFIS and MVRA Mining Technology (TIMM A). UK, 117 (3), pp. 116–121.

Singh, T.N., Kanchan, R., Verma, A.K. 2004. Prediction of blast induced ground vibration and frequency using an artificial intelligent technique. Blast Induced Ground Vibration and Frequency, 7–15.

Singh, T.N., Singh, V. 2005. An intelligent approach to prediction and control ground vibration in mines. Geotech. and Geol. Engineering, 23, pp. 249–262.

Tatar, M.K., Özfırat, M.K. 2016. Yeraltı maden makinaları ve mekanizasyonu. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fak. Yayınları, İzmir.

Yavuz, M., Ankara, H., Erçelebi, S.G. 2003. Tam mekanize uzunayaklarda üretimi etkileyen faktörler. Türkiye 18. Uluslararasi Madencilik Kongresi ve Sergisi - IMCET 2003, ISBN 975-395-606-1.

Yılmaz, I. 2009. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comprasion: a case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). Computer and Geosciences, 35.

Zhang, X., Wang, H., Yu, H. 2007. Neural network based algorithm and simulation of ınformation fusion in the coal mine. Journal of China Univ. of Mining and Technology, Vol. 7, Issue 4, pp. 595-598.

Yeni Kazı Havesine Geçiş Yöntemlerinin Farklı Ayak Uzunluklarındaki Verimlilik Analizi

Efficiency Analysis of New Web Transaction Methods in Different Face Lengths

M.E. Yetkin, M.K. Özfirat
Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir

ÖZET Tam mekanize kömür kazısı yapılan uzun ayaklarda verimli bir şekilde üretim yapmanın temel unsurlarından birisi en kısa tur zamanında kazı işlemini tamamlamak ve buna bağlı olarak daha fazla üretim yapmaktır. Bu çalışmada uzun ayaklarda ayna kazısı sırasında kullanılan ayak başı ve yarım ayak yöntemleri ele alınmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, aynı makine ekipman koşulları altında ayak uzunluğunun artmasıyla birlikte ayak başı kazı yönteminde daha kısa tur zamanlarında kazının tamamlandığı ve daha fazla üretim yapıldığı, ayak uzunluğunun kısalmasıyla birlikte hemen hemen iki yönteminde aynı tur zamanında kazıyı tamamladıkları ve üretim miktarlarının çok yakın olduğunu görülmüştür. Bu çalışmadaki parametreler doğrultusunda ayak başı üretim yönteminin daha verimli olduğu belirlenmiştir.

ABSTRACT One of the key elements of efficient production of fully mechanized longwalls is to complete the excavation process in the shortest cycle time and to make more production accordingly. In this study, full-face and half face methods, which are used during face excavation process in longwalls are mentioned. As a result of the study, it is seen that, in the same machine equipment conditions, with the increase of the face length in full-face excavation method, the excavation is completed in shorter production times and the more production is achieved. With the decrease of the face length, it is seen that in almost both methods, the excavation is completed in the same cycle time and the production amounts are very close. It is determined that full-face excavation method is more efficient in the light of the parameters used in this study.

1 GİRİŞ

Uzun ayak üretim yönteminin ilk uygulaması 17. Yüzyılın sonlarında İngiltere'de yapılmış olup, uzun bir arın boyunca kömürün alt kısmını keserek üstte askıda kalan damarın kendiliğinden kopup düşmesini sağlamak şeklinde olmuştur (Şimşir, 2015). Uzun ayak üretim yöntemi, Batı Avrupa orijinli olmasına rağmen dünyadaki uygulamaları bu coğrafi sınırların ötesine taşarak, giderek daha yaygın bir üretim sistemi olarak gelişmektedir. Artan kömür talebinin karşılanabilmesi için uzun ayaklarda üretim kapasitelerinin arttırılması zorunluluğu beraberinde mekanizasyonu da zorunlu hale getirmiştir. Kazı makinaları mekaniği ve mekanizasyonu, gelişmesini kömür madenciliğine borçludur. Yeraltı yapıları asırlar önce yapılmış olmasına rağmen mekanize kazılar 19. Yüzyılda kömür üretiminde başlamıştır. Kömür aşındırıcı olmayan zayıf bir formasyondur. İlk defa 1850 yıllarında İskoçya' da dökme demir, kesici uç olarak basınçlı hava ile birlikte kullanılmıştır. 1900'lü yıllardan sonra elektrik enerjisinin yeraltına girişi ile kazı makinalarındaki gelişme hızlanmıştır. Yeraltı

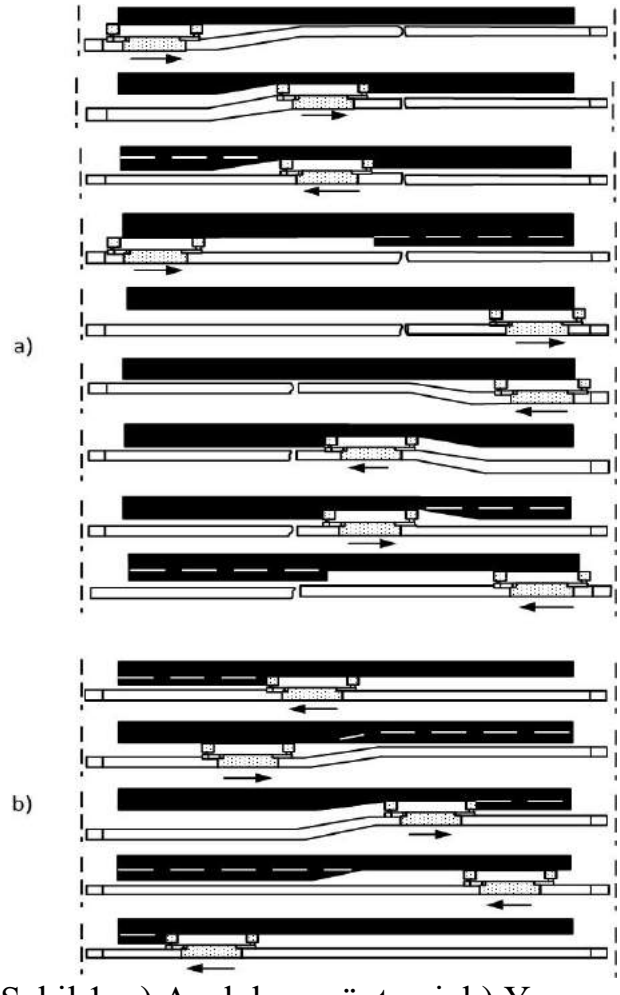
madenciliğinde mekanize kazının gösterdiği gelişme, potkabaç makinası ve bu makine tekniğinin geçirdiği aşama ile yakından ilgilidir. İlk olarak geçen yüzyılın başlarında uygulanan potkabaç makinası kazıda bedeni işçiliği azaltmıştır. Potkabaç çekmede amaç kömür kazısı değil, serbest yüzey oluşturarak kazı kolaylığı sağlamaktır. 1930'lu yılların ortalarında potkabaç makinası ile kazılan kömürün yüklenmesi denemeleri yapılmıştır. kazı arınında boydan boya potkabaç çekilerek daha sonra kazılması yerine, arın boyunca kazı yapmak düşüncesi, kömür sabanının bulunmasına neden olmuştur. 1937 yılında, kömürde çift sürer gibi kazı yapabilen bir alet, sabanın ilk aşaması olmuştur. sabandaki gelişmede, sabanın zincirli olukla birlikte çalıştırılması yeni bir çığır açmıştır. zincirli oluğun sabana gidaj görevi gördüğü yavaş saban 1941'de uygulanmış ve kesme ile oluğa yükleme birlikte yapılmıştır. bu gelişmeler bedeni işçiliği ve patlayıcı maddenin kullanılmadığı, kömürün kazılıp ardından zincirli konveyöre yüklendiği tamburlu kesici yükleyici makinaların üretilmesi ile sonuçlanmıştır (Tatar ve Özfirat, 2016). Mekanizasyonun temel elemanlarından birisi olan kesici yükleyiciler, ayaktan kömür üretimi yapılması ve kesilen kömürün aktarma elemanlarına iletilmesi aşamasında kullanılır.

Bu çalışmada, farklı ayak uzunluklarında tamburlu kesici-yükleyicinin tur zamanı için veriler ve parametreler kabul edilerek kesici-yükleyicinin farklı yeni kazı havesine geçiş yöntemlerindeki üretim kapasiteleri belirlenmiş ve verimlilik analizi yapılmıştır.

2 TAM MEKANİZE KÖMÜR KAZISI

Arında, bir havelik kazısını tamamlayan kesici-yükleyicinin yeni bir haveye başlamak için normal kazı hareketleri dışında bir dizi işlem yapması gerekmektedir. Çift tamburlu kesici-yükleyici kullanılan tam mekanize kömür ocaklarında yeni kazı havesine geçebilmek için yapılan manevra hareketlerinden en yaygın olarak kullanılanları yarım ayak ve ayak başı yöntemleridir (Yavuz ve Erçelebi 2000, Tatar ve Özfırat 2016). Ayak başı yönteminin esası, kesici-yükleyici makinenin ayak başında yaptığı bir dizi seri manevraya dayanmaktadır. Kesici-yükleyici makine yaptığı manevralar sonucunda yeni kazı havesine geçer ve tambur genişliğindeki kömürü keserek üretim işlerini sürdürür. Üst tabanyolu başında bulunan kesici-yükleyici makine yeni kazı havesine geçebilmek için öncelikle tambur pozisyonlarını değiştirmek zorundadır, çünkü bir önceki kazı periyodunun sonunda üst tabanyoluna gelen kesici-yükleyici makinenin üst tabanyolu tarafındaki tamburu yukarda diğeri ise aşağıdadır. Yarım ayak yönteminde ise ayak ortadan iki bölüme ayrılmıştır. Bu yöntemin uygulanmasında, kesici-yükleyici makine ayağın ortasından itibaren yeni kazı havesini oluşturma işlemlerine başlar. Yarım ayak yönteminde, ayak başı yöntemine oranla yapılan manevra hareketlerinde azalmalar meydana gelmektedir.

Ayak başı ve yarım ayak yöntemlerinde tamburlu kesici-yükleyicinin aynada yaptığı hareketler Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. a) Ayak başı yöntemi, b) Yarım ayak yöntemi (Şimşir, 2015)

3 TUR ZAMANI HESAPLAMALARI

Kesici-yükleyici makinenin tambur genişliğindeki kömür dilimini ayak boyunca kesmesi için harcanan veya bir havelik kömür kesmesi için gerekli olan zamana tur zamanı denir. Tur zamanının süresi ile üretilecek kömür miktarı arasında ters orantı vardır. Dolayısıyla tur zamanının azalışı ile üretilecek olan kömür miktarı artacaktır. Tur zamanı hesaplanırken kesici-yükleyici makinenin yaptığı manevra ve kesim hareketleri dikkate alınmaktadır. Kömür kesme, taban temizleme, yeni bir kazı yüzeyi oluşturmak için kömüre dalma, kazı pozisyonu almak için manevra yapma ve kazı yönünü değiştirmek için makinenin tamburlarının pozisyonlarını değiştirme bir havelik üretim periyodu için kesici-yükleyici makinenin yaptığı temel hareketlerdir (Yavuz ve Erçelebi, 2000).

Tur zamanının hesaplanması için gerekli parametreler ve birimleri aşağıda verilmiştir.

d = Kesici-yükleyici makinenin tambur çapı (m),
I_k = Yürüyen tahkimat ünitelerinin ötelenmesi ile ayakta oluşan kıvrımın uzunluğu (m),
I_{ky} = Kesici-yükleyici makinenin uzunluğu (m),
I_m = Ayak başı yönteminde, yeni kazı havesi için gerekli olan manevra uzunluğu (m),
I = Ayak uzunluğu (m),
u = Kesici-yükleyici makinenin tamburlarının pozisyon değiştirme süresi (sn),
V_t = Kesici-yükleyici makinenin temizleme hızı (m/dk),
V_k = Kesici-yükleyici makinenin kesme hızı (m/dk).

3.1 Ayak Başı Yöntemi İçin Tur Zamanının Hesaplanması

Ayak başı yönteminin esası, kesici-yükleyici makinenin ayak başında yaptığı bir dizi seri manevraya dayanmaktadır. Tur zamanı hesaplanırken bu manevralar esnasında geçen sürelerin toplamı dikkate alınır. Bu süreler aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır.

Tambur pozisyon değişimi

$(t_1) = u$

İki tambur arasında kalan kömürün kesilmesi

$$(t_2) = \frac{I_{ky}-2d}{V_k} x60$$

Manevra hareketi

$$(t_3) = \frac{I_m-I_{ky}+2d}{V_t}\ x60$$

Have açma hareketi

$$(t_4) = \frac{I_k+I_{ky}}{V_k} x60$$

Tambur pozisyon değişimi

$(t_5) = u$

Yeni Have kazısı

$$(t_6) = \frac{I_{ky}+I_m+I_k}{V_k}\ x60$$

Tambur pozisyon değişimi

$(t_7) = u$

İki tambur arasında kalan kömürün kesilmesi

$$(t_8) = \frac{I_{ky}-2d}{V_k}\ x60$$

Boşta hareket

$$(t_9) = \frac{I_m+I_k+2d}{V_t} x60$$

Ayak boyunca kazı

$$(t_{10}) = \frac{I-2I_{ky}-I_m-I_k}{V_k}\ x60$$

Bir havelik kazı için harcanan zamanın yani tur zamanının hesaplanması için makinenin harcadığı yukarda ifade edilen

bütün zamanların toplanması gereklidir (Yavuz ve Erçelebi, 2000). Ayak başı yöntemi için tur zamanı;

$$(t) = \sum_{n=1}^{10} t_i \quad \text{yani}$$

$$t = 3u + \frac{I + 2I_{ky} + I_k - 4d}{V_k} x60 + \frac{2I_m + I_k - I_{ky} + 4d}{V_t}\ x60$$

bağıntısı ile ifade edilir.

