

Aynı Jeolojik Formasyona Sahip NATM İmalatlarında Tek ve Çift Sıra Boru Kemer Uygulamasının Yüzey Oturmalarına Etkisi; Çekmeköy-Sultanbeyli Metro Örneği

The Effect of Single and Double Umbrella Arch Applications on Surface Settlement in NATM Technics with the Same Geological Formation; Cekmekoy-Sultanbeyli Subway Example

T. Perveroğlu Şat

Yüksel Proje A.Ş., Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu, İstanbul

A. Türkoğlu

Teknik Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu, İstanbul

H.İ. Şahin

İBB Anadolu Yakası Raylı Sistem Şube Müdürlüğü, Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu, İstanbul

ÖZET: NATM yönteminde kullanılan geçici destek elemanları arasında yer alan boru kemer, zemin özelliği gösteren ortamlarda açılan tünellerde kazı aynası önündeki emniyeti sağlayabilmek için üzerinde yapılaşmanın fazla olduğu ortamlarda oturmaların kontrol altına alınmasına hizmet etmek amaçlı kullanılan bir ön destek yöntemidir. Boru kemer imalatının tasarım amacı direkt olarak zemini sağlamlaştırma üzerine kurulu olmakla beraber, uygulaması ise aynada borulara özel olarak açılan deliklerden boruların içerisine enjeksiyon basılarak zemin içerisine sürülme şeklindedir.

Bu bildiriye, Çekmeköy- Sultanbeyli Metrosu kapsamında inşa edilen Sultanbeyli istasyonuna ait aynı jeolojik formasyona sahip peron tünellerinde tek ve çift sıra boru kemer uygulanması sonucunda tasarımda öngörülen yüzey oturma değerleri ve aletsel gözlem verileri karşılaştırılmıştır.

ABSTRACT: Umbrella arch, which is among the temporary support elements used in the NATM method, is a prevault support method used to provide safety in front of the excavation face in soil-like environments and to serve restricting settlements due to excessive building load on surface in the weak ground conditions where the tunnel is located. Although the design purpose of umbrella arch application is based on improving the ground directly, its application is in the form of driving pipes into the ground by injecting grout into the pipes through the holes specially opened for the pipes in the face.

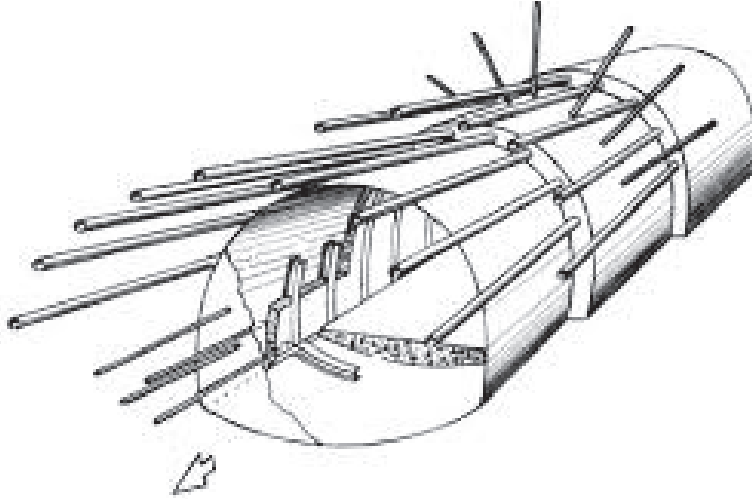
In this paper, the comparison of the surface settlement values predicted in the design and the instrumental observation data as a result of the application of single and double row umbrella arches in the platform tunnels of the Sultanbeyli Station, which was built within the scope of Çekmeköy-Sultanbeyli Metro, will be discussed.

1 GİRİŞ

Büyük kentlerdeki hızlı nüfus artışı sebebi ile ulaşım ciddi bir sorun haline gelmekte, bu sorunda en etkili çözüm yollarının başında gelen metro hatları tüm dünyada giderek artan bir oranda kullanılmaktadır. Hızlı ve kolay ulaşımın sağlandığı metro hatları çoğunlukla kentsel yerleşim

alanlarının yüzeydeki yoğunluğu sebebi ile yer altından geçen yapılar olarak tasarlanmakta olup, metro hattının derinliğine, yüzeydeki yapılar ile etkileşimine ve zemin formasyonu gibi bazı parametrelere bağlı olarak açılacak tünel imalatlarının yapım yöntemi belirlenebilmektedir.

Tünel imalatları için yapım yönteminin belirlenmesinde farklı metotların şekillenmesini sağlayan en önemli unsurlardan biri, hiç kuşkusuz tünel güzergahının yer aldığı zemin özellikleridir. Bu metotlar arasında, farklı zemin ve kaya tiplerine göre ülkemizde de sıkça kullanılan NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu) ile tünel açma metodu yer almaktadır. NATM yöntemindeki temel ilke asıl taşıyıcının zeminin kendisi olması ve hesap yöntemlerinin zeminin taşıma gücü esas alınarak gerçekleştirilmesi üzerine kurulu olmasıdır. Kazı sırasında öncelikle tünel stabilitesi korunmaya çalışılarak, zeminde yüzey oturmalarına izin verilmeyecek şekilde gerekli destekleme ve zemin iyileştirme metotlarından yararlanılmaktadır. NATM yöntemi ile açılacak tünellerin tasarımı şekillenirken; zemin özellikleri, açılacak tünelin çapı, tünelin üzerindeki örtü kalınlığı, yer altı su seviyesi, yer üstündeki yapılaşma durumları gibi faktörler göz önünde bulundurulmaktadır. Bu kapsamda tünel kazısı sırasında geçici destek elemanları kullanılmakta, bu geçici destek elemanlarının yapısal gereksinimlerine ise yukarıda bahsedilen zemin koşulları altlık oluşturmaktadır. Şekil 1’de tipik bir boru (şemsiye) kemer (umbrella arch) uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 1. Geleneksel NATM imalatında boru kemer uygulama yöntemi (Hoek,2001)

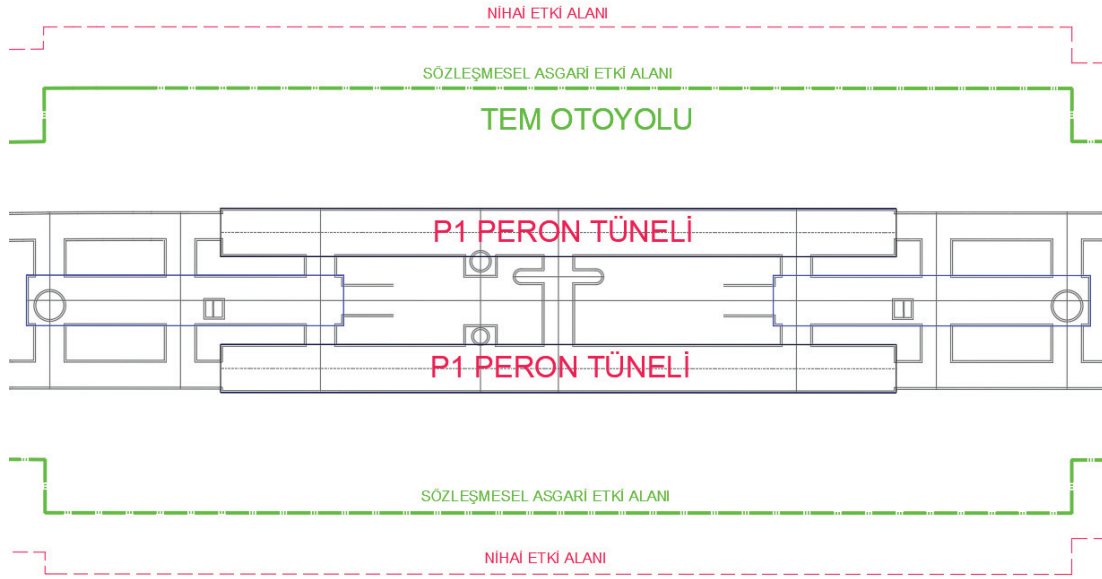
1.1 Projeye Ait Genel Bilgiler

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi (Hastane)–Taşdelen-Yenidoğan Metro Hattı Projesi (ÇSS-YCE) her iki ana hat ve bağlantı hatları ile birlikte toplam ~17 km uzunluğunda imal edilecek metro hattı; ana hat tünelleri ve toplamda 13 adet istasyon yapısı içermekte olan bir toplu taşıma sistemidir. Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Merkez Metro Hattı sırasıyla Meclis, Sarıgazi, Sancaktepe Şehir Hastanesi, Sancaktepe, Samandıra Merkez, Veysel Karani, Hasanpaşa ve Sultanbeyli istasyonlarından geçerek Sultanbeyli ile TEM yolu kenarında son bulmaktadır. Sarıgazi –Yenidoğan metro hattı ise Yenidoğan istasyonundan başlayarak sırası ile Soğukpınar, Cumhuriyet, Aydınlar, Sarıgazi istasyonlarından geçerek Emek istasyonunda son bulmaktadır. Saha için yer bulduru haritası Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Proje güzergahı ve yer bulduru haritası

17 km uzunluğunda imal edilecek metro hattında NATM imalatı ile açılacak tünellerin toplam uzunluğu yaklaşık 9 km olmakla beraber, bildiriye konu olan Sultanbeyli istasyonu peron tünelleri (P1) toplam uzunluğu Hat 1 ve Hat 2 toplam 295 m olarak tasarlanmıştır. Peron tünellerinin üst kotu yüzeyden itibaren 25 m derinlikte yer almakta olup, Sultanbeyli peron tünelleri etkileşim alanı içerisinde TEM otoyolu yer almaktadır (Şekil 3).

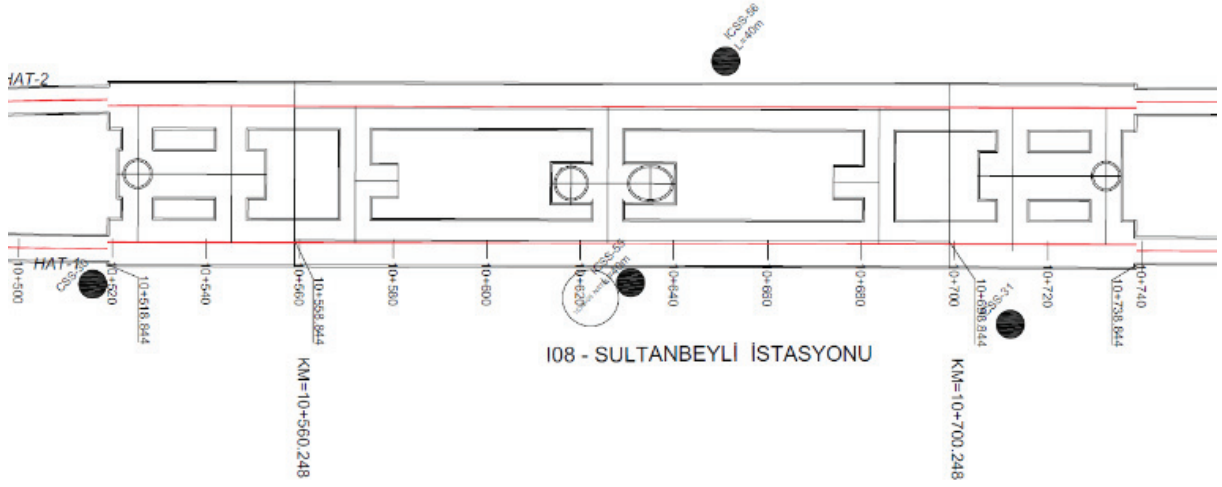


Şekil 3. Sultanbeyli İstasyonu peron tüneli ve otoyol etkileşim alanı

1.2 Bölgeye Ait Mühendislik Jeolojisi

Bildiriye konu olan Sultanbeyli istasyonu peron tünellerinin bulunduğu km aralığında yapılan yer üstü sondaj konumları Şekil 4'te, bu sondajlardan elde edilen tipik bir sondaj karot verisi Şekil 5-10'da sunulmuştur. Ayrıca NATM imatları esnasında aynadan alınan numunelerin de görülebileceği fotoğrafa Şekil 11'den ulaşılabilmektedir.

Bölgeye hakim olan zemin formasyonunu net şekilde saptayabilmek adına ihale eki döneminde ve sonradan Yüklenici tarafından yaptırılan toplamda dört adet sondaj bilgisinden yararlanılmıştır. Bu sondajların yerleşimi Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Sultanbeyli istasyonu sondaj yerleşim planı

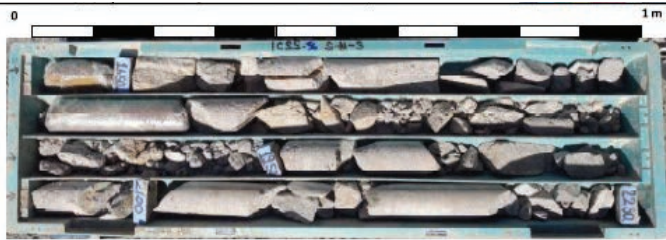
Sultanbeyli bölgesinde dört adet sondaj bilgisine göre oluşturulan idealize zemin profili yüzeyde yapay dolgu, devamında Sultanbeyli formasyonuna (Tst) ait çok sıkı siltli kum – kumlu killi çakıl, devamında Kurtköy formasyonuna ait çok – tümüyle ayrılmış kumtaşı (arkoz) birimi (Opks-W5) ile tabanda Kurtköy formasyonuna ait (Opks) kumtaşı (arkoz) birimlerinden oluşmaktadır (Şekil 5-10).



Şekil 5. 0.00-10.50m derinlikleri arası



Şekil 6. 10.50-16.00m derinlikleri arası



Şekil 7. 16.00-22.50m derinlikleri arası



Şekil 8. 22.50-29.50m derinlikleri arası



Şekil 9. 29.50-34.50m derinlikleri arası



Şekil 10. 34.50-40.00m derinlikleri arası

Hem karot sandık fotoğraflarından (Şekil 5-10) görülen kaya numuneler üzerinde, hem de Şekil 11’de görülen A tüneli kazı aynasından alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, killi-siltli kum birimin derinliği azaltılarak peron tüneli üst sınırına çekilmiş, peron tünelinin tamamen ayrılmış kumtaşı (Arkoz) birimde açılacağı kabulü yapılarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Son durumda Çizelge 1’de verilen arkoz sınırı aşağıdaki gibi revize edilerek tasarımda kullanılmıştır.



Çizelge 1 : Peron tünelleri için idealize zemin profili

Birim	Tabaka Kalınlığı	
	Başlangıç (m)	Bitiş (m)
Dolgu	0.0	3.0
Killi Siltli Kum	3.0	24.0
Çok Ayrılmış Kumtaşı(Arkoz)	24.0	50.0

Şekil 11. Tünel ayna görüntüsü

1.3 NATM Uygulamalarında Boru Kemerin İşlevi

NATM Metodu imalatlarında, yöntemin doğası gereği; zeminin belli bir süre boyunca desteksiz durabilmesi (stand-up time) ve kazılar sırasında tünel bir dren işlevi göreceğinden düşük geçirimsizliğe sahip olması beklenir. Desteksiz durabilme süresi kısa olan zeminlerde kazı öncesi destekleme metodları uygulanmakta olup, bu metodlar ile aynadaki zemin desteklenerek çekme dayanımları sağlanırken, aynanın üstündeki zemin desteklendiğinde ise zemin yükleri azaltılarak ayna stabilitesinin yükseltilmesi amaçlanmaktadır.

Yukarıda bahsedilen sebepler doğrultusunda, klasik NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu)’nun kohezyonu düşük zeminlerde uygulanamaması, deformasyonların yüksek olması ve verim elde edilememesi üzerine ilk defa İtalya’da “Boru Kemer” metodu uygulanmaya başlanmıştır (Çeçen, 2007).

Bu yöntem, NATM ile yapılan kazılarda tünel içi ve yüzey deformasyonlarının kabul edilebilir sınır üzerine çıkmasını kontrol altına alabilmek açısından tüm dünyada uygulanmaktadır. Şekil 12’de ÇSS projesi kapsamında boru kemer uygulamasının görüldüğü bir tünel kesiti görülmektedir.



Şekil 12. ÇSS projesi peron tüneli (P1) boru kemer uygulaması

1.4 NATM İle Yapılan Tünel Kazılarında Zemin Kaybına Bağlı Yüzey Oturma Bağlılıkları

Peck (1969) yapmış olduğu çalışmalarda tünel açılımı sırasında yüzeyde beklenen oturma hacmi ile, tünel açılımı sırasında meydana gelen zemin kaybını ilişkilendirmiş ve bazı kabuller neticesinde iterasyonlar ortaya koymuştur. Tünel imalatlarından kaynaklı oturma eğrileri, maksimum deplasmanın tünel eksenine dik olan mesafede üssel bir fonksiyonla (Gauss fonksiyonu) yayıldığı kabulüne dayanır. Bu formül, Peck (1969) tarafından Chicago metrosunda yapılan gözlemler neticesinde geliştirilmiş olup, formül neticesinde elde edilen şekil “oturma çanağı”, “tasman eğrisi” gibi isimlerle anılıp, sunulan yöntemler aşağıda özetlenmiştir. Tünelin tam üzerinde gerçekleşen maksimum oturma aşağıdaki Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır:

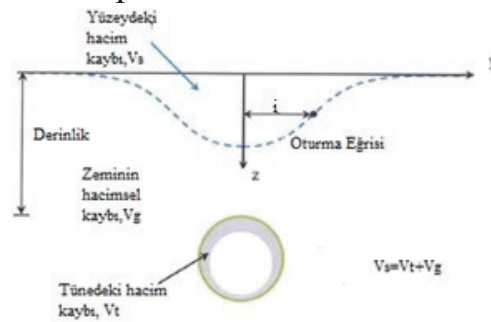
$$s_{max} = VL\pi D^2 / 4\sqrt{2\pi} \cdot i = 0.313 V_L D^2 / i \quad (1)$$

Bu formülde VL hacimsel kaybı, D tünel çapını, i ise dönme noktasını (point of inflection) ifade etmektedir. Dönme noktası aşağıdaki Eşitlik (2) hesaplanmaktadır:

$$i = K \cdot z_0 \quad (2)$$

K eğri genişlik parametresi ve z ise tünel orta noktasının derinliğidir. Elde edilen maksimum oturma tünelle dik olarak yayılması için (Şekil 13) Gauss eğrisi kullanılmaktadır.

$s(z) = s_{max} \exp(-y^2/2i^2)$ olarak hesaplanmaktadır



Şekil 13. Oturma eğrilerinin görünümü

Tasarımlarda kullanılacak hacimsel kayıplar genellikle zemin tipine bağlıdır. Zemin tipine bağlı hacimsel kayıplar ile ilgili tasarımlarda kullanılacak kaynak Guglielmetti vd.'nin (2007) önerdiği tasarım matrisidir. Bu matris TBM tünelleri için oluşturulmuş olup, İstanbul'da açılan NATM tünelleri ve diğer çalışmalardan raporlanan verilerden hareketle NATM hacimsel kayıpları aşağıda verilen Çizelge 2'deki gibi hesaplanabilmektedir:

$$VL_{NATM}=2 \cdot VL_{TBM} \quad (3)$$

Çizelge 2 : Guglielmetti vd. (2007) Tarafından TBM Tünelleri için Önerilen Matris Yöntemi

VL ve K Matrisi		Tünel Aynasındaki Jeolojik Durum			
		1) Zemin Tipi Malzeme	2) Karışık Malzeme (Zemin ve Kaya)	3) Fay ve/veya Ayrışmış Zon	4) Parçalı Kaya Kütlesi veya Zayıf Kaya
Tünel Örtüsünün Durumu	A) Zemin Tipi Malzeme	Tünel çevre kohezyonu: c:0 ise VL:%1, k:0.3 c>0 ise VL:%0.8, k:0.5	Tünel çevre kohezyonu: c:0 ise VL:%1.2, k:0.3 c>0 ise VL:%1, k:0.5	Tünel çevre kohezyonu: c:0 ise VL:%1, k:0.3 c>0 ise VL:%0.8, k:0.5	Tünel çevre kohezyonu: c:0 ise VL:%0.8, k:0.3 c>0 ise VL:%0.5, k:0.5
	B) Karışık Malzeme (Zemin ve Kaya)	VL:%0.5-0.7 Tünel çevre kohezyonu: c:0 ise k:0.3 c>0 ise k:0.5	VL:%0.6-0.8 Tünel çevre kohezyonu: c:0 ise k:0.3 c>0 ise k:0.5	VL:%0.5-0.8 k:0.5-0.7	VL<%0.5 k:0.5-0.7
	C) Fay ve/veya Ayrışmış Zon	VL:%0.4-0.8 Çatlak kohezyonu: c:0 ise k:0.3 c>0 ise k:0.5	VL:%0.5-0.9 Çatlak kohezyonu: c:0 ise k:0.3 c>0 ise k:0.5	VL:%0.6-1.2 Çatlak kohezyonu: c:0 ise k:0.3 c>0 ise k:0.5	VL:%0.4-0.9 k:0.5-0.7
	D) Parçalı Kaya Kütlesi veya Zayıf Kaya	VL:%0.3-0.5 k:0.5-0.7	VL:%0.4-0.6 k:0.5-0.7	VL<%0.4 k>0.7	VL<%0.2 k>0.7

c: Zeminin kohezyon değeri k: Eğri genişlik parametresi olarak tanımlanmaktadır.

Tünelin bulunduğu derinlik/örtü kalınlığı zeminin mühendislik özellikleri, tünelin çapı gibi birden çok etken, zemin kaybı ile doğru orantılı olacak şekilde yüzeydeki oturma eğrisini etkilemektedir (Yıldırım, 2022). Bu kapsamda değerlendirildiğinde, boru kemer yönteminin en temel amacının, kazı kesiti çevresinde belli bir alanda güçlendirilmiş bir zon oluşturup tünel cidarına gelen yüklerin tünel üst yarısına doğrudan etkimesini sınırlandırarak, yan cidarlara dağılım yapmasını sağlamak olduğu söylenebilecektir (Değirmenci, 2019). "Boru kemer" yönteminde kazı tavanına perfore çelik borular yerleştirilmekte ve boru içerisinde bulunan hortum aracılığıyla içine basınçlı enjeksiyon verilmektedir. Bu boruların yerleştirilebilmesi için üst yarı kazısı kesiti normal ilerleme kesitinden daha geniş açılmakta, her kazı adımında şemsiye kemer boruları bindirmeli şekilde uygulanmaktadır (Şekil 1).

2 BORU KEMER İMALATININ TASARIM KRİTERLERİ VE LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Literatürde “boru kemer” borularının yataydaki yerleştirilme aralıkları ve bindirme boyları ile ilgili birçok parametrik çalışma yer almakta olup, Morovatdar ve diğ. (2020) yapmış oldukları çalışmada optimum boru çapı, et kalınlığı ve yatayda borular arası mesafenin zemin koşullarına göre değişebileceğini fakat optimum boru kemer boyunun, tünel çapının 1.5 katı kadar, minimum bindirme boyunun ise boru uzunluğunun minimum %25’i kadar olması gerektiğini belirtmektedir. Zhang vd. (2014) ise yapmış oldukları çalışmada minimum bindirme boyunun 3 m’den az olmaması gerektiğini belirtmektedirler (Yıldırım, 2022).

Tüm bunların yanı sıra, kapsamlı bir literatür taraması yapıldığında boru kemer uygulamasının düzeydeki sırası (tek - çift sıra) ile ilgili net bir tasarım verisinin ortaya konamadığı saptanmıştır.

Oke vd. (2014), Bizjak ve Petkovsek (2004)’e atıfla Golovec Tüneli için UASC Boru kemer seçim çizelgesi (Umbrella Arch Selection Chart) kullanılarak tek sıra boru kemer (FpGUA) seçildiğini fakat yüzeyde yol bulunması ve toprak kayması potansiyelinin olmasından kaynaklı en kötü koşullar altında çift sıra boru kemerin (FpdGUA) tasmanı kontrol altında tutabileceğini belirtmiştir.

Tan (2005), Miwa ve Ogasawara (2005) çalışmalarında, boru kemerin geleneksel olarak tek sıra uygulandığını, çok düşük örtü kalınlıklarında (2m-5m) ve yaklaşık 10m eşdeğer çaplı tünelde yüzey oturmalarını minimize edebilmek adına çift sıra boru kemer uygulaması düşünülebileceği, fakat yapılan sonlu eleman analizlerinde tek ve çift sıra boru kemer için yüzey oturmalarındaki farkın gerçek değerler ile örtüşmeyebileceğine dikkat çekmiştir.

Muraki (1997) çalışmasında, 24 vaka üzerinden boru kemer uygulaması kullanım amaçlarına göre yüzdeler olarak oranlamış olup, %50 ayna duraylılığını sağlamak, %36 yüzey oturmasını azaltmak ve %14 toprak kayması/şev duraylılığını sağlamak için kullanıldığını ifade etmiştir. 24 vaka içerisinde yatay jet grout, güçlendirilmiş yatay jet grout, enjeksiyonlanmış çelik boru şemsiye ve boru çatı yöntemleri dahil olmakla beraber, yüzey oturmasını kısıtlamada en etkili yöntemin yatay jet enjeksiyonu (jet grout) olduğunu değerlendirmiştir.

2.1 Sultanbeyli İstasyonu Peron Tünelleri İçin Boru Kemer Kabulleri

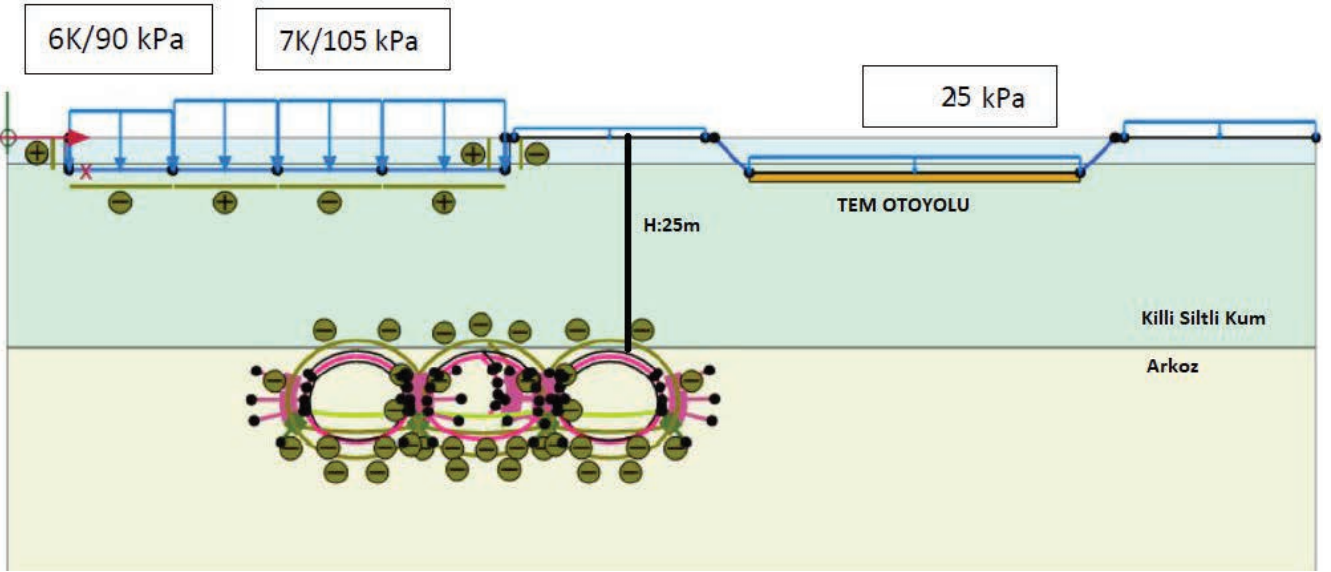
Bölüm 1.1’de belirtildiği üzere Sultanbeyli istasyonu peron tünelleri yüzeyden 25 m derinde yer almaktadır. Bölüm 1.2’de detaylıca açıklanan jeolojik birimin (arkoz) tünel açılımı sırasındaki ve sonrasındaki davranışına ilave olarak, TEM otoyolunun peron tünellerinin sözleşmesel etki alanı içerisinde olması sebebi ile tasarımda ilave önlemlerin alınması gerekebileceği gündeme gelmiştir. Arkozu oluşturan ana malzeme olan kum zeminlerin malzeme özelliği bakımından granüler yapıda ve yüksek geçirimsizliğe sahip olması, NATM imalatları sırasında yer altı suyunun hızla düşmesine sebebiyet verebileceği gibi; tünel içerisine suyla beraber taşınması muhtemel ince malzeme miktarıyla zemin yüzeyinde ani oturmalar görülmesine neden olabilecektir. Yüzey oturmaları, tünelde oluşması beklenen hacimsel kayıp verilerinden yola çıkarak Gauss eğrisi teorisinin yarı ampirik yaklaşımı kullanılarak hesaplanabilmektedir (Bölüm 1.4). Fakat yüzey oturmasının tünelde teorik olarak oluşması beklenen hacim kaybından daha yüksek yaşandığı örnekler ve geçmiş tecrübelerimiz değerlendirildiğinde, tünel imalatları sebebi ile kum ve silt tabakalarında yaşanan gevşeme ve yumuşamanın yüzeyde ilave oturmalara neden olabileceği yukarıda bahsetmiş olduğumuz çekincelerimizi doğrulamaktadır.

Proje genelinde yaşanan çekincelerin başlıca sebebinin arkozun yüksek yer altı su seviyesi altındaki davranışının NATM kazıları sırasında yüzeye ilave oturma olarak yansiyabilme ihtimali; bu oturmaların da TEM otoyolunda risk teşkil etmemesi adına ilave önlemlerin alınması üzerine kurgulanmıştır.

2.1.1 Sultanbeyli istasyonu peron tüneli tasarım kriterleri

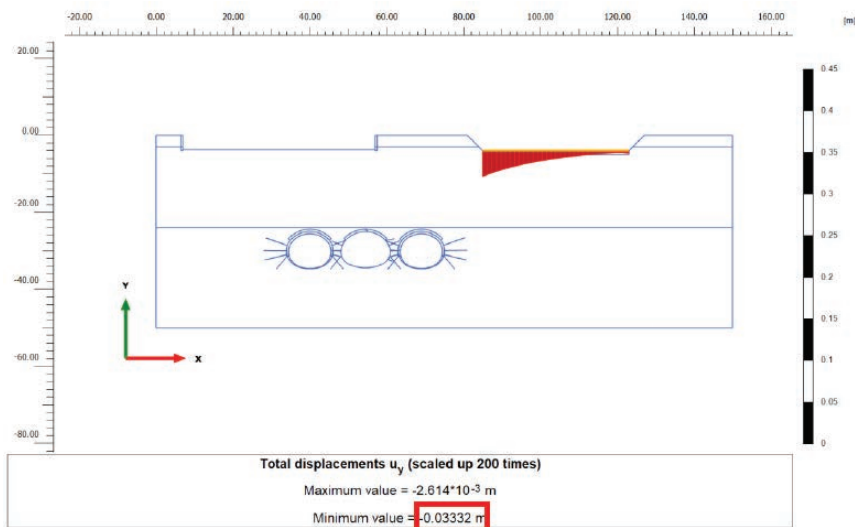
Bölüm 2.1’de açıklandığı üzere, Sultanbeyli peron tünelleri geçici kazı destek tasarımları şekillenirken, TEM otoyolu ile etkileşimi birinci unsur olarak dikkate alınmıştır. Yapılan sondajların haricinde, P1 tüneli öncesinde yapılan ve P1 tüneline yükselecek olan A tüneli kazı aynasından alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda; killi siltli kum birim kalınlığı azaltılarak, altında yer alan tamamen ayrılmış kumtaşı (Arkoz) sınırı tünel üst kotundan 1 m yukarı çekilmiş ve Çizelge 1’de verilen idealize zemin profili oluşturularak tasarımlara başlanmıştır.

Analizler Plaxis 2D program ile en kritik kesit olan 3 tünel (P1-P2-P1) etkileşimi için gerçekleştirilmiş olup, kazı destek modeli Şekil 14’te görülmektedir.



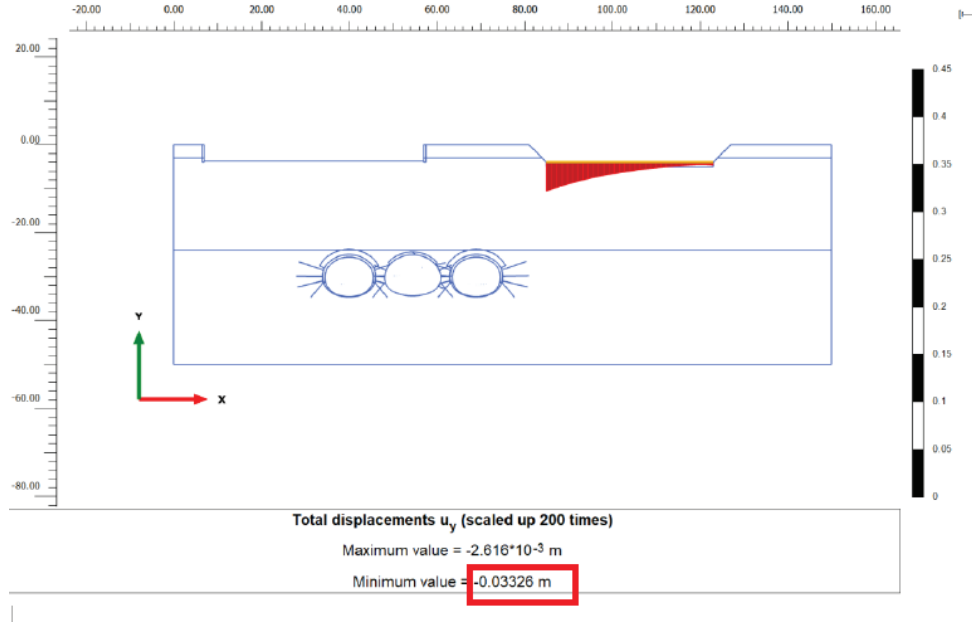
Şekil 14. P1 tüneli kazı destek modeli (Tekfen Mühendislik, 2022)

Başlangıçta yapılan nümerik analizler, tünel üzerinde yer alan ayrılmış zon için tek sıra boru kemer tahkimatı üzerine kurgulanmıştır. Bu durumda TEM otoyolu altında üç tünelin de (P1-P2-P1) açılması halinde beklenen düşey oturma 33 mm bulunmuş olup, program çıktısından alınan sonuç Şekil 15’de gösterilmektedir.



Şekil 15. Tek sıra boru kemer ile otoyol altındaki düşey oturma değeri (Tekfen Mühendislik, 2022)

Hat 2 P1 tünelinin (TEM otoyolu yakınında bulunan) kazı destek imalatları aşamasında teorik olarak öngörülen düşey oturma değerlerinden daha fazla olması muhtemel oturmaları/deplasmanları sınırlandırmak hedeflenmiş olup, gerekmesi durumunda çift sıra boru kemer kullanılması önerilmiştir. İlave olarak Bölüm 2.1’de açıklandığı üzere, tünelin içinde bulunduğu birimin arkoz olması, kayanın gevrek davranış gösterebilme ihtimali ve geçirimsizliğinin yüksek olması sebebi ile, imalat sırasında olası kazaların önüne geçilmesi amacıyla da gerekmesi durumunda çift sıra boru kemer kullanılması önerilmiştir. Önerilen bu çift sıra boru kemer alternatifi analiz olarak da tahkik edilmiş, fakat tek sıra boru kemer olarak çözülen kesitte bulunan düşey oturma değeri ile arasında bir fark görülmediği raporlanmıştır (Şekil 16).



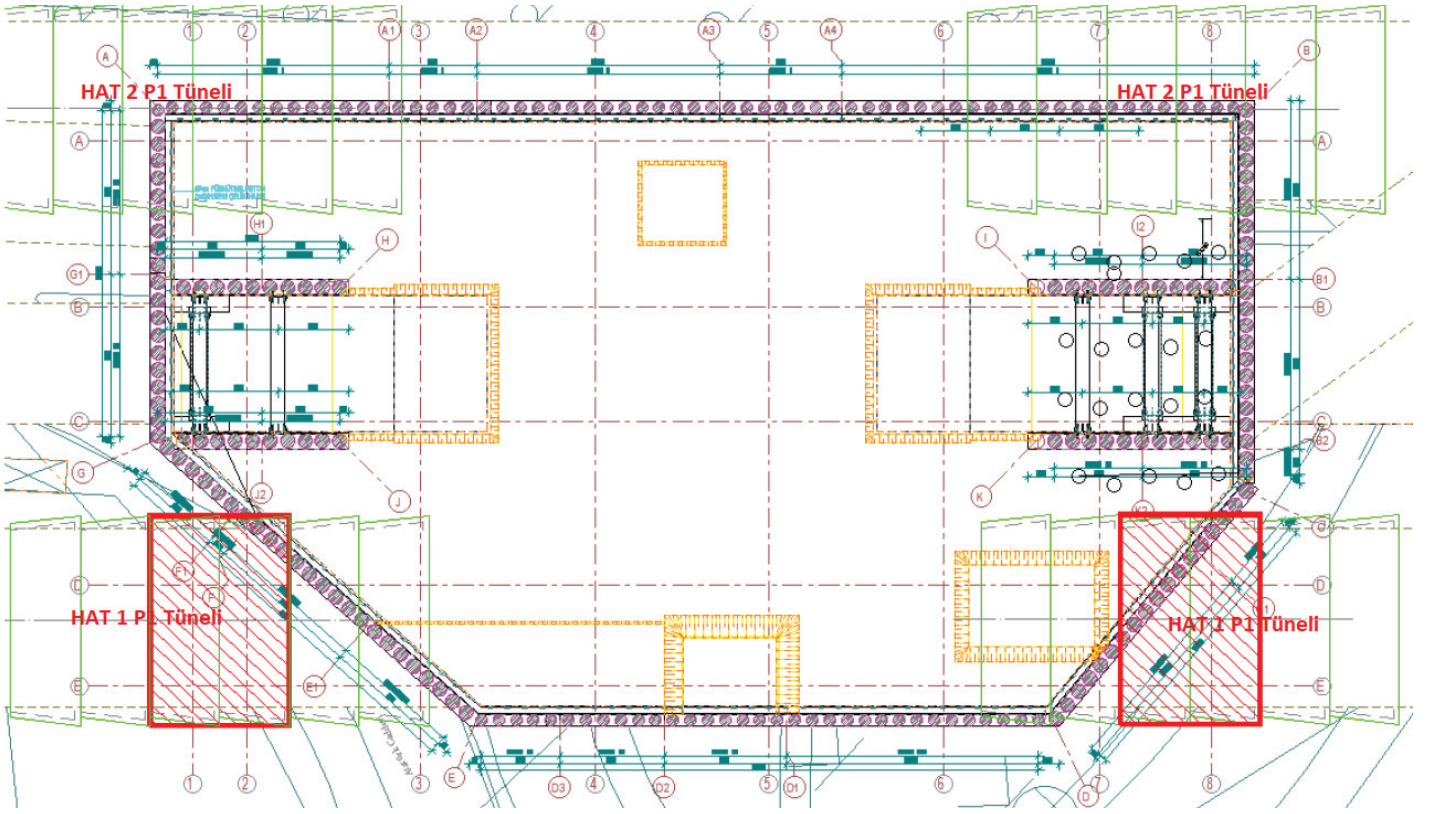
Şekil 16. Çift sıra boru kemer ile otoyol altındaki düşey oturma değeri (Tekfen Mühendislik, 2022)

Yapılan analizler neticesinde ortaya çıkan bu teorik sonuçlar, Bölüm 2’de bahsedilen literatür araştırmalarını desteklemekte olup; özellikle yüzeyden 25 m derinde olan (Yaklaşık 2D) NATM kazı destek imalatları sırasında, tek sıra yerine çift sıra boru kemer uygulamasının yüzey oturmalarına teorik olarak olumlu etkisinin ortaya konamayacağını göstermiştir.

2.1.2 Sultanbeyli istasyonu peron tüneli imalatı sırası ve sonrasındaki yüzey oturma değerleri

Bölüm 2’de Tan (2005), Miwa ve Ogasawara (2005) belirtildiği üzere, özellikle düşük örtü yükü altından geçen ve bu sebeple ani göçme riski barındıran NATM imalatlarında çift sıra boru kemer uygulamasının riskleri minimize etmekte yararı olacağı belirtilmiştir.

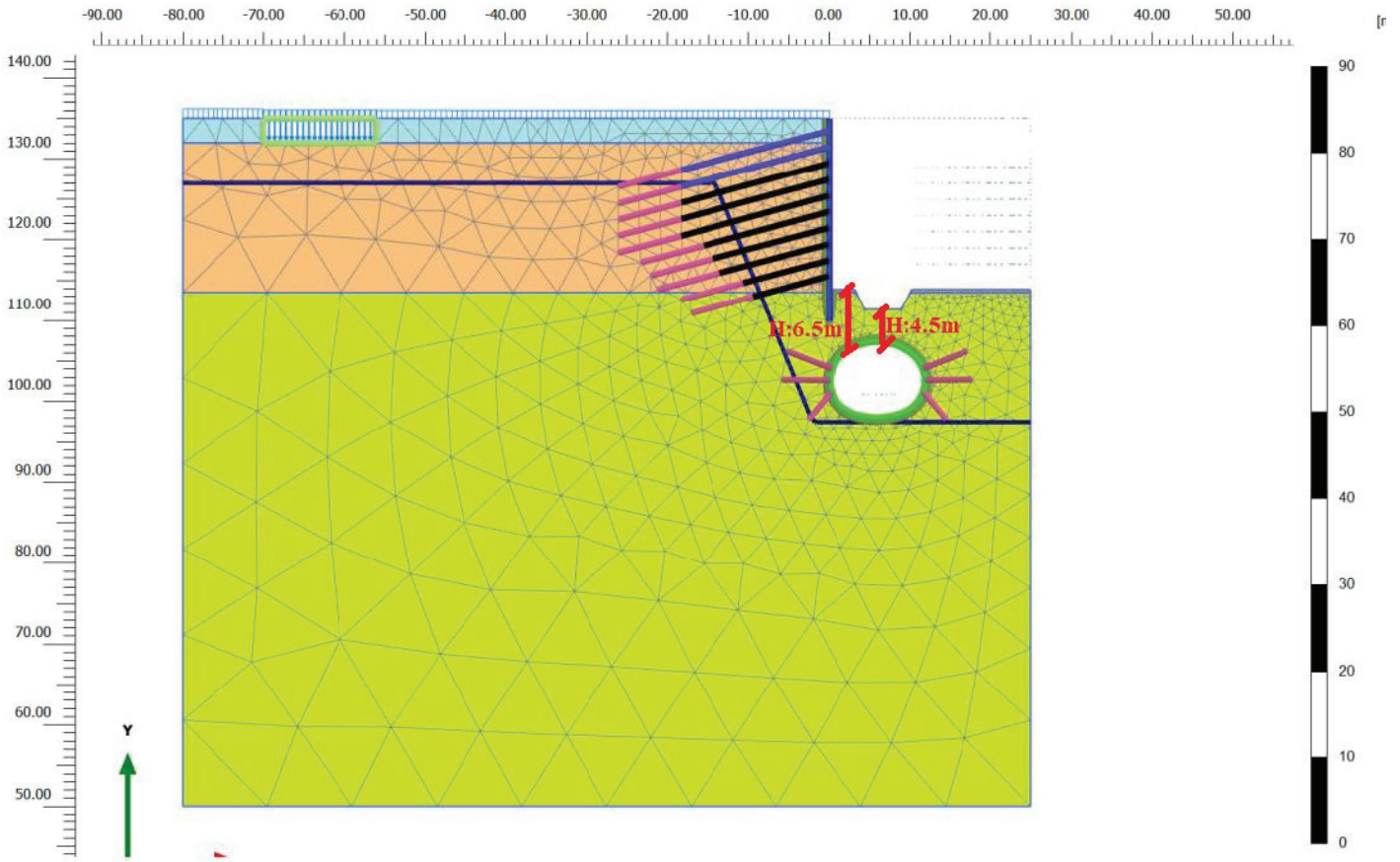
Bu kapsamda, Sultanbeyli istasyonu için peron tünelleri ile konkors kazısının etkileşim halinde bulunduğu bölgeler belirlenmiş ve Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 17. Konkors ve peron tüneli etkileşim bölgeleri (Tekfen Mühendislik, 2022)

Şekil 17’de görülen işaretli bölgelerde, yaklaşık 20m derinliğindeki konkors geçici kazısı tamamlandığında peron tünelinin üzerindeki örtü yükü yaklaşık 6,5 m’ye düşmektedir (Pit çukuru olan bölgelerde ise bu yükseklik lokal olarak 4,5 m’lere düşmektedir). Düşük örtü kalınlığı ve jeolojik değişikliklerden dolayı yapılacak tünel kazısı sonucunda konkors ve çevre binalarda deformasyonların hesaplanandan daha yüksek çıkması ve olası zayıf bir zona dengelmesi durumunda tünel üzerinden oluşacak göçüğün yüzeye ulaşma riskinin bulunması, özellikle iksa stabilitesi için de ciddi riskler barındırmaktadır.

Bu kapsamda deformasyonları en aza indirebilmek amacıyla peron tüneli imalatlarına çift sıra boru kemer olarak devam edilmesi ve bunun haricinde pah güçlendirme yapılması önerilmiştir. Son durumda yapılan kazı-tünel etkileşimi analizleri sonucunda mevcut tünel kazı desteğiyle (kalıcı kaplama yapılmadan) iksa ve tünel stabilitesinin güvenli bir şekilde sağlanabildiği gösterilmiştir.

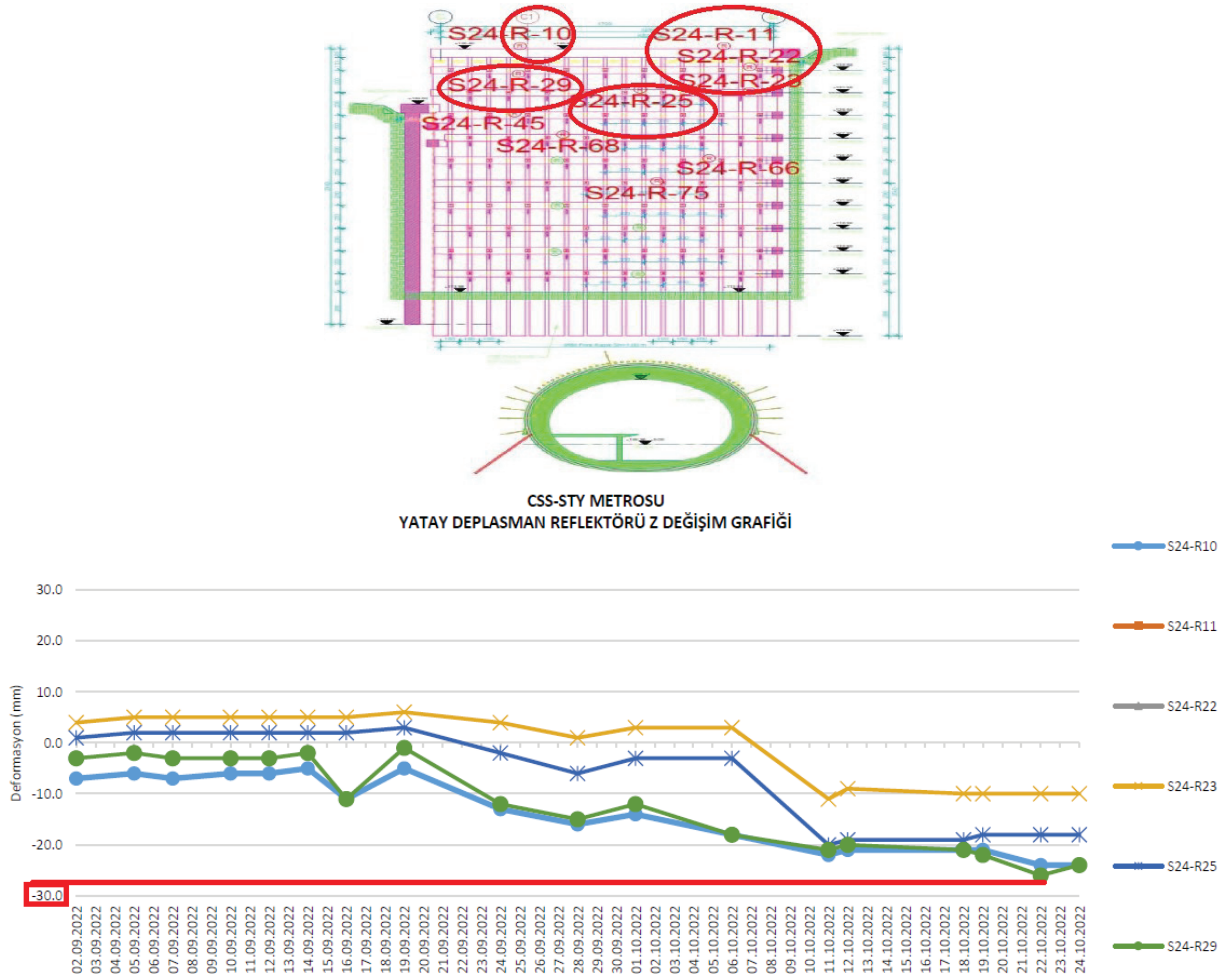


Şekil 18. Konkors ve peron tüneli etkileşim bölgesi analiz kesiti (Tekfen Mühendislik, 2022)

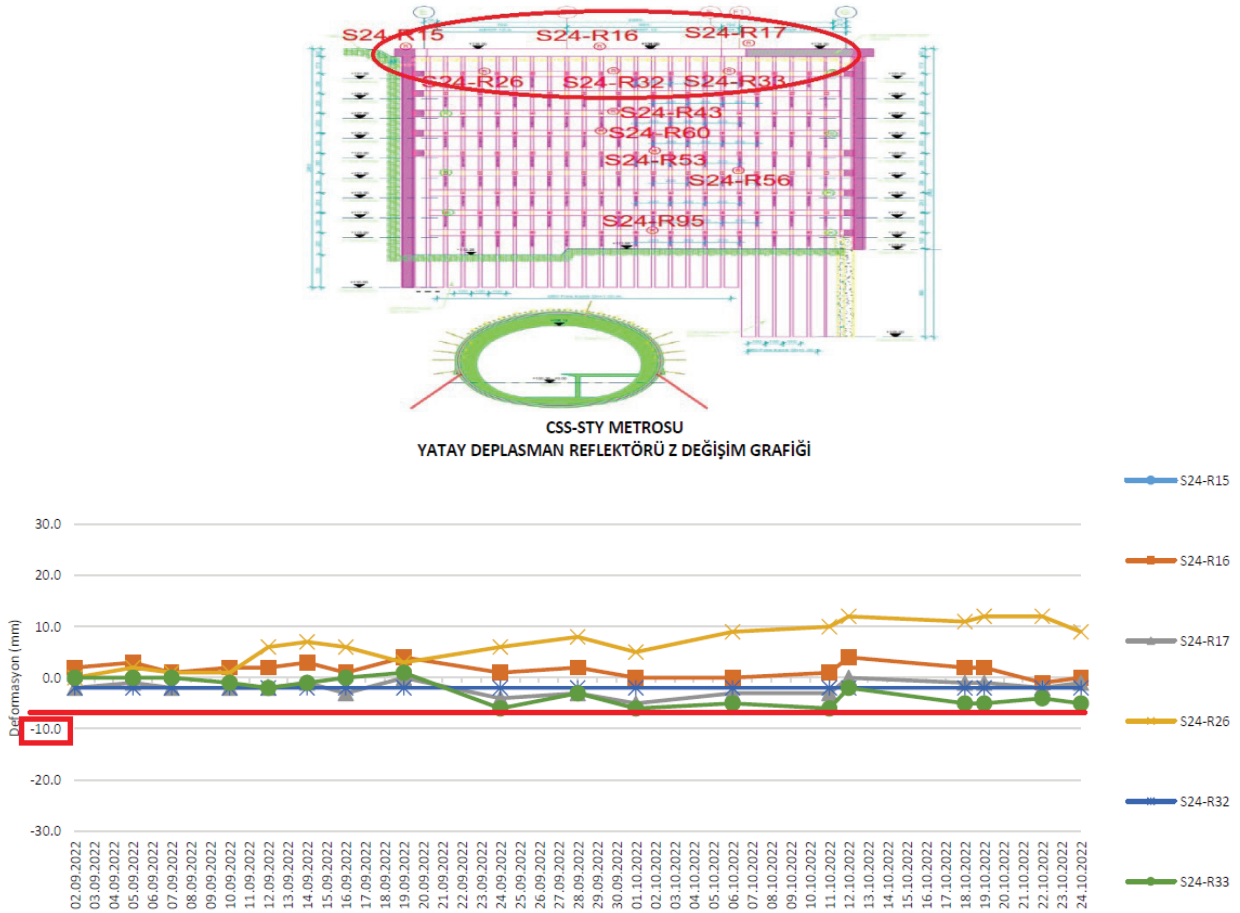
Konkors kazılarından kaynaklı tünel üzerindeki örtü yüksekliğinin azaldığı bölgelerde (4,5 m-6,5 m) uygulanan tek sıra ve çift sıra boru imalatları sonucunda, istasyon kazı destek elemanları üzerine yerleştirilmiş olan reflektör okumalarından alınan okuma verileri Şekil 19’da ve Şekil 20’de gösterilmektedir.

Yapılan analizler sonucunda Şekil 15 ve Şekil 16’da gösterildiği üzere tek sıra umbrella imalatı ile ilerlemenin yüzey oturmasına olumsuz bir katkısı yaratmadığı teorik olarak ortaya konmuştur. Bu kapsamda değerlendirilen ve tünel etkileşim alanında olası oturmalardan etkilenecek riskli bir yapı bulunmadığı için tek sıra boru kemer tahkimatı ile ilerlenen Hat1 P1 geri kazısına bağlı olarak, tünelin konkors kazı taban kotu ile etkileşime girdiği bölge olan C-D iksa duvarında (Şekil 17) düşey deformasyon 30 mm üzerinde raporlanmıştır (Şekil 19). Öte yandan tünellerin etkileşim alanı içerisinde bina bulunması sebebi ile ilave önlem amaçlı çift sıra boru kemer tahkimatı ile ilerlenmesine karar verilen Hat1 P1 ileri kazısı sonucunda, tünelin konkors kazı taban kotu ile etkileşime girdiği bölge olan E-G iksa duvarında (Şekil 17) ise düşey deformasyonun 7 mm civarında kaldığı raporlanmıştır (Şekil 20).

İstasyon kazı destek elemanları üzerine yerleştirilmiş reflektörler ile alınan üç boyutlu okuma sonuçlarından yola çıkılarak raporlanan veriler ile beraber, örtü yükünün azaldığı konkors-tünel etkileşiminin olduğu bölgeler için tek sıra yerine çift sıra boru kemer tahkimatı uygulamasının düşey oturmalara olumlu katkısının olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 19. Hat1 P1 geri tek sıra boru kemer imalatı CD aksı düşey oturma değerleri (30 mm)



Şekil 20. Hat1 P1 ileri çift sıra boru kemer imalatı EG Aksı düşey oturma değerleri (7 mm)

3 SONUÇLAR

Bu bildiriye, Çekmeköy- Sultanbeyli Metrosu kapsamında inşa edilen Sultanbeyli İstasyonu'na ait aynı jeolojik formasyona sahip peron tünellerinde tek ve çift sıra boru kemer uygulanması sonucunda, tasarımda öngörülen yüzey oturma değerleri ve aletsel ölçüm verilerinin karşılaştırılmasından bahsedilmiştir.

Bölüm 2'de bahsedilen literatür çalışmalarında belirtildiği üzere, tünel açımı esnasında ve sonrasında yüzey oturmalarının kritik değerlere ulaşabilmesindeki en önemli etken düşük örtü yüksekliğidir. Tünel üzerindeki örtü yüksekliğinin azalması, kemerlenme sağlanamamasına yol açabileceği gibi, bu durum ani göçme/zemin boşalması vb. olumsuz koşullar yaratabilme ihtimalini de güçlendirecektir.

Bu kapsamda Sultanbeyli İstasyonu için yapılan geoteknik analizlerde, örtü yüksekliğinin 25 m olduğu kısımlarda, tek sıra yerine çift sıra boru kemer uygulaması yapılmasının teorik olarak bir farkı görülememiş olup, literatür araştırmalarında da bu konuyla ilgili net veriler elde edilememiştir. Fakat özellikle tünel üzerindeki örtü yükünün azaldığı, konkors-tünel etkileşimi olan bölgeler için uygulanan tek ve çift sıra boru kemer imalatları sonrasındaki yüzey oturma değerleri kıyaslandığında, çift sıra boru kemer imalatının düşey oturmalara olumlu etki yarattığı gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tüm proje süreçlerinde emeği geçen İşveren İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistemler Daire Başkanlığı Anadolu Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü'ne, Müşavir Firma Yüksel Proje A.Ş.'ye, Yüklenici Firma Doğu İnşaat ve Tic. San. A.Ş.'ye olmak üzere projeye sağladıkları katkılar sebebi ile Tekfen Mühendislik Geoteknik Grubu çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Bizjak, K, Petkovsek, B. (2004). Displacement analysis of tunnel support in soft rock around a shallow highway tunnel at Golovec.
- Çeçen, E. (2007). Kent İçi Tünellerinde Uygulanan Şemsiye-Kemer ve Ayna Donatılama Tekniklerinin Gerilme-Deformasyon Üzerine Etkilerinin Sayısal Analizi. Doktora Tezi: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Değirmenci, S. (2019). Oruçlu Tüneli Göçük Bölgesinin Şemsiye Kemer Yöntemi ile Desteklenmesi. Yüksek Lisans: Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S., (2007). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*. Londra: Taylor & Francis.
- Hoek, E., (2001). *Big Tunnels in Bad Rock 2000 Terzaghi Lecture*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 9. p. 726-740.
- Miwa, M., Ogasawara, M., (2005). Tunnelling through an embankment using all ground fasten method. *Tunnelling and Underground Space Technology* 20.
- Morotvatdar, A., Palassi, M. & Ashtiani, R., (2020). Effect of Pipe Characteristics in Umbrella Arch Method on Controlling Tunelling Induced Settlements in Soft Grounds. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Muraki, Y. (1997). *The Umbrella Method In Tunneling*. (Yüksek Lisans Tezi), Kobe Üniversitesi, Japonya.
- Oke, J., Vlachopoulos, N. & Marinos, V., (2014). Umbrella Arch Nomenclature and Selection Methodology for Temporary Support Systems for the Design and Construction of Tunnels. *Geotechnical and Geological Engineering*.
- 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.
- Tan, W. L. (2005). *Numerical Analysis for shallow tunnels in weak ground supported by Umbrella Arch Method*. (Yüksek Lisans Tezi). Nanyang Teknoloji Üniversitesi, Singapur.
- Tekfen Mühendislik. (2022). *Sultanbeyli İstasyonu P1 Tüneli (Üst Yarı Tek Aşama) E/F Destek Sınıfı Kazı ve Destekleme Sistemi Hesap Raporu*. Yayımlanmamış Rapor, İstanbul.
- Tekfen Mühendislik. (2022). *Sultanbeyli İstasyonu Konkors Kazısı ve Tünel Etkileşimi Değerlendirme Raporu*. Yayımlanmamış Rapor, İstanbul.
- Yıldırım, E. (2022). *Problemlili Zemin Koşullarında Şemsiye Boru Destek Sisteminin Sayısal Modellemesi: Bir Vaka Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Zhang, Z., Li, H., Liu., (2014)., *Load Transferring Mechanism of Pipe Umbrella Support in Shallow-Buried Tunnels*. Tunneling and Underground Space Technology.

Metro İstasyonlarında İksa İmalatlarını Hızlandırma Üzerine Alternatif Bir Yöntem İncelemesi

An Alternative Method Analysis on Accelerating Shoring Production in Metro Stations

B.K. Beşli, A. S. Peker
Tekfen Mühendislik., İstanbul

H. C. Özdemir, C. Barış
IC İçtaş İnşaat, İstanbul

ÖZET: Kentlerde artan nüfus yoğunluğu; yoğun ve düzensiz yapılaşma, çevre kirliliği ve göç hareketleri sonucu trafik yoğunluğunun artması gibi sorunlara yol açmaktadır. Ulaşımın yetersiz kalması bu sorunlar arasında en önemlisidir. Toplu taşıma sistemlerinden biri olan raylı sistem ağlarının gelişmesi, kentsel ulaşım ile ilgili birçok sorunu çözmektedir. Raylı sistemler ulaşım görevini yerine getirirken bir yandan da kentsel yaşam alanlarının rahatlamasını sağlamakta, çevre, gürültü ve görüntü kirliliğinin önüne geçmektedir.

Metro projelerinin planlanan sürelerde tamamlanabilmesi için inşaat işlerinin yapımının önceden doğru şekilde planlanması büyük önem arz etmektedir. Günümüzde tünel imalatları, TBM kullanımının artmasıyla daha kısa sürelerde yapılabilmektedir. Metro projelerinde TBM kullanımı yatırımı yüksek bir maliyet olarak karşımıza çıkar. Fakat buna karşılık olarak inşaat işlerini hızlandıran ve iş güvenliğini arttıran bir yöntem olması nedeniyle altyapı projelerinde tercih edilmektedir.

Yapım aşamasında ise hazırlanan planlama çalışmalarında TBM çalışmaları kritik aktivite olarak görülmektedir. Bu sebeple TBM işletmesi yapılacak olan istasyonun bir an önce kazı kotuna indirilmesi ve TBM girişine hazırlanması gerekmektedir. Tema Park istasyonu, Mahmutbey Bahçeşehir Esenyurt Metro Projesinde TBM işletmesi yapılacak olan istasyondur. Projeye süresel avantaj sağlamak için Aç-kapa olarak tasarlanan istasyonun kazı destek sistemi olarak düşeyde fore kazık ve yatayda çelik strutlar kullanılmıştır. TBM parçalarının temele indirilmesi operasyonunda gerekli alanın oluşturulabilmesi için bir bölgede öngermeli ankrajlar kullanılmıştır. Kazı işlerini en kısa süre tamamlamak amacıyla ve sahada strut ve öngermeli ankraj imalatlarının birbirine paralel ilerleyebilmesi için öngermeli ankrajların düşey aralıkları pratikte uygulanandan (1.5-2m) farklı ve strut kotlarına paralel olarak (yaklaşık 5m düşey aralık) olarak belirlenmiştir. Süresel avantaj sağlamak adına tasarlanan bu bölgede kazıklar 80cm çapında 100cm arayla oluşturulmuştur. Kazık boyu soket dahil 32.80 m'dir. Ankrajlar ise düşeyde 5m ve 5 sıra olacak şekilde tasarlanmıştır.

Bu çalışmada, Tema Park İstasyon'unda TBM işletmesi yapılacak bölgenin (ankrajlı bölge) geçici kazı desteği Plaxis 2D programı kullanılarak modellenmiş, sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından edilen kazık deplasmanları ve ankraj kuvvetleri, saha ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. İnceleme ve değerlendirmeler sonucunda sayısal model ile saha ölçüm sonuçları uygunluk göstermiş ve bu tasarımın uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

ABSTRACT: The increasing population density in cities leads to problems such as intense and irregular construction, pollution, and increased traffic density due to migration. Lack of transportation is the most important of these problems. The development of rail system networks, one of the public transportation systems, solves many issues related to urban

transportation. Rail systems provide transportation while ensuring that urban living areas are relaxed, preventing environmental, noise, and image pollution.

It is important to plan the construction works correctly in advance so that the metro projects can be completed within the planned times. Nowadays, tunnel construction can be done in shorter periods with the increase in the use of TBM. The investment in the use of TBM in metro projects is a high cost. However, it is preferred in infrastructure projects because it is a method that accelerates construction work and increases occupational safety.

During construction, TBM works are seen as a critical activity in the planning studies prepared. Therefore, the station to be operated by TBM must be lowered to the excavation level as soon as possible and prepared for the TBM entrance. Tema Park station is the station where TBM operation will be carried out in Mahmutbey Bahçeşehir Esenyurt Metro Project. Vertical bored piles and horizontal steel struts were used as the excavation support system of the station, which was designed as a cut and cover to provide a time advantage to the project. Prestressed anchors were used in one area to create the required area to lower the TBM parts to the foundation. To complete the excavation works in the shortest time and for the strut and prestressed anchor productions to proceed similarly to each other in the field, the vertical spacing of the prestressed anchors is different from the practically applied (1.5-2m) and similar to the strut elevations (approximately 5m vertical spacing). In the area designed to provide time advantage, the piles are 80 cm in diameter and 100 cm in spacing. The pile length is 32.80 m. The anchors are designed to be 5 m vertically and 5 rows.

In this study, the temporary excavation support of the area where the TBM operation will be performed (anchored region) at Tema Park Station was modeled, and numerical analysis was performed using the Plaxis 2D program. The pile displacements and anchor forces obtained from the analysis results were compared with the field measurements. As a result of the examinations and evaluations, the numerical model and the field measurements were compatible, and it was determined that the design was applicable.

1 GİRİŞ

Şehirlerin, artan nüfusa bağlı olarak sürekli büyüyen altyapı ve ulaşım faaliyetlerinin önemi her geçen yıl artmaktadır. Özellikle büyük yerleşim yerlerinde nüfus yoğunluğuna bağlı olarak artan ihtiyaçların karşılanabilmesi için yer altı çalışmaları ayrı bir önem kazanmıştır. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de ve özellikle İstanbulda gerçekleştirilen altyapı yatırımlarının sayısı bu duruma iyi bir örnek teşkil etmektedir. İlk yatırım giderlerinin yüksek olmasına karşılık, orta ve uzun vadede fert başına ulaşım maliyetlerini de düşüren bu sistemler daha güvenilir ve daha çevreci olması sebebiyle daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Metrolar bir yandan taşıma görevini yerine getirirken, diğer yandan da kentsel yaşam alanlarının rahatlamasını sağlamakta ve kentsel yoğunluğun artmasına engel olmaktadır. Ayrıca projeye ek maliyet ve zaman yükü getiren kamulaştırma faaliyetlerine ihtiyaç duymamaktadır. Fert başına ulaşım maliyetlerini de düşüren bu sistemler aynı zamanda daha emniyetlidir. Metro istasyonu yapım süresi istasyonun konumuna, altyapı yoğunluğuna, jeolojik şartlara ve kamulaştırma işlemi gerekliliğine göre oldukça değişkenlik göstermektedir. Metro istasyonları tamamen aç kapa, kısmen aç- kapa, kısmen tünel veya tamamen tünel şeklinde yapılabilmektedir.

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.

TBM'ler günümüzde mekanize tünel açma makinaları arasında en yaygın kullanılan makinalar olmaya başlanmış olup, her türlü kayaç ve zemin ortamında kullanılacak 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 olmaktadır (Ateş vd. 2014, Paltrinieri vd. 2016). Gelişen teknolojiye bağlı olarak söz konusu altyapı projelerinde kullanılan yöntemler de zamanla değişmekte, klasik tünelleme yöntemleri yerini daha ekonomik ve emniyetli olarak kabul edilen Tünel Açma Makinelerine (TBM) bırakmaktadır.

Bir şehirde raylı sistemin varlığı günde yüz binlerce yolcunun taşınmasını sağlamakta ve bu yolcuların aktif olarak kullandıkları yol, kaldırım vb. kentsel alanlarda rahatlık sağlamaktadır.

Yer altı metro istasyonları, belirli noktalarda bulunan giriş yapıları dışında yüzeyle ilişkisi olmayan kapalı yapılardır.

2 PROJENİN ÖZELLİKLERİ

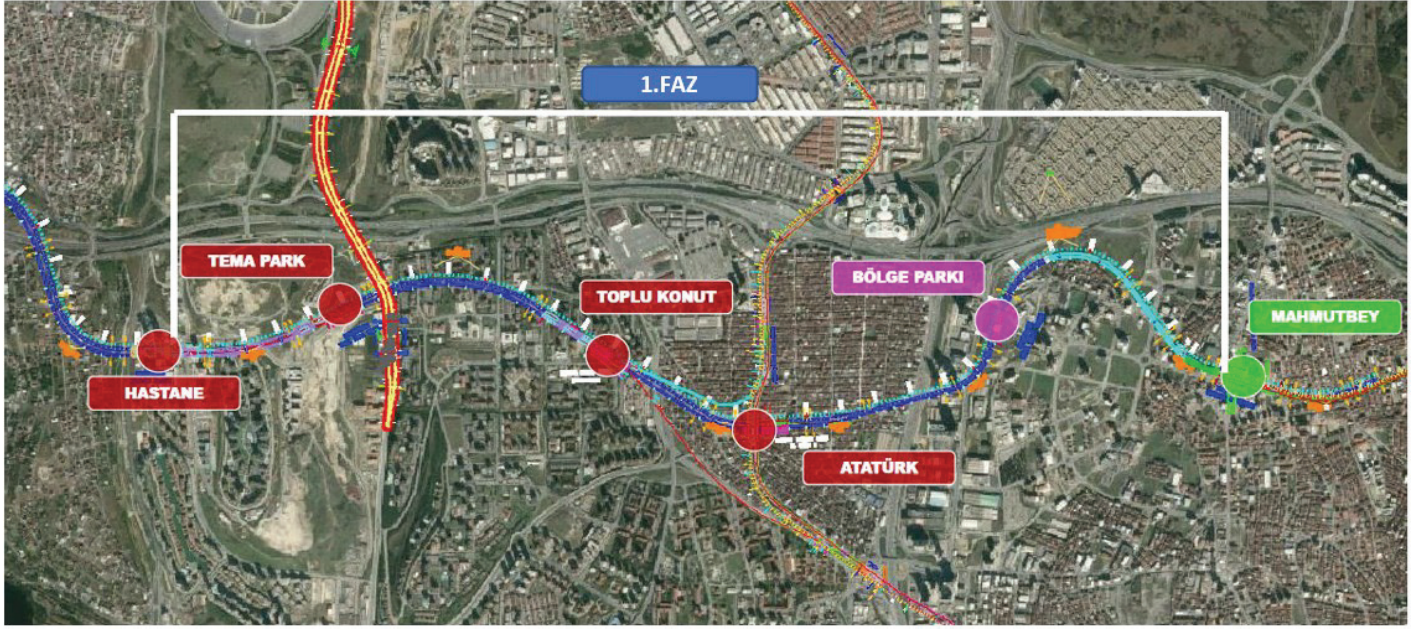
Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metrosu İnşaat ve Elektromekanik Sistemler Temin, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri Projesi (MBE) toplam yaklaşık 18.5 km uzunluğunda imal edilecek metro hattı; ana hat tünelleri ve toplamda 10 adet istasyon yapısı içermekte olan bir toplu taşıma sistemidir (Şekil 1). Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Hattı sırasıyla Atatürk, Toplu Konut, Tema Park, Hastane, Tahtakale, İspartakule, Bahçeşehir, Esenkent, Ardıçlı ve Esenyurt istasyonlarından oluşmaktadır. Saha için yer bulduru haritası Şekil 2’de verilmiştir.

2.1 Tema Park İstasyonu

Tema Park İstasyonu İstanbul ili, küçükçekmece ilçesinde konumlandırılmıştır (Şekil 3). İhale eki kesin projelerde NATM tekniğiyle yapılacak şekilde tasarlanmış olan Tema Park İstasyonunun yer aldığı arazinin, şahıs mülkiyetinde olduğu tespit edilmiş, maliklerle yapılan toplantılar sonucu üst kullanım hakkının İstanbul Büyükşehir Belediyesi lehine süresiz devri için anlaşma sağlanarak bu konuda bir protokol düzenlenmiştir. Arazinin üst kullanım hakkının devrinden sonra imalat kolaylığı ve maliyet avantajı göz önünde bulundurularak yapılan tasarım çalışmaları sonucunda aç-kapa metoduyla inşa edilecek şekilde revize edilmiştir. Ayrıca aç-kapa metoduyla tasarlanan istasyon yapısının TBM giriş yapısı olarak kullanılması imkânı da ortaya çıkmıştır. İlk iki TBM’in Mahmutbey İstasyonu yönünde kazı yapması kararlaştırılmış ve TBM’lerin giriş noktası olarak Tema Park İstasyonu belirlenmiştir. Yapılan bu tasarım revizyonu ile istasyon boyutları büyümesine rağmen yapım maliyetinde düşüş sağlanmış ve ihale eki güzergâh üzerinde öngörülmeyen TBM giriş yapısı lokasyonu da belirlenmiştir.



Şekil 1. Proje bulduru haritası



Şekil 2. Faz 1 proje bulduru haritası



Şekil 3. Tema Park istasyonu-1

İstasyon plan ölçüleri yapı dış sınırı esas alınarak 193.0 x 27.0 m'dir. İstasyon yapısı Avrupa Otoyolu (O3) Güney Yan Yolu güneyinde Tema İstanbul Yolu kuzeyinde bulunan BHT Clinic İstanbul Tema Hastanesi önünde (batısında) konumlandırılmıştır. -İstasyon yapısı 3 katlıdır. İstasyon yapısının oturacağı arazi eğimi kuzeyden güneye ve batıdan doğuya doğru azalmakta olup, kotlar kuzey kesimde yaklaşık +25.0 ile +40.0 arasında güney kesimde ise yaklaşık +23.0 ile +30.0 arasında değişmektedir.

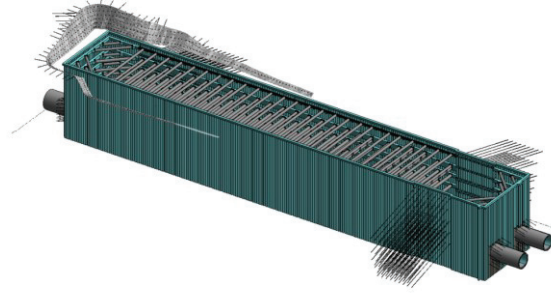
Sahadaki hâkim jeolojik koşullar, yapının ve mimari detayların belirlediği koşullar, çevre yapılanmanın ortaya koyduğu koşullar bir arada değerlendirilerek, bu sahada uygulanabilecek en uygun iksa sistemi alternatifi olarak fore kazıklı (80cm çapında- yerinde dökme betonarme), destek olarak öngermeli ankraj ve çelik strutların kullanıldığı bir iksa sistemi belirlenmiştir.

Yapım aşamasında ise hazırlanan planlama çalışmalarında TBM çalışmaları kritik aktivite olarak görülmektedir.

Bu sebeple TBM işletmesi yapılacak olan istasyonun bir an önce kazı kotuna indirilmesi ve TBM girişine hazırlanması gerekmektedir. Tema Park istasyonu, Mahmutbey Bahçeşehir Esenyurt Metro Projesinde TBM işletmesi yapılacak olan istasyondur. Projeye süresel avantaj sağlamak için Aç-kapa olarak tasarlanan istasyonun kazı destek sistemi olarak düşeyde fore kazık ve yatayda çelik strutlar kullanılmıştır (Şekil 4).

TBM parçalarının temele indirilmesi operasyonunda gerekli alanın oluşturulabilmesi için bir bölgede öngermeli ankrajlar kullanılmıştır. Kazı işlerini en kısa süre tamamlamak amacıyla ve

sahada strut ve öngermeli ankraj imalatlarının birbirine paralel ilerleyebilmesi için öngermeli ankrajların düşey aralıkları pratikte uygulanandan (1.5-2m) farklı ve strut kotlarına paralel olarak (yaklaşık 5m düşey aralık) belirlenmiştir.



Şekil 4 Tema Park istasyonu-2

3 JEOLJİK KOŞULLAR

İstanbul'un Kuzey-batısında yer alan inceleme alanı ve çevresinde temelde Istranca Masifine ait metamorfik ve İstanbul Paleozoyiğine ait sedimenter kayalar bulunmaktadır (Şen ve diğ., 1998). Bu temel üzerinde Trakya Havzasına ait Tersiyer yaşlı çökeller yer almaktadır. Trakya Havzası Çökelleri transgressif karakterli bir istifle başlamış, denizel-delta-lagün ve akarsu ortamlarında çökelen regresif bir istifle son bulmuştur.

Trakya Havzası'nın doğusunda sığ zonda bulunan inceleme alanı ve civarında Koyunbaba, Soğucak, Ceylan, Mezardere, Pınarhisar, Osmercık ve Danişmen, Çukurçeşme ve Bakırköy Formasyonu ile Güngören üyesi bulunmaktadır (Şen 1994, Sayar, 1977; Şen ve diğ., 1998).

Özetlenen bu jeolojik olaylar sonunda bölgede yeni bir karasallaşma dönemine girilmiş ve zaman zaman etkinlik gösteren menderesli akarsu koşulları altında ortaya çıkan kırıntılarla bölgenin en yaşlı litostratigrafik birimi olan Oligosen yaşlı Gürpınar Formasyonu gelişmiştir.

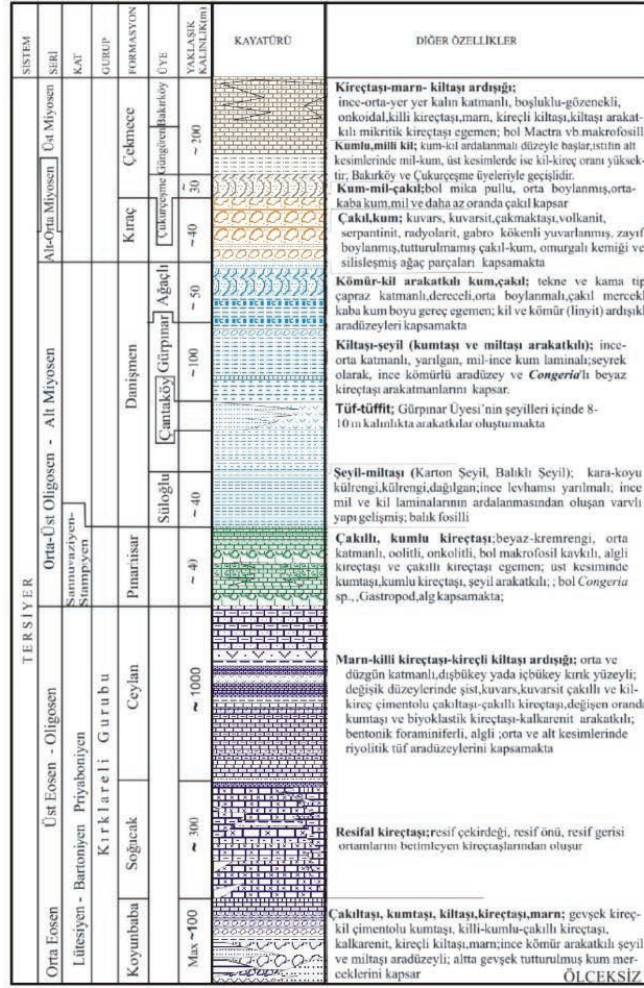
Gürpınar killeri üzerinde ağırlıklı olarak çakıllı kum ve kumlu çakıl seviyelerinden oluşan Miyosen yaşlı Çukurçeşme Formasyonu yer alır. Bu birimin de üstünde yine Miyosen yaşlı Güngören Formasyonu'nun kil-kum-silt seviyeleri yer almaktadır. En üstte ise kavkılı kireçtaşları ve tebeşirsi marnlardan oluşan Bakırköy Kireçtaşı birimi bulunmaktadır.

Ceylan formasyonu Kireçtaşı, killi kireçtaşı ve yer yer silt-kum ara seviyeli şeyl-marn aralanmasında oluşmaktadır. Birim, Ünal (1967) tarafından formasyon mertebesinde değerlendirilmiştir.

Ceylan Formasyonu gri, sarımsı killi kireçtaşı, çok az sarımsı renklerde silt-kum ara tabakaları içeren gri-yeşil renkli şeyl-marn aralanmasından oluşmaktadır. Ceylan Formasyonu Soğucak Formasyonu ile yanıl ve düşey geçişli olarak bulunmaktadır. Trakya havzasında bu birimin kalınlığı 400-1000 metreye kadar çıktığı ve havza kenarına doğru kamalanarak bittiği bilinmektedir. Birim şelf ortamında çökelmiştir (Şen 1994, Şen ve diğ., 1998).

İnceleme sahasını temsil eden genelleştirilmiş stratigrafik kesit aşağıda sunulmaktadır (Şekil 5).

Yapılan sondaj çalışmaları sonucunda karşılaşılan birimler ve yapılan sınıflandırmaya göre güzergah jeolojik karakter olarak aşağıdaki kısımlara bölünerek incelenecektir (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**).



Şekil 5. Araştırma sahasının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti

Çizelge 1 İnceleme güzergahının jeolojik kategorizasyonu

Kesim	Başlangıç Km	Bitiş Km	Kısmi Uzunluk (m)	Jeolojik Birimler
1	0+000	0+600	600	Dolgu / Kil (Çukurçeşme Form.)
2	0+600	2+325	1725	Dolgu / Alüvyon / Kil (Çukurçeşme Form.) / Kireçtaşı / Siltaşı- Kilaçtaşı (Ceylan Form.)
3	2+325	3+000	675	Kil (Çukurçeşme Form.) / Siltaşı- Kilaçtaşı / Kireçtaşı (Ceylan Form.)
4	3+000	3+500	500	Dolgu / Alüvyon / Kil / Kum (Çukurçeşme Form.) Kireçtaşı / Siltaşı- Kilaçtaşı (Ceylan Form.)
5	3+500	4+765	1265	Dolgu / Alüvyon / Kil / Killi Kum / Kuvars Çakıllı Killi Kum (Çukurçeşme Form.) / Siltaşı - Kilaçtaşı (Ceylan Form.)
6	4+765	7+129.603	2435	Dolgu / Alüvyon / Kireçtaşı / Siltaşı - Kilaçtaşı (Ceylan Form.)

3.1 Çalışma Alanı Jeolojisi

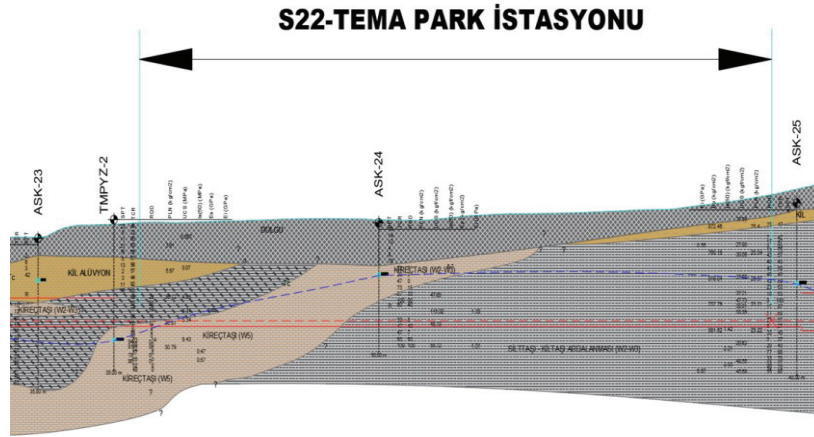
Çalışma alanı Tema Park İstasyon bölgesinde ASK-23 , ASK-24, ASK 25, ASK- 26 sondaj çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışma sonuçları incelendiğinde, proje alanında en üst kottan itibaren sırasıyla dolgu, alüvyon,çok sert kil ve devamındaki birim siltaşı kilaçtaşı ardalanması bulunmaktadır.

3.1.1 Alüvyon (Qal)

Alüvyonlar, geç Kuvaternerde İstanbul yarımadasında mevcut olan çeşitli akarsu ortamlarında depolanmış, gevşek blok-çakıl-kum-kilden oluşmuş çökellerdir. Genelde çapraz tabakalı ve devresel çökeller şeklinde olup kalınlıkları ve kendilerini oluşturan malzeme çevrelerine ve akarsuların fiziksel ve geometrik özelliklerine bağlıdır. Bu birim Holosen yaşlıdır.

3.1.2 Ceylan Formasyonu

Kireçtaşı, killi kireçtaşı ve yer yer silt-kum ara seviyeli şeyl-marn ardalanmasında oluşan birim Ünal(1967) tarafından formasyon mertebesinde değerlendirilmiştir. Ceylan Formasyonu gri, sarımsı killi kireçtaşı, çok az sarımsı renklerde silt-kum ara tabakaları içeren gri-yeşil renkli şeyl-marn ardalanmasından oluşmaktadır. Ceylan Formasyonu Soğucak Formasyonu ile yanal ve düşey geçişli olarak bulunmaktadır. Trakya havzasında bu birimin kalınlığı 400-1000 metreye kadar çıktığı ve havza kenarına doğru kamalanarak bittiği bilinmektedir. Birim şelf ortamında çökelmiştir (Şen 1994, Şen ve diğ., 1998). İstasyon jeolojik kesiti Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. İstasyon jeolojik kesiti

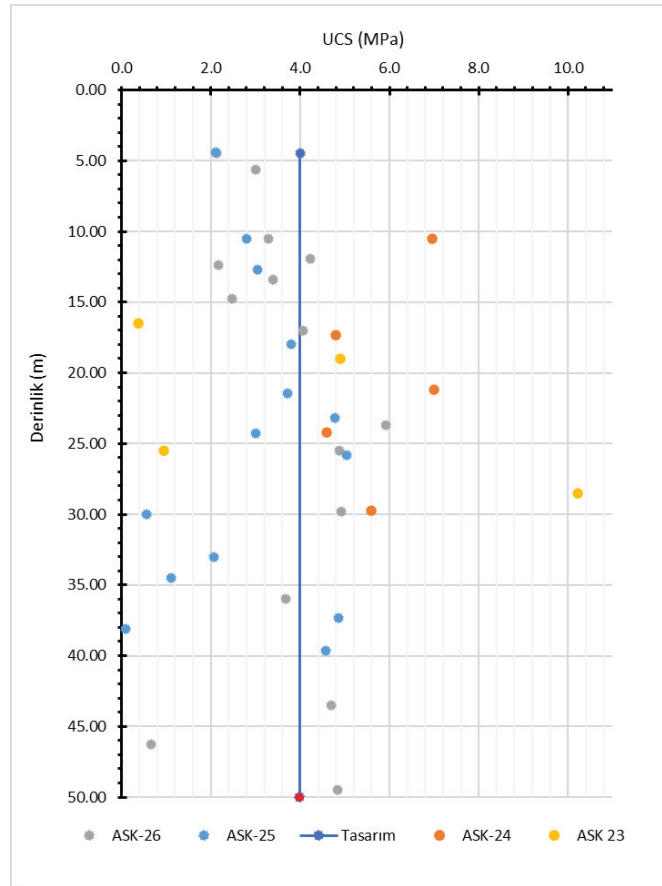
3.2 Arazi ve Laloratuvar Çalışmaları

Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Hattı Projesi'nde kapsamındaki zemin araştırma çalışmalarında, Temapark İstasyonunun bulunduğu bölgelerdeki zemin çalışmaları incelenmiş olup, tasarımına yönelik ASK-23, ASK-24, ASK-25 ve ASK-26 araştırma sondajları değerlendirilmiştir. Yüzeyde dolgu, dolgunun altında alüvyon , daha sonra orta dayanımlı Kilitaşı Siltaşı ardalanması görülmektedir. Sondaj bilgileri **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de görülmektedir.

Çizelge 2. Temapark İstasyonu Bölgesinde Gerçekleştirilen Sondajlar

Sondaj No	Ağız Kotu (m)	Sondaj Derinliği (m)	Dolgu Kalınlığı (m)	Zemin Kalınlığı (m)	Yass (m)
ASK-23	22.20	35.0	4.0	11	19.30
ASK-24	25.79	30.0	10.0	-	20.50
ASK-25	30.43	40.0	1.0	3.6	21.00
ASK-26	32.65	50.0	1.5	1.0	22.50

Laboratuvar deneyleri sonuçlarına göre belirlenen UCS derinlik grafiği Şekil 7’de verilmiştir. Ayrıca sondaj çalışmaları sırasında gerçekleştirilen arazi deneyleri ve bu çalışmalar neticesinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda belirlenen geomekanik parametreler **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**’de verilmiştir.



Şekil 7. Tema Park istasyonu UCS- derinlik grafiği

Çizelge 3. Tema Park istasyonu geomekanik parametre

İdealize Zemin Profili						
Başlangıç	Bitiş	Zemin Tipi	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E' MPa
0	8	Dolgu	18	1	28	15
8.7	16	Alüvyon	19	10	30	25
16	-	Silttaşı Kiltaşı	21	68	35	250

4 SAYISAL ANALİZ VE SAHA ÖLÇÜMLERİNİN SAYISAL ANALİZLE KARŞILAŞTIRILMASI

Uygulama aşamında hazırlanan planlama çalışmalarında TBM imatları kritik aktivite olarak görülmektedir. Bu sebeple TBM işletmesi yapılacak olan istasyonun bir an önce kazı kotuna indirilmesi ve TBM girişine hazırlanması gerekmektedir. Tema Park istasyonu, Mahmutbey Bahçeşehir Esenyurt Metro Projesinde TBM işletmesi yapılacak olan istasyondur.

Projeye süresel avantaj sağlamak için Aç-kapa olarak tasarlanan istasyonun kazı destek sistemi olarak düşeyde fore kazık ve yatayda çelik strutlar kullanılmıştır. TBM parçalarının temele indirilmesi operasyonunda gerekli alanın oluşturulabilmesi için bir bölgede öngermeli ankrajlar kullanılmıştır. Kazı işlerini en kısa süre tamamlamak amacıyla ve sahada strut ve öngermeli ankraj imatlarının birbirine paralel ilerleyebilmesi için öngermeli ankrajların düşey

aralıkları pratikte uygulanandan (1.5-2m) farklı ve strut kotlarına paralel olarak (yaklaşık 5m düşey aralık) belirlenmiştir. Ankrajlar için belirlen kök sürtünme değerleri için BS EN 8081 - 2017 - Code of Practice for Grouted Anchors ve FHWA-IF-99-015 - GEC 4 - Ground Anchors and Anchored Systems şartnamelerinden yararlanılmıştır.



Şekil 8. Tema Park istasyonu-3

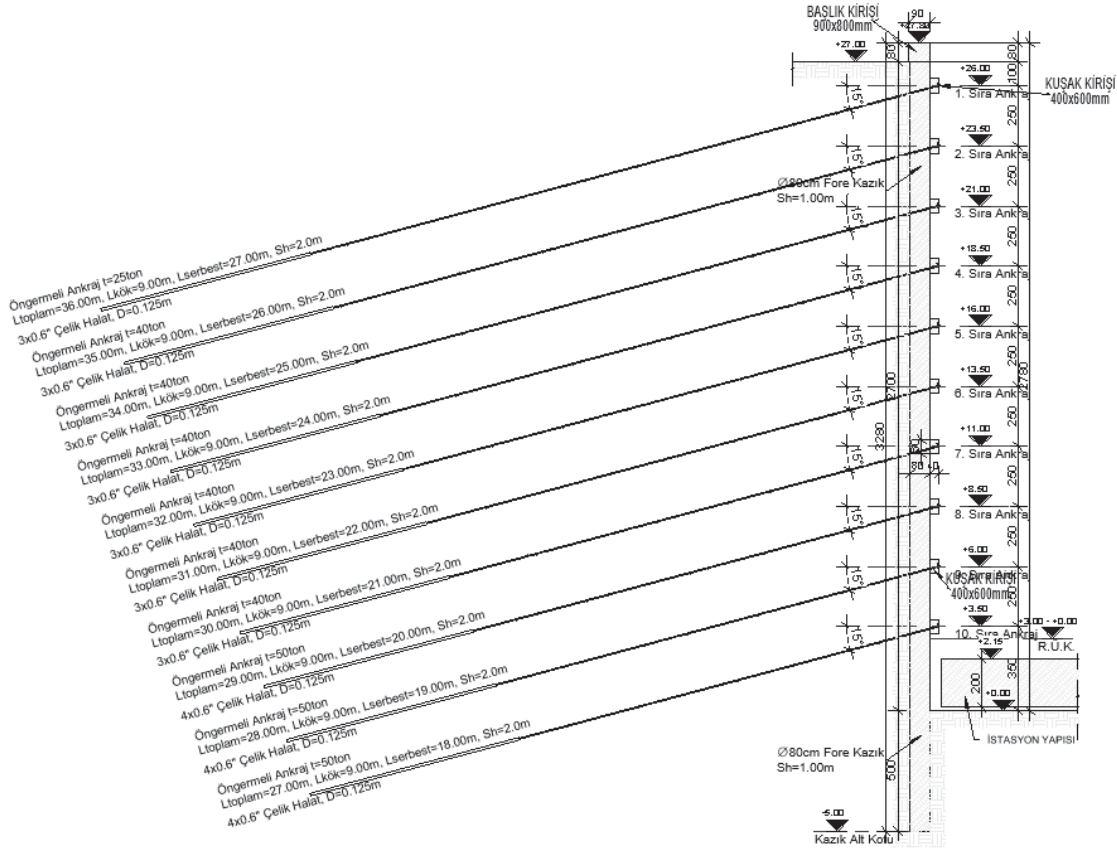
İlgili bölge ilk aşamada düşey aralıkları 2.5 m olan 10 sıra ankraj olarak projelendirilmiştir (Şek 9). Fakat ankraj imalatı uzun sürdüğünden dolayı ve süresel avantaj sağlamak adına yeni durumda düşey aralıkları 5m olan 5 sıra ankraj olarak güncellenmiştir (Şek. 10). Kazıklar 80cm çapında ve 100cm arayla imal edilmiştir. Kazık boyu başlık kirişi dahil 32.80m'dir. Kazık soket boyu ise 5m'dir. 3. ve 4. Sıra ile 5. ve 6. sırada tasarlanan ankrajlar kendi içlerinde düşeyde 60 cm arayla tasarlanmıştır. Bu ankrajların eğim açıları sırasıyla 15° ve 18° ve kuşak kirişleri 40*120 cm'dir.

Bu şekilde kazı kotuna hızlıca inilecek ve ankraj imalatlarının daha hızlı ilerleyeceği düşünülmüştür.

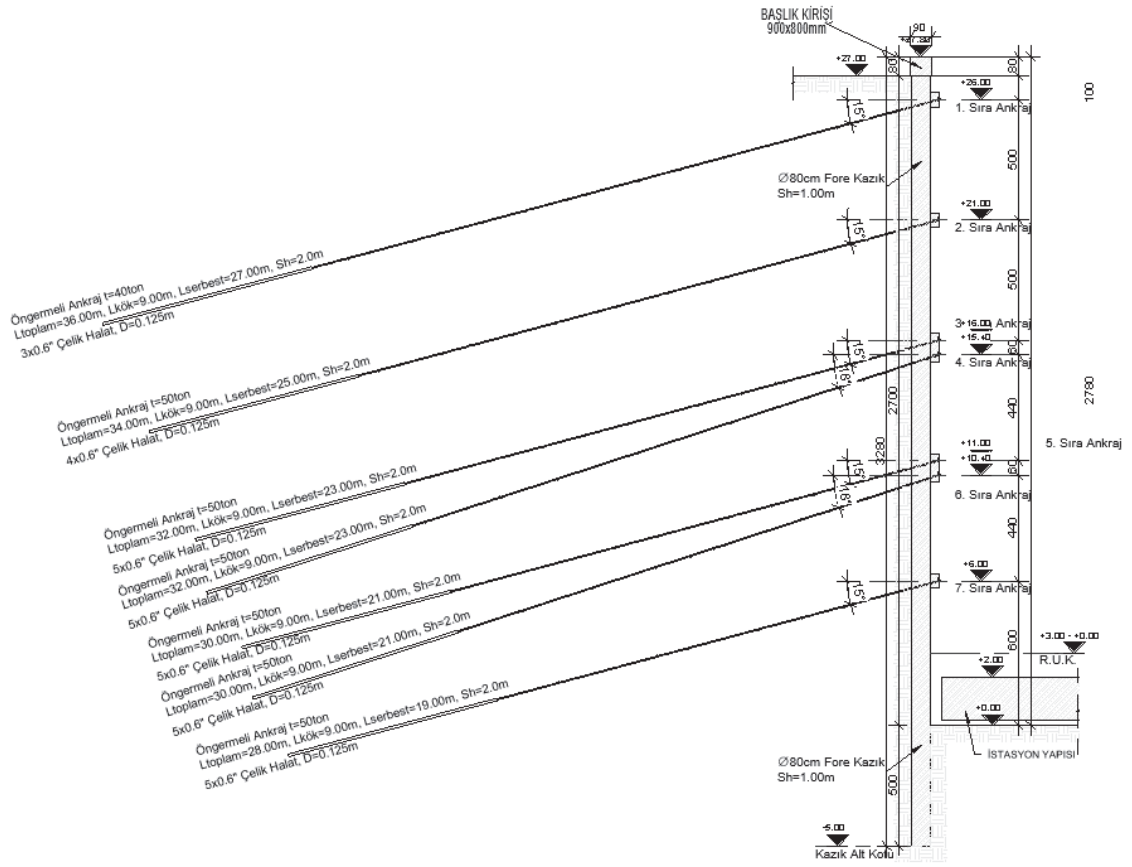
Ankrajlarla ilgili diğer detaylar aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Ankraj bilgileri tablosu

	Ankraj Kotu	Ankraj Boyu (m)	Ankraj Açısı	Ön Germe (ton)	Halat Sayısı	Kuşak Kirişi Boyutları (cm)
1. Sıra Ankraj	26.00	24+9	15°	40	3	40*60
2. Sıra Ankraj	21.00	25+9	15°	50	4	40*60
3. Sıra Ankraj	16.00	23+9	15°	50	5	40*120
4. Sıra Ankraj	15.40	23+9	18°	50	5	
5. Sıra Ankraj	11.00	21+9	15°	50	5	40*120
6. Sıra Ankraj	10.40	19+9	18°	50	5	
7. Sıra Ankraj	6.00	19+9	15°	50	5	40*60



Şekil 9. İlk model kesiti

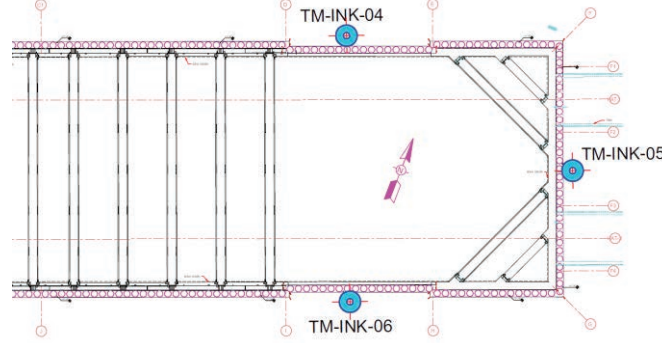


Şekil 10. Güncel model kesiti

4.1 Analiz Sonuçları

Plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde zemin ve kayanın inelastik, lineer olmayan davranışının modellenmesinde “Pekleşen Zemin-Hardening Soil Model” modelinin geçerli olacağı kabulü yapılmıştır.

Yukarıda verilen zemin parametreleri ve idealize zemin profili ile Plaxis’ten sistem deformasyonları ve fore kazıklarda oluşacak kesit tesirleri belirlenmiştir. Ayrıca kazı sonrası sistemin toptan güvenlik katsayısı kontrol edilmiştir ve 1.5 ile karşılaştırılmıştır.



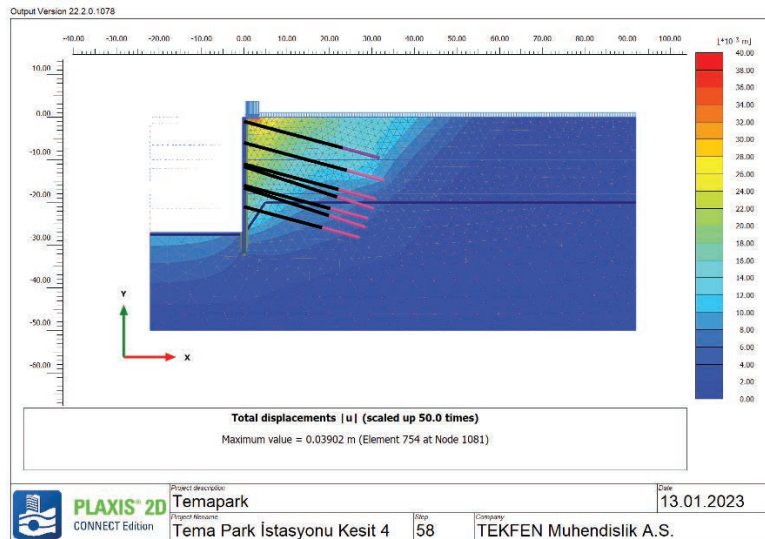
Şekil 11. Ankrajlı bölge planı

Şekil 11’de görüldüğü üzere Ankrajlı bölgelerde TM-INK-04 ve TM-IBK-06 inklinometre kuyuları açılmıştır. Bu kuyulardan alınan deformasyon okumaları ile analiz sonucu karşılaştırılmıştır.

4.1.1 Süresel Değerlendirme

Ankrajlı kazı iksa destek sistemi tasarlanırken ankrajlar pratikte 1.5 ile 2.5m düşey aralıklarla hesaplanır. Fakat kazı derinliği çok olan istasyonlarda bu uygulama çok zaman alacaktır. Bu projede süresel avantaj sağlamak adına Tema Park İstasyonu’nda bulunan ankrajlı bölgede ankrajlar düşeyde 5 m aralıklarla tasarlanmıştır. Bu tasarım sayesinde kazı kotuna en kısa zamanda inilerek projeye süresel avantaj sağlamıştır.

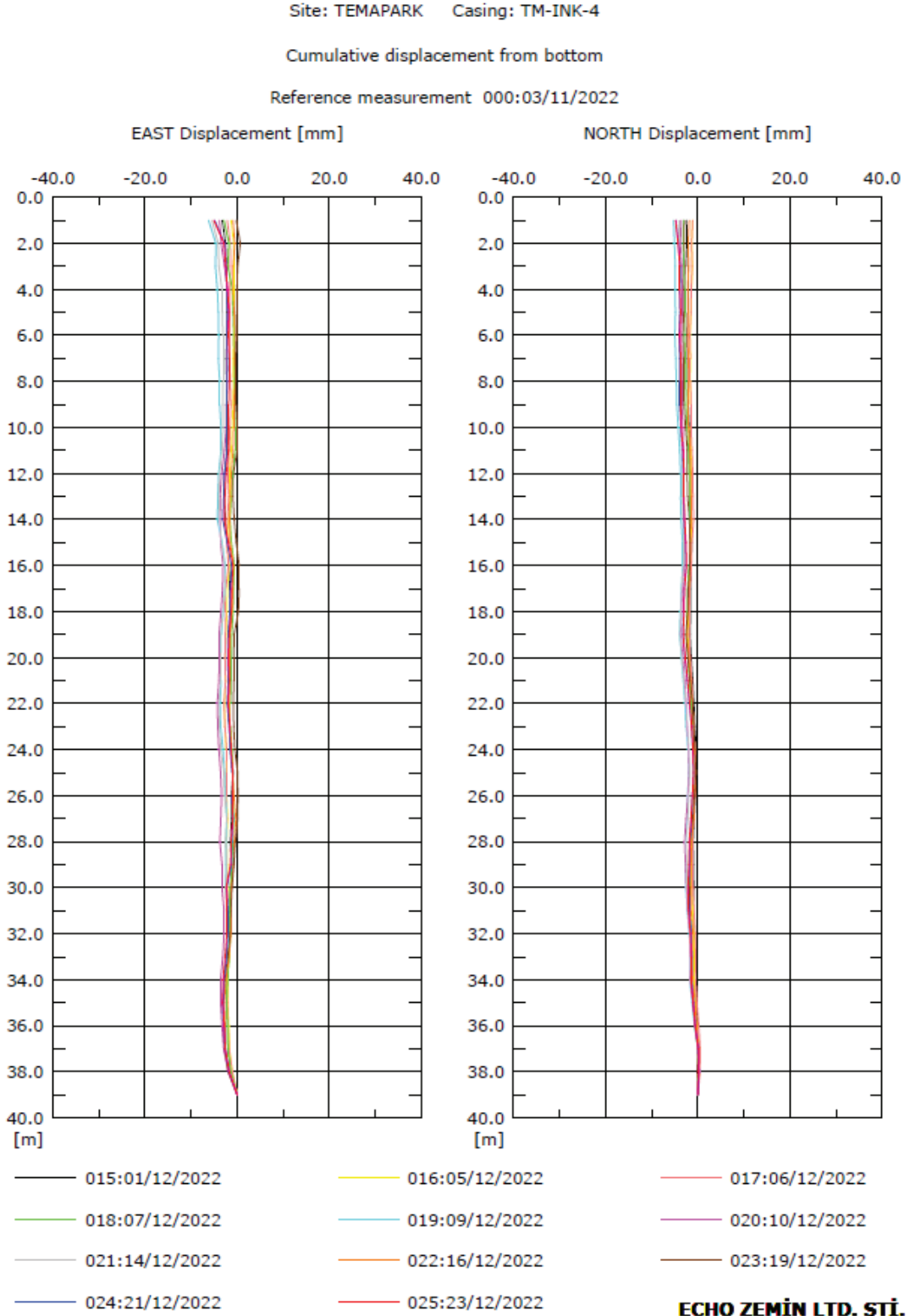
Şekil 12’de Plaxis programında kurulan sayısal modeli gösterilmiştir.



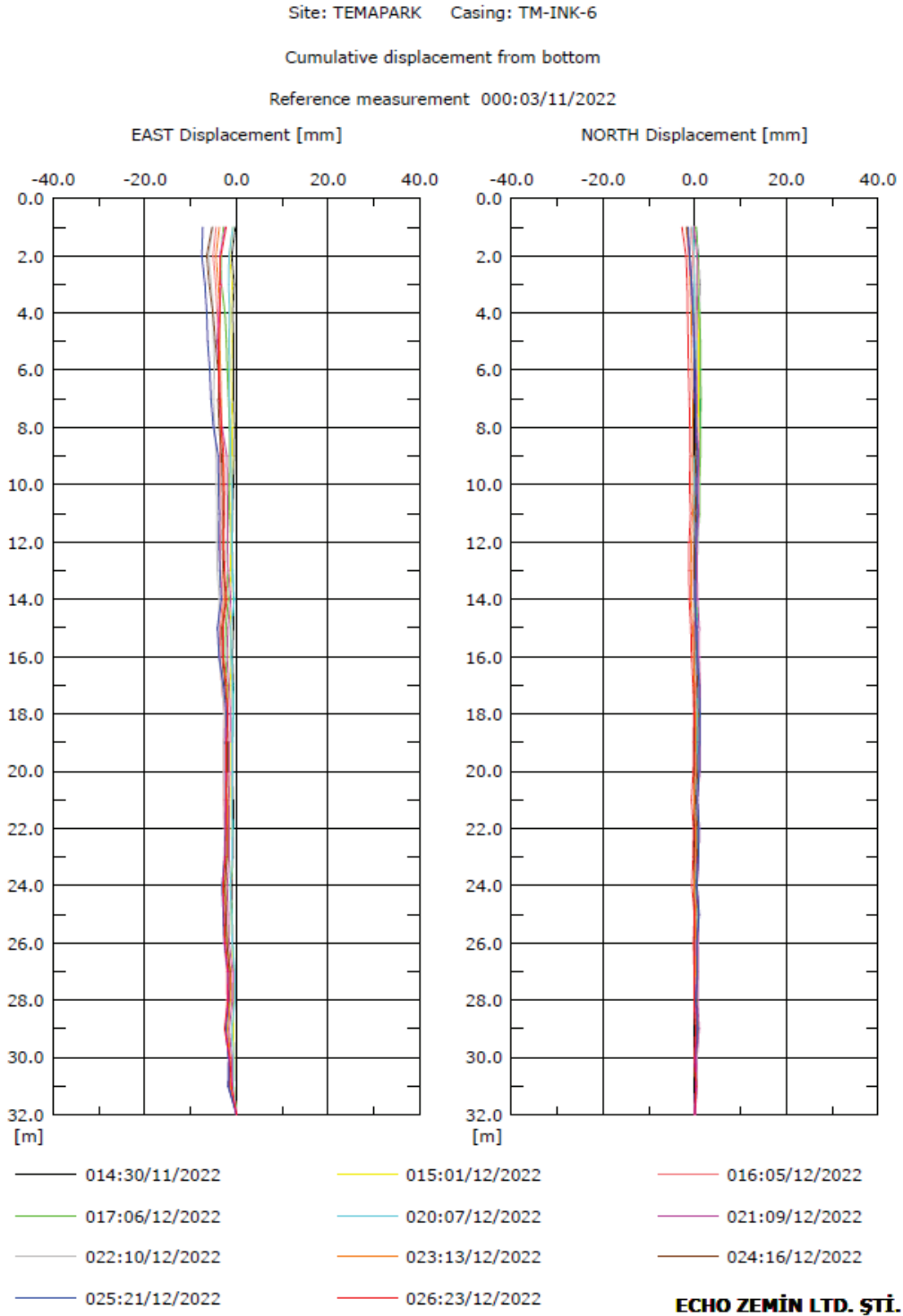
Şekil 12. Analiz sonucu

4.1.2 Deplasman Kontrolü

Literatürde yatay destekli kazıkların, yatay deplasman sınırlarının %0.2 ile %0.5 arasında kalması önerilmektedir. İlk tasarıma göre yapılan analiz sonucunda deplasmanın 3.2cm çıktığı ikinci tasarımda ise deplasman 2.5cm olduğu görülmüştür. Ayrıca sahadan alınan inklinometre ölçümlerin 8 mm-10 mm arasında olduğu ve tasarımsal sonuç ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Şekil 13 ve 14’de saha ölçüm sonuçları verilmiştir.



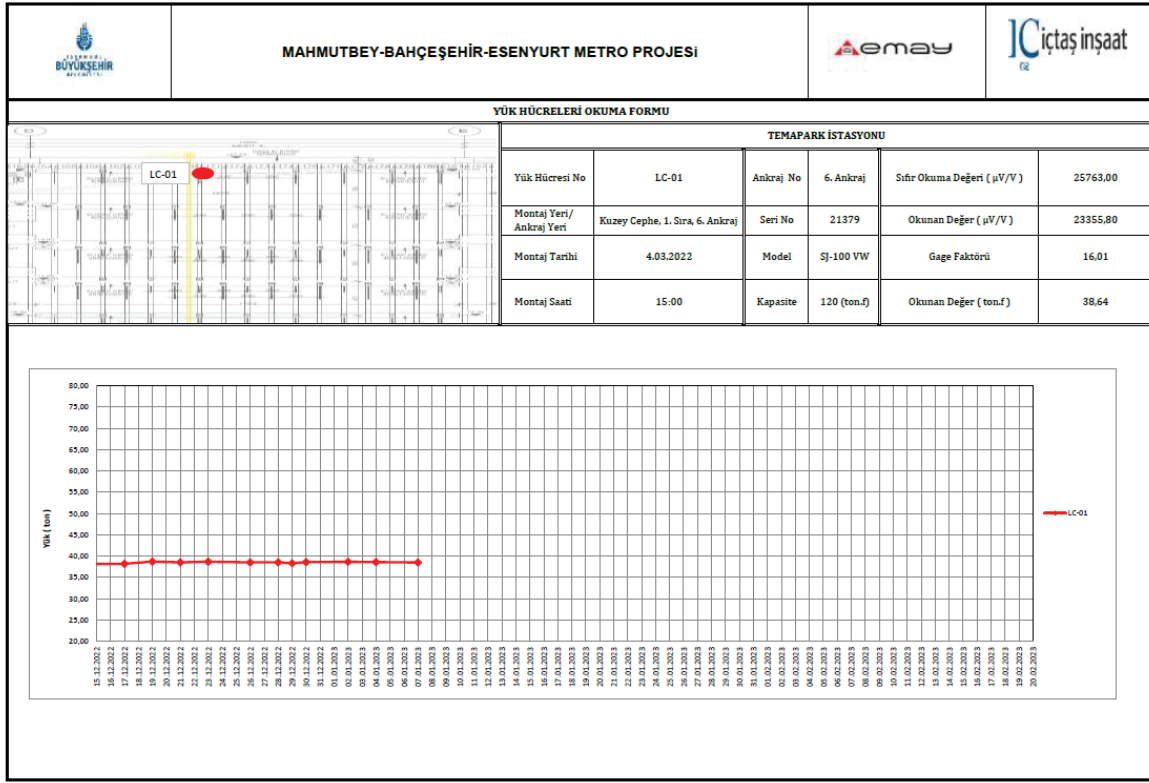
Şekil 13. TM-INK-04 saha ölçüm sonucu



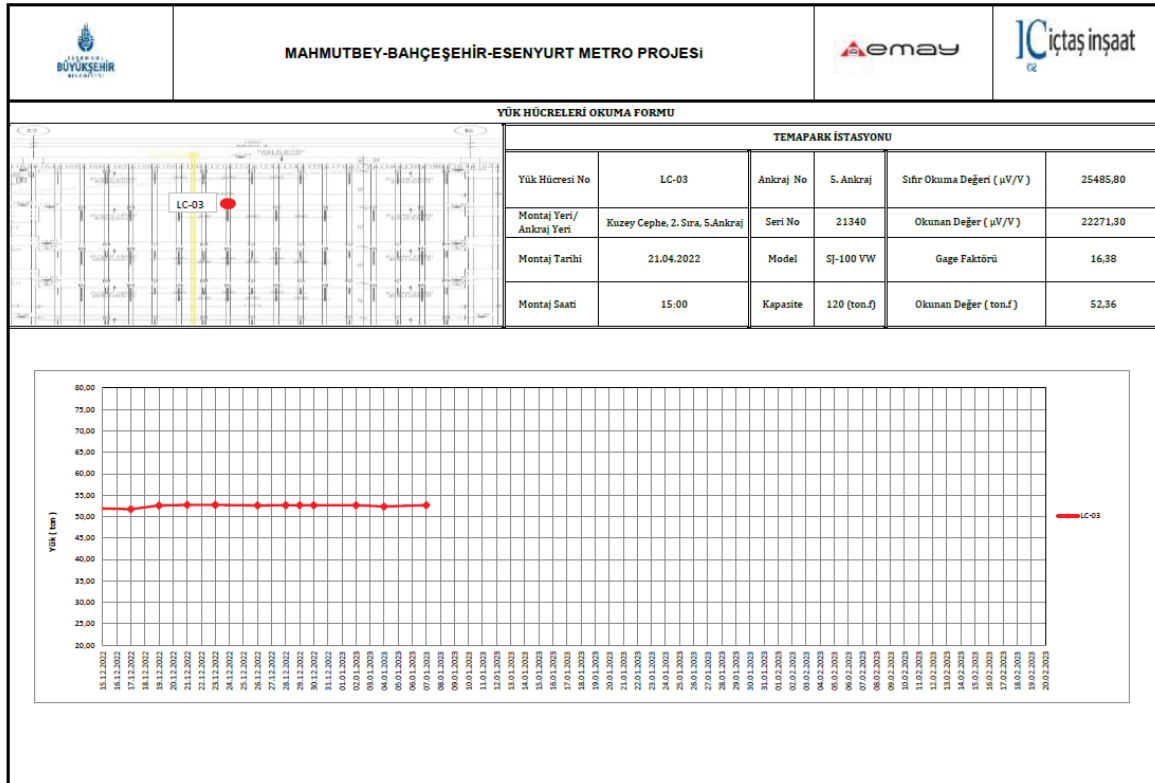
Şekil 14. TM-INK-06 saha ölçüm sonucu

4.1.3 Ankraj Kuvvetleri Kontrolü

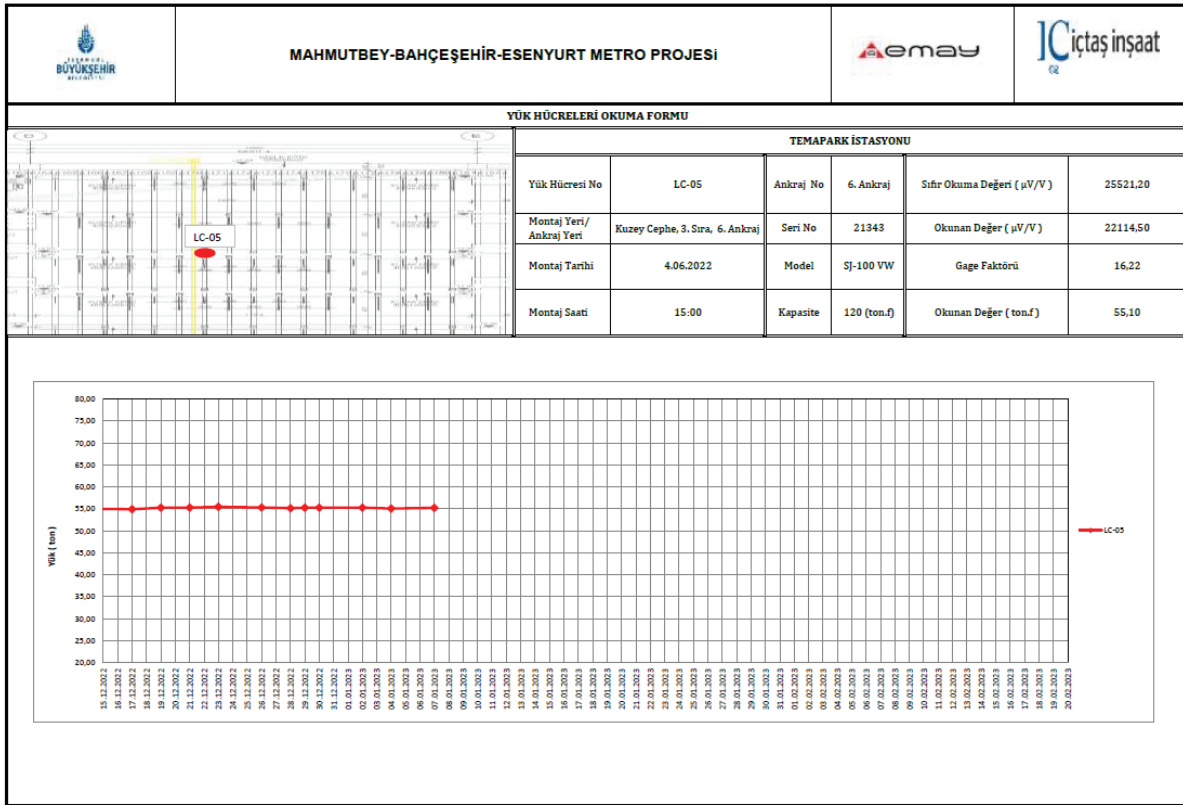
Sayısal analizi gerçekleştirilen konu bölgenin sonuçları ile sahada alınan ölçüm sonuçları uyumluluk göstermektedir. Saha ölçüm sonuçları aşağıda verilen şekil 15, 16, 17 ve 18’de gösterilmiştir.



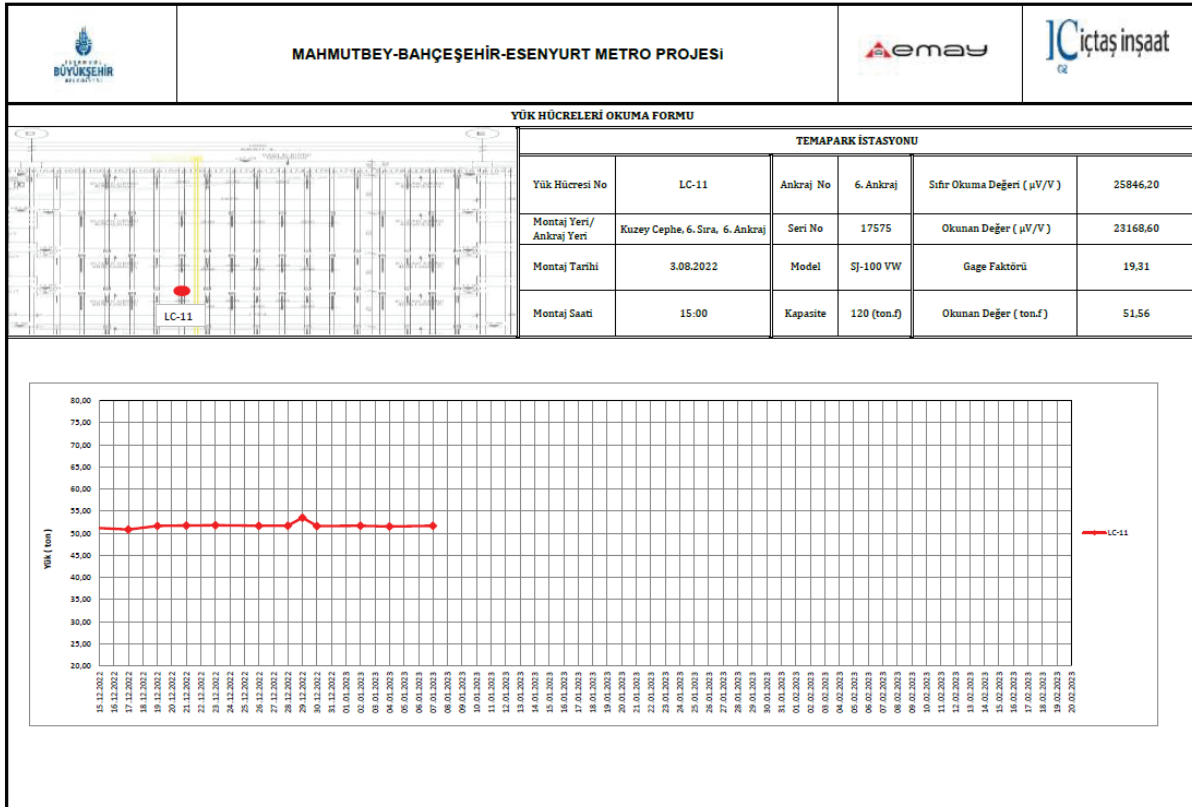
Şekil 15. 1. Sıra 6. ankraj ölçüm sonucu



Şekil 16. 2. Sıra 5. ankraj ölçüm sonucu



Şekil 17. 3. Sıra 6. ankraj ölçüm sonucu



Şekil 18. 6. Sıra 6. ankraj ölçüm sonucu

5 SONUÇLAR

Yapımı devam etmekte olan Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Projesinin kazısı devam eden Tema Park İstasyonu kazısı sırasında yapılan ankraj uygulaması bu bildiriye konu edilmiştir.

TBM işletmesi yapılacak bu istasyonun kazı işleri en kısa sürede tamamlanması gerekmektedir. Bu hedefe ulaşabilmek için Sahadaki strut ve öngermeli ankraj imalatlarının birbirine paralel ilerleyebilmesi mecburidir. Bu yüzden öngermeli ankrajların düşey aralıkları pratikte uygulanandan (1.5-2m) farklı ve strut kotlarına paralel olarak (yaklaşık 5m düşey aralık) belirlenmiştir. Bu doğrultuda tasarlanan kazı destek sistemi Plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçları sahadan alınan ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

Kazık yatay deplasmanı literatürde belirlenmiş %0.2 ile %0.5 arasında kalmaktadır. Ayrıca sayısal analiz sonuçları ile sahada inklinometrelerden alınan sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Sayısal analiz sonuçlarına göre hesaplanan ankraj kuvvetleri ile sahada yük hücrelerinden alınan sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Projeye çok ciddi süresel avantaj sağlayan bu tasarımın, sahadan alınan ölçüm sonuçlarıyla pratikteki ankraj tasarım sonuçlarının uyumlu olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Acaroğlu Ergün E., Bayram O., 2011, Kadıköy Kozyatağı Arası Tünel Kazısında Kullanılan EPB Tünel Açma Makinaları Kazı Parametreleri Analizi, 22. Uluslararası Madencilik Kongresi, Bildiriler Kitabı 11-13 Mayıs 2011.
- Ateş U, Bilgin N, Çopur H., (2014,) Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects. *Tunn Undergr Space Technol* 40:46–63
- BS 8081-2017, British Standard Code of Practice for Ground Anchorages, 2017,76s.
- FHWA-IF-99-015, Geotechnical Engineering Circular No.4, Ground Anchors and Anchored Systems, June 1999,94s.
- Plaxis 2D 20123 Delft University of Technology & Plaxis bv, The Netherlands.
- Paltrinieri E, Sandrone F, Zhao J (2016) Analysis and estimation of gripper TBM performances in highly fractured and faulted rocks. *Tunn Undergr Space Technol* 52:44–61
- Ünal, O 1967, I. Bölge (Marmara) Trakya jeolojisi ve petrol imkanları T:P.A.O Arama Grubu Arşivi ,391
- Sayar, C., (1997) İstanbul yeni iskan yöreleri geoteknik ve sismik etüdü. Büyükçekmece-Küçükçekmece Göller arası yöre, Boğazii Üniverste Deprem Mühendisliği Araştırma Enstitüsü, basılmamış rapor, cilt I, 14-27.
- Şen, Ş., 1994 Çekmece gölleri arasındaki bölgesinin jeolojisi ve sedimenter özellikleri: Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 66s.
- Şen, Ş., Korl, H., Önal, M., 1995, Trakya Havzası Doğusunun Jeolojisi. Trakya Havzası Jeoloji Sempozyumu, Abstract, 25.
- Şen C., ve Kaygusuz A., 1998, Doğu Pontid ada yayı granitlerin petrografik ve kimyasal özellikleri. Türkiye Cumhuriyetin 75. Yılında Fırat Üniversitesi'nde Jeoloji Mühendisliği Eğitiminin 20. Yılı Sempozyumu Bildiri Özleri, 12-13.

Kayaç Delinebilirliğinin Kırılma Tokluğuna (Mod-I) Bağlı Olarak Tahmini

Prediction of Rock Drillability Based on Fracture Toughness (Mode-I)

G. Ekincioğlu

Ahi Evran Üniversitesi, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Kırşehir

D. Akbay

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Çanakkale

N. Şengün, R. Altındağ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Isparta

ÖZET: Kırılma tokluğu; şev stabilite analizleri, yeraltı-tünel kazıları ve delme-patlatma uygulamaları için büyük önem taşımaktadır. Kırılma tokluğunun belirlenebilmesi için kullanılan farklı yöntemler mevcuttur. Delinebilirlik kavramı da mekanik kazı makinelerinin yeraltı kazılarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmasıyla projelerin planlanması ve maliyetlerinin tahmin edilmesinde önemli bir parametre haline gelmiştir. Kayaçların delinebilirliği iki farklı deneyden elde edilen sonuçların birlikte değerlendirilmesi ile belirlenmekte olup delme oranı indeksi (DRI) olarak ifade edilmektedir. Hem kırılma tokluğu hem de DRI belirlenirken kullanılan yöntemlerin genel özelliği, ihtiyaç duyulan ekipman ve numune hazırlamadaki zorluklardır.

Bu çalışmada, on farklı kayacın kırılma tokluk değerleri iki farklı deney yöntemi ve nokta yük dayanım indeksinin ($I_{s(50)}$) kullanıldığı bir ampirik eşitlik elde edilmiştir. Kayaçların DRI değerleri de deneysel olarak belirlenerek her iki kayaç özelliği arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak irdelenmiştir. $I_{s(50)}$ kullanılarak kayaçların kırılma tokluğunun pratik, hızlı, ekonomik bir şekilde belirlenebileceği ve belirlenen bu tokluk değeri ile de kayaçların DRI değerlerinin tahmin edilebileceği görülmüştür.

ABSTRACT: Fracture toughness; It is of great importance for slope stability analysis, underground-tunnel excavation and drilling-blasting applications. There are different methods used to determine fracture toughness. The term of drillability has also become an important parameter in planning projects and estimating their costs, with the widespread use of mechanical excavation machines in underground excavations. The drillability of rocks is also determined by evaluating the results obtained from two different tests together and is expressed as the drilling rate index (DRI). The general feature of the methods used to determine both fracture toughness and DRI is the equipment needed and difficulties in sample preparation.

In this study, an empirical equation was obtained using the fracture toughness values of ten different rocks, two different test methods and point load strength index. The DRI values of the rocks were also determined experimentally and the relationships between the two rock properties were examined statistically. It has been seen that the fracture toughness of the rocks can be determined in a practical, fast and economical way by using the point load strength index, and the DRI values of the rocks can be estimated with this toughness value.

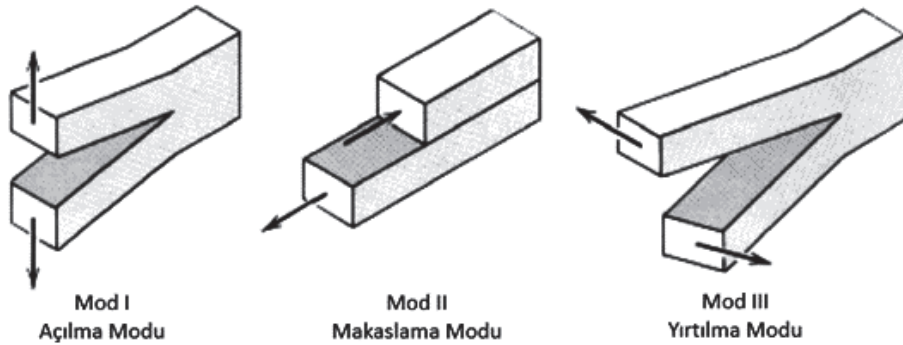
1 GİRİŞ

Kırılma tokluğu; kırık, çatlak, boşluk gibi yapısal kusurları bulunan bir malzemenin kırılmaya karşı direncini ifade eden mekanik bir özelliktir. Diğer bir ifadeyle mevcut kusurlarının yayılması veya gelişmesi için gerekli olan gerilme miktarının göstergesidir. Bu özelliğinden

dolayı kırılma tokluğu, birçok alanda sıklıkla başvuru, ihtiyaç duyulan ve gelişimini sürdüren önemli bir konudur (Sönmez, 2018).

Kayaçlarda delme-patlatma, kazma, tünel açma gibi parçalanma işlemlerinde kayacın yapısal özellikleri ön plana çıkmaktadır. Kırılma tokluğu (ISRM, 1988) kayaçların sınıflandırılmasında (Gunsallus ve Kulhawy, 1984), model ölçekli patlatma ve tünel açma işlerinde (Nelson ve Fong, 1986), kayaç parçalanma modellemesinde girdi parametresi olarak ve boyut küçültmede işlemlerinde uygun kırıcı türünün seçiminde kullanılmaktadır. Ayrıca kırılma tokluğu, barajların stabilitesini analiz etmek (Huang vd., 1987) ve yapıdaki çatlamaı incelemek amacıyla da kullanılmaktadır (Lajtai ve Bielus, 1986; Altındağ, 2000).

Malzemelerdeki çatlak ilerleme davranışı üç farklı şekilde gelişmektedir (Şekil 1). Bunlar sırasıyla Mod-I, Mod-II ve Mod-III olarak adlandırılmaktadır. Çatlağın ilerlemesi bu modların biri, ikisi veya üçünün de aynı anda oluşmasıyla olabilir (Şengün, 2009). Genellikle çatlak mekaniğinde en çok karşılaşılan ve uygulama açısından en kolay çatlak modu Mod-I'dir. Bu nedenle çatlak mekaniğinde pek çok çalışma Mod-I üzerinde yoğunlaşmıştır (Whittaker vd., 1992; Park, 2006; Su, 2010; Sakız, 2019). Açılma veya gerilme modu olarak adlandırılan Mod-I kırılma tokluğunda çatlak ucu, çatlak düzlemine dik yönde yer değiştirmelere maruz bırakılmaktadır. Bu yüzden çatlak yayılımı çatlak düzlemi yönünde gelişmektedir. Kayma veya kesme modu olarak adlandırılan Mod-II kırılma tokluğunda çatlak yüzeyleri, çatlak düzleminde nispeten birbirlerine doğru hareket etmekte, yırtılma veya düzlem dışı kayma modu olarak adlandırılan Mod-III kırılma tokluğunda ise çatlak düzleminde yüzeye doğru paralel hareket etmektedir. Bu modların herhangi ikisinin kombinasyonu ile kırılma meydana gelmesi durumunda ise buna karma ya da karışık mod adı verilmektedir (Backers, 2004; Özdemir, 2020).



Şekil 1. Çatlak ilerleme modları (Whittaker vd., 1992)

Madencilikte delme işlemi kaya malzemesini kazma ve çoğunlukla patlatma işlerinde patlayıcı şarjının yapılacağı deliklerin delinmesi için gereklidir. Delme işleminin kolaylığı veya zorluğu kayacın delinmeye karşı gösterdiği dirence göre değerlendirilir ve kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerine göre değişmektedir. Kayaların delinebilirlikleri, arazide ya da laboratuvarda yapılan delik delme işlemi sonunda delik boyunun delme işlemi için geçen süreye oranı olarak ifade edilmektedir. Kaya delinebilirliği laboratuvar ortamında kırılma deneyi (S_{20}) ve Sievers minyatür delme deneyinden (SJ) elde edilen sonuçların birlikte değerlendirilmesi ile belirlenir ve delme oranı indeksi (DRI) değeri olarak ifade edilir (Ekincioglu ve Akbay, 2021). Bu indeks, 1943 yılında İsviçre'de N. Von Matern ve A. Hjelmer tarafından geliştirilmiş olup 1950'li yılların sonundan itibaren kayaçların delinebilirliklerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır (Tamrock, 1984).

Bu çalışma kapsamında, karbonat kökenli on farklı kayacın (traverten, kireçtaşı, hakiki mermer) Mod-I kırılma tokluk değerleri; V-Çentikli Brazilian Diski (CCNBD) deneyi, Tek Kenar Çentikli Kiriş (SENB) deneyi ve Bearman (1999)'nın önerdiği hesaplama şekli ile nokta yük dayanım indeksi ($I_{s(50)}$) deneyinden yararlanarak üç farklı yöntemden elde edilmiştir. Daha

sonra aynı kayaçların delinebilirlik oranı indeks (DRI) değerleri belirlenerek her iki kaya özelliği arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak irdelenmiştir.

2 MATERYAL VE METOD

Çalışma kapsamında Türkiye'nin farklı bölgelerinden 10 farklı karbonatlı kayaç temin edilmiştir (Çizelge 1). Her ne kadar incelenen kayaç grubu içerisinde sedimanter kayaçlar bulunsa da bariz tabakalanma düzlemleri görülmemiştir. Çalışmada öncelikle kayaçların DRI değerlerini belirlemek amacıyla S₂₀ deneyi ve SJ deneyleri gerçekleştirilmiş olup CCBND, I_{s50} ve SENB gibi üç farklı Mod-I kırılma toklukları değerleri belirlenmiştir. Daha sonrasında elde edilen tokluk değerleri ile DRI değerleri arasındaki ilişkiler basit regresyon analizleri ile incelenmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan kayaçlar

Kayaç Adı	Kayaç Kodu	Jeolojik Köken	Bölge
Ağlasun Bej	AB	Sedimanter	Burdur
Adıyaman Emperador	AE	Sedimanter	Adıyaman
Burdur Bej	BB	Sedimanter	Burdur
Bucak Traverten	BT	Sedimanter	Burdur
Denizli Traverten	DT	Sedimanter	Denizli
Kaplan Postu	KP	Metamorfik	Afyon
Marmara Grili	MG	Metamorfik	Balıkesir
Muğla Beyaz	MB	Metamorfik	Muğla
Rozalya Bej	RB	Sedimanter	Bilecik
Simena Limra	SL	Sedimanter	Antalya

2.1 Kayaçların kırılma tokluk değerleri

Kırılma tokluğu, numunelerde kontrollü çatlaklar geliştirerek belirlenmektedir. Numunelerde oluşturulmuş, önceden varmış gibi davranış gösteren yapay çatlağın ucu, gerilmelerin yoğunlaştırılması, fazla yüklemenin önlenmesi ve kontrollü çatlağın gelişmesi için keskin bir çentik şeklinde hazırlanmaktadır. Kayaçlarda, kırılma tokluğu değerini belirlemek farklı deney yöntemleri önerilmiş olup bu çalışma V-Çentikli Brazilian Diski (CCNBD), Tek Kenar Çentikli Kiriş (SENB) yöntemleri ile birlikte sıra I_{s(50)} deneyinden elde edilen değerlerin kullanıldığı ampirik bir eşitlik kullanılmıştır.

2.1.1 V-Çentikli Brazilian Diski

Bu deney yöntemi; numune hazırlama işleminin nispeten kolay olması, diğer yöntemlere göre daha yüksek kırılma yükü değerleri elde ediliyor olması, farklı yükleme modlarına (Mod-I, Mod-II ve karışık Mod) uygun olması ve deney yönteminin basitliğinden dolayı diğer önerilmiş deney yöntemlerine göre daha çok kullanıldığı için (Fowell vd., 2006) tercih edilmiştir. Çapı 54 mm, kalınlığı 20 mm olan V-çentikli Brazilian Diski (CCNBD) numuneleri hazırlanarak, her kayaç türünde 6 adet numune üzerinde kırılma tokluğu deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Kayaçların kırılma toklukları Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.

$$K_{IC-CCNBD} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{D}} Y_{min}^* \quad (1)$$

$$Y_{min}^* = ue^{v\alpha_1} \quad (2)$$

D = Numune çapı, m

B = Numunenin kalınlığı, m

P_{\max} = Kırılma yükü, MN

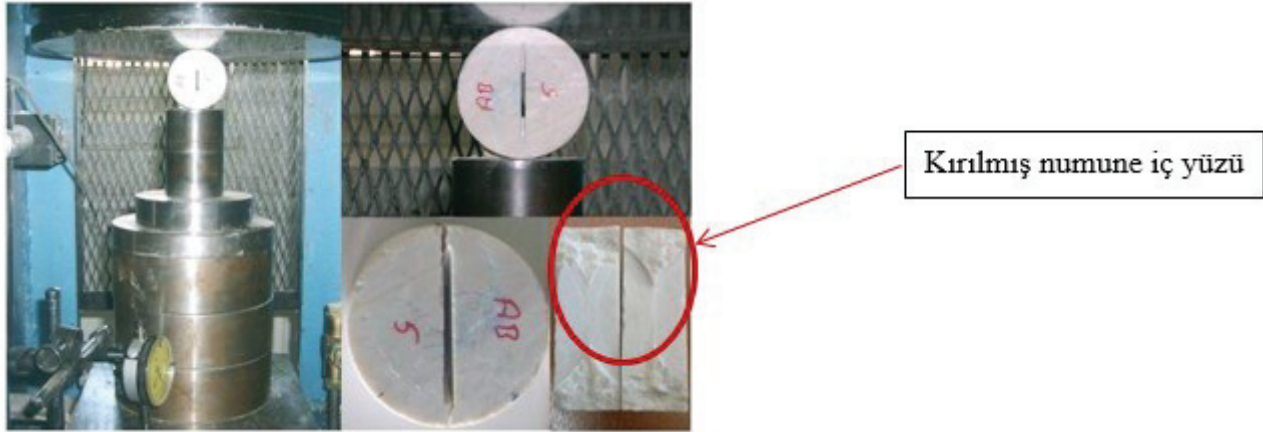
Y_{\min}^* = Kritik boyutsuzluk faktörü (CCNBD numunesinin çeşitli geometrik şekilleri kullanılarak sayısal analiz sonuçlarından uyarlanarak belirlenir (ISRM, 2007)

u ve $v = \alpha_0$ (a_0/R) ve α_B (B/R) değerleri kullanılarak Çizelge 2'den belirlenir (ISRM, 2007)

α_1 = Çatlak uzunluğunun numune çapına oranı (a/R)

Çizelge 2. Standart CCNBD numunesi geometrik boyutları (ISRM, 2007)

Tanım	Değer	Boyutsuzluk ifadesi
Numune Çapı (D) mm	75	
Numune kalınlığı (B) mm	30	$\alpha_B = (B/R) = 0,80$
Başlangıç çatlağının uzunluğu (a_0) mm	9,89	$\alpha_0 = (a_0/R) = 0,2637$
Çatlağın son uzunluğu (a_1) mm	24,37	$\alpha_1 = (a_1/R) = 0,65$
Testere çapı (D_s) mm	52	$\alpha_s = (D_s/R) = 0,6933$
Kesme derinliği (h_c) mm	16,95	
Y_{\min}^*	0,84	
Kritik çatlak uzunluğu (a_m) mm	19,31	$\alpha_m = (a_m/R) = 0,5149$



Şekil 2. CCNBD yöntemi kırılma tokluğu deneyi (Şengün, 2009)

Çizelge 3. Kayaçların $K_{IC-CCNBD}$ değerleri

Kayaç Kodu	$K_{IC-CCNBD}$ $MNm^{-3/2}$
AB	1,16*
AE	1,76
BB	1,26*
BT	0,71*
DT	0,78*
KP	1,21*
MB	0,71*
MG	1,01*
RB	1,62
SL	0,69*

*Şengün, 2009

2.1.2 Tek Kenar Çentikli Kiriş

Bu deney yöntemi; numune hazırlama ve deney uygulama koşullarının nispeten kolay olması nedeniyle tercih edilmiştir. Tek Kenar Çentikli Kiriş (SENB) yöntemi için her kayaç türünden 20x30x150 mm kenar uzunluklu dikdörtgen prizma şeklinde 6 adet numune hazırlanmış ve numunelerin alt kısımlarından 7,5 mm derinliğinde 3,2 mm genişliğinde çentikler açılmıştır (Şekil 3). Dört noktadan yükleme yapılarak numuneler kırılmıştır. Kayaçların kırılma toklukları Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4’de verilmiştir.

$$K_{IC-SENB} = \frac{P_f \times Y}{b \times h^{0,5}} \quad (3)$$

$$Y = \frac{3(L_e - L_i)\alpha^{0,5}X}{2h(1-\alpha)^{1,5}} \quad (4)$$

$$X = 1,9887 \left[\frac{(3,49 - 0,68\alpha - 1,35\alpha^2)}{(1+\alpha)^2} \right] - 1,32\alpha \quad (5)$$

P_f = Kırılma yükü, MN

b = Numunenin eni, m

h = Numunenin yüksekliği, m

Y = Uygunluk faktörü

X = Boyutsuzluk faktörü

L_e = Dıştaki yükleme noktaları arası mesafe, m

L_i = İçteki yükleme noktaları arası mesafe, m

a = Çentik mesafesi, m

α = Boyutsuzluk faktörü (a/h)



Şekil 3. SENB yöntemi kırılma tokluğu deneyi (Şengün, 2009)

Çizelge 4. Kayaçların $K_{IC-SENB}$ değerleri

Kayaç Kodu	$K_{IC-SENB}$ MNm ^{-3/2}
AB	0,68*
AE	1,05
BB	0,89*
BT	0,64*
DT	0,54*
KP	0,86*
MB	0,64*
MG	0,70*
RB	1,12
SL	0,57*

*Şengün, 2009

2.1.3 Nokta Yük Aparatı ile Kırılma Tokluğunun Belirlenmesi

Kayaçların kırılma toklukları deneysel olarak belirlenen nokta yükleme dayanımı değerleri kullanılarak hızlı bir şekilde önerilen ampirik eşitliklerle belirlenebilmektedir (Bearman, 1999). Bu yöntemde kırılma tokluğu değeri, nokta yükleme dayanımı deneyi karot numune üzerinde çapsal yükleme yapılarak belirlendiyse Eşitlik 6, karot numune üzerinde aksenal yükleme yapılarak belirlendiyse veya deney blok numuneler üzerinde uygulandıysa ise Eşitlik 7 yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu çalışmada $I_{s(50)}$ deneyleri prizmatik numuneler üzerinde

uygulanmış olup, kayaçların kırılma toklukları Eşitlik 7 yardımıyla hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir.

$$K_{IC-Is(50)} = \frac{29,84 \times P}{D^{1,5}} \quad (6)$$

$$K_{IC-Is(50)} = \frac{26,50 \times P}{W \times D^{0,75}} \quad (7)$$

P = Kırılma yükü, MN

D = Konik başlıklar arası mesafe, m

W = Numunenin eni, m

Çizelge 5. Kayaçların $K_{IC-Is(50)}$ değerleri

Kayaç Kodu	$K_{IC-Is(50)}$ MNm ^{-3/2}
AB	1,05*
AE	1,30
BB	1,20*
BT	0,90*
DT	0,81*
KP	0,78*
MB	0,79*
MG	0,73*
RB	1,38
SL	0,80*
*Şengün, 2009	

2.2 Kayaçların Delme Oranı İndeks Değerleri

DRI, kayaçların delinebilirliklerinin zorluğunun veya kolaylığının bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Bu indeks, 1943 yılında İsviçre'de N. Von Matern ve A. Hjelm tarafından geliştirilmiştir. Bu deney yöntemi birkaç değişiklikten sonra standart hale gelmiş ve 1950'li yılların sonundan itibaren kayaçların delinebilirliklerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır. DRI, iki temel laboratuvar deneyine (kırılma ve minyatür delme deneyi) bağlı olarak bulunmaktadır (Tamrock, 1984).

2.2.1 Kırılma deneyi (S20)

Kırılma deneyi, kayaçların tekrarlı darbelere karşı gösterdiği direncin belirlenmesinde önemli bir ölçüm yöntemidir. Bu deneyde tane boyutu -16 mm/ +11,2 mm elek aralığındaki 500 gr malzeme üzerine 25 cm yükseklikten 14 kg ağırlığındaki çekiç 20 defa düşürülür. 20 kez tekrarlanan darbeye kırılan malzeme 11,2 mm'lik elekten elenir. -11,2 mm'lik malzeme miktarının deneyin başlangıcındaki malzemeye ağırlıkça oranlanmasıyla yüzde olarak kayacın kırılma değeri hesaplanır (Dahl, 2003).

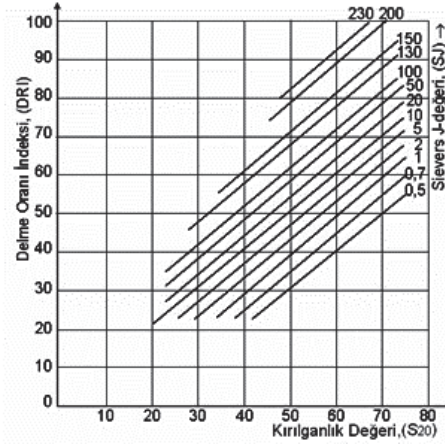
2.2.2 Sievers minyatür delme deneyi (SJ)

Sievers minyatür delme deneyi, kayaçların yüzey sertliğine veya delmeye karşı gösterdiği direncin belirlenmesinde önemli bir ölçüm yöntemidir. Hazırlanan deney numuneleri üzerinde, delme aletinde 20 kg'lık ağırlık altında 1 dakika boyunca 200 dev/dak hızla delik açılır. Açılan

delik boyları mm cinsinden ölçülerek elde edilen değerlerin ortalaması alınır. Bu delik delme işlemi kayaç yapısına bağlı olarak 4-8 adet arasında delikler delinerek ortalaması alınır.)

2.2.3 DRI'nın belirlenmesi

DRI değeri Şekil 4'teki abak yardımıyla belirlenir. Herhangi bir kayaç örneğine ait S_{20} değeri ve SJ değeri abak üzerindeki eğrilerde kesiştirilerek DRI değeri belirlenir ve Çizelge 6'ya bağlı olarak kayaç delinebilirliği sınıflandırılır (Dahl, 2003).

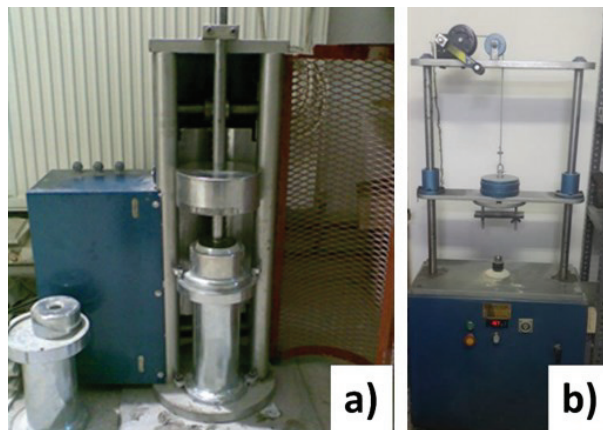


Şekil 4. DRI hesaplanması için oluşturulan abak (Dahl, 2003)

Çizelge 6. Kayaçların DRI sınıflaması (Dahl, 2003)

Sınıf	DRI
Oldukça düşük	≤ 25
Çok düşük	26-32
Düşük	33-42
Orta	43-57
Yüksek	58-69
Çok yüksek	70-82
Oldukça yüksek	≥ 83

Çalışma kapsamında kayaç örneklerinin S_{20} değerleri için deneyler (Şekil 5a) 3'er kez tekrarlanmış ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalamaları (Çizelge 6) alınmıştır. SJ değerleri için 30 mm boyunda NX karot örnekleri üzerinde deneyler yapılmıştır (Şekil 5b). Her kayaç türü için deney 5 numune üzerinde yapılmış ve ortalama değerleri de Çizelge 7'de verilmiştir. İki deneyden elde edilen sonuçlar kullanarak belirlenen DRI değerleri Çizelge 7'de verilmiştir.