3.2 Yarım Ayak Yöntemi İçin Tur Zamanının Hesaplanması

Yarım ayak yönteminde ayak ortadan iki bölüme ayrılmıştır. Bu yöntemin uygulanmasında, kesici-yükleyici makine ayağın ortasından itibaren yeni kazı havesini oluşturma işlemlerine başlar. Yarım ayak yönteminde, ayak başı yöntemine oranla yapılan manevra hareketlerinde azalmalar meydana gelmektedir (Yavuz ve Erçelebi, 2000).

Have açma hareketi

$$(t_1) = \frac{\frac{I_k}{2} + \frac{I}{2}}{V_k}\ x60$$

Tambur pozisyon değişimi

$$(t_2) = u$$

İki tambur arasında kalan kömürün kesilmesi

$$(t_3) = \frac{I_{ky} - 2d}{V_k}\ x60$$

Taban temizleme hareketi

$$(t_4) = \frac{\frac{I}{2} - \frac{I_k}{2} - I_{ky} + 2d}{V_t}\ x60$$

Yarım ayak kazı hareketi

$$(t_5) = \frac{\frac{I}{2} + \frac{I_k}{2}}{V_k}\ x60$$

Tambur pozisyonu değişimi

$$(t_6) = u$$

İki tambur arasında kalan kömürün kesilmesi

$$(t_7) = \frac{I_{ky} - 2d}{V_k}\ x60$$

Taban temizleme hareketi

$$(t_8) = \frac{\frac{I}{2} - \frac{I_k}{2} - I_{ky} + 2d}{V_t} x60$$

Yukarıda anlatılan işlemlerden sonra eşitliklerin toplanmasıyla,

Yarım ayak yöntemi için tur zamanı

$$(t) = \sum_{n=t}^{8} ti \quad \text{yani}$$

$$t = 2u + \frac{I + I_k + 2I_{ky} - 4d}{V_k}\ x60 + \frac{I - I_k - 2I_{ky} + 4d}{V_t} x60$$

bağıntısı ile ifade edilir.

4 OLUŞTURULAN MODELLER VE ELDE EDİLEN VERİLER

Çalışma kapsamında ayak başı ve yarım ayak yöntemlerinin tur zamanlarının ve üretim kapasitelerinin belirlenmesi için dört farklı uzun ayak modeli oluşturulmuştur. Bu modellerde pano boyları 1500 m olarak sabit tutulmuş, ayak uzunlukları ise 100 m, 150 m, 200 m ve 250 m olarak dikkate alınmıştır. Oluşturulan modellerde ayrıca hesaplamaların düzgün bir şekilde yapılabilmesi için parametre değerlerinde bir takım kabuller yapılmıştır. Bunlar; kömür yoğunluğu, kömür damar kalınlığı, maksimum kesme yüksekliği, kesici-yükleyicinin gövde yüksekliği, kesici-yükleyicinin gövde derinliği, kesici-yükleyicinin kol uzunluğu, hareketli kol açısı, yürüyen tahkimat ünitelerinin ötelenmesi ile ayakta oluşan kıvrımın uzunluğu, kesici-yükleyici makinenin uzunluğu, yeni kazı havesi için gerekli olan manevra uzunluğu, kesici-yükleyici makinenin tamburlarının pozisyon değiştirme süresi, kesici-yükleyici makinenin temizleme hızı, kesici-yükleyici

makinenin kesme hızı, tambur çapı, iki tambur arasında kalan kömürün kesilmesi, manevra hareketi, have açma hareketi, tambur pozisyon değişimi, yeni have kazısı, boşta hareket, ayak boyunca kazı ve taban temizleme hareketi parametreleridir.

Yapılan kabullerden sonra dört farklı ayak uzunluğunda ayak başı ve yarım ayak yöntemlerinin tur zamanları ve vardiyada üretilecek olan kömür miktarları hesaplanmıştır. Ayak başı ve yarım ayak yöntemlerinde farklı ayak uzunluklarındaki hesaplanan üretim miktarları Tablo 1'de verilmiştir. Hesaplanan tur süreleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Üretim yöntemlerine göre kapasite miktarları

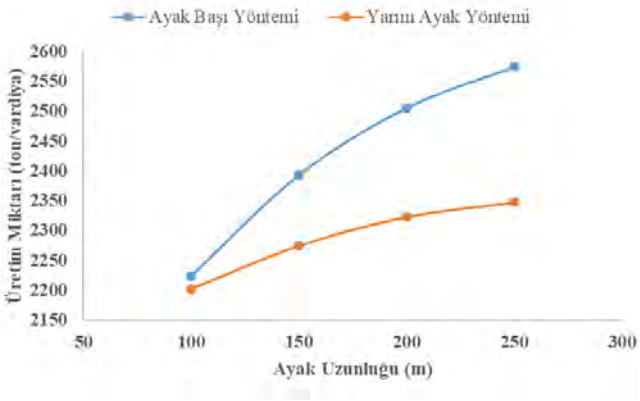
	Ayak Uzunluğu (m)			
Üretim Yöntemi	100	150	200	250
Ayak Başı Yöntemi Kapasite (ton/vardiya)	2223,77	2393,33	2505.66	2574,89
Yarım Ayak Yöntemi Kapasite (ton/vardiya)	2201,54	2274,20	2322.88	2347,35

Tablo 2. Üretim yöntemlerine göre tur süreleri

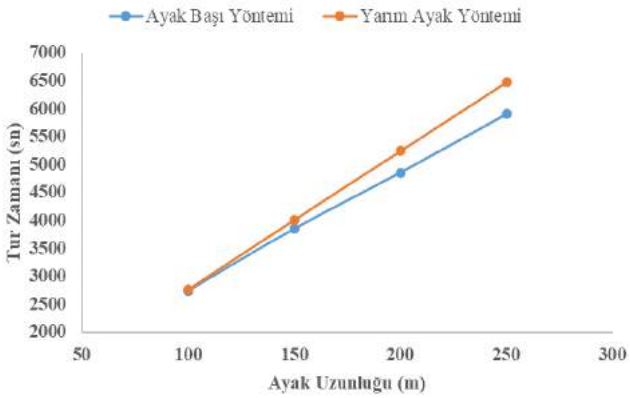
	Ayak Uzunluğu (m)			
Üretim Yöntemi	100	150	200	250
Ayak Başı yöntemi tur süresi (sn)	2732	3844	4852	5900
Yarım Ayak yöntemi tur süresi (sn)	2760	4008	5240	6472

Ayak başı ve yarım ayak üretim yöntemlerinin farklı ayak uzunluklarındaki vardiya başına üretim miktarı değişimi Şekil 2'de verilmiştir.

Ayak başı ve yarım ayak üretim yöntemlerinin farklı ayak uzunluklarındaki tur zamanı sürelerinin değişimi Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2. Ayak uzunluğu ve üretim yöntemine göre kapasite değişimi



Şekil 3. Ayak uzunluğu ve üretim yöntemine göre tur süresi değişimi

5 DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Tam mekanize kömür kazısı yapılan ocaklarda verimli bir şekilde üretim yapmanın temel unsurlarından birisi en kısa tur zamanında kazı işlemini tamamlamak ve buna bağlı olarak daha fazla üretim yapmaktır. Farklı ayak uzunlukları için aynı makine ekipman koşulları altında ayak uzunluğu arttığında ayak başı ayna kazı yönteminde daha kısa tur zamanında kazının tamamlandığı ve daha fazla üretim yapıldığı görülmektedir. Ayak uzunluğu kısaldığında ise hemen hemen iki yönteminde aynı tur zamanında ve üretim miktarlarında olduğunu görülmüştür. Günümüz uzun ayak madenciliğinde oluşturulan pano boyutları artmakta ve buna bağlı olarak daha uzun ayaklarda çalışılmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda ayak başı ayna kazı yönteminin ayak uzunluğu arttıkça, daha kısa tur zamanlarında daha fazla üretime olanak sağladığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

Şimsir, F. 2015. *Yeraltı Madencilik Yöntemleri*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.

Tatar, Ç, Özfırat, M.K., (2016*). Yeraltı Maden Makinaları ve Mekanizasyonu*, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.

Yavuz, M., Erçelebi, S.G. 2000. Tam Mekanize Kömür Kazısında Tur Zamanı Hesaplamaları, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi. 13 (1).

Zeolit İkamesinin Çimentolu Macun Dolgunun Mekanik Özelliklerine Etkisi

Effect of Substitution of Zeolite on the Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill

A. Başçetin
İstanbul -Cerrahpaşa Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

H. Eker
Gümüşhane Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane

S. Tüylü, D. Adıgüzel
İstanbul - Cerrahpaşa Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET Madenlerin aranması, çıkarılması ve zenginleştirilmesi sonucu oluşan maden atıkları uygun şekilde bertaraf edilmediğinde çevre ve insan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır. Son zamanlarda geliştirilen ve yaygın bir şekilde kullanılan çimentolu macun dolgu (CPB) yöntemi; maden atıklarının bertarafı konusunda sektöre hem işletme hem çevresel, hem de yasal mevzuatın uygulanması açısından birçok faydalar sağlamaktadır.

Bu çalışmada; bakır madeninden (Küre, Kastamonu) alınan cevher hazırlama tesis atıklarıyla; Portland çimentosu (PÇ) (ağırlıkça %7, %9 ve %11), su ve PÇ yerine (ikame) Bigadiç'ten alınan doğal zeolitin (ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında) karıştırılmasıyla CBP numuneleri elde edilmiştir. Böylece, PÇ yerine zeolitin kullanılmasının CPB'nin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen CPB numuneleri, 25 °C sıcaklıkta ve en az % 80 nem koşullarında kür kabininde bekletilmiş ve 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda Tek Eksenli Basınç Dayanımı (TEBD) ve Ultrasonik P- Dalga Hızı (Pundit) deneylerine tabi tutulmuştur.

ABSTRACT The resulting of exploration, extraction and processing of the mines poses a threat to the environment and human health when the mine tailings are not appropriately disposed. Recently developed and widely used cement paste backfill (CPB) method has many benefits for the mining industry in terms of the application of the sectoral, operational, environmental and legal legislation on the disposal of mine waste.

In this study; mineral processing plant tailings taken from a copper mine (Küre, Kastamonu); Portland cement (PC) (7%, 9% and 11% by weight), and water is mixed with natural zeolite taken from Bigadic (10%, 20%, 30% and 40% by weight) as substitute for PC, and thus, CPB samples were obtained. The effect of using zeolite instead of PC on the mechanical properties of CPB was investigated. Obtained CPB samples were stored in a curing cabinet at 25 °C and at least 80% humidity and subjected to uniaxial compressive strength (UCS) and ultrasonic P-pulse velocity (UPV, Pundit) tests at curing times of 3, 7, 14 and 28 days.

1 GİRİŞ

Madenlerin aranması, çıkarılması ve zenginleştirilmesi sonucu oluşan maden atıkları uygun şekilde bertaraf edilmediğinde çevre ve insan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır (Karapınar, 2009). Dünya çapında yılda yaklaşık 7 milyar ton, ülkemizde ise 30 milyon ton katı atık oluşmaktadır. Bu atıkların çoğu ağır metal (bakır, kurşun, kobalt, çinko, kadmiyum ve

krom) içerdiğinden tehlikeli atık sınıfına girmektedir. Oluşan bu atıkların büyük bir kısmı havayla temas halindeyken atık sahalarına, atık barajlarına ve denizaltına depolanmaktadır. Bu da çevresel sorunların ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Özellikle sülfürlü mineral (pirit vb.) içeren atıkların depolanması asidik maden suyu (AMD) oluşumuna ve atıkta bulunan ağır metallerin salınmasına, doğrudan çevredeki su kaynaklarının ve toprağın kirlenmesine neden olmaktadır (Erçıkdı vd. 2012). Son zamanlarda geliştirilen ve yaygın bir şekilde kullanılan çimentolu macun dolgu (CPB) yöntemi; maden atıklarının bertarafı konusunda sektöre hem işletme hem çevresel, hem de yasal mevzuatın uygulanması açısından birçok faydalar sağlamaktadır. CPB, ince boyutlu cevher zenginleştirme atıklarının (ağırlıkça %75-85), bağlayıcı (ağırlıkça %3-9) ve istenen akışkanlığı ve katı oranını (%70-80) sağlamak için ilave edilen suyun başarılı bir karışımı olarak ifade edilmektedir (Kesimal, vd. 2003, Erçıkdı vd. 2013, Yılmaz vd. 2017, Yılmaz ve Guresci 2017).

Bu çalışmada; bakır madeninden (Küre, Kastamonu) alınan cevher hazırlama tesis atıklarının, Portland çimentosu (PÇ) (ağırlıkça %7, %9 ve %11) ve su ile karıştırılmasıyla oluşturulan çimentolu macun dolguda (CPB) PÇ yerine (ikame) Bigadiç'ten alınan doğal zeolitten ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında kullanılmasının CPB'nin mekanik özelliklerine etkisine bakılmıştır. Elde edilen CPB numuneleri, 25 °C sıcaklıkta ve en az %80 nem koşullarında kür kabininde bekletilmiş ve 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda Tek Eksenli Basınç Dayanımı (TEBD) ve Ultrasonik P- Dalga Hızı (Pundit) deneylerine tabi tutulmuştur.

2 MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Malzeme

Atık malzeme; Küre'de yer alan bakır madeninden temin edilmiştir. Macun dolgu tesisindeki vakumlu disk filtre çıkışından varillere doldurularak İ.Ü. Maden Mühendisliği Laboratuvarına getirilmiştir.

Bağlayıcı olarak Akçansa Çatalca tesisinden alınan CEM I 42,5 kullanılmıştır. Ayrıca çimento yerine ikame olarak doğal zeolit kullanılmıştır. Doğal Zeolit; Balıkesir Bigadiç'te yer alan Eti Maden Bigadiç İşletme Müdürlüğü sahasından temin edilmiştir. Ayrıca karışımlarda şebekeden alınan musluk suyu kullanılmıştır. Çizelge 1'de Kullanılan bakır atık, çimento ve zeolitin kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan bakır atık, çimento ve zeolitin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellikler	Bakır Atık (%)	CEM I 42,5 R (%)	Zeolit (%)
Kimyasal Bileşim			
SiO_2	12,26	19,13	64,36
Al_2O_3	4,08	4,71	10,89
Fe_2O_3	54,28	3,28	1,44
MgO	2,33	1,29	1,34
SO_3	-	3,49	-
CaO	1,76	64,07	3,58
Na_2O	0,03	0,25	0,18
K_2O	0,09	0,86	4,33
Serbest CaO	-	1,65	
Kızdırma Kaybı	24	2,09	11,00
Fiziksel Özellikler			
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	3,61	3,14	2,33
Özgül Yüzey (cm^2/g)	1801	3640	2687

2.2 Yöntem

Macun dolgu tesisinden getirilen bakır atığı ile ağırlıkça %7-9-11 oranlarında çimento ve musluk suyu karıştırılmasıyla referans numuneleri oluşturulmuştur. Ayrıca kullanılan çimento miktarlarının (%7-9-11) her biri için %10, %20, %30 ve %40 oranlarında zeolit ikamesi içeren numuneler oluşturulmuştur.