Şekil 4. a) S_{20} deney aleti, b) SJ deney aleti (Ekincioğlu, 2013)

Çizelge 7. Kayaçların DRI değerleri

Kayaç Kodu	DRI	Sınıf
AB	47 [•]	Orta
AE	41	Düşük
BB	37 [•]	Düşük
BT	61 [•]	Yüksek
DT	64 [•]	Yüksek
KP	54 [•]	Orta
MB	58 [•]	Yüksek
MG	59 [•]	Yüksek
RB	38	Düşük
SL	61 [•]	Yüksek

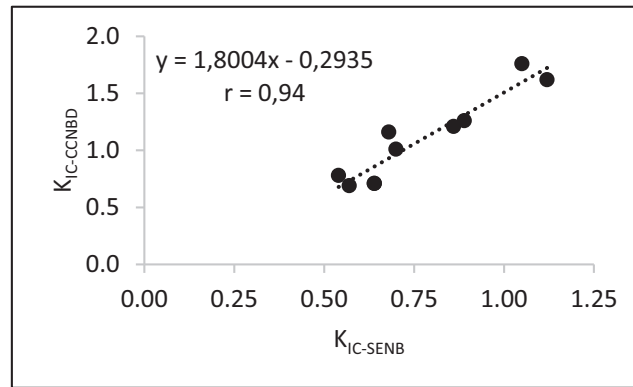
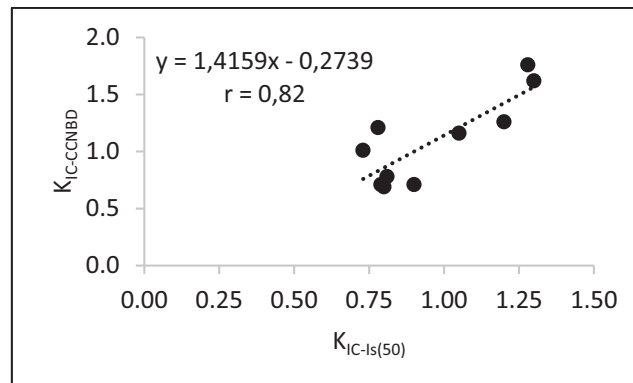
[•]Ekincioglu vd., 2013

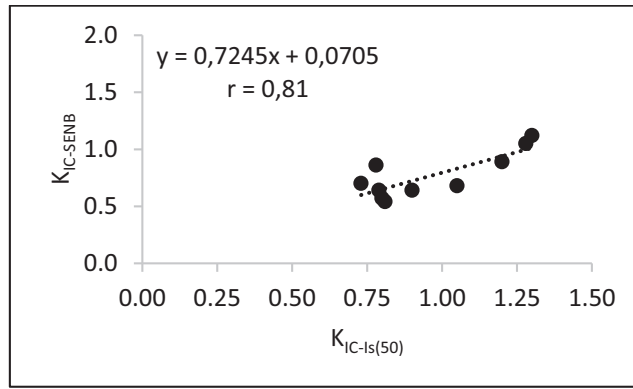
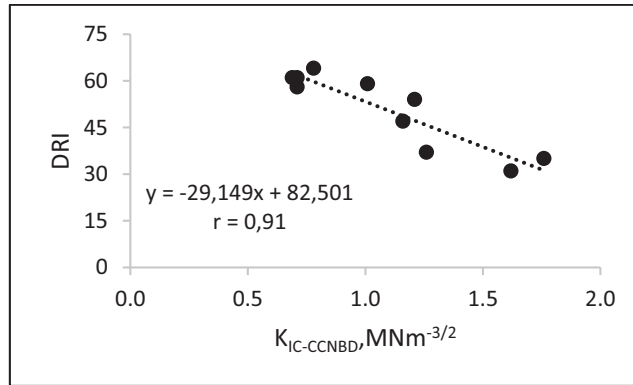
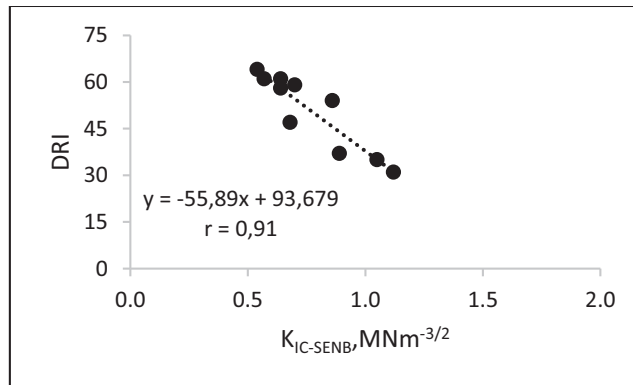
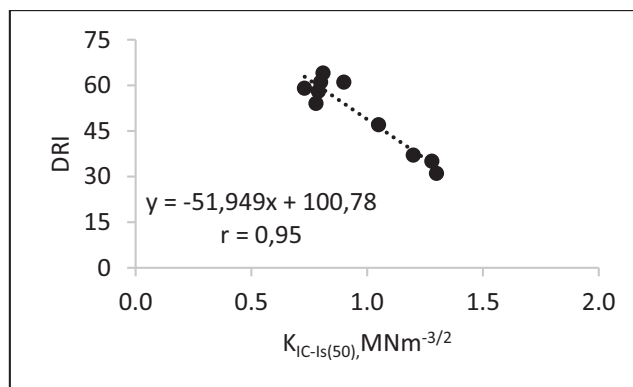
3 BULGULAR

Kayaçların üç farklı yöntemle belirlenen tokluk değerleri ve bu tokluk değerleri ile deneysel olarak belirlenen DRI arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak irdelenmiştir.

Kayaçların $K_{IC-CCNBD}$ ile $K_{IC-SENB}$ değerleri arasında $r = 0,94$ korelasyon katsayılı bir ilişki, $K_{IC-CCNBD}$ ile $K_{IC-Is(50)}$ ve $K_{IC-SENB}$ ile $K_{IC-Is(50)}$ arasında ise sırasıyla $r = 0,82$ ve $r = 0,81$ korelasyon katsayılı ilişkiler belirlenmiştir (Şekil 6-8). Ampirik olarak belirlenen tokluk değerleri ile deneysel olarak belirlenen tokluk değerleri arasındaki nispeten düşük ilişkinin $I_{s(50)}$ deney yöntemine özgü ihmal edilebilir hatalardan dolayı elde edildiği düşünülmektedir.

Kayaçların kırılma tokluklarından $K_{IC-CCNBD}$ ve $K_{IC-SENB}$ ile DRI arasında $r = 0,91$, $K_{IC-Is(50)}$ ile DRI arasında ise $r = 0,95$ gibi yüksek korelasyonlu lineer azalan ilişkilerin olduğu belirlenmiştir (Şekil 9-11).

Şekil 6. $K_{IC-CCNBD}$ ile $K_{IC-SENB}$ arasındaki ilişkiŞekil 7. $K_{IC-CCNBD}$ ile $K_{IC-Is(50)}$ arasındaki ilişki

Şekil 8. $K_{IC-CCNBD}$ ile $K_{IC-Is(50)}$ arasındaki ilişkiŞekil 9. $K_{IC-CCNBD}$ ile DRI arasındaki ilişkiŞekil 10. $K_{IC-SENb}$ ile DRI arasındaki ilişkiŞekil 11. $K_{IC-Is(50)}$ ile DRI arasındaki ilişki

4 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kayaçlarda gerçekleştirilen delik delme işlemlerinde delici makine ve ekipmana bağlı parametreler değiştirilebilirken, kayaç özellikleri değiştirilememektedir. Bu nedenle kayaçlarda delik delme işlemleri öncesinde kayaç özelliklerinin ve özellikle de kayaçların delinebilirliklerinin belirlenmesi, işin başarısı ve verimi için çok önemlidir. Kayaçların DRI değerleri numune hazırlama işlemi oldukça zahmetli ve zaman alıcı olan S_{20} ve SJ deney yönteminden elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi/yorumlanması ile belirlenmektedir. Kayaçların delinebilirliğini etkileyen diğer bir kayaç özelliği de kırılma tokluğudur. Kayaçların kırılma tokluğunun belirlenmesi için farklı deney yöntemleri önerilmiş olup bu yöntemlerin de ortak özelliği numune hazırlama ve yöntemin uygulamasının zaman alıcı ve özel ekipman gerektirmesidir.

Bu çalışmada, karbonat kökenli 10 farklı kayacın (traverten, kireçtaşı, hakiki mermer) Mod-I kırılma tokluk değerleri; CCNBD deneyi, SENB deneyi ve Bearman (1999)'nın önerdiği nokta yük dayanım indeksi değerini kullanan eşitlik yardımı ile üç farklı kırılma tokluğu yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Kayaçların DRI değerleri de deneysel olarak belirlenmiştir. Daha sonra kayaçların DRI ve üç farklı kırılma tokluğu arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak incelenmiştir. İncelemeler sonucunda kayaçların çatlak oluşumunun çoğalmasına gösterdiği direnç diğer bir ifadeyle tokluk değeri arttıkça delinebilirliklerinin düşük sınıf içerisinde yer aldığı görülmüştür. Dolayısı ile yeraltı mühendislik çalışmaları öncesinde kayaç delinebilirliklerinin tahminin de kayaçların kırılma tokluk değerlerinin bilinmesi proje safhasında göz önünde bulundurulması gereken bir kayaç özelliği olarak değerlendirilmelidir.

Kayaçların tokluğunu belirlemek için kullanılan yöntemlerden CCNBD ve SENB oldukça zahmetli deney-yöntemleri iken, $I_{s(50)}$ değerinin kullanıldığı yöntem ise $I_{s(50)}$ değerinin hem arazide hem laboratuvarında hızlı ve pratik bir şekilde belirlenebilmesi nedeniyle daha avantajlı bir yöntem olarak öngörülmektedir. Buna göre, $I_{s(50)}$ kullanılarak kayaçların kırılma tokluğunun daha hızlı, pratik ve doğru bir şekilde belirlenebileceği ve belirlenen bu tokluk değeri ile de kayaçların DRI değerlerinin tahmin edilebileceği görülmüştür.

Araştırmacılar tarafından kayaçların kırılma tokluğunun veya delinebilirliğinin birçok kayaç özelliği ile ilişkisinin incelendiği/tahmin edildiği çalışma yapılmasına rağmen kırılma tokluğu ile delinebilirlik arasındaki ilişkinin incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

KAYNAKLAR

- Altındağ, R, 2000. Kayaçlarda kırılma tokluğu ve diğer mekanik özellikler arasındaki ilişkiler, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 2(2), s.39-47.
- Backers, T, 2004. Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading, University of Potsdam, PhD Thesis, Germany, 137p.
- Bearman, RA, 1999. The use of the point load test for the rapid estimation of mode I fracture toughness, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 36, pp.257-263.
- Dahl, F, 2003. DRI, BWI, CLI Standards, NTNU, Anleggsdrift, Trondheim, Norway.
- Ekincioglu, G, Akbay, D, 2021. Estimating the drilling rate index (DRI) values of rocks by indirect methods, 6nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC'21), s. 304-309, Kapadokya/Nevşehir.
- Ekincioglu, G, Altındağ, R, Sengun, N, Demirdag, S, Guney, A, 2013. Investigation of the relationships between drilling rate index (DRI), physico-mechanical properties and specific cutting energy for some carbonates rocks. ISRM International Symposium - EUROCK 2013, 23-26 October, Wroclaw, Poland
- Gunsallus, KL, Kulhawy, FH, 1984. A comparative evaluation of rock strength measures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 21, pp.233-248.
- Huang, S, Liu, E, Sun, J, Jian, Z, 1987. The application of fracture mechanics to fracture analysis of concrete dam, SEM/RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock, pp.520-527, Houston, Texas.
- ISRM, 1988. Suggested methods for determining the fracture toughness of rocks (F.Ouchterlony, working Group Coordinator), International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts., 25, pp.71-96.

- Lajtai, EZ, Bielus, LP, 1986. Stress corrosion cracking of Lac du Bonnet granite in tension and compression, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 19, pp.71-87.
- Nelson, PP, Fong, FLC, 1986. Characterization of rock for boreability using fracture material properties, *Proceedings of the 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, pp,846- 852, Tuscaloosa, Alabama.
- Özdemir, E, 2020. Çevresel faktörlerin etkisiyle kayaçların kırılma indekslerinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 244 s.
- Park, N, 2006. Discrete Element Modeling of Rock Fracture Behavior: Fracture Toughness and Time Dependent Fracture Growth, The University of Texas at Austin, Ph.D. Thesis, 263 pp.
- Sakız, U, 2019. Kayaç Delinebilirliğinin ve Mekanik Özelliklerinin Spesifik Delme Enerjisine Olan Etkisinin Araştırılması, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 181 s.
- Sönmez, U, 2018. Bazı Türk Mermerlerinin Tür-I Kırılma Tokluğu ile Elmas Telli Kesme Makinelerinin Performansı Arasındaki İlişkilerin Analizi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 90s.
- Su, O, 2010. Kalem Uçlu Kesmelerle Kayaç Kesme Mekanizmasının Üç Boyutlu Sayısal Modellenmesi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 207 s.
- Şengün, N, 2009. Kayaçların kırılma tokluğu ve gevrekliğinin dairesel testereler ile kesme verimi üzerine etkileri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 165 s.
- Tamrock, 1998. *Surface Drilling and Blasting*, Finland, 474 p.
- Whittaker, BN, Singh, RN, Sun, G, 1992. *Rock Fracture Mechanics - Principles, Design and Applications*, Elsevier, Amsterdam, 570 p.

Şemsiye Kemer Uygulamasındaki Sayısal Modelleme Yaklaşımlarının Karşılaştırılması

The Comparison of the Numerical Modeling Approaches on the Umbrella Arch Application

H.E. Ergincan

Yüksel Proje A.Ş., Çekmeköy – Sancaktepe - Sultanbeyli Metrosu, İstanbul

T.Y. Özudođru

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

I.Z. Yildirim

Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET: Şemsiye kemer uygulaması özellikle zayıf zemin koşullarında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nde sıklıkla başvuru alan ön tahkimat yöntemlerinden biridir. Kazı destek sisteminin deformasyonlar üzerindeki etkisi sayısal modellemelerle hesaplanır ve hesaplanan deformasyonun kabul edilebilir sınırlar içinde olması gerekir. Deformasyonlar proje boyunca aletsel ölçümlerle takip edilir. Ölçülen deformasyonların sayısal modelleme sonuçlarına yakın olması, modelleme yaklaşımlarının ve varsayımlarının geçerli olduğunu gösterir. Bu çalışmada Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro hattı üzerinde bir kesitin sayısal analizden elde edilen sonuçlar, yüzey ölçüm verileriyle kıyaslanarak irdelenmektedir. İki boyutlu sonlu elemanlar yazılımında şemsiye kemer uygulaması: (i) plaka, (ii) suni plaka ve (iii) tekil boru yaklaşımlarıyla modellenmiştir. Sayısal sonuçlar üç yaklaşımla da elde edilen yüzey deplasman değerlerinin saha ölçümleriyle genellikle uyumlu olduğuna işaret etmektedir. Ölçüm verilerine en yakın yüzey deplasman sonuçları kazı destek sisteminin suni plaka yaklaşımı ile modellendiği durumda elde edilmiştir. Bu çalışmada incelenen durum için, ön destek sisteminin modellenmesinde tekil boru yaklaşımının kullanılması, diğer iki yaklaşıma kıyasla benzersiz bir avantaj sağlamadığı görülmüştür.

ABSTRACT: Umbrella arch application is one of the most frequently used pre-support techniques, especially in weak ground conditions with the New Austrian Tunneling Method. The effect of the pre-support system on the deformations is determined using numerical analysis, and the estimated deformations should be within acceptable limits. Deformations are measured using field instruments throughout the project. If the measured deformations are close to those estimated by numerical modeling, this indicates that the modeling approaches and assumptions are valid. In this study, the results of the numerical analysis performed for a section of the Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro line are compared with the field measurements of surface displacements. In the two-dimensional finite element software, umbrella arch application was modelled using: (i) plate, (ii) dummy plate and (iii) individual pipe approaches. The surface displacement estimated by all three approaches were generally in agreement with the field measurements. Modeling the pre-support system with the dummy plate approach resulted in surface displacements closest to the measured data. For the case analyzed in this study, using the individual-pipe approach in the modeling of the pre-support system did not provide a unique advantage compared to the more practical plate approach.

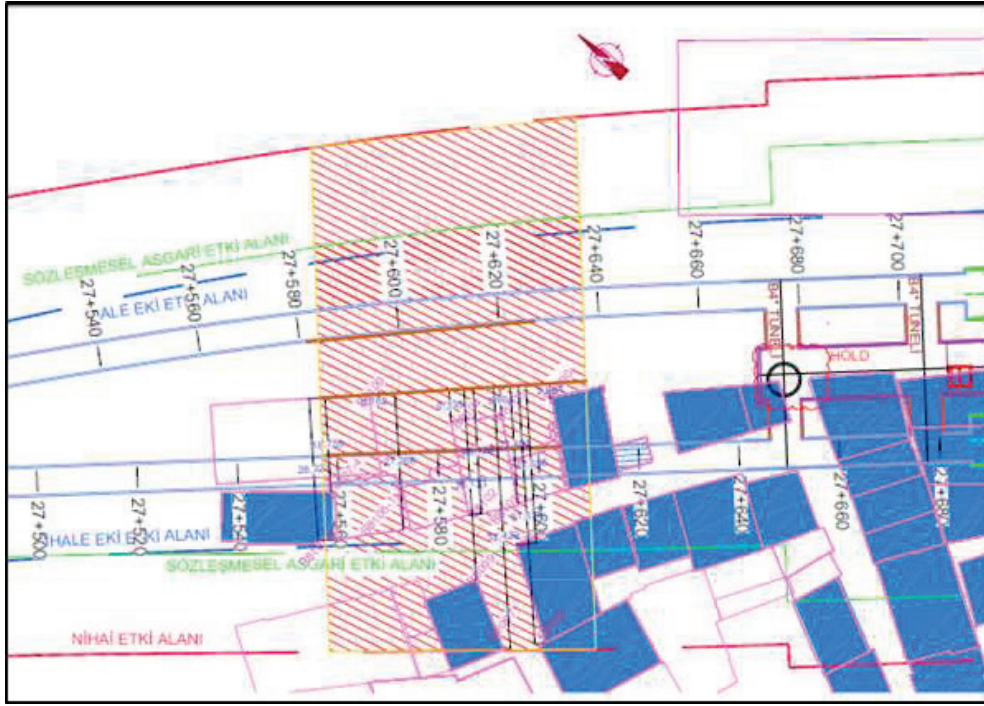
1 GİRİŞ

Trafik, İstanbul başta olmak üzere yoğun nüfuslu kentlerde en önemli sorunlardan biridir. Trafik rahatlatmak ve ulaşımı daha hızlı, konforlu ve güvenilir hale getirmek için raylı sistemlerin kullanımı ve bunlar için gerekli tünellerin inşası bir zorunluluktur. Şehir içi tünel inşaatlarında özellikle sığ örtü kalınlığında çalışılırken zayıf zeminlerin ve yüzeyde hassas yapıların bulunması gibi güvenli imalatı zorlaştıran durumlarla sıklıkla karşılaşmaktadır. Ayrıca kesit boyutları, zemin koşulları, maliyet kısıtları sebebiyle ana hat dışındaki tünellerde genellikle mekanize kazı yapılamamakta ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ya da New Austrian Tunneling Method (NATM) olarak bilinen yöntem kullanılmaktadır. İlkesel olarak NATM, tünelin üzerindeki yükü, zeminin deforme olmasına bağlı olarak gerilme dağılımının yeniden oluşturulmasıyla, zeminin kendisine taşıtmayı amaçlar. Zemin koşulları sebebiyle desteksiz kazı süresinin çok kısa olduğu ve özellikle tünel içinde göçme veya yüzeyde aşırı oturma riski bulunduran durumlarda ise NATM ile açılan tünellerde zeminin iyileştirilmesi ve/veya destek sisteminin güçlendirilmesi gerekir. Şemsiye kemer uygulaması da bu ön-tahkimat ve zemin iyileştirmesi tekniklerinden biridir. Bu destekleme ve iyileştirme yöntemi, tünel aynasından ileriye açılı olarak kazılan deliklerin içine genellikle 101.6 mm çaplı çelik perfore boruların itilmesi ardından boru içinin ve boruyla zemin arasında kalan boşluğun enjeksiyonla doldurulmasına dayanmaktadır. Böylece, uygulama bölgesindeki zeminin iyileştirilmesiyle tünel çatısında yapay bir kemerlenme sağlanır. Bu şekilde, örtü yükü destek elemanlarına aktarılarak tünel çeperindeki zemine doğru dağıtılmaktadır.

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmadaki temel amaç, şemsiye kemer uygulamasını literatürdeki farklı yaklaşımlarla sayısal olarak modellemek, yaklaşım farklılıklarının sayısal analiz sonuçları üzerindeki etkisini belirlemek ve sayısal analiz sonuçlarıyla aletsel gözlem sonuçlarını kıyaslayarak yaklaşımların geçerliliğini irdelemektir. Kazı sebebiyle oluşacak yüzey oturmasının sayısal analizlerle doğru tahmin edilmesi, kritik durumların önceden belirlenebilmesi ve destek elemanlarının tasarlanması için önem taşımaktadır. Burada sunulan çalışma bu konudaki literatüre katkı sunmayı hedeflemektedir.

Bu çalışmada Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi'nde şemsiye kemer uygulaması yapılarak kazı destek aşamaları tamamlanan A tipi tüneller incelenmiştir. Bu tünel tipinin seçilmesinin nedeni, kesit olarak dairesele yakın olması ve Tunnel Boring Machine (TBM) tünelleri ile peron tünellerini birbirine bağlayan tüneller için yaygın olarak imal edilmesidir. Şemsiye kemer uygulaması boruların aynadan ileriye (kazı yönünde) açılı olarak itilmesine dayanmaktadır ve genellikle en geniş tünel kesiti en kritik durumu oluşturmaktadır. Bu kriter gözetilerek, incelenen kritik tünel kesitinin eşdeğer çapı 8.2 m olarak belirlenmiştir. Güzergâh, imalat süreci açısından zemin hareketlerinin sönmülmüş olması beklenen bölgelere indirgenerek S23C makas yapısı ile S24 Sultanbeyli istasyonu arası bu çalışmanın odağı olarak belirlenmiştir. Sayısal analizler yapılarak incelenecek alan çevre kazıların etkisinden izole olmalıdır. Bunun için etki potansiyeline sahip imalatlarla arasında en az 20 m pay bırakılarak daraltılmış ve nihai etki alanıyla çevrelenmiş seçilen çalışma alanı Şekil 1'de gösterilen taralı bölgedir. Bu bölge ilerleme yönünde yaklaşık 50 m'yi kapsamakta ve kapsadığı alanda güncel olarak ölçümleri devam eden 13 adet oturma bulunu bulunmaktadır.



Şekil 1. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi'nde incelenen bölge

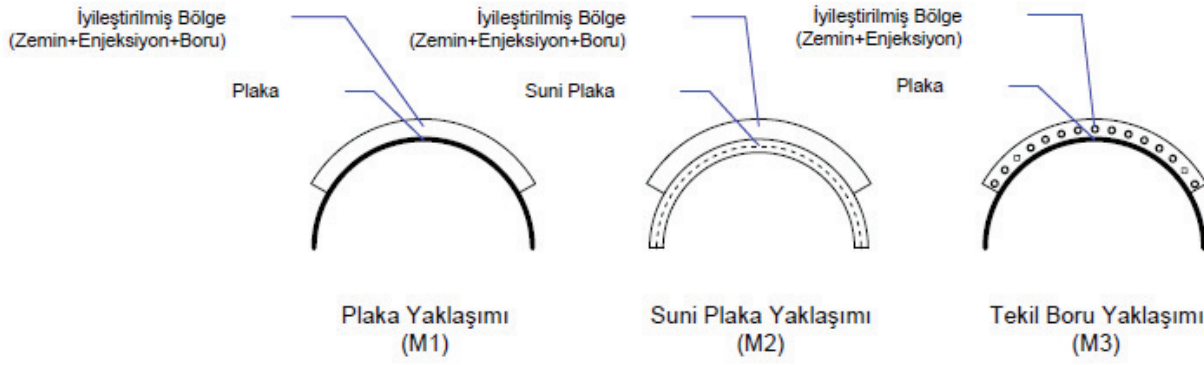
2 YÖNTEM

Sayısal modeller, sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan ve geoteknik analizlerde sıklıkla tercih edilen iki boyutlu PLAXIS 2D yazılımı (Bentley Systems, Incorporated, 2022) kullanılarak kazı aşamalarını yansıtabilecek şekilde hazırlanmıştır. Literatürde şemsiye kemer uygulamasının iki boyutlu modellenmesi Çeçen (2007), Ocak ve Selçuk (2017) örneklerinde görüldüğü gibi boy kesitte elastik kiriş olarak yapılabilmektedir. Bu çalışmada ise şemsiye kemer uygulaması, zemin davranışı nihai etki alanında incelendiği için Tan (2005), Ağbay (2019), Norouzi (2020) ve Güneş (2021) örneklerinde olduğu gibi enkesitte düzlemsel deformasyon şartlarında iyileştirilmiş bölge olarak tanımlanmıştır. Güzergâh çevresindeki bina ve yol yapılarına ait yüzey yüklerinin etkisi de dikkate alınmıştır.

2.1 Şemsiye Kemer Modelleme Yaklaşımları

Literatürdeki şemsiye kemer uygulamalarında kazı destek elemanları Tan (2005)'te plaka ve tekil boru, Ağbay (2019) ve Norouzi (2020)'de plaka, Güneş (2021)'de ise suni plaka olarak modellenmektedir. Şemsiye kemer uygulamasının modellenmesinde literatürde yer alan üç farklı yaklaşım: (i) plaka (M1), (ii) suni plaka (M2) ve (iii) tekil boru (M3) bu çalışmada incelenmiştir. Kullanılan her yaklaşım Şekil 2'de görülmektedir. Tüm yaklaşımlarda, şemsiye kemer uygulamasıyla iyileştirilen bölgenin elastisite modülü, kullanılan malzemelerin elastisite modüllerinin, kapladıkları alana göre ağırlıklı ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. İyileştirilmiş tabakanın elastisite modülü hesabında (i) plaka ve (ii) suni plaka yaklaşımlarında zemin, enjeksiyon ve borular göz önüne alınırken; (iii) tekil boru yaklaşımında ise şemsiye kemer boruları iyileştirilmiş tabaka içinde ayrıca modellendiği için ağırlıklı ortalamaya sadece zemin ve enjeksiyonun katkısı dahil edilmektedir.

Destek elemanları; plaka ve tekil boru yaklaşımında plaka elemanı, suni plaka yönteminde ise doğrusal elastik zemin olarak tanımlanmaktadır. Suni plaka yaklaşımında kazı destek elemanında oluşan yükleri tahmin edebilmek amacıyla dayanım parametreleri (EA ve EI) 10^{-6} ile çarpılmış, böylece bu elemanlar davranışa etkisi ortadan kaldırılmış plaka olarak tanımlanmaktadır. Bu sebeple doğrusal elastik zeminin ortasına yerleştirilen bu plaka suni plaka olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2. Şemsiye kemerin sayısal modellemesinde incelenen yaklaşımlar

2.2 Zemin Özellikleri

İdealize zemin profilindeki derinlik, birim hacim ağırlık, kohezyon, kayma direnci açısı ve elastik modül parametreleri, proje raporuna dayanarak, Çizelge 1’de verilmektedir (İBB Raylı Sistemler DB, 2022). Zemin modeli pekleşen zemin (hardening soil – HS) olarak seçilmiştir.

Çizelge 1. İdealize zemin tabakaları ve kullanılan parametreler

Üst Derinlik (m)	Alt Derinlik (m)	Zemin Tipi	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)	E' (MPa)
0.0	3.5	Dolgu	18	1	28	15
3.5	24.0	Killi siltli kum	20	10	35	70
24.0	50.0	Çok ayrılmış kumtaşı (Arkoz)	24	61	39	65

İyileştirilmiş bölgenin parametreleri ise bölgenin alanı kesitten ölçüldükten sonra ağırlıklı ortalamada payı olan birimlerin katkılarına göre hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 2’de özetlenmektedir.

Çizelge 2. İyileştirilmiş (şemsiye kemer uygulanan) bölgede kullanılan parametreler

Yaklaşımlar		Plaka ve Suni Plaka (M1 & M2)				Tekil Boru (M3)			
Birim	Alan (m ²)	E (MPa)		γ (kN/m ³)		E (MPa)		γ (kN/m ³)	
		Ham	A.P. (%)	Ham	A.P. (%)	Ham	A.P. (%)	Ham	A.P. (%)
Zemin	2.961	65.0	1.58	24.0	87.64	65.0	30.49	24.0	87.64
Enjeksiyon	0.219	2000.0	3.60	25.0	6.76	2000.0	69.51	25.0	6.76
Çelik boru	0.058	200000.0	94.82	78.6	5.60	–	–	78.6	5.60
İyileştirilmiş bölge		3760.0		25.0		198.5		25.0	

İyileştirilmiş bölge kalınlığı: 35 cm, boru et kalınlığı: 6.3 mm, boru iç çapı: 101.7 mm, boru aralığı: 30 cm, boru dış çapı: 114.3 mm

Notlar: A.P.: ağırlık payı yüzdesi, E: elastisite modülü, γ : birim hacim ağırlık

Modellerde 30 cm kalınlığında kazı destek elemanı ve 10 cm kalınlığında geçici taban (invert) elemanı püskürtme beton ile tanımlanmıştır. Buna ek olarak çelik zemin çivileri tanımlanmıştır. Kazı destek ve geçici taban elemanları püskürtme betonun yaş ve sertleşmiş mukavemetine göre aşamalarla tanımlanmıştır. Suni plaka yönteminde kazı destek elemanları doğrusal elastik zemin tabakası olarak tanımlanmış ve bu zemin tabakasının orta ekseninde dayanıma etkisi olmayan suni bir plaka tanımlanmıştır. Tüm modellerde bina temelleri plakalar ile tanımlanmış olup yapı yükleri bu temeller aracılığıyla zemine aktarılmaktadır.

2.3 Kabuller

Bu çalışmada sahada incelenen durumun modele en uygun şekilde yansıtılabilmesi için, sayısal analizlerde aşağıdaki kabuller ve yaklaşımlar uygulanmıştır:

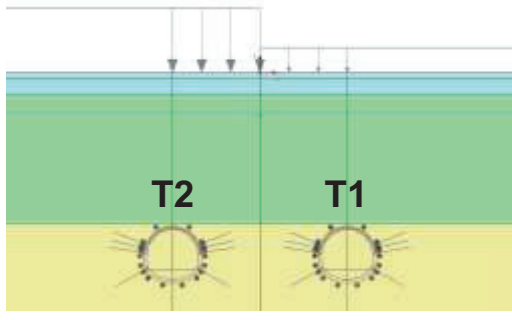
- Modelin sınırları deplasmanların sönümlenmesi dikkate alınarak yeterince geniş seçilmiştir.
- Su seviyesinin tünel alt kotuna kadar düşürülmesi genel kabulü uygulanmıştır.
- Şemsiye kemer uygulamasıyla ne kadar kalınlıkta zeminin iyileştirildiği; zeminin türüne, enjeksiyonun basıncına, hatta çimentonun inceliğine ve su/çimento oranına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Boruların kazı kesitiyle mesafesi de göz önüne alınarak ortalama kalınlık 35 cm kabul edilmiştir.
- Ağbay (2019)'da belirtildiği gibi, şemsiye kemer kullanılan kayaç ortam için arayüz dayanım katsayısı (R_{inter}) 0.7 alınmıştır.
- Ferahlama yüzdeleri FHWA (2009), Zelger (2012), Güneş (2021)'den faydalanılarak tünelin üst yarısında %40-%60-%100; alt yarısında ise %20-%40-%100 olarak belirlenmiştir.
- Ferahlama aşamalarında püskürtme betonun zamanla mukavemetini almasına bağlı olarak yaş püskürtme beton mukavemetinin sertleşmiş mukavemetin 1/3'ü olacağı kabul edilmiştir (FHWA, 2009). Püskürtme beton normal betona göre daha hızlı dayanım kazanmakta olup, seçilen mukavemet kazanma oranı bir günden daha kısa süreye karşılık gelmektedir (Ishida vd., 2009).
- Yüzey yükleri belirlenirken genel yük kabullerinden ve literatürden faydalanılmıştır (AASHTO, 2002; Norouzi, 2020). Şekil 3'te görüldüğü gibi havadan ve sokaktan çekilen resimler incelenerek yükler ortalama üç katlı binalar için hesaplanmıştır. Bina temel elemanı için 1 m kalınlıkta beton hesaba katılmış, yol tabakasının mukavemet parametreleri için ise Faheem ve Hassan (2014)'den yararlanılmıştır.



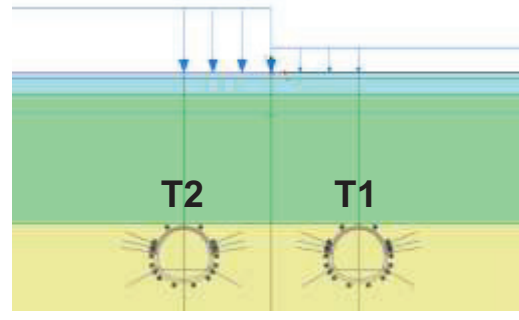
Şekil 3. Çalışma bölgesinin (a) plan (havadan) ve (b) sokak görüntüsü

2.4 Aşamalar

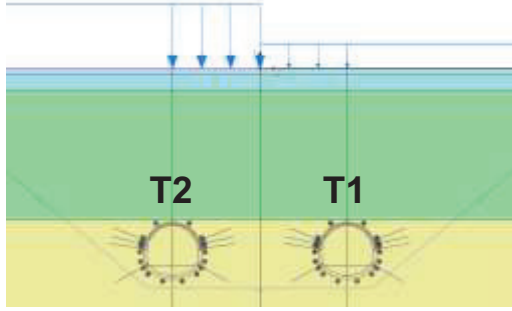
Bu çalışmada kullanılan PLAXIS 2D, NATM'de uygulanan aşamalı kazıyı modellemek için elverişlidir. Yukarıda açıklanan kabuller doğrultusunda analizlerde 17 aşama tanımlanmıştır. Aşamaların ekran görüntüleri Şekil 4'te görülmektedir. Başlangıç aşamasında gerilme dağılımı zeminin kendi yükü hesaba katılarak (K_0) prosedürüyle belirlenmektedir. Daha sonra sırasıyla yüzey yükleri aktifleştirilir ve yeraltı suyu seviyesi düşürülür. Yüzey oturması tahmininde sadece tünellerin açılmasından kaynaklanan etkilerin belirlenebilmesi için bu aşamada yer değiştirmeler sıfırlanmaktadır.



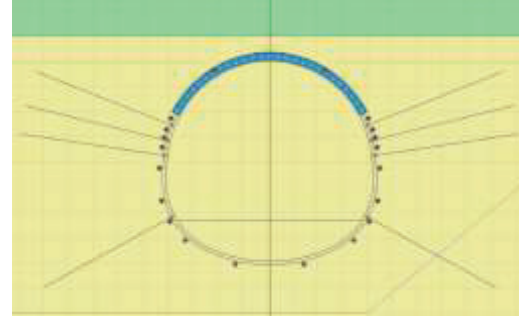
0. Başlangıç durumu



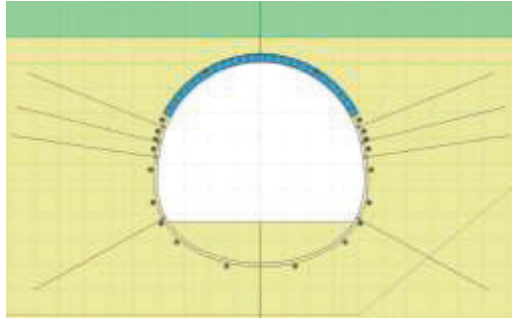
1. Yüzey yüklemesi



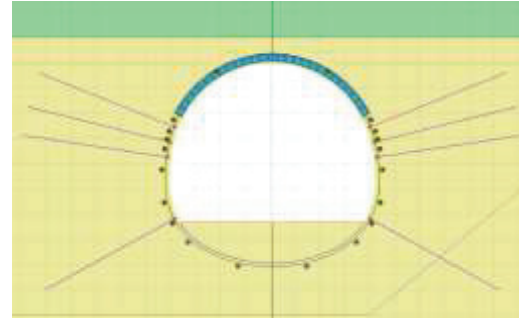
2. Su seviyesinin düşürülmesi



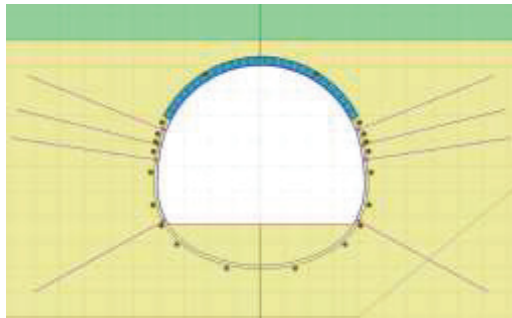
3. Boru kemerle iyileştirilmiş bölgenin aktive edilmesi



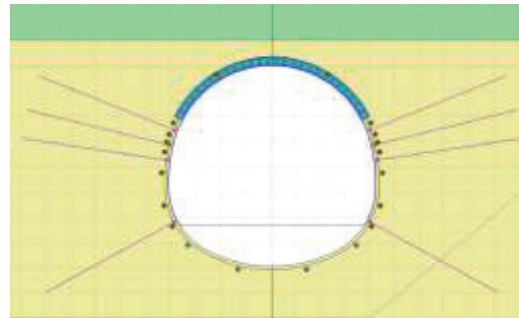
4. Üst yarı kazısı desteksiz safha



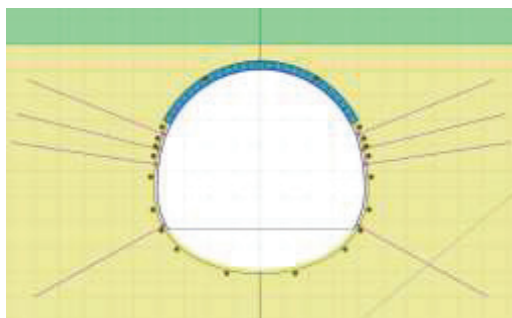
5. Üst yarı kazısı kısmi destekli safha



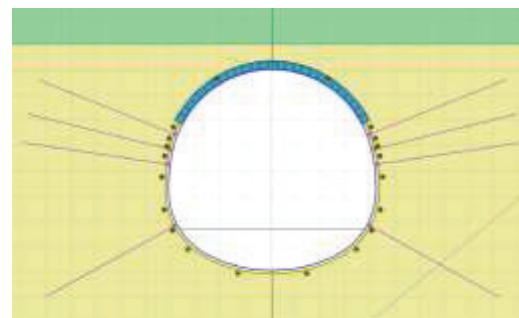
6. Üst yarı kazısı tam destekli safha



7. Alt yarı kazısı desteksiz safha



8. Alt yarı kazısı kısmi destekli safha



9. Alt yarı kazısı tam destekli safha

Şekil 4. Şemsiye kemer uygulamalı NATM tünel imalatının sayısal modelleme aşamaları

Tünel kazı aşamaları başlamadan önce şemsiye kemer uygulaması yapılan bölgedeki zemin iyileştirilmektedir. Kazı üst ve alt yarıda desteksiz, yaş durum ve sertleşmiş durum olmak üzere üçer aşamada açılır. Bu altı aşama, her aşamaya karşılık gelen ferahlama oranları ve kazı destek elemanları etkinleştirilerek tanımlanmaktadır. Zemin çivileri ise yaş durumla beraber etkinleştirilmektedir. İlk açılan tünel T1 olarak adlandırılmıştır. T1 tünel kazısının tamamlanmasının ardından T2 olarak adlandırılan ikinci tünelin kazısı başlar. T2 tünelinin kazısında da T1'e benzer şekilde iyileştirilmiş bölgenin etkinleştirilmesinden başlayarak Şekil 4'te görülen sayısal modelleme aşamaları uygulanmıştır.

3 ANALİZ SONUÇLARI

3.1 Tünel İçi Kapanma ve Yüzey Oturması

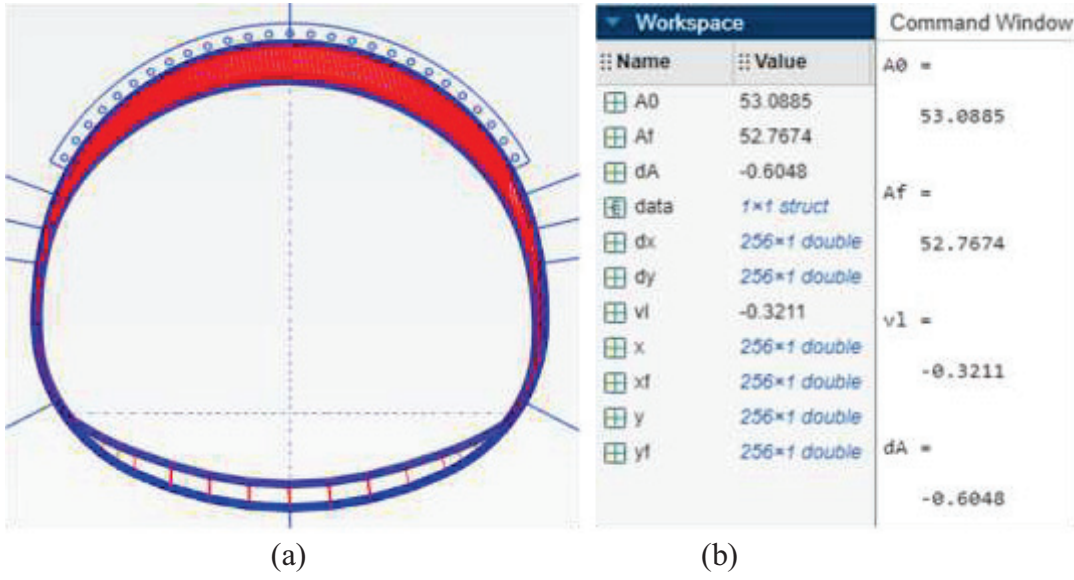
Tünel içi kapanma miktarı tünelde göçük ihtimalinden, makina sıkışmasına, kazı destek elemanlarında oluşan yapısal sorundan, yüzey oturmasına kadar tünel imalatının her aşamasında etkili olduğu için mekanize kazılarda ve açık ayna kazılarında büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden bu projedeki teknik şartname (İBB, 2020) örtü kalınlığının iki eşdeğer çaptan büyük olduğu durumlarda tünel içi hacim kaybını (tünel içi kapanma) %1.5 ile sınırlandırmaktadır. Guglielmetti vd. (2007)'de ayna ve örtü tabakasında benzer zemin koşullarına sahip tüneller TBM ile açıldığında %0.5 tünel içi hacim kaybı beklenebileceği belirtilmektedir. Mair (1996) ise NATM kazıları için sınır tünel içi hacim kaybının %0.5-%2.0 arasında olması gerektiğini öngörmektedir. Yıllar içinde ilerleyen teknoloji ve geliştirilen şemsiye kemer destekleme uygulamalarıyla birlikte NATM kazılarında da tünel içi hacim kaybının belirtilen aralığın alt sınırında olması beklenmektedir.

Sayısal modelleme sonuçlarına göre farklı şemsiye kemer modellemeleri için hazırlanan tünellerin kapanma sonucu oluşacak şekilleri belirlenmiştir. Deforme olan tünel şekillerinin kapanma miktarları MATLAB® yazılımı (The MathWorks Inc., 2022) kullanılarak hesaplanmıştır ve Çizelge 3'te verilmektedir. Hesaplanan tünel içi hacim kayıpları her üç modelleme yaklaşımı için de kabul edilebilir seviyededir. Benzer bir yöntem kullanılarak yüzeydeki hacim kaybı hesaplanmış, tünel içi kapanma arttıkça yüzeydeki hacim kaybının da arttığı belirlenmiştir.

Çizelge 3. Tünel içi hacim kaybı (tünel içi kapanma) ve yüzeyde hacim kaybı

Hesap yaklaşımı	M1		M2		M3		
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
Tünel							
Maksimum yatay deplasman (mm)	8.1	8.5	3.0	6.4	7.9	8.8	
Maksimum düşey deplasman (mm)	25.0	24.9	15.7	21.7	25.2	25.6	
Maksimum bileşke deplasman (mm)	25.1	25.0	15.7	21.7	25.3	25.7	
Tünel içi hacim kaybı, V_L	(%)	0.57	0.58	0.37	0.57	0.58	0.60
	(m^3/m)	0.303	0.311	0.181	0.283	0.307	0.321
İki tünel içi hacim kaybı, $\sum V_L$ (m^3/m)	0.614		0.464		0.628		
Yüzeyde hacim kaybı, V_s (m^3/m)	1.377		0.907		1.385		

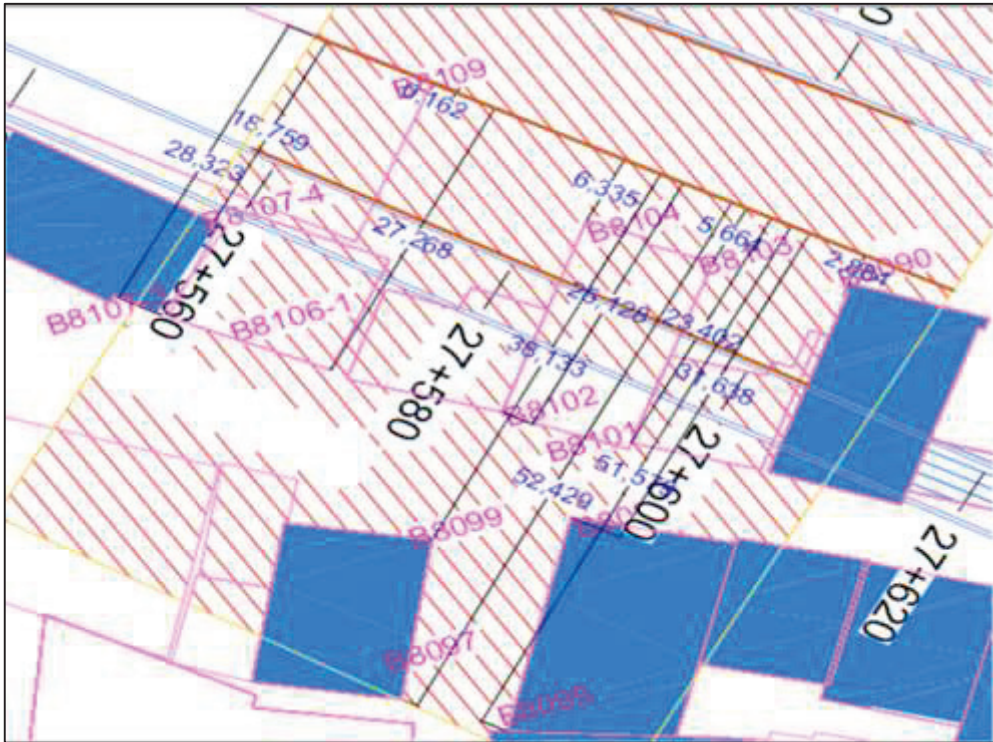
Şekil 5a'da en çok kapanmanın gerçekleştiği M3 modeli T2 tünelindeki deformasyonlar 25 kez büyütülerek gösterilmektedir. Şekil 5b'de tünel içi hacim kaybının MATLAB® kullanılarak hesabı görülmektedir.



Şekil 5. T2 tünelinin tekil boru (M3) yaklaşımı ile hazırlanan modelinde (a) tünel içi yer değiştirmeleri (PLAXIS 2D) ve (b) tünel içi hacim kaybının MATLAB® hesabı

3.2 Saha Verileri

Özellikle şehir içi tünelcilik çalışmalarında yüzey oturmaları büyük bir risk oluşturmaktadır ve bu sebeple oturmalar düzenli olarak aletsel ölçüm yöntemleriyle izlenmektedir. Proje sürecinde üst yapı sorunlarıyla karşılaşmamak için saha ölçümleri yardımıyla potansiyel riskler hızlı bir şekilde belirlenir ve erken önlem alınarak zararların önüne geçilebilir. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro hattı üzerinde, sayısal modellemeler yaparak incelediğimiz alanda toplam 13 adet oturma bulonu yerleştirilerek, bu bulonlar proje sürecinde takip edilmiştir. Bulon yerleşim planı ve tüneller arasındaki orta eksene göre uzaklıkları Şekil 6'da gösterilmektedir.

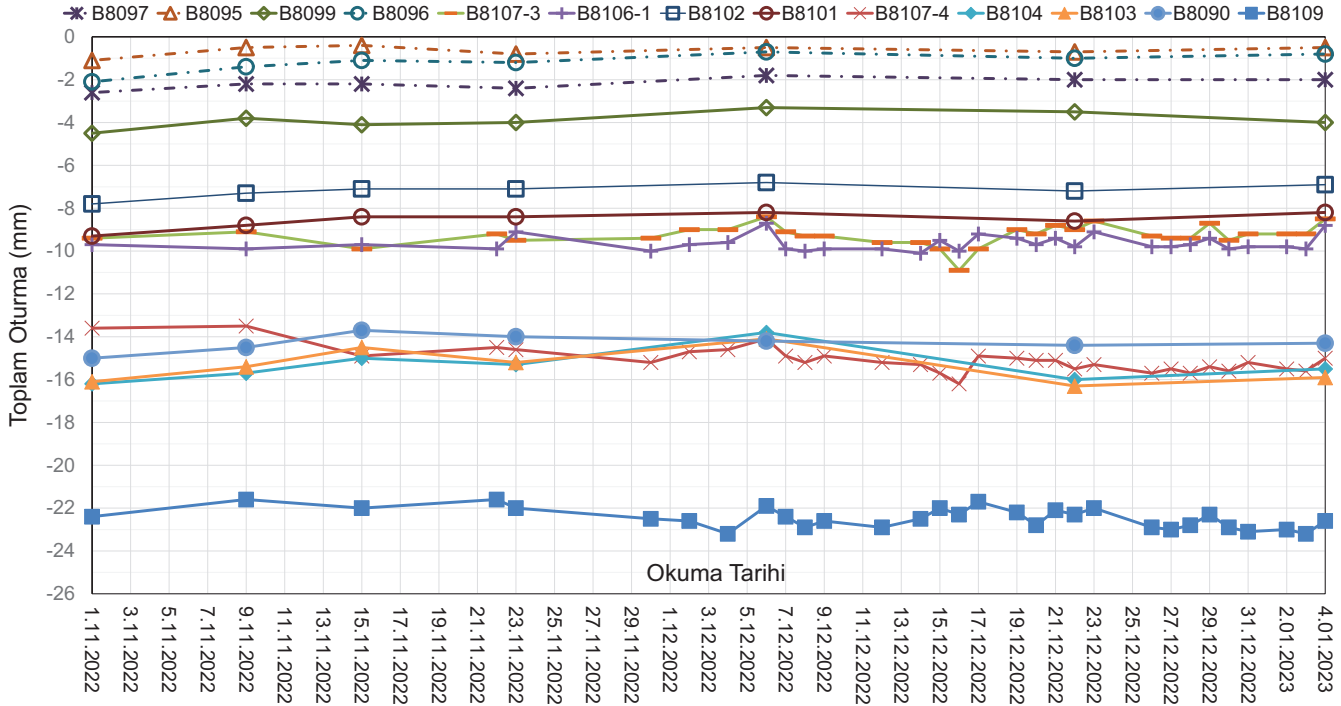


Şekil 6. Bulon yerleşim planı ve iki tünelin orta eksenine uzaklıkları

Oturma bulonlarından elde edilen deplasman değerleri ile sayısal analiz sonuçları arasında sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek için bulonlardaki hareketin sönümlenmiş olması gerekmektedir. Bu durumun gerçekleşebilmesi için ilgili bölgedeki tünel imalatının tamamlanıp

kazı destek elemanlarının mukavemetini kazanmış olması gerekir. Ayrıca, ilerleyen tünel kazısının odaklanılan bölgede ek deformasyon oluşturmayacak kadar uzaklaşmış olması gerekir. Bu gözlem, kalıcı kaplama imalatına başlama zamanının belirlenmesi için de önemlidir.

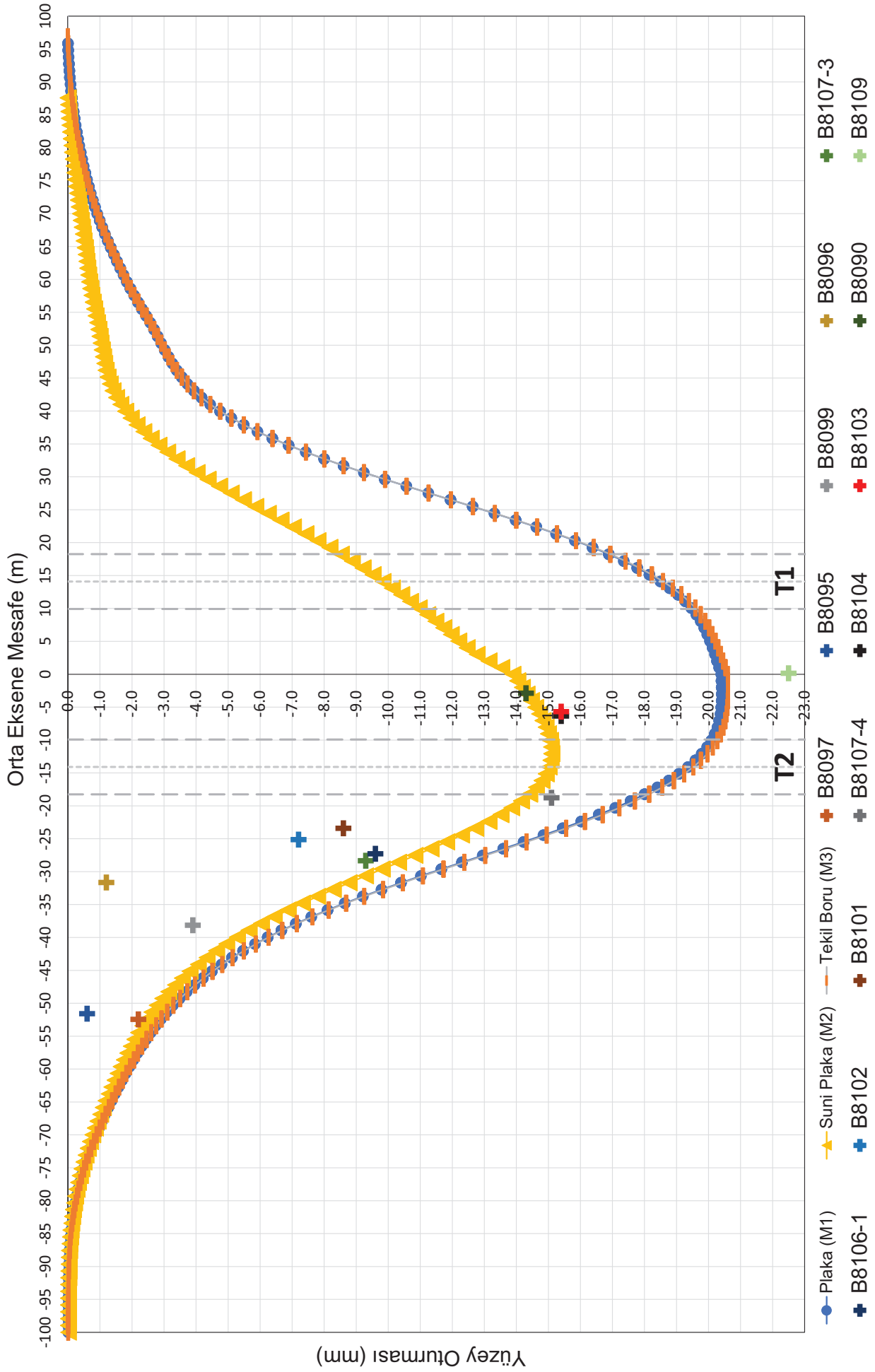
İncelenen alanda bulonların yer değiştirme - zaman grafiği Şekil 7’de verilmektedir. Grafik incelendiğinde iki aydan uzun süredir deplasmanlardaki değişimin 0-3 mm aralığında olduğu görülmektedir. Tünel imalatının incelenen bölgede tamamlandığı ve kazının büyük ölçüde bölgeden uzaklaştığı düşünülürse bu gözlem anlamlıdır. Bu durumda bulonların yer değiştirmelerinin büyük ölçüde sönümlendiği ve kazı destek elemanlarının mukavemetini alacak sürenin büyük ölçüde tamamlandığı kabul edilebilir.



Şekil 7. İncelenen bölgedeki bulonlarda zamana bağlı toplam oturma

Bu kabul üzerine hareketin sönümlendiği aralıktaki ortalama deformasyon miktarı tüm bulonlar için hesaplanmış ve bulonların konumuna göre yüzey oturma grafiğine eklenmiştir. Şekil 8’de (i) plaka (M1), (ii) suni plaka (M2) ve (iii) tekil boru (M3) olmak üzere üç farklı şemsiye kemer modelleme yaklaşımıyla elde edilen yüzey oturmaları ile saha verileri kıyaslanmaktadır. Her üç modelleme yaklaşımı da kabul edilebilir hata paylarıyla oturmaları tahmin etmektedir. Özellikle suni plaka (M2) yaklaşımının yüzey oturma tahminiyle saha ölçümlerinden elde edilen değerler oldukça yakındır. Bu çalışmada incelenen tünellerin arasındaki mesafe birbirini etkileyecek kadar kısadır. Bu sebeple tünellerin açılma sırası da yüzey deformasyonları üzerinde etkili olmaktadır. Yüzey oturmasının simetrik olmadığı ve beklendiği gibi daha geç açılan T2 tüneli doğrultusuna kaydığı, özellikle suni plaka (M2) yaklaşımıyla elde edilen sonuçlarda net olarak görülmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde yer değiştirmeler ağ örüntüsündeki düğüm noktalarında belirlenebilmektedir. Bu çalışmada oluşturulan modellerde yüzey oturmasının hesaplanabilmesi için ince bir ağ kullanılmasına rağmen, yüzeyde düğüm noktaları arası mesafe 1 m’yi aşmaktadır. Düğüm noktaları ve bulon yerleri tam olarak çakışmadığında, bulon noktalarındaki sayısal modelleme sonuçları doğrusal ara değer bulma (enterpolasyon) yapılarak hesaplanmıştır. Sayısal modellemelere dayanarak bulon yerleşim noktalarında yaklaşık olarak elde edilen yer değiştirmeler ve saha ölçümleri arasındaki farklar Çizelge 4’te gösterilmektedir. En büyük hatanın 1 cm’den az olduğu görülmektedir. Suni plaka yaklaşımıyla çoğu bulon için çok yakın oturma tahmini yapılabilmektedir.



Şekil 8. Saha ölçümü ve sayısal model sonuçlarına göre yüzey oturmalarını karşılaştırması

Çizelge 4. Bulon noktalarında saha ölçümleri ve sayısal modelleme ile belirlenen oturmalar arasındaki fark

Yer değiştirme (mm)																
Bulon No	B8097	B8095	B8099	B8096	B8107-3	B8106-1	B8102	B8101	B8107-4	B8104	B8103	B8090	B8109	En yüksek fark	En düşük fark	Ortalama fark
Model																
M1	-0.7	-2.4	-3.1	-9.2	-3.2	-3.5	-7.2	-6.9	-2.7	-5.0	-5.0	-6.1	2.1	9.2	0.7	-4.1
M2	-0.3	-2.0	-2.1	-7.6	-1.2	-1.4	-4.8	-4.1	0.8	0.6	0.7	0.0	8.7	8.7	0.0	-1.0
M3	-0.7	-2.5	-3.1	-9.3	-3.2	-3.6	-7.3	-7.0	-2.8	-5.2	-5.2	-6.3	1.9	9.3	0.7	-4.2

4 SONUÇ

Şemsiye kemer uygulaması ülkemizde ve dünyada özellikle zayıf zemin koşullarında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) uygulamalarında başvurulan ön destek sistemlerinden biridir. Bu çalışmada Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro hattı üzerinde şemsiye kemer uygulamasıyla beraber NATM uygulanan bir alan incelenerek, sayısal analizden elde edilen sonuçlar, yüzey ölçüm verileriyle kıyaslanarak irdelenmiştir. İki boyutlu bir sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır ve şemsiye kemer uygulaması: (i) plaka, (ii) suni plaka ve (iii) tekil boru yaklaşımlarıyla, üç farklı şekilde modellenmiştir. Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Her üç (plaka, suni plaka, tekil boru) modelleme yaklaşımının da tüm bulon noktalarındaki yüzey oturmalarını 10 mm'den az farkla tahmin ettiği gözlenmiştir. Tüm bulon noktalarında yüzey oturmaları tahmininde ortalama hata 5 mm'nin altındadır.
- Yapısal kriter olan rölatif dönme açısı düşünüldüğünde, santimetre mertebesinde altındaki farkların ihmal edilebilir düzeyde olduğu değerlendirilebilir. Tünel içi hacim kaybı arttıkça yüzeydeki hacim kaybının da arttığı tespit edilmiştir.
- Ölçüm verilerine en yakın yer değiştirme sonuçları kazı destek sisteminin suni plaka yaklaşımı ile modellendiği durumda elde edilmiştir.
- Yüzey oturmasının simetrik olmadığı ve beklendiği gibi daha geç açılan T2 tüneli doğrultusuna kaydığı, en belirgin olarak suni plaka (M2) yaklaşımıyla elde edilen sonuçlarda görülmektedir.
- İncelenen durum için, ön destek sisteminin modellenmesinde tekil boru yaklaşımının kullanılmasının, diğer iki yaklaşıma kıyasla büyük bir avantaj sağlamadığı gözlenmiştir.
- Başta suni plaka yaklaşımı olmak üzere üç yaklaşımın da şemsiye kemer uygulamalı tünellerin sayısal modellemesinde geçerli yaklaşımlar olduğu görülmüştür.
- Hesaplanan tünel içi hacim kaybı değerlerinin şartname kısıtlarına uygun ve literatürdeki aralıkta olduğu gözlenmiştir.

Burada sunulan çalışmaya benzer, saha ölçümleri ve sayısal modelleme sonuçlarının beraber değerlendirildiği çalışmalar, NATM ile beraber şemsiye kemer uygulanan tünellerin tasarımına ve imalatına katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi'nin verilerinden faydalanarak çalışmanın zenginleşmesine büyük olanak sağlayan İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistemler Daire Başkanlığı Anadolu Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü'ne teşekkürlerini sunar; projede müşavirlik hizmetleri sunan ve çalışma süresince desteğini esirgemeyen Yüksel Proje A.Ş.'ye ve çalışanlarına gönülden teşekkür eder. Bu çalışma Boğaziçi Üniversitesi'nin 16961 numaralı BAP projesinin desteği ile gerçekleşmiştir.

KAYNAKLAR

- Ağbay, E. (2019, Ocak). *Assessment Of Twin Tunnel Induced Ground Deformation By Empirical And Numerical Analyses (Eurasia Tunnel: NATM Part, Istanbul, Turkey)*. (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- American Association of State Highways and Transportation Officials - AASHTO. (2002). *Interim Guide for Design of Pavement Structures*. Vaşington, DC, Amerika Birleşik Devletleri.
- Bentley Systems, Incorporated. (2022). *Plaxis 2D CONNECT Edition V22.02 - Reference Manual*. Exton, PA, Amerika Birleşik Devletleri.
- Çeçen, E. E. (2007, Mayıs). *Kent İçi Tünellerinde Uygulanan Şemsiye Kemer Ve Ayna Donatılama Tekniklerinin Gerilme-Deformasyon Üzerine Etkilerinin Sayısal Analizi*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Faheem, H., & Hassan, A. M. (2014). 2D plaxis finite element modeling of asphalt-concrete pavement reinforced with GEOGRID. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 42(6), s. 1336-1348. doi:10.21608/jesaun.2014.115106
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2007). *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*. Londra: Taylor & Francis.
- Güneş, A. (2021). *Numerical Assessment Of Tunnel Advancement In Problematic Soil Conditions: A Case Study*. (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Ishida, A., Araki, A., Yamomoto, K., Morioka, M., & Hori, A. (2009). Application Of Blended Cement In Shotcrete To Reduce The Environmental Burden.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi. (2020). Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi (Hastane)-Taşdelen-Yenidoğan Metrosu İnşaat ve Elektromekanik Sistemler Temin, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri Teknik Şartnameler Bölüm 1 - Kaba ve İnce İnşaat İşleri. 160.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistem Daire Başkanlığı Anadolu Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü. (2022). *S23D Makas-S24 Sultanbeyli İstasyonu Ve Kuyruk Bölgesi A Tüneli Tip4 İçin Kalıcı Kaplama Hesap Raporu*. Yayınlanmamış Rapor, İstanbul.
- Mair, R. J. (1996). Settlement effects of bored tunnels. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, (s. 43-53). Londra.
- Norouzi, H. (2020). The Effect Of Loading Type On The Amount Of Effect Of Loading On The Surface Settlement During Forepoling Tunnel Excavation In Different Geotechnical Conditions. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 10(1), s. 55-60. doi:10.2478/jaes-2020-0009
- Ocak, İ., & Selçuk, E. (2017). Comparison of NATM and umbrella arch method in terms of cost, completion time, and deformation. *10(7)*. doi:10.1007/s12517-017-2938-8
- Tan, W. L. (2005). *Numerical Analysis for shallow tunnels in weak ground supported by Umbrella Arch Method*. (Yüksek Lisans Tezi). Nanyang Teknoloji Üniversitesi, Singapur.
- The MathWorks Inc. (2022). *MATLAB Data Import and Export*. Natic, MA, Amerika Birleşik Devletleri.
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (2009). *Technical manual for design and construction of road tunnels -civil elements*, Publication No: FHWA-NHI-10-34.
- Zelger, J. (2012). Calibration of 2D pre-relaxation factors in tunnelling with 3D Finite element calculations. (Yüksek Lisans Tezi). Graz Teknoloji Üniversitesi, Avusturya.

NATM Tünel Açma Metodunda Ara Kaplama Yöntemi

Temporary Lining Method in NATM Tunneling Method

H. Doğan, S. S. Şeref, Y. Bozbaş

Krk Holding, Soner Temel Mühendislik İnş ve Tic. A.Ş., Sakarya

ÖZET:Bu çalışmada birincil destekleme elemanı olan iksa, donatı, püskürtme beton bulon gibi birincil destekleme imalatlarının tamamlanmasına rağmen, birincil destekleme kabuğunun zemin etkileri altında yenilmesinin devam ettiği durumlarda uygulanan betonarme ara kaplama yönteminin yapım aşamaları ele alınmış olup ara kaplama yöntemi yapılacak olan tünel çalışmalarına ışık tutması için hazırlanmıştır. Örnek uygulama olarak bildirinin yazım tarihinde halen devam etmekte olan, Ankara İstanbul hızlı tren projesi Sapanca-Geyve yüksek hızlı tren hattı alt yapı, üst yapı ve elektromekanik İşleri ile tünel 26 YHT hat kesimi ve elektromekanik işleri yapımı projesi kapsamında T1 ve T2 tünelleri bu çalışmada ele alınmıştır.

ABSTRACT: In this study, despite the completion of the primary support productions such as reinforcement, shotcrete bolt, which is the primary supporting element, the construction stages of the reinforced concrete intercoating method applied in cases where the defeat of the primary support shell underground effects continues are discussed and the intermediate coating method is prepared to shed light on the tunnel works to be performed. As an exemplary application, T1 and T2 tunnels were discussed in this study within the scope of Ankara Istanbul high-speed train project Sapanca-Geyve high speed train line infrastructure, superstructure and electromechanical works and tunnel 26 YHT line cutting and electromechanical works construction project, which is still ongoing at the time of writing of the paper.

1 GÜZERGAH VE PROJE BİLGİSİ

T1 tüneli Sakarya ilinin Sapanca ilçe sınırlarında Hacı Mercan mahallesinin kuzeydoğusundan geçip Akçay vadisine uzanmaktadır. T2 tüneli ise Akçay vadisinden başlayıp İlimbey ve Karacam mahallelerinden geçerek Geyve ilçesinin Doğançay bucağında son bulacaktır. Aşağıdaki haritada detayları mevcuttur (Şekil 1).

Her iki tünelin Kuzey Anadolu fay hattına (KAF) olan yakınlıklarının yani sıra KAF üzerinde deprem oluşturma olasılığı en fazla olan Geyve boşluğuna olan yakınlıkları tasarımda deprem yüklerinin önemini attırmaktadır.

Tünel kazı- destek aşamasında uygulanan birincil destekleme ve ara kaplama kalınlıkları sırasıyla 50 cm ile 60 cm ile 135 cm arası olup, bunların ardından yapılan nihai betonarme kaplama kalınlığı 50 cm dir. Kazı kesiti maksimum 211 m² olup, ön destekleme ile yürütülen kazı destekleme faaliyetlerinde ön destekleme olarak 3 sıra kendinden delen 3,5” çapında 9 metre boyunda süren uygulanmaktadır.



Şekil 1 Bölgenin haritası

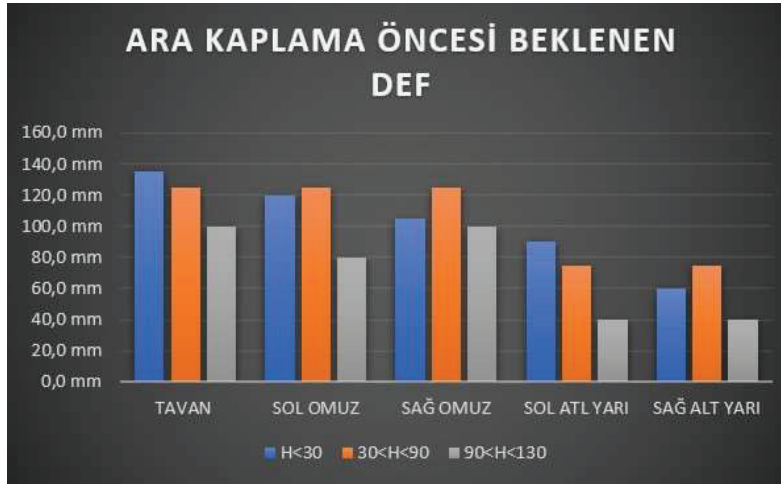
2 BÖLGENİN JEOLJİSİ

T1 tünelinin yer aldığı bölge Örencek formasyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu formasyon ilk kez Aydın vd. (1987) tarafından isimlendirilmiştir. Formasyon, kırmızı, sarımsı kırmızı, kahve renkli konglomera, kumtaşı, çamurtaşı ardalanması ile temsil edilir. Birim genelde az tutturulmuş ve orta-kalın tabakalıdır. Tabakalanması yer yer belirsizdir. Konglomeralar, aşınmalı tabanlı, kötü boylanmalı olup, yuvarlak-az yuvarlak çakıllardan oluşmaktadır (Şekil 2).

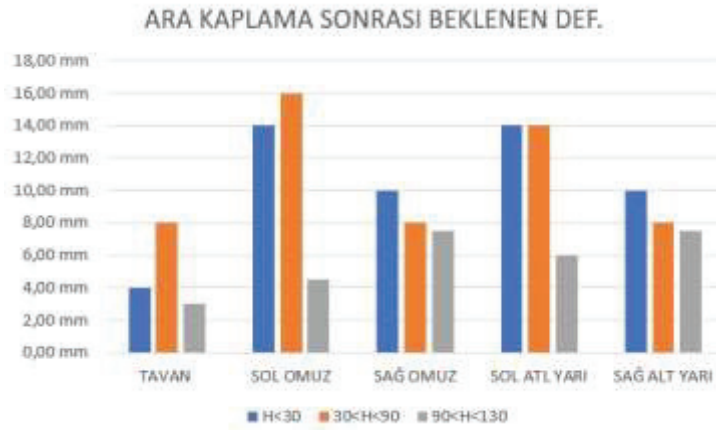
Bu jeolojik durumlar altında açılacak olan tünelde hesap raporuna göre ara kaplamasız bölgede oluşacak deformasyon miktarları aşağıdaki grafikteki gibidir.



Şekil 2. T1 tüneline ayna fotoğrafı



Şekil 3. T1 tüneline ara kaplama öncesi beklenen deformasyon



Şekil 4. T1 tüneline ara kaplama sonrası beklenen deformasyon

3 ARA KAPLAMANIN YAPILMASININ SEBEPLERİ

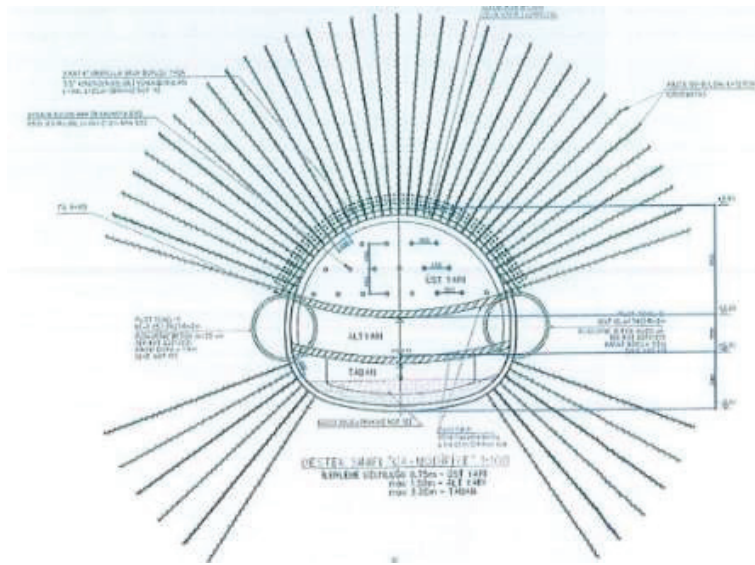
T1 çıkış tüneline konumlandığı güzergahın jeolojik formasyonu (Örencik) az tutturulmuş çakıl, kum ve kil aralanmalarından oluşan göreceli olarak genç ve zayıf birimlerden meydana gelmektedir. Bu bilgiler ışığında kaya sınıfı olarak C4 klas seçilmiştir. Buna rağmen kazı destekleme tasarım hesap raporunda 2885 metre uzunluğundaki T1 çıkış tüneline 1340 metrelik kısmını C4 klasa ait birincil destekleme sistemine ait 50 cm kalınlığındaki kompozit yapıyı sayısal yöntem olan hybrid elements ve ardışık kazı aşamaları için elasto - plastik olarak analiz edilmiş bu analiz sonucu zemine yenildiği ön görülmüştür. Bundan dolayı bu bölgede C4 düzenlenmiş (alt yarı pilot tünel yöntemi) tahkimat sisteminin yapılması planlanmıştır (TCDDİGM 2019) (Şekil 5).

Bu yöntem ülkemizde Bolu dağı tünellerinde uygulanmış olup zayıf zonları içeren kısa mesafeli bir bölgede (150m -200 m) başarılı olmuş bir yöntem iken zayıf zonları içeren büyük bir bölgede işin süresi ve maliyetini artırmaktadır. Edinilen tecrübeler ışığında bu yöntemin dezavantajları aşağıda sıralanmıştır;

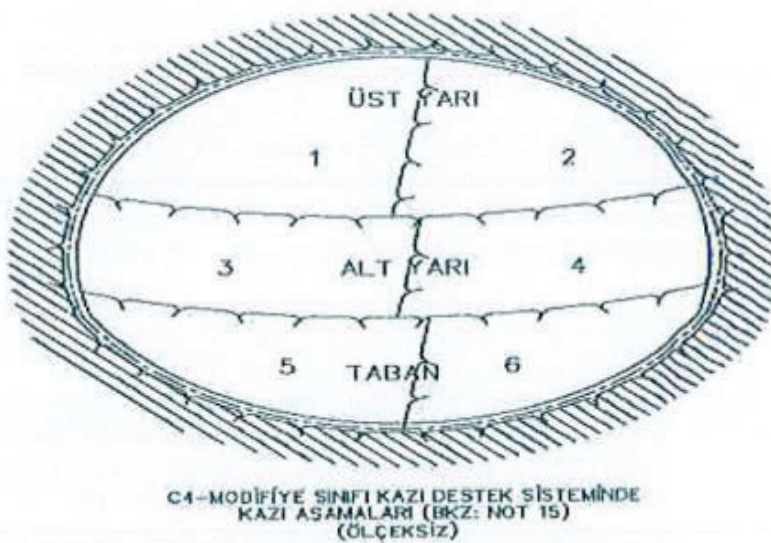
- Kazı kademeli yapıldığı için özellikle birinci kat donatı (çelik hasır) montajının devamlılığı alınan tüm tedbirlere rağmen sağlanamayacaktır ayrıca bu tedbirlere "L" demiri uygulaması da dahildir. Bu sorun nedeniyle yapının kompozitliğine zarar vermektedir.
- Kademe kazısı tamamlanıp çimento dolgululu bulonlar kaya içerisine yerleştirildikten 28 gün sonra ikinci kademe kazısı başlatılmalıdır aksi takdirde bulonlar zarar görerek çalışmaz hale gelebilir buda zaman kaybına sebebiyet vermektedir.

- Bu unsurlar dışında birincil desteklemede kullanılan 3 sıra kendinden delen sürenler arasından tavana delinecek olan bulonlar ya kendinden delen sürenlere ya da kendisine zarar verecektir bu da görevlerini yapamayacağı anlamına gelir.

Ara kaplamayı tercih etmekteki hususların en başında zaman kavramı gelmektedir. Ara kaplama proje talimatı doğrultusunda birincil desteklemenin yaklaşık 35-40 metre gerisinden geleceği için kazı yapılan alanda aksamalara sebebiyet vermemektedir. Ara kaplama yönteminde kullanılan Çelik Bağ (iksa), bağlantı çubuğu, saç, beton kompozit bir yapı haline dönüşeceği için mukavemeti daha yüksek olacaktır. Pilot tünel sisteminde, kazısı ve birincil desteklemesi yapılmış tünel imalatı kırılarak ana tünelin birincil desteklemesi yeniden yapılmakta dolayısıyla bitmiş birincil desteklemenin toplam maliyeti artmaktadır. Ara kaplama yönteminde ani deformasyonlara karşı tedbir amaçlı kısmi/bölgesel imalat yapılabilmesi mümkünken pilot tünel metodunda böyle bir imkân bulunmamaktadır. Bu bilgiler ışığında daha hızlı ve daha doğru bir yaklaşım olan ara kaplama yöntemini yapmak daha doğru bir tercih gibi durmaktadır.

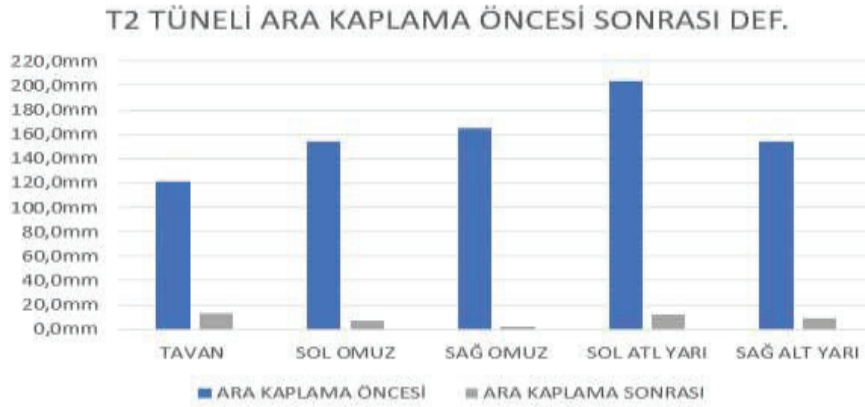


Şekil 5. C4 düzenlenmiş alt yarı pilot tünel yöntemi.

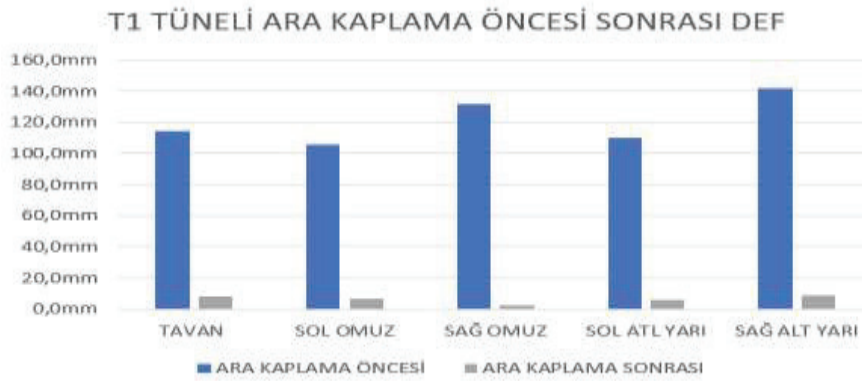


Şekil 6. C4 düzenlenmiş alt yarı pilot tünel yöntemi.

Seçilen ara kaplama yönteminin uygulamada ‘tünel içi deformasyon’ açısından sonuçları şekil 7 ve 8 grafiklerde gösterilmektedir. Bu sonuçlar yapım aşamasında tünel içerisindeki ölçümlerdir birincil desteklemesi tamamlanmış bölgede her 4,5 metre de bir ölçüm istasyonu kurularak değerler birincil desteklemenin tüm aşamaları tamamlanana kadar günlük birincil desteklemenin tamamlanıp ara kaplamanın tamamlanmasına kadar geçen süreçte 2 veya 3 günde bir ara kaplamanın tamamlanmasıyla birlikte yeni oluşturulacak ölçüm istasyonu her 10 metrede bir olacak ve haftada 1 kez okunacaktır.



Şekil 7. T2 tünellerindeki deformasyon



Şekil 8. T1 tünellerindeki deformasyon

4 ARA KAPLAMANIN SAHADA UYGULANIŞI

Ara kaplama betonu, taban betonunun üzerine basacak şekilde tasarlanmıştır. Bu amaçla taban betonunda beton dökümü öncesinde donatının içine ankraj donatıları yerleştirilir (şekil 9). Betonunun prizi sonrası ankraj donatılarına NPI 200 profil iksa montajı yapılmaktadır. Ankraj donatılarının montajı ile ilgili uygulamada en çok rastlanan sorunlar; ankraj donatılarının beton içinde kalan boyları ile ankraj donatılarının koordinatlarının hassasiyetidir. Her iki husustaki uygulama hataları ara kaplamanın omurgasını oluşturan çelik profil iksaların montajını ve kendisinden sonra gelen imalatların ‘yerinde’ olmasını imkânsız hale getirebilmektedir.

Ankraj taban kemer betonu dökümü yapılmadan önce kiriş donatısına montajı sağlanmaktadır. Kiriş betonu dökümünün tamamlanıp prizini almasından hemen sonraki adım olarak ara kaplama iksasının birinci parçası olan (ara kaplama çelik bağ (iks) alt parçası) ankraja M20 bulonlar yardımıyla montajı yapılmaktadır. Ankraj ve alt yarı iksasının birleşimi yapıldıktan hemen sonra ölçüm ekibi tarafından kotu ayarlanarak, bir önceki ve bir sonraki iksalar birbirine ara bağlantı elemanları ile birbirine bağlanmaktadır. Bu işlem

tamamlanmasıyla birlikte ara kaplama alt yarı iksa montajı tamamlanmış olup aynı işlemler sağlı sollu olmak üzere birbirini takip etmektedir (Şekil 10).



Şekil 9. Ankrāj montajı



Şekil 10. Ara kaplama alt yarı iksa montajı

Alt yarı çelik bağ (iksa) montajının tamamlanmasının ardından projesine uygun bir şekilde ara kaplama üst yarı çelik bağ (iksa) montajı ile çalışma devam etmektedir.

Bu iki iksa ankrajda olduğu gibi birbirlerine M20 bulonlarla bağlanmaktadır. Alt yarıda olduğu gibi bir önceki ve bir sonraki çelik bağ (iksa) birbirlerine 26 mm çapındaki nervürlü demirden yapılmış işbalarla birbirine bağlanmaktadır. Ara kaplamanın üst yarı çelik bağı (iksa) iki parçadan oluşmaktadır bu iki parça önce başka bir alanda birbirlerine montajı sağlandıktan sonra yerine montaj yapılır. Yerine montaj sırasında en az iki platforma ihtiyaç duyulmaktadır platformlardan bir tanesi üst yarı iksasını kaldırıp tutarken diğer platformdaki çalışma sepetinde bulunan çalışanlar alt ve üst yarı çelik bağ (iksa) birleşimini yapmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Ara kaplama üst yarı iksa montajı

Çelik bağ (iksa) aralıkları 100 cm olup, iksalar enine yönde 50 cm ara ile Ø26 mm çapında donatı ile birbirine bağlanmaktadır.

Çelik bağ (iksa) bağlantı çubuklarının montajından sonra çelik sac levha montajı başlamaktadır. Sac plakaların her biri 50 mm 97 cm, t=5 mm boyutlarında olup, her iksa arasında enine yönde 54 adet kullanılır.

Sac levhalar iki profil çelik bağ (iksa) arasına yerleştirilerek elektrod kaynağı ile sabitlenir. Levhaların çelik bağ (iksa) iç kısmına yerleştirilmesiyle beton döküm işlemi sırasında saca gelen yükün iksalarca da taşınması sağlanır.

Saç montajının verimli ve sürekliliği için çalışılmakta olan alana 1 adet iskele yaptırılmıştır. Bu iskelenin amacı tünellerde bulunan nihai kaplama kalıbı öncesi yürütülen demirci arabası gibi düşünülebilir farkı ise birçok inşaat iskelesinin birleştirilerek yapılmasıdır. İskele tabanında NPI100 profilden meydana gelen iki adet sehpanın üzerine kurulmuştur bu sehpalarda sekizer adet teker bulunmaktadır. Sehpalara yürüyüş motoru görevi görmesi amaçlı mini elektrikli vinçler yatay olarak bağlanmış, iskele yürütülmek istediği zaman vinçin kancalarını sabit noktaya bağlanıp motoru çalıştırmak yeterli tekerlerin aynı doğrultuda devam edebilmesi adına ray görevini görmesi için tekerlerin altına NPU100 profili ray gibi yerleştirilmiştir burada dikkat edilecek hususlar;

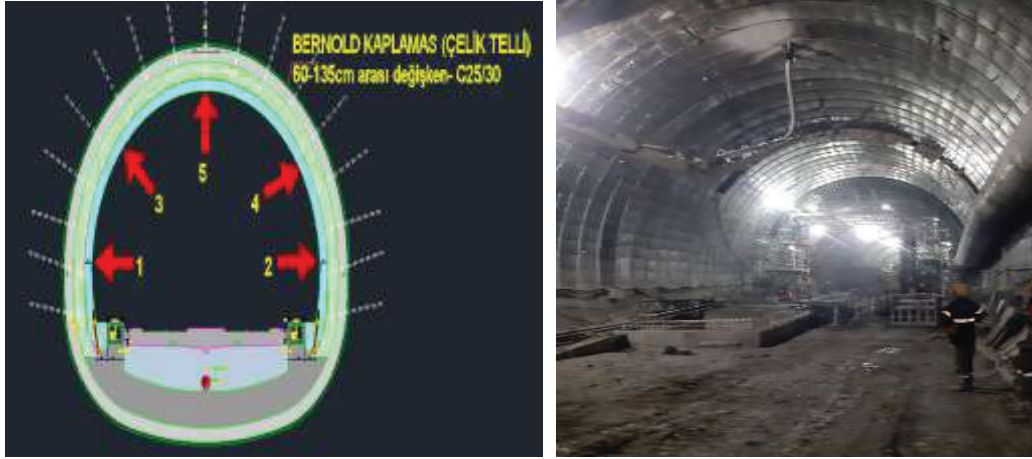
- Motorun çalıştırılıp yürütmeye başlama işlemi sağlı sollu ve eş zamanlı yapılmalıdır.
- Ray görevi gören NPU100 profilin düzgün ve sabitlenerek yerleştirilmelidir.
- İskelenin tekerlerinde zaman içerisinde eğilmelere bağlı hasarlar meydana gelebilmektedir bundan dolayı her yürütme işlemi başlamadan önce teker kontrolü yapılmalıdır.

Saç montajı her raunt için aynı şekilde devam eder on iki raunt saç montajının tamamlanmasıyla birlikte beton dökme işlemine geçilerek anonun son noktasından ahşap kalıp yapılır. Beton döküm işlemi öncesinde daha öncesinden delinmiş olan barbakan vazifesi görecek 350 cm uzunluğunda borular 3 mx3 m karelajla, deliklere yerleştirilir. Sac montajı öncesinde bu boruların yerleştirilmesi sökölüp yeniden takılmak zorunda kalınarak boru etrafına sarılmış olan geotekstilin zarar görmesine sebep olacağından bu işlem saç montajının tamamlanmasından sonra yapılır.

Ara kaplama betonu C25/30 çelik telli beton olarak projesinde tanımlanmıştır. Ara kaplama betonunun tünelin eksen noktasında minimum 60 cm maksimum 135 cm kalınlığında dökülmektedir. Beton beş farklı noktadan basılması gerekmektedir.

Beton pompalama işlemi bir ve iki numaralardan açılan pencerelerden beton pompası yardımıyla başlatılır sırasıyla üç dört beş olarak devam edilir (Şekil 11). Beton dökülürken dikkat edilecek hususlar şunlardır;

- Beton bir numaradan başlamış ise bir sonraki kademeye geçerken önce üç sonra dört numaralı pencerelerden devam eder böylece betona ani yüklenmelerle saç patlaması kalıp açması gibi sorunlar ortadan kaldırılır.
- 12 m boyundaki anoya bütün numaralar boyunca yeterli aralıklarla pencereler açılıp, betonun şişe vibratör ile sıkıştırılması sağlanmalıdır.
- Beton içerisinde kullanılan çelik tellerin yeterince homojen dağılmış olmasına dikkat edilmesi gerekir.
- Beşinci bölgeden beton basımı öncesi kolektör borusu ve tahliye borusu konulur. Tahliye borusu püskürtme beton yüzeyinin 2~3 cm altında bırakılır.
- 12 m anonun boyuna bakılarak dört metrede bir bırakılan kolektör ile verimli beton basımı gerçekleştirilmektedir.



Şekil 11. Ara kaplama beton uygulaması

5 SONUÇ

T1 ve T2 tünellerinde uygulamasını yapılan ara kaplama yöntemi proje takip mesafesinde yapıldığı sürece deformasyonu gözlemlenmiştir 204 milimetre deformasyon olan noktada ara kaplamanın tamamlanmasıyla birlikte 12 milimetre deformasyonlara kadar düşmüştür. Ayrıca beton içerisinde kullanılan çelik telin betona süneklilik kazandırması nedeniyle gevrek kırılmaları önlenmiş ön görülmektedir.

KAYNAKLAR

TCDDİGM 2019 Doğançay Ripajı 2. Kesim Doğançay – Sapanca Arası Yüksek Hızlı Tren Projesi Tünel İnşaatı Yapım İşi T-1 Proje Hesap Raporu Fugro Proje No: P2017.0048

Çelik Strut Yüklerinin Değerlendirilmesi İçin Pratik Bir Öneri

Practical Suggestion to Evaluate Steel Strut Loads

M. Zengin

Doğuş İnşaat ve Ticaret A.Ş., İstanbul

S. Çevik

Teknik Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., İstanbul

C. Avşar

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), İstanbul

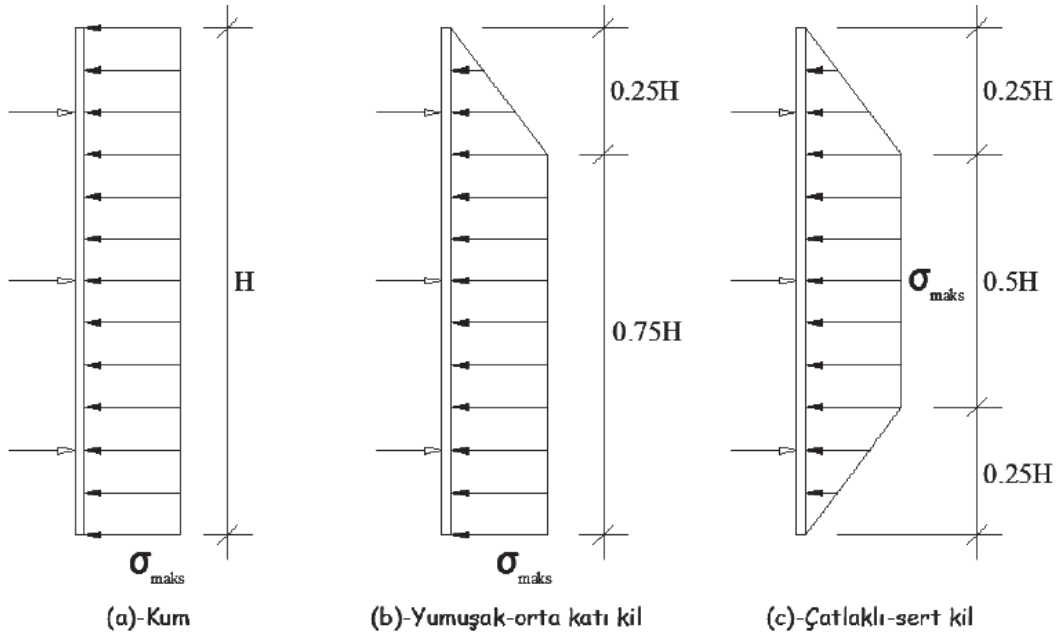
ÖZET: Şehirleşmenin gelişmesine paralel olarak artan arsa maliyetleri beraberinde derin kazı ihtiyaçlarını her geçen gün artırmaktadır. Derin kazı destekleme sistemleri düşeyde; fore kazık, diyafram duvar, püskürtme beton/betonarme perde elemanlarından, yatayda ise öngermeli ankraj, zemin çivisi ve çelik strut elemanlarından teşkil edilmektedirler. Bu çalışmada metro projelerinde geniş uygulama alanı bulan yatay destek elemanlarından çelik strutlara gelen yüklerin hesabı için pratik bir yöntem önerilmiştir. Arazide strutlar üzerine gelen yüklerin doğru şekilde ölçülmesi en az tasarım aşamasında yapılan hesaplar kadar önemlidir. Strutlar üzerine gelen yüklerin ölçülmesinde strain gauge elemanları sıklıkla kullanılmaktadır. Deformasyon ölçümleri için ise prizma/reflektör elemanları kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında çubuk elemanda aksenal uzama/kısalma formülasyonu kullanılarak arazide strain gauge ile ölçülen yük değerlerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Visual Basic programlama dili ile hesap için bir program geliştirilerek strutların üzerine gelen yüklerin tahmin edilmesine dair bir yöntem sunulmuştur.

ABSTRACT: The need for deep excavations in new construction projects at the urban areas are rising due to increasing land costs. Shoring systems consist of bored piles, diaphragm walls, shotcrete walls in vertical direction, prestressed anchors, soil nails and steel struts in horizontal direction. A practical method to calculate the strut loads in subway projects is proposed in this study. Accurate quantification of the loads under service is equally important with the estimations in design phase. Strain gauges, prisms and reflectors are used to measure loads and deformations on struts, respectively. Axial strains are used to estimate strut loads under service loads in construction area. A practical method was proposed by using a software developed with Visual Basic to estimate loads on struts which has no strain gauges.

1 GİRİŞ

Günümüzde şehirleşmenin artışına paralel olarak inşaat mühendisliği uygulamalarında derin kazıların uygulama alanları yaygınlaşmaktadır. Derin kazı destekleme sistemleri çeşitli geoteknolojiler kullanılarak tasarlanıp inşa edilebilmektedirler. Derin kazı yatay destek elemanlarından çelik strutlar üzerine gelen yükler strain gauge yardımıyla ölçülmekle birlikte, bu elemanlarının derin kazı sistemindeki her strut için kullanılması hem uygulama pratiği açısından hem de hassas ekipmanlar olmalarından ötürü tercih edilmemektedir.

Boston metro projesi uzantısı için seçilen üç farklı kesimde kazı destekleme sisteminin performansının değerlendirilmesi amacıyla kazı derinliğinin yaklaşık 17,7 m olduğu kesitte 5 sıra strut kullanılmıştır (Lambe 1970). Strut yüklerinin tahmini için çok sıra destekli sistemlere gelen toprak basınçları analitik ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenebilmektedir. Analitik yöntemlerin başında Peck (1969) tarafından önerilen hesap yöntemi gelmektedir. Yönteme ait toprak basınç dağılımları Şekil 1’ de gösterilmiştir. Peck (1969) tarafından önerilen toprak basınç dağılımları kullanılarak yapılan hesaplarda, servis yükleri altında arazide ölçülen strut yükleri tasarım aşamasında hesaplanan yüklerden daha düşük ölçülmüştür (Lambe 1970). Bu durumun zemin parametrelerindeki belirsizlik sonucunda meydana geldiği değerlendirilmiştir (Lambe 1970). Swatek ve diğ. (1972) yerel zemin koşullarının yumuşak-orta katı siltli kil birimlerden meydana geldiği, Chicago’da inşa edilen National Plaza için uygulanan derin kazı destekleme sisteminin performansını incelemişlerdir. Destekleme sisteminde 6 sıra strut kullanılmış ve ölçülen strut yüklerinden hareketle hesaplanan yatay toprak basıncı, Peck (1969) önerdiği toprak basıncından 1,8 kat daha küçük elde edilmiştir. Çevik ve diğ. (2021) tarafından aşırı deformasyona uğramış bir kazı destekleme sisteminde ilave çelik strutlar ile tasarım yapılarak deformasyonların kontrol altına alındığı bir çalışma yapılmıştır. Plaxis 2D yazılımı kullanılarak yapılan geri analizler ile arazideki deformasyon davranışı bulunmuş daha sonra mobilize olmuş toprak yüklerinin karşılanması için 2 sıra çelik strut kullanılmasına karar verilmiştir. Strain gauge okumaları ile elde edilen strut yükleri, hesaplanan strut yükleri ile mertebe ile uyumlu olduğu görülmüş olup destekleme işlemi sonrası kazı taban kotuna başarıyla inilmesi sağlanmıştır.

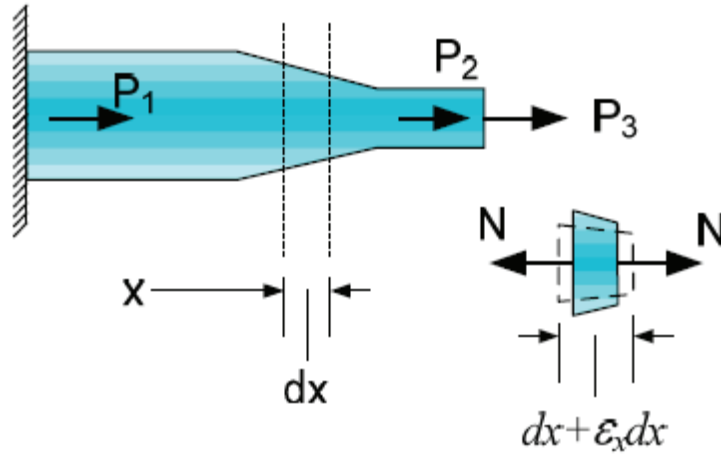


Şekil 1. Peck (1969) toprak basıncı dağılımları

Bu çalışmada Çekmeköy-Sultanbeyli Metro Projesi kapsamındaki bir istasyon yapısında çelik strutlara gelen yüklerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma kapsamında Visual Basic programlama dili ile bir program geliştirilerek kazı destek elemanlarının servis yükleri altındaki arazi performanslarını gözlemleyen mühendisler için strutların üzerine gelen yüklerin tahmin edilmesine dair pratik bir yöntem sunulmuştur.

2 EKSENEL KUVVET ETKİSİNDEKİ ÇUBUKLAR

Strutlar gibi aksenal kuvvet etkisindeki çubuklarda gerilme-şekil değiştirme bağıntıları kullanılarak hesaplar yapılmaktadır. Şekil değiştirme hipotezine göre aksenal normal kuvvete maruz çubuklarda çubuk eksenine dik ve düzlem olan kesitler, çubuk eksenini doğrultusunda ötelenme hareketi yaparlar (Erol ve diğ., 2011). Bu hipoteze göre en kesit üzerindeki her nokta aynı normal birim şekil değişimini yapar. Normal birim şekil değişimi sabit olup en kesit üzerinde noktadan noktaya değişmez, Hooke yasası geçerlidir. Ayrıca açısız birim şekil değiştirmeler de olmadığından kayma gerilmeleri sıfır olmak zorundadır. Şekil 2’ de gösterilen aksenal kuvvetlere maruz kalan bir çubuk iki yüzünden etkiyen aksenal kuvvetlerin etkisiyle şekil değiştirmektedir. Bu parçadaki boy değişiminin tüm çubuk boyunca integrasyonu ile çubuğun boyundaki toplam değişime hesaplanır. Aksenal yüklü çubuklarda boy değişimi δ ile gösterilir. Aksenal kuvvete maruz çubuklardaki boy değişimi normal kuvvetle (N) doğru, uzama rijitliği (EA, burada E elastisite modülü, A kesit alanını temsil etmektedir) ile ters orantılı olarak değişmektedir. Çalışma kapsamında Visual Basic programlama dili kullanılarak geliştirilen yazılıma ait ara yüz Şekil 3’ te gösterilmiştir. Yazılımda girdi parametreleri strut çapı, et kalınlığı, uzunluğu ve aksenal kısalma girilerek neticesinde oluşan aksenal yük değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 2. Aksenal kuvvet şekil değiştirme hesabı

$$\delta = \frac{NL}{EA} \quad (1)$$

Strut Yük Hesabı ×

Strut Özellikleri

Çap D (m)=

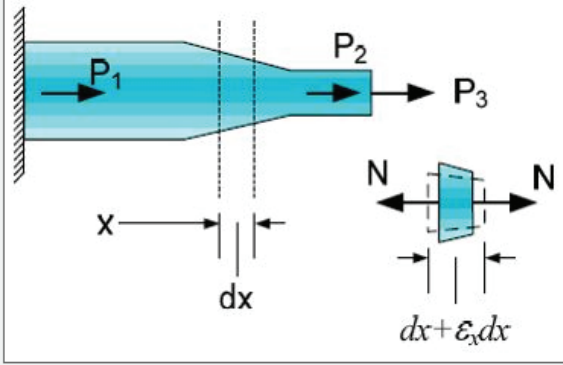
Et kalınlığı t (m)=

Uzunluk L (m)=

Elastisite modülü E (kPa)= 210000000

Strut Eksenel Kısalması

Delta d (m)=



HESAPLA

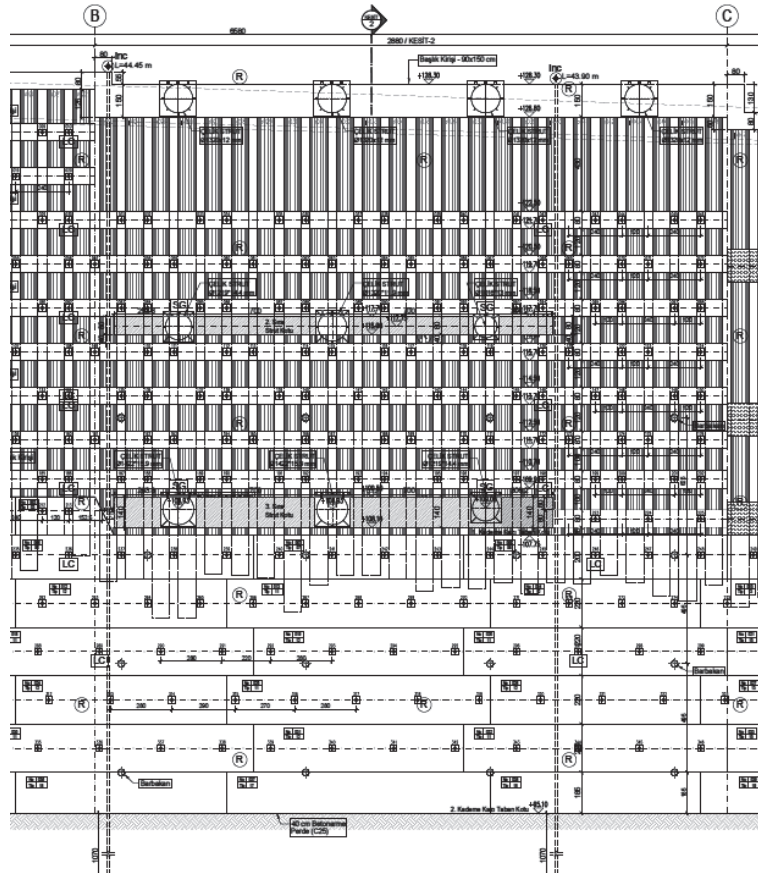
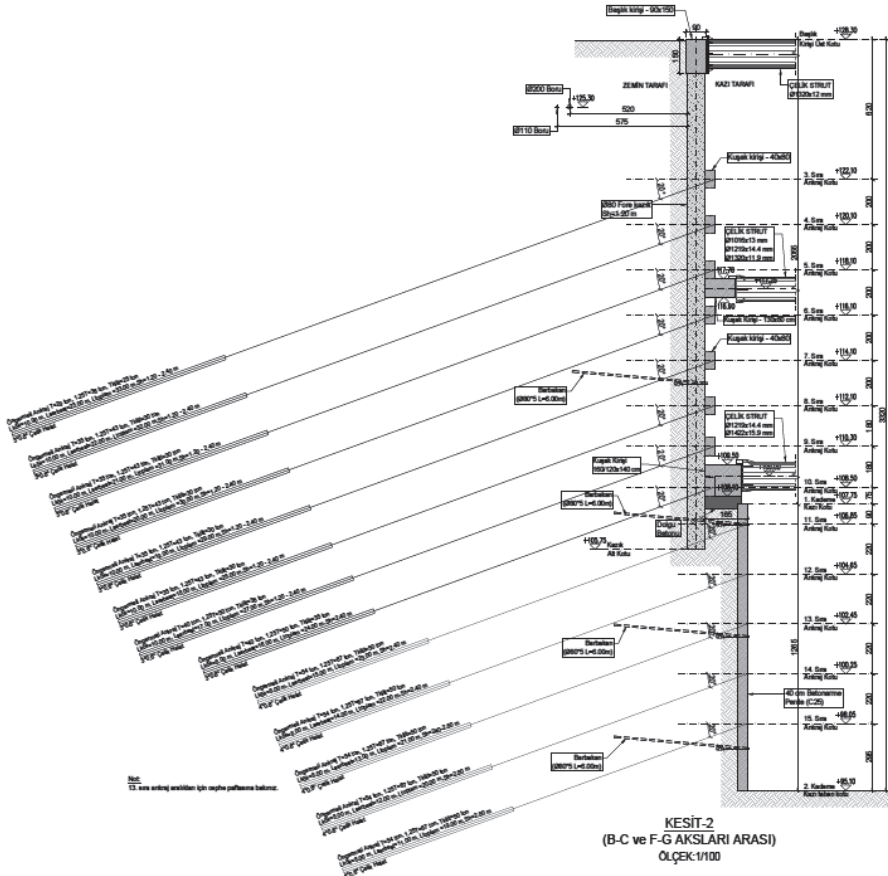
N (kN)= 5096,9303

Developed by Safa Çevik (2022)

Şekil 3. Geliştirilen yazılım

3 ARAZİ ÇALIŞMASI

Proje kapsamında yapılan derin kazı destekleme sisteminde, yatay destek elemanı olarak çelik strut ve ön germeli ankrajlar kullanılmıştır (Şekil 4). Kazı derinliği yaklaşık 33,20 m' dir. Zemin profili yüzeyden itibaren 20 m kalınlıklı orta katı-katı kil birimi takiben orta ayrılmış kireçtaşı birimden meydana gelmektedir. Bu çalışma kapsamında sadece strut yükleri değerlendirilmiştir. Strutlar üzerine gelen yükler NTC Thermistor (3KD-ATF) sensör teknolojisi ile üretilmiş; çözünürlüğü $1\mu\epsilon$, hassasiyeti $\pm 0.1\%$ FSR ve ölçüm aralığı $1000-4000\mu\epsilon$ olan SJ-2000 V.W. model strain gauge ile ölçülmüştür. Geliştirilen yazılım ile servis yükleri altında ölçülen bu deplasmanlara karşılık gelen yükler hesaplanarak strain gaugeler vasıtasıyla ölçülen yükler ile mertebesiz kontrolü yapılmıştır. Çalışmada kapsamında kullanılan strut çapları 1,016-1,422 m, et kalınlıkları ise 11,9-15,9 mm arasında değişmektedir (Şekil 4). Arazide montajı yapılan strain gauge Şekil 5' te, prizma yerleşimi ise Şekil 6' da gösterilmiştir. Strain gaugeler strut üzerine kaynak ile prizmalar ise strut üzerine civata ile tutturularak sabitlenmektedir. Strain gauge ile direkt olarak strut üzerindeki yükler ve reflektör/prizma ile de strut üzerinde meydana gelen deformasyonlar ölçülmüştür. Prizma okumaları periyodik olarak günlük, gerekli görülmesi halinde günde 2 defa alınmıştır. Strain gauge okumaları ise GEI GMUX G801 Model dijital web tabanlı otomatik datalogger ile gerekli görüldüğü durumlarda saatlik okumalar şeklinde alınmıştır.



Şekil 4. Kazı destek sistemi kesiti



(a)



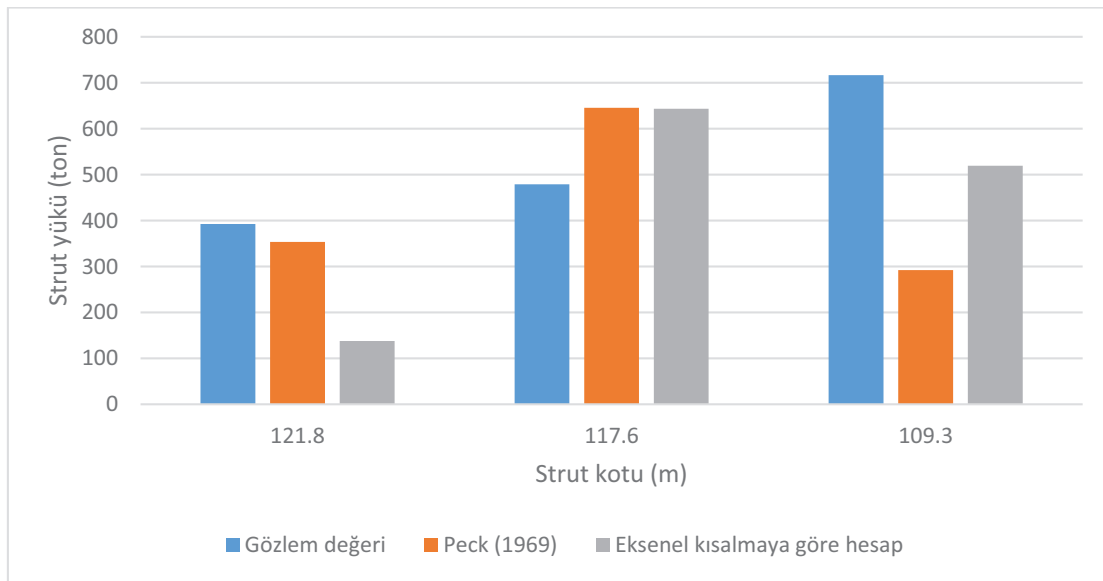
(b)

Şekil 5. Strain gauge montajı

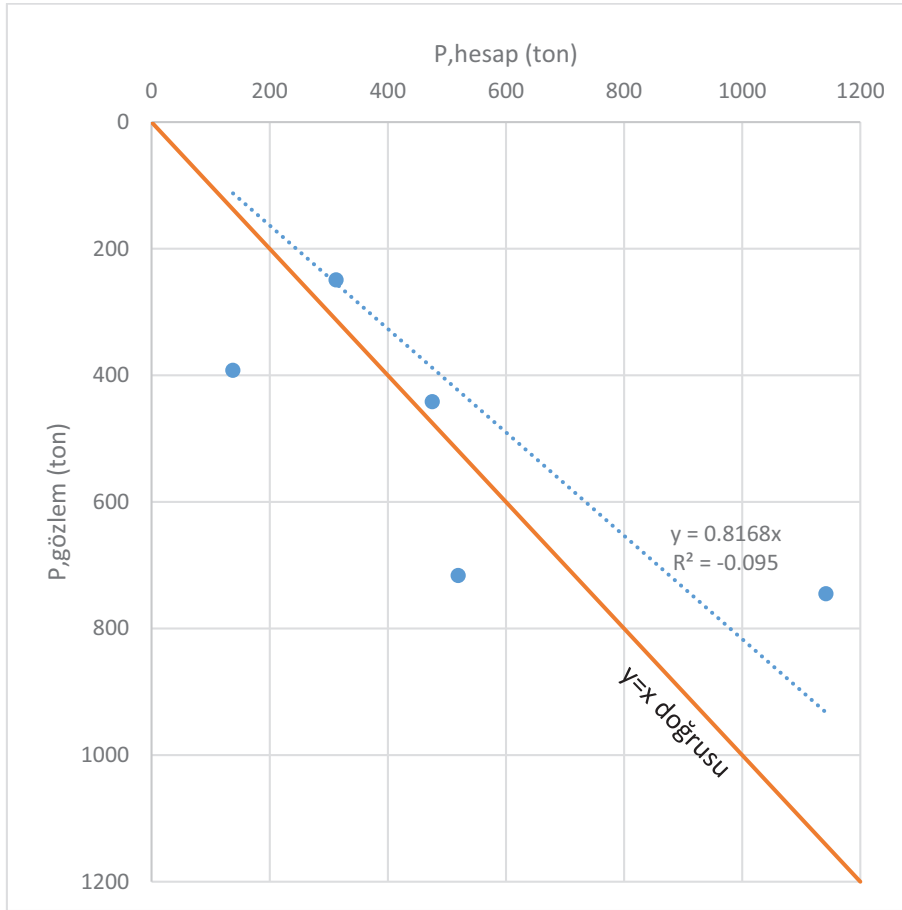


Şekil 6. Prizma montajı

Peck (1969) tarafından önerilen yöntemle hesaplanan strut yükleri arazi verileri ve eksenel yüklü çubuklar için yapılan hesapla karşılaştırılmıştır (Şekil 7). Ayrıca arazide servis yükleri altında okunan gözlem strut yükleri, eksenel yüklü çubuklar için yapılan hesap sonucu elde edilen hesap yükü karşılaştırmalı olarak Şekil 8’ de verilmiştir. Arazide strutlar üzerindeki yükler nihai kazı kotu için alınmıştır. Araziden elde edilen 5 veri üzerinden yapılan çalışmaya göre hesaplanan strut yükleri ile arazi verileri ile elde edilen yüklerin mertebesel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Böylelikle servis yükleri altında üzerinde strain gauge bulunmayan strutlarda, prizma/reflektörden okunan deformasyon miktarlarına göre hesaplanacak yük değerlerinin mertebesel değerlendirmesi için pratik bir yöntem olarak kullanılabilceği görülmüştür.



Şekil 7. Peck (1969) sonuçları ile kıyaslama



Şekil 8 Arazi okumaları ve hesap ile elde edilen değerlerin karşılaştırılması

4 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, derin kazı destekleme sistemlerinde kullanılan çelik strutların üzerine gelen yüklerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Çekmeköy-Sultanbeyli Metro Projesi kapsamında inşa edilen bir istasyona ait derin kazı destekleme sistemi vaka analizi olarak incelenmiştir. Eksenel kuvvet etkisi altındaki çubukların hesabı için kullanılan denklem yardımıyla reflektör okuma değerlerine göre yük hesabı yapılmıştır. Ayrıca Peck (1969) yöntemi ile de hesap yapılmıştır. Hesaplanan değerler arazide strain gauge ile ölçülen strut yükleriyle kıyaslanarak merite kontrolü yapılmıştır. Elde edilen değerlerin arazi okumaları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bununla birlikte bazı noktalardaki farkların ölçüm ekipmanlarındaki hassasiyetlerden meydana geldiği düşünülmektedir. Çalışma kapsamında sınırlı sayıda arazi verisi kullanılmış olup elde edilen değerler proje alanı ile sınırlı kalmaktadır. İleride yapılacak çalışmalarda veri seti sayısı artırılarak daha hassas korelasyonlar elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- Çevik, S., Kadiroğlu, T., Zengin, M. ve Avşar, C. (2021). Derin Kazı Destekleme Sistemi Tasarımına Ait Vaka Analizi Değerlendirmesi, 5. *Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu* (ISBN: 978-605-9678-27-8), s.122-128, Zonguldak.
- Erol, H., Şengel, S. ve Çelikörs, Y. (2011). Mukavemet 2- Sunu Ders Notları, *ESOGU*, Eskişehir.
- Lambe, T. W. (1970). Braced Excavations, *Proceedings of the Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth-Retaining Structures*, American Society of Civil Engineers, s.149–218.
- Peck (1969) Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground.
- Swatek, E. P., Jr., Asrow, S. P. ve Seitz, A. (1972). Performance of Bracing for Deep Chicago Excavation, *Proceedings of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures*, American Society of Civil Engineers, Vol. 1, Part 2, s.1303–1322.

Sentetik Fiber, Çelik Fiber ve Çelik Hasırın Püskürtme Beton Mukavemetine Etkisi

Effect of Synthetic Fiber, Steel Fiber and Steel Mesh on Shotcrete Strength

G. Okcu

Eti Bakır A.Ş. Küre Yeraltı İşletmesi, Kastamonu

ÖZET: İşletme faaliyeti sonucu açılan boşluğun çalışma süresince emniyetli şekilde açık tutulması için alınan tedbirlerin toplamına tahkimat adı verilir. Püskürtme beton tahkimatın önemli bir parçasıdır. Püskürtme beton, yoğun ve homojen bir yapı elde etmek amacıyla bir hortum ucundan pnömatik olarak yüksek basınçla püskürtülen çimento, su ve agrega karışımıdır. Donatısız püskürtme beton, kırılgan bir malzemedir ve çekme gerilmelerine düşük bir direnci vardır. Püskürtme beton uygulamasının dayanım değerlerinin artırılması için donatılarla birlikte uygulanması gerekmektedir. Donatı olarak çelik hasır ya da çelik veya sentetik lifler kullanılmaktadır. Donatılı püskürtme betonun dayanımı incelenip olumlu ve olumsuz yönleri belirlenmiştir.

ABSTRACT: The sum of the measures taken to keep the gap opened as a result of the operating activity safely open during the operation is called support. Shotcrete is an essential part of support. Shotcrete is a mixture of cement, water and aggregate that is pneumatically sprayed with high pressure from a hose end in order to obtain a dense and homogeneous structure. Unreinforced shotcrete is a brittle material and has a low resistance to tensile stresses. In order to increase the strength values of the shotcrete application, it should be applied together with the reinforcements. Steel mesh or steel or synthetic fibers are used as reinforcement. The strength of reinforced shotcrete was examined and its positive and negative aspects were determined.

1 GİRİŞ

Çalışmaya konu olan bakır işletmesi Kastamonu İli, Küre İlçesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Maden işletmesi Kastamonu şehir merkezine yaklaşık 58 km, İnebolu'ya 30 km uzaklıkta olup asfalt yol ile bağlıdır. İnceleme alanı içerisinde yer alan maden işletmesi eski tarihlerden beri işletilmekte olup bakır cevheri çıkarılması amacıyla faaliyet göstermektedir. Çalışmanın yapıldığı galerilerde halen üretime devam edilmektedir (Çobanoğlu, 2019).

Çalışma konusu olan galerilerin yüzeylerin tamamı tahkimatlı ilerlemektedir. Bu durum kaya kütlelerinin zayıfladığı, fay zonlarına giriş-çıkış kesimlerindeki açıklıkların bulunması ve galeri içi su gelimine bağlı olarak stabil kazı koşullarının oluşabilmesi için zorunlu olarak uygulanmaktadır (Çobanoğlu, 2019).

Bölgede daha önce yapılmış çalışmalarda RMR (Kaya Kalite Göstergesi) değerlerinin kuru koşul için ortalama 61.2 ve doygun koşul için ortalama 53.2 olarak değerlendirilmiş ve RMR sonucuna göre çelik hasır takviyeli püskürtme beton kullanılması öngörülmüştür (Çobanoğlu, 2019).

Kazı kesiti pasa için 5x5 mt ve cevher için 7x5 mt olması açısından bütün galerilerde püskürtme beton uygulaması zorunludur. Püskürtme beton olmadan ilerleme yapılmamaktadır. Püskürtme beton olmayan alan açık alan olarak belirtilip çalışma yapılması veya altına girilmesi kesinlikle yasaktır. Şekil 1’de püskürtme beton uygulaması bulunmaktadır.



Şekil 1. Püskürtme beton uygulaması

Galerilerde uygulanan püskürtme beton C30 standartlarına uygun olarak tasarlanmış ve 3 günlük dayanımı 32-37 MPa, 7 günlük dayanımı 38-45 MPa, 28 günlük dayanımı 45-52 MPa ve kalınlığı 7-8 cm birinci kat ve 10-12 cm hasır üstü (ikinci kat) olacak şekilde uygulanmaktadır. Bu değerler RMR ile iyi uyumlu görünse de hem işçilik hem de maliyet açısından işletmeye zarar vermektedir.

Bu çalışma kapsamında Kasım 2021 tarihinde yapılan testler yeraltı galerilerinde mevcut iş devam ederken, işi engellemeden ve tamamen hazırlıksız olarak gerçekleştirilmiştir.

Püskürtme betonun eğilme mekanizması altında kırılma sonrası davranışını incelemek amacıyla farklı türde lif içeriği ve çelik hasırın kullanıldığı püskürtme beton örneklerine panel testi uygulanmıştır. Literatür olarak püskürtme betonun eğilme davranışı panel testi sonucu elde edilen enerji yutma kapasitesi ile belirlenmektedir.

2 MALZEME VE YÖNTEM

İTÜ Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetim Enstitüsü Müdürlüğü’nde yapılan testler EFNARC (tokluk indeksi ölçümünde kullanılan plaka eğilme deneyi) ve TS EN 14488-5 standartlarına uygun olarak 600 mm kenar ve 100 mm yüksekliğe sahip plak numuneleri kullanılarak yapılmıştır. Plak numuneler açıklığı 500 mm olan kare çelik mesnet üzerine tam oturacak şekilde yerleştirilmiştir. Plak numunesi yerleştirildikten sonra numunenin altına iki adet LVDT yerleştirilmiştir. Plak numunenin tam ortasına denk gelecek şekilde yük uygulanmıştır. Elde edilen verilere göre yük-sehim ilişkisi incelenerek numunelerin enerji yutma kapasiteleri belirlenmiştir. Kara Yolları Emniyet Şartnamesi Tokluk sınıfı Çizelge 1’de belirtilmiştir.

Çizelge 1. EFNARC'a göre tokluk sınıfı

Tokluk	25 mm'lik sehime kadar joule cinsinden yutulan enerji
a	500
b	700
c	1000

Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar 1 m³'te 3 kg sentetik fiber içeren plak numuneler, Q257/257 çelik hasır içeren plak numuneler ve 20 kg çelik fiber içeren plak numuneler kullanılmıştır. Sentetik fiber içeren plakaların 25 sehime karşılık gelen tokluk değeri ve plak numunelerin taşıdığı maksimum yük değeri Çizelge 2-4 'de gösterilmiştir. Kırılmış Plak numunesi Şekil 2'de gösterilmiştir. Çelik fiber içeren plakaların 25 sehime karşılık gelen tokluk değeri ve plak numunelerin taşıdığı maksimum yük değeri Çizelge 5'de ve fiberli beton beslemenin görüntüsü ise Şekil 3'de gösterilmiştir. Q257/257 çelik hasır içeren plak numunelerin 25 sehime karşılık gelen tokluk değeri ve plak numunelerin taşıdığı maksimum yük değeri Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2. Birinci testin sonuçları (sentetik fiber)

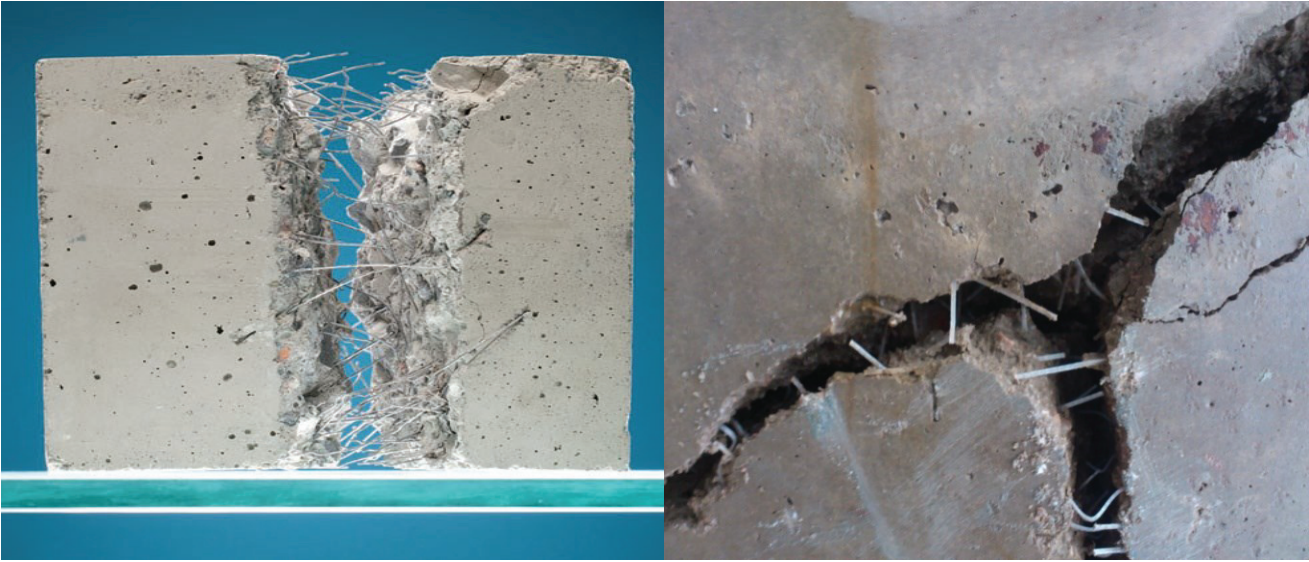
	Numune Kodu	25 mm'lik sehime kadar joule cinsinden yutulan enerji	Max. Yük (kN)
Sentetik Fiber	1	667	50
	2	844	66
	3	747	44
	4	709	54
	Ortalama	742	54

Çizelge 3. İkinci testin sonuçları (sentetik fiber)

	Numune Kodu	25 mm'lik sehime kadar joule cinsinden yutulan enerji	Max. Yük (kN)
Sentetik Fiber	1	694	37
	2	503	35
	3	707	38
	4	510	34
	Ortalama	604	36

Çizelge 3. Üçüncü testin sonuçları (sentetik fiber)

	Numune Kodu	25 mm'lik sehime kadar joule cinsinden yutulan enerji	Max. Yük (kN)
Sentetik Fiber	1	807	65
	2	733	57
	3	880	78
	4	657	59
	Ortalama	769	65



Şekil 2. Kırılmış plak numunesi

Çizelge 4. Dördüncü testin sonuçları (çelik fiber)

	Numune Kodu	25 mm'lik sehime kadar joule cinsinden yutulan enerji	Max. Yük (kN)
Çelik Fiber	1	1080	51
	2	911	53
	3	1114	48
	4	1644*	71
	Ortalama	1035	51

*plak numunesi gerekli olan boyuttan fazla olduğu görülmüştür (değerlendirmeye alınmamıştır).



Şekil 3. Fiberli beton besleme

Çizelge 5 : Beşinci testin sonuçları (çelik hasır)

Q257/257 Çelik Hasır	Numune Kodu	25 mm'lik sehime kadar joule cinsinden yutulmuş enerji	Max. Yük (kN)
	1	1088	65
	2	1187	72
	3	1109	64
	4	1043	59
	Ortalama	1107	65

3 SONUÇLAR

Püskürtme betona eklenen sentetik ve çelik fiber ile zemine uygulanan çelik hasırın üzeri püskürtme beton ile kapatılmasıyla tokluk artmaktadır. Fakat yalın betonun parçalara ayrıldığı gözlemlenmiştir. Çelik hasır kullanılan plaklarda ilk kırılma yükü daha yüksektir, fakat 25 mm'lik sehime ulaşmadan kopmalar olmaktadır. Çelik ve sentetik fiberin kırılma yükleri yüksek olmamasına rağmen kopmalar görülmemiştir. **Bu durum ani çökme riskini azaltmaktadır.**

Fiberlerin tüm betona homojen yayılmasından kaynaklı betonda parçalanma ve dökülme azalmış, fakat çelik hasırın üzerindeki beton parçalanarak dökülmüştür.

Tüm bu sonuçlar ele alındığında tünellerde uygulanan püskürtme beton içindeki çelik hasır kullanımını az bir farkla olsa da önde görünmektedir. Fakat çelik hasır maliyeti, uygulamadaki zaman kayıpları ve iş gücü açısından oluşan kayıplar çelik tele oranla çok daha yüksek bulunmuştur.

Sentetik fiberin uygulama anında karışımı, uygulama anındaki çevreye saçılımı, atık su pompalarının filtrelerini tıkaşından kaynaklı sorunlar, topaklanmadan kaynaklı ızgaradan geçmeme durumu ve flotasyon tesisindeki ayrıştırma ile alakalı sıkıntılardan kaynaklı cevher ilerlemelerinde uygun görülmemiştir. Ayrıca püskürtme anında nozzle ucundan çıkan fiber sayısı ile betonun içinde bulunan fiber sayısının eşit olmadığı, yaklaşık olarak %20-25 civarında eksilme olduğu görülmüştür. Sentetik fiberden alınan karot numunesi ile yapılan tek eksenli basma testinde (UCS) beton dayanımını yalın betona oranla %15-20 arasında düşürdüğü görülmüştür.

Sentetik fiberin korozyon sorunu olmadığından, hafif ve maliyet açısından daha uygun olduğundan dolayı cevher olmayan galerilerde kılavuz ve rampa gibi ilerlemelerde uygulanması uygun görülmüştür.

Çelik fiberin gerek havadaki tozlardan gerekse yeraltı suyunun pH derecesinden dolayı korozyona uğradığı ve bir yıldan az zamanda hava veya suya temaslı olduğu bölgelerde özelliğini yitirdiği görülmüştür. Çelik fiberin yalnızca cevher galerisi ilerlemelerinde kullanılması uygun görülmüştür.

Çelik hasırın ilk alım maliyeti, açık zemine püskürtme beton atılmadan uygulanamaması, uygulandıktan sonra korozyonu önlemek ve dayanımı arttırabilmek amacıyla tekrar püskürtme beton ile yüzeyinin kapatılması, gerekli olan araç ve kullanılan malzeme olarak gereksinimleri fiberlere oranla yüksektir. Ayrıca ilerleme konusunda fiber kullanımını hasır üzeri beton uygulanmasına gerek olmadığından dolayı iş ve zaman kaybını önemli ölçüde azaltmaktadır. Hasır üzerine atılan püskürtme betonda oluşan rötre çatlağı zamanla genişleyerek daha büyük çatlaklara sebep olmakta ve bu çatlaklardan dolayı kendini tutamayan beton tehlike arz etmektedir. Daha önce işletmede buna benzer durumlardan kaynaklı kazalar yaşanmıştır.

Çelik hasırların litolojiden kaynaklı düşük dayanımlı zeminlerde ve geçiş zonlarında, zemindeki aşırı deformasyonun olduğu bölgelerde ve güvenliğin yüksek olması gereken alanlarda kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte hasır uygulamasının üzerini kapatma amaçlı uygulanan püskürtme betonda her halükarda fiber kullanılması gerekmektedir.

4 ÖNERİLER

- Birincil üretim (cevher) galerilerinde püskürtme beton ile birlikte çelik fiber kullanılması,
- Ana rampa, havalandırma galerileri, ikincil üretim (cevher) galerileri, havuzlar, sığınma istasyonları, araştırma galerileri ve siyal şeyl, cevher-pasa geçişlerindeki mukavemeti düşük vb. bölgelerde çelik hasır ile birlikte zemin çivisi kullanılması,
- Kuzey-güney kılavuzları, crosscut'lar ve çelik hasır uygulamasının üzerini kaplama amaçlı uygulanan püskürtme betonlarda ise sentetik fiber kullanılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Çobanoğlu, İ., 2019. Eti Bakır Maden San. Ve Tic. A.Ş. Küre (Kastamonu) Bakır Madeni İşletmesi Ocak Galerileri Kaya Malzeme – Kütle Özellikleri ve Tahkimatsız Ayakta Kalma Sürelerinin Belirlenmesine Ait Kaya Mekaniği Raporu, s.1-23.

Low Carbon Lining for Tunnelling Precast Segment How Fibre Reinforced Concrete Could Facilitate This Achievement

B. De Rivaz

NV Bekaert SA, Zwevegem, Belgium

ABSTRACT:

Reinforced concrete tunnels linings have mostly traditionally been cast in situ, but the development of Tunnel Boring Machines has led to the invention of precast concrete segmental lining technology, which is nowadays one of the most promising applications of Fibre-Reinforced Concrete (FRC).

This paper will provide the state of art concerning the use of Fiber Reinforced Concrete (FRC) for precast segment: design principle and example of carbon counting on recent project. Recent projects have demonstrated that structural ductility, durability, and sustainability are going hand in hand, this combined approach will be key requirement in all new project.

1 INTRODUCTION

For a sustainable use of structural concrete, environmental and mechanical performances of concrete structures must have the same importance. By means of sufficiently high mechanical performances, the structural safety of a construction is ensured.

In a tunnelling project, it is generally considered that 60% to 70% of embodied carbon is contained in the concrete linings of the shafts and tunnels. It is paramount, therefore that the tunnelling industry does its utmost to significantly reduce or eliminate its use of cement in all applications – segmental linings, in-situ linings, sprayed concrete, and annulus grouts.

This is the reason why a great challenge for the coming years will be develop solution for low carbon lining.

Mechanical excavated tunnels (tunnels excavated with a TBM – Tunnel Boring Machine) are more and more used in Civil Engineering. In these tunnels, the lining is made assembling precast segments used by the TBM as reacting elements in the excavation process. The use of Fibre-Reinforced Concrete (FRC) allows to reduce or eliminate the traditional reinforcement in the precast segment production. Over the last twenty years, the use of this technology has increased.

The use of Fibre Reinforced Concrete (FRC) allows several advantages, compared with traditional steel mesh or steel bar reinforcement according to fib bulletin 83 and all main recommendation published as:

Cracking control during construction phases

- Higher impact resistance
- Durability advantages at final stage
- Reduction of costs
- Sustainability advantages
- Boosting of the production process

Recent project has demonstrated that structural ductility, durability, and sustainability are going hand to hand.

This holistic approach will be clearly a new booster for FRC tunnel lining. This paper will provide the start of the art on this issue, the key design principal and detail recent cases studies showing impact in carbon calculation saving in France, Middle East, and Australia.

2 SUSTAINABILITY & STRUCTURAL REQUIREMENT

For a sustainable use of structural concrete, environmental and mechanical performances of concrete structures must have the same importance. By means of sufficiently high mechanical performances, the structural safety of a construction is ensured. At the same time, a low environmental impact guarantees a sustainable development, which is, in accordance with the definition by the Brundtland Commission of the United Nations, a "development that "meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" (Brundtland Commission, 1987).

FRC acts on the tensile behaviour of cracked concrete and imparts ductility to a fragile material. FRC's excellent properties which overcome cracking as well as its improved durability over reinforced concrete are why we continue to develop that material and explain its economic success. The Life Cycle Assessment (LCA) is a methodology for assessing environmental impacts associated with all the stages of the life cycle of a product or process. It quantifies a material impact on the environment over its entire existence, from extraction of the raw materials required for its production up to its end of life. This approach, combined with research into a low-carbon solution, will give new momentum to FRC.

3 BASIC FRC BEHAVIOUR

A minimum tensile (strength) strength > 1800 MPa is recommended for final lining application considering the performance required and concrete classes. (Ref 5 A leap forward for SFRC segmental linings in France Tunnel Tech April 2022).

The hooked ends ensure the desired fiber pull-out. This is the mechanism that generates the renowned concrete ductility and post-crack strength.

The tensile strength of a steel fiber has to increase in parallel with the strength of its anchorage. Only in this way can the fiber resist the forces acting upon it. Otherwise, it would snap, causing the concrete to become brittle. On the other hand, a stronger wire cannot be fully utilized with an ordinary anchor design. Therefore, the tensile strength of a fiber has to be perfectly aligned with its anchorage system and its diameter.

Wire ductility and concrete ductility are two different aspects. Dramix® 3D and 4D steel fibers create concrete ductility by the slow deformation of the hook during the pull-out process, and not by the ductility of the wire itself.

4 DESIGN PRINCIPLE

Model Code 2010 is the most comprehensive code on concrete structures. It covers their complete life cycle from conceptual design, dimensioning, construction, and conservation through to dismantlement. It is edited by fib Model Code 2010 was produced through the exceptional efforts of participants in 44 countries from five continents.

Figure 1 illustrates the design process involved, from beam tests, classification, design values, and constitutive laws.



Figure 1. Design process.

The tensile behavior of the materials was characterized by performing bending tests on a notched beam. The tests were performed according to the EN 14651 European code, which is the reference standard for the CE label of steel and for ISO certification.

The compressive strength of the materials was measured by a testing cube with a side of 150 mm. For every cast made to produce every single segment, three beams were produced. In agreement with EN 14651, nominal strengths corresponding to four different crack mouth opening displacement (CMOD), namely 0.5, 1.5, 2.5 and 3.5 mm, were evaluated.

Figure 2 and 3 shows a typical result of the beam tests considering 40kg fibre type Dramix® 4D 80/60BG with significant strength values. FL is peak force, f_{R1} and f_{R3} are the stresses related to CMODs equal to 0.5 and 2.5 mm respectively. These values are the reference ones for final lining design performed according to the fib Model Code 2010 prescriptions.

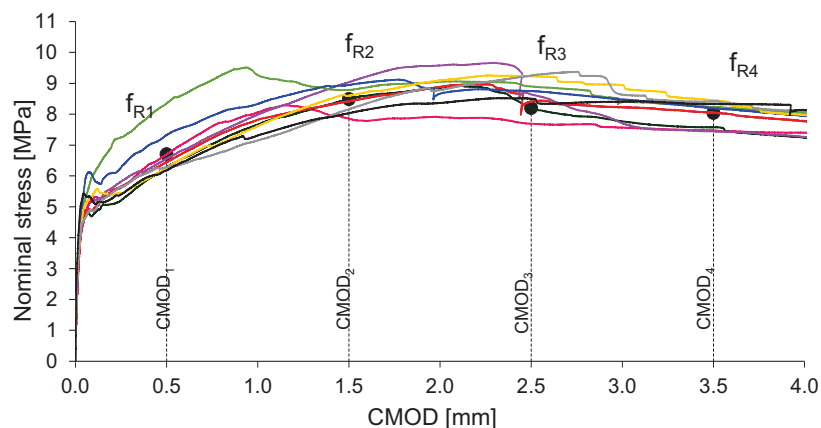


Figure 2. Curve Load -deflection of the beam bending tests according to EN 14651 (Roma University Report).

	f_L [Mpa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
Beam_01	4.68	6.70	7.86	7.69	7.47
Beam_02	4.90	6.28	8.49	8.20	7.58
Beam_03	4.78	6.45	8.41	8.42	8.04
Beam_04	5.15	6.56	9.04	8.64	7.44
Beam_05	5.72	7.33	8.95	8.75	8.19
Beam_06	5.03	6.27	8.60	9.23	8.45
Beam_07	5.63	7.75	10.2	8.99	8.54
Beam_08	4.60	6.28	8.16	9.25	8.40
Beam_09	5.43	6.18	8.03	8.50	8.33
Average	5.10	6.64	8.64	8.63	8.05
Characteristic	4.30	5.58	7.26	7.65	7.19

Figure 3. Results of the beam bending tests according to EN 14651 mean and characteristic value (Roma University Report).

To dimension a steel fiber-reinforced concrete segment, a reference test methodology needs to be adopted for the characterization of performance. In addition to the mechanical performance, various properties of the FRC can be specified.

Since brittleness must be avoided in structural behavior, fiber reinforcement can be used as substitution (even partially) of conventional reinforcement (at ULS), only if both the following relationships are fulfilled:

$$\begin{aligned} f_{R1k} / f_{Lk} &> 0.4 \\ f_{R3k} / f_{R1k} &> 0.5 \end{aligned}$$

Where f_{Lk} is the characteristic value of the nominal strength, corresponding to the peak load (or the highest load value in the interval 0 – 0.05 mm), determined from the EN 14651 beam test.

It is recommended to realize 12 beams per dosage and concrete mix formula.

If fibres are used as the only reinforcement for final lining, hardening post-crack behavior at section level (beam test) allow immediately:

- Cracking control at SLS
- Structural ductility (ULS)

5 LOW CARBON PRECAST SEGMENTS CASE STUDIES

5.1 Grand Paris

The use of steel to replace all or a part of conventional reinforcement has been demonstrated to lower the embodied CO₂ of the segmental lining. While it is possible to significantly reduce the embodied CO₂ of a concrete mixture for segment production by replacing a portion of its cement content with alternative cementitious materials, there is little or no difference between the cementitious blends and contents required to produce fiber reinforced or conventionally reinforced concrete segments for tunnel linings.

Figure 4 shows an example reduction in CO₂ emissions on a project made possible by modification of the concrete and further reduction by being able to replace the rebar with steel fibers in a dosage that satisfied all the design requirements. On a per pound (kg) basis the

embodied CO₂ of conventional rebar and steel fibers is assumed the same. This is a generalization assuming the wire rod that the fiber is produced from, and the rebar have similar % recycled material content and similar steel production methods. In a precast segment the reduction in carbon footprint is due to the steel fibers being more efficient in reinforcing the element. In this example the elimination the combination of the right binder and steels fibre could conduct to a reduction 70%.

The recent project for the Grand Paris Linea 16.1 has shown the following reference:

- From the saving in the ratio of fibers compared with steel reinforcement bars, leading to a significant reduction in CO₂ emissions during transportation. If we compare 85kg/m³ for steel reinforcement bars with the 40kg/m³ for fibers, we get a saving on materials of more than 50%.
- By the benefit of better optimized loading for the fibers. 22 big bags of 1,100/kg per truck = 24.2 tons per load for the delivery of the fibers in comparison with 60 equivalent segments per truck = 17.85 T for the delivery of the concrete reinforcement bars.
- From the small diameter of the fibers which helps to further limit toxic emissions from the primary steel industry, due to primary coils which do not exceed 1 mm of wire diameter. The drawing technology is low emission.
- Fewer trucks on the road and optimized waste management in a large city like Paris is an important element to take into account. From an ecological point of view, the carbon balance is therefore very positive. In this respect, Bekaert has recently obtained its EPD (Environmental Product Declaration) Type III ITB certificate number 215/2021.
- The concrete chosen for the Line 16 Lot 1 fibre reinforced segments has a low carbon footprint of 170kg CO₂ equivalent/m³ and reduces the carbon weight of the steel in the segments by 90kg equivalent CO₂/m³ **or nearly 11,000 tons equivalent CO₂ per 10km**



Figure 4. Project jobsite Grand Paris - Photo Credit Eiffage Génie Civil.

In terms of concrete, there will be a before and after Grand Paris Express. Until now, to design the segments, we used reinforced concrete, that is to say concrete poured around cages of massive metal reinforcements.

The graph hereunder illustrates the main impact gain in term of carbon emission for typical Pre-cast segment ring used for a Metro tunnel.

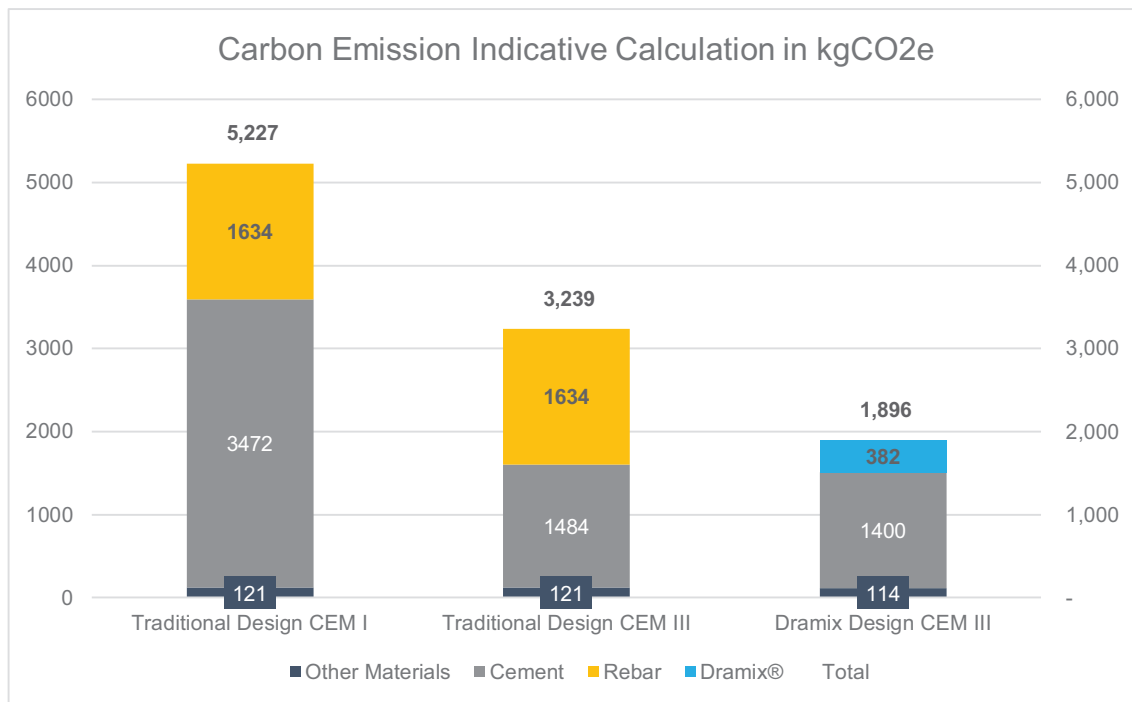


Figure 5. Typical Metro project, precast segment carbon emission counting.

This example (figure 5) is based on the following assumption.

- ⇒ Using a CEM III vs CEMI improves the CO₂ score significantly.
- ⇒ As we use 60% less reinforcement (100kg rebar vs 40 kg Dramix®) and also average rebar EPD is higher than Dramix® EPD, we end up with this difference with reinforcement
- ⇒ Using FRC allows thickness reduction by 2cm mini which results in additional savings in concrete.
- ⇒ Thickness 38 cm

5.2 Middle East Journey

A paper by consultant COWI Denmark entitled ‘Consultant’s view of durable and sustainable concrete tunnel constructions in the Middle East’ WTC 2018 Dubai provides this example how much CO₂ emission saving was reached by replacing traditional concrete and steel-reinforced with steel fiber reinforcement and adding GBBS/FA to the concrete mix. provides an example of reduction of concrete and further reduction by being able to replace the rebar with steel fibres in a dosage that satisfied all the design requirements.

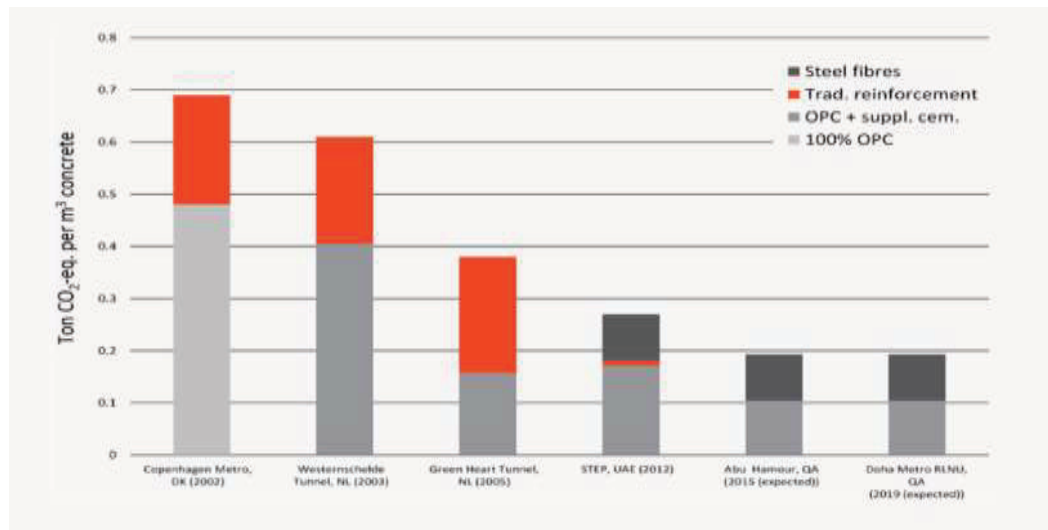


Figure 6. Evolution of Precast segment lining (Cowi /C.Edvarsen publication WTC 2018).

This project as Doha Metro Green line has been designed with FRC using Dramix® fibre based on MC2010 to meet some specific condition:

- ⇒ Very high chloride content: 10,000 - 50,000 mg/l
- ⇒ High sulphate content: 100 – 5,500 mg/l
- ⇒ High soil temperature: 28 - 32° C

Main advantages

- Increased resistance to chloride-induced corrosion
- Eliminated risk of stray current-induced corrosion
- Easier production/handling
- Simplified segment precasting process

This return of experience in Middle East demonstrates that by using FRC increased resistance to chloride-induced corrosion and reduced carbon footprint. Durability and sustainability go hand to hand.

5.3 The Forrestfield Airport Link

The Forrestfield airport link is a “design and construct” type of project; it will deliver an 8.5 km extension of the existing PTA urban rail network in Perth, Western Australia, connecting the Midland Line, just past Bayswater Station, to Forrestfield. The twin-bored tunnels will travel underneath the Swan River, Tonkin Highway and Perth Airport. The project will include three new stations; Redcliffe Station (located under-ground in Redcliffe), Airport Central Station (located underground at Perth Airport to service both domestic and international terminals) and Forrestfield Station. The tunnel excavation diameter is 7,100 mm; the segmental lining has an inside diameter of 6,170 mm, and thickness of segment is 300 mm with an average length of 1,600 mm.

The segmental lining was designed to meet the project’s concrete requirements of 120-year service life with a minimum water/binder ratio of 0.35. This article draws its attention to the specific concrete mix design from the design up to the construction phases of the precast segmental linings.

Several trials were performed with cast concrete beams according to standard BS EN 14651 (single trial was made with #9 concrete beams) with 35 kg/m³. The characteristic values of these results were more than the serviceability state 5.08 MPa at CMOD1 and 5.28 MPa at

CMOD3. The results have confirmed the assumptions for the quantity reduction and the mix with 35 kg/m³ of Dramix® 4D 80/60BGP steel fibres content was adopted in project works.