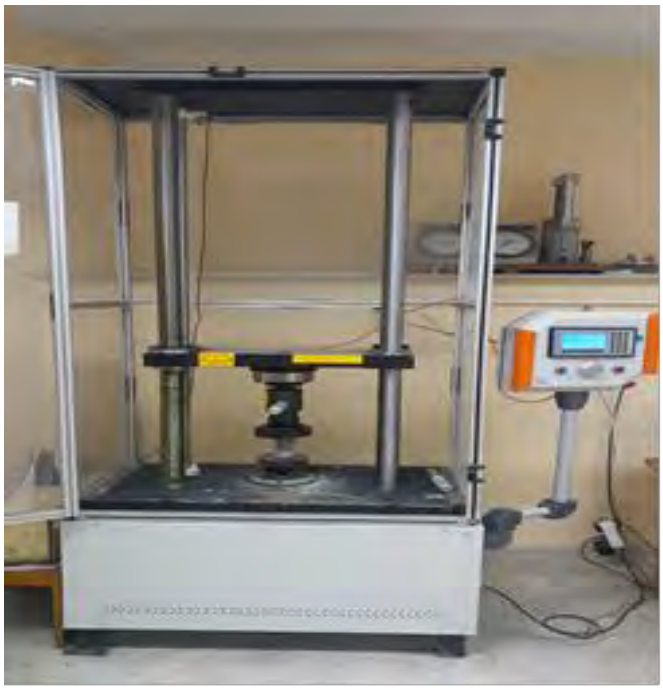
Macun dolgunun homojen bir karışım oluşturması mikser (Şek. 1a) vasıtasıyla 7 dk karıştırılarak sağlanmıştır. Hazırlanan macun dolgu karışımları 18 cm çökme (slump) (Şek. 1b) ve %80 katı oranı değerine göre hazırlanmıştır. Macun dolgu karışımları 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki drenajlı (alt kısmında 4 adet delik bulunan) silindirik numune kalıplarına (Şek. 1c) dökülmüş ve en az %80 nem oranında ve 25 °C sıcaklığa ayarlanan kür kabininde (Şek. 1d) belirlenen kür sürelerinde (3, 7, 14, 28, 56 ve 90 gün) bekletilmiştir.

Şekil 1. Çimentolu macun dolgu numunelerinin hazırlanma aşamaları

2.2.1 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi

Macun dolgunun; tek eksenli basınç dayanımı deneyi 50×100 mm boyutlarında hazırlanan silindirik numuneler üzerinde ASTM C 39 standardına uygun olarak yapılmıştır.

Belirlenen kür sürelerine ulaşan % 7-9-11 çimento oranları ve doğal zeolitten ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimento yerine kullanılmasıyla elde edilen numuneler 50 kN yükleme kapasitesine sahip 1 mm/dk sabit yükleme hızında otomatik kontrollü preste (Şek. 2) kırılarak dayanım değerleri 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Şekil 2. Tek eksenli basınç dayanım testinde kullanılan pres

Silindirik macun dolgu numunelerinin boy/çap oranı en az 2 cm olup, numunelerin alt ve üst yüzeyleri deney öncesi düzeltilmiştir. Her bir kür süresi için 3 adet numune deneyde test edilmiş olup, elde edilen değerlerin ortalaması sonuç olarak alınmıştır.

2.2.2 Ultrasonik dalga hızı (Pundit) deneyi

Ultrasonik test cihazı tarafından macun numunesinin içerisine gönderilen P dalgalarının silindirik numunenin bir yüzeyinden diğerine geçme süresi ölçülmekte ve dalga hızı hesaplanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalara göre macun dolgunun dayanım özelliği tek eksenli basınç dayanımı yöntemi yerine tahribatsız, ucuz, daha kısa sürede ve kolay bir şekilde pundit yöntemiyle belirlenmeye çalışılmıştır (Yılmaz 2013, Erçıkdı vd. 2014, Yılmaz vd. 2014, Yılmaz ve Erçıkdı 2016).

Ultrasonik P-Dalga Hızı (Pundit) Deneyleri; ASTM C 597 standardına uygun olarak 0,1 µs hassaslıkta sinyal süresine ve 54 kHz sinyal frekansına sahip transdüserler (jeofonlar) yardımıyla proceq-tico marka test cihazıyla gerçekleştirilmiştir (Şek. 3).

%7-9-11 çimento oranları ve doğal zeolit (ağırlıkça % 10, % 20, % 30 ve % 40) ikameli, 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresinde

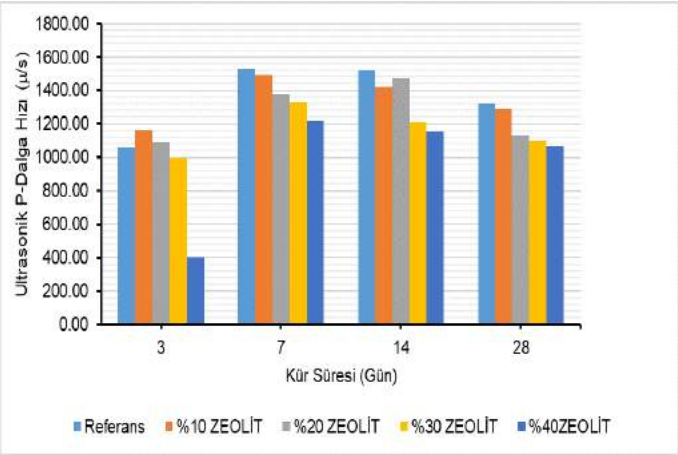
Şekil 3. Ultrasonik P-dalga hızı (Pundit) cihazı

144 adet silindirik (50x100 mm) macun dolgu numunesi kullanılmıştır. Her bir kür süresi için 3 adet numune test edilmiş olup, sonuçlarda elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Deney öncesinde numunelerin alt ve üst yüzeylerinin pürüzlülüğü düzeltilmiştir. Ayrıca boyları 0,1 mm hassaslıkta elektronik kumpas ile ölçülmüştür. Kumpastan elde edilen boy değerleri cihaza uzunluk olarak girilmiştir. Transdüserler ile numunenin alt ve üst yüzeyleri arasında düzgün bağlantı kurmak için her iki yüzeye de jel kaplanmıştır ve her numune için Ultrasonik P- dalga hızı değerleri elde edilmiştir.

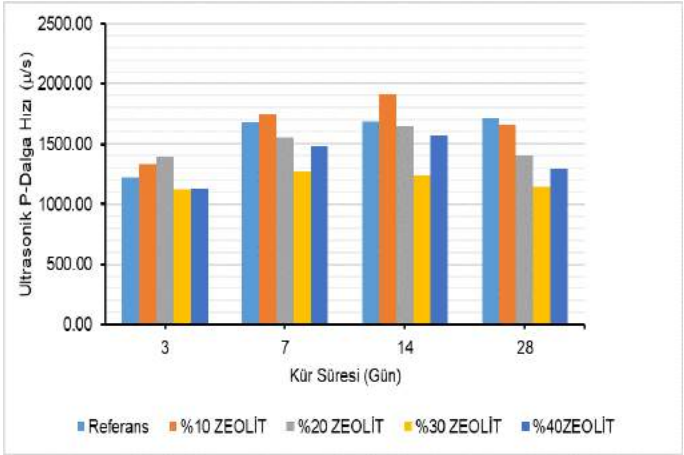
3 BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Ultrasonik Dalga Hızı (Pundit/UPV) Deney Sonuçları

Şekil 4'e göre; UPV değerleri %7 çimento oranında tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarından farklı bir eğilim göstermektedir. UPV değerleri; kür süresine bağlı olarak 400 - 1960 µ/s arasında değişmektedir. 14 gün kür süresiyle birlikte değerlerde bir düşüş görülmektedir. Bunun su doygunluğunun azalmasından kaynaklandığı Suazo vd. (2016) çalışmasında ortaya konmuştur.



Şekil 4. %7 çimentolu ve zeolit ikameli numunelerin Ultrasonik P-Dalga Hızı

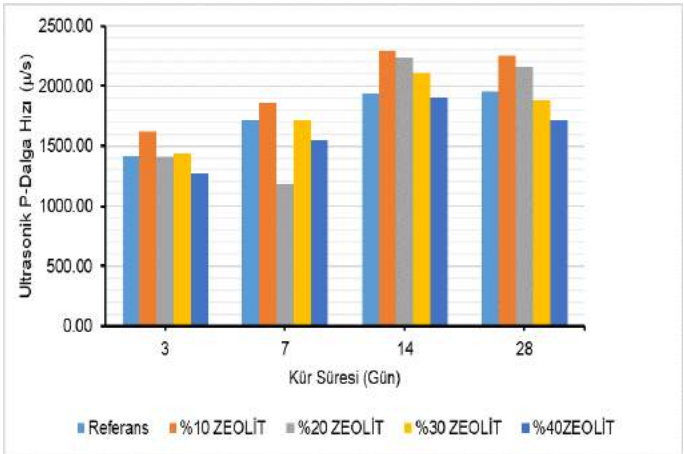


Şekil 5. %9 çimentolu ve zeolit ikameli numunelerin Ultrasonik P-Dalga Hızı

Erçıkdı vd. (2014); %7 çimento oranında iki farklı atık üzerinde yaptığı deneylerde UCS>1 MPa dayanıma sahip numunelerin UPV değeri en fazla 1690 µ/s, 0,5 < UCS < 1,0 MPa arasında olanların ise 1370 - 1690 µ/s olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 4'te ise Pundit değerinin 0,5 < UCS < 1,0 MPa arasında olanların 1060-1530 µ/s, UCS>1 MPa olanların ise 1015-1605 µ/s olduğu görülmektedir. Ayrıca Yılmaz (2013); çalışmasında aynı boyuttaki numuneler (5x10 cm) için 1300-1650 µ/s değerlerini elde etmiştir.

UPV değerleri %9 çimento oranında tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarından farklı bir eğilim göstermektedir. Ultrasonik P- dalga hızı, 1120 - 1910 µ/s arasında değişmektedir. 28 gün kür süresine kadar değerlerde bir yükseliş görülmektedir (Şek. 5). Erçıkdı vd. (2014); %5, 6, 7 çimento oranlarında iki farklı atık üzerinde yaptığı deneylerde UCS>1 MPa dayanıma sahip numunelerin UPV değeri en fazla 1690 µ/s olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 5'te %9 çimento oranına sahip numunenin Pundit değerinin UCS>1 MPa olanların 1220 -1750 µ/s arasında olduğu görülmektedir.

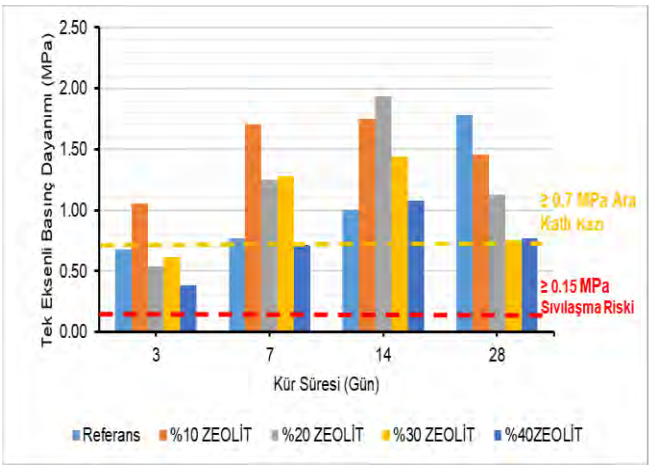
% 7 ve % 9 oranlarında olduğu gibi %11 çimento oranında da UPV değerlerinin tek eksenli basınç dayanım sonuçlarından farklı olduğu görülmektedir. 14 gün kür süresine kadar artış trendi söz konusu iken sonrasında Ultrasonik P- dalga hızı birbirine göre yakın değerler almaktadır. 28 gün kür süresinde 2255 µ/s hızına ulaşmaktadır. Erçıkdı vd. (2014); %5, 6, 7 çimento oranlarında iki farklı atık üzerinde yaptığı deneylerde UCS>1 MPa dayanıma sahip numunelerin UPV değeri en fazla 1690 µ/s olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 6'da ise %11 çimento oranına sahip numunenin Pundit değerinin UCS>1 MPa olanların 1415 - 2295 µ/s arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 6. %11 çimentolu ve zeolit ikameli numunelerin Ultrasonik P-Dalga Hızı

3.2 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

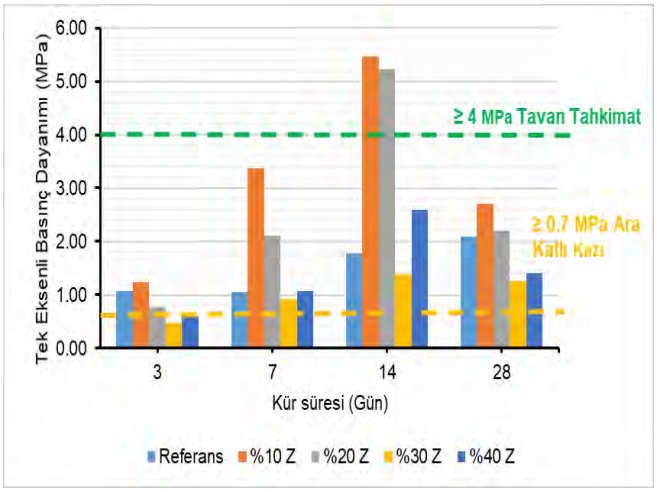
%7 çimento içeren macun dolgu karışımında Doğal zeolitin eklenmesi basınç dayanımını artırmıştır. 14. kür süresinde referansa göre doğal zeolit içeren (%10, %20, %30 ve %40) numuneler sırasıyla ≅1.8, 1.9, 1.4 ve 1.1 kat daha fazla dayanım kazanmıştır. 28 günlük kür süresinde istenilen ≥ 0,7 MPa dayanım sınır değerini sadece %10 karışım oranında geçmiştir. Tavan tahkimatı olarak istenilen ≥ 4 MPa sınır değerini geçen karışım oranı bulunmamaktadır. Ayrıca sıvılaşma riski sınırı olan ≥ 0,15 MPa değerini bütün karışım oranları sağlanmaktadır (Şek. 7).



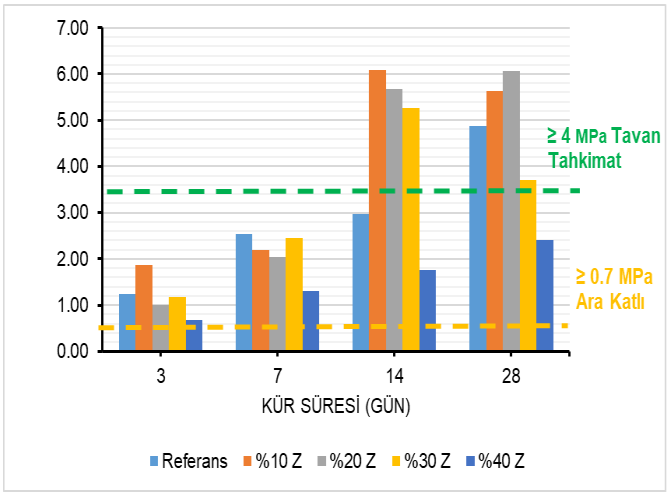
Şekil 7. %7 çimentolu ve zeolit ikameli numunelerin tek eksenli basınç dayanımı

%9 çimento içeren macun dolgu karışımında doğal zeolitin eklenmesi basınç dayanımını artırmıştır. 14. kür süresinde referansa göre doğal zeolit içeren (%10 ve %20) numuneler sırasıyla ≅3,1 ve 2,9 kat daha fazla dayanım kazanmıştır. 28 günlük kür süresinde istenilen ≥ 0,7 MPa dayanım sınır değerini bütün karışım oranlarında (%10, 20, 30 ve 40) geçmiştir. Tavan tahkimatı olarak istenilen ≥ 4 MPa sınır değerini ise sadece %10 ve %20 karışım oranlarında aşmıştır (Şek. 8).

Şekil 9'da görüldüğü üzere %11 çimento içeren macun dolgu karışımında doğal zeolitin eklenmesi basınç dayanımını artırmıştır. Referansa göre doğal zeolitin içeren (% 20) numune 0.8 kat daha fazla dayanım kazanmıştır. 28 günlük kür süresinde istenilen ≥ 1 MPa dayanım sınır değerini bütün karışım oranlarında (% 10, 20, 30 ve 40) geçmiştir. Tavan tahkimatı olarak istenilen ≥ 4 MPa sınır değerini ise sadece %10 ve %20 karışım oranlarında aşmıştır.



Şekil 8. %9 çimentolu ve zeolit ikameli numunelerin tek eksenli basınç dayanımı



Şekil 9. %11 çimentolu ve zeolit ikameli numunelerin tek eksenli basınç dayanımı

4 SONUÇLAR

Bakır madeninden (Küre, Kastamonu) alınan cevher hazırlama tesis atıklarının; Portland çimentosu (PÇ) (ağırlıkça %7, %9 ve %11), su ve PÇ yerine (ikame) Bigadiç'ten alınan doğal zeolittin (ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında) karıştırılmasıyla çimentolu macun dolgu (CPB) numuneleri elde edilmiştir.

Bu çalışmayla; %7-9-11 oranlarındaki macun dolgu karışımlarına PÇ yerine doğal zeolit ikamesiyle referans numunelerine göre dayanımı arttırdığı ortaya konulmuştur.

Ayrıca PÇ yerine Doğal zeolitin ikamesi sonucunda kullanılan PÇ miktarında %20 tasarruf elde edilmiştir ve böylece macun dolgu tesislerinin en büyük mali gideri olan çimento maliyeti düşürülmüştür. Ek olarak, bor işletmesinde atık olarak yer alan doğal zeolit yeniden kullanılarak çevresel açıdan ve işletme açısından madencilik sektörüne faydası sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

ASTM C 597, 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

ASTM C 39, 2018. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.

Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. 2012. Tesis Atıklarının Yönetiminde macun dolgu teknolijisi, Madencilik Turkiye, ss. 70-75.

Erçıkdı, B., Baki, H., İzki, M. 2013. Effect of desliming of sulphide-rich mill tailings onthe long-term strength of cemented paste backfill, J Environ Manage 115:5–13.

Erçıkdı, B., Yılmaz, T., Külekçi, G., 2014. Strength and ultrasonic properties of cemented paste backfill, Ultrasonics 54:195–204.

Kesimal, A., Erçıkdı, B., Yılmaz, E. 2003. The effect of desliming by sedimentation on paste backfill performance, Miner Eng 16(10):1009–1011

Karapınar, N. 2009. Maden atık yönetimi; Macun teknolojisi kullanımı, Madencilik, 48(1), 31-42.

Suazo, G., Fourie, A., Doherty, J.P. 2016. Experimental Investigation of Propagation and Transmission of Compressional Stress Waves in Cemented Paste Backfill, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Eylül 2016, 04016104-1-13.

Yılmaz, T. 2013. Effect of sample size on the strength and ultrasonic pulse velocity of paste backfill, M,Sc, Thesis, Karadeniz Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, 93 p.

Yılmaz, T., Erçıkdı, B., Karaman, K., Külekçi, G. 2014. Assessment of strength properties of cemented paste backfill by ultrasonic pulse velocity test, Ultrasonics 54:1386–1394.

Yılmaz, T., Erçıkdı, B. 2016. Predicting the uniaxial compressive strength of cemented paste backfill from ultrasonic pulse velocity test, Nondestructive Testing and Evaluation, doi:10,1080/10589 759, 2015.

Yılmaz, T., Erçıkdı, B., Cihangir, F. 2017. Yüksek Fırın Cürufu ve Perlit İkamesinin Çimentolu Macun Dolgunun Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(2), ss. 239-251, Haziran 2017.

Yılmaz, E., Guresci, M. 2017. Design and Characterization of Underground Paste Backfill, in: Paste Tailings Management, Yilmaz E, Mamadou, F, Eds, Springer, London/Berlin/Switzerland, Cham, pp. 111-144.

Farklı Bağlayıcı Oranlarındaki Macun Dolgunun Dayanım ile Ultrasonik Dalga Hızı Değerleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması

Investigation of the Relationship between Strength and Ultrasonic Wave Velocity Values of Paste Backfill in Different Binder Ratios

S. Tüylü, A. Başçetin, B. Aghatabay, D. Adıgüzel
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET Son yıllarda cevher hazırlama tesisi artıklarının depolanması sırasında yaşanan çevresel problemlerden dolayı, bu artık malzemelerin yeraltında macun dolgu malzemesi olarak kullanımında büyük bir artış görülmektedir. Macun dolgu sistemi, artıkların yeraltında depolanabilmesinin yanı sıra tavan yüklerine bağlı göçüklere karşı da destek görevini üstlenmekte olduğundan dolayı minimum 4 MPa'lık dayanım şartını sağlamalı ve karışım maliyeti minimum olmalıdır. Bu kapsamda, CEM I PÇ 42,5 çimento %3, %5, %7, %9 ve %11 oranlarında sırasıyla %80 PKO'ya göre karıştırılarak macun dolgu malzemesi hazırlandı ve silindir kalıplara döküldü. Numuneler 3, 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda tek eksenli basma dayanımı testine tabi tutuldu. Ayrıca bu çalışmada numunelere kırılmadan önce pundit deneyi yapılarak ultrasonik dalga hızı parametresi ile tek eksenli basma dayanımı arasındaki ilişki değerlendirildi. Sonuç olarak karışım oranları içerisinde maliyet düşünüldüğünde %5 çimentolu dolgu karışımı optimum karışım oranıdır. Tavanı tutma özelliği istenen yeraltı işletmelerde ise (> 4MPa dayanım) %11 oranında çimentolu karışım uygun olmaktadır.

ABSTRACT In recent years, the paste fill system since residues can be stored underground as well as must supporting to roof loads. This is expect to provide a minimum 4 MPa durability requirement and minimize the cost of the mix. In this study, paste backfill material used was prepared by consists of mixture of cement (3-9% by weight) CEM I PC, 42.5 cement with 80% solid ratio and pour cylinder molds. The paste material samples prepared were subjected to the uniaxial compression strength test at the end of the 3,7,14, and 28 days of curing times. In addition to it in this study, the relationship between uniaxial compression strength and ultrasonic P-wave was evaluated as well. As a result, when the cost is considered within the mixing ratios, the optimum mix ratio is 5% cement paste mixture. In the underground mining for underground supporting system (> 4 MPa strength), 11% ratio cement paste mixture is suitable.

1 GİRİŞ

Günümüzde gittikçe artan çevresel ve düzenleyici kısıtlamalar, artıkların emniyetli ve güvenli bir şekilde yönetilmesini gerektirmektedir. Madencilik faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan atık ve artıklar çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan kısa, orta ve uzun vadede zararlı sonuçlar doğurabilmektedir (Kitula 2006, Başçetin vd. 2017). Özellikle sülfür içeren artıklar madencilik endüstrisinde en ciddi çevresel problemlerden biri olarak kabul edilir (Öhlander vd., 2012). Artıkların bertaraf edilmesi, jeoteknik ve jeokimyasal stabilizasyon güvenliği açısından önemlidir. Özellikle, depolanan malzemelerin Asit Maden Dreanajı (AMD), ağır metal mobilizasyonu gibi jeokimyasal etkilerinin

yanı sıra durabilitesini etkileyen dayanım parametreleri açısından jeoteknik özelliklerinin ortaya konulması gerekmektedir (Başçetin vd., 2016b). Macun dolgu yönteminin avantajlarından bazıları çevresel açıdan tehlikeli artıkların yeraltı açıklıklarında depolanması, yeryüzünde depolanan artık miktarının en aza indirilmesi, üretim artışının daha etkin sağlanması, sülfürlü minerallerin oksidasyonunu ve ağır metal mobilizasyonun kontrol edilmesidir (Yılmaz vd. 2014, Aldhafeeri vd. 2016). Ayrıca yeraltı boşlukları için verimli bir tahkimat ile cevher kütlelerinin sürekli ve tamamen kazanılabilmesini sağlamaktadır.

Çimentolu Macun Dolgu (ÇMD); cevher zenginleştirme işlemleri sonrası ortaya çıkan proses artıklarının çimento bağlayıcısı ve su ile karışımdan oluşan pompalanabilirlik açısından uygun kıvama (6–10 inç slamp) sahip bir malzemedir (Cihangir vd. 2015, Wu vd. 2015, Ouattara vd. 2017). Pülpte katı oranı (PKO) genellikle %70 – 85 arasındadır (Yilmaz vd. 2011, Wu vd. 2015, Li ve Fall 2016, Jiang vd. 2017). Literatür incelemelerine göre macun dolguda kullanılan bağlayıcı (çimento, puzzolan malzemeler vb.) oranları ve türlerinde farklılıklar görünmektedir. Örnek olarak Wang vd. (2017) çalışmasına göre %1-7; Benzaazoua vd. (2002), Kesimal vd. (2002), Li ve Fall (2016), Ouattara vd. (2017) çalışmalarına göre %3-7; Kesimal vd. (2012) bir başka çalışmasına göre %3-8; Wu vd. (2015), Koohestani vd. (2017) çalışmalarına göre kullanılacak bağlayıcı oranı %2-10 arasında uygulanmaktadır. Dolgu bileşenlerinden her biri, macun dolgunun kısa, orta ve uzun dönemdeki durabilitesini, nakliyesini ve boşluklara yerleştirilmesi gibi işlenebilirlik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir.

ÇMD'deki çimento genel oranının katı madde kütlesinin ağırlıkça %1 ila %10 arasında değiştiği literatürden anlaşılmakta olup madencilik faaliyetinin yaklaşık %10 ila %20'si arasında işletme maliyetini oluşturduğu ifade edilebilmektedir (Benzaazoua ve Belem, 2004). Bu çalışmada Kastamonu Küre bakır madeni macun dolgu tesisi için optimum macun dolgu dizaynının belirlenmesine yönelik fiziksel ve mekanik denyleri yapıldı. Elde edilen sonuçlar ile artığın fiziksel ve mekanik özelliklerini ilişkilendirilerek en uygun bağlayıcı dozajı belirlenmiştir. Macun dolgusunun dayanımını, çevresel açıdan riskini ve pompalanabilirlik kalitesini etkileyen ana bileşenleri bunlardır; Artık malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (özgül ağırlık, tane boyut dağılımı, tane şekli, permeabilite, konsolidasyon, mineraloji ve elemental içerik), Bağlayıcı malzeme türleri ve oranı (çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb.) ve karışım suyunun kimyasal özellikleri (sülfat konsantrasyonu, pH, Eh ve elektriksel iletkenlik) (Jung ve Biswas 2002, Benzaazoua vd. 2004, Belem ve Benzaazoua 2007, Ercikdi vd. 2009, Yılmaz vd. 2009). Her bileşen, dolgu dolumunda, akışında, yerleştirildiğinde ve uzun süreli sertleştirmede önemli bir rol oynamaktadır.