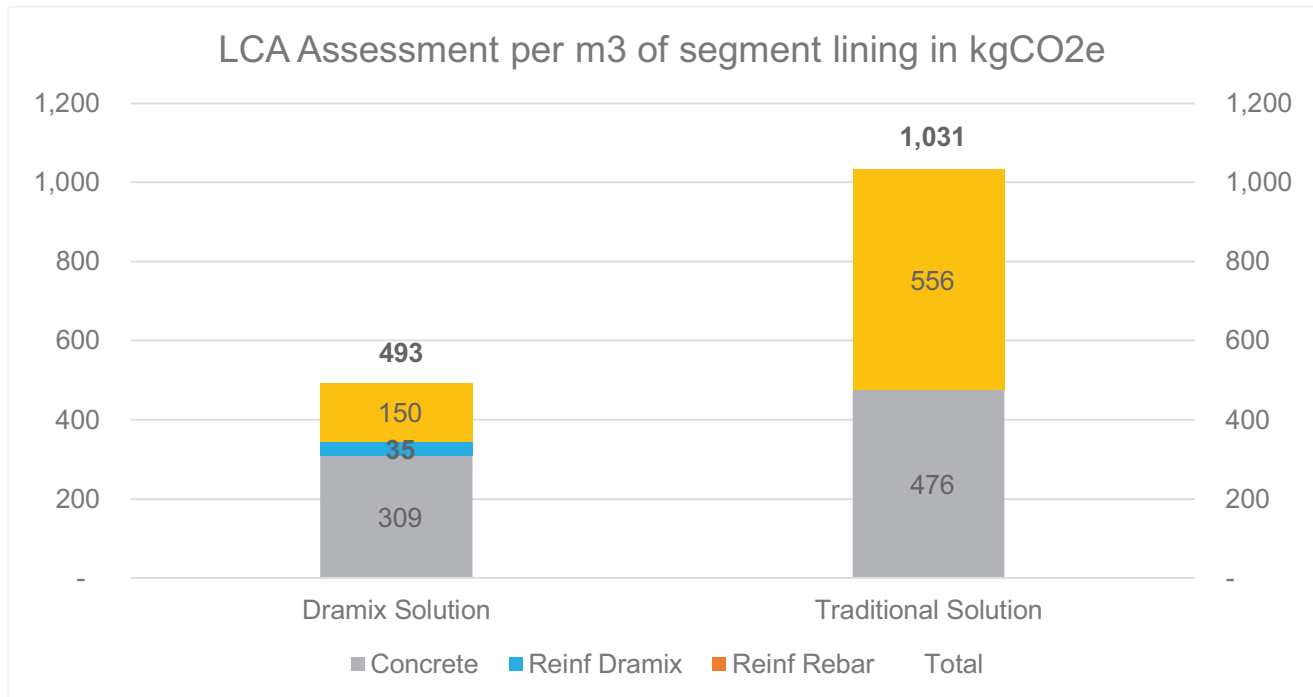


Figure 7. One Click LCA calculation.

6 EPD CERTIFICATE

An Environmental Product Declaration (EPD) is a document that transparently communicates the key environmental performance indicators of a product over its lifetime.

A third-party verification ensures that data relating to environmental aspects of Dramix® has been validated by an external organization.

This declaration is the Type III Environmental Product Declaration (EPD) based on EN 15804:2012+A1 and verified according to ISO 14025 by an external auditor. It contains the information on the impacts of the declared construction materials on the environment. Their aspects were verified by the independent body according to ISO 14025. Basically, a comparison or evaluation of EPD data is possible only if all the compared data were created according to EN 15804:2012+A1.

The environmental impact of Dramix® product (cradle to gate with options) is largely dependent on the energy intensive production of steel (half product) on which the manufacturer has only a limited influence. The carbon impact of steel production (Wire Rods) in the product stage A1 is as high as 85%. The impact of the production line largely depends on the amount of electricity consumed by manufacturing plant (0.34 kWh/kg of product). There are no significant emissions or environmental impacts in the A3 production processes alone (partly gas combustion). The production process itself does not have significant environmental impacts in the life cycle.

Interrogation of the LCA results show that the cradle-to-gate carbon (Global Warming Potential) impact of 1 kg of fibre production is 0.88kg CO₂eq. For comparison, ton of steel produced worldwide in 2019 emitted on average 1.85 tons of carbon dioxide.

The LCA results show that the cradle-to gate primary energy demand of fossil fuel is equal 9.4 MJ. This is due to the production of nuclear energy by the Czech Republic. The transport of raw materials from considerable distances is optimized and not significant (0.007kg CO₂/kg).

7 CONCLUSION

There has been a trend the last years that concrete tunnel linings have increased material consumption, cost, and environmental loads. Nowadays develop and/or improve tunnel construction methodology to choose the optimal tunnel lining, including environmental footprint and cost-effectiveness. Create required knowledge to produce final lining to meet new large infra-structure projects with modern demands to functionality incl. 100-year service life and environmental impact.

The use of steel fibre reinforced concrete will highly participate to meet low carbon lining by concrete consumption and steel reinforcement saving. If ductility and durability have been the key words the last 40 years, the sustainability will be the key driver for further FRC lining development in the coming years.

Indeed, new generation of binder combined with FRC allow new achievement:

- Provide excellent long-term durability performance exceeding that of Portland cement-based concretes.
- Excellent long-term durability performance exceeding that of Portland cement-based concretes. Extremely low embodied carbon footprint compared to conventional concretes on Port-land cements.
- Compared to reinforced concrete, fiber-reinforced concrete notably represents savings of around 5,000 tons of steel for 10 kilometers of tunnels (Typical Metro Tunnel).

REFERENCES

- Allen, C, Nov 2021. Low Carbon Concrete/rules of the thumb, *T&T Journal*.
- April 2022. A leap forward for SFRC segmental linings in France, *Tunnel Tech*.
- Brundtland Commission, 1987. Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development, 1987. United Nations World Commission on Environment and Development. Published as Annex to General Assembly document A/42/427.
- EN 14651, 2005. Test Method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength.
- Edvardsen, C. The consultant's view on service life design, *WTC Congress*.
- COWI A/S, Paral-lelvej 2, DK-2800 Kongens Lyngby, Denmark, *WTC Congress*.
- Edvardsen, C, 2010. The consultants view on service life design. In Proceedings of the Conference on Service Life Design for Infrastructure (PRO 70), Delft, RILEM Publications SARL, 249-264.
- Forrestfield airport link project in Perth, Western Australia. Precast concrete segmental lining. S.C. Scaffidi, Salini Im-pregilo S.p.A., Milano, Italia now e Build Spa &A. Anders, S. Porto & E. Torres SI-NRW JV, Redcliffe, Perth, Western Australia, *WTC 2019*.
- FIB, 2010. Model Code 2010 - First complete Draft, Bulletin 55-56.
- ITB, 2015. EPD – Environmental Product Declaration Type III, No. 215.
- Meda, Prof Alberto, February 2015. Precast segment in concrete newly high tensile strength steel fibre. October 2017. Precast tunnel segments in fibre reinforced concrete fib bulletin 83.
- RILEM. Recommendations for design rules are available for steel fibre reinforced concrete, TC 162-TDF.

Tahkimat Sistemi Olarak Sentetik Fiber Donatılı Püskürtme Beton Kullanımı

Use of Synthetic Fiber Reinforced Shotcrete as Support System

B. Erdal, L.A. Bayraktaroğlu, A.A. Dilber
Kordsa Teknik Tekstil, Kocaeli

ÖZET: Makro ve mikro sentetik fiber donatılar 1990'lı yıllardan itibaren püskürtme betonlarında kullanılmaktadır. Sürekli destekli sistemlerde püskürtme betonlarda tamamen geleneksel donatının yerine kullanılabilirler. Mikro sentetik fiber donatılar betonda plastik ve kuruma rötresi çatlaklarını minimize ederken, makro sentetik fiber donatılar tokluk ve sünekliliği arttırarak daha iyi bir duraylılık sağlar. Makro-Mikro sentetik fiber donatılar EN 14889-2 standardına uygunluk gösterirler. Eşdeğer çapı 0.3 mm büyük olan lif çeşitleri makro, eşdeğer çapı ≤ 0.3 mm olan lif çeşitleri ise mikro olarak adlandırılırlar.

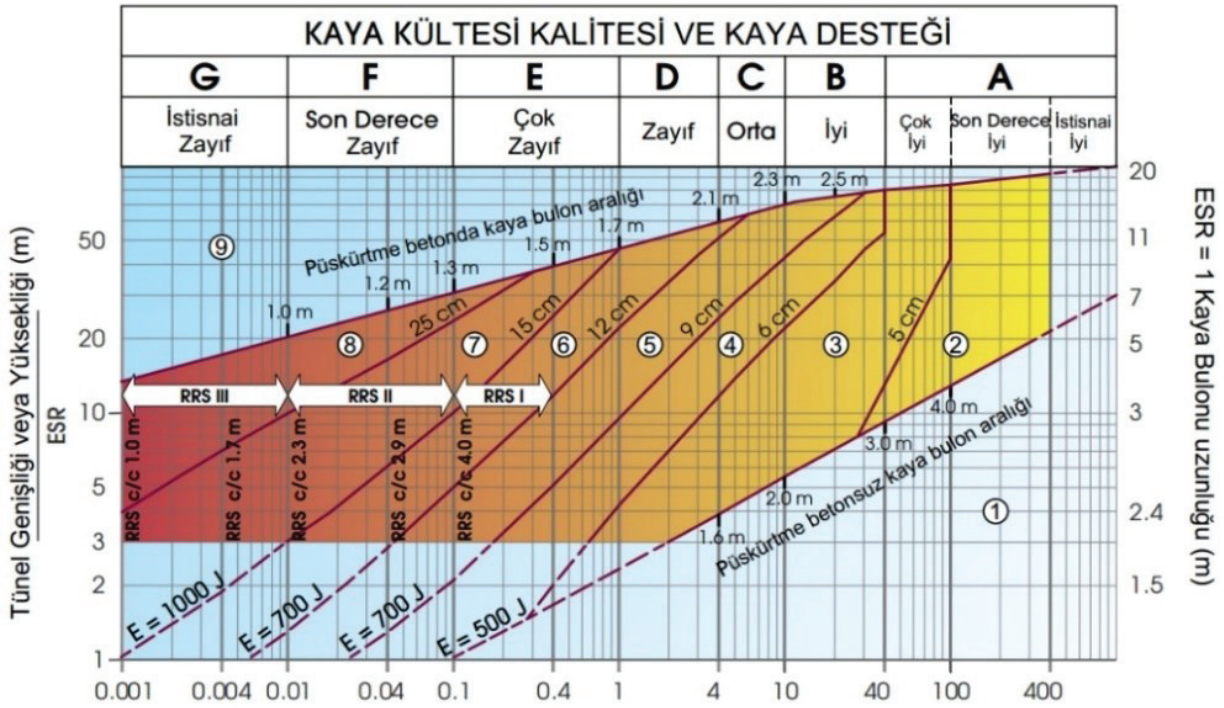
Tünel uygulamalarında kullanılan tahkimat sistemi geçmişten bugüne gelişmekte olan teknolojiye paralel olarak yenilenmektedir. Ağaç kütükleri ile başlayan donatılendirme serüveni, çelik tahkimat sistemleri ile pekişmiş olup, bugünlerde ise tünel yapıları hem pratik hem de dayanıklı olan fiber donatılı beton ile güçlendirilmektedir. Hızlı çalışma anlayışı, verimliliği yüksek planlamanın ön planda olması, tahkimat sisteminin uygulanmasında zaman muhakemesinin iyi yapılmasını oldukça kritik bir noktaya taşımaktadır.

ABSTRACT: Synthetic fibers have been used in shotcrete since 1990s. They can be used to completely replace the conventional reinforcement in continuously supported systems. While micro synthetic fiber reinforcements minimize plastic and drying shrinkage cracks in concrete, macro synthetic fibers provide durability by increasing toughness and ductility. Macro-micro synthetic fiber reinforcements comply with EN 14889-2. Fiber types with an equivalent diameter greater than 0.3 mm are called macro fibers, and with equivalent diameters smaller than or equal to 0.3 mm are called micro fibers.

Support systems that are used in tunnel applications has been renewed in parallel with the developing technology. Adventure of reinforcement systems started with tree stumps and has been consolidated with steel support systems. Nowadays, tunnel structures are reinforced with fiber reinforced concrete, which is practical and durable. Importance of speed and high efficiency in construction of support systems makes it critical to make a good time planning.

1 Q KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMİ

Şev ve tünel yapılarında, oluşan deformasyonların hızlıca karşılanabilmesi noktasında püskürtme beton uygulamaları büyük bir öneme sahiptir. Bununla beraber kavramın bir bütün olarak incelenmesi, kayaç, sağlam kaya ve süreksizliklerin tespiti için elzemdir. Kaya kütlelerinin genel davranışı incelenirken kayacın Grimstad ve Barton (1993) tarafından geliştirilen Q tasarım yaklaşımının tasarım mühendislerince dikkate alınması yerinde olacaktır. 1974 yılında geliştirilen Q (Barton vd., 1974) sistemi, kaya kütlelerinin birbirinden farklı altı parametresi aracılığı ile hesaplanmakta ve Şekil 1’de gösterildiği gibi tünel yapısını istisnai iyi ile istisnai kötü arasında dokuz farklı bölüme ayırmaktadır. Sistem, aynı zamanda her bir bölüm için kazı destek önerisinde bulunmaktadır. Burada fiber donatılarla (Şekil 2) alakalı durum incelendiğinde özellikle iyi, orta, zayıf, çok zayıf yapı sınıflamasında 500 ila 1000 Joule arasında değişen enerji absorbe etme kapasitesi yani tokluk değeri sistem içerisinde aranmaktadır. Tokluk lifli betonun çekme gerilmeleri karşısında çatlak sonrası yük taşımaya devam etme yeteneğidir. Tokluk, yük-deplasman eğrileri altında kalan alanın toplamı olarak tanımlanır ve Joule birimi ile ifade edilmektedir (Newton x metre ya da kiloNewton x milimetre olarak da ifade edilebilir).



Şekil 2. Makro sentetik fiber donatı

Çizelge 1'de Q kaya kütle sınıflama sisteminin öngördüğü sınıflama aralıkları sunulmuştur. Şekil 1'de görülen tahkimat bölgeleri aşağıda sıralanmıştır

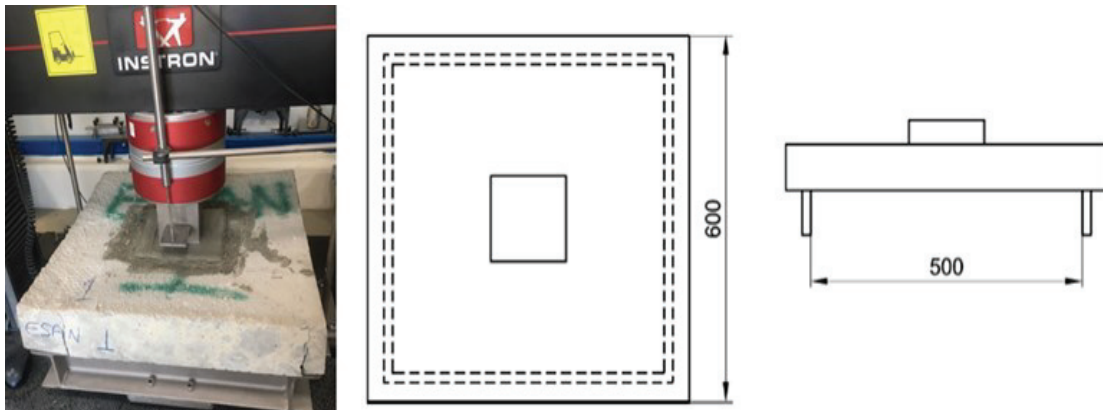
- 1- Tahkimat gerekmez
- 2- Dökülmeleri ve kavlakları önlemek için noktasal kaya bulonu
- 3- Sistematik kaya bulonu
- 4- Sistematik kaya bulonu ve 4-10 cm kalınlığında donatısız püskürtme beton
- 5- Fiber donatılı püskürtme beton 5-9 cm ve kaya bulonu Sfr+B
- 6- Fiber donatılı püskürtme beton 12-15 cm ve kaya bulonu Sfr+B
- 7- Fiber donatılı püskürtme beton 9-12 cm ve kaya bulonu Sfr+B
- 8- Donatılı püskürtme beton >12 cm ve kaya bulonu Sfr+B
- 9- Özel değerlendirme

Çizelge 1. Q kaya kütle sınıflama sisteminin öngördüğü sınıflama aralıkları (Barton ve ark., 1974).

Q	Sınıf
< 0,01	İstisnai zayıf
0,01 - 0,1	Son derece zayıf
0,1 - 1,0	Çok zayıf
1 - 4	Zayıf
4 - 10	Orta
10 - 40	İyi
40 - 100	Çok iyi
100 - 400	Son derece iyi
> 400	İstisnai iyi

2 BETONDA ENERJİ YUTMA (TOKLUK) KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

Sentetik fiber takviyeli betonlara ait yük-deplasman davranışları Şekil 3'te yer verilen kapalı çevrimli deplasman kontrollü 100 kN kapasiteli deney makinesinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yük gelecek yüzeylerine pürüzsüz bir alan oluşturmak amacıyla deneyden üç gün önce çimento esaslı bir harç uygulanmıştır.



Şekil 1. Enerji tokluk deneyi test cihazı

Kare şekilli numunenin püskürtme beton uygulanan yüzeyi yüke, kalıp içerisinde kalan bölümü ise plak numunenin oturduğu ayaklara temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Yük, yükleme hücresi vasıtasıyla numunenin tam orta noktasına uygulanmış olup, deney esnasında, aynı anda yük hücresinden yük değeri, LVDT yardımıyla ise yer değiştirme değeri ölçülmüştür.

TS EN 14488-1'e uygun bir kalıp içerisinde püskürtülen 600 mm x 600 mm boyutlara sahip panel numunesinin üzeri püskürtme işleminden hemen sonra 100 mm kalınlığa sahip olacak şekilde tıraşlanmış ve kare yüzeyli bir numune oluşturulmuştur. Hazırlanan plaka, deneyden en az 3 gün öncesine kadar EN 12390-2'ye uygun koşullar altında kür işlemine tabi tutulmuş ve deney anına kadar nemli olması sağlanmıştır.

3 DENEYSEL ÇALIŞMA

Özel bir maden firmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda tahkimat elemanı olarak fiber donatılar test edilmiştir. Denemeler süresince maden işletmesinde yer altı uygulamalarında ihtiyaç duyulmakta olan beton basınç dayanım değerlerinin karşılanabilmesi için Çizelge 2'de gösterilen C30/37 sınıfında beton kullanılmıştır.

Çizelge 2. Deneysel çalışma için kullanılan beton malzeme içeriği

Malzeme	Miktar	Birim	Tür
Çimento	450	kg	Cem I 42.5 R
Su	160	kg	
Kum (0-5)	1173	kg	
Agrega (5-12)	415	kg	
Akışkanlaştırıcı	3,5	kg	Sika ViscoCrete Hi-Tech 33
Çökme	19	cm	
Su/Çimento	0.36		

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan makro sentetik fiber donatıya ait özellikler Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Deneyde kullanılan fiber donatı

Ürün Adı	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Narinlik Oranı (l/d)	Fiber Adedi (adet/kg)
PP54+	54	0.95	530	7.2	57	28.800

Deneysel çalışma kapsamında fiber donatılar maden işletmesi beton santralinde karışıma eklenmiş olup, karışım beton mikserine aktarılmadan önce santral bunkerinde yaklaşık 60 saniye boyunca karıştırılmıştır. Bu karışımın amacı fiber donatının beton içerisinde homojen olarak dağılımının korunması olarak açıklanabilir.

Santralde üretilen betonun içerisinde yer alan bileşenler belirli bir sıralama ile bunkere beslenmekte olup bu sıra kum ve agreganın banda aktarılması, aynı banda fiber donatının beslenmesi, agrega ve fiber karışımının bunkere dökülmesi şeklindedir. Bunkere çimentonun eklenmesi ve en son karışım suyunun bunkere beslenmesi neticesinde elde edilen harmanın 60 saniye boyunca karıştırılması ile beton elde edilmektedir.

Takiben beton mikseri yaklaşık 25 dakika mesafe kat ederek uygulama noktasına ulaşmıştır ve püskürtme beton uygulamasından Şekil 4'te gösterildiği gibi dört adet panel numunesi alınmıştır. Numunelerin üzerleri püskürtme işlemi tamamlanır tamamlanmaz TS EN 14488-5 standardında bahsedildiği gibi kalınlığı 10 cm olacak şekilde düzeltilmiştir.



Şekil 4. Panel numunelerinin hazırlanması

Yerinden 24 saat boyunca hareket ettirilmeyen numuneler Şekil 5’te örneklendiği gibi kalıptan çıkartılmış ve kürleme işlemine tabi tutulacakları alana taşınmıştır. Burada suya doygun vaziyette 28 gün boyunca bekletilmiştir.



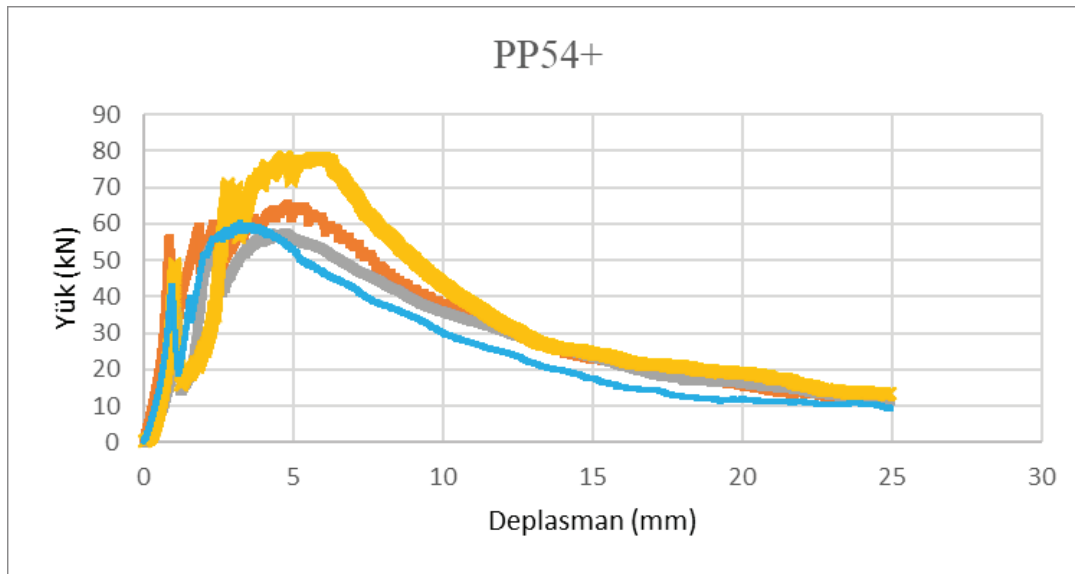
Şekil 5. Kalıptan çıkartılan örnek panel numuneler

Q değerlerine bağlı destek kategorilerine (Grimstad ve Barton, 1993) istinaden birim metre küp beton içerisine 700 Joule enerji tokluk değerinin karşılanabilmesi maksadıyla 3.5 kg PP54+ makro sentetik fiber donatının beslenmesi ile alınan numunelere ait tokluk sonuçları Çizelge 4’te verilmektedir. Çizelgede ilk kırılım yükü (kN), maksimum tepe yük (kN) ve enerji tokluk değerini gösteren Joule sonucu yer almaktadır. İlk kırılım yükü ortalama olarak 45.48 kN, maksimum tepe yükü ise 65.27 kN olarak ölçülmüştür ve enerji tokluk değeri yük – deplasman grafiğinin altında kalan alanın nümerik olarak hesaplanmasıyla 769.87 J olarak belirlenmiştir. Bu nümerik hesaplamının yapılabilmesi için deney makinesinin vermiş olduğu yük-deplasman grafiğinde bulunan veri noktalarından ardışık olanların yük değerlerinin ortalaması, bu iki nokta arasında oluşan deplasman farkıyla çarpılmıştır. Bu hesaplama yöntemiyle, ardışık her iki veri noktası ile yatay eksen arasında oluşan dörtgenin alanı bulunmuştur. Bu alanlar kümülatif olarak toplandığında grafiğin altında kalan alan elde edilmiş ve enerji tokluk değeri (J) olarak not edilmiştir.

Çizelge 4. PP54+ enerji tokluk testi sonucu

Açıklama	İlk Kırılım Yüğü (kN)	Maksimum Tepe Yüğü (kN)	Joule
M1	55.75	65.25	807.24
M2	36.56	57.37	733.90
M3	47.45	78.47	880.52
M4	42.14	59.99	657.82
Maksimum	55.75	78.47	880.52
Medyan	44.80	62.62	770.57
Standart Sapma	8.17	9.39	95.72
Ortalama	45.48	65.27	769.87
Minimum	36.56	57.37	657.82

Şekil 6’da alınan dört panel numunesinin yük – sehım grafiğı ve Şekil 7’de panel numunelerinden bir tanesinin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Numune üzerinde dört adet kırık hattı numunenin orta noktasına doğru hareket ettiğı görülmüştür.



Şekil 6. PP54+ ile güçlendirilen betonun yük – sehım grafiğı



Şekil 7. PP54+ 2 numaralı numunenin deney sonrası görüntüsü

4 SONUÇLAR

Makro sentetik fiber donatılar sürekli destekli sistemlerde (püskürtme betonları) tamamen çelik donatı yerine kullanılabilirler (ACI 544.4R-18). Sentetik fiber donatıların tahkimat elemanı olarak sağladığı faydalar, yapıya kazandırdığı eğilme performansı, çatlakların köprülenmesi, enerji tokluk değerlerinin artırılması, ani kırılma ve göçmelerin önlenmesi, geri sekme miktarının azaltılması, demir işçiliğine dayalı imalat, montaj hatalarının elimine edilmesi, şeklinde sıralanabilir. Öte yandan tüm bu uygulama avantajlarına ek olarak maliyetlerin düşürülmesi ve daha güvenli bir çalışma ortamı yaratılması başlıklarında sentetik fiber donatılar muazzam bir katkı sağlamaktadır.

Q kaya kütle sınıflama sistemine göre bir değerlendirme yapıldığında elde edilen sonucun 700 ila 1000 J arasında yani 5 ve 6 destek kategorisinde konumlandığı görülmüştür. Bir başka ifade ile fiber donatılı püskürtme betonun 5 metreye 5 metre açıklıkta bir galeri içerisinde 15 cm beton kalınlığında, kaya saplamaları ve iksa sistemleri ile desteklenmesiyle tahkimat elemanı olarak kullanılabilceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

ACI 544.4R-18: Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete.

Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics and Engineering vol. 6 iss. 4 pp. 189-236. EN 12390-2: Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength test

EN 14889-2: Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres - Definitions, specifications and conformity

NGI, 2015. Using the Q-system: Rock mass classification and support design (ör. s.34).

TS EN 14488-1 : Püskürtme beton - Deneyler - Taze ve sertleşmiş betondan numune alma

TS EN 14488-5: Püskürtme beton - Deneyler: Bölüm 5: Lif takviyeli plaka numunelerde enerji yutma kapasitesinin tayini

Demiryolu ve Karayolu Tünellerindeki Güvenlik Tünellerinin Yapım Amaçlı Kullanımının Değerlendirilmesi ve Ulaştırma Tünelleri Yapım İşlerinde Bant Konveyör Kullanımının Verimlilik Analizi 2023

Evaluation of the Use of Safety Tunnels in Railway and Highway Tunnels for Construction Purposes and Efficiency Analysis of the Use of Belt Conveyor in Construction of Transportation Tunnels and Transportation 2023

S.S. Şeref, E. Ünver

Krk Holding, Soner Temel Mühendislik İnş. ve Tic. A.Ş., İstanbul

ÖZET: Bu çalışmada, yapım ve kaçış amacı ile kullanılan küçük kesitli güvenlik tünellerinde yaşanan lojistik problemler, hafriyat nakli için belirlenen yöntem ve bant konveyör ile kamyon nakliyelerinin maliyet analizleri değerlendirilerek benzer projelere ışık tutması amaçlanmıştır.

Değerlendirmenin yapılmış olduğu tünel GT 5 olup Sapanca – Geyve Yüksek Hızlı Tren Hattı projesinde 4664 m uzunluğundaki T2 tüneline 1825. metreden birleşmektedir. GT 5 tüneli, %5.5 eğime, 486 m uzunluğa, 38 m² kesit alanına ve 5.5 m genişliğe sahiptir. GT 5 tünelinin yapımı tamamlanmış, mevcut durumda T2 tünelinin yapımında lojistik amacı ile hizmet vermeye devam etmektedir.

ABSTRACT: This study aims to shed light on similar projects by evaluating the logistical problems experienced in small-section safety tunnels used for construction and escape purposes, the method determined for excavation transportation and the cost analysis of belt conveyor and truck transportation.

The tunnel where the evaluation was made is GT 5 and it connects to the 4664 m long T2 tunnel at 1825 meters in the Sapanca - Geyve High Speed Train project. GT 5 tunnel has a slope of 5.5%, a length of 486 m, a cross-sectional area of 38 m² and a width of 5.5 m. The construction of the GT 5 tunnel has been completed and is currently in service for logistics purposes during the construction of the T2 tunnel.

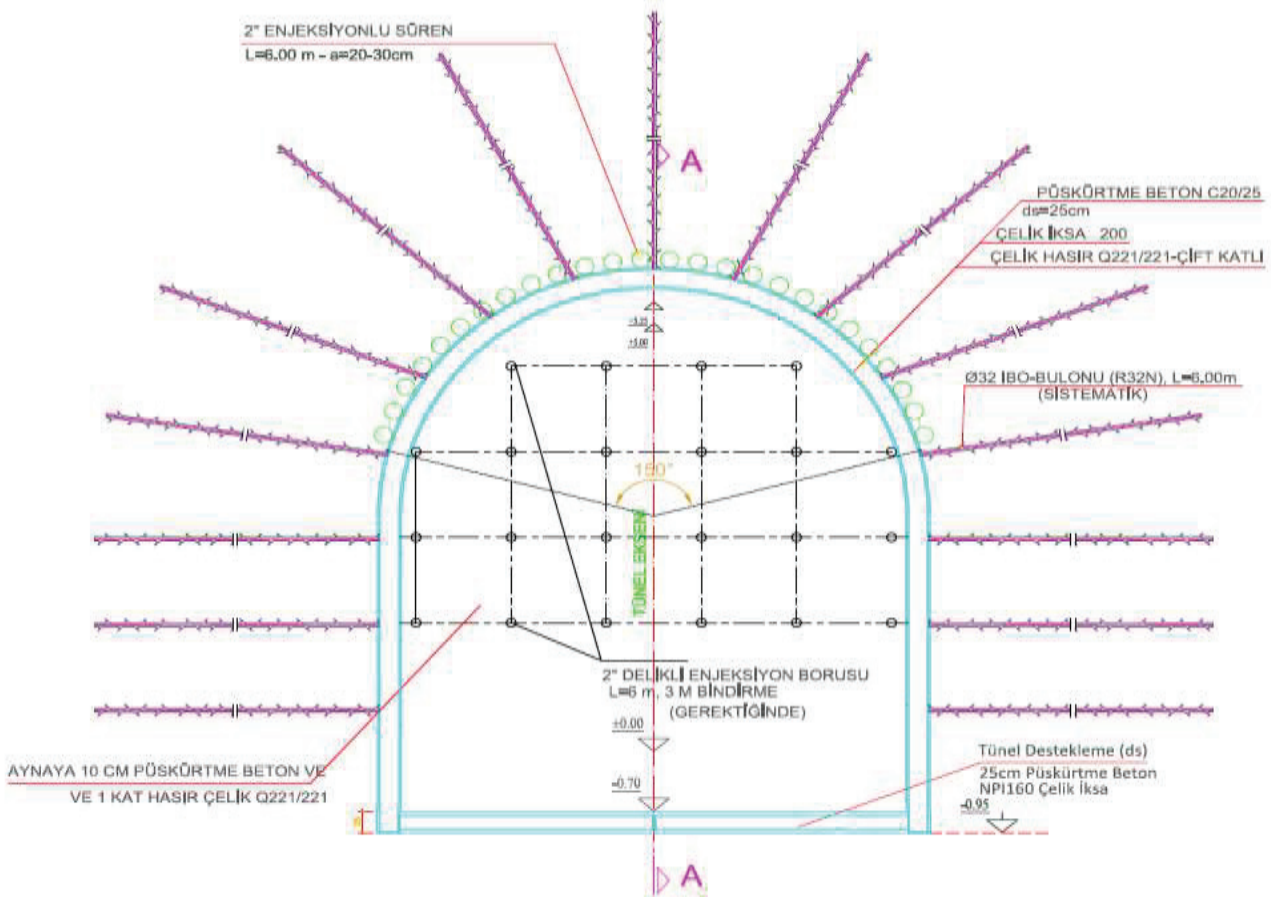
1 GİRİŞ

Bu çalışmada, yapım döneminde ana hat tüneline erişim sağlayarak ayna oluşturma amacı ile hat işletme döneminde kaçış amacı ile kullanılan küçük kesitli güvenlik tünellerinde yaşanan sorunlar irdelenmiş, hafriyat nakli için bant konveyör ile kamyon nakliyelerinin maliyet analizleri değerlendirilerek benzer projelerdeki kararlar için fayda sağlaması amaçlanmıştır.

Çalışmada öncelikli olarak, güzergâh ve proje bilgilerine yer verilmiş olup güvenlik tünellerinin kullanım amaçlarından, geçmişte yaşanmış kazalara, lojistik zorluklara, çözüm önerilerine ve bant konveyör ile hafriyat naklinin kamyon ile hafriyat nakli ile karşılaştırılması konularına değinilmiştir.

- GT 1 (yapımı devam etmekte)
- GT3 (yapımı devam etmekte)
- GT4 (tamamlandı)
- GT 5 (tamamlandı)
- GT 6 (tamamlandı)

Güvenlik tünelleri kullanım amacına göre iki farklı şekilde değerlendirilebilir. Bunlardan ilki, yapım döneminde ana tünele ulaşarak ilave kazı aynası oluşturmak, diğeri ise hat işletme döneminde kaçış (güvenlik, tahliye, müdahale, acil durum vb) amaçlı kullanımdır. Güvenlik tüneli tip kesiti Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Güvenlik tüneli tip kesiti (Ayggar, 2017)

3.1 Güvenlik (Kaçış) Amaçlı Kullanım

Uzunluğu 1000 m’ nin üzerinde olan ve tek tüp olarak inşa edilmiş demiryolu tünellerinde güvenlik tünellerinin yapılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Geçmişte yaşanan kazalar güvenlik tünellerinin önemini bize göstermiştir.

Demiryolu hatlarında raydan çıkmalar (deraymanlar), çarpışmalar, karamboller ve yangınlar en sık yaşanan kaza türlerindedir. Bununla birlikte bu kazalara açık hatlara nazaran tünellerde daha az rastlanılmaktadır. Ancak tünellerde bu kazaların etkileri açık hatlara oranla daha yüksek boyutta olmaktadır. Bu kazaların içerisinde tünellerde en fazla yıkıcı etkiye sahip olan yangınlardır. Demiryolu tünellerinde az kazaya rağmen hasar ve can kaybı oldukça fazla olmaktadır 2008’de Manş Tünelinde kaza sonrası yangınlardan dolayı büyük miktarlarda hasarlar meydana gelmiş, 1995 yılında Azerbaycan’ın başkenti Bakü’de ise kaza sonrası yangında yaklaşık 300 kişi yaşamını yitirmiştir (Uğuz ve Ural, 2019). Son 50 yılda bazı tünel yangınlarında yaşamını kaybedenlerin sayısı Çizelge 1 ‘de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Son 50 yılda bazı tünel yangınlarında yaşamını kaybedenlerin sayısı (İlkışık vd., 2008).

Yıl	Tünel	Mağdur
2003	Daegu, Güney Kore	198 Ölü
2001	Gotthard, İsviçre	11 Ölü
2000	Kitzateinhorn, Avusturya	158 Ölü
1998	Mont Blanch, Fransa	39 Ölü
1995	Bakü, Azerbaycan	289 Ölü
1987	Londra, İngiltere	31 Ölü
1982	Caldecott, Amerika	6 Ölü

Çizelge 1’ den anlaşılacağı gibi tünellerde yaşanan kazalarda çok sayıda can kaybı yaşanmıştır. Kayıpların azaltılması için insanların olay yerinden hızla uzaklaşarak güvenli bir alana sığınmaları gerekmektedir. Bu amaçla yeterli miktarda güvenlik tüneli, yaya yolları vb. ‘ne ihtiyaç duyulmaktadır.

3.2 Yapım Amaçlı Kullanımı

Sapanca – Geyve YHT Hattı projesinde, yapımı tamamlanan ve devam eden güvenlik tünellerinin kesiti yaklaşık olarak 38 m², yüksekliği 6.5 m, genişliği ise 5.5 m olup dar olarak nitelendirebileceğimiz bir tünel kesitidir.

Açık kasalı tır, low – bed gibi daha büyük ebatlı olan araçlar tünel içerisine giriş – çıkışlarda ve manevra esnasında zorluk yaşadığından, kazı – destek işlerinde ihtiyaç duyulan malzemelerin (lojistik) güvenlik tünelleri üzerinden ana tünellere nakledilmesi için vinç, kamyon vb. araçlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Malzeme nakillerine, betonun transmikserler ile ve hafriyatın kamyonlar ile nakli de eklendiğinde (personel giriş çıkışları için gerekli araçlar dahil edilmese bile) güvenlik tüneli içerisinde trafik sıkışıklıkları meydana gelmektedir. Trafik akışının sağlanması için çeşitli çözümler geliştirilmiştir (sinyalizasyon, ışıklı ikaz, sesli haberleşme).

Tünel kesitinin bir bölümü iş makinesi, kamyon, transmikser, hiyap vb. araçlar tarafından küçültüldüğünde (ihlal edildiğinde), kirli hava çıkış hızı yavaşlamakta ve buna bağlı olarak ana tünel ortamı (havası, atmosferi) personel sağlığı açısından uygunsuz bir hale gelmektedir.

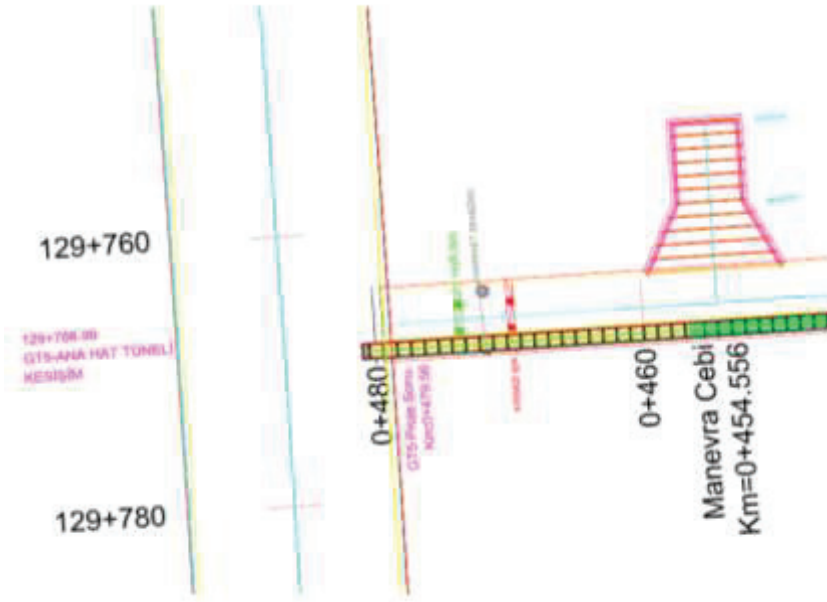
3.2.1 Lojistik

- Malzeme Tedariki (Beton, tahkimat elemanları, inşaat malzemesi vb.)
Tünelcilik faaliyetlerinin yerine getirilebilmesi için ihtiyaç duyulan malzemelerin (tahkimat elemanları, inşaat malzemeleri, sarf malzemeleri, kişisel koruyucular vb.) taşınması amaçlı kullanımdır.
- Hafriyat Nakli
Kazı – destek işlemleri sırasında açığa çıkan hafriyatın tünel dışına çıkarılması, dolgu amacı ile tünel içerisine malzeme taşınması vb. amaçlı kullanımdır.
- Personel Ulaşımı
Personellerin giriş ve çıkışında, bir iş kazası olduğunda ambulansın ve yangın çıktığında itfaiyenin girmesi amaçlı kullanımdır.
- Havalandırma, Kullanma Suyu ve Hava Nakilleri ile Kirli Suyun Tahkiyesinde
Tünel içerisinde ihtiyaç duyulan temiz havanın fantüpler vasıtası ile ulaştırılması ve kirli hava dönüş yolu olarak kullanılması, kazı – destek işlerinde ihtiyaç duyulan kullanma suyu ve havanın ulaştırılmasında ve tünel içerisinde üretilen ya da yeraltından çıkan suyun (kirli ya da temiz) tahliyesi amaçlı kullanımdır.

3.2.2 Trafik akışının sağlanması için çözüm önerileri

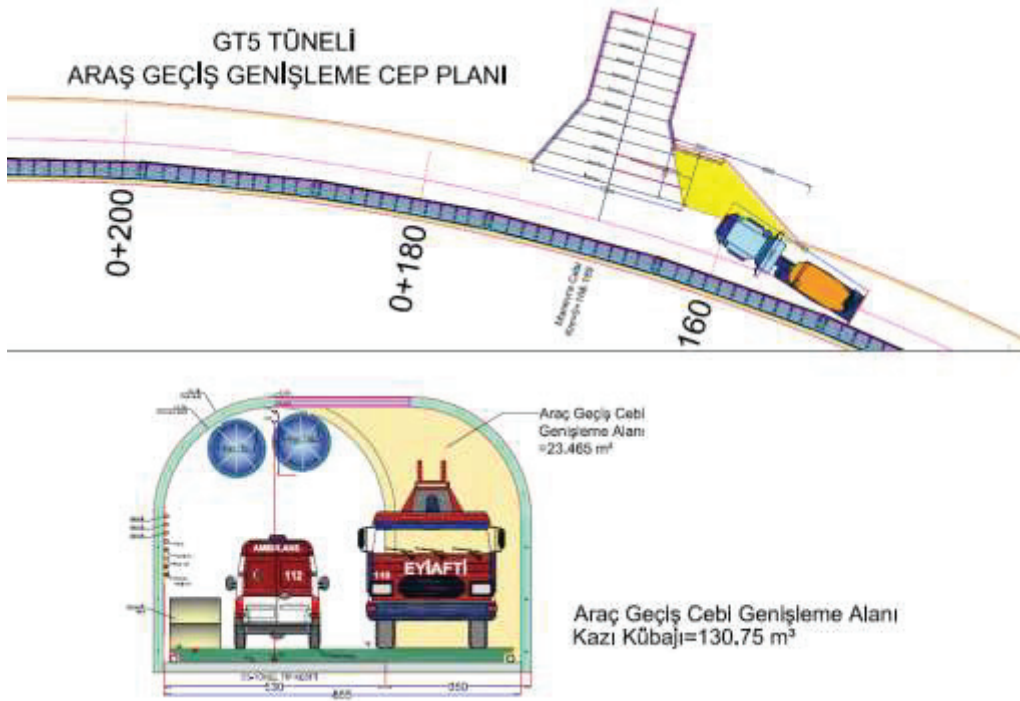
İncelemeye esas projedeki güvenlik tüneli tip kesiti, 2 aracın yan yana geçmesine müsaade etmeyecek kadar küçük bir kesit alanına sahiptir. Bu sebeple tünele her araç giriş ve çıkışında aksamaların yaşanmaması sürekli olarak takip gerektiren bir organizasyondur. Meydana gelebilecek bir aksaklık, lojistiği sekteye uğratacağından doğrudan üretim hızını negatif yönde etkileyecektir. Bu amaçla proje kapsamında bazı çözüm önerileri geliştirilmiş olup aşağıda belirtilmiştir.

- Işıklı uyarı. Tünele araç girdiğinde (ana tünelden güvenlik tüneline giriş ve açık sahadan tünel giriş) hareket sensörleri yardımı ile araç algılanır ve karşı istikamette kırmızı ışık yanar. Bu amaçla kurulan sensörlerin yerleşiminde güvenlik tünelinin doğrultusu (yatay kurp olması durumunda görüş kısıtlandığından sensör aralıkları kısıtlanmıştır), manevra-geçiş ceplerinin konumu ile araç boyutları dikkate alınmıştır. Yapılan ışıklı uyarı sisteminin araç – makine sürücüsü tarafından görülebilmesi için tünel en kesiti boyunca renkli ışıklı borular yerleştirilmiştir.



Şekil 3. Işıklı uyarı sistem planı (Çelik vd., 2021)

- Haberleşme. Tünel dışı ve tünel içinde görevlendirilen personel yardımı ile giren ve çıkan araç hakkında bilgilendirme yapılması.
- Yol verme. Manevra cebi önünde iki aracın birbirine yol vermesi. Mevcut manevra cepleri araçların yalnızca “dik” şekilde girmesi için tasarlanmış olup tasarım tipik bir ambülans boyutu için yapılarak işletme dönemi ihtiyaçları dikkate alınmıştır. Yapım sürecinde bu cepler çok daha geniş kapsamlı ve çok daha büyük boyutlu araçlar için kullanılacağından tasarımda modifikasyon yapılmıştır. Araç geçiş, manevra ceplerinde iki aracın yan yana geçişine müsaade edecek genişleme yapılmıştır. Şekil 4’ de sarı renkli belirtilen alan modifikasyon kapsamında imal edilmiştir.



Şekil 4. Manevra cebi genişleme planı (Çelik, 2021a)

- Arızaya Müdahale. Tünel içinde seyir halinde olan bir iş makinesi arızalanıp yolu kapattığında üretim aksamaması adına müdahale edilmesi.

3.3 Tünelciliğin Konforlu ve Emniyetli Yürütülmesi için Minimum Gereklilikler

İncelemeye esas projedeki güvenlik tüneli at nalı şeklinde olup düşey pozisyonda olan ve ayak olarak tabir edilen kısımlar düz bir duvar şeklindedir. Kazı yapıldığında düz olan kısımlarda zemin yükleri eşit olmadığından aşırı sökülme sonucunda doğal şeklini almaktadır. Böyle bir durumda aşırı sökülmenin önüne geçmek için ya da miktarı azaltmak için düz olan ayak kısımlarına kendi delen süren / süren / zemin çivisi uygulamaları yapılmaktadır.

Desteklemesi yapılmış olan güvenlik tünellerinde deformasyon olması durumunda ise düz olan ayak kısımlarının tünel eksenine yaklaşması (konverjans) durumunda, taban tahkimatında deformasyonlar ve kotunda yükselmeler (taban kabarması) meydana gelmektedir. Böyle bir durumda tabana ve yanlara bulon ve taban betonu uygulamaları yapılmaktadır.

Benzer problemlerin yaşanmaması, tünelcilik faaliyetlerinin konforlu ve emniyetli yürütülmesi adına ihtiyaç duyulan minimum gereklilikler aşağıda sıralanmıştır.

- Tünel kesiti at nalı yerine dairesel kesit olarak tasarlanması.
- Tünel içerisinde iki aracın yan yana geçişine izin verilecek şekilde geniş kesitli tasarlanması.
- Manevra cepleri iş makinelerinin dışında kamyon ve mikser gibi büyük araçların dönebileceği şekilde tasarlanması.

4 BANT KONVEYÖR İLE GELENEKSEL HAFRİYAT NAKLİNİN KIYASLANMASI

Tünellerde hafriyat nakli genel olarak kamyonlar ile yapılırken yükleme işlemleri ise loader ve ekskavatörler yardımı ile yapılmaktadır. Bazı küçük kesitli tünellerde (maden galerileri vb) ise doğrudan iş makinesi, traktörler, kesite uygun yandan devirmeli kamyonlar/iş makineleri ve diğer madencilik uygulamaları ile yapılabilmekteyken, Sakarya – Geyve YHT projesinde ise hem bant konveyör hem de kamyon-iş makinesi uygulamaları ile birlikte yapılmaktadır.

4.1 Kamyon İle Hafriyat Nakli

Hafriyat nakli, bant konveyörün kurulu olmadığı şantiyelerin tamamında kamyon ile yapılırken, sistemin bulunduğu şantiyede de ebatları 300 mm' nin üzerinde bulunan hafriyat ile mırık, kamyonlar ile taşınmaktadır. Kullanılmakta olan kamyonların taşıma kapasitesi 18 m³' dür.

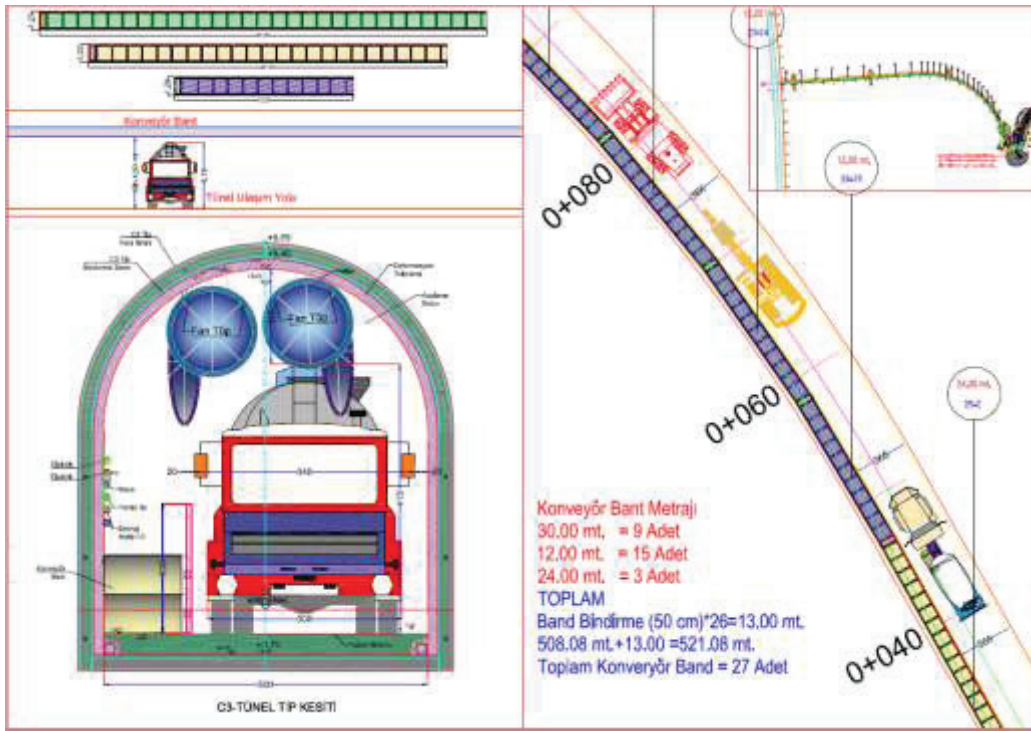
Kamyon ile hafriyat nakli yapılması esnasında; kamyon, tünel içerisindeki güzergâh boyunca beton mikseri, loader, ekskavatör, diğer iş makineleri, malzeme taşıyan hi-up, lojistik amacı ile taşımacılık yapan araçlar vb. araçlarla sık sık karşılaşmakta ve buna bağlı olarak trafik sıkışıklığı, organizasyonların aksamasına sebep olmaktadır.

4.2 Bant Konveyör İle Hafriyat Nakli

Hafriyat, kazı alanından loaderler yardımı ile yükleme alanına taşınır ve ardından bunkere doldurulur. Kullanılmakta olan bunkerin kapasitesi 9 m³' dür.

Bant konveyör ile hafriyat nakli yapılması esnasında; bant konveyör güzergâh boyunca kendine ayrılmış alanda hareket etmekte ve aynı zamanda yanından beton mikserleri, iş makineleri, lojistik amaçlı araçlar vb. diğer araçlar kesinti olmaksızın geçebilmektedir.

GT 5 tüneli, 480 m (Başlangıç ve bitiş km' leri sırası ile 0+025,00 ile 0+480,00) uzunlukta olup %-5.5 eğime sahiptir. Km 0+050,00 ile 0+218,66 arası 150 m yarı çaplı sola karp şeklinde. Yatay kurbun açısı olması sebebi ile bant konveyör tek parça olacak şekilde dizayn edilememiştir. 12 m, 24 m ve 30 m uzunlukta toplam 3 tip bant konveyör modülleri kullanılmıştır. Bant konveyör yerleşim planları Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Bant konveyör yerleşim planları (Çelik, 2021b)

4.3 Nakliye Yöntemi Seçimi

Dünyada son yıllarda özellikle enerji verimliliğinin artırılması, düşük emisyonlu teknolojilerin kullanılması ve maliyet azaltılması konusunda çeşitli çalışmalara odaklanılmıştır. Açık işletmelerde ve madenlerde yapılan araştırmalar sonucunda bant konveyör ile nakliye yapılmasının kamyonlar ile nakliye yapılmasına göre daha ekonomik olduğu ortaya çıkmıştır.

Günümüzde motorin fiyatları dikkate alındığında, bant konveyör ile uygun olan eğimlerde mesafe kısıtlaması olmaksızın ekonomik nakliye sağlanabilir.

Uygun nakliye yönteminin seçilmesinde bazı faktörler göz önüne alınmaktadır. Bunlar tünel kesiti, nakliye güzergahının eğimi, üretilecek malzemenin büyüklüğü, kazılma /kırılma şekli, nem içeriği ve kullanım süresidir. Nakliye yönteminin ana kriterlere göre karşılaştırılması Çizelge 2’ de özetlenmiştir.

Çizelge 2. Nakliye yönteminin karşılaştırılması (Mallı ve Gönen, 2017)

Kriterler	Kamyon	Konveyör Bant
Tünel Kesiti	Büyük Kesitler	Küçük Kesitler
Kapasite (ton/yıl)	2000000<	2000000>
Malzeme	iri parçalı, bloklu	ince parçalı
Ekonomik Ömür	10 yıl (ortalama)	sınırlama yok
İlk Yatırım Gideri	Düşük	Yüksek
İşletme Gideri	Yüksek	Düşük
Eğim	8° / 12°	-14 / +18
Kullanım Süresi	Kısa Süreli	Uzun Süreli
Karbon Salınımı	Var	Yok

Çizelge 3’ te 2022 yılında Sapanca – Geyve YHT Hattı projesinde çalışan tüm kamyonların naklettiği toplam hafriyat miktarının GT 5 tüneline taşınan hafriyat miktarı ile kıyaslaması yapılmıştır.

Enerji tüketim maliyeti birim zamanda bant konveyörün yüksek, bakım maliyeti ise düşüktür. İşletme maliyeti karşılaştırıldığında kamyon ile nakliye avantajlı görünse de uzun süreli kullanımda hem ilk yatırım maliyeti açısından hem de işletme maliyeti açısından bant konveyör ile hafriyat naklinin yapılması ekonomik olacağı görülmektedir.

Çizelge 3. Bant konveyör ve kamyon ile yapılan nakliyelerinin maliyet açısından değerlendirilmesi.

Kriterler	Konveyör Bant	Kamyon
Nakliye Mesafesi	1000 m	1000 m
Konveyör Bant Hızı	0.64 m/sn	2.38 m/sn
Nakledilen Malzemenin Hacmi	16.138,07 m ³	161.423,97 m ³
Enerji Tüketimi	198,00 kw/sa	2,02 lt/sa
Birim Fiyat	3,43 ₺/kw	23,50 ₺/lt
Çalışma Süresi	448,28 sa	11.658,40 sa
İlk Yatırım Maliyeti (kamyon için kira bedeli)	5.101.029,25 ₺	5.460.000,00 ₺
Bakım Maliyeti	29,01 ₺/m ³	36,08 ₺/m ³
İşletme Maliyet	47.86 ₺/m ³	39.51 ₺/m ³
Toplam Maliyet	76.87 ₺/m ³	75.59 ₺/m ³

Çizelge 4’ te 2022 (Ocak 2023 dahil) yılında GT 5 tüneline üretilen hafriyat miktarının 1 adet kamyon ile naklinin yapıldığı kabul edilerek aynı miktarın bant konveyör ile naklinin kıyaslaması yapıldığında:

- Bant konveyörün birim zamandaki enerji tüketiminin kamyonundan fazla olduğu görülmüştür.

- Bant konveyörün birim zamanda taşıdığı hafriyat miktarının kamyonun yaklaşık 2 katı olduğu görülmüştür. Kamyonun taşıdığı hafriyat miktarının bant konveyör ile aynı olması için 2 adet kamyonu ihtiyaç olduğu görülmüştür.
- Bant konveyörün ilk yatırım maliyeti kamyonu göre yüksek olmasına rağmen, 2 kamyon ile yapılan çalışmalarda 30 ayda bant konveyör maliyetine ulaşıldığı görülmüştür.
- Bant konveyör bakım maliyeti kamyon bakım maliyetinden 22.55 ₺/m³ daha ucuz olduğu görülmüştür.
- Bant konveyör işletme maliyeti kamyon işletme maliyetinden 8.53 ₺/m³ daha ucuz olduğu görülmüştür.
- Bant konveyör toplam maliyetinin kamyon toplam maliyetinden 31.07 ₺/m³ daha ucuz olduğu görülmüştür.

Çizelge 4 Bant konveyör ve kamyon ile yapılan nakliyelerinin maliyet açısından değerlendirilmesi (benzer şartlarda)

Kriterler	Konveyör Bant	Kamyon
Nakliye Mesafesi	1000 m	1000 m
Konveyör Bant Hızı	0.64 m/sn	2.38 m/sn
Nakledilen Malzemenin Hacmi	16.138,07 m ³	16.138,07 m ³
Enerji Tüketimi	198.00 kw/sa	2.86 lt/sa
Birim Fiyat	3.43 ₺/kw	23.41 ₺/lt
Çalışma Süresi	448.28 sa	1.165,53 sa
İlk Yatırım Maliyeti (kamyon için kira bedeli)	5.101.029,25 ₺	1.032.000,00 ₺
Bakım Maliyeti	29.01 ₺/m ³	51.56 ₺/m ³
İşletme Maliyet	47.86 ₺/m ³	56.39 ₺/m ³
Toplam Maliyet	76.87 ₺/m ³	107.94 ₺/m ³

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Dar kesitli ve dairesel olmayan güvenlik tünellerinin yapımı ve yapım sonrası lojistik amaçlı kullanımı örnek GT 5 tüneli özelinde değerlendirilmiştir. Edinilen yapım tecrübesine dayanarak:

- Güvenlik tünellerinin ana tünele / tünellere erişim sağlayıp kazı aynası oluşturma amaçlı kullanılacağı projelerde kazı ve tünel emniyeti ile lojistik konfor açısından yerleşik olarak uygulanan at nalı kesitler yerine dairesel kesitlerin uygulanması gerektiği görülmüştür.
- Yan yana araç / makine geçişine müsaade etmeyen küçük kesitli tüneller yerine yan yana geçişe müsaade edecek yeterli büyüklüğe sahip uygun kesitli tünellerin lojistik faaliyetlerdeki verimliliği artacağı görülmüştür.
- Maliyetlerin artmaması sebebi ile uzun metrajlı güvenlik tünellerinin tamamının yan yana araç / makine geçişine müsaade edecek yeterli büyüklükte imal edilememesi durumunda, manevra ceplerinin yan yana geçişe müsaade edecek genişlik ve uzunlukta imal edilmesi gerektiği görülmüştür.
- Yatay kurpta açılan tünellerde trafik güvenliği için hareket sensörleri ile desteklenmiş ışıklı uyarı sistemleri kullanmanın faydalı olduğu görülmüştür.
- Çalışma konforu açısından gerekli havalandırma kapasitesi artırımı için kesitlerde “işletmede gerekli minimum kesit” yerine “yapımda gerekli optimum kesit” hedefinin dikkate alınması gerektiği görülmüştür.

- Madencilik ve TBM işletmesinde yaygın ve vazgeçilmez olarak kullanılan bant konveyör sistemleri metro, demir yolu, kara yolu tünelticilik işlerinde yaygın olarak kullanılmamakta hatta çok az miktarda projede yer bulmaktadır. Sebebi kısa tünellere adaptasyonun zor olması, alışkanlık ve ilk yatırım maliyetidir. Çevre kirliliğinin arttığı, karbon salınımının her geçen gün önem kazandığı dünyada fosil yakıt yerine elektrik enerjili sistemler tercih edilebilir. Bu bağlamda, hafriyat naklinin bant konveyör sistemleri ile yapılmasının kamyon ile yapılmasına göre 31.07 ₺/m³ (Ocak 2023 maliyetleri ile) daha ucuz olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Bahşi, N. 2023. Güzergah Planı, Doğançay Ripajı 2. Kesim, Sapanca – Geyve YHT Hattı, Ankara – İstanbul Hızlı Tren Projesi, 2017.
- Çelik, H. 2021a. Manevra Cebi Genişleme Planı, Doğançay Ripajı 2. Kesim, Sapanca – Geyve YHT Hattı, Ankara – İstanbul Hızlı Tren Projesi, 2017.
- Çelik, H. 2021b. Bant Konveyör Yerleşim Planı, Doğançay Ripajı 2. Kesim, Sapanca – Geyve YHT Hattı, Ankara – İstanbul Hızlı Tren Projesi, 2017.
- Çelik, H., Bozbaş, Y., Gümüşbaş, A. 2021. Işıklı Uyarı Sistem Planı, Doğançay Ripajı 2. Kesim, Sapanca – Geyve YHT Hattı, Ankara – İstanbul Hızlı Tren Projesi, 2017.
- İlkışık, M.O, Ergenç, Ö.N, Türk, M.T.. 2008. Manş Tüneli Yangını.
- Fugrosial Yerbilimleri Müş. ve Müh. Ltd. Şti. 2017. Güvenlik Tüneli C3 Destek Sistemi Detayları Çizim No: FS-TUN-GT-DES-008, Doğançay Ripajı 2. Kesim, Sapanca – Geyve YHT Hattı, Ankara – İstanbul Hızlı Tren Projesi, 2017.
- Mallı, T., Gönen, A., 2017. Açık İşletmelerde Bantlı Konveyör Nakliye Sisteminin Değişen Kapasite ve Taşıma Mesafesine Bağlı Ekonomik Analizi.
- Şeref, S.S. 2023. Bant Konveyör ve Kamyon Nakliyelerinin Maliyet Değerlendirme Çizelgesi, Doğançay Ripajı 2. Kesim, Sapanca – Geyve YHT Hattı, Ankara – İstanbul Hızlı Tren Projesi.
- TCDD, 2023. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, www.tcdd.gov.tr
- Uğuz Ş, Ural, N, 2019. Demiryolu Tünellerinde Güvenlik (Kaçış) Tünellerinin Önemi.

Ataköy-İkitelli Metro Hattı, Ataköy Şantiyesi Makas Tünellerinde Susuzlaştırma Enjeksiyon İşleri ve Deformasyon Analizi

Ataköy-İkitelli Metro Line, Dewatering Injection Works at Ataköy Construction Site Crossing Tunnels and Deformation Analysis

O. A. Gül, E. Ünver, R. E. Yılmaz, C. Polat

KRK Holding Soner Temel Mühendislik İnş. ve Tic. A.Ş. İstanbul

ÖZET: Şehir içi yolcu taşımacılığında raylı sistemlerin önemi her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda inşa edilmekte olan Ataköy-İkitelli metro hattı yaklaşık olarak 13,5 km uzunluğunda ve yolcu taşıma kapasitesi saatte 72.000 kişi olup 12 adet istasyondan oluşmaktadır. Ataköy-İkitelli hattı; İkitelli Sanayi istasyonunda M3 Kirazlı-Başakşehir metro hattı ile, Mehmet Akif İstasyonunda M7 Kabataş-Esenyurt metro hattı ile, Mimar Sinan istasyonunda M1B Yenikapı-Halkalı metro hattı ile, Çobançeşme istasyonunda M2 Yenikapı-Halkalı metro hattı ile, Yenibosna istasyonunda M1A Yenikapı-Atatürk Havalimanı metro hattı ile, ve son olarak Ataköy İstasyonunda Marmaray işletmesi ile entegrasyonu sağlanacaktır. Avrupa yakasının trafik yükünü rahatlatarak olan projede Ataköy İstasyonu makas şantiyesi büyük önem arz etmektedir. Ataköy istasyonunda daha önce yapılan NATM kazı çalışmaları zemindeki olumsuz şartlardan dolayı yarıda kalmıştır. Ataköy Şantiyesinde 24.10.2021 tarihinde yaklaşık 1,5 yıl boyunca kendi haline bırakılmış istasyon kısmından kazı çalışmalarına başlanılmış ve susuzlaştırma enjeksiyonu desteği ile yan yana aynalardan yapılan kazı ve destekleme sonucunda makas tünelleri başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Bu çalışma yeraltı su seviyesinin altında, su gelirlinin normalin çok üzerinde olduğu, su ile mücadeleye ihtiyaç duyulan projelere ışık tutması amacıyla hazırlanmıştır.

ABSTRACT: The importance of railway systems in urban passenger transportation has been increasing day by day. In this context, the Ataköy-İkitelli metro line, which is being built, is approximately 13.5 km long and has a capacity of 72.000 people per hour and consists of 12 stations. Ataköy-İkitelli line; With the M3 Kirazlı-Basakşehir metro line at İkitelli Sanayi station, with the M7 Kabataş-Esenyurt metro line at Mehmet Akif Station, with the M1B Yenikapı-Halkalı metro line at Mimar Sinan station, with the M2 Yenikapı-Halkalı metro line at Çobançeşme station, M1A Yenikapı-Atatürk Airport at Yenibosna station will be integrated with the metro line, and finally with the Marmaray operation at Ataköy Station. Ataköy Station switch construction site was of great importance in the project, which will relieve the traffic load of the European side. The previous NATM excavations at Ataköy station were interrupted due to the unfavorable conditions on the ground. On 24.10.2021, excavation works were started from the station part, which was left to itself for approximately 1.5 years, on 24.10.2021, and the truss tunnels were successfully completed as a result of excavation and support made from side-by-side mirrors with the support of dewatering injection.

This study has been prepared to shed light on the projects where the water income is below the groundwater level, the water income is much higher than the normal, and there is a need to fight against water.

1 GİRİŞ

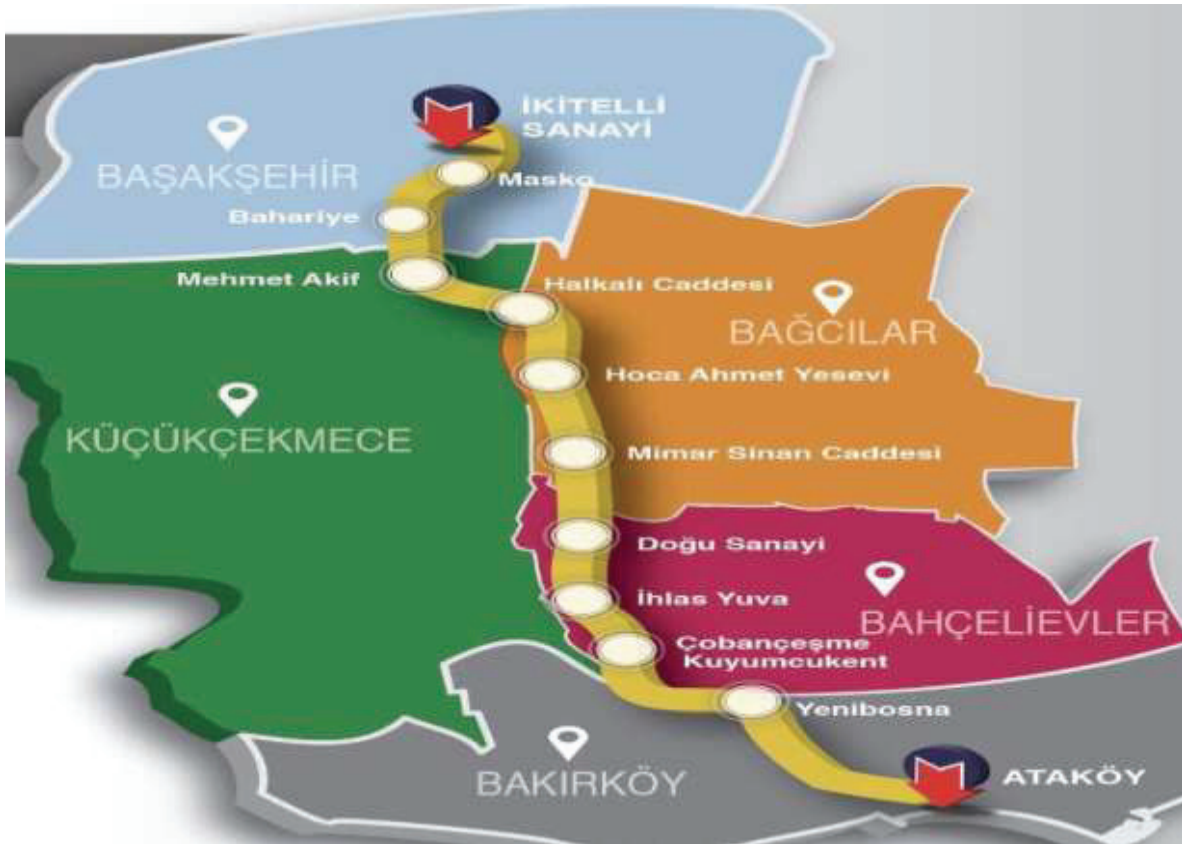
Bu çalışma yeraltı su seviyesinin altında, su gelirin normalin çok üzerinde olduğu, su ile mücadeleye ihtiyaç duyulan projelere ışık tutması amacıyla hazırlanmıştır.

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, uygun enjeksiyon delgi yerleri, çapı ve uzunlukları, enjeksiyon karışım oranları için yapılan çalışmalar yer almaktadır. Suyun tüneller faaliyetleri üzerindeki olumsuz etkileri değerlendirilmiş olup bu olumsuzluklar susuzlaştırma enjeksiyonu ile olumlu hale dönüştürülerek, sağlıklı bir ortamda tüneller yapılmasına olanak tanınmıştır.

2 GÜZERGAH VE PROJE BİLGİLERİ

Ataköy-İkitelli Metro Hattı, İstanbul'un batı yakasındaki bölgeleri, kuzeyden güneye birbirini bağlayacaktır. Bu hat İstanbul'un Avrupa yakasındaki bölgeleri doğudan batıya bağlayan Metrobüs hızlı transit hattının yanı sıra Bakırköy, Bahçelievler, Küçükçekmece, Bağcılar, Başakşehir ilçelerinden geçen proje, beş raylı sistemle entegre olacak. Projenin güzergahı Şekil 1'de gösterilmiştir.

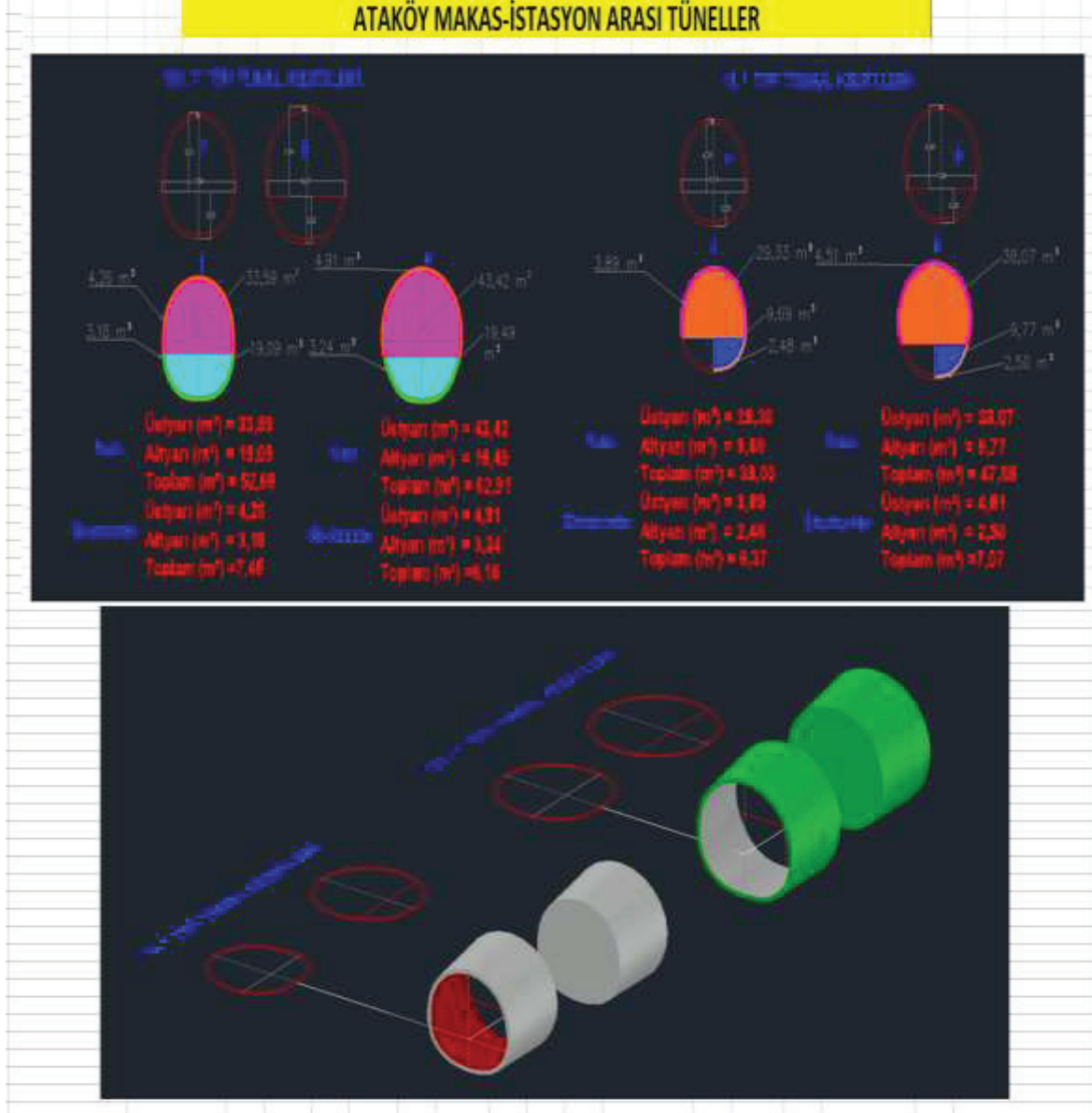
Proje, hattı kullananların Ataköy'den İkitelli'ye 19 dakikada ulaşmalarını sağlayacaktır; mevcut koşullarda özel araçla bu yolculuk yaklaşık 50 dakika sürmektedir. Proje'nin yoğun trafik sıkışıklığını hava ve gürültü kirliliğini ve karbon emisyonlarını büyük ölçüde azaltması ve hatta her gün yolculuk edeceği tahmin edilen 400.000 yolcu için daha emniyetli ve daha güvenilir ulaşım hizmetleri sağlaması beklenmektedir (İBB, 2016).



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

Ataköy-İkitelli Metro Projesi 13.5 kilometre uzunluğunda, en fazla % 4 eğimli ve en az 300 metre dönüş yarıçapına sahip olacaktır. Tünel çapı gabari 6.57 metre 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. Ataköy İstasyon –Makas Arası Bağlantı Tünelleri; çift tünel olup Hat 1 B1.1 tünel boyu 22.39 m. olup A Tüneli 122.50 metredir. Hat 2 B1.1 tünel boyu 21.59 m. olup A Tüneli 125.16 metredir. Toplamda açılacak tünel boyu 291.64 metredir. Açılacak tünel kesitleri ve üç boyutlu çizimleri Şekil 2’ de gösterilmiştir.



Şekil 2. Ataköy İstasyon- Makas arası açılacak olan tünel kesitleri ve üç boyutlu çizimleri

3 JEOLJİK FORMASYON

Ataköy- İkitelli metro güzergahı, kuzeyde Soğucak Kireçtaşı içinde başlayıp, güney yönde Ceylan Formasyonu, Danişment Formasyonuna ait Gürpınar Üyesi, Çekmece Formasyonuna ait Güngören-Çukurçeşme üyelerini kat ederek en güneyde Çekmece Formasyonuna ait Bakırköy Kireçtaşı içinde son bulur. Güzergah boyunca yer yer dolgu ve alüvyal çökeller mevcuttur. Güzergah boyunca kat edilmesi beklenen birimler esas ve tali olmak üzere iki şekilde Çizelge 1’de özetlenmiştir (Artson Geoteknik, 2016).

Ataköy Makas-İstasyon Arası NATM tünelleri Hat 1 tüneli Başlangıç km olarak 12+993.19 bitiş km ise 13+138.08 Hat 2 tüneli ise başlangıç km olarak 12+972.31 bitiş km ise 13+119.06 olarak açılmıştır. Formasyon yapısı olarak açılan tüneller Bakırköy Formasyonun özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 1. Ataköy- İkitelli Formasyon (Artson Geoteknik, 2016)

Başlangıç (km)	Bitiş (km)	Esas Formasyon	Tali Formasyon
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 kum km 5+900 -6+100 arasında kum (Tçç) geçici kum geçilmesi beklenmektedir.
6+000	9+600	Çukurçeşme (Tçç) ve Gürpınar (Tdg)	Güngören (Tçg) Kıraç (Tik) ve Ceylan (Tc)
9+600	11+670	Güngören Üyesi (Tçg)	Çukurçeşme (Tçç) ve Bakırköy (Tçb)
11+670	13+372	Bakırköy Güngören Kireçtaşı	Alüvyon (Qal)

3.1 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 kireçtaşı ardalanması ile başlayan tatlı su Fasiyesli: düzensiz tabakalanmalı beyaz mikritik bir kireçtaşıdır. Aralarında yer yer yeşil ve mavi renkli killi marnlı düzeyler bulunur. Kireçtaşı yer yer olitik ve tebeşirimsidir. İnceden kalına doğru değişen tabakalı, boşluklu ve bol kırıklıdır.

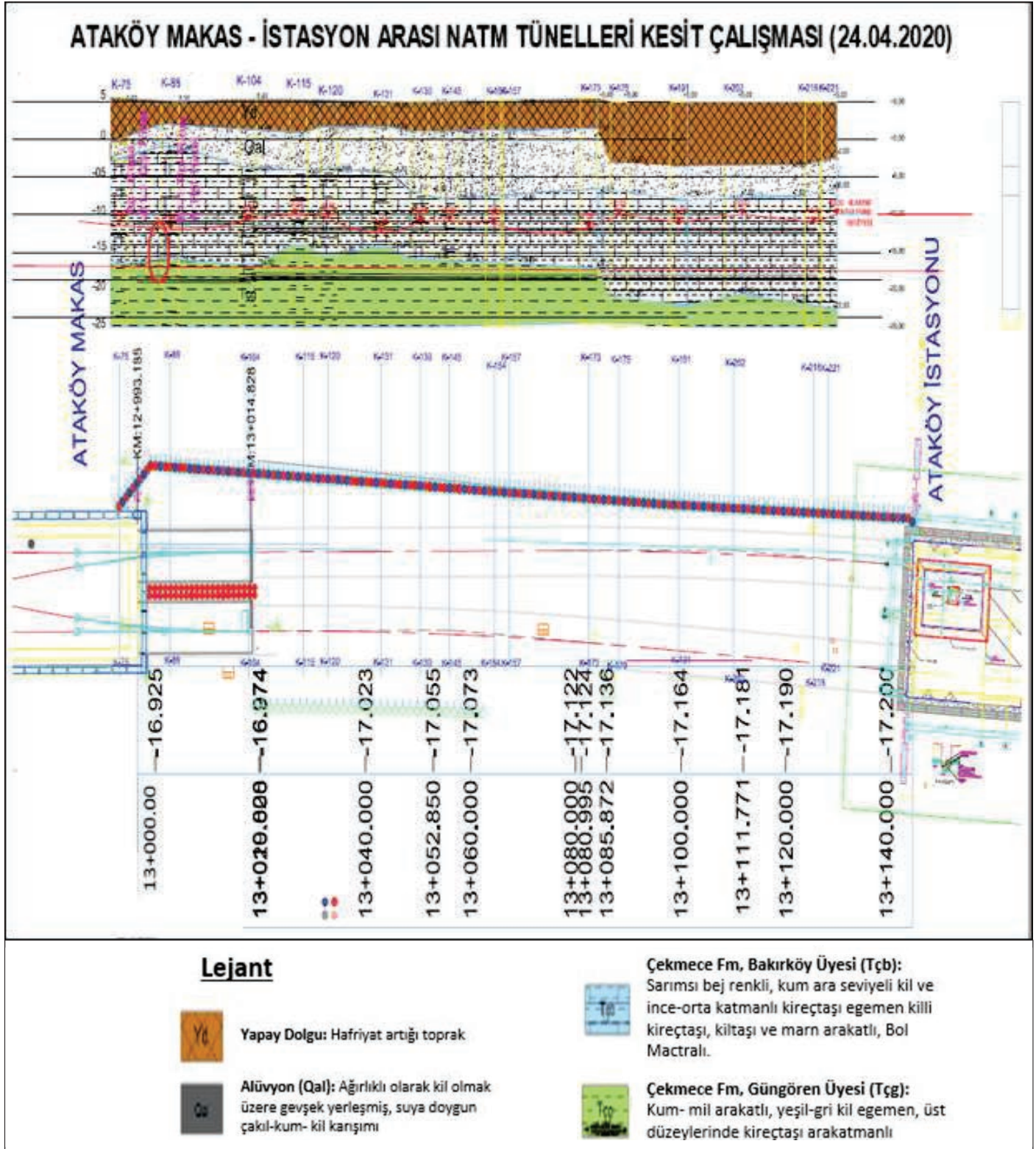
Bakırköy Formasyonunun alt dokanağı, ayrıldığı kesimlerde Güngören Formasyonu ile yanal ve düşey geçişlidir. Genelde 25-30 m kalınlık gösteren Bakırköy Formasyonunun kuzeye doğru kalınlığı azalır. Bu kalınlık 10-15 m'ye kadar düşer. 2020 yılında Makas-İstasyon arasında açılan tünellerin jeolojik kesit çalışması Şekil 3' de gösterilmiştir.

4 KAZI DESTEK ÇALIŞMALARI SU İLİŞKİSİ VE DEFORMASYON ANALİZİ

4.1 Tünel Kazısı

Ataköy Makas-Ataköy İstasyon arasındaki ilk tünel kazısına 01.11.2022 tarihinde başlandı.10.08.2022 tarihinde (282 günde) tüneller teslim edilmiştir. Kazı uygulamaları ekskavatörler yardımıyla yapılmakta olup ortaya çıkan hafriyat ise yükleyiciler vasıtası ile uzaklaştırılmaktadır. Kazı yüzeyi ayrılmış kireçtaşı ve kil tabakalarından oluşmakta olup, kireçtaşı, bünyesinde barındırmış olduğu suyu serbest bırakmaktadır. Yani kazı sırasında aynadan gelen su sebebiyle sağlıklı bir çalışma ortamı oluşmaktadır. Bu durum beraberinde bir takım ciddi problemleri oluşturmaktadır. Oluşan problemleri aşağıda ifade edilmiştir.

- Kazı ile birlikte üretilen pasa su ile birleşerek çamur ve mırık haline gelmektedir.
- Çamur ve mırık haline gelen pasanın uzaklaştırılması yukarıda stoklanması hafriyat sahası dolu olduğu zaman aşağıda biriktirilmesi ve sonuç olarak çıkan suyu tahliye edilen çökeltme tanklarının dolması ve rögarların tıkanmasına sebep olmuştur.
- Püskürtme betonun uygulanacağı yüzeyden gelen su nedeniyle dökülme (ribaunt) fazla olmaktadır.
- Şekil 4’de görülen çelik hasır ve İksa montajı yoğun su altında yapılmak zorunda kaldığı için uygunsuz çalışma ortamları oluşmuş ve kaynak işleri yapılırken çok sıkıntı yaşanmıştır.



Şekil 3. Ataköy Makas- İstasyon arası açılacak olan tünel kesitleri (Aga Enerji, 2020)



Şekil 4. İksa montajı

4.2 Yeraltı Suyunun Tünelcilik Üzerindeki Olumsuz Etkileri

Geçmişten günümüze gelişen makine, ekipmanı teknoloji ve teknikler yardımı ile tünelcilik faaliyetlerini yürütmek oldukça kolay bir hale gelmiştir. Şöyle ki; iş makinelerindeki teknolojik gelişimler, uygun zemin koşulları ve geçmiş deneyimler bu durum üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Ancak Ataköy Şantiyesinde su gelirinun fazla olmasından dolayı, tünelcilik faaliyetleri olumsuz yönde etkilenmiştir. Bu olumsuzluklar;

- Uygulamada zorluklar yaşanmasına, çalışanların ıslanmasına ve isteksiz çalışmasına, işe ön yargılı bakmalarına,
- İş Sağlığı ve güvenliği açısından, elektrik çarpması probleminin riskinin artmasına,
- Su tahliye problemlerine, su baskını ve enerji sarfiyatının artmasına, pompa bakım maliyetleri gibi giderlerin artmasına,
- İş makinelerinde meydana gelen özellikle elektrik arızalarının artmasına ve makine kaportalarının aşınmasına,
- Zemin stabilite problemlerinin artmasına,
- Püskürtme beton miktarında zayıflığın oluşmasına,
- Enjeksiyon süresinde artışlara, bunlara bağlı olarak iş programının uzamasına neden olmuştur.

5 SUSUZLAŞTIRMA ENJEKSİYONU

Ataköy Makas- İstasyon arası tünelleri, konum olarak yeraltı su seviyesinden düşük kottadır (-15.90 İksa ayak kotu). Yeraltı suyunun olumsuz etkisi, kazı ve destekleme çalışmalarının başlamasıyla birlikte, imalatın her aşamasında aksaklıklara yol açmıştır. Bu aksaklıkların giderilmesi için uygun bir yöntem belirlenip tünelcilik faaliyetlerinin devam edebilmesi adına harekete geçilmiştir.

5.1 Susuzlaştırma Enjeksiyon Yöntemi

Enjeksiyon işlemi, amacına yönelik farklı şekillerde yapılabilir. Yapılan her kazı ve delgi uygulamalarının neredeyse tamamında su geliri mevcut olmasından dolayı enjeksiyon yönteminin belirlenmesinde amaç, yeraltı suyunu faaliyet alanından uzak tutarak daha az sulu bir ortamda çalışabilmek olmuştur. Bu bağlamda proje özelliklerine göre bir yöntem uygulanmıştır.

Enjeksiyon uygulamasında gelen suyun basıncını yenecek karşı bir basınç ile enjeksiyon yapılarak suyun ötelenmesi ön görülmüştür. Burada yapılan susuzlaştırma enjeksiyonun amacı aşırı stabilite problemi olmadığı için yalnızca zemindeki geçirgenliği azaltarak daha az sulu bir formasyonda tünelcilik yapmaktır. Yapılan enjeksiyon konsolidasyon enjeksiyonu değildir. Konsolidasyon enjeksiyonu; dayanımı düşük olan formasyonlarda yada rezidüel zeminlerde uygulanarak zeminin mekanik ve jeolojik özelliklerini değiştirip dayanımını arttırmaktır.

5.2 Susuzlaştırma Delgi Yöntemi

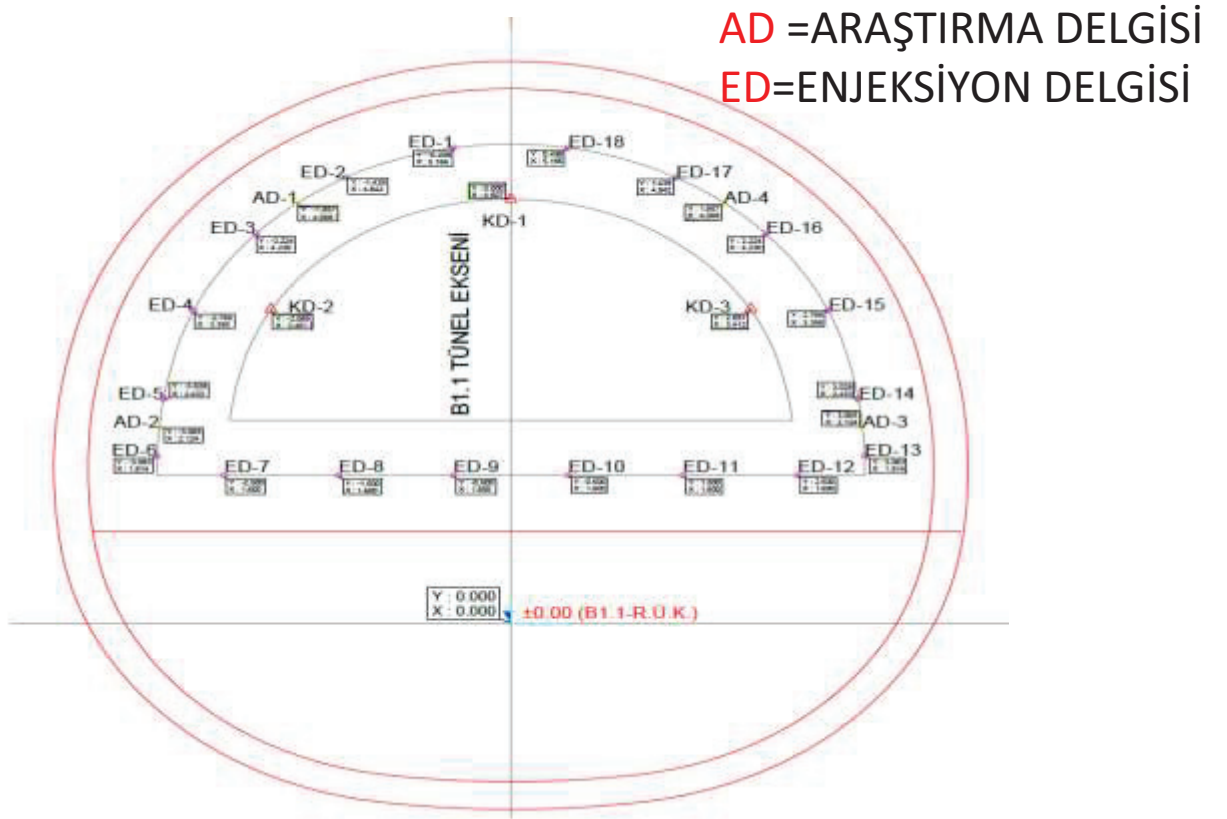
Proje verilerine göre kazı adımı 4.80 m, umbrella arch boyu 9.0 m ve ayna zemin çivisi boyu 12 m olarak belirlenmiştir. İmalatına başlanılan Ataköy Makas-İstasyon arası tünel kazılarında susuzlaştırma enjeksiyonunun gerekliliğine hem orada yapılan diyafram çalışmalarından hem de Ataköy-İstasyon tarafından delinen delgilerdeki suyun varlığından ve bölgede mevcut zemin çalışmalarında tespit edilen serbest akiferden dolayı karar verilmiştir. Yapılacak delgilerin hem delgi makinesinin deleceği kotta, deleceği açıda ve deleceği anlamlı uzunlukta olması gerekiyordu. Buna istinaden yapılan proje değişiklikleri;

- Susuzlaştırma delgi boyları ayna zemin çivisinin delgi boylarından her zaman uzun olmak zorundadır.
- Susuzlaştırma delgi boylarını umbrella arch delgisi yaparken umbrella borusunun bittiği yerde bir enjeksiyon bulutu oluşturup ve o bulut içerisinde hapis edip umbrella borularından gelecek olan suyu minimize etmektir.
- Yapılacak susuzlaştırma delgi paternini ayna kesit alanına homojen olarak dağıtmak gereklidir.

Kazı aynasına çelik hasır montajı yapıp püskürtme beton ile ayna kapatıldıktan sonra AD1-AD2-AD3-AD4 delgileri delinecek bir tanesinden 18 lt/dakika yada 4 adet araştırma delgisinden toplamda 60 lt/dakika su geliri var ise enjeksiyon delgileri delinecek ve ayna püskürtme beton kalınlığı 30 cm çıkarılacaktı. Burada kritik olan nokta susuzlaştırma delgisi yapılmadan ön hazırlığın yapılmasıdır. Şekil 5’de yapılacak olan susuzlaştırma delgilerinin aynadaki yerleşimi görülmektedir.

Aynanın püskürtme beton ile kapaması yapılırken eğer projede geçici invert var ise yapılacak olan geçici invert ile ayna kapamasının hasırları birbirine kenetlenip bohçalama yapılması elzemdir. Yapılacak delginin işlevsel olması yapılacak olan enjeksiyonun kalitesi ile doğru orantılıdır. Şekil 6’da enjeksiyon kuyularının gösterimi yapılmıştır.

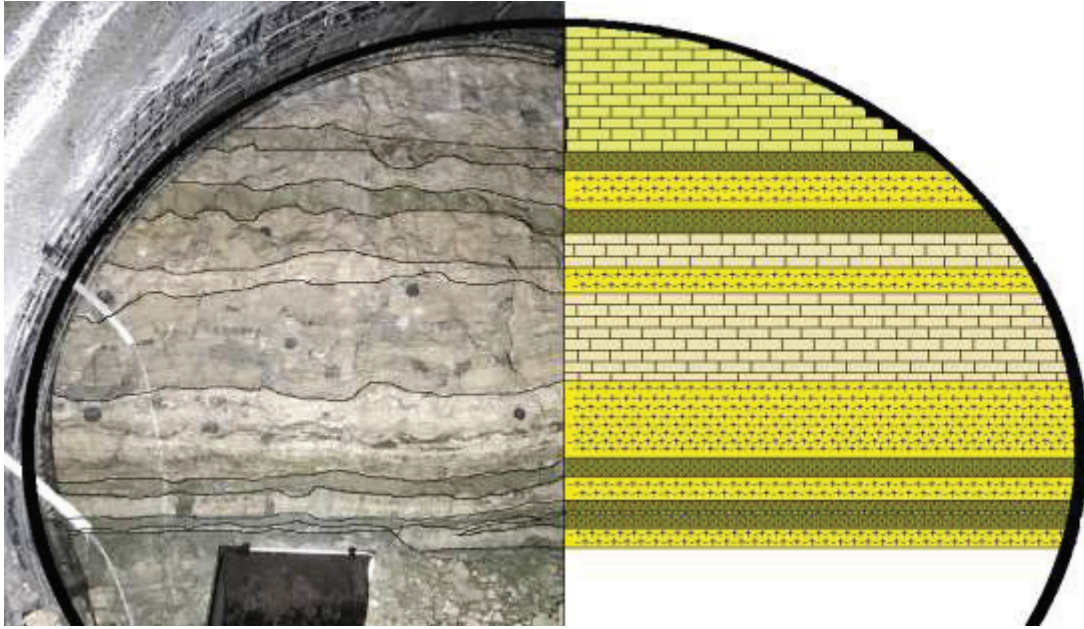
Delgi açıları için jeolojik yapı göz önünde bulundurulmuştur. Her ayna kapanırken aynanın fotoğrafı çekilmiş ve tabakalanmanın yatay yönlü olup ve aralara kil dolgulu olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple delgi yönü ve seçimi önem arz etmektedir. Şekil 7’de jeolojik en kesit görülmektedir. Killi birimden kuyu açılırsa yada ince sık tabakalı birimden kuyu açılırsa enjeksiyon gerekli yerlere nüfus edemeyecek yada daha az nüfus ederek uygulamanın başarısız olmasına sebep olacaktır.



Şekil 5. Susuzlaştırma Delgilerinin aynadaki yerleşimi



Şekil 6. Enjeksiyon kuyularının gösterimi



Şekil 7. Jeolojik en kesit

5.3 Susuzlaştırma Enjeksiyonunda Kullanılan Malzemeler

5.3.1. Çimento

Blaine değeri yüksek olan yani diğer bir deyişle özgül yüzeyi fazla çimento tercih edilmiştir.

5.3.2. Su

Enjeksiyonda kullanılan su, içerisinde atık malzeme olmayan temiz berrak su kullanılmıştır.

5.3.3. Akışkanlaştırıcı

Viskozitesi yüksek olan bir enjeksiyon karışımına belli bir oranda Rhebouuilt 1000 T marka akışkanlaştırıcı katıldığında karışımın viskozitesini azaltmaktadır. Bu sayede birim zamanda zemine nüfus eden çimento miktarı artmıştır.

5.3.4. Priz hızlandırıcı

Priz hızlandırıcı, yapılan enjeksiyonun daha erken priz almasını sağlamak için kullanılan bir üründür.

Refü (enjeksiyonla doyurulmuş) şartı sürecinin başladığı andan itibaren enjeksiyon karışımına belirli oranda katıldığında sürecin sonuna kadar olan zamanda, çimentonun çatlak içinde donma süresini sağlayarak yapılan enjeksiyon verimi artmıştır.

5.3.5. Hidrolik ve mekanik paker (tıkaç)

Verimli bir enjeksiyon için kuyu içine yerleştirilen pakerlerin tam sızdırmazlığı sağlayacak şekilde deliği tıkası gerekir ve pakerin arkasındaki çekvalfin çalışması önemlidir. Bu sayede kuyu, istenilen miktarda basınç altında tutularak düzenli bir enjeksiyon uygulamasına tabi tutulur. Eğer sızdırmazlık sağlanamaz ise kuyu yeterli basınç altında tutulamayacağı için refü şartı sağlanmamış olur ve enjeksiyon başarısız olur. Şekil 8 'de pakeri devreye almak için gerekli malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 8. Hidrolik Paker ve aparatları

5.4 Enjeksiyon Seti

Çift yönlü enjeksiyon yapabilen ve gücünü hidrolik sistemden alan enjeksiyon setleri kullanılmıştır. Enjeksiyon pompası sürekli arıza vermeyecek şekilde su soğutmalı ve hava soğutmalı pompalar tercih edilmiştir. Seçilen enjeksiyon setlerinde yaklaşık 100 metre araya bir ikinci enjeksiyon seti atılmadan kuyu ağzındaki basınç değerleri sağlanabilmektedir. Şekil 9'da enjeksiyon setlerine ait görsel görülmektedir.



Şekil 9. Lineer enjeksiyon setleri

5.5 Enjeksiyon Seti

Tünelcilik sisteminde enjeksiyonun hiç durmadan sürekli yapılması için silo sistemi şarttır.

Silo sistemi ile beraber hazırlayıcı kazan ve santral sistemi de olması gereklidir. Çok suyun olduğu formasyonlarda enjeksiyonun sürekli yapılması gerektiğinden dolayı silo sistemi hem enjeksiyonda çalışacak kişi sayısı açısından hem de maliyet açısından oldukça avantajlıdır.

5.6 Enjeksiyon Karışım Oranları Ve Enjeksiyon Uygulaması

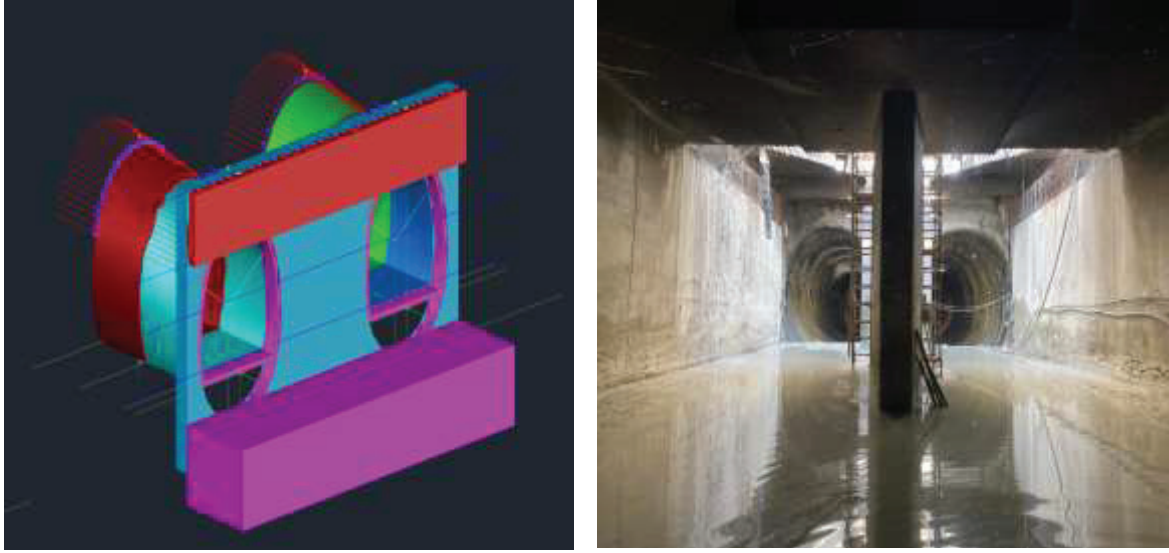
Kazı destek çalışmalarının uygun bir şekilde yapılabilmesi için kazı aynasından suyu uzaklaştırıp (4.8 m), kazılmamış kısma yani çalışma alanının dışına itmek olmuştur. Susuzlaştırma enjeksiyon uygulamasında kullanılacak olan karışım oranları Çizelge 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Enjeksiyon karışım oranları (Yılmaz, 2018)

Karışım Oranı(çim/su)	Çimento Miktarı (kg)	Su Miktarı (kg)	Birim Hacim (lt)	Çalışma Basıncı (bar)
(1/3)	100	300	332.25	6-7
(2/3)	200	300	364.50	6-7
(1/1)	250	250	330.63	6-7
(7/5)	350	250	362.88	6-7
(2/1)	400	200	329.00	6-7

Enjeksiyon paternine göre delgi yerleri işaretlenip Şekil 6’da gösterilen delgiler uygun metraj ve uygun açıda delinerek delme işlemi tamamlanır. Delinen delgilerin delgi boyları ortalama 11.5 m. uzunluğunda dışa 10° açılı olacak şekilde Ø125 mm delikleri delinmiş ve zeminin kireçtaşı formasyonu çatlaklı olduğu için paker kuyu ağzına takılarak tek kademedede enjeksiyon yapılmıştır. İlk olarak araştırma delgileri delinip ardından gelecek suyun debisine göre enjeksiyon delgileri delinmiştir ve hepsi paker ile tek kademedede enjeksiyon yapılmıştır. Tüneli çevreleyen zemine destek amaçlı uygulanan ayna zemin çivisi veya yan zemin çivisinden gelen sular, koyu karışım ile kuyu doldurularak ayna zemin çivisi veya yan zemin çivisinin işlevselliği sağlanmıştır. Enjeksiyon işlemleri aşağıda sıralanmıştır.

- Enjeksiyon kuyusunun ağız kısmına bir hidrolik paker tutturulur. Hava vermek suretiyle paker şişirilir ve kuyu sızdırmaz hale getirilir. Diğer bir deyişle enjeksiyon verildiğinde kuyunun hiçbir noktasından enjeksiyonun kaçmasına müsaade edilmeyecek hale getirilir.
- Çimento/Su oranı = 1/3 oranında karışımla enjeksiyona başlanır.
- Bir kazan enjeksiyon yapıldıktan sonra (80x80 kazan ölçüsü 400 lt) basınç yükselmeyorsa 2/3 oranındaki karışıma geçilir.
- Bir kazan enjeksiyon yapıldıktan sonra (80x80 kazan ölçüsü 400 lt) basınç yükselmeyorsa 1/1 oranındaki karışıma geçilir.
- Bir kazan enjeksiyon yapıldıktan sonra (80x80 kazan ölçüsü 400 lt) basınç yükselmeyorsa 7/5 oranındaki karışıma geçilir.
- Bir kazan enjeksiyon verildikten sonra basınç yükselmeyorsa 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 oranı).
- 1/3 oranında enjeksiyon verilmeye başlanır ve alış devam ediyorsa enjeksiyona devam edilir. Hangi oranda olursa olsun alış miktarı, dakikada 2 lt’den az ya da 10 dakikalık sürede 50 lt ‘den az alış yapıyorsa kuyu refü (enjeksiyonla doyurulmuş) sayılır.

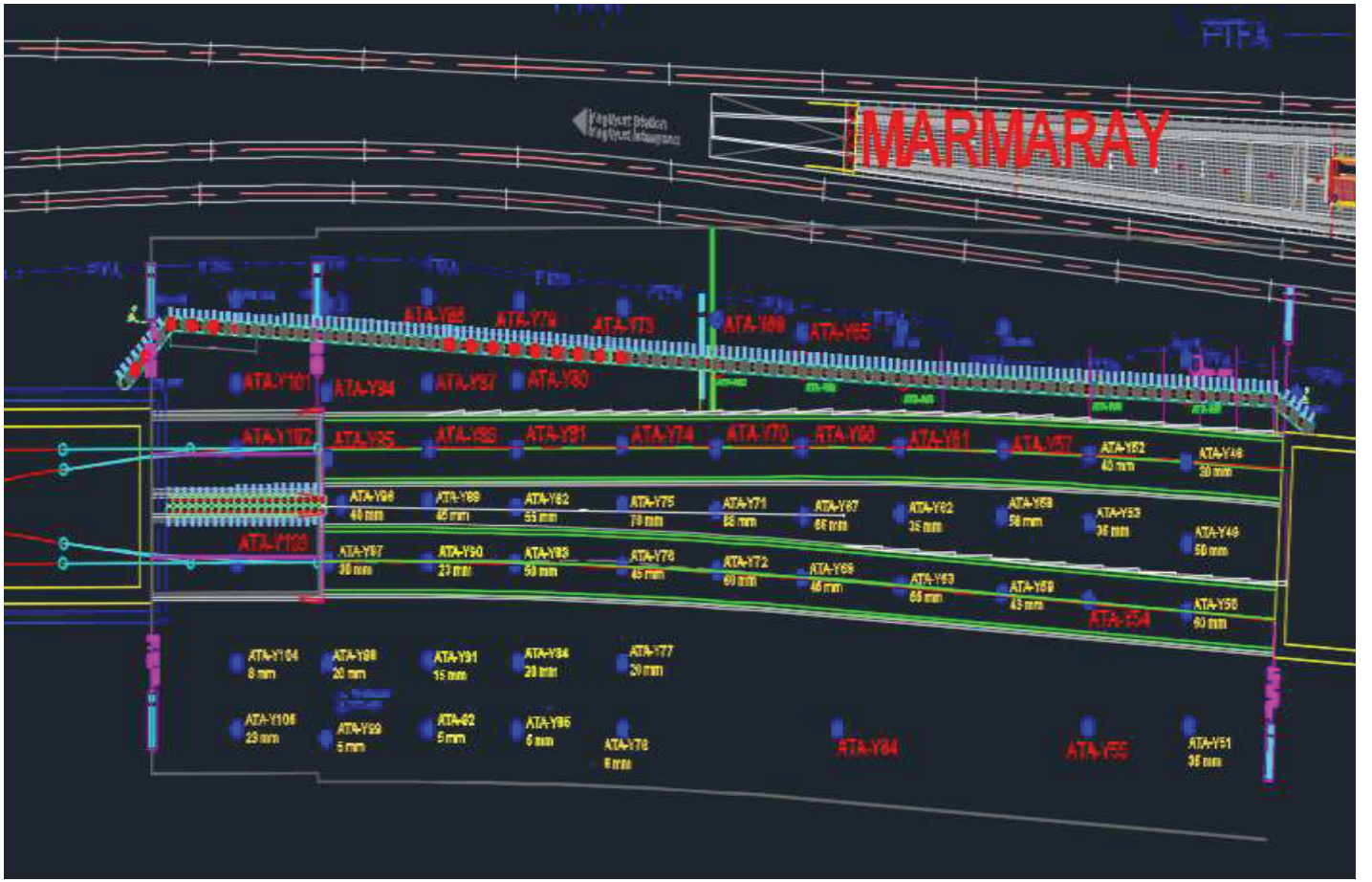


Şekil 10. Tünellerin asimetrik görünüşü

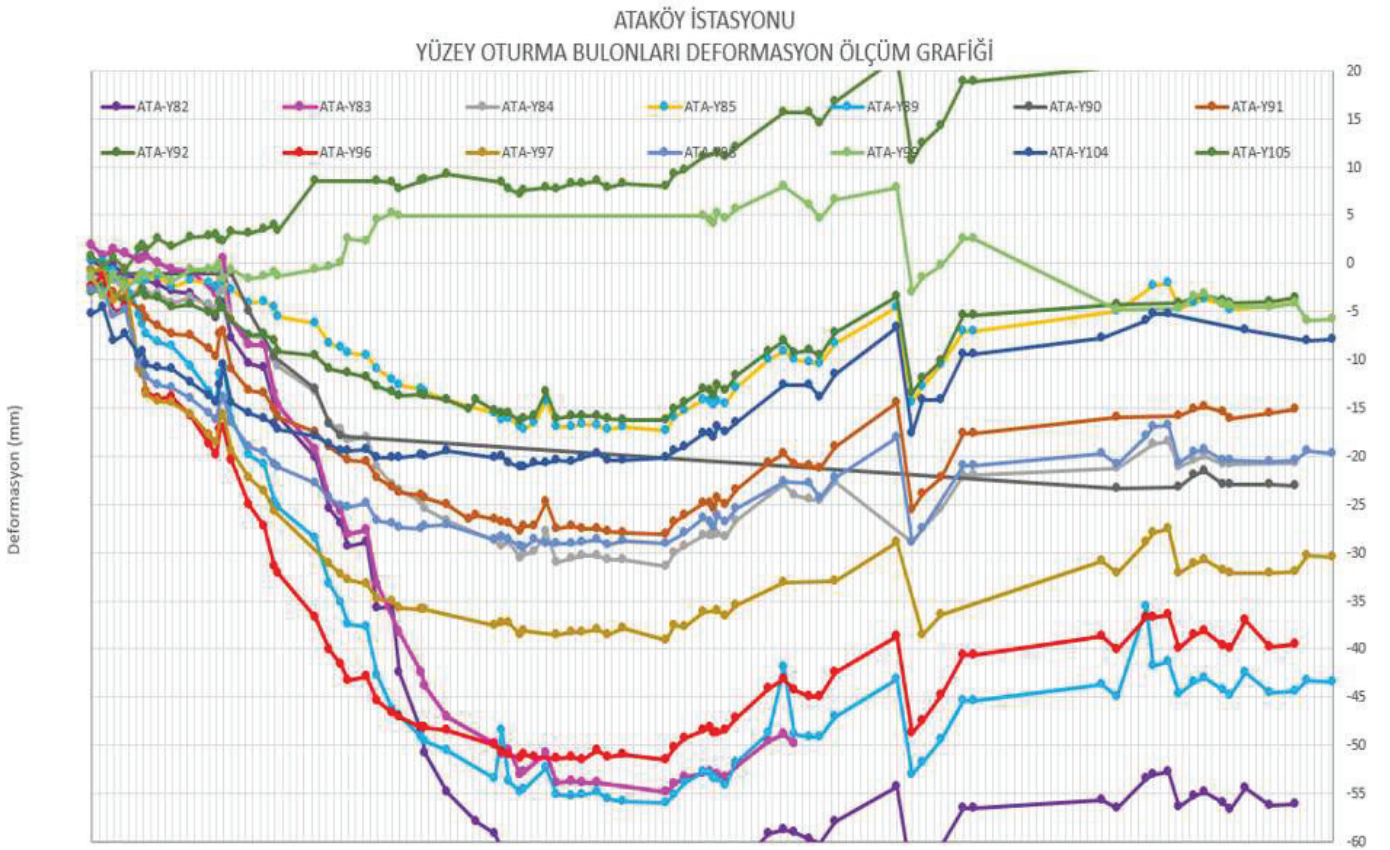
Bu sıralama yukarıda yazıldığı gibi her enjeksiyon kuyusu için tekrarlanarak devam eder. Zemindeki kılcal boşluklardan dolayı enjeksiyon alışı devam edebilir, böyle durumlarda çimento miktarının %1 kadar akışkanlaştırıcı kullanılır. Aynanın enjeksiyona hazır olup olmadığını delgi delmeden anlayabilmek için yapılan enjeksiyon hortumlarının ağızları açılır eğer su gelişi var ise tekrar enjeksiyon yapıp priz süresinden sonra kazıya başlanır. Kazı aynasına çelik hasır montajı yapıp püskürtme beton imalatına başlanmadan önce eğer delgilerden su gelişi var ise o yerlere drenaj borusu konulup ardından çelik hasır montajına geçilir ve püskürtme beton atılıp ardından ikinci kat çelik hasır atılıp kör ayna kapatılmış gibi aynada hiç bindirme bırakmadan ayna kapaması yapılır ve tam sızdırmazlık sağlanmış olur.

6 DEFORMASYON ANALİZİ

Ataköy Şantiyesinde tünel güzergahında toplam 49 adet yüzey oturma bulonu, 6 adet piyezometre ve 7 adet inklinometre bulunmaktadır. Şekil 11’de tünel güzergahında bulunan izleme noktalarının konumu gösterilmiştir. Tünel kotu ile zemin arasında et kalınlığı 16.5 m’dir. Delgi esnasında çok fazla miktarda suyun 18-64 lt/dakika su geldiği delgilerde suyun akmasına izin verilmeden paker atılıp hemen enjeksiyona başlanılmıştır. Hem tünel içi deformasyonlar hem de yüzeyde oluşan oturma bulonları baz alınarak deformasyon analizi yapılmış olup o veriler eşliğinde gerektiği yerde üstyarısı yapılan yerin alt yarısı tamamlanmış gerektiği yerde ise Hat 1 ve Hat 2 üst yarı arası takip mesafesi uzatılmıştır. Proje karakteristikleri nedeniyle tünel kazıları arasındaki yatay mesafe olabildiğince sınırlı tutulmaktadır. Yapılan çalışmalar önde yürütülen kazının jeolojik ortamda örselenmeye neden olduğunu dolayısıyla arkadan gelen tünelin açıldığı ortam aynı olsa bile, teorik olarak önden ilerletilen kazı nedeniyle örselendiği bu nedenle de ortamın jeomekanik parametrelerinde negatif yönde bir değişim olduğunu göstermektedir (Topal ve Mahmutoglu, 2022). Arkadan gelen tünelin önde yürütülen tünelin etki alanı içerisinde kalması durumunda daha zayıf bir ortamdan geçmesi söz konusu olmaktadır. Bu durum tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey oturma şekilleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ataköy Şantiyesinde açılan tüneller makas tüneli gibi çalışmakta olup deformasyon hep Hat 1 ileri yönde olmuş ve arkadan gelen Hat 2 tüneline nispeten daha rahat ortamda kazı yürütülmüştür (Hat 1 tarafından yapılan enjeksiyon Hat 2 tarafını da iyileştirmiş ve zemini konsolide etmiştir). Şekil 12’de deformasyon izleme noktalarından ölçülen oturmaların zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 11. Tünel güzergahında bulunan izleme noktalarının konumları



Şekil 12. Deformasyon izleme noktalarında ölçülen oturmaların zamanla değişimi (01.11.2023 ile 15.07.2023 tarihler arası)

7 SONUÇLAR

Ataköy makas- İstasyon arası tünel kazısında aşırı derecede su olması sebebiyle susuzlaştırma enjeksiyonu uygulamasına başvurulmuştur. Şekil 10'da imalatları tamamlanan tüneller gösterilmiştir. Yapılan imalatları değerlendirerek bu formasyon için en uygun sıralama belirlenmiştir. Buna göre;

- Susuzlaştırma enjeksiyonu uygulanarak kazı ve desteklemenin susuz ya da yönetilebilir miktarlardaki su eşliğinde yapılması sağlanmalıdır.
- Susuzlaştırma enjeksiyonu sonrası kazı esnasında sızan sızıntı sular mutlaka enjeksiyon yapacağımız şekilde hortuma alınıp püskürtme beton üzerine atılarak suların kazı alanından uzaklaştırılması gereklidir.
- Kazı raundu bitirilip, yeni enjeksiyon aşamasına geçildiğinde tünel aynasının çift kat çelik hasır ile birlikte atılan püskürtme betonun ise sızdırmaz bir kabuk olarak tüm çevreyi kaplamış bir kabuk oluşturması sağlanmıştır.
- Bu şartlarda açılan tünel imalatında mutlaka geçici invert yapılması gereklidir. Bu imalat hem stabiliteyi sağlayacak hem de sağlıklı çalışma ortamı oluşumuna destek olacaktır.
- Hidrolik pakerin kullanılmadığı yerlerde (Ua borusu) mutlak suretle mekanik paker kullanılması gereklidir. Eğer paker kullanılmayacak ise su ile prizi daha erken alan alçı kullanılması gereklidir ve yapılacak alçı çok önemlidir. Gelecek olan basınca bir tampon görevi görmesi için kuyunun içerisine ilk önce taş üstüğü konulması gereklidir.
- Yapılan enjeksiyonun su ile yıkanmasına izin verilmemelidir. Bunun için silo sistemi var ise karıştırıcı sürekli enjeksiyon yapıp sete aktarmalı enjeksiyon hiç durdurulmalıdır. Silo sistemi yok ise iki adet enjeksiyon seti olmalı biri enjeksiyon aynaya basarken diğeri hazır olmalı sette enjeksiyon bitmeden sürekli enjeksiyonun devamlılığı sağlanmalıdır.
- Suyu deşarj edilen rögar ve onun öncesinde en az üç adet olacak çökeltme tankı bulunması gereklidir.
- Su geliri olan tünel kazılarında eğer deformasyon yok ise alt yarı yapılmadan ilerlemek hem üretim kalitesi artıracaktır hem de projeyi daha ekonomik hale olacaktır.
- Çelik hasır montajı ve püskürtme beton ile ayna kapatılırken yapılacak olan enjeksiyonun kalitesini arttırmak ve püskürtme beton kalınlığını sağlamak için ilk önce tek kat çelik hasır montajı yapıp püskürtme beton atılıp ardından ikinci kat çelik hasır montajı yapıp püskürtme beton kalınlığını sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Aga Enerji, 2020 *Ataköy-İkitelli Metro Hattı Jeolojik Kesit Çalışması*, Yayınlanmamış Rapor, Aga Enerji, İstanbul.
- Artson Geoteknik, 2016. *Ataköy-İkitelli Metro Hattı Güzergahı Kesin Proje Jeoloji-Jeoteknik Etüd Raporu*. Artson Geoteknik Mühendislik ve Müşavirlik Proje Jeoteknik Etüd Raporu.
- İBB, 2016. www.metro.istanbul
- Topal, C., Mahmutoğlu, Y., 2022. *İstanbul'da Zayıf Jeolojik Ortamlarda Metro Tüneli Kazılarının Neden Olduğu Oturma Teknesinde Değişimler*. Jeoloji Mühendisliği Dergisi,46(1), s.1-16.
- Yılmaz, Ö, 2018. Enjeksiyon Yapım Yöntemi, Özgürlük Meydanı İstasyonu, B-B-K Metro Hattı.

Meskün Mahal Tünellerinde Kontrollü Patlatma ve Hidrolik Kırıcı Esaslı Kazı Mukayesesi

Comparison of Controlled Blasting and Hydraulic Breaker Based Excavation in Residential Tunnels

M. Canbal

Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü Marmaray Bölge Müdürlüğü, İstanbul

M. Sarıdede, Ö. Özkaya

Gülermak YSE Adi Ortaklığı, İstanbul

A. Kahrıman, S. Bağdatlı

İstanbul Okan Üniversitesi, Patlayıcı Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, İstanbul

E.A. Dondurmacı

Akademi Patlayıcı Mühendisliği, İstanbul

ÖZET: İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı Metro Hattı, Kartal – Kaynarca Metro Hattı'nı Sabiha Gökçen Havalimanı'na bağlayan 7,4 km uzunluğunda, çift hatlı ve üzerinde 4 adet yolcu istasyonu bulunan bir raylı toplu taşıma sistemidir. Tünel inşaatı sırasında NATM (New Austrian Tunnel Method) yöntemi ve kontrollü patlatma tekniği kullanılmıştır. Çevresel duyarlılıklar dikkate alındığında, patlatma kaynağından belirli bir uzaklıkta bulunan bir yerleşim biriminin ya da herhangi bir yapının, patlatma kaynaklı yersarsıntısı ve hava şoku gibi çevresel sonuçlardan etkilenmemesi gerekir. Bu nedenle, jeolojik yapı ve çevresel faktörler dikkate alınarak lokasyona risk analizine dayalı patlatma tasarımının yapılması zorunludur. Yerleşim bölgesinde yapılacak olan tünel kazısının, planlanan zamanda ve öngörülen maliyet keşfi dahilinde tamamlanması esastır. Bu nedenle patlatmalı kazı uygulamaları zaman ve maliyet yönetimi açısından önemli bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu bildiride; yoğun bir yerleşim bölgesinde yer alan Kaynarca-Sabiha Gökçen Havalimanı metro inşaatında; çevresel risk ve kriter kısıtlamaları ile gerçekleştirilen kontrollü patlatma ve mekanik kazı yöntemleri zaman ve maliyet açısından karşılaştırılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda; hidrolik kırıcılı kazı maliyetinin çevre kısıtlamaları altında gerçekleştirilen kontrollü patlatma yönteminden %50 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Süresel etki analizinde ise Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) birim fiyat tariflerinde yer alan ilgili poz numarası ile karşılaştırma yapılmıştır. Buna göre saatlik kazı kapasitesi 300 HP kapasiteli hidrolik kırıcıda 3.5 m³ iken kontrollü patlatmalı kazıda 15 m³ olarak belirlenmiştir.

ABSTRACT: Istanbul Sabiha Gökçen Airport Metro Line is a 7.4 km long, double-track public rail transportation system connecting the Kartal-Kaynarca Metro Line to Sabiha Gökçen Airport and has 4 passenger stations on it. During the construction of the tunnel, the NATM (New Austrian Tunnel Method) method and the controlled blasting technique were used.

Taking into account environmental sensitivities, a residential unit or any structure located at a certain distance from the explosion source should not be affected by environmental consequences such as ground vibration and air shock caused by the blasting.

For this reason, it is mandatory to make a blasting design based on location-specific risk analysis, considering geological structure and environmental factors.

It is essential that the tunnel excavation to be carried out in the residential area is completed at the planned time and within the projected cost. For this reason, blasting excavation applications are emerging as an important element in terms of time and cost management.

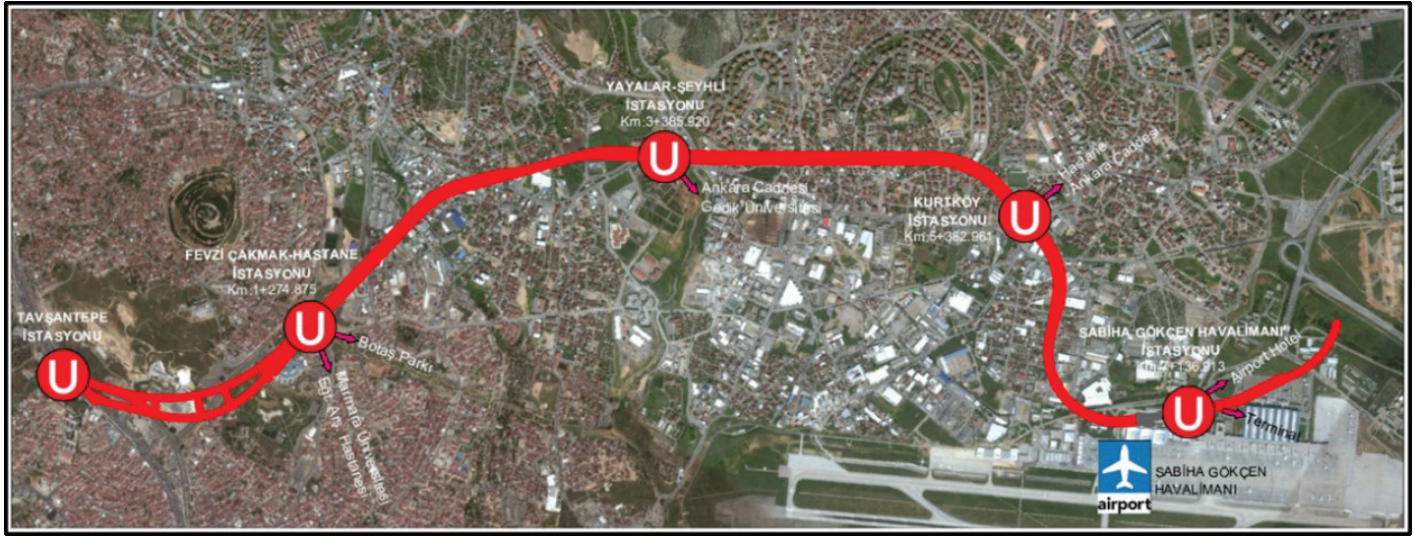
In this study; in the Kaynarca-Sabiha Gökçen Airport subway construction, which is located in a dense residential area; controlled blasting carried out with environmental risk and criterion restrictions and mechanical excavation methods are compared in terms of time and cost.

As a result of the analyzes carried out; It was determined that the cost of excavation with hydraulic hammer is 50% higher than the controlled blasting method carried out under environmental restrictions.

In the time effect analysis, a comparison was made with the relevant exposure number included in the unit price recipes of the Ministry of Environment and urbanization. Accordingly, the hourly excavation capacity was determined as 3.5m³ in the hydraulic hammer with a capacity of 300 HP and 15m³ in the controlled blasting.

1 İSTANBUL SABIHA GÖKÇEN HAVALİMANI METRO HATTI HAKKINDA GENEL BİLGİLER

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nca ihale edilerek GÜLERMAK-YSE Adi Ortaklığınca inşa edilen İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı Metro Hattı Kartal-Kaynarca Metro Hattı'nı Sabiha Gökçen Havalimanı'na bağlayan 7,4 km uzunluğunda, çift hatlı ve üzerinde 4 adet yolcu istasyonu bulunan bir raylı toplu taşıma sistemidir. Proje güzergahı Şekil 1'de gösterilmiştir.



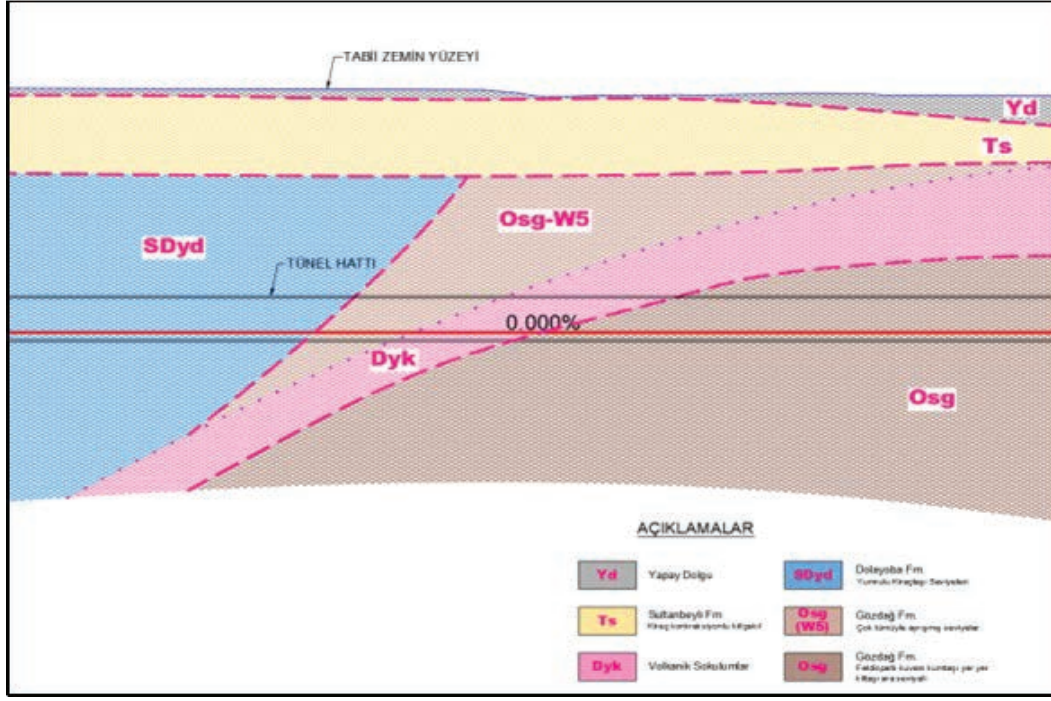
Şekil 1. Sabiha Gökçen metro proje güzergahı

Söz konusu Metro Hattının inşaat işleri; NATM (New Austrian Tunnel Method) yöntemi ile yapılan ulaşım tünelleri, 3 adet tünel istasyonu ve 1 adet (Cut ve Cover) aç-kapa olmak üzere toplam 4 adet metro istasyonunun inşaat işleri, giriş ve çıkış yapıları, demiryolu işleri, enerji temini, elektromekanik işler, sinyalizasyon işleri ve mevcut Kadıköy – Kaynarca Metro Hattı Sistemleri'ne entegrasyonu ve işletmeye alınmasıdır.

Sabiha Gökçen Metro Projesi, İstanbul Anadolu yakasını doğu ve batı yönünde kateden Kadıköy-Kartal Tavşantepe (M4) Metro Hattı'nı kuzeyde havalimanı güneyde Marmaray Hattı'na bağlayacak şekilde kuzey ve güney doğrultusunda tasarlanmış bir metro projesidir.

1.1 Jeolojik Durum

Metro güzergahındaki jeolojik profile ait bir kesit Şekil 2’de ifade edilmiştir. 7. 4 km’lik Proje güzergahı ana hatlarıyla Dolayoba (kireçtaşı), Gözdağı (kumtaşı), Kurtköy (Arkoz) ve Sultanbeyli (killi şistli) formasyonlarından geçmektedir. Söz konusu formasyonlar içerisinde Volkanik sokulumlar, karst boşluklar, ayrılmış parçalı lamineli karakterlerden oluşan süreksizlikler bulunmaktadır. Hat boyunca tünel kotunun üstünde yeraltı su seviyesi gözlemlenmiştir. Jeolojik yapılara ait bilgiler aşağıda detaylı verilmiştir.



Şekil 2. Jeolojik profil

Kurtköy Formasyonu (Oku); Mor renkli kumtaşı, çamurtaşı – şeyl ve çakıltaşı ar dalanmasından (arkoz serisinden) oluşmaktadır. Birim adını Pendik kuzeydoğusundaki Kurtköy Beldesi’nden alır. Formasyon genelde soluk mor, kırmızı ve nadiren yeşilimsi gri renkli, orta – kalın tabakalı, feldispatlı kumtaşı, çakıllı kumtaşı, kumlu çakıltaşı, çakıltaşı, subarkoz ve koyu mor – bordo renkli, laminalı, feldispatlı şeyl ar dalanmasından (arkoz serisinden) oluşur. Daha üstte yer alan Gözdağ Formasyonu ’nun fosillerine dayanılarak belirlenen alt yaşının orta ordovisiyen olduğu göz önüne alındığında, birimin yaşı Erken Ordovisiyen olmalıdır.

Gözdağ Formasyonu (OSg); Kumtaşı (grovak) ve şeyl ar dalanmasından oluşan birim, Gözdağ Formasyonu olarak adlanmıştır. Adını Pendik kuzeyindeki Gözdağ Tepe/Gözdağ Mahallesi’nden alır. Birim genel olarak yeşilimsi gri, gri, altere olmuş kesimleri sarımsı kahverengi renkli, ince tabakalı ve laminalı silttaşı – şeyl ile koyu yeşil ve yeşilimsi gri renkli, ince – orta tabakalı kumtaşı ar dalanmasından oluşur. Üst seviyeleri mor, kahverengi ve gri renkli silttaşı – şeyl ar dalanması karakterindedir. Bu düzey merceksel geometrili, feldispatlı kuvars kumtaşları (subarkozlar) ile oolitik şamozitler içerir. Aynı düzeylerde yer yer gözlenen mor renkli, ince tabakalı silttaşları, Kurtköy Formasyonu ile karıştırılabilecek niteliktedir. Altta Aydos üstte Dolayoba formasyonları ile geçişli olan birimin kalınlığı 200 – 500 m dolayında olup, önemli bir yanal değişim gözlenmez. Gözdağ Formasyonu’nun yaşı Orta Ordovisiyen – Erken Silüriyen (Landoveriyen) olarak benimsenmiştir.

Dolayoba Formasyonu (SDyd); Pendik kuzeyindeki Dolayoba (Dolayba) beldesi civarında yüzeylenen resifal özellikli, kireçtaşları, “Dolayoba kireçtaşı” olarak adlandırılmış, Önalın (1981, 1982) tarafından da “Dolayoba formasyonu” olarak değiştirilmiştir. Birim genelde açık gri ve yer yer pembe, yer yer de açık kahve renkli, ince – kalın tabakalı resifal kireçtaşlarından oluşur. Birim altta Gözdağ, üstte İstinye formasyonları ile dereceli geçişlidir. Kalınlığı 100 m

dolayında olan birim, yanal ve dikey yönde kendisini oluşturan kaya türleri arasında değişim gösterir.

Sultanbeyli Formasyonu (Ts); Sultanbeyli, Kurtköy, Orhanlı, Kurnaköy köyleri arasında geniş alanlar kaplayan kum, çakıl birikintileri için kullanılmıştır. (Yüksel Proje Jeoteknik Raporu, 2016).

1.2 Proje Güzergahında Yapısal Durum

Güzergâh boyunca jeolojik etkileşim sınırı her bir hat ekseninden 25 m'dir. Bu etkileşim koridoru içerisinde 3 adet sağlık tesisi, 4 adet eğitim tesisi, 5 adet kamu binası, 7 adet sanayi tesisi ve 500 adet konut, 2 adet viyadük, 2 adet havalimanı endüstriyel tesisi yer almaktadır.

Güzergâh boyunca etkileşim koridoru içerisinde çok çeşitli ve sayıda altyapı tesisleri bulunmaktadır. Doğalgaz ana iletim hatları, yüksek ve orta gerilim hatları, basınçlı ana kolektör iletim hatları, sanayi tesislerine ait kimyasal depolar, akaryakıt istasyonları yeraltı depoları, mevcut işletme altındaki metro hatları, yeraltına alınmış menfez dereler, 2 m çapın üstünde atık su ve yağmursuyu hatları mevcuttur.

Proje güzergahı boyunca ana hat tünelleri üzerinde 18 m ile 55 m örtü kalınlığı mevcuttur. Tünel olarak yapılan çıkış yapıları, yolcu altgeçidi gibi yapılarda ise 5 m'lere düşmektedir.

Etkileşim koridoru içerisinde bulunan yeryüzündeki yapıların yeraltındaki uzantıları (bodrum, otopark) eklendiğinde kontrollü patlatma yöntemi kullanılarak yapılan tünel ile yapı arasındaki mesafenin 10 m ye kadar düştüğü bölgeler bulunmaktadır. Etkileşim koridorunda kontrollü patlatmalı tünel ile yeraltı tesisleri arasındaki en yakın mesafeler ise yer yer 5 m'lere düşmektedir.

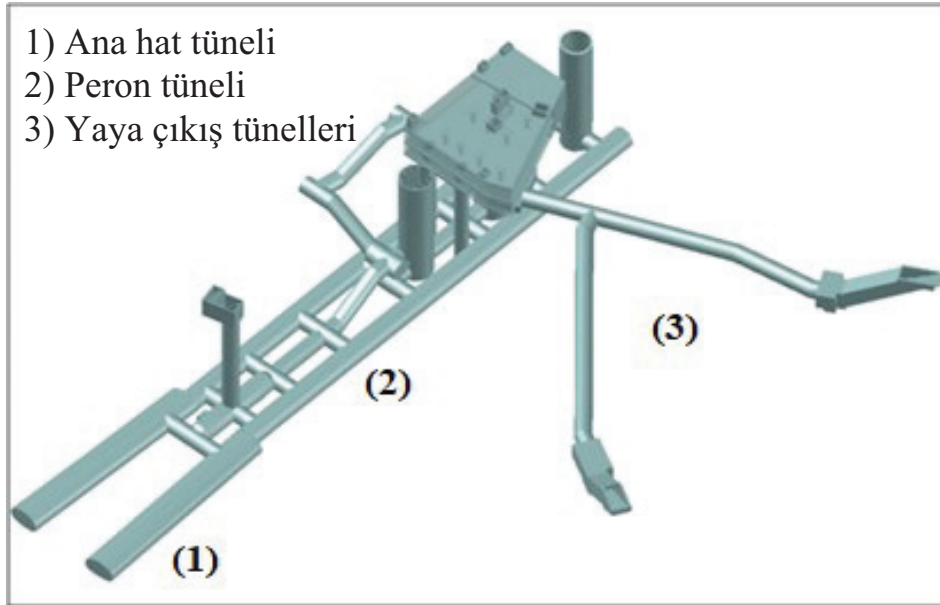
2 PROJE İNŞAAT YAPISI VE UYGULAMA VERİLERİ

Güzergâh üzerinde bulunan metro istasyonlarının 3 boyutlu şematik gösterimleri Şekil 3- 6'da verilmiştir.

Marmara Eğitim ve Araştırma Hastanesi bölgesinde yer alan "Fevzi Çakmak - Hastane İstasyonu" 180 metre uzunluğunda 2 adet peron tünelleri, 2 adet havalandırma shaftı, 2 adet asansör shaftı ve 2 adet tesisat shaftından oluşan NATM yöntemi ile yapılan istasyondur. Söz konusu istasyon yapısı içerisinde % 30 eğim ile yapılan 4 adet merdiven tüneli bulunmakta olup, yolcuların yeryüzüne çıkacağı 2 adet yaya bağlantı tünelleri bulunmaktadır.

İstasyon yapısının ray kotundan itibaren yeryüzüne olan derinliği yaklaşık 65 metre olup, 3 ara kat ve 8 adet peron bağlantı tüneline sahiptir.

İstasyon yapısının etkileşim alanında yeryüzü yapılarından çok katlı 7 adet konut, 3 adet hastane, 70 adet çeşitli nitelikte yapı, 1 adet ağır sanayi yapısı (Türk Ytong) bulunmaktadır. Etkileşim içerisinde bulunan yeraltı yapılarından ise, BOTAŞ doğalgaz boru hattı, İSKİ şehir şebekesi ana kolektör hattı, yüksek gerilim hattı, Kaynarca deresi bulunmaktadır.

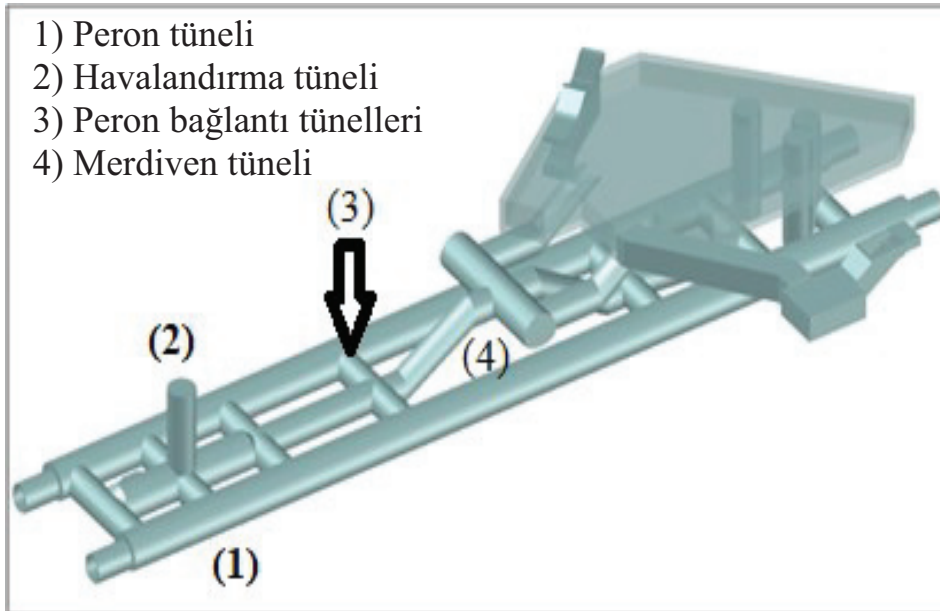


Şekil 3. Fevzi Çakmak-Hastane İstasyonu

Şeyhli bölgesinde yer alan “Yayalar istasyonu” 180 metre uzunluğunda 2 adet peron tünelleri, 2 adet havalandırma şaftı, 1 adet acil kaçış şaftı, 1 adet asansör şaftı ve 2 adet tesisat şaftından oluşan NATM yöntemi ile yapılan istasyondur. Söz konusu istasyon yapısı içerisinde %30 eğim ile yapılan 4 adet merdiven tüneli bulunmaktadır.

İstasyon yapısının ray kotundan itibaren yeryüzüne olan derinliği yaklaşık 33 metre olup, 1 ara kat ve 7 adet peron bağlantı tüneline oluşmaktadır.

İstasyon yapısının etkileşim alanında yeryüzü yapılarından çok katlı 10 adet konut, 50 adet çeşitli nitelikte yapı, 1 adet viyadük, 2 adet Üniversite eğitim binası, 1 adet orta dereceli eğitim binası, 10 adet çeşitli amaçlı orta dereceli sanayi yapısı bulunmaktadır. Etkileşim içerisinde bulunan yeraltı yapılarından ise, 1 adet kemikli dere bulunmaktadır.

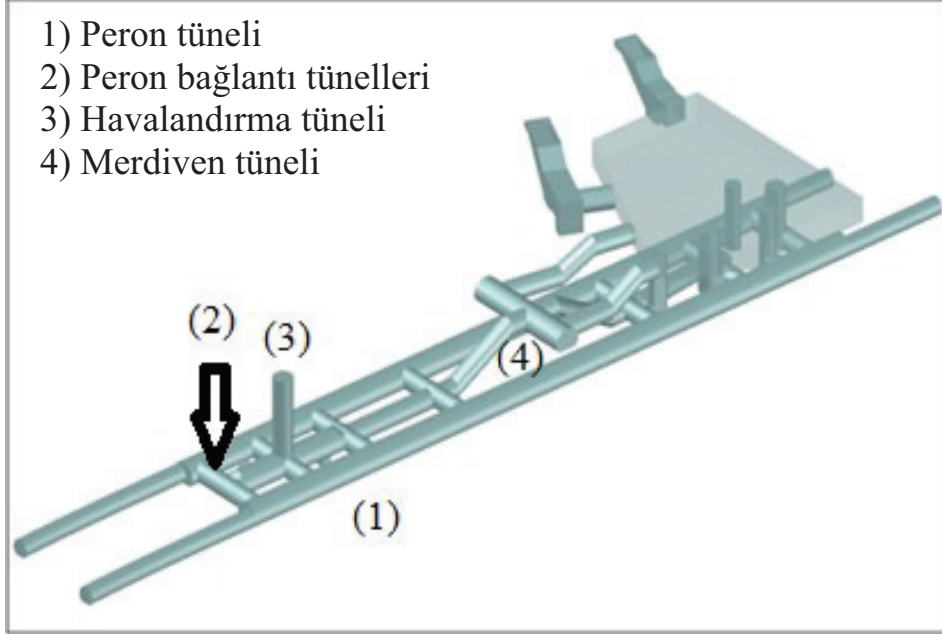


Şekil 4. Şeyhli-Yayalar İstasyonu

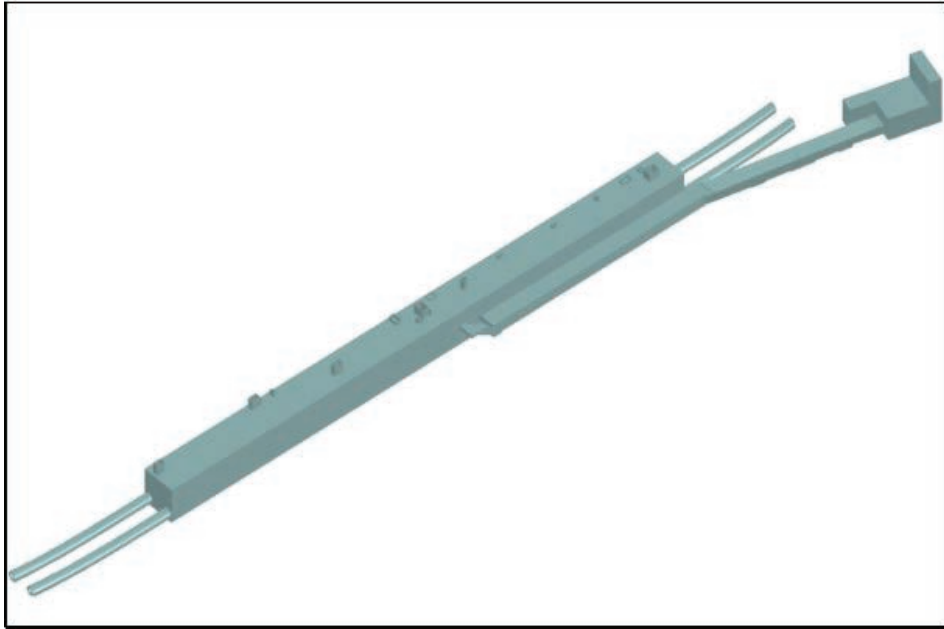
Kurtköy bölgesinde yer alan “Kurtköy istasyonu” 180 metre uzunluğunda 2 adet peron tünelleri, 2 adet havalandırma şaftı, 1 adet acil kaçış şaftı, 1 adet asansör şaftı ve 2 adet tesisat şaftından oluşan NATM yöntemi ile yapılan istasyondur. Söz konusu istasyon yapısı içerisinde % 30 eğim ile yapılan 4 adet merdiven tüneli bulunmaktadır.

İstasyon yapısının ray kotundan itibaren yeryüzüne olan derinliği yaklaşık 36 metre olup, 1 ara kat ve 7 adet peron bağlantı tüneline oluşmaktadır.

İstasyon yapısının etkileşim alanında yeryüzü yapılarından çok katlı 50 adet konut, 50 adet çeşitli nitelikte yapı, 1 adet Hastane binası, 4 adet ilk ve orta dereceli eğitim binası, 50 adet çeşitli amaçlı orta dereceli ticarethane, 30 adet küçük ölçekli sanayi tesisi, 2 adet emniyet güvenlik yapısı bulunmaktadır. Etkileşim içerisinde bulunan yeraltı yapılarından ise, 1 adet İGDAŞ doğalgaz ana iletim hattı, 3 ayrı dere yatağı bulunmaktadır.



Şekil 5. Kurtköy İstasyonu



Şekil 6. Sabiha Gökçen İstasyonu

Sabiha Gökçen Havalimanı bölgesinde yer alan “Sabiha Gökçen Havalimanı İstasyonu” yaklaşık 10.000 m²’lik bir alana sahiptir. 180 metre uzunluğunda istasyon yapısı, 200 metre uzunluğunda makas yapısı bulunmakta olup, 3 katlı Aç-Kapa yöntemi ile yapılan istasyondur. Söz konusu istasyon yapısında 3 adet çıkış yapısı bulunmaktadır. İstasyon yapısının ray kotundan itibaren yeryüzüne olan derinliği yaklaşık 24 metredir.

İstasyon yapısının etkileşim alanında yeryüzü yapılarından 100 adet çeşitli nitelikte konut yapısı, 30 adet çeşitli amaçlı orta dereceli ticarethane, 20 adet küçük ölçekli sanayi tesisi, 3 adet emniyet güvenlik yapısı, 2 adet ibadethane, 7 adet havaalanı işletme ve bakım tesisi, 3 adet yolcu terminal binası, 1 adet otel, 2 adet viyadük bulunmaktadır. Etkileşim içerisinde bulunan yeraltı yapılarından ise, 1 adet katlı otopark, 2 adet havalimanı tesisat galerisi, 1 adet su deposu, 1 adet arıtma tesisi, dere yatağı bulunmaktadır.

3 ROJE KAPSAMINDA KONTROLLÜ PARTLATMA İLKELERİ

İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı Raylı Sistem Bağlantısı Metro Hattı kazılarında “Risk Analizine Dayalı Patlatma Tasarımı” esaslı çalışma yapılmıştır.

NATM metodu ile yapılacak olan tünel kazısı çalışmalarının, projenin planlanan zamanda tamamlanması ve öngörülen maliyet keşfi içerisinde kalması için tünel kazısı çalışmalarında patlatmalı kazı uygulanması zaman ve maliyet yönetimi açısından önemli bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır.

Çevresel duyarlılıklar dikkate alındığında, patlatma kaynağından belirli bir uzaklıkta bulunan bir yerleşim biriminin ya da herhangi bir yapının, patlatma sonucunda oluşacak yersarsıntısı ve hava şoku gibi sonuçlardan etkilenmemesi için, patlatma tasarımında bir gecikme aralığında kullanılacak en fazla patlayıcı madde miktarını önceden belirlemek ve kontrollü atımlar gerçekleştirmek zorunludur.

Patlatmadan kaynaklı çevre problemlerinin bir çoğu yapısal hasarlar üzerine yoğunlaşmakta olup, tazminat ödemek gibi problemlerle de karşı karşıya kalınmaktadır. Bununla birlikte şehir içi patlatmalı kazılar, çalışma sahasının çevresinde yaşayan insanlarda ve canlılarda endişe, korku, panik ve kızgınlık gibi psikolojik etkiler de oluşturmaktadır. Bu psikolojik etkilerin oluşmasının başlıca sebepleri hava şoku ve yer sarsıntılarıdır. İnsanlar; patlatmalı kazı hakkında bilgilendirilmelerinden doğal olarak sarsıntıları depremle karıştırmakta ve binalarında hasar meydana getirdiğini sanarak korku ve paniğe kapılmaktadırlar. Bu nedenle uygulamacıların, yapısal hasar riskini önleyecek kontrollü patlatmalar gerçekleştirirken aynı zamanda uygun bir halkla ilişkiler program ve organizasyonu ile proje yönetimi sergilemeleri de zorunlu olmaktadır.