1.1 Dayanım ve Durabilite

Belirli bir dayanım kazanma süresi için macun dolgu dayanımı bağlayıcı içeriğiyle doğru orantılıdır (Belem ve Benzaazoua 2007, Erçıkdı 2013 ve 2014) çalışmasına göre dolgunun kendi stabilitesini sağlaması için 28 günlük dayanımının en az 1,0 MPa olmasını belirtmiştir. Macun dolgunun tavan tahkimatı sağlaması amacıyla yeraltı üretim boşluklarına yerleştirilmesi durumunda ise dolgunun minimum 4 MPa'lık bir dayanıma sahip olması gerekmektedir (Belem ve Benzaazoua 2007, Erçıkdı 2009, Kesimal vd. 2012). Macun dolgunun yeraltındaki konumuna ve işlevine bağlı olarak literatürde belirtilen dayanım değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

1.2 Bağlayıcı

Bağlayıcılar, su ile kimyasal reaksiyona girerek agrega tanelerini birbirine bağlayan malzemelerdir (Hefni, 2014). Bağlayıcı maddeler, ÇMD içerisinde kohezyon mukavemeti arttırarak kendi kendini tutabilmesine ve dayanım kazanmasına yardımcı olur. (Belem ve Benzaazoua, 2007). Bağlayıcı olarak en yaygın olanı Portland çimentosudur (CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V). ÇMD'de en kısa zamanda

Çizelge 1. Macun dolguda istenen tek eksenli basma dayanım değerleri

Kaynaklar	TEBD	Kür süresi	Açıklama
US EPA US Environmental Protection Agency, 1989	≥345 kPa	-	Backfill
Brackebusch, 1994	0,7–2 MPa	-	Backfill
Benzaazoua vd., 1999	≥0.7 MPa	28	Backfill
Bloss, 2002	150–300 KPa		kısa süredeki sıvılaştırmayı ortadan kaldırmak için
Belem ve Benzaazoua, 2007	1 MPa	-	kendi kendini ayakta tutabilen backfill
	≥5 MPa	-	Tavanı Tutmada Backfill
Ercikdi vd., 2010	≥0,7 MPa	28	Backfill
Kesimal vd., 2012	≥ 1 MPa	28	kendi kendini ayakta tutabilen backfill
	≥ 4 MPa	28	Tavanı Tutmada Backfill
Ercikdi vd., 2014	≥ 1 MPa	28	kendi kendini ayakta tutabilen backfill
Cihangir vd., 2015	≥ 1 MPa	28 ve 365	backfill
Li ve Fall, 2016	≥ 1 MPa	28	kendi kendini ayakta tutabilen backfill
Bascetin vd., 2016a	2-5 MPa	28	backfill
Chen vd., 2017	≥ 3 MPa	7	backfill

maksimum dayanım elde edilmesi gerekmektedir bu yüzden Bağlayıcının seçiminde iki parametre önemlidir. Bunlardan ilki çimentonun maksimum dayanımı diğeri prizlenme süresidir (Hefni, 2014). Bağlayıcı, ÇMD'nin istenen dayanım ve stabilitesini elde etmek için kullanılır. Bu çalışmada, CEM I 42,5 R çimento %3, %5, %7, %9 ve %11 oranlarında kullanılmıştır. Katkısız olması, yüksek dayanım ve erken priz süresi nedenleri için CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır.

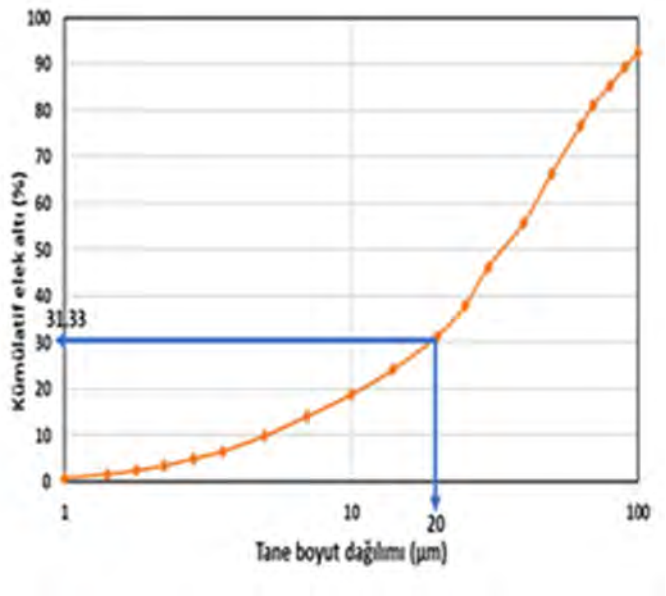
2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Artık Malzemenin Karakterizasyonu

Karışım oranları ve jeoteknik parametrelerinin hesaplanması için artıkların özgül ağırlığı (Gs) önemlidir (Yılmaz, 2010). Artık malzemenin özgül ağırlığı ile dolgu dayanımı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Artığın özgül ağırlığının artırılmasının, aynı bağlayıcı oranı için daha yüksek bir mukavemet kazandıracaktır (Fall vd., 2005). Artık malzemenin özgül ağırlığı (Gs) 250 ve 500 ml'lik piknometreler kullanılarak ASTM D854-02 standardına göre elde edilmiştir. Artık malzemenin yapılan iki ayrı piknometre deneyinde özgül ağırlıkları 3,48 ve 3,51 olarak bulunmuş olup malzemenin ortalama özgül ağırlığı 3,495 g/cm3 olarak hesaplanmıştır.

Artıkların tane boyut dağılımı, macun malzeme tanelerin ayrışması, kimyasal reaktiviteyi ve genel hidromekanik özellikleri etkileyebileceğinden önemli bir özelliktir. Mineralojilerine bağlı olarak, bu ince artıklar (<20 µm) yüksek su tutma özelliğine sahiptir, bu da iyi akış özelliklerine sahip olmasına neden olur. Fakat nispeten daha düşük mukavemetli bir ÇMD yaratmaktadır. Landriault (2001)'e göre ÇMD karışımlarının tasarımlarında iri (malzemenin ağırlıkça %15-35<20 µm), orta (malzemenin ağırlıkça %35-60<20 µm) ve ince (malzemenin ağırlıkça %60-90<20 µm) artıklar olmak üzere üç adet tane boyut dağılım kategorisi bulunmaktadır. Deneysel olarak bir macun dolgu karışımında yeterli suyu bünyelerinde tutabilmeleri için artıkların 20 µm'den daha ince tanelerin ağırlıkça en az %15 olması

gerekmektedir (Fall vd., 2005). Artıkların ince tane oranı ÇMD slampını etkilemekte ve tane boyut dağılımındaki ince parçacık oranı arttıkça slampın düşmesine neden olur. ÇMD 'deki slamp azalmasının en temel nedeni ince artık tanelerinin yüzey alanındaki artışla beraber tanelerdeki su ihtiyacının artmasıdır (Fall vd. 2008. Tane boyut dağılımları Malvern Mastersizer cihazı ile belirlenmiştir. Artığın 20 mikron altı malzeme miktarı ağırlıkça %31,33 olup, macun oluşturmak için gerekli limit değerden (ağırlıkça %15) yüksektir (Şekil 1). Artık malzemesi iri boyutlu (malzemenin ağırlıkça %15-35<20 µm) macun dolgu malzemesi sınıfında yer almaktadır. Çizelge 2'de Cu ve Cc değerleri hesaplanarak verilmiştir.



Şekil 1. Artık malzemenin tane boyut dağılımı

Çizelge 2. Artık malzemenin tane boyut dağılım özellikleri

D_{10}	**5.038**
D_{30}	18.929
D_{50}	34.95
D_{60}	43.892
D_{90}	91.839
C_u	8.71
C_c	41.13

Her bileşenin doğal özellikleri, ÇMD'nin kısa ve uzun vadeli mekanik performansında önemli rol oynamaktadır (Cihangir vd., 2012). Bazı mineraller, sülfat artışına bağlı olarak uzun süreli mukavemet kaybına neden olabilir (Yılmaz, 2010). Bu tip artıklardan yapılmış ÇMD, yeraltı ÇMD için kullanılmadan önce kısa ve uzun süreli dayanıklılık açısından laboratuar testlerine tabi tutulmalıdır. Kimyasal analizlere göre (Çiz. 3) artık malzemelerin S-2 (Sülfid Kükürdü) miktarı 42,22'dir ve oldukça yüksek olduğu görülebilmektedir. Mineralojik olarak kalsit, kuvars, albit, pirit, ankerit, klorit ve kalkopirit gibi minerallerden oluşmaktadır. Bilindiği üzere pirit minerali su ve oksijen varlığında oksidasyona uğrayarak asit ve sülfat oluşturmaktadır.

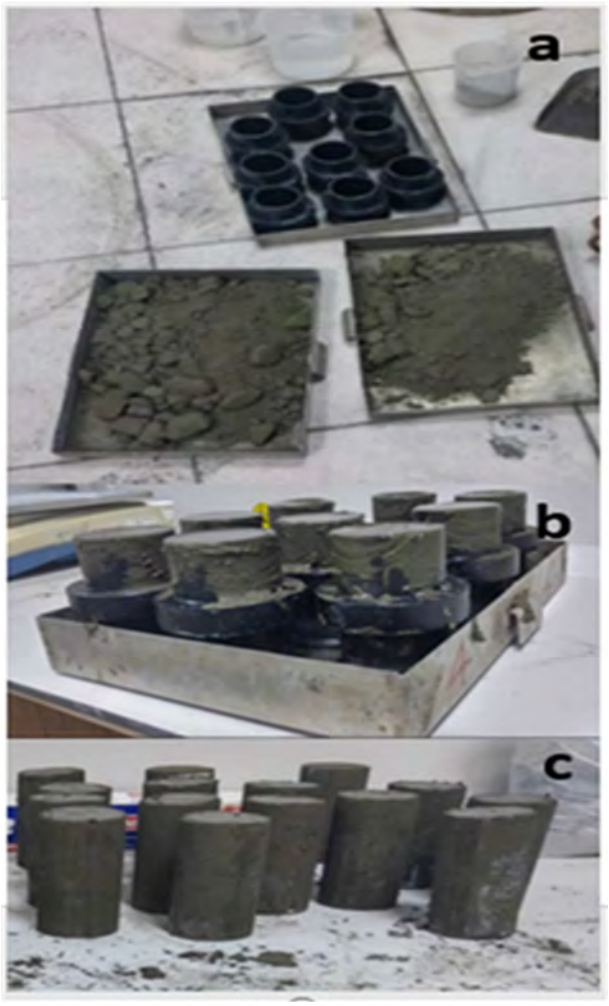
Çizelge 3. Artık malzemesinin kimyasal özellikleri

Kimyasal bileşim	Miktarı
SiO_2	7,02
Al_2O_3	1,75
Fe_2O_3	57,03
CaO	1,24
MgO	0,63
TiO_2	0,13
Cr_2O_3	0,005
Na_2O	0,14
K_2O	0,12
MnO	0,03
P_2O_5	<0,01
S^{-2} (Sülfid Kükürdü)	41,22
Toplam Kükürt	45,18

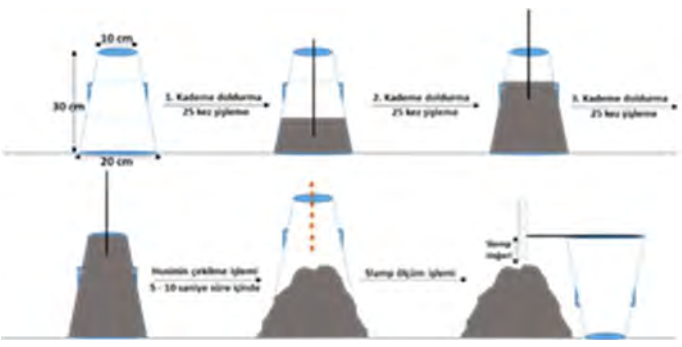
2.2 Macun Dolgu Malzemelerinin Hazırlanması

Artık, bağlayıcı malzeme ve karışım suyu kullanılarak %3-11 çimento oranı ve 6-10 inch (15-25 cm) slump aralığında macun dolgu numuneleri hazırlanmış ve daha sonra %80 nemli ve 25ºC sıcaklık ortamında 3, 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde beklemeye tabi tutulmuştur. Bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42,5 R çimento kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme miktarı %80 PKO'ya göre hesaplanarak ilave edilmiştir. Macun dolgu karışımının istenen akışkanlığa gelmesi için çeşme suyu kullanılmıştır. Karışımın (artık malzeme, bağlayıcı ve su) homojen bir şekilde hazırlanması için beton mikseri kullanılmıştır. Karıştırma işlemi 7 dakika (Ghirian ve Fall, 2015) süreyle yapılmıştır. Hazırlanan macun dolgu karışımı 5 cm

çapında ve 10 cm yüksekliğindeki silindir numune kalıplarına dökülmüştür (Şekil 2). Her bir bağlayıcı oranı (%3, %5, %7, %9 ve %11) ve kür süresi (3, 7, 14 ve 28 günlük) için %80 PKO'da 5 adet numune hazırlanmıştır. Çimento oranı ve su/çimento oranının macun dolgu performansına etkisini belirlemek amacıyla toplam 100 adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 2. Macun dolgu numunelerinin hazırlanması: a) numune ve kullanılan malzemeler, b) test kalıpları, c) macun dolgu numuneleri



Şekil 3. Slamp ölçümünün gösterimi

2.3 Kıvam Özellikleri

Reolojik testlerine göre daha kolay olan standart slamp (Şekil 3). macun dolgu kıvamını belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Slamp malzemenin pompalanabilirliği hakkında bilgi vermektedir. Yeraltında pompalamayı kolaylaştırmak için en uygun macun dolgu slamp değerleri 150 mm (6 inç) ile 250 mm (10 inç) arasındadır (Belem ve Benzaazoua 2007, Yılmaz 2010, Ercikdi vd. 2017, Ouattara vd. 2017). ÇMD teknolojisinde ideal ve en sık kullanılan slamp değeri 18 cm'dir (Tariq ve Nehdi 2007, Fall ve Pokharel 2010, Ghirian ve Fall 2016). Genellikle macun dolgu karışımında su miktarı arttıkça karışımın slamp değeri artmaktadır. Ancak fazla su ihtiva eden karışımın kür süresi uzamakta ve dolgu dayanım ve durabilitesi azalmaktadır (Erçıkdı, 2009). Bu çalışmada slamp deneyi TS EN 12350-2 standardına göre yapılmıştır.