Patlatma kaynaklı çevresel sorunlar, patlayıcı madde enerjisinin tamamının parçalanma ve ötelenme işinde kullanılmadığını göstermektedir. Çevresel etkilerden arındırılmış ya da en aza indirilmiş bir patlatma tasarımı aynı zamanda patlayıcı enerjisinin de en verimli şekilde kullanılması anlamına gelecektir. Patlatma kaynaklı yer sarsıntıları, kısa süreli (geçici) ve düzensiz yer hareketleridir. Bu tür bir hareketi, “Durgun su yüzeyinde sabit duran bir mantarın veya kâğıttan bir kayığın, suya bir taş atılmasıyla iç içe oluşan konsantrik dalgalardan etkilenip devinik şekilde hareket etmesine” benzetmek mümkündür. Dalgalar sürüklenip, su durgunlaştıkça mantarın hareketi de yavaşlar ve durur. Zemindeki bir parçacığın (taneciğin) hareketi de mantarın hareketi gibi olup, zemindeki parçacığın hareket hızına “parçacık hızı” denir (Kahriman, 2014).

Frekans (f) ise, durgun sudaki mantarın 1 saniye sürede kaç kez yukarı aşağı salındığına benzer şekilde, zemindeki bir parçacığın 1 saniyede kaç kez sarsıldığını yani sarsılma sıklığını gösterir. Frekans devir/saniye veya Hertz (Hz) birimi ile ifade edilir. Yer sarsıntısının özellikleri ve niteliği, daha çok patlatma tasarımı, delik düzeni, bir seferde ateşlenen patlayıcı miktarı, ateşleme aralığı (gecikme süresi) yönünden önemli etmenlere sahiptir.

Başka bir söyleyişle bu etmenlere bağlı olarak oluşan parçacık hızı, önemli bir hasar göstergesidir. Ancak patlatma yerinden uzaklardaki, sarsıntının özellikleri ve niteliği daha çok yer sarsıntısı dalgasının ulaşabildiği kaya veya zemin (jeolojik) ortamının özelliklerinden etkilenir. Zemin katsayıları ve yer sarsıntısının frekansı da hasar oluşumunda veya oluşmamasında önemli ve tayin edici etmenlerdir. Yer sarsıntılarının frekans özellikleri başlıca iki unsurdan etkilenirler. Bunlar jeoloji (kaya türleri) ve ateşlemelerdeki gecikme aralığıdır.

Patlatmalı kazılarda titreşim kaynaklı yapı hasarlarını önlemek üzere, parçacık hızını, ölçekli mesafeye bağlı olarak tahmin etmeyi esas alan yaklaşımlar, yersarsıntısı ölçüm aletlerinin gelişmesi ve kullanılmaya başlanmasıyla ortaya atılmıştır. Literatürde ölçekli mesafenin belirlenmesinde en sık kullanılan formül Eşitlik 1’de verilmektedir.

$$SD = R / \sqrt{W} \quad (1)$$

Patlatmadan kaynaklanan yer sarsıntılarının önceden tahmin edilmesi, yer sarsıntılarının önlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Maksimum parçacık hızı tahminine yönelik geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan ampirik ilişki Eşitlik 2’de verilmiştir.

$$PPV = k (SD)^{-\beta} \quad (2)$$

Eşitliklerde verilen PPV maksimum parçacık hızı (mm/s), SD ölçekli mesafe, R atım noktası ile ölçüm istasyonu arasındaki mesafe (m), W gecikme başına kullanılan en fazla şarj miktarı (kg), k ve b değerleri ise bölgedeki patlatmalara göre elde edilen arazi katsayılarıdır. Patlatma paterni tasarımında kullanılmak üzere, bölgede daha önce yapılan patlatma verilerinden de yararlanılmıştır. Bu kapsamda daha önce Kartal-Kaynarca metro projesinde gerçekleşen atımlardan elde edilen verilerle birlikte, çalışma sahasında yapılan patlatmalardan elde edilen titreşim kayıtları değerlendirilmiştir (Kahrıman, 2014). Yoğunluklu meskun mahaldeki proje güzergahında kontrollü geçiş için bu veriler titreşim yayılım eşitliğinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Elde edilen titreşim yayılım denklemi Eşitlik 3’de verilmiştir.

$$PPV=28906 \times (SD)^{-2.735} \quad (r=0.78) \quad (3)$$

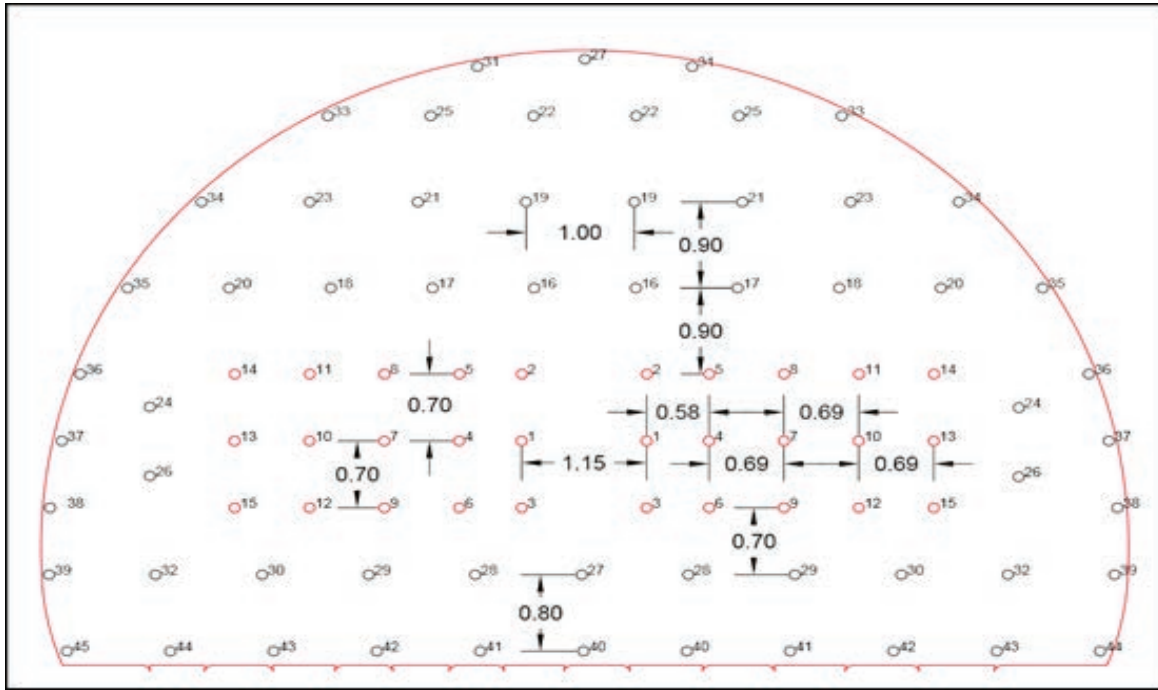
Elde edilen yaklaşım denklemi (Eşitlik 3) kullanılarak, mesafeye göre kullanılabilir patlayıcı miktarları ve kullanılan patlayıcı miktarlarına göre yaklaşılabilecek maksimum mesafeler belirlenmiştir. Proje süresince yürürlükte olan “T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliğine” göre betonarme yapılar için öngörülen parçacık hızı değeri eşik hasar limiti olan 19 mm/s’lik parçacık hızlarının altında tutulmuştur. Mesafenin fonksiyonu olarak gecikme başına kullanılan en fazla şarj miktarları aşağıdaki Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Mesafenin fonksiyonuna göre kullanılan maksimum şarj miktarı

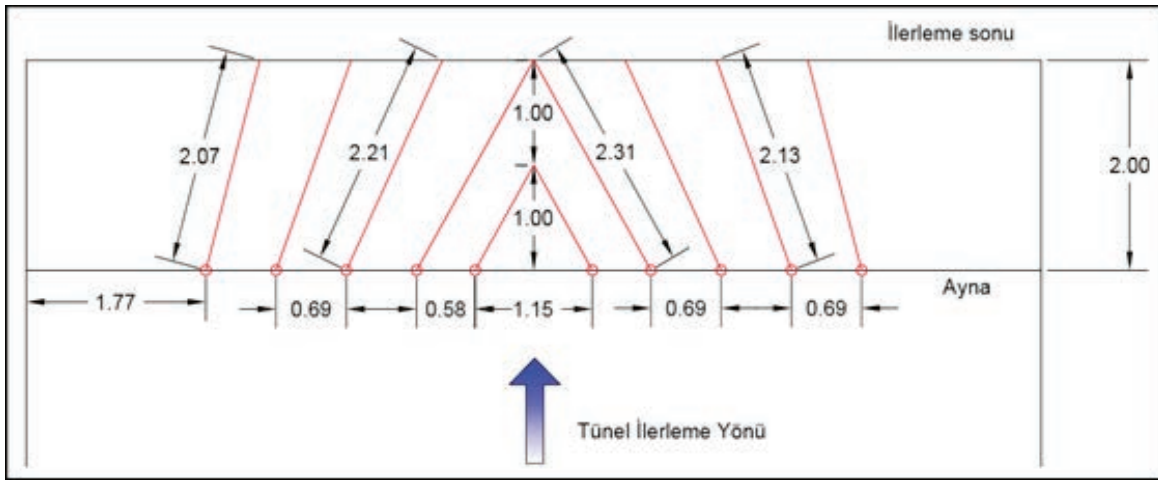
Mesafe (m)	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (mm/s)	Gecikme Başına Kullanılabilir Patlayıcı Madde Miktarı (kg) PPV=28906 x (SD) ^{-2,735}
20	19	1.9
25		3.0
30		4.2
35		5.5
40		7.5
50		9.5

Titreşim Yayılım çizelgesi (Çiz 1) incelendiğinde, risk unsuru yapılara 20 metre mesafe gecikme başına kullanılabilir maksimum patlayıcı miktarı 1.9 kg. iken, bu değer 25 ve 30 metre mesafelerde sırası ile 3 kg ve 4.2 kg olarak hesaplanmıştır.

Ölçekli mesafe fonksiyonuna göre hesaplanan parçacık hızı tahmini ile titreşim yayılımının meskûn mahallerde risk unsuru yapılara 25 ve 30 metre yaklaşılması durumunda yapılar üzerinde herhangi bir olumsuz sonuç doğurmayacak olan 54 m² kesit alanlı tünel patlatma tasarımları Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiştir. Deliklerin üzerinde belirtilen numaralar ateşleme sırasını belirtmektedir. Uzunluklar metre cinsinden verilmiştir (Bağdatlı, 2014).

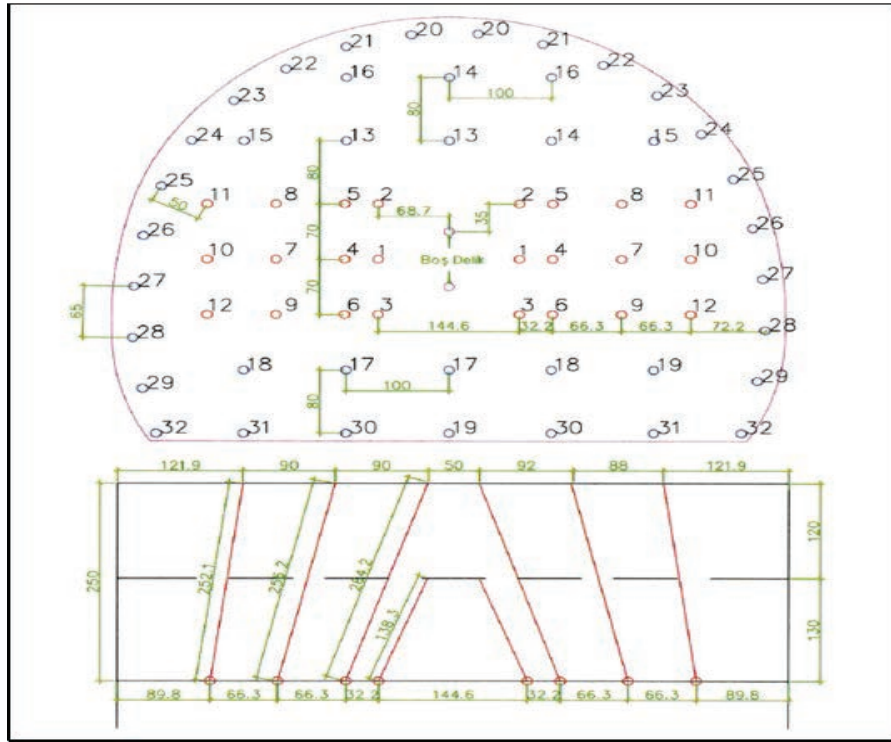


Şekil 7. İstasyon tünellerinde kullanılan örnek patlatma paterni meskûn mahalde 25-30 m. mesafede patlatma tasarımı



Şekil 8. Meskûn mahalde 25-30 m. mesafede patlatma tasarımı

Meskûn mahalde risk unsuru yapılara 25 -30 m arasında yaklaşılması durumunda tünel ilerleme adımının 2 m. Olması durumunda uygulanması önerilen patlatma tasarımı V-kesme delikleri görüntüsü planı Şekil 9’da verilmiştir. Anahat tünellerinde gerçekleştirilen tipik atımların fotoğrafları Şekil 10’da gösterilmiştir



Şekil 9. Anahat Tüneli Tip Patlatma Paterni



Şekil 10. Anahat tünelleri atım fotoğrafları (atım öncesi ve sonrası)

4 MALİYET MUKAYESESİ

Modern hayatın bir sonucu olarak şehir içlerinde büyük inşaat projelerinin yapılması elzem bir ihtiyaçtır. Bu ihtiyaç ulaştırma alanında daha hızlı ve güvenli taşıma yöntemlerinin geliştirilmesi ile paralel olarak kent içi tünel yapımı ile metro, kentler arası hızlı tren demiryolu inşaatı ile arazi eğimlerinin uygun olmayan kısımlarında tünel yapımı faaliyetlerini de hızlandırmıştır.

Çeşitli yöntemlerle yürütülen kazı çalışmaları eskiden tüm inşaat faaliyetinin %5 ile %7'sini kapsamaktayken günümüzde bu oran %12 ile %15 mertebesine kadar yükselmiştir. Projelerin nitelik, nicelik, kapasite, amaç ve işletmeye alma süreleri doğrultusunda belirlenen öncelikleri, öne çıkan proje kriterleri ve hassasiyetleri kazı çalışmalarını çoğu zaman kritik bir aktiviteye dönüştürmektedir. Bu durum patlayıcı mühendisliği uygulamalarını kaçınılmaz kılmaktadır. İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı Raylı Sistem Bağlantısı metro projesinde uygulanan kontrollü patlatmalı tünel kazısı maliyet analiz yapılarak, hidrolik kırıcı kazı ile karşılaştırılmıştır (Canbal, 2017). Maliyet analiz çalışmasında 1m³ kaya kazısının patlayıcı

mühendisliği uygulamaları ile yapılması için gerekli olan birim maliyet unsurları, uygulama yerinde yapılan ölçüm ve hesaplamalar doğrultusunda ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Söz konusu metro inşaatında yapılacak tünel tip kesitleri; A, B4, B6, P ve T tipi olarak değişik kesitlerdeki tünellerden oluşmaktadır. Ancak bu çalışma 28 m² kesit (Ana Hat) A tipi ulaştırma tüneli için yapılmıştır.

Ayrıntılı maliyet unsurları bazında yapılan maliyet analizi Çizelge 2’te verilmiştir.

Çizelge 2. A tipi ulaştırma tüneli patlatmalı kazısı çalışmalarındaki maliyet analizi

METRO NATM TÜNEL KAZISINDA PATLAYICI MADDE KULLANIMI ANALİZİ (m³)				
A - MALZEMELER	Birimi	Miktarı	Fiyatı \$	Tutarı \$
Dinamit (38X400 mm.) 545 gr.	kg/m ³	1.0000	\$1.27	\$1.27
Elektrikli Kapsül	adet/m ³	0.0266	\$0.53	\$0.01
Elektriksiz Kapsül	adet/m ³	0.8660	\$1.15	\$1.00
İnfilaklı Fital (5 gr.)	metre	0.4000	\$0.14	\$0.06
Ateşleme Kablosu	metre	1.3300	\$0.06	\$0.08
Jumbo Elektrik Tüketimi (125 kw/saat)	kw/m ³	1.6625	\$0.13	\$0.22
Hidrofor (Jumbo su beslemesi) (5 kw/h)	kw/m ³	0.0665	\$0.13	\$0.01
Havalandırma Fanı (55 KW) Enerji sarfiyatı (6,3\$/dak.) (10,6/90m ³)=0,12dak/m ³	kw/m ³	0.1200	\$6.30	\$0.76
Motorin Loder (25 lt/h)	lt/m ³	0.0650	\$1.20	\$0.08
Motorin Kırıcı (35 lt/h)	lt/m ³	0.3500	\$1.20	\$0.42
Yağ (195 lt/1000h)	lt/m ³	0.0025	\$35.20	\$0.09
Hava Filtresi	adet/m ³	0.0001	\$28.33	\$0.004
Matkap Ucu R32 Button Bit 45 mm. (900 m.)	adet/m ³	0.0010	\$50.00	\$0.05
Tij Demiri (R 32-38 Drifter Rod 4,3 m.)	adet/m ³	0.0001	\$225.00	\$0.02
A TOPLAM				\$4.06
B - EKİPMANLAR	Birimi	Miktarı	Fiyatı \$	Tutarı \$
Kaya Delici Jumbo (Atlas coppo boomer 282)	h/m ³	0.0380	\$6.940	\$0.264
Loder (Patlatma Sonrası Pasa Çekimi)	h/m ³	0.0330	\$4.620	\$0.152
Kırıcı Ekskavatör (Patlatma Sonrası Tarama)	h/m ³	0.0100	\$4.620	\$0.046
Havalandırma Fanı (55 KW) (100.000 saat ömürlü)	dak./ m ³	0.1200	\$0.007	\$0.001
B TOPLAM				\$0.463
C - İŞÇİLİKLER	Birimi	Miktarı	Fiyatı \$	Tutarı \$
Patlayıcı Mühendisi (Patern+Ruhsat+Uygulama+Ölçme+Raporlama)	h/m ³	0.1600	\$9.500	\$1.520
Formen	h/m ³	0.1200	\$6.500	\$0.780
Erbab İşçi	h/m ³	0.2500	\$4.500	\$1.125
Ateşçi Formeni	h/m ³	0.1200	\$6.000	\$0.720
Ateşçi Yardımcısı	h/m ³	0.1900	\$4.000	\$0.760
Jumbo Oparatörü (Patern Deliklerini hazırlama)	h/m ³	0.0133	\$5.500	\$0.073
Loder Oparatörü (Patern çalışması)	h/m ³	0.0026	\$4.500	\$0.012
Kırıcı Ekskavatör Oparatörü (Patlatma Sonrası Kavlak Taraması)	h/m ³	0.0026	\$4.500	\$0.012
Güvenlik Görevlisi	h/m ³	0.0100	\$2.000	\$0.020
İSG Uzmanı	h/m ³	0.0100	\$4.500	\$0.045
Elektrikçi Ustası	h/m ³	0.0026	\$4.500	\$0.012
C - TOPLAM				\$5.078
D - NAKLİYELER	Birimi	Miktarı	Fiyatı \$	Tutarı \$
Patlayıcı Madde Nakli	km/m ³	0.8000	\$0.11	\$0.09
D TOPLAM				\$0.09
ANALİZ TOPLAMI	\$/m³			\$9.69

*Hafriyat yükleme, taşıma ve tünel yapımı çalışmaları analize alınmamıştır.

Sabiha Gökçen Metro Projesi kapsamında toplam 15962 m tünel yapılmıştır. 9372 m tünel, kontrollü patlatma yöntemi ile açılarak yaklaşık 425.000 m³ kaya kazısı yapılmıştır. Proje genelinde 395ton patlayıcı madde tüketilmiştir. Kontrollü patlatma yöntemi ile yapılan tünel faaliyetleri, proje süresinin 1.5 yılını kapsamıştır. Hidrolik kaya kırıcı ile aynı sürede tamamlanabilmesi koşulu ancak 40 adet tünel aynasının tamamında mekanik kırım ile mümkün

olabilecekti. Analizde tariflenen poz kapsamında 300 HP güce sahip hidrolik kırıcı üzerinden karşılaştırma yapılmış ancak metro tünelleri boyutlarına (gabarisine) sığacak şekilde makinenin küçültülmesi gerekliliği düşünüldüğünde aynı sürede tamamlanabilmesi ancak 120 makine ve en az 120 tünel aynası koşullarında mümkün olabilecekti.

Çizelge 2’te verilen patlatma maliyetleri, 2016 yılı Çevre Şehircilik Bakanlığının 03.505/2Y Poz numaralı “Ekskavatör (paletli) (300 HP) (maksimum 3.5 m³ 1 saatlik ücreti” analizi ile karşılaştırıştır.

Buna göre, kaya kazısı için 300hp kapasiteli mekanik kırıcı 1 saatlik çalışma sonucu 3.5 m³kaya kazısı yapmaktadır. Makinenin 1 saatlik çalışma ücreti 2016 yılı birim fiyatları ile 187.41 TL (3.023TL/\$) = 62,00 \$ maliyet ile 3.5 m³ kaya kazısı yapılabileceği dolayısıyla (62.00\$/3.5 m³) = 17.70 \$/ m³ maliyet, sadece kaya kırma faaliyetinde oluşmaktadır (Canbal, 2018)

Kontrollü gerçekleşmek durumunda olan patlatmalı kazı birim maliyeti ise 9,7 \$/ m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre hidrolik kırıcı kazı maliyetinin patlatmalı kazı maliyetinden %50 daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Süresel etki analizinde ise (keza ÇŞB aynı poz numarası ile yapılan karşılaştırmada) hidrolik kırıcı kazı 1 saatlik kapasitesi 3.5 m³ iken patlatmalı kazıda 15 m³ olmaktadır. Yapılan analizde patlatmalı kazı çalışmaları için olması gereken tüm mühendislik hesaplamaları, güvenlik ve çevresel önlem maliyetleri de dikkate alınmıştır.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Yoğun yerleşim alanları, muhtelif hassas tesis ve donanımların bulunduğu proje güzergahında sağlam kaya yapıları nedeniyle patlatmalı kazı kaçınılmaz olmuştur. Söz konusu faaliyet, doğal olarak titreşim, hava şoku, ve kaya fırlaması gibi çevresel sorunların ulusal ve uluslararası norm ve kriterlere uygun sınırlamalar la kontrollü gerçekleştirilmesini gerektirmiştir.

Bu kısıtlılıklar altında gerçekleştirilen faaliyetin hidrolik kırıcı kazı ile yapılan mukayesesi sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki gibi olmuştur.

Yapılan analizler sonucunda; hidrolik kırıcı kazı maliyetinin, çevresel kısıtlar altında gerçekleştirilen kontrollü patlatmalı kazı yönteminden %50 daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Süresel etki analizinde ise ÇŞB ilgili poz numarası ile karşılaştıra yapılmıştır. Buna göre saatlik kazı kapasitesi 300 HP kapasiteli hidrolik kırıcıda 3.5 m³ iken kontrollü patlatmalı kazıda 15 m³ olarak belirlenmiştir.

Meskûn mahalde elde edilen bu değerler, ülke genelinde patlayıcı mühendisliği ilkeleri çerçevesinde yapılacak uygulamalarda çok daha ekonomik ve teknik açıdan verimli sonuçların çevre dostu yaklaşımlarla sağlanabileceğini göstermektedir. Bu nedenle tüm inşaat ve madencilik faaliyetlerimizin “Türkiye Makine Mezarlığı Olmasın” sloganı ile patlayıcı mühendisliği ilkeleri uygulanarak gerçekleştirilmesi yönünde teknik şartnameler, hukuki ve çevresel başta olmak üzere ilgili tüm mevzuatımız güncellenmelidir.

KAYNAKLAR

- Kahriman A., 2009. Patlayıcı Mühendisliği Derneği Dergisi Ocak 2009 sayısı.
 Kahriman A.,2014. İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı Raylı Sistem Bağlantısı Metro Projesinde Risk Analizine Dayalı Patlatma Ön Tasarım Raporu.
 Bağdatlı S., 2014. İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı Raylı Sistem Bağlantısı Metro Projesinde Risk Analizine Dayalı Patlatma Ön Tasarım Raporu,Tünel Patlatma Tasarımları ve Uygulamada Kullanılacak Patlayıcı Madde Miktarları İle Patlatma Deliklerinin Uzunlukları.
 Canbal m., 201. Patlayıcı Mühendisliğinde Kayıt ve Raporlamalar Birim Miktarları Süre ve Maliyet Analizleri, İdeal Kültür Yayıncılık, İstanbul, 144s.
 Canbal m., 2018. Patlayıcı Mühendisliği Uygulamalarında Kaya Delme Mekaniği Makine ve Ekipman Optimizasyonu Süresel ve Finansal Analizler, İdeal Kültür Yayıncılık,İstanbul,107 s.
 Yüksel Proje, 2016. Sabiha Gökçen Havalimanı Metro Projesi Jeolojik-Jeoteknik Rapor.

MINE DEVELOPMENTS AND MINING APPLICATIONS
MADENLERDE HAZIRLIKLAR VE MADENCİLİK UYGULAMALARI

Konik Keskilerdeki WC-Co Miktarının Galeri Açma Makinesi Performansına Etkisi

Effect of WC-Co Ratio of Conical Picks on the Roadheader Performance

M. Akkaş

Demir Export A.Ş., Soma, Manisa

O. Su

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, ZMYO, Madencilik ve Maden Çıkarma Böl., Kilimli, Zonguldak

ÖZET: Galeri açma makinaları özellikle yeraltı madenlerinde en çok ihtiyaç duyulan makinelerdendir. Bu makinelerden en iyi verimin veya performansın alınabilmesi için kesici kafasının jeolojik şartlara uygun tasarlanmalıdır. Diğer taraftan makine üzerinde monte edilen keskinin de aşınmaya karşı dirençli olması gerekir. Bu çerçevede keski yapısındaki WC ve Co oranları keskinin aşınma mekanizmalarını ve uç ömrünü etkiler. Dolayısıyla aşınmanın geç oluşması işletme maliyetlerini düşürür. Bu çalışmada farklı firmalardan satın alınan kalem ucu tipi keskinin WC ve Co yüzdeleri ile keski tüketim değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Ayrıca, keskinin aşınma şekillerine bağlı olarak bazı karşılaştırmalar ve istatistiki bilgiler sunulmuştur.

ABSTRACT: Roadheaders are one of the most needed machines, especially in underground mines. In order to get the best efficiency or performance from these machines, the cutterhead should be designed in accordance with the geological conditions. On the other hand, conical picks mounted on the machine should also be resistant to wear. In this context, WC and Co ratios in the pick structure affect the wear mechanisms and tool life. Long pick life reduces operating costs. In this study, the relationships between WC and Co ratio and consumption values of conical picks purchased from different companies were investigated. In addition, some comparisons and statistical information are presented depending on the wear patterns of the picks.

1 GİRİŞ

Aşınma, kazı esnasında keskinin kayaçlar tarafından koparılmasıdır. Yüksek aşındırıcılık özelliğine sahip kayaçlar, kısa zamanda keskinin körelmesine neden olabilmektedir. Bu durum, bir yandan keski tüketimini artırmakta, diğer yandan kazı verimini düşürmekte ve dolayısı ile kazı maliyetinin artmasına yol açmaktadır.

Tungsten karbür (WC), tungsten ve karbon atomu içeren kimyasal bir bileşiktir. Çelikten yaklaşık iki kat daha sert ve yoğunluğu iki kat daha yüksek olan tungsten karbür, sertlik, dayanım ve aşınma direnci özelliği nedeniyle kömür veya kayaç kazısında kullanılan çeşitli keski ve uçların üretiminde kullanılır. Kazıcı keskinin veya delici matkap uçların aşınması veya yenilme karakteristiklerinde olumlu etki yaratır. Bu nedenle kuvars gibi aşınmaya karşı direnç gösteren minerallerin kazısında yaygın olarak kullanılırlar. Keski içerisinde doğru oranlarda kullanılmadığında, keskinin ömrü, keski tüketimi ve dolayısı ile kullanıldıkları makinanın kazı performansını da etkilemektedirler.

Tungsten karbür taneleri kobalt (Co) gibi metalik bir bağlayıcı matrisiyle 1400°C sıvı fazda sinterleyerek ısıtıldığında keskinin malzeme özelliklerini, dolayısıyla performansının önemli

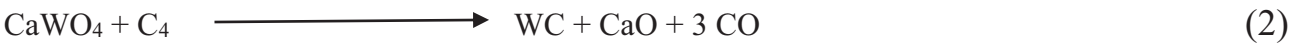
derecede etkiler. Bu nedenle kobalt miktarının sertlik üzerindeki etkisi de büyüktür. Belirli bir kobalt miktarında tanelerin çapı büyüdükçe uç sertliğini kaybeder. Kobalt miktarı arttıkça yenilme dayanımı da artar. Dolayısıyla konik keskinin kazı sırasındaki aşınmasında da önemli bir parametredir.

Çeşitli araştırmacılar madencilik ve maden çıkarma uygulamalarında kullanılan WC-Co elementlerinden imal edilmiş uçların laboratuvar veya arazi çalışmalarındaki etkisini incelemişler, aşınma ve erozyonda meydana gelen yenilme mekanizmaları hakkında araştırmalar yapmışlardır. Tkalich vd. (2012) bire-bir ölçekli delme deneyinde kullandığı uçlardaki hacimsel ağırlık kayıp ile CC dereceleri (20-250 µm aralığında) arasında dikkate değer sonuçlar sergilediğini görmüştür. En düşük hacim kayıpları, dar aralıktaki WC tane boyutu dağılımı ve saf kobalt bağlayıcıya sahip CC sınıfıyla donatılmış matkap ucunda elde edilmiştir. Normal WC tane boyutu dağılımına ve saf kobalt bağlayıcıya sahip CC kaliteleri için daha yüksek aşınma oranları gözlemlenirken, diğer Ni bazlı bağlayıcılar ile en yüksek aşınma oranları gözlemlenmişlerdir. Beste vd. (2008), kuvarsit, manyetit, kromit, manganez ve jips gibi farklı kaya türlerinde yerinde yapılan bir dizi delme çalışmalarında buton tipi uçların (WC tanecikleri boyutları 2-5 µm ve %5-10 Co) bozulma mekanizmaları incelenmiştir. Dewangan vd. (2015) kömür kazısında takılan konik keskinin farklı aşınma mekanizmalarına incelemiştir. Aşınmış yüzeyler FE-SEM (alan emisyon taramalı elektron mikroskobu) ve EDS (enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi) kullanılarak gözlemlenmiştir. Kömür/kaya karışımı, WC tanelerinin çatlaması ve ezilmesi ve kaya parçacıklarının yapışması gibi mekanizmalar göz önüne alınmıştır.

Bu çalışmada farklı konik keskinin WC-Co oranları incelenerek, belirli bir ilerleme miktarında galeri açma makinası performansı açısından değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca, keskinin aşınma türleri incelenmiş ve ekonomik bir kazı modelinin sağlanabilmesi açısından keski tüketim değerleri ve birim maliyetler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

2 TUNGSTEN KARBÜRÜN KAZIDAKİ ETKİSİ

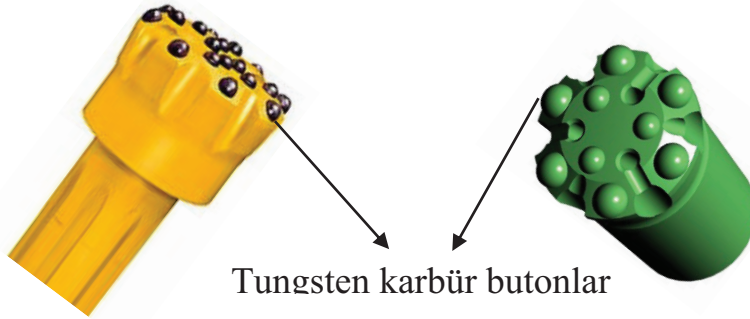
İlk olarak 1. Dünya Savaşında Almanya'da üretilen semente karbür, daha sonraları özel niteliklere sahip değişik malzemelerin tasarımında, başta endüstriyel olmak üzere birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Exner, 1979). Semente karbür; tungsten karbür tanelerini metalik bir bağlayıcıyla genellikle kobaltla sinterleyerek yapılan kompozit bir malzemedir. Eşitlik 1'e göre saf tungsten tozlarının karbon ile 1500 °C gibi yüksek bir sıcaklıkta vakum içinde karıştırılmasıyla tungsten karbür üretilmektedir. Ayrıca, Eşitlik 2-3'teki gibi selit, karbon monoksit veya metan gibi gazlarla tepkimeye girerek de üretilmektedir (Nahak vd., 2015)..



Madencilikte delici matkapların üzerindeki küresel ve balistik yapıdaki gömme butonları ile kazıcı makinaların keskinlerinde çok sık olarak kullanılmaktadır (Şekil 1-2). Bağlayıcı olarak katılan kobalt malzemenin korozyon direncini artırmak için genellikle nikel ile alaşımlanır ve sıvı faz sinterleme yöntemiyle imalat sürecinde her zaman tungsten ve karbon ile birleştirilir. Bu yapı içerisinde az miktarda titanyum, tantal, krom veya vanadyum karbür de eklenmektedir. TiC-ZrC sistemindeki faz ayrımı semente karbürdeki sertliği arttırmak için kullanılır. Uçlarda oluşan en önemli aşınma mekanizmaları, WC tanelerinin parçalanması, bağlayıcı faz ekstrüzyonu ve termal yorgunluktur.

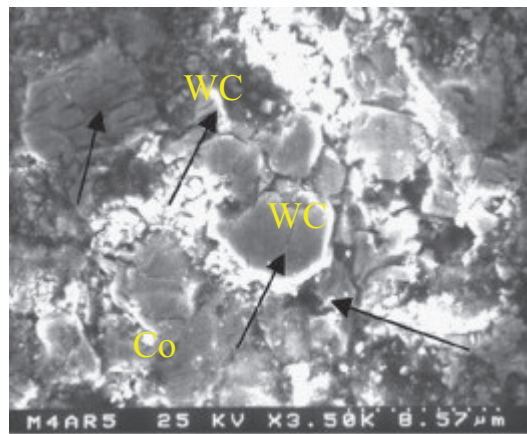


Şekil 1. Konik keskideki tungsten karbür uç



Şekil 2. Delici matkaplardaki tungsten karbür butonlar.

Madencilikte kullanılan WC-Co bazlı üretilen keski ve delici matkapların birçok arazi uygulamasında aşınmaya karşı dirençleri çok önemlidir. Çünkü makinanın gerçek performansını bu uçlar belirler. Bu nedenle, herhangi bir kazı veya delme işinde kullanılan kazıcı/delici ucun aşınma direnci başta WC ve Co olmak üzere diğer alaşımların oranlarının uygun şekilde optimizasyonuna bağlıdır. Şekil 3'te kobalt bağlayıcılı WC tanelerinin X ışınımı spektrometresi altındaki görüntüsü verilmiştir. Kazı sırasında uçlarda meydana gelen aşınma, WC taneciklerinin hasara uğraması, kırılması ve yüzeyden sökülmesi sonucu meydana gelir.



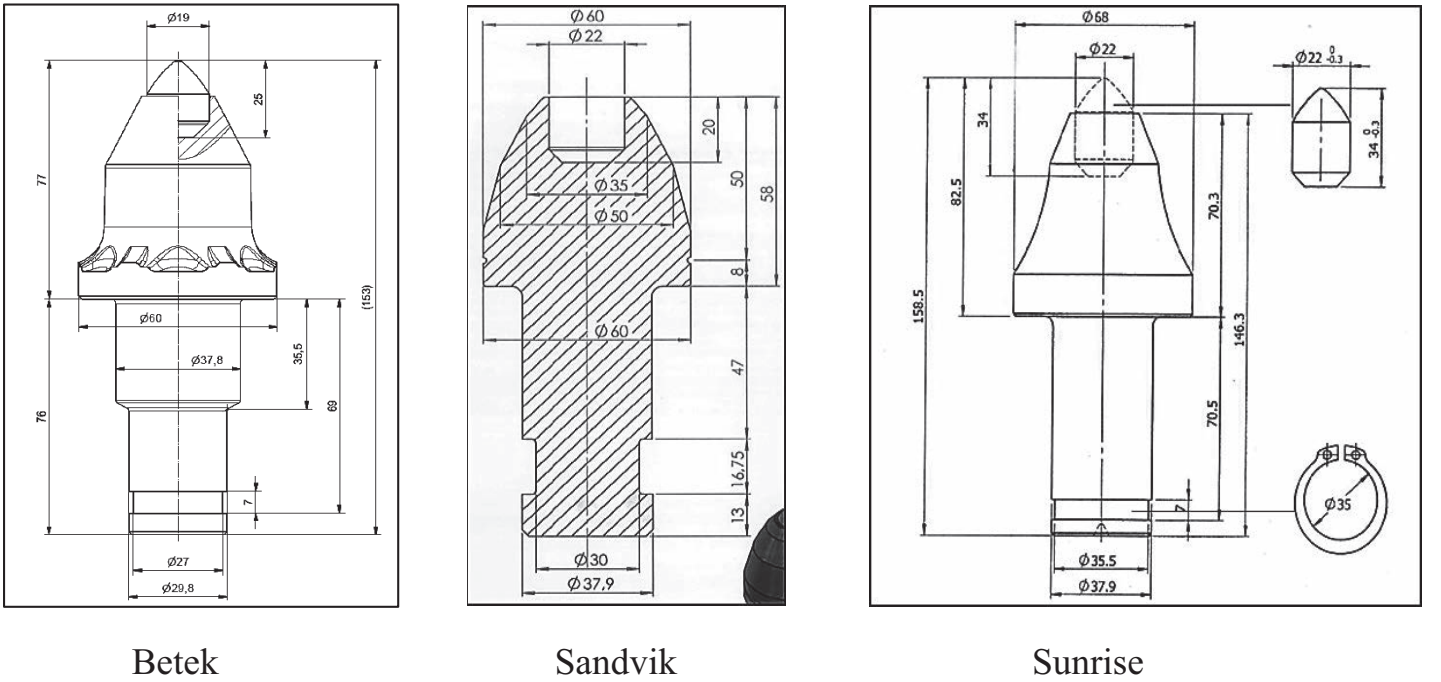
Şekil 3. Kobalt bağlayıcısı içerisindeki tungsten karbür taneleri (Gee vd., 2007).

3 LABORATUVAR VE ARAZİ ÇALIŞMALARI

Konik keskinler galeri açma makinalarında en yaygın kullanılan uçlardır. Keskinin kazı sırasındaki performansı ve uç ömrü, keskinin aşınma mekanizması ve dolayısıyla metalürjik içeriği ile yakından ilişkili olduğundan, bu çalışmada farklı derecelerde tungsten karbür ve kobalt miktarlarına sahip konik keskinlerin Amasra'da hazırlık çalışmalarını sürdüren özel bir maden ocağında kumtaşı, siltaşı formasyonlarındaki kesme performansları incelenmiştir. Keskinler DH R60T ve DH R75T galeri açma makinasının kesici kafalarına monte edilmiştir. DH R60T 60 ton ağırlığında ve 160 kW kesici kafa gücüne sahiptir. Travers (çift tamburlu) tip kesici kafası 0,85 m çapta ve kesici kafa üzerinde $2 \times 42 = 84$ adet konik keski vardır. 79 ton ağırlığındaki DH R75T'nin kesici kafası ise 200 kW kesme gücüne, $2 \times 55 = 110$ adet konik keskiye ve 1,14 m çapa sahiptir.

3.1 Kazıda Kullanılan Keskinler

Amasra bölgesinde kullanılan galeri açma makinelerinde çok farklı türlerde ve metal alaşımlarında keskinler denemiş ve kazı için en iyi performans sergileyen keski belirlenmiştir (Akkaş, 2019). Bu amaçla DH R60T ve DH R75T model galeri açma makinelerinde Betek, Sunrise, Sandvik, CST marka ve China Coal tarafından üretilmiş keskinler kullanılmıştır (Şekil 4).



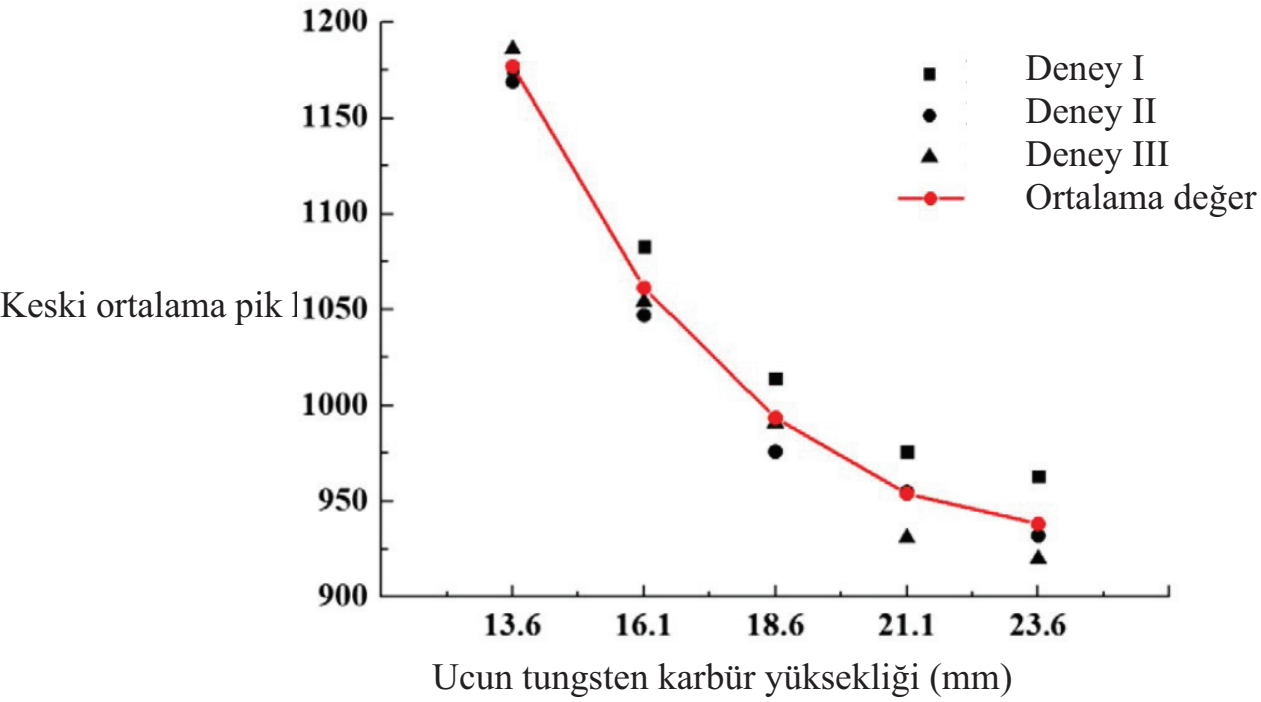
Şekil 4. Kullanılan keskinlerin geometrik şekilleri

DH R60T model kollu galeri açma makinesinde sağ ve sol kesici kafa tamburunda 3 helis ve 14 adet kesici uç tutucu olmakla birlikte sağ ve sol tamburda toplamda 84 adet kesici uç tutucu bulunmaktadır. Kesici uç tutucuların her biri özel açılarla ve doğrultularda yerleştirilerek kesici kafaya gaz altı kaynağı ile monte edilmiştir. Kesici uç tutucuları kafaya kaynak yapmak için kesici kafa şablonu kullanılmıştır. Montaj sırasında gösterilen bu hassasiyet makina performansını da etkilemektedir. Çünkü ufak bir tasarım hatası kesici uç tutucuların kırılmasına, kazının verimsiz olmasına, kesici uçların asimetrik aşınmasına ve tungsten karbür uçların kırılmasına neden olmaktadır. Keskinlerin bazı özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Keskinin tungsten karbür özellikleri.

Ozellik	R60T	R75T
Tungsten karbür yüksekliği	25	34
Tungsten karbür çapı	19	22
Keski (uç) açısı	80	85
Rockwell sertliği C	43±1.5	50±1.3
Keski gövdesi alaşımı	34MnCrB ₄ +Ti	34MnCrB ₄ +Ti
	42CrMo ₄	42CrMo ₄

Diğer taraftan uçtaki tasarım hatası aşınma kesme kuvvetleri ve tork gibi değerleri de etkilenmektedir. Liu vd. (2017) keski gövdesi içindeki karbür kısmının yüksekliğinin fazla olmasının önemini Şekil 5'te göstermiştir. Bu şekilde yükseklik 13,6 ile 18,6 mm'ye doğru arttıkça keski üzerinde rol oynayan yükler hızlı şekilde düşmektedir. Bu düşüş 18,6 mm'den sonra ise yavaşlamakta ve 23,6 mm'den sonra stabil hale gelmektedir. Bu nedenle galeri açma makinelerinde kullandığımız keskinde tungsten karbür kısmının minimum yüksekliği 25 mm olanlar tercih edilmiştir.



Şekil 5. Tungsten karbür ucun yüksekliği ile keski tork değerleri arasındaki ilişki (Liu vd., 2017).

Galeri açma makinesinde kullanılan kesici uçların içerdiği element ve bileşikler portatif XRF elementel cihazı kullanılarak analizleri yapılmış ve başta tungsten karbür ve kobalt ile demir vb. metal elementlerinin oranları kayıt altına alınmıştır (Çizelge 2). Buna göre kullanılan keskinde tungsten karbür oranlarının %77,24 ile % 85,50, kobalt oranlarının ise % 4,11 ile %11,31 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Çizelge 2. Kesici uçların metalürjik özellikleri ve yüzde değerleri (Akkaş, 2019).

Element	Betek (R75T)	Betek (R60T)	Sandvik (R75T)	Sunrise (R75T)	CST (R75T)	China Coal (R60T)
Co	9,38	8,25	4,11	7,3	11,31	5,52
Cu	0,09	0,35	0,13	0,11	0,61	1,51
Fe	2,03	9,96	11,07	7,33	10,15	3,65
Hf	0,27	0,28	-	0,23	-	0,14
Hg	0,37	0,29	0,34	0,35	0,26	0,32
Mg	0	-	-	-	-	-
Ni	0,34	0,43	0,25	0,39	0,13	0,55
Pt	0,06	0,08	-	0,11	-	-
S	-	-	-	0,4	-	-
Si	-	-	0,59	0,15	-	1,37
WC	87,20	80,18	83,51	83,57	77,24	85,5
Zn	-	-	-	0,06	0,31	0,57
Cd	-	-	-	-	-	-
Cr	0,27	-	-	-	-	-
Mn	-	0,18	-	-	-	-
Al	-	-	-	-	-	0,88
TOPLAM	100	100	100	100	100	100

3.2 Keski Aşınma Türleri ve İlerlemeler

Amasra bölgesinde galeri içerisinde çeşitli metrajlardan alınan kayaç örneklerinin petrografik analizleri yapılarak kuvars ve feldspatlı (aşındırıcı) mineral içerikleri belirlenmiştir. Özellikle ince taneli kumtaşı numunelerinin eşdeğer kuvars yüzdesinin % 69, siltaşının ise % 63 olduğu tespit edilmiştir (Su ve Akkaş, 2020).

Ana hazırlık galerilerinin açılmasında kullanılan keskinin ilerlemelere bağlı olarak tüketim miktarları kayıt altına alınmış ve buna göre keski sarfiyatı hesaplanmıştır. Keskinin simetrik veya asimetrik aşınma türleri incelenmiştir. Bu sonuçlara göre en uygun maliyetli ve kaliteli uç seçilmiştir.

Çizelge 3. Konik keski türleriyle yapılan ilerlemeler, keski tüketimleri (Akkaş, 2019).

Keski türü	İlerleme (m)	Keski tüketimi (adet/m ³)	WC	Co
Betek (R60T)	502	0,117	80,18	8,25
Betek (R75T)	361	0,112	87,20	9,38
Sandvik (R75T)	506	0,445	83,51	4,11
Sunrise (R75T)	679	0,084	83,57	7,30
CST (R75T)	245	0,080	77,24	11,31
China Coal (R60T)	24,5	0,190	85,50	5,52

Keskinin aşınma türlerinde tercih edilen şekil simetrik aşınmadır. Simetrik aşınma kesici ucun uç yuvasında düzgün bir şekilde döndüğünün göstergesidir. Asimetrik aşınma ise keskinin uç yuvasında dönmediğinin ve sabit bir yerde kalarak kazı yaptığını göstermektedir. Bu gibi durumlarda kesici uç tutucularında kırılmalar ve çatlamlar meydana gelmektedir. Kesici uç

tutucu kırılmaları sonucunda kesici uç tutucuların dizilimi karmaşık bir yapıya sahip olduğundan kesici uç tutucu kaynağının doğru pozisyonda ve açıda kesici kafaya kaynak yapılması önemli bir faktördür. Şekil 6'da görüldüğü üzere iki keski türünde aşınmış kesici uçlar kontrol edilirken asimetrik aşınanlar bir tarafa, simetrik aşınanlar başka bir tarafa ve tungsten karbür ucu kopan keski ise ayrı bir tarafa dizilmiştir.



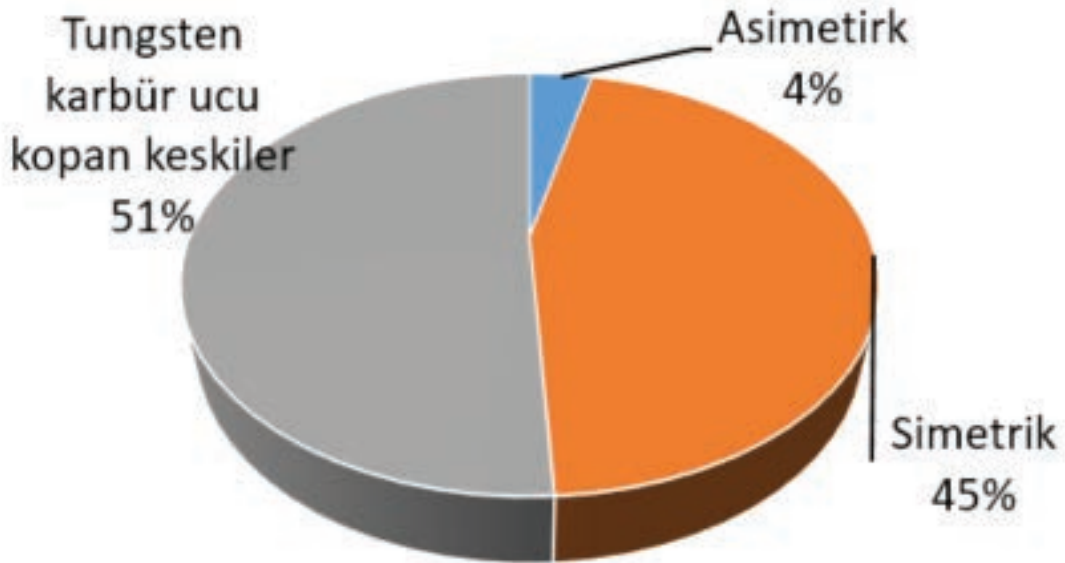
Betek keski (Aşınanlar)



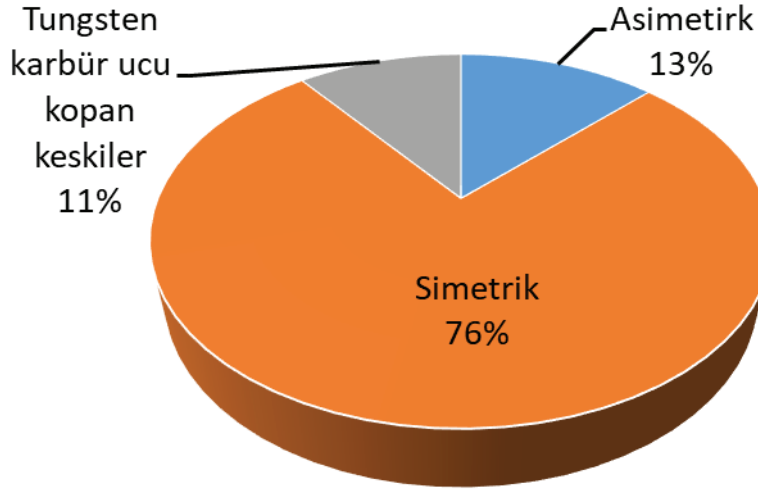
Sunrise keski (Aşınmayanlar)

Şekil 6. Keski türünde meydana gelen aşınmalar.

Üç farklı aşınma türüne göre tüm keski ayrıldıktan sonra sayılmış ve yüzde olarak oranlanmıştır. Buna göre Şekil 7-8'de DH R60T kollu galeri açma makinesinin kesici uçlarından en çok kullanılan Sunrise ve Betek konik keski türlerine göre karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 7. Sunrise keski türündeki aşınma şekilleri.



Şekil 8. Betek keskilerdeki aşınma şekilleri.

Şekil 7'ye göre Sunrise uçlarda tungsten karpit kopmalarının fazla olduğu görülmektedir. Yapılan incelemeler sonucu bunun en önemli nedeninin üretimden kaynaklandığı, tungsten karpit uç kısmının gövde kısmına kaynağının düzgün yapılmadığı ve doğru yerleştirilmediği fark edilmiştir. Sunrise keskilerle 679 m ilerleme yapılmasına rağmen, keski tüketimi 0,084 adet/m³ gibi oldukça düşük bir seviyede kalmıştır. Bu bağlamda tasarım ve üretimi çok başarılı olmasa da keskinin iyi bir kazı performansı sergilediği söylenebilir.

Betek uçlarda ise simetrik aşınma yüzdesi çok yüksektir (%76). Dolayısıyla optimum aşınma şekli bu keskiye sağlanmıştır. Toplam 862 m ilerlemede ortalama 0,115 adet/m³ keski tüketimi ekonomik bir kazı yapıldığının (< 0,2 adet/m³) göstergesidir.

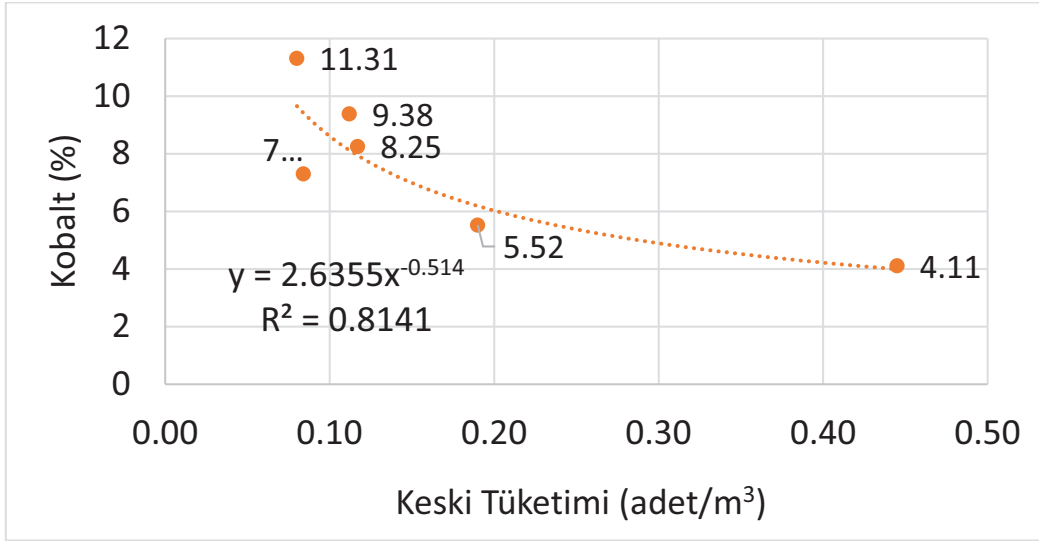
Sunrise ve Betek maliyet açısından karşılaştırıldığında ise Betek uçlarının birim maliyetleri Sunrise uçlara göre pahalıdır. Yapılan çalışmalar Betek'in aşınma ömrünün Sunrise kesici uçlara göre daha kısa olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, Sunrise keskilerin birim maliyetlerinin düşük olmasına rağmen tungsten karbür uç kısımlarının fazla kırılması ekonomik işletme maliyetlerini arttırmaktadır. Bu nedenle simetrik aşınmada daha etkili ve performansı daha iyi olan, ancak keski tüketimi daha yüksek olan Betek keskilerin daha ekonomik kazı yapılmasına olanak sağladığı ortaya çıkmıştır. Kazı işleminin yumuşak kayalarda Sunrise model keski ve sert kayalarda ise Betek kullanılması kazı maliyeti ve keski kafa performansını olumlu etkileyecektir.

4 METALURJİK ÖZELLİKLERE BAĞLI MAKİNA PERFORMANSI

Kullanılan keskilerden Betek, Sandvik ve Sunrise siltaşı ve kumtaşı kayaç birimleri içerisinde kazı yapmıştır. CST keski sadece siltaşı, China Coal ise konglomera ve siltaşı kayaç birimleri içerisinde kazı yapmıştır. Ancak Sandvik keski ağırlıklı olarak kumtaşı formasyonunda kullanılmıştır. Bu bağlamda CST model keski haricinde çoğu keski aynı kayaç birimleri içerisinde deneme imkanı bulunmuştur. Her ne kadar farklı firmalara ait keski benzer özelliklerdeki birimlerde kullanılmış olsa da, bazı keski türleriyle kritik keski tüketim değerlerine ulaşılmıştır.

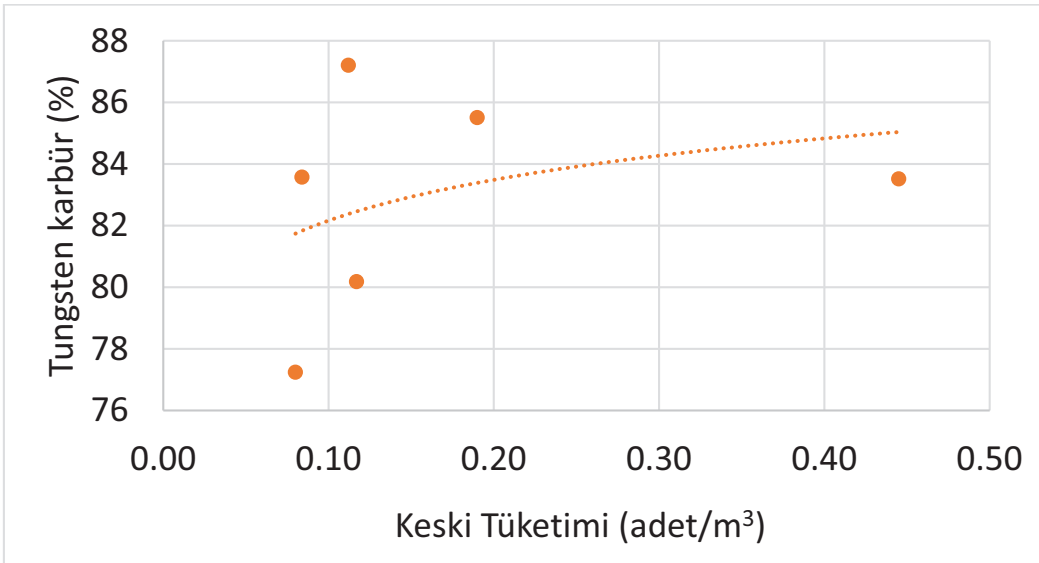
Keski tüketimi makine performansı hakkında bilgi veren önemli bir parametredir. Bu nedenle kalem ucu tipi keskilerin tungsten karbür ve kobalt oranları ile keski tüketimleri arasında kömür yan kayaçları için istatistiksel bir analiz yapılmıştır (Şekil 9-10). Burada kobalt yüzdesi ve keski tüketimi arasında R= 0,91 oranında üstel azalan bir ilişki elde edilmiştir.



Şekil 9. Kobalt yüzdesi ve keski tüketimi arasındaki ilişki.

Bu korelasyondan arazideki keski tüketimleri tespit edilerek kömür yan kayaçları için kobalt yüzdesi tahmin edilebilmektedir. Kobalt yüzdesi ve keski tüketimi arasındaki ilişkilerin güvenilirliğini arttırabilmek için daha farklı markalar üzerinde, değişik formasyon yapılarında daha çok denemeler yapılması anlamlı olacaktır.

Diğer taraftan Şekil 10'da tungsten karbür içeriğinin keski tüketimi ile olan ilişkisi verilmiştir. Buna göre tungsten karbürün makine performansı açısından anlamlı bir korelasyona sahip olmadığı görülmüştür. Bu ilişkide kobalt yüzdesi azaldıkça keski tüketiminde artış gözlemlenmektedir.



Şekil 10. Tungsten karbür yüzdesi ve keski tüketimi arasındaki ilişki.

Şekil 9 ve Şekil 10'daki ilişkiler arasında kıyaslama yapıldığında, kobalt yüzdesinin keski tüketimi üzerinde tungsten karbürden daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.

5 SONUÇLAR

Metalürjik özellikleri belirlenen konik keski DH R60T ve DH R75T galeri açma makinalarının traverse tip kesici kafalarına farklı zamanlarda monte edilerek yeraltında galeriler sürülmüştür. Keski kollarının aşındırıcı kısımları kobalt (Co) bakımından zengin bir bağlayıcı içerisine gömülmüş tungsten karbür (WC) tanelerinden oluşmaktadır. Kömür çevre

kayaçlarında tungsten karbür çapı 19 mm ve uzunluğu ise en az 25 mm olan kesici uçların kullanılması önemlidir. Bu boyutlardaki keskilerle taban yollarında yumuşak kaya içerisinde ilerleme yapılabilir. Ana galerilerde sert kayaçlar içerisinde ise 22 mm tungsten karbür çapı olan ve 34 mm uzunluğundaki keskilerin tercih edilmesi makine performansına önemli bir katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada basit bir elemental analiz cihazı ile uçların metalürjik özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda makine performansı açısından önemli bir parametre olan keski tüketimi ile tungsten karbür ve kobalt yüzdeleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bunun sonucunda keski tüketimi ile tungsten karbür arasında anlamlı ilişkiler bulunamazken, WC tanelerini bir arada tutan kobalt ile güçlü bir korelasyon olduğu görülmüştür.

Tungsten karbürü uçta aşınmaya sebep olan en önemli neden WC'nin tanecik boyutlarıdır ki bu da keski ucunun sertliğini ve dayanımını etkiler. Dolayısıyla bu çalışmada ki anlamlı bir korelasyon elde edilememesinin temel nedeni muhtemelen tüm keskilerin metalürjik yapısı içerisindeki WC taneciklerinin boyut farklılığındandır.

Keskilerin aşınma türleri ve ilerleme metrajları açısından bakıldığında optimum performans Betek keskilerde sağlanmıştır. Bu keskilerdeki kobalt oranının %8-9 olması tek başına yüksek korelasyona sahip bir ilişki sergilemiş gibi görünse de gerçek makine performans değerlendirmesi için en uygun WC-Co karışımının elde edilebilmesi ve optimum tanecik boyutunun tespit edilmesi daha doğru sonuçlar verecektir. Aynı zamanda sement karbürün çatlak tokluğu, Young modülü ve bağlayıcı kobaltın özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi anlamlı olacaktır.

Tüm bu parametreler en uygun şekilde optimize edildiğinde keski üzerindeki aşınma türü de kontrol edilebilecek ve makine performansı artacaktır. Bu nedenle kayaç içerisindeki aşındırıcı mineral oranının yanı sıra ve ucun aşınma direncinin WC ve Co değerlerinin de önceden bilinmesi kazı makinası performansının önceden tahmin edilmesinde farklı bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akkaş, M. (2019) Amasra Bölgesinde Kullanılan Orta Ağırlıktaki Galeri Açma Makinalarının Performans ve Uç Tüketimlerinin Değerlendirilmesi, Zonguldak Bulent Ecevit Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 227 s.
- Beste, U., Jacobson, S. and Hogmark, S. (2008) Rock penetration into cemented carbide drill buttons during rock drilling, *Wear*, Vol: 264, No:11–12, pp. 1142-1151.
- Dewangan, S., Chattopadhyaya, S. And Hloch, S. (2015) Critical damage analysis of WC-Co tip of conical pick due to coal excavation in mines, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol:2015, No:296, 7p.
- Exner, H.E. (1979) Physical and chemical nature of cemented carbides, *Int Met Rev*, Vol:4, pp. 149–173.
- Gee, M.G., Gant, A. ve Roebuck, B (2007) Wear mechanisms in abrasion and erosion of WC/Co and related hardmetals, *Wear*, Vol:263, No: 1–6, pp. 137-148.
- Liu S., Ji, H., Liu, X and Jiang, H. (2017) Experimental research on wear of conical pick interacting with coal-rock, *Engineering Failure Analysis*, Vol:74, pp. 172-187.
- Nahak, S., Dewangan, S. and Chattopadhyaya, S. (2015) Discussion on Wear Phenomenain Cemented Carbide, *Procedia Earth and Planetary Science*, Vol: 11, pp. 284-293.
- Su, O and Akkaş, M. (2020) Assessment of pick wear based on the field performance of two transverse type roadheaders: a case study from Amasra coalfield, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol: 79, No: 5, pp. 2499-2512.
- Tkalich, D., Kane, A., Saai, A., Yastrebov, V.A., Hokka, M., Kuokkala, V., Bengtsson, M., From, A., Oelgardt, C. And Li, C.C. (2017) Wear of cemented tungsten carbide percussive drill-bit inserts: Laboratory and field study, *Wear*, Vol:386–387, pp. 106-117.

Kalın Bir Kömür Damarında Açılan Uzunayak Tabanyolu için İki Farklı Tahkimat Tipinin Pilot Uygulama Sonuçları ile Karşılaştırılması

Comparison of Two Different Support Types by Pilot Application Results for Longwall Gateroad in a Thick Coal Seam

İ. Özkan, M. Mesutoğlu

Konya Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya

A. Sancak

TKİ-GLİ-Ömerler Yeraltı İşletmesi Hazırlık Baş Mühendisi, Kütahya

E. İpek

TKİ-GLİ İşletme Müdürü, Kütahya

ÖZET: Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) – Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ) Ömerler yeraltı maden ocağında hazırlanan A6 uzunayak panosu malzeme galerisi (tabanyolu) içerisinde kullanılan demir bağ tahkimatına alternatif kaya saplamalarının uygulanabilirliğinin araştırılması için bir pilot çalışma gerçekleştirilmiştir. At nalı kesitinde açılan yaklaşık 500 m uzunluğundaki A6 uzunayak panosu malzeme galerisinin orta kısmında kalan iki bölgenin bir tanesinde tahkimat sistemi olarak reçine dolgulu kablolu kaya saplamaları, diğer komşu bölgede ise demir bağlar kullanılmıştır. Hazırlanan pilot uygulama bölgeleri içerisinde planlanan beş kesitte sırası ile konverjans (KO), taban kabarması (TK) ve hidrolik yük ölçüm (HYÖ) istasyonları kurulmuştur. A6 panosu malzeme galerisinde demir bağ ve reçine dolgulu kablolu kaya saplamalarına ait ölçüm sonuçları üzerinde ayrıntılı değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuç olarak, reçine dolgulu kablolu kaya saplamalarının (KBL) demir bağ (DMRB) tahkimat sistemine göre tavan kömür tabakalarının yarattığı deformasyonları yaklaşık %50 oranında azalttığı ve uzunayak madenciliğinden oluşan dinamik etkilere karşı tabanyolunu daha güvenli hale getirdiği belirlenmiştir.

ABSTRACT: A pilot study was conducted to investigate the applicability of alternative rock bolts to the steel arches used for longwall panel gateroads in the Turkish Coal Enterprises (TKİ)-Garp Lignites Enterprise (GLİ) Ömerler underground coal mine. Resin-cable rock bolt (KBL) and steel arch (DMRB) support systems in adjacent two areas selected in the middle of the A6 longwall panel gateroad, which has horseshoe cross-section, were used. Convergence (KO), ground heave (TK) and hydraulic load measurement (HÖ) stations were established in the five sections selected in each pilot application regions, respectively. The monitoring results from installed stations were detail evaluated. Compared each two support system used in pilot application region, it has been determined that the deformations formed in gateroad coal-roof strata reduced approximately 50% by KBL. As a results, it was seen that the gateroad stability subjected to the dynamic effects due to longwall mining make safer by rock bolt.

1 GİRİŞ

Yerüstü ve yeraltı kaya mühendislik yapılarında tasarım çalışmaları, kazı sırasında yapılan gözlem ve izleme çalışmaları, geriye dönük analizler ile duraylılık çalışmaları yürütülmektedir. Maden galerileri ve tüneller gibi yeraltı kazılarının duraylılık analizlerinde günümüzde sıklıkla başvurulan tahkimat tasarım yaklaşımları, görgül (ampirik) ve sayısal tasarım yaklaşımlarıdır.

Gözlem, ölçüm, tecrübe, mühendislik sezgi ve yargıları sonucu elde edilen bulguların birleştirilmesiyle görgül tasarım yaklaşımları geliştirilmiştir. Literatürde kaya kütle sınıflama sistemi olarak tanımlanan ve yaygın bir şekilde proje çalışmalarında kullanılan görgül yaklaşımlar, yeraltı açıklıklarının duraylılığı için gerekli olan tahkimat gereksinimlerini öngörebilmektedir. Kaya saplama boyu ve aralığı, demir bağ boyutları ve aralıkları, püskürtme beton kalınlığı gibi tahkimat boyutlarını verebilmektedirler. Kaya saplama tahkimat tasarım çalışmalarını dikkate alan 11 farklı görgül yaklaşım bulunmaktadır. Bu görgül yaklaşımların altı adeti RMR kaya kütle sınıflama sistemine (Bieniawski, 1973; Ünal, 1983, 1986, 1989); Vanketaswarlu, 1986; Lowson ve Bieniawski, 2013), iki adeti Q kaya kütle sınıflama sistemine (Barton vd., 1974; Grimstad ve Barton, 1995), iki adeti RQD sistemine (Deere vd., 1970; Merritt, 1972) dayalı olduğu görülmektedir. Ayrıca Panek (1964) ve süreksizlik takım sayısı ile süreksizlik eğimine bağlı tasarım yaklaşımları mevcuttur. Bu yaklaşımlar, Özkan (2010), Özkan vd. (2022a), Özkan vd. (2022b) ve Mesutoğlu (2019) tarafından topluca verilmiştir.

Yeraltı ve yerüstü kaya mühendislik kazılarında açıklık etrafındaki gerilme ve deformasyon davranışları, matematiksel temel ve kabullere bağlı geliştirilen sayısal tasarım yaklaşımları ile de incelenmektedir. İki ve üç boyutlu sayısal analiz yapabilen programlar geliştirilmiş olup günümüzde birçok önemli proje çalışmasında kullanılmaktadır. Ancak hazırlanan iki ve üç boyutlu katı modeller üzerinde sayısal çözümlerinin yapılabilmesi için modele kaya malzeme ve kütle parametreleri yanında tahkimat girdi parametrelerinin de (kaya saplama boyu, aralığı, püskürtme beton kalınlığı vb) başlangıçta tanımlanması gerekmektedir. Bilinmeyen optimum tahkimat parametrelerinin belirlenmesi için yüzlerce kez sayısal çözümlerinin yapılması zorunluluğu ciddi bir problem olarak görülmektedir. Bunun yanında her zaman ölçülmesi mümkün olmayan arazi gerilmeleri ve yer değiştirme miktarlarının sunulması ile özellikle karmaşık problemlerde elde edilen analiz sonuçlarının yorumlanması sayısal yaklaşımın daha dikkatli kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

En uygun tahkimat tasarımının belirlenmesinde, öncelikle görgül yaklaşımlar yardımıyla kaya saplama boyu ve aralığı, püskürtme beton kalınlığı, demir bağ boyutlarının belirlenmesi daha sonra bu ön tasarım sonuçlarını içeren tahkimat boyutlarının iki ve üç boyutlu sayısal analizler ile test edilmesi daha hızlı ve güvenilir sonuçlara ulaşmayı sağlamaktadır.

TKİ-GLİ-Ömerler A6 uzunayak panosunda TÜBİTAK projesi kapsamında kaya saplamalarına yönelik bir pilot uygulama için öncelikle kömür ve çevre kayaçların malzeme ve kütle özellikleri, laboratuvar ve sahada yapılan deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir. Ön tasarım çalışmaları kapsamında görgül yaklaşımlar ile kaya saplama tahkimat tasarım sonuçları elde edilmiştir. Daha sonra genelleştirilen kaya saplama boyutları (saplama boyu ve aralığı gibi) dikkate alınarak iki ve üç boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu bildiride, reçine dolgulu kablolu kaya saplama (KBL) için gerçekleştirilen görgül tasarım çalışmaları, üç boyutlu sayısal çözümler sonuçları, pilot uygulama çalışmaları, ölçüm sonuçları ile demir bağ (DMRB) tahkimat sistemine ait üç boyutlu sayısal analiz sonuçları, pilot uygulama bölgesindeki ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Değerlendirme sonuçları, yeraltı kömür ocaklarında çalışan uygulayıcı mühendisler için sunulmuştur.

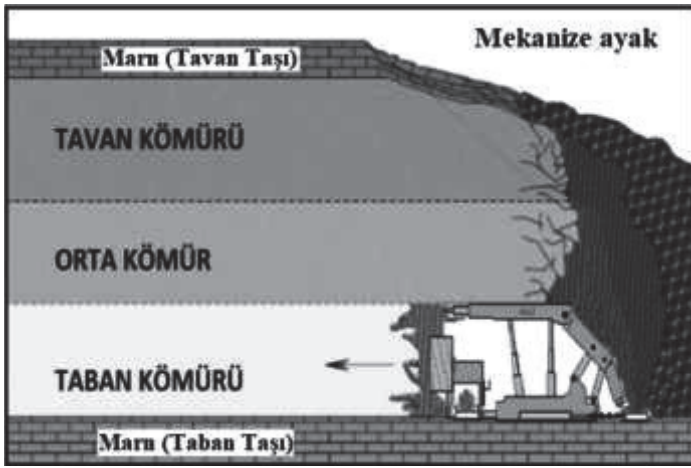
2 PİLOT UYGULAMA SAHASI HAKKINDA GENEL BİLGİ

TKİ-GLİ uhdesinde olan havzada, tabaka eğimleri genelde 5-20° eğimle kuzey doğu yönündedir. Çalışma sahası içerisinde kalan kömür rezervi 18 milyon ton civarındadır. Kömür damarı kalınlığı 5-12 metre arasında değişmekte olup, ortalama 8 metre kalınlığa sahiptir (Çelik, 2005). Kömür damarı çeşitli seviyelerde yaklaşık 15-30 cm kalınlığa sahip kil ara kesmeleri içermektedir. Yeraltı ocağında çalışılan en derin kısım +469 kotunda olup örtü tabakası kalınlığı yaklaşık 330 m'dir. A1 ve A2 panoları bu bölge içerisinde yer almaktadır.