2.4 Karışım Suyu ve Sızıntı Suyu Analizleri

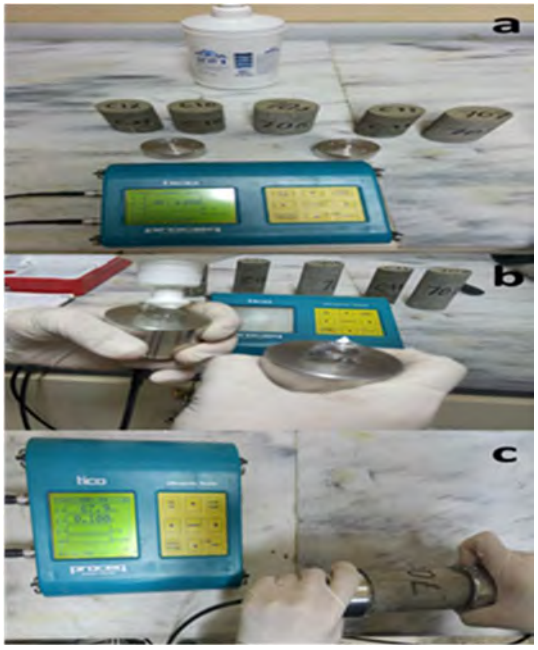
Karışım suyu olarak proses suyu veya temiz su kullanılır (Fall vd. 2009, Hefni 2014. Suyun kalitesi çimentolu dolguda dayanımı etkileyebilir. Örneğin, yüksek tuz konsantrasyonları, çimento parçacıklarını kaplayan ve dolgu karışımında dağılmalarını engelleyen tuz kristalleşmesini yardım eder. Karışım suyu, su/çimento oranı ve çimento hidratasyon mekanizmaları bakımından ÇMD'nin mekanik mukavemetini de etkilemektedir (Yılmaz, 2010). Dolgu karışımında proses suyunu kullanmak çevresel yönden daha güvenilir ve uygun olmaktadır. Ancak karışım suyunun kimyasal bileşimi (pH, Ca+2, özellikle SO4-2 içeriği) dolgu performansı açısından önemlidir (Erçıkdı, 2009).

Sızıntı suyu pH'ın 9'un altına düşmesi hidratasyon ürünlerinin bağlayıcılık özelliklerini yitirmesine ve dolgunun duraylılığını kaybetmesine yol açmaktadır (Baki, 2013). Ouellet vd. (2006) çalışmasına göre sızıntı suyun pH değerleri 13,05 ile 9,87 arasında değişmekte ve zamanla azalma eğilimi göstermektedir. Kür koşulları altında,

ÇMD karışımında bulunan piritin oksidasyonu, hidratasyon ürünleri ile etkileşerek ÇMD'nin stabilitesini etkileyen asit (pH) ve sülfat SO_2'nin oluşumuna neden olmaktadır. (Cihangir vd., 2012). Macun dolgu malzemesi olarak kullanılan piritin su ve oksijen varlığında oksidasyonu sonucu açığa çıkan asit, hidratasyon ürünlerinin (C-S-H, portlandit) bağlayıcılık özelliklerini kaybetmelerine (pH≤9) yol açarak dolgu dayanım ve durabilitesini azaltmaktadır (Belem ve Benzaazoua 2007, Tariq ve Nehdi 2007, Erçıkdı 2009). pH ölçümleri için İstanbul Üniversitesi maden işletme anabilim dalı laboratuvarındaki pH metre kullanılmıştır.

2.5 Ultrasonik Dalga Hızı (Pundit Deneyi)

Pundit cihazı adını Portable Ultrasonig Non-destructive Indicatel Tester (Taşınabilir Ultrasonik Hasarsız Dijital Göstergeli Test) kelimelerinin ilk harflerinden alır. Ultrasonik Dalga Hızı (UDH) testi, beton veya kaya malzemelerinin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan en popüler tahribatsız tekniklerden biridir (Yilmaz vd., 2014). Ultrasonik dalga hızı (UDH) testi hem arazi hem de laboratuar koşullarında uygulanabilen tahribatsız ve kolay bir yöntemdir. Düşük maliyetli, daha az zaman alıcı ve pratik bir yöntem olan UDH testinin, kaya ve beton TEBD'ini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Trtnik vd., 2009). Bu çalışmada, ultrasonik dalga hızı ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için ampirik (deneysel) eşitliklerin korelasyon katsayıları (r) Microsoft Excel yardımıyla hesaplanmıştır. ÇMD numuneleri 3, 7, 14 ve 28 günlük kür periyotlarında ASTM C 597 (2009) standartlarına uygun olarak Uzunluk Ölçümü 0,1 mm'lik ve zaman 0,1 µs hassaslıkta sinyal süresine ve 54 kHz sinyal frekansına sahip Pundit-Plus model test cihazı ile yapılmıştır (Şekil 4). Tam teması sağlamak ve transdüserler ile numune ortamı arasındaki hava boşluğu ortadan kaldırmak için transdüserler yüzeyine (verici ve alıcı) jel ince bir kat şeklinde uygulanmıştır.



Şekil 4. (a) Pundit (hız) ölçüm cihazı, (b) Transdüserler yüzeyine (verici ve alıcı) ultrason jelinin uygulanması, (c) numune ölçümü

Macun dolgu silindirin bir yüzeyinden içeriye gönderilen ses üstü dalganın, silindirdeki diğer bir yüzeye ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra, dalga hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\mathrm{UDH}(x,t) = \frac{x}{t} \qquad (1)$$

UDH (x, t): ÇMD 'de P dalga hızı,

x: verici ve alıcı arasındaki mesafe (numune uzunluğu),
t: P dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zamandır.

2.6 Tek Eksenli Basma Dayanımı

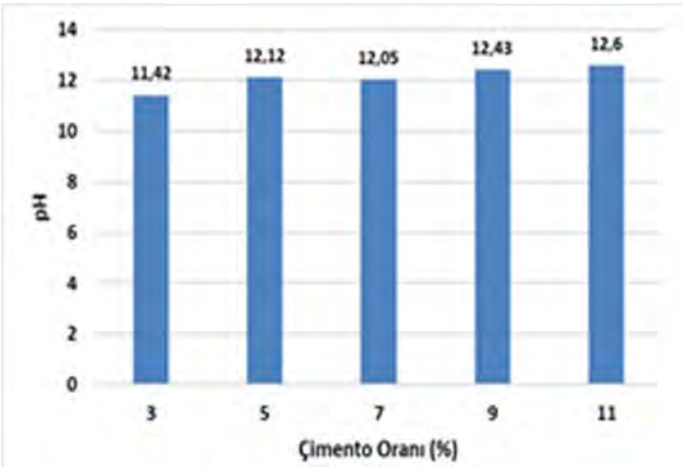
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (TEBD) deneyi ultrasonik testte olduğu gibi 100×50 mm boyutlarındaki silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi ASTM C 39 standardına göre yapılmıştır. Belirlenen kür sürelerine ulaşan numuneler 20 ton yükleme kapasitesine sahip 0,1 mm/dk sabit yükleme hızında (Şekil 5) otomatik kontrollü preste kırılarak dayanım değerleri her bir çimento oranı için 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresinde bulunmuştur.

Şekil 5. Tek eksenli basma dayanımı cihazı

3 BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Sızıntı Suyun pH Analizi

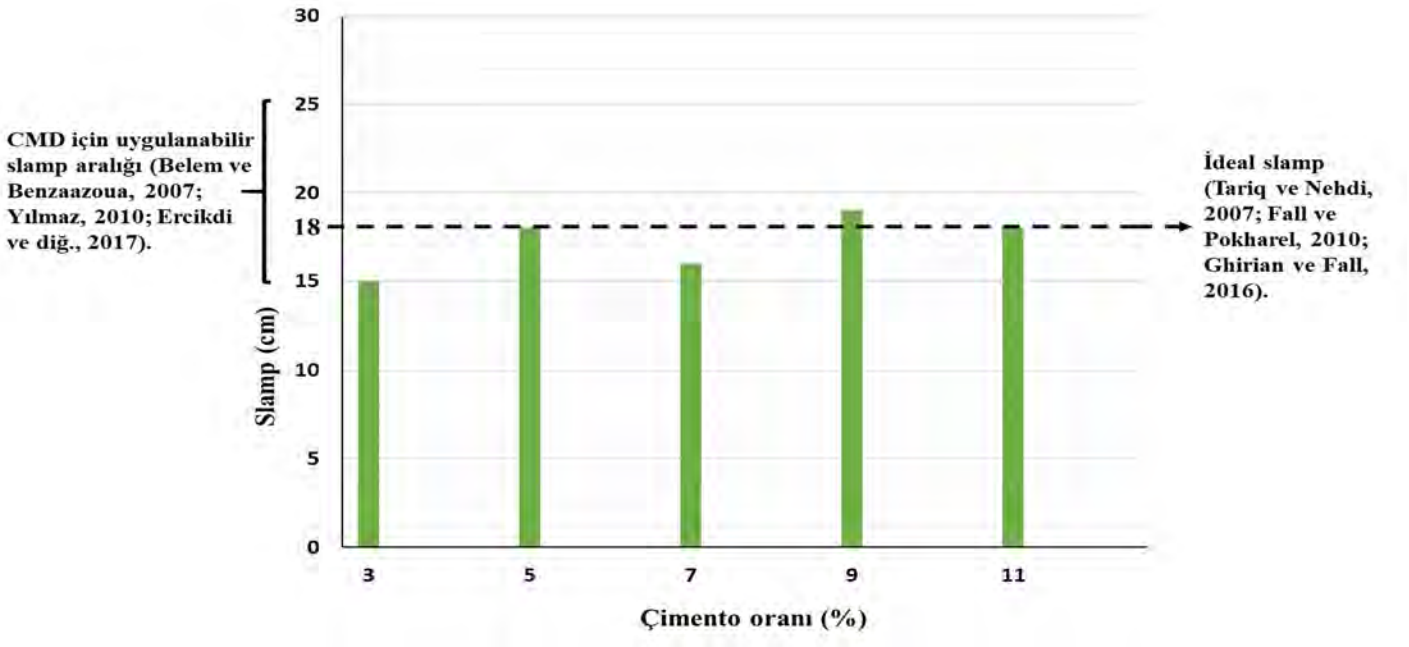
Macun dolgu karışımında kullanılan suyun ph'ı 7,5dir. Şekil 6'da görüldüğü üzere %3 çimento oranında hazırlanan ÇMD'nin pH'ı 11,42, %7 çimento oranında hazırlanan ÇMD'nin pH'ı 12,27, %11 çimento oranında hazırlanan ÇMD'nin pH'ı 12,6 olarak ölçülmüştür. Buradan çimento oranın arttıkça pH'ın yükseldiği söylenebilmektedir. Küre bakır macun karışımının %3-11 çimento oranlarındaki sızıntı suyu pH değerleri 11,42 ile 12,6 arasındadır.



Şekil 6. Farklı çimento oranlarında sızıntı suyun pH değerleri

3.2 Kıvam (Slamp) Deneyi

Bu kapsamda Sabit PKO değerinde (%80) çimentolu macun dolgu karışımları hazırlanmıştır. Şekil 7'de görüldüğü gibi farklı çimento oranlarında slamp değerlerinin 15 – 25 cm arasında olduğu tespit edilmiştir. Tariq ve Nehdi (2007. Fall ve Pokharel (2010) ve Ghirian ve Fall (2016) söylediklerine göre ÇMD teknolojisinde ideal ve en sık kullanılan slamp değeri 18 cm'dir. Küre bakır macun karışımında %5 ve %11 çimento oranlarında slamp değeri 18 cm bulunmuştur.

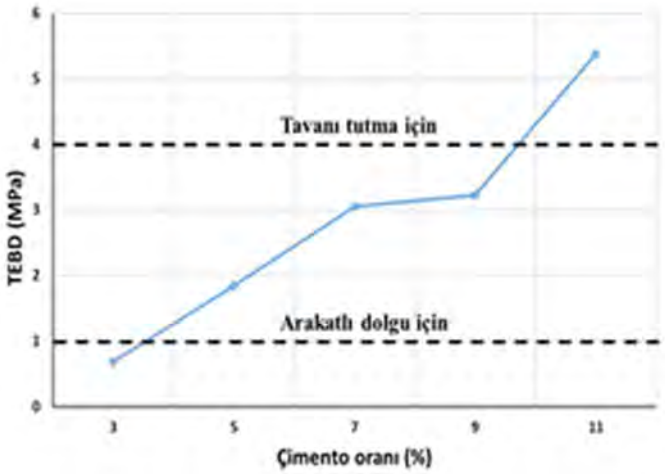


Şekil 7. Farklı çimento oranında slamp değerleri

3.3 Tek Eksenli Basma Dayanımlarının değerlendirilmesi

28 günlük kür süresi sonundaki dayanımları Şekil 8'de görülmektedir. Buna göre kür süresi sonunda en düşük dayanım %3 çimentolu macun dolgu karışımında ölçülürken (0,685 MPa) en yüksek dayanım ise %11 çimentolu macun dolgu karışımında ölçülmüştür (5,378 MPa).

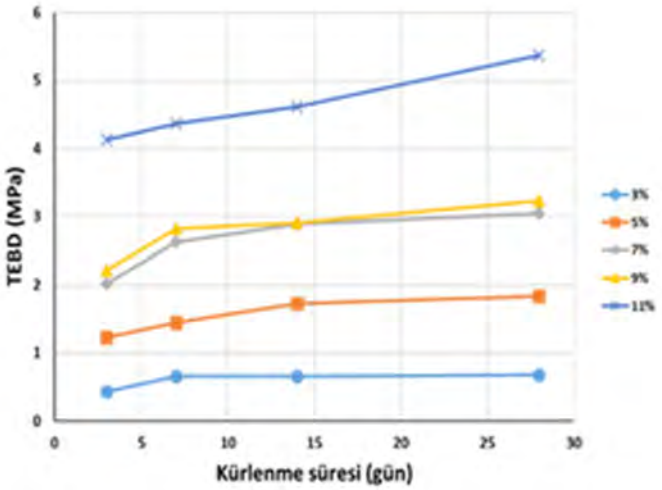
28 günlük kür süresi sonunda yeraltı macun dolgu uygulamalarında yalnızca arakatlı kazı ve dolgu yapılacak işletmeler için %5, %7, %9 ve %11 çimentolu karışımlar uygun olabilirken (en az 1 MPa dayanım), tavanı tutma özelliği istenen yeraltı işletmeleri için ise yalnızca %11 çimentolu karışımlar istenen dayanımı (> 4 MPa) sağlamaktadır. %3 çimentolu karışım ise istenilen değerlerin altında kalmıştır.



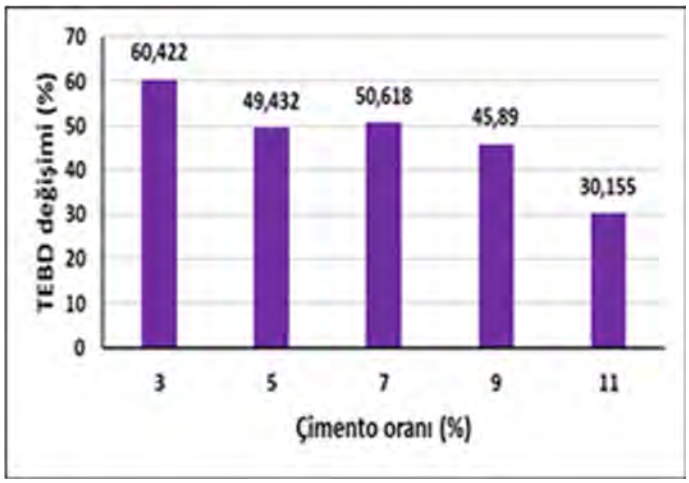
Şekil 8. 28 günlük kür süresi sonunda basma dayanımları

Farklı bağlayıcı oranlarında tek eksenli basma dayanımları ölçülen numunelerin 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonundaki dayanımları Şekil 9'da görülmektedir. Bütün karışımlarda 3-28 günlük TEBD incelendiğinde lineer bir artış vardır. %3 çimento karışımının 28 günlük TEBD dayanım bakıldığında 0,685 MPa görülürken, %2 çimento eklendiğinde %169 artış belirlenmiştir. %7 ve %9 çimentolu karışımları bakıldığında çimento oranı artmasına rağmen TEBD değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Karışımlara %2 çimento eklendiğinde TEBD'daki en fazla değişim (MPa) %9 ile %11'lik karışımlarda gözlenmekte olup 2,148 MPa artmıştır.

Şekil 10 incelendiğinde farklı çimento oranlarındaki macun dolgu karışımlarının 3 günlük ve 28 günlük TEBD değişimlerine bakıldığında en fazla artış %3 çimentolu karşımda %60,422 olarak tespit edilmiştir. Buna rağmen %11 çimento karışıma bakıldığında bu artışın %30,155 olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Kür sürelerine göre elde edilen tek eksenli basma dayanımları

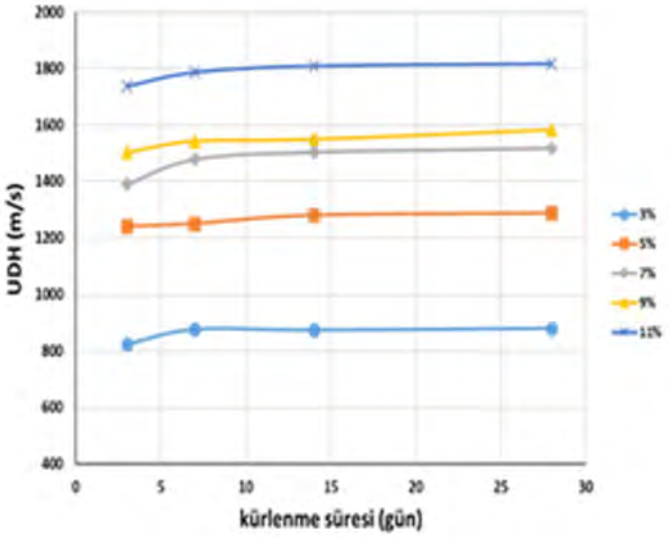


Şekil 10. Farklı çimento oranların 3 ile 28 günlük kür sürelerindeki TEBD % değişimleri

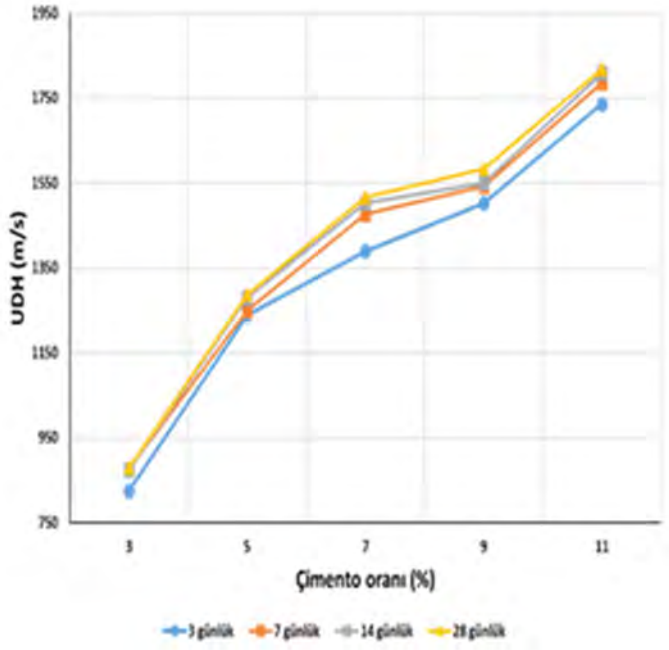
3.4 Dolgu Numune Pundit Değerlerin değerlendirmesi

Şekil 11'de farklı bağlayıcı oranlarının (%3-%5-%7-%9 ve %11 çimentolu macun dolgu numuneleri) belirlenen kür sürelerinde (3-7-14 ve 28 gün) ölçülen Pundit değerleri

sonuçları görülmektedir. Pundit değer ölçümlerinin 7. gün kür süresinden sonra ortalamalar değerde kaldığı gözlemlenmiştir. %3 çimento karışımının 28 günlük Pundit değerine bakıldığında 880 m/s görülürken, %8 çimento eklendiğinde 1818 m/s olduğu ve %344 artış olduğu belirlenmiştir. %7 ve %9 çimentolu karışımları bakıldığında çimento oranı artmasına rağmen Pundit değerlerinin birbirine yakın olduğu, sadece %4,5'luk bir artış olduğu görülmüştür.



Şekil 11. Farklı kür sürelerinde pundit değerleri



Şekil 12. Farklı bağlayıcı oranlarında pundit değerleri

Şekil 12'de görüldüğü üzere çimento oranı arttıkça pundit değeri arttığı belirlenmiştir. Bunun da çimento oranı arttıkça dolgunun daha kompozit hale geldiğini, numune içerisindeki süreksizliklerin azaldığını ve numunelerin daha kararlı bir yapı sergilediklerini ortaya koymaktadır.

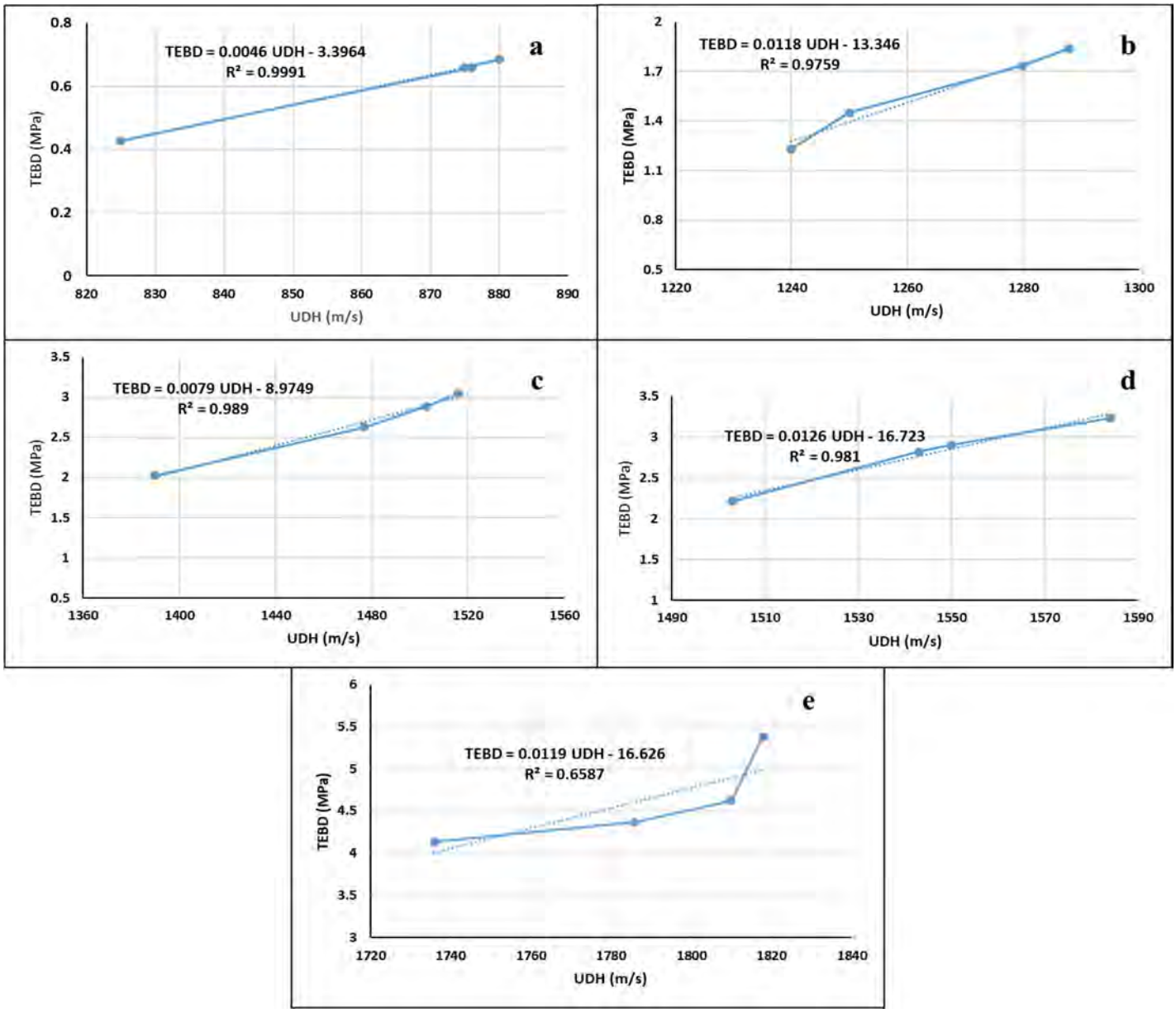
3.5 Pundit - Tek Eksenli Basma Dayanımı İlişkisi

UDH-TEBD ilişkisinin incelendiği grafiklerin (Şekil 13) korelasyon katsayıları (R^2) ve eşitlikler Çizelge 4'te özetlenmiştir. En uygun ilişki, doğrusal (lineer) ilişki metoduyla sağlanmıştır. %3 çimento oranı (R2= 0.999; Şekil 13.a), %5 çimento oranı (R2= 0.976; Şekil 13.b) %7 çimento oranı (R2= 0.989; Şekil 13.c) %9 çimento oranı (R2=0.981; Şekil 13.d) ve %11 çimento oranı (R2=0.659; Şekil 13.e) etkisinin incelendiği UDH-TEBD ilişki grafiklerinden korelasyon katsayılarının oldukça yüksek çıktığı belirlenmiştir. %11 çimentolu karşım dışındaki bütün karışımlarda TEBD ile UDH arasında en düşük R^2 = 0,976 korelasyon katsayısına sahip güçlü bir ilişki ortaya koyulmuştur. Ayrıca tek eksenli basma dayanımı ile Pundit arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu söylenebilir.

Çizelge 4. UDH-TEBD ilişkisine ait eşitlikler ve korelasyon katsayıları

Çimento oranı	Basınç dayanım eşitliği (y = ax ± b)	Korelasyon katsayıları (R^2)
%3	TEBD = 0,0046 UDH - 3,3964	0,999
%5	TEBD = 0,0118 UDH - 13,346	0,976
%7	TEBD = 0,0079 UDH - 8,9749	0,989
%9	TEBD = 0,0126 UDH - 16,723	0,981
%11	TEBD = 0,0119 UDH - 16,626	0,659

Çizelge 4'te görüldüğü üzere %11 çimento içerikli macun dolgu malzemesinin TEBD ile Pundit ilişkisi zayıf çıkmıştır



Şekil 13. Farklı çimento oranında TEBD ve UDH ilişkisi; a) %3 çimento oranı, b) %5 çimento oranı, c) %7 çimento oranı, d) %9 çimento oranı, e) %11 çimento oranı

4 SONUÇLAR

Macun dolguda kullanılacak artıkların 20 µm ve altı ince tane oranının en az %15 olmalıdır. Buna göre Küre bakır artıklarında %31,33 olduğu belirlenmiş ve macun dolgu karışımında kullanılabilir olduğu görülmüştür. Sızıntı suyu pH değerleri 11,42 ile 12,6 olduğu ölçülmüş olup pH değerlerinin uygun olduğu anlaşılmaktadır. Çimentolu macun dolgu karışımlarının yeraltı uygulamaları için dayanım sonuçlarına göre 28 günlük kür süresi sonunda yalnızca arakatlı kazı ve dolgu işlemleri yapılacak olan işletmelerde (>1MPa dayanım) %5, %7, %9 ve %11 oranında çimentolu karışımlar uygundur. Bu karışım oranları içerisinde maliyet düşünüldüğünde %5 çimentolu dolgu karışımı optimum karışım oranıdır. Tavanı tutma özelliği istenen yeraltı işletmelerde ise (> 4MPa dayanım) %11 oranında çimentolu karışım uygun olmaktadır. %11 çimentolu karışım uygulandığında %5 çimentolu karışımına göre TEBD'da %192 bir iyileşme sağlanmaktadır. Yapılan deneylerde %3, %5, %7 ve %9 çimentolu karışımlarında TEBD-UDH arasında yüksek korelasyonlu (En düşük R^2 = 0,976) bir ilişki ortaya konulmuştur. Böylece diğer karışımlarının TEBD yapılmadan sonuçları yüksek güvenlikte tahmin edilebilmektedir.

KAYNAKLAR

Aldhafeeri, Z., Fall, M., Pokharel, M., Pouramini, Z. 2016. Temperature Dependence of the Reactivity of Cemented Paste Backfill. Applied Geochemistry 72: 10-19.

ASTM C 597. 2009. Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete. ASTM International.

ASTM C39/C39M-15a. 2015. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International.

ASTM D 854-02. 2002. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International.

Baki, H. 2013. Atık Tane Boyutunun Sülfürlü Atıklardan Hazırlanan Macun Dolgu Performansına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Başçetin, A., Tüylü, S. 2017. Application of Pb-Zn Tailings for Surface Paste Disposal: Geotechnical and Geochemical Observations., International Journal of Mining, Reclamation and Environment: 1-15.

Başçetin A., Tüylü, S., Özdemir, O., Adigüzel, D. 2016b. New Technologies on Mine Process Tailing Disposal, Journal of Geological Resource and Engineering, Vol.4, No.2, pp. 63-72.

Başçetin A., Tüylü, S., Özdemir, O., Adigüzel, D., Benzaazoua, M. 2017. An investigation of crack formation in surface paste disposal method for pyritic Pb–Zn tailings, International Journal of Environmental Science and Technology, pp. 1-8.

Başçetin A., Tüylü, S., Özdemir, O., Adigüzel, D., Çınar, U. 2016a. Determination of Optimum Mixture Ratios of Paste Backfill Materials for Disposal of Mineral Processing Tailings. SME. Phoenix, AZ, SME: 4.

Belem, T., Benzaazoua, M. 2007. Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology., Geotechnical and Geological Engineering 26(2): 147-174.

Benzaazoua, M., Belem, T. 2004. An Overview on the Use of Paste Backfill Technology as a Ground Support Method in Cut-and-Fill Mines. Ground Support in Mining and Underground Construction. , Taylor & Francis: 631-636.

Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P., Verburg, R. 1999. Cementitious Backfill with High Sulfur Content Physical, Chemical, and Mineralogical Characterization. Cement and Concrete Research 29:7.

Benzaazoua, M., Fall, M., Belem, T. 2004. A Contribution to Understanding the Hardening Process of Cemented Pastefill., Minerals Engineering 172): 141-152.

Benzaazoua, M., Belem, T., Bussie`re, B. 2002. Chemical Factors That İnfluence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill. Cement and Concrete Research 32: 12.

Brackebusch, F.W. 1994. Basics of Paste Backfill Systems., International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts 46(1): 6.

Chen, Q., Zhang, Q., Fourie, A., Xin, C. 2017. Utilization of Phosphogypsum and Phosphate Tailings for Cemented Paste Backfill. J Environ Manage 201:19-27.

Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Turan, A., Deveci, H. 2012. Utilisation of Alkali-Activated Blast Furnace Slag inPaste Backfill of High-Sulphide Mill Tailings: Effect of Binder Type and Dosage. Minerals Engineering 30: 33-43.

Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A., Turan, A., Deveci, H., Erdemir, F. 2015. Paste Backfill of High-Sulphide Mill Tailings Using Alkali-Activated Blast Furnace Slag: Effect of Activator Nature, Concentration and Slag Properties. Minerals Engineering 83: 117-127.

Erçıkdı, B. 2009. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. 2017. Practical Importance of Tailings for Cemented Paste Backfill. Paste Tailings Management, In: Yılmaz E., and Fall M. (ed), Chapter 2, Springer, pp. 7-32.

Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, I. 2009. Utilization of İndustrial Waste Products as Pozzolanic Material in Cemented Paste Backfill of High Sulphide Mill Tailings. J Hazard Mater 168(2-3): 848-856.

Ercikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, I. 2010. Utilization of Water-Reducing Admixtures inCemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Mill Tailings., J Hazard Mater 179(1-3): 940-946.

Ercikdi, B., Baki, H., Izki, M. 2013. Effect of desliming of sulphide-rich mill tailings on the long-term strength of cemented paste backfill. J Environ Manage, 115: 5-13.

Ercikdi, B., Yilmaz, T., Kulekci, G. 2014. Strength and Ultrasonic Properties of Cemented Paste Backfill. Ultrasonics 54(1): 195-204.

Fall, M., Pokharel, M. 2010. Coupled Effects of Sulphate and Temperature on the Strength Development of Cemented Tailings Backfills: Portland Cement-Paste Backfill. Cement and Concrete Composites 32(10): 819-828.

Fall, M., Adrien, D., Célestin, J.C., Pokharel, M., Touré, M. 2009. Saturated Hydraulic Conductivity of Cemented Paste Backfill. Minerals Engineering 22(15): 1307-1317.

Fall, M., Benzaazoua, M., Saa, E.G. 2008. Mix Proportioning of Underground Cemented Tailings Backfill. Tunnelling and Underground Space Technology 23(1): 80-90.

Fall, M., Benzaazoua, M., Ouellet, S.2005. Experimental Characterization of the İnfluence of Tailings Fineness and Density on the Quality of Cemented Paste Backfill. Minerals Engineering 18(1): 41-44.

Ghirian, A., Fall, M. 2015. Coupled Behavior of Cemented Paste Backfill at Early Ages. Geotechnical and Geological Engineering 33(5): 1141-1166.

Ghirian, A., Fall, M. 2016. Long-Term Coupled Behaviour of Cemented Paste Backfill in Load Cell Experiments. Geomechanics and Geoengineering 11(4): 237-251.

Hefni, M.A. 2014. An Investigation into the Development and Potential of Foam Minefill. PhD thesis, McGill University.

Jiang, H., Fall, M., Cui, L. 2017. Freezing Behaviour of Cemented Paste Backfill Material in Column Experiments. Construction and Building Materials 147: 837-846.

Jung, S.J., Biswas, K. 2002. Review of current high density paste fill and its technology. Mineral Resources Engineering, 112): 18.

Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçıkdı, B., Alp, İ., Yumlu, M., Özdemir, B. 2002. Çimentolu Macun Dolgunun Laboratuvar Testi. Madencilik 41(4): 10.

Kesimal, A., Deveci, H., Ercikdi, B., Cihangir, F., Izki, M., Baki, H. 2012. Evaluation of Paste Backfill Performance of Different Mill Tailings in Küre Copper Mine. Trabzon, Turkey. Karadeniz Technical University (KTU) Engineering Faculty Department of Mining Engineering: 42.

Kitula, A.G.N. 2006. The Environmental and Socio-Economic İmpacts of Mining on Local Livelihoods inTanzania: A Case Study of Geita District. Journal of Cleaner Production 14(3-4): 405-414.

Koohestani, B., Bussière, B., Belem, T., Koubaa, A. 2017. Influence of Polymer Powder on Properties of Cemented Paste Backfill. International Journal of Mineral Processing 167: 1-8.

Landriault, D. 2001. Backfilling in Underground Mining. In: W.A. Hustrulid (Eds.), Underground Mining Methods Engineering Fundamentals and International Case Studies, SME, 15 s.

Li, W., Fall, M. 2016. Sulphate Effect on the Early Age Strength and Self-Desiccation of Cemented Paste Backfill. Construction and Building Materials 106: 296-304.

Öhlander, B., Chatwin, T., Alakangas, L. 2012. Management of Sulfide-Bearing Waste, a Challenge for the Mining Industry. Minerals 2(4): 1-10.

Ouattara, D., Yahia, A., Mbonimpa, M., Belem, T. 2017. Effects of Superplasticizer on Rheological Properties of Cemented Paste Backfills. International Journal of Mineral Processing 161: 28-40.

Ouellet, S., Bussière, B., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., Aubertin, M. 2006. Reactivity and Mineralogical Evolution of an Underground Mine Sulphidic Cemented Paste Backfill. Minerals Engineering 19(5): 407-419.

Tariq, A., Nehdi, M. 2007. Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management 160(4): 155-166.

Trtnik, G., Kavcic, F., Turk, G. 2009. Prediction of Concrete Strength Using Ultrasonic Pulse Velocity and Artificial Neural Networks. Ultrasonics 49(1): 53-60.

TS EN 12350-2. Beton-taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (slamp) deneyi, Türk Standartlar Enstitüsü.

Wang, Y., Wu, A., Wang, S., Wang, H., Yang, L., Wang, Y., Ruan, Z.E. 2017. Correlative Mechanism of Hydraulic-Mechanical Property in Cemented Paste Backfill. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 32(3): 579-585.

Wu, A., Wang, Y., Wang, H., Yin, S., Miao, X. 2015. Coupled Effects of Cement Type and Water Quality on the Properties of Cemented Paste Backfill. International Journal of Mineral Processing 143: 65-71.

Yılmaz, E. 2010. Investigating the Hydrogeotechnical and Microstructural Properties of Cemented Paste Backfill Using the Cuaps Apparatus. PhD thesis, Universite Du Quebec En Abitibi-Temiscamingue.

Yilmaz, E., Benzaazoua, M., Belem, T., Bussière, B. 2009. Effect of curing under pressure on compressive strength development of cemented paste backfill. Minerals Engineering, 22(9-10): 772-785.

Yilmaz, E., Belem, T., Benzaazoua, M. 2014. Effects of Curing and Stress Conditions on Hydromechanical, Geotechnical and Geochemical Properties of Cemented Paste Backfill. Engineering Geology 168: 23-37.

Yilmaz, E., Belem, T., Bussière, B., Benzaazoua, M. 2011. Relationships between Microstructural Properties and Compressive Strength of Consolidated and Unconsolidated Cemented Paste Backfills. Cement and Concrete Composites 33(6): 702-715.

Yilmaz, T., Ercikdi, B., Karaman, K., Kulekci, G. 2014. Assessment of Strength Properties of Cemented Paste Backfill by Ultrasonic Pulse Velocity Test. Ultrasonics 54(5): 1386-1394.

YAZAR DİZİNİ
AUTHOR INDEX

Adıgüzel, D.	575, 583
Aghatabay, B.	583
Akkaş, M.	199
Aksoy, C.O.	525
Akyıldız, Ö.	217
Akyıldız, S.	423
Alan, E.	225, 247, 269
Arıoğlu, B.	3
Arıoğlu, E.	3
Ateş, U.	73
Atik, İ.	335
Aydın, D.	105
Ayhan, M.	105, 139
Balcı, C.	57, 165
Başçetin, A.	575, 583
Bayındır, O.	299, 307
Berber, M.	449
Bezgin, N.Ö.	509
Bilgili, A.E.	65
Binen, İ.S.	73, 179
Büyüksağiş , İ.S.	281, 433
Canpolat, A.N.	485, 553
Chanda, E.K.	501
Cingöz, G.	477
Coşkun, B.	397
Çalışkan, U.	57, 83
Çelik, İ.H.	241
Çevik, İ.	299, 307
Çolak, A.	485, 553
Çomaklı, R.	165, 207
Çopur, H.	173, 317
Demir, S.	97
Demirci, B.	117
Dilli, İ.	143
Doğan, E.	317
Doğan, İ.D.	291
Doğruöz, C.	379
Domaç, A.	225
Duran, D.	217
Durdu, A.	299, 307
Düzgün, Ö.	261
Eker, H.	575
Ercan, S.	459
Erdoğan, T.	317
Erkuş, O.	465
Eşsizoğlu, O.	65
Fener, M.	485, 553
Gençtürk, B.	261
Gökçe, H.B.	3
Grasso, P.	27
Günay, M.K.	299, 307
Gürsoy, M.	281, 433
Haghi Topraqlou, P.	173
Hüdaverdi, T.	217
İçöz, İ.	83
İleri, İ.	449, 477
İlik, Ö.G.	261
İlkdoğan, T.	57, 83
İlker, C.	517
İnal, O.	83
Kabwe, E.	501
Kahraman, E.	351, 405
Kahraman, S.	193, 485, 553
Kanlıçay, E.	149, 299, 307
Kara, F.	73
Karaçelebi, S.	413, 541
Karadoğan, A.	299, 307, 559
Karakus, M.	501
Karaoğlan, H.	299, 307
Kaski, M.	65
Kıran, H.	127
Kişi, A.	299, 307
Kocaman, B.	379
Kocaman, R.	379
Koç, S.Ö.	327
Koçak, Ç.	351, 405
Köken, E.	153

Kuku, S. 65
Kuruyer, V. 83
Küçükateş, K. 327
Külekçi, G. 493, 535

Mahmutoğlu, Y. 97
Mavi, A.R. 207
Mercan, Ö. 413, 541
Murat, H. 335

Namlı, M. 91

Oral, T. 371
Osgoui, R.R. 27
Özarslan , A. 153
Özdemir, T. 65, 517
Özer, T. 371
Özer, Ü. 299, 307
Özfırat, M.K. 569
Özkaya, B. 83
Özkul, O. 299, 307
Özyurt, M.C. 299, 307, 559

Rostami, M. 193
Russo, G 27

Saygın, E. 193
Sefer, İ. 299, 307
Sen, S.P. 47
Sertabipoğlu, Z. 299, 307
Shaterpour-Mamaghani, A. 317
Soyer, E. 343, 351, 361, 389, 405
Su, O. 199
Şahin, S. 299, 307
Şahinoğlu, Ü.K. 299, 307
Şen, S. 143
Şenkal, S.S. 199
Şeref, S.S. 117
Şimşek, D. 225
Şireci, S. 299, 307
Şirin, O. 327

Taşatan, S. 517
Tokgöz, N. 179
Topcan, S. 343, 361
Tumaç, D. 83
Tüylü, S. 575, 583

Uzun, Ç. 241

Vardar, M. 13
Varol, O.O. 139

Yaralı, O. 127
Yaşa, U. 413, 541
Yavuz, K. 83
Yazar, F. 327
Yazıcı, H.A. 57, 83
Yetkin, M.E. 569
Yıldırım, K. 307
Yılmaz, A.O. 535
Yılmaz, Ö. 117, 335
Yurdacan, Ş.A. 485, 553
Yurttaş, M. 299, 307
Yücel, H. 389

Zaif, B.C. 299, 307
Zare Naghadehi, M. 173