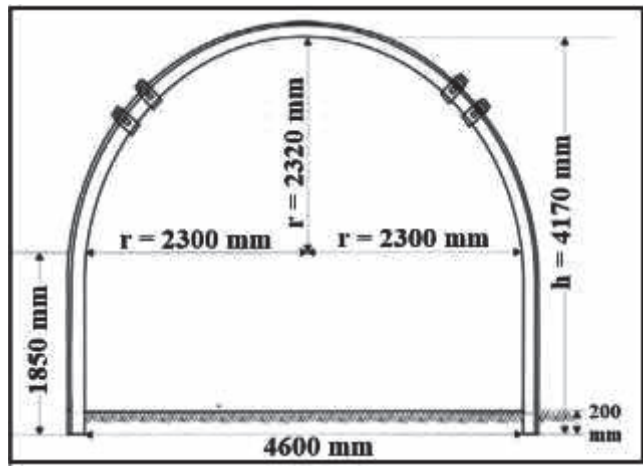
GLİ Tunçbilek kömür havzasında, yeraltı kömür üretimi, Ömerler-A sahasında yapılmaktadır. Tam mekanize kazı sisteminin kullanıldığı yeraltı ocağında, geri dönümlü

arkadan blok göçertmeli uzunayak üretim yöntemi ile kömür üretimi yapılmaktadır. Ortalama 8 m kalınlığa sahip kalın kömür damarının alt kotunda kalan 3.5 metrelik kısmı tek katlı yöntem olarak kazılmakta tavanda kalan yaklaşık 5 metrelik kısım ise arkadan göçertilerek alınmaktadır. Üretim yönteminin kesit görünümü Şekil 1’de verilmiştir.

Kalın kömür damarının taban kotunda kalmak kaydı ile üst taban (malzeme yolu) ve alt taban (kömür yolu) yolları sürülmekte ve ayak içi olacak kılavuz galeri ile birbirine bağlanarak uzunayak panoları oluşturulmaktadır. Panoların ayak içi uzunlukları genelde 90-110 m aralığında, pano boyları ise 500-1000 m aralığında ve panolar arasında bırakılan topuk genişlikleri ise 20 m seçilmektedir. Ayak içerisinde çift tamburlu kesici yükleyici, bir tanesi arın kömürü için diğeri arka göçük kömürünü almak için iki adet çift zincirli konveyör ve dört hidrolik direkli yürüyen tahkimat üniteleri bulunmaktadır. Ömerler yeraltı ocağında kullanılan mekanize sistemde üç tip kalkan tahkimat ünitesi kullanılmaktadır. Bu ünitelere; ayak içi tahkimatları, geçiş tahkimatları ve taban yolu içine kurulan ayak başı tahkimat isimleri verilmektedir. GLİ-Ömerler mekanize pano taban yollarında profil tipi GI 140 olan 4.60’lık çelik bağ kullanılmaktadır. Bu kavisli tahkimatların genişliği 4600 mm yüksekliği ise 3500 mm’dir (Şek. 2). Kazı alanı 15.79 m² faydalı kesiti ise 13.80 m²’dir.



Şekil 1. Uygulanan üretim yöntemi



Şekil 2. Galeri kesiti ve demir bağ tahkimat

3 KAYA MALZEME VE KÜTLE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Görgül ve sayısal analizler için veri tabanı niteliğini taşıyacak A1, A2 ve A6 panolarında saha deneyleri ve bu panolardan temin edilen örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen kaya mekaniği çalışmalarından kömür biriminin malzeme ve kütle özelliklerinin tavantaşı ve tabantaşı birimine nazaran daha zayıf olduğu belirlenmiştir. Tabantaşı biriminin daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu anlaşılmaktadır (Çiz. 1 ve 2).

Çizelge 1. Kaya malzeme özellikleri (Özkan vd., 2022a; Mesutoğlu, 2019)

Veri	Sembol, Birim	Kömür	Tavantaşı	Tabantaşı
Tek Eksenli Basma Dayanımı	σ_{ci} (MPa)	8.84	10.66	12.04
Çekme Dayanımı	σ_t (MPa)	2.30	8.31	8.91
Kohezyon	c (MPa)	0.401	0.487	0.419
Yüzey Sürtünme Açısı	ϕ (°)	31.03	24.32	25.44
Elastisite Modülü	E (MPa)	2663	3198	3612
Poisson Oranı	ν (-)	0.18	0.264	0.27
Doğal Yoğunluk	ρ (gr/cm ³)	1.26	2.00	2.12
Doğal Birim Hacim Ağırlık	γ (kN/m ³)	12.40	19.60	21.7
Suda Dağılma Dayanımı İndeksi	I_{d2} (%)	91.00	98.89	98.55
Nokta Yükleme Dayanımı	$I_{s(50)}$ (MPa)	0.51	0.70	2.38

Çizelge 2. Ömerler yeraltı ocağına ait kaya kütle özellikleri (Özkan vd. 2022a, Mesutoğlu 2019).

Veri	Sembol, Birim	Kömür	Tavantaşı	Tabantaşı
Jeolojik Dayanım İndeksi	GSI	35	43	47
Kaya Kütle İndeksi	RMR	32	44	47
Kaya Kalite Göstergesi	RQD	50	60	70
Kaya Kalite İndeksi	Q	0.37	0.99	1.16
Tek Eksenli Basma Dayanımı	σ_{cm} (MPa)	1.481*	1.244*	1.543*
Çekme Dayanımı	σ_{tm} (MPa)	0.004*	0.024*	0.037*
Kohezyon	c_m (MPa)	0.401*	0.487*	0.419*
İçsel Sürtünme Açısı	ϕ_m (°)	31.03*	24.32*	25.44*
Elastisite Modülü	E_m (MPa)	302*	625.99*	920.07*
Poisson Oranı	ν	0.18	0.264	0.27
Sıkışma Modülü ($K = [E/3(1-2\nu)]$)	K (MPa)	157.29	442.08	666.72
Makaslama Modülü ($G = [E/2(1+\nu)]$)	G (MPa)	127.97	247.62	362.23

* RocLab (Rocscience, 2022) yardımıyla belirlenmiştir.

4 GÖRGÜL YAKLAŞIMLAR İLE BELİRLENEN ÖN TASARIM SONUÇLARI

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalara, gözlem ve incelemelere dayalı olarak hazırlanan veri tabanı (Çiz. 3), görgül yaklaşımlara ait kaya saplama tasarım çıktılarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Görgül yaklaşımlara ait çözümlenmeler ile saplama boyu (L) ve saplama aralığı (S) gibi temel boyutlar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4’de topluca sunulmuştur. Kaya saplama boylarının (L) 1.3-10.45 m aralığında olduğu, Çizelge 4’de sunulan görgül tasarım sonuçlarından görülmektedir. Ancak Yaklaşım-11 (Lowson ve Bieniawski, 2013) yardımıyla belirlenen kaya saplama boyunun (L=10.45m) oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ortalama kaya saplama boyunun bu değer dikkate alınmadan (L) 2.5 ± 1.0 m olduğu belirlenmiştir (Çiz. 4). Ortalama kaya saplama boyuna en yakın sonuç öneren yaklaşımların sırası ile Ünal (1986, 1989) ve Panek (1964) olduğu dikkat çekmektedir. Yaklaşım-8 (Çiz. 4) olarak tanımlanan Ünal (1986, 1989)’ın görgül yaklaşımı, günümüzde yaygın olarak kullanılan kaya saplama türlerine ait detaylı eşitlikler önermektedir (Özkan, 2010; Özkan vd., 2022a; Özkan vd., 2022b; Mesutoğlu, 2019).

Galerinin en kesitinde kaya saplama aralıklarının (S1) 0.9-1.2 m aralığında değiştiği, ortalama kaya saplama aralıklarının (S1) ise 1.0 ± 0.13 m olduğu görülmektedir (Çiz. 4). Ayrıca galeri boyunca kaya saplama hat aralıkları (S2) 1.0 m alınmıştır.

Galerinin en kesitinde oluşturulan her bir hattaki kaya saplama adedi (N), görgül yaklaşımlar yardımıyla ayrı ayrı belirlenmiştir. Çizelge 4’de verilen N değerleri dikkate alınarak ortalama N değerinin 6 olduğu hesaplanmıştır. Ancak görgül yaklaşımlar, açıklık duraylılığı için kaya saplama yanında ek olarak püskürtme beton ve/veya gerekirse çelik bağ önerisinde de bulunmaktadır. Bu proje çalışması kapsamında gerçekleştirilecek pilot uygulamada sadece kaya saplama düşünüldüğü için her hattaki kaya saplama adedi bir artırılarak 7 adet olmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Sonuç olarak, Çizelge 4’de sunulan ortalama sonuçlar, saha incelemeleri ve gözlemleri, mühendislik sezgi ve tecrübeleri dikkate alınarak tasarım sonucu olarak Şekil 3 ortaya konmuştur. Ayrıca bu şekilde, kömür damarına ait stampa yer verilmiştir. Şekil 3’de sunulan galeri kesitinde görüldüğü gibi 7 adet kaya saplama kullanımının kullanılması, saplama boyunun (L) 3.3 m olması, galeri en kesitinde saplama arası mesafenin (S1) 1.0 m olması ve galerinin uzun eksenli boyunca saplama hatları arasındaki (S2) 1.0 m olması

öngörülmüştür. Sahada yapılan gözlem, ölçüm, deneyim ve mühendislik sezgileri ile kavisli galeri kesitteki galeri tavanında 3 adet tavana dik kaya saplamasının yerleştirilmesi planlanmıştır (P1, M, T1). Topuk (T) tarafında yatayla 70° eğimli T2 ve yatayla 50° eğimli T3 kaya saplaması, benzer şekilde pano (P) tarafında yatayla 70° eğimli P2 ve yatayla 50° eğimli P3 kaya saplamasının yerleştirilmesi planlanmıştır.

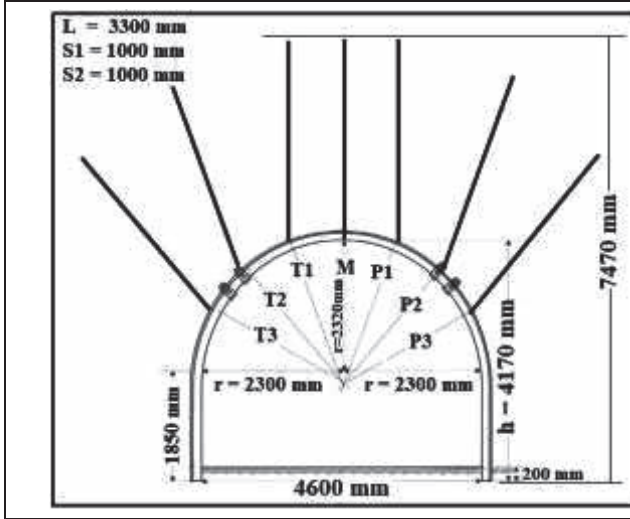
Çizelge 3. Görgül tasarımda kullanılan girdi parametreleri (Özkan vd., 2022a; Mesutoğlu 2019).

Parametre	Sembol	Değer
Galeri Açıklığı (m)	B	4,60
Süreksizlik Takım Sayısı (adet)	n	≥3
Süreksizlik Yatım Açısı (°)	φ	45°-90°
Galeri tavanındaki kaya tabakalarının ortalama kalınlığı (cm)	t	5
Süreksizlikler arası mesafe (m)	JS	0,4
Galeri tavanındaki kömür kaya birimine ait kaya kalite değeri	RQD	50
Galeri tavanındaki kömür kaya birimi için kaya kütle kalitesi	RMR	32
Galeri açıklığı üzerindeki örtü tabaka kalınlığı (m)	H	150.25
Örtü tabakasına ait birim hacim ağırlık (kN/m ³)	γ	21.48
Yatay arazi gerilmesinin (σ _h) düşey arazi gerilmesine (σ _v) oranı	K	0.473
Galeri tavanındaki linyit kaya birimine ait kaya kalite indeksi	Q	0.37
Kaya yükü yüksekliği (C[(100-RMR)/100]*B) (m)	h _t	2.90
Kazı tahkimat oranı (1.6- 2.0)	ESR	1.80
Eşdeğer kazı açıklığı (B/ESR)	De	2.56
Eklem takımı sayısı	J _n	15
Blok Boyutu	RQD/J _n	50/15 = 3.33

Çizelge 4. Görgül tasarım kaya saplama tahkimat tasarım çıktıları (Özkan vd., 2022a; Mesutoğlu 2019).

Tasarım Yaklaşımı		L	S ₁	S ₁ x S ₂	N
No	Geliştiren	m	m	m x m	#
1	Anonim (Genel tasarım sonucu)	2.4	1.2	1.2 x 1.2	6
2	Panek 1964 (Genel tasarım sonucu)	2.5	1.0	1.0 x 1.0	4
3	Deere vd. 1970 (Genel tasarım sonucu)	-	0.9	0.9 x 1.0	6
4	Merritt 1972 (Genel tasarım sonucu)	-	1.2	1.2 x 1.0	6
5	Bieniawski 1973 (Genel tasarım sonucu)	5.0	1.0	1.0 x 1.0	6
6a	Ünal 1983 (Mekanik kaya saplama)	1.90	1.2	1.2 x 1.5	6
6b	Ünal 1983 (Reçine kaya saplaması)	1.30	1.2	1.2 x 1.5	6
7	Vanketaswarlu 1986 (Genel tasarım sonucu)	1.80	1.0	1.0 x 1.0	6
8a	Ünal 1986, 1989 (Mekanik kaya saplama)	1.98	0.9	0.9 x 1.0	6
8b	Ünal 1986, 1989 (Reçineli kaya saplama)	3.41	0.9	0.9 x 1.0	6
8c	Ünal 1986, 1989 (Swellex kaya saplaması)	2.89	0.9	0.9 x 1.0	6
9	Barton vd. 1974 (Genel tasarım sonucu)	-	1.0	1.0 x 1.0	6
10	Grimstad ve Barton 1995 (Genel tasarım sonucu)	1.80	0.9	0.9 x 1.0	6
11	Lowson ve Bieniawski 2013 (Kablolu kaya sapla)	10.45*	0.96	0.96 x 1.0	6
Genel Ortalama		2.5±1	1.0±0.1	1.0 x 1.1	6

* Bu veri ortalamaya dahil edilmemiştir.



T1-M-P1 saplamalarının ulaştığı üst seviye 7470 mm

Kömür Damar Stampı	t (mm)	Toplam t (mm)
Tavan Taşı	-	-
Kömür	1800	8300
A Kili	200	6500
Kömür	1000	6300
B Kili	300	5300
Kömür	1800	5000
Sarı Kil	150	3200
Kömür	1000	3050
C Kili	250	2050
Kömür	1800	1800
Taban Taşı	-	-

Şekil 3. Veri tabanına dayalı geliştirilen kaya saplama tasarımı sonucu Özkan vd. (2022a)

5 ÜÇ BOYUTLU SAYISAL ÇÖZÜMLEME SONUÇLARI

Şekil 3’de sunulan ön tasarım çıktısı, çalışmanın planlandığı A6 panosu için üç boyutlu (FLAC 3D) sayısal analizlere tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

5.1 Üç Boyutlu Modelde Yapılan Varsayımlar ve Kısıtlamalar

Modelleme çalışmalarında bazı varsayım ve kısıtlamalar söz konusu olmuştur. Bunlar sırası ile; (i) Model çalışmalarında σ_1 ’in düşey (-z yönünde), σ_2 ve σ_3 ’ün yatay (x ve y yönünde) olduğu kabul edilmiştir, (ii) Gerçekte 400-450 metre arasında olan A6 uzunayak panosunun uzunluğu modelde y yönünde 500 metre alınmıştır, (iii) Göçüğe ait malzeme özellikleri literatürde yer alan bazı eşitlikler ile belirlenmiştir, (iv) Tahkimat üniteleri modelde tanımlanırken, yürüyen tahkimat üniteleri, kabuk yapısal elemanı (Shell structural elements) ile demir bağ tahkimat sistemi, kiriş yapısal elemanı (Beam structural elements), kaya saplaması tahkimat elemanı ise kazık yapısal elemanı (Pile structural elements) ve Kablolü tip kaya saplaması, kablo yapısal elemanı (cable structural elements) ile tanımlanmıştır, (v) Modelde A6 uzunayak panosunun bulunduğu kömür damarının eğimi 0° olarak kabul edilmiştir. Ayrıca yeraltı suyu model çalışmalarında ihmal edilmiştir.

5.2 Model Geometrisi ve Ağların Oluşturulması

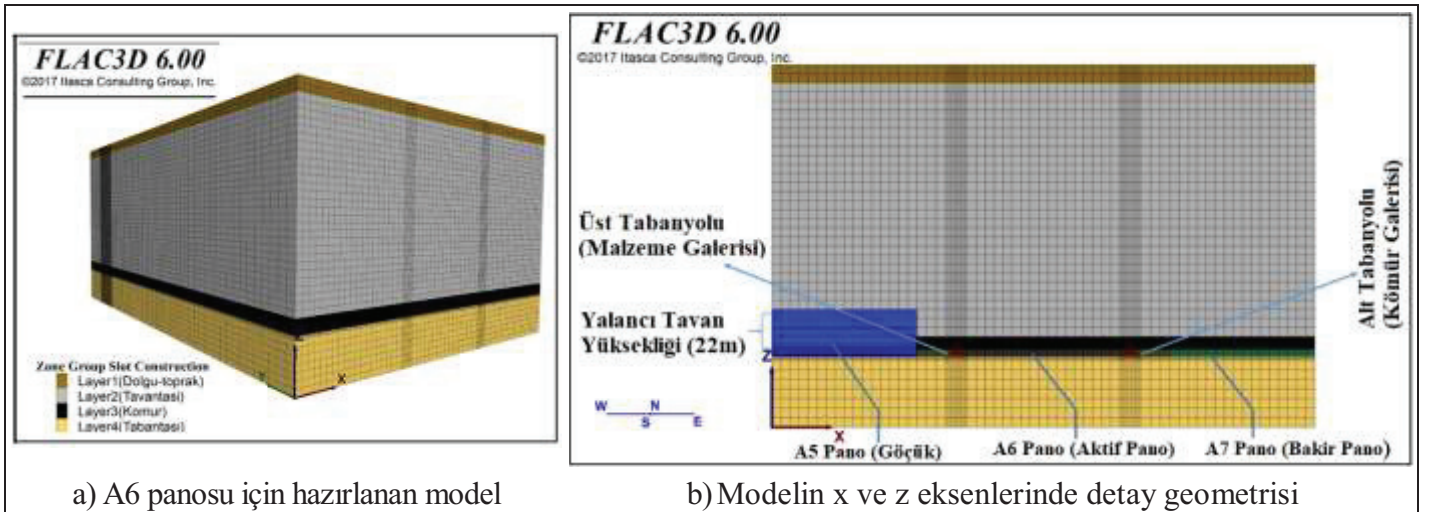
Ömerler yeraltı maden ocağı A6 uzunayak panosuna ait geometrinin modellenmesi çalışmalarında, ocağa ait güncel durum dikkate alınmıştır. Yeraltı ocağı imalat haritasında görülen, daha önce çalışılmış ve göçükte kalan A5 panosu, pilot uygulamanın planlandığı A6 panosu ve A6 panosunun diğer tarafında yer alan bakir durumdaki A7 panosu modele tanımlanmıştır. Katı modelin z yönü derinlik istikameti, y yönü uzunayak pano boy istikameti, x yönü ise uzunayak panosundaki ayak uzunluğu istikameti olarak seçilmiştir (Şek. 4a). Model geometrisinde +x yönü 300 m, -z yönü 200 m ve +y yönü 500 m olarak tanımlanmıştır.

Modelde +x yönünde ayak içi uzunluğu 90 m, topuk genişliği 20 m alınmıştır. Hazırlanan modelde -z yönünde kalın damar kalınlığı 11 m, kömür damar üzerindeki kıltaşı birimi 140 m, kıltaşı üzerindeki dolgu malzemesi 10 m ve kömür damarı altında kalan kıltaşı birimi 39 m alınmıştır. Modelde +y yönü 500 m olarak tanımlanmıştır. Galeride (tabanyolu) üretime bağlı oluşan dinamik etkinin analizlerde incelenebilmesi için uzunayak panosunun ilk arka göçük etkisinden kurtulduğu 450. m, uzunayak kazı arını kabul edilmiştir. Bir başka ifade ile panonun ilk 50 m’sinin çalışılmış ve göçükte bırakılmış olduğu varsayılmıştır (Şek. 4a).

Model geometrisinde dikdörtgen ve kare şekilli tuğla (brick) elemanlar kullanılmıştır. Modelde uzunayak kazısının 1'er metrelik haveler şeklinde yapıldığı varsayılmış ve yaratacağı dinamik etkinin incelenmesi için panonun 450-400 m'ler arası 1 m'lik ağırlara bölünmüştür. Bunun haricinde kalan diğer kısımlar 5 ve 10'ar m'lik ağırlara bölünmüştür. Sonuçta modelde toplam 361665 bölge ve 376320 adet düğüm noktası oluşturulmuştur (Şek. 4a ve 4b).

5.3 Tahkimat Ünitelerinin Modele Tanıtılması ve Modelin Çalıştırılması

Ömerler yeraltı ocağında kullanılan bağlar GI ve TH çelik profillerdir. Modelde demir bağları temsil etmek üzere işletmeden alınan, GI 140 profiline ait malzeme özellikleri kullanılmıştır (Çiz. 5). Kablolü kaya saplamaların FLAC 3D ile modellenmesinde ise kablo yapısal elemanları (cable structural elements) kullanılmıştır. Modelde kullanılan kablolü kaya saplama malzeme özellikleri Çizelge 5'de sunulmuştur. Ömerler yeraltı ocağında ayak içinde kullanılan yürüyen tahkimat ünitelerinin, FLAC 3D programına doğrudan yerleştirilmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle modelde, yürüyen tahkimat ünitelerini temsil etmek üzere, elastik modülü 180 GPa, Poisson oranı 0.3 olan ve kalınlığı 45 cm olan kabuk yapısal elemanlar (Shell structural elements) kullanılmıştır.



Şekil 4. Üç boyutlu sayısal analiz için hazırlanan model (Özkan vd., 2022a; Mesutoğlu, 2019)

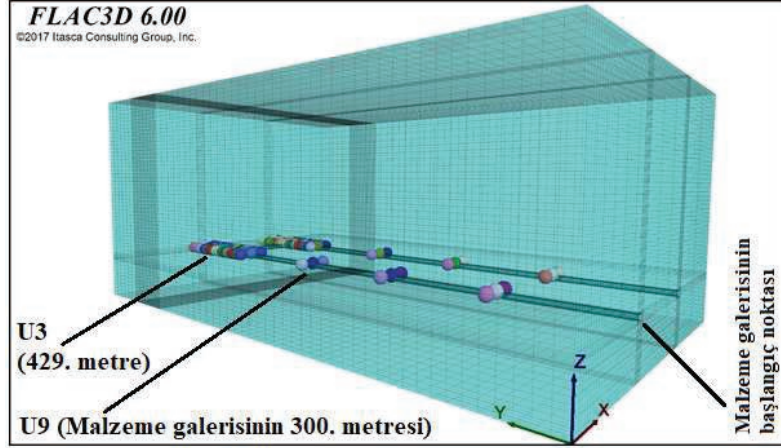
Çizelge 5. Modelde kullanılan tahkimat özellikleri (Özkan vd., 2022a; Mesutoğlu, 2019)

Modelde kullanılan demir bağ tahkimat özellikleri		Modelde kullanılan kablolü kaya saplama özellikleri	
Malzeme Parametreleri	Malzeme Özellikleri	Malzeme Parametreleri	Malzeme Özellikleri
Profil Tipi	GI 140	Delik çapı (m)	0.048
Kesit Ağırlığı (kg/m)	41.6	Kablo çapı (m)	0.021
Boyut-Yükseklik (mm)	h=140	Kablo modülü (GPa)	125
Boyut-Genişlik (mm)	b=110	Kesit Alanı (mm ²)	313
Kesit Alanı (m ²)	0.0154	Maksimum Çekme Kapasitesi (kN)	250
I _x (cm ⁴)	1586	Su-Dolgu oranı	0.35
I _y (cm ⁴)	315	Dolgu-bağ sertliği (N/m ²)	1.75*10 ⁷
Yoğunluk (kg/m ³)	2701.3	Dolgu kohezyon mukavemeti (N/m)	2*10 ⁵

5.4 Model Geometrisinde İzleme Bölgelerinin Yer Tespiti ve Tanımlanması

Üç boyutlu analizler için iki ayrı model hazırlanmıştır. At nalı kesite sahip galerilerin demir bağ ile tahkim edilen modele ANK-DMRB, benzer şekilde kablolü kaya saplamaları ile tahkim edilen modele ANK-KBL ismi verilmiştir. Her iki modelde, hazırlık (Aşama-1) ve geri dönüşlü üretim (Aşama-2) faaliyetlerinin art arda gerçekleştiği varsayılmıştır. Modelde oluşan

gerilme ve deformasyonların izlenmesi için 120 izleme noktası kurgulanmıştır (Şek. 5). Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde A5 ve A6 panolarının komşuluğunda olan malzeme galerisinin (üst tabanyolu) üzerinde yer alan U9 (300. m) ve U3 (429. m) istasyon noktalarından alınan sayısal veriler (gerilme ve düşey yer değiştirme) dikkate alınmıştır (Şek. 5).



Şekil 5. İzleme bölgelerinin model geometrisi üzerinde konumları (Özkan vd. 2022a; Mesutoğlu, 2019)

5.5 Sayısal Analiz Sonuçları

Hazırlanan ANK-DMRB ve ANK-KBL isimli üç boyutlu iki modelin çalıştırılmasında, modelde önce Aşama-1'in adından da Aşama-2'nin geliştiği varsayılmıştır. Modelde Aşama-1 için U9 izleme noktası (300. m), malzeme galerisinin ilk açılmaya başladığı andan (0. m) itibaren galerinin tamamlandığı ana kadar (500. m) izlenmiştir. Takibinde ise geri dönüşlü uzunayak kazısını tanımlayan Aşama-2 için U3 izleme noktası, kazı arınının hemen 18 m ilerisinde konumlanmış (429. m) olup arındaki 1 m'lik ilerleyişler ile arına yaklaşma süreci ve göçükte kalıncaya kadar geçen süreç izlenmiştir (Şek. 5). Malzeme galerisi tavanında yer alan U3 ve U9 nolu izleme noktalarından alınan veriler kullanılarak Şekil 6 ve 7 hazırlanmıştır.

Şekil 6 ve 7'de sunulan grafiklerde Aşama-1 ve Aşama-2 yi kapsayan tüm işlemler üç kısımda incelenmiştir. İlk kısım Aşama-1 sürecini (kazı ilerleme aşaması: 0-10), ikinci kısım panoda ilk arka göçüğün oluşması için yapılan ilk 50 metrelik kazıyı (kazı ilerleme aşaması: 10-11), üçüncü kısım ise Aşama-2 sürecindeki faaliyetleri belirtmektedir (kazı ilerleme aşaması: 11-29). Bu süreçler zamandan bağımsız arka arkaya tanımlanmıştır.

Hazırlanan grafiklerin ilk kısmı olan Aşama-1 safhasında, hazırlık çalışmalarının yürütüldüğü galerinin 200. metresine ulaşıncaya henüz daha kazılmamış U3 (300. m) noktasında yer değiştirmelerin ve orijinal saha gerilmelerinin değişmeye başladığı Şekil 6 ve 7'den görülmektedir. Bu değişimin, ANK-DMRB tahkimatlı durumda ANK-KBL tahkimatlı duruma göre oldukça fazla olduğu anlaşılmaktadır. Yer değişim değerleri ANK-DMRB'da 96.2 mm iken ANK-KBL'de 28.8 mm olmuştur. Benzer şekilde saha gerilmelerindeki değişim ANK-DMRB'da 3344 kPa iken ANK-KBL'de 164 kPa seviyesinde ortaya çıkmıştır. Aşama-1 için kablolu kaya saplamalarının oldukça başarılı olduğu görülmektedir (kazı ilerleme aşaması: 0-10).

Grafiklerin ikinci kısmı için pano arkasında beklenen ilk göçüğün oluştuğu ve ayağın arka göçük tarafının rahatladığı varsayılmıştır (10-11 kazı ilerleme aşamaları).

Hazırlanan grafiklerin üçüncü kısmı olan Aşama-2 safhasında, uzunayak kazı çalışmalarının yürütüldüğü model panoda kazı arınının 1'er metreden oluşan toplamda 10 metrelik ilerlemesi sonunda (kazı ilerleme aşaması: 21) galeri tavanında oluşan yer değiştirmelerin hızla artmaya başladığı görülmektedir (Şek. 6 ve 7). Bu artışın ANK-DMRB'da çok daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. ANK-DMRD'li durumda yer değiştirme miktarı 376 mm iken ANK-KBL'li durumda 105 mm olmuştur. Sahadaki ikincil gerilmelerin ANK-DMRB'li durumda 8.8 kPa'dan 1.8 kPa'la kadar azaldığı, ANK-KBL'li durumda ise ikincil gerilmelerin 3340 kPa seviyesinden 1770 kPa seviyesine düştüğü anlaşılmaktadır. Aşama-2 için kablolu kaya saplamalarına ait performans değerlerinin oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir (kazı ilerleme aşaması: 11-29).

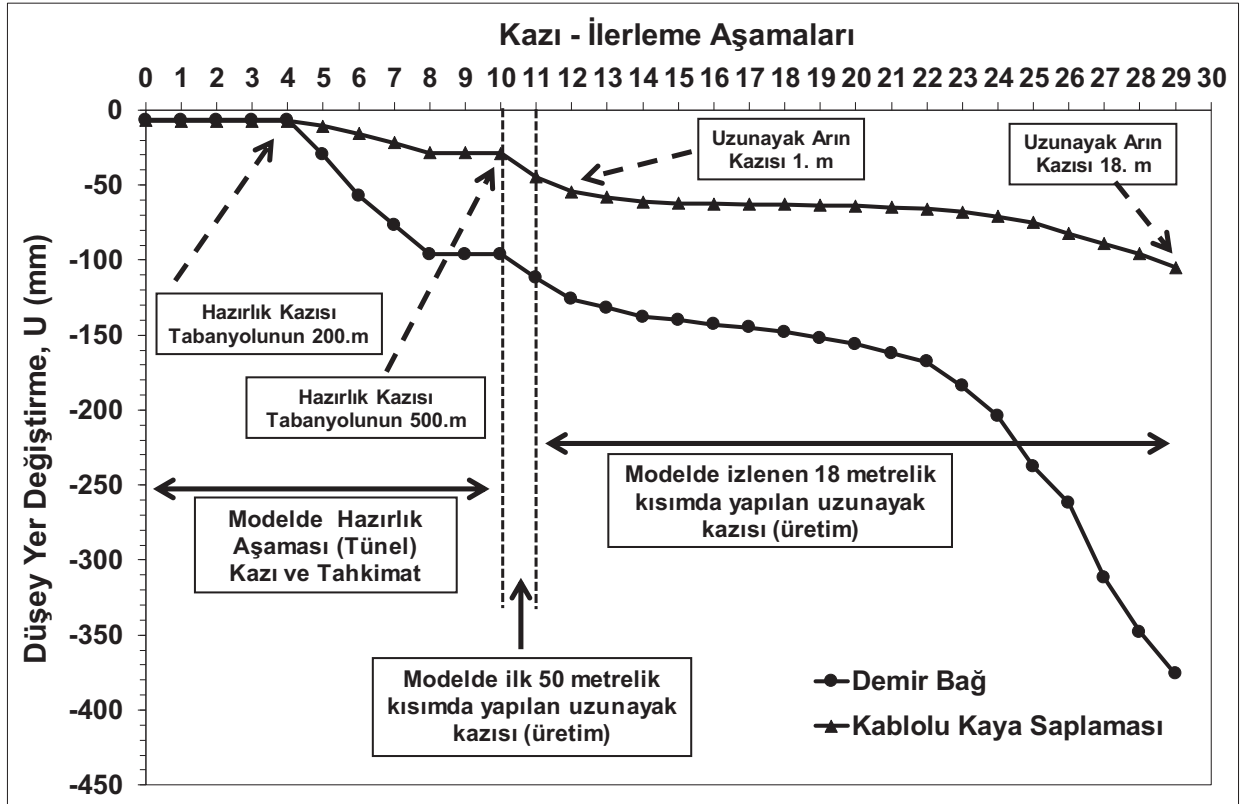
6 PİLOT UYGULAMA ÇALIŞMALARI

TKİ-GLİ'de at nalı kesitinde açılan A6 panosu malzeme galerisinin (tabanyolu) orta kısmında kalan 145 metrelik kısım, pilot uygulama ve izleme bölgesi olarak seçilmiştir. Uygulama bölgesi için "Prof. Dr. Erdal Ünal Uygulama Galerisi (Prof Dr EÜ-KSUG)" ismi verilmiştir. Bu bölge 25'er metrelik altı bölgeye ayrılmıştır. İlk ve son bölgeler maden ocağında kullanılan demir bağ ile tahkim edilmiştir. Diğer bölgeler ise sırası ile kablolu kaya saplamaları, swellex kaya saplamaları, reçine dolgulu rebar kaya saplamaları ve reçine dolgulu kablolu-rebar kaya saplamalarının kombinasyonu ile tahkim edilmiştir.

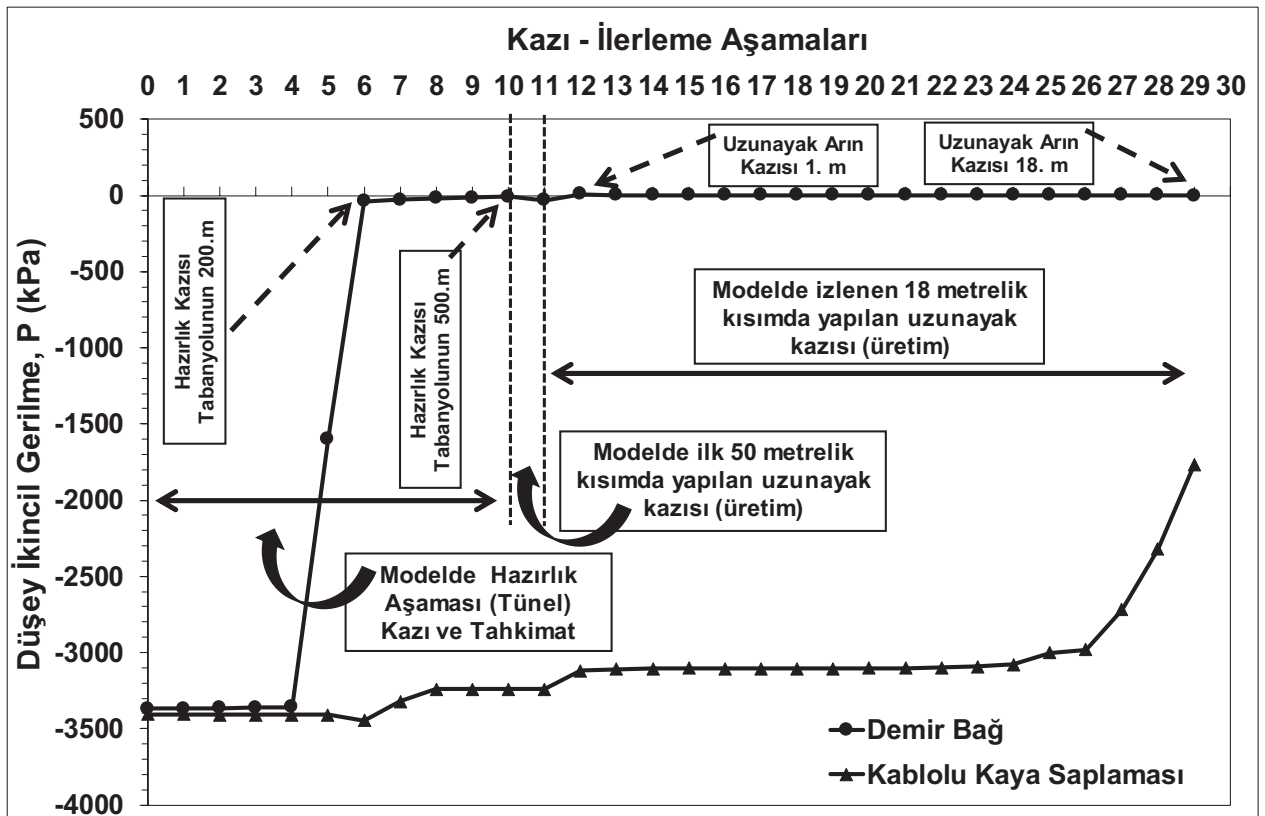
Farklı kaya saplamaları ve demir bağ ile tahkim edilen bölgelerin performanslarını belirlemek amacıyla sahada izleme sistemi kurulmuştur. 25'er metreden oluşan her bölgenin içerisinde yaklaşık 5'er metre aralıklardaki kesitlerde sırası ile konverjans (KO), taban kabarması (TK) ve hidrolik yük ölçüm (HYÖ) istasyonları kurulmuştur. Bu istasyonlardan zamana ve uzunayak kazı ilerlemesine bağlı olarak ölçümler alınmaktadır.

Sahada dört farklı kaya saplama bölgesinde pilot uygulaması tamamlanan 100 m'lik bölgenin ilk 75 m'lik kısmı henüz uzunayağın göçük tarafında kalmıştır. Bu yüzden ölçümlere devam edilmektedir. Sonuçları tamamı ile alınan demir bağ tahkimatlı ilk bölge (KSUG-DMRB) ve kablolu kaya saplama tahkimatlı ikinci bölgeye (KSUG-KBL) ait sonuçlar burada sunulmuştur. Saha ölçüm sonuçları, sayısal analizlerde belirtilen Aşama-2'ye karşılık gelmektedir.

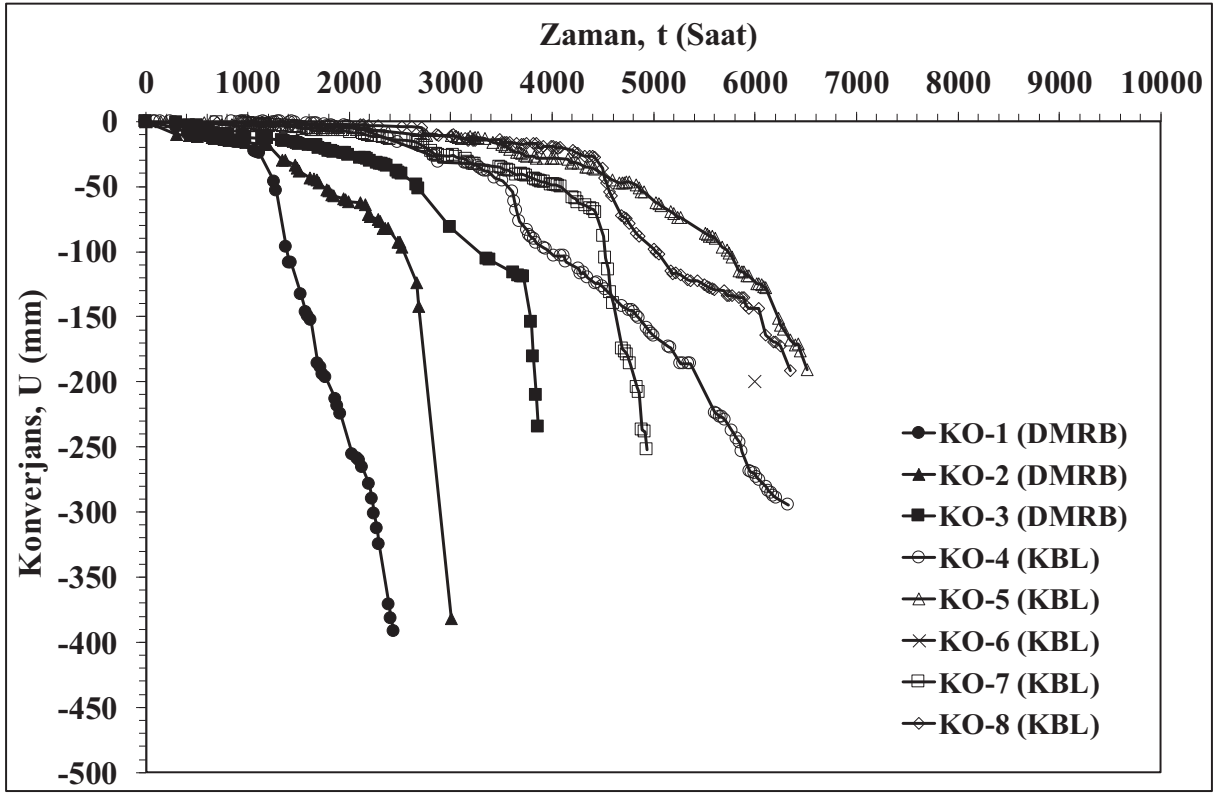
Şekil 8 ve 9'da zaman-yer değiştirme ile arından mesafe-yer değiştirme grafikleri sunulmuştur. KSUG-DMRB bölgesinde karşılaşılan konverjans değerlerinin KO-1, KO-2 ve KO-3 istasyonları için sırası ile 391.6mm, 381.49mm, 234.6mm olduğu görülmektedir. KSUG-KBL bölgesindeki konverjans değerlerinin ise KO-4, KO-5, KO-6, KO-7 ve KO-8 istasyonları için sırası ile 294.23mm, 190.82mm, 200.0mm, 252.39mm ve 191.21mm olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak demir bağ ile tahkim edilen bölgede deformasyonların daha fazla olduğu ve deformasyonlara daha erken izin verildiği anlaşılmaktadır.



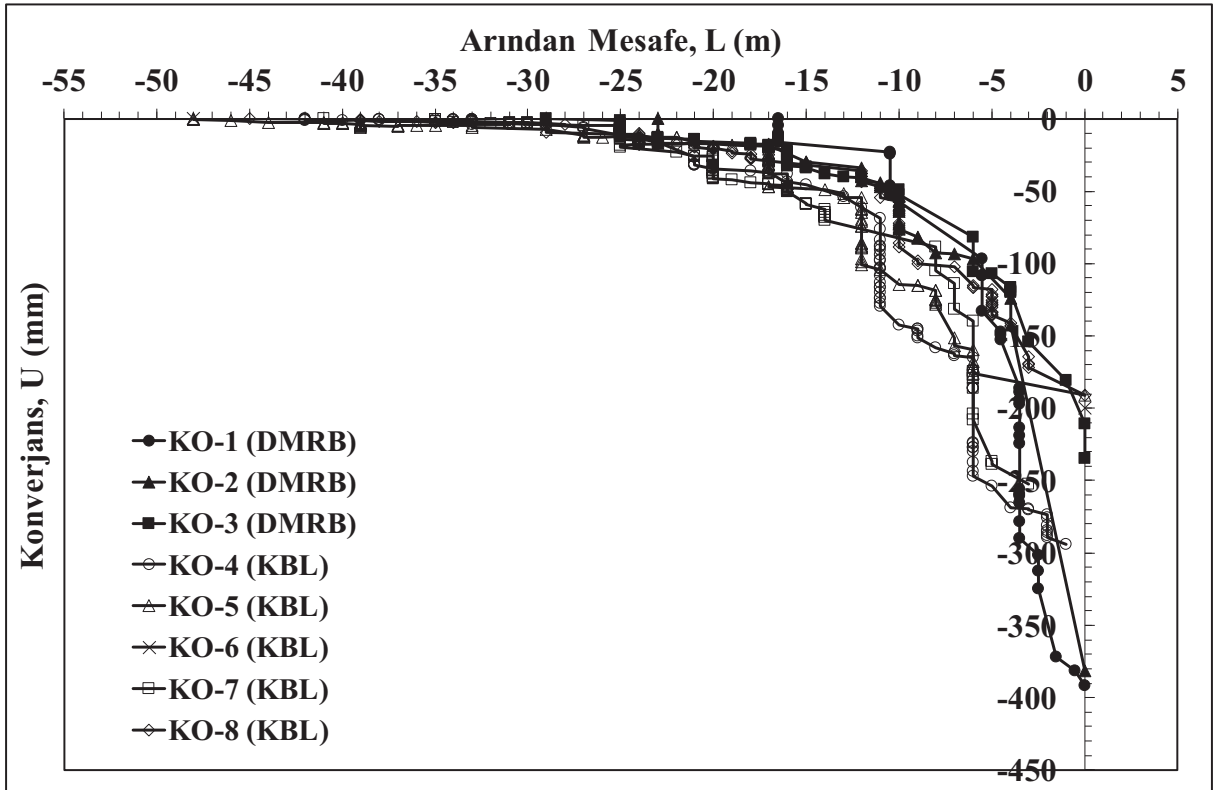
Şekil 6. U9 ve U3 izleme noktalarından belirlenen yer değişim değerleri (Özkan vd., 2022a)



Şekil 7. U9 ve U3 izleme noktalarından belirlenen ikincil gerilme değerleri (Özkan vd., 2022a)



Şekil 8. Pilot uygulama bölgesinde zaman-yer değiştirme davranışı (Özkan vd., 2022a)



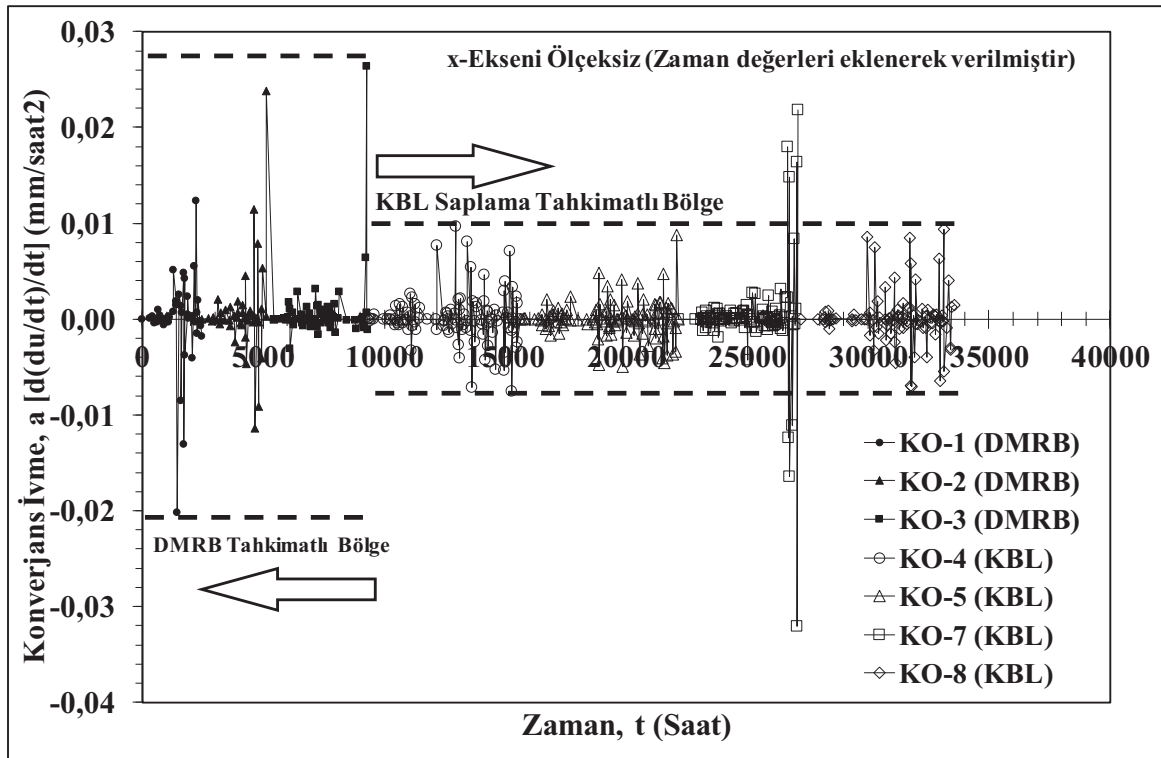
Şekil 9. Pilot uygulama bölgesinde arıdan mesafe-yer değiştirme davranışı (Özkan vd., 2022a)

7 BULGULAR ÜZERİNDE DEĞERLENDİRME ÇALIŞMALARI

TKİ-GLİ A6 panosu malzeme galerisinde gerçekleştirilen pilot uygulama sonucunda kablolu kaya saplamaları ve demir bağ tahkimat sistemine ait performans analizleri yapılmıştır. Demir bağ tahkimatlı bölgede kurulan üç adet konverjans istasyonu (KO-1, KO-2 ve KO-3) ile kablolu kaya saplamalı bölgede kurulan beş adet konverjans istasyonundan (KO-4, KO-5, KO-6, KO-7

ve KO-8) alınan ölçüm değerleri yardımıyla Şekil 8 ve 9 hazırlanmıştır. Konverjans ölçümlerinde uzunayak arınındaki ilerleme mesafeleri (L, m), zaman (t, saat) ve bunlara bağlı galeri açıklığında ortaya çıkan yer değiştirme değerleri (u, mm) kayıt altına alınmıştır. Bu temel verilere bağlı olarak konverjans hızı ($v=du/dt$, mm/saat) ve konverjans ivme ($a=du/dt^2$, mm/saat²) davranışları belirlenmiştir. Elde edilen ivme davranışları, x eksenine eklenmiş zaman değerleri ve y eksenine ivme değerleri olacak şekilde grafik ortamına aktarılmıştır. Şekil 10'da sunulan grafikte görüldüğü üzere demir bağ (KSUG-DMRB) tahkimatlı bölgede ivmesel hareketin (-0.021mm/saat²) ile (+0.027mm/saat²) aralığında değiştiği görülmektedir. Buna karşın kablolu kaya saplamalı (KSUG-KBL) bölgede ivme hareketlerinin ise daha dar bir aralıkta (-0.0055 mm/saat²) ile (+0.01 mm/saat²) arasında değiştiği anlaşılmıştır (Şek. 10). Kablolu kaya saplamalı bölgede KO-7 istasyonunda görülen sıra dışı ivme davranışı (-0.032+0.025 mm/saat²), A6 panoda aniden üretim ihtiyacına bağlı olarak üç gün boyunca günlük ilerleme hızının 2m/gün seviyesine çıkarılmasından kaynaklanmıştır. Normal koşullarda panodaki ilerleme hızı 10-15 m/ay mertebesinde olmuştur. Kısa bir zamanda yapılan 6 metrelik ilerleme, ivmesel hareketin de artmasına neden olmuştur. Benzer bir durum başkaca oluşmadığı için bu gelişme değerlendirmede dikkate alınmamıştır.

Şekil 10'da sunulan ivme davranışından pasif bir tahkimat olarak tanımlanan demir bağ (KSUG-DMRB) tahkimatlı bölgede, tahkimat tarafından özellikle tavan tabakalarındaki hareketin engellenemediği, tabakaların büyük ivmesel salınımlar içinde olduğu netice itibarı ile de deformasyonların büyük olduğu anlaşılmaktadır. Benzer bir değerlendirme kablolu kaya saplamaları (KSUG-KBL) için yapıldığında kaya saplamalarının tavan tabakalarını başlangıçta bağlayarak büyük bir kiriş oluşturduğu böylece daha az deformasyonlara izin verdiği, ivmesel hareketlerin daha dar bir aralıkta oluşmasından anlaşılmaktadır.



Şekil 10. Pilot uygulama bölgesi için belirlenen tahkimat performansları (Özkan vd. 2022a)

8 SONUÇLAR

TKİ-GLİ A6 panosu malzeme galerisinde farklı kaya saplamaları ile gerçekleştirilen pilot uygulama sonuçları ve değerlendirmesi aşağıda sunulmuştur.

- i. Görgül yaklaşımlar ile ön tasarım sonuçları belirlenmiştir. Genelleştirilen ortalama sonuçlar ile Ünal (1986, 1989) görgül yaklaşım sonuçlarının örtüştüğü görülmüştür.
- ii. Genelleştirilen ön tasarım sonuçları saha gözlemleri, mühendislik sezgi ve tecrübeleri ile revize edilmiş, sayısal analizlere tabi tutulmuş ve sonuçları kablolu kaya saplamaların demir bağ tahkimat sistemine göre deformasyonları daha başarılı önlediği belirlenmiştir.
- iii. Kablolu kaya saplamasına ait nihai tasarım, A6 panosu malzeme galerisininin 25 metrelik bir bölümünde uygulanmış, bu bölge ile komşu demir bağ tahkimatlı bölgede ölçüm istasyonları kurulmuştur. Uzunayak arınındaki ilerleme ve zaman bağlı alınan ölçümler, kablolu kaya saplamaların demir bağ tahkimat sistemine nazaran deformasyonları 386.5 mm seviyesinden 221.5 mm'ye yaklaşık %43 oranında azalttığını göstermiştir.
- iv. Teknik açıdan üstünlüğü belirlenen kablolu kaya saplamalarının aynı zamanda ekonomik açıdan da üstün olduğu genel olarak görülmüştür.
- v. TKİ-GLİ, pilot uygulamalara katılan mühendis ve işçi personeli ile kaya saplama uygulamalarını yürütebilecek bilgi ve tecrübeye sahip çekirdek bir takım oluşturmuştur.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, kaya saplama proje çalışmasını 116M698 nolu bütçe ile destekleyen TÜBİTAK'a, pilot uygulamaya destek veren TKİ'ye ve bildiriye değerlendiren hakemlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Anonim, Rock bolt support design approach based on discontinuity set number and discontinuity dip (In: Hasan Gerçek, BEÜ-Dep. of Mining Eng., Support in Underground Mining, Lecture Notes, 1995, Zonguldak).
- Barton, N., Lien, R. and Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock mechanics, 6 (4), p.189-236.
- Bieniawski, Z. T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses, Civil Engineer in South Africa, 15 (12), 335-344.
- Çelik, R., 2005. GLİ Ömerler mekanize ocakta yürüyen tahkimatın taşınmasının geliştirilmesi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Eskişehir, 144p.
- Deere, D. U., Peck, R. B., Parker, H. W., Monsees, J. E. and Schmidt, B., 1970. Design of Tunnel Support Systems: Highway Research Record, Highway Research Board, v. 339, p. 26-33.
- Grimstad, E. and Barton, N., 1995. Rock mass classification and the use of NMT in India, Proc. Conf. Design and Construction of Underground Structures, pp.23-25.
- Lowson, A. and Bieniawski, Z., 2013. Critical Assessment of RMR based Tunnel Design Practices: A Practical Engineer's Approach, Rapid Excavation & Tunneling Conference, June 2013, Washington, DC, Session: Design and Planning, 16p.
- Merritt, A.H., 1972. Geologic Prediction for Underground Excavations, in Lane, K.S., and Garsfield, L.A., eds., North American Rapid Excavation and Tunneling Conference, Volume 1: Chicago, New York: Society of Mining Engineers, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, p. 115-132.
- Mesutoğlu, M., 2019. Determination of rock bolt and steel set behaviors used in control of longwall tailgate roof strata by numerical analysis, Konya Tech. Univ., Dep. of Mining Eng., PhD Thesis, Konya, 298p.
- Özkan, İ., 2010. Madencilikte Kaya Saplamaları ile Tahkimat Teknolojisi, Ders Notu, Konya Teknik Üniversitesi-Maden Müh. Böl., Konya, 72p.
- Özkan, İ., Geniş, M., Uysal, Ö., Mesutoğlu, M., 2022a. Ulusal Yeraltı Kömür Madenciliğimizde Kömür Galerilerinin Tavan Tahkimatı için Yeni Bir Teknoloji: Kaya Saplama Sistemlerinin Tasarımı, TÜBİTAK

- 116M698 Nolu Proje Sonuç Raporu, Ankara, 418p.
- Özkan, İ., Mesutoğlu, M., Sancak, A., Bayındır, R., 2022b. Uzunayak tabanyollarının kaya saplamaları ile tahkimat tasarımı için önerilen görgül yaklaşımlar üzerine bir değerlendirme: örnek bir çalışma, KAYAMEK'2022- 13. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Isparta, pp.199-210
- Panek, L. A., 1964. Design For Bolting Stratified Roof, Trans SME, 229, pp.113-119.
- Rocscience, RocLab, 2002. Toronto, Canada, <http://www.rocscience.com/> , <https://www.rocscience.com/downloads/roclab/RocLabManual.pdf> , 2022.
- Ünal, E., 1983. Development of design guidelines and roof control standards for coal mine roofs, Ph.D. Thesis. The Pennsylvania State University. Department of Mineral Engineering. State College. 355p.
- Ünal, E., 1986. Galerilerde Kaya Saplamaları ile Tahkimat Tasarımı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Türkiye 5. Kömür Kongresi, Zonguldak, 3-9 Mayıs 1986, pp. 241-258.
- Ünal, E., 1989. Support Selection of Mine Roadways by Means of a Computer Program, Proc. 30th US Symp. on Rock Mech., West Virginia University, Morgantown, pp. 943-952.
- Venkateswarlu, V., 1986. Geomechanics classification of coal measure rocks vis-a-vis roof supports, PhD Thesis, Indian School of Mines, Dhanbad, 251p. (In: Bieniawski ZT, editor. Engineering rock mass classification. John Wiley and Sons, 1989).

Derin Bir Kömür Madeninde Tahkimatın Yeniden Tasarımı

Re-Design of Support in A Deep Coal Mine

T. Onargan

Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir.

E. Erbeyoğlu, Y. Başköse

Progeo Proje ve Danışmanlık Ltd. Şti., Ankara

F. Büyükbaş, H. Evinç

Polyak Eynez Enerji Üretim Madencilik San. ve Tic. A.Ş., İzmir

C. Gökçeoğlu

Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara

ÖZET: Türkiye'nin en derin yeraltı linyit madeni olma özelliğine sahip İzmir Kınık Madeni bulunduğu bölgenin tektonik yapısı gereği büyük bir öneme sahiptir. 900 m derinliğindeki Kınık Yeraltı İşletmesi bir ana galeri ve 2 kuyudan oluşmaktadır. Madenin işletme tünellerinden olan pompa istasyonu bölgesi tahkimatlarında, zamana bağlı olarak galerinin çalışmasını etkileyecek şekilde deformasyonlar meydana gelmiştir. Galerinin düzgün bir şekilde işleyebilmesi için tahkimat tasarımının yeniden değerlendirilmesi gerekmiştir. Yeryüzünden yaklaşık 900 m derinlikte ve tektonik olarak aktif bir bölgede açılmış bir galeri için mevcut koşullar göz önüne alınarak, yeni bir tahkimat tasarlanmış, nümerik analizlerle önerilen tahkimat sisteminde herhangi bir duraysızlık probleminin oluşmayacağı ortaya konmuştur.

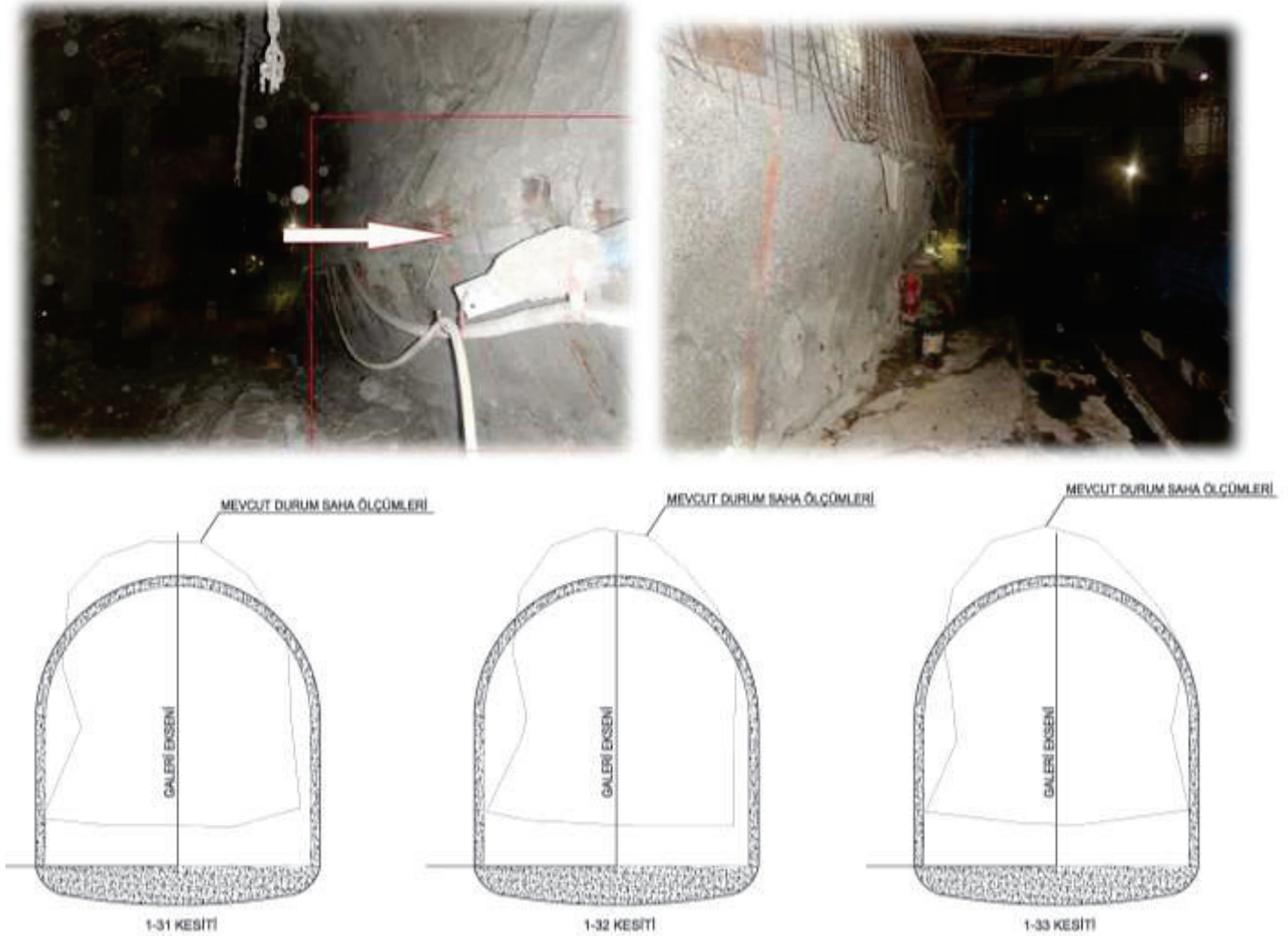
ABSTRACT: İzmir Kınık Mine, which is the deepest underground lignite mine in Turkey, has a great importance due to the tectonic structure of the region where it is located. The 900 m deep Kınık Underground Coal Mine consists of a main gallery and 2 main shafts. Over time, deformations have occurred on the supports of the pump station area, which is one of the mine's operation galleries, in a way that will affect the operation of the gallery. In order for the gallery to function properly, the need to renew the support design has emerged. Considering the current conditions, a new support was designed for a gallery excavated at a depth of about 900 m from the surface and a tectonically active region, and it was revealed by numerical analysis that no instability problem would occur in the proposed supporting system.

1 GİRİŞ

Derin kömür madenlerinde, yeraltı açıklıkların kazısı sırasında ve sonrasında açıklık geometrisinde büyük deformasyonlar meydana gelebilir. Bu durum açıklığın içerisinde yer aldığı kaya kütlelerinin özellikleri, yerinde gerilme şartları ve kaya kütlelerinin sahip olduğu jeoteknik yapıdan kaynaklanmaktadır.

İncelenen yeraltı kömür madeni Türkiye'nin en derin yeraltı maden işletmesi olup, yaklaşık 900 m derinlikte üretim faaliyetleri sürdürülmektedir. İşletmede büyük hazırlıklar kapsamında Servis Kuyusu bağlantı galerilerinden (tünellerinden) Pompa İstasyonu ve Kuzey İnset galerileri önceki yıllarda Çin Halk Cumhuriyeti'nden gelen firmalar tarafından açılmış ve tahkim edilmiştir. Bu galerilerde açılmayı takip eden yıllarda 1.5 m'lere varan konverjanslar ve

deformasyonlar oluşmuş ve geline noktada yeraltı kömür işletmesinin sürdürülebilirliği bakımından çok önemli olan bu galerilerin/tünellerin yeniden tamir-taramaya tabi tutulması durumu kaçınılmaz olmuştur (Şekil 1).



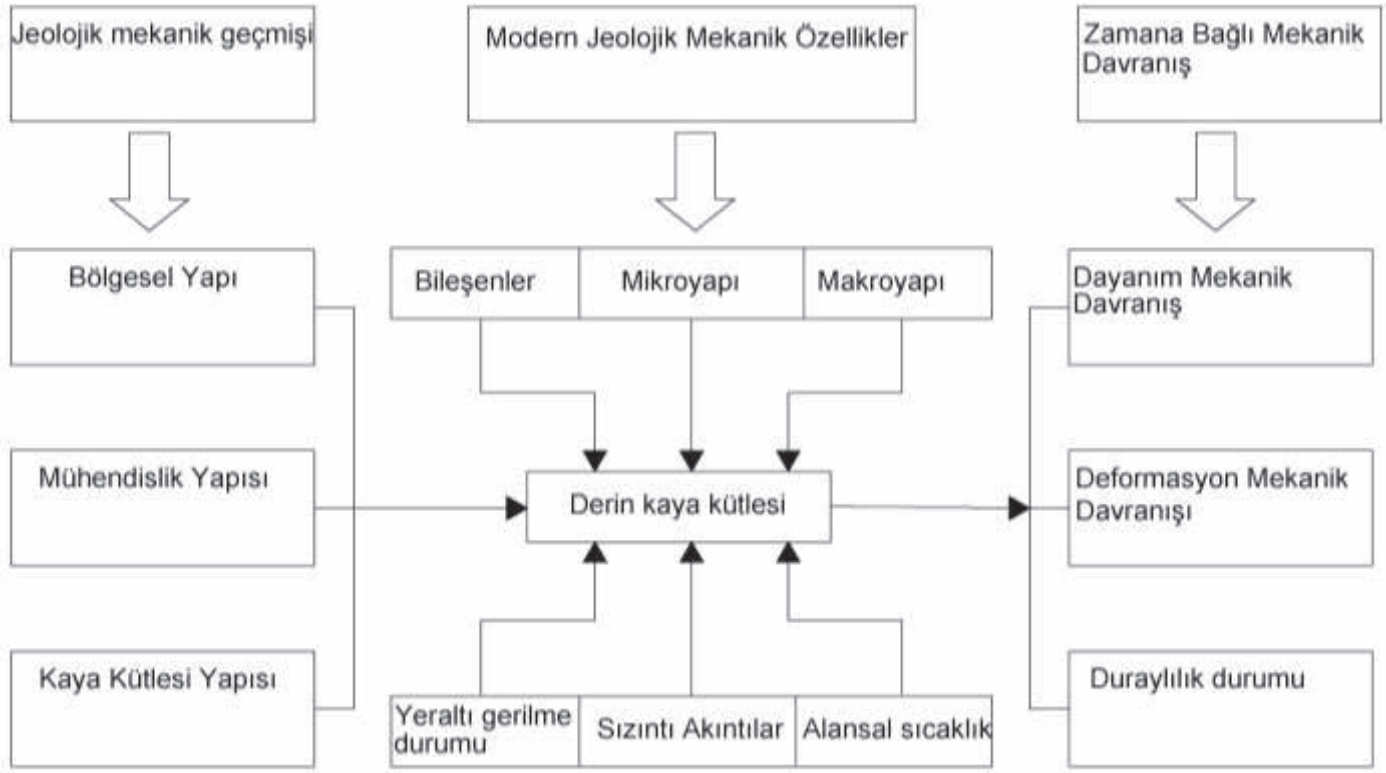
Şekil 1. 1. Bölge pompa galerisi deformasyon gözlemleri ve enkesit deformasyon ölçümleri

1.1 Önceki Çalışmalar

Derin kömür madenciliğinin yapıldığı birçok ülkede (Avustralya, Kanada, Çin, Güney Afrika ve ABD) son yıllarda, bu konuda kapsamlı araştırmalar yapılmıştır (He, 2006).

Derin kömür madenciliğinde açıklığı çevreleyen kaya kütlelerinin deformasyon mekanizması belirli derinlikteki performansı (gevrek davranış sonucu çatlama ve sünek yapılarda göçme), kaya kütlelerinin maruz kaldığı farklı sınırlayıcı gerilme koşulları ve gerilmeleri altında değişkenlik göstermektedir (Şekil 2).

Yeraltı açıklığının yer aldığı kaya kütlelerinin davranışı üzerinde zaman etkisi ve açıklığın sahip olduğu yüksek çevreleme basınçları da kaya kütlelerinin deformasyon davranışı üzerinde önemli bir etkidir (He ve Sousa, 2012).



Şekil 2. Büyük derinliklerde kaya kütlesinin jeomekanik özelliklerini belirleyen karakteristikler (He ve Sousa, 2012)

Süreksiz ortamlarda; (diskontinuum) gerilme - dağılımının, gerilmelerin birinden ötekine aktarılırken homojen kalmadığı; gerilme akılarının şiddet ve yönlerinin değişmelere uğradığı bilinmektedir. Bunun nedenleri arasında; birbirlerine komşu süreksizlik yüzeylerinde farklı pürüzlülüklerin bulunması ve bu nedenle yüzeylerin birbirlerine ancak belirli noktalarda temas etmesi de vardır. Gerilmeler bu toplam dokanak yüzeylerinden iletildiği ve bu dokanak alanı genel süreksizlik yüzeyinden çok daha küçük olduğu için, bu kesimlerde büyük gerilme yoğunlaşmaları, dolayısıyla daha büyük deformasyonlar, plastikleşmeler ve yenilmeler meydana gelecektir. Monolitik (Tek cisim ortamı – kaya malzemesi) ortamda yenilme dayanımlarının çok altında bulunan yükleme değerleri, böylece polilitik (çok cisim ortamı = kaya) ortamlarda yenilmelere neden olabilecektir (Şekil 3).



Şekil 3. U çelik profilde gözlenen deformasyon (He ve Sousa, 2012)

Araştırmalar bakir ortamda açılan yeraltı açıklıkları için ikincil gerilme durumu oluşumunun başlıca üç «hareketlilik türü» ile belirlenebileceğini ortaya koymaktadır (Vardar, 1977);

- 1) Kaya içinde yenilme olmaksızın deformasyonların zamanla sönümlenmesi ile sonuçlanan “pekleşme hareketliliği”
- 2) Belirli zaman aralıklarında ani yenilme ve akma olaylarıyla birbirini izleyen ve zamanla sönümlenen “denetlenebilen hareketlilik”
- 3) Kaya yapısının tümüyle yenilerek çökmesi ile sonuçlanan, çok sayıdaki, ani ve giderek sıklaşan deformasyon artışlarına bağlı “güvensiz hareketlilik” tir.

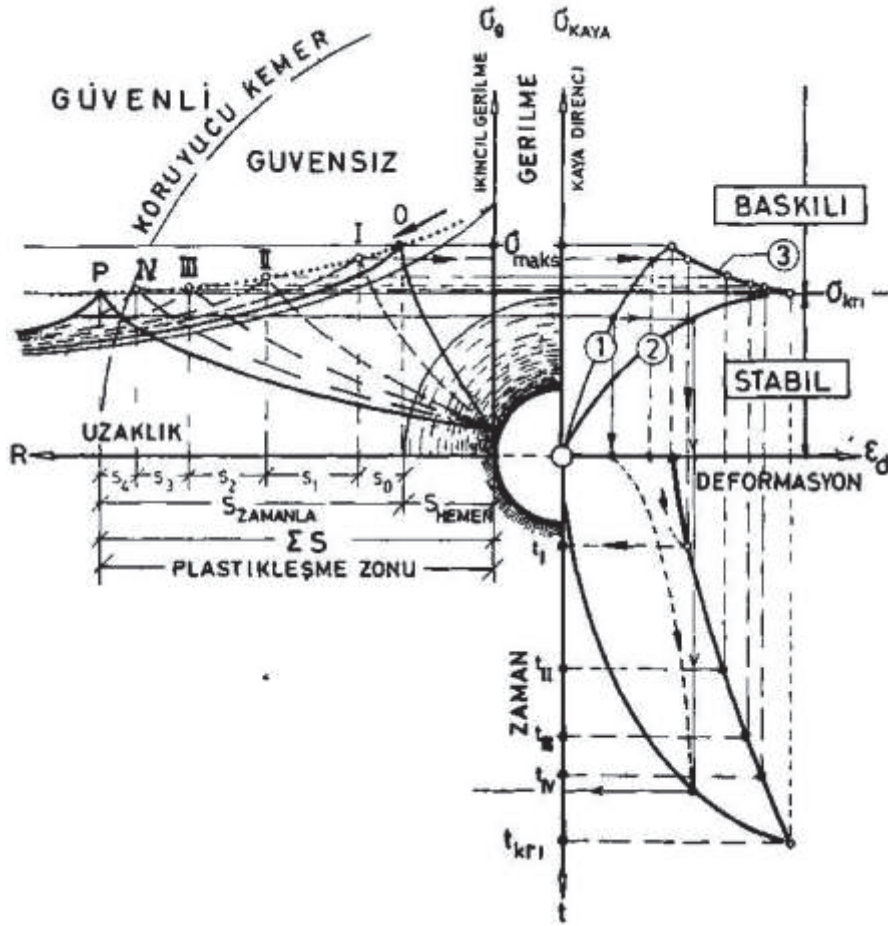
Madenlerde açılan boşlukların duraylılığına (stabilitesine) doğrudan ve birinci derecede etkileyen gerilmeler, boşluk duvarını çevreleyen teğetsel gerilmelerdir. Kaya kütlesi bu zorlamaların şiddetine bağlı olarak farklı davranışlar gösterir, ikincil gerilme durumunun oluşumu sırasında görülen bu etkin gerilmenin değeri, eğer kaya kütlesinin kritik kalıcı direncinden daha küçük ise, kaya kütle yapısı “sağlam” dır (Vardar, 1977).

Hemen ve/veya zamana bağlı kırılma ve gevşemelerin görülebilmesi için, teğetsel gerilme şiddetinin kayanın kalıcı direncini aşması gerekir. Bu durumda “baskılı kaya”dan söz edilir. Oluşan teğetsel gerilmelerin kayanın ani kırılma direncini aşması halinde, kazıya bağlı oluşacak plastik zon bölgesinde gecikmeksizin akma ve kırılmalar meydana gelir ve açıklık çevresindeki kaya kütlesi plastikleşerek gevşer. Bu bölgeyi çevreleyen kaya yapısı zamana bağlı olarak deforme olur ve gevşer. Bu olaylar Şekil 4’de gösterildiği gibi 3 aşamada meydana gelir;

1. Aşama: (Aldatıcı gerilme kemerlenmesi) Kazı sonrasında, ani gevşeme bölgesini çevreleyen kısım, teğetsel gerilmelerin etkisi altında sıkışır. Akrı üzerindeki gerilmeler altında zamana bağlı olarak kırılma emri almış olan kesim, sünmeye ve giderek kırılma direncini kaybetmeye başlar. Bu sırada kaya içinde çekme ve kesme çatlakları gelişir. Bunun dışındaki bölgelerde ise, hiçbir kırılma ve akma olmaksızın zamanla pekleşme görülecektir (Vardar, 1981).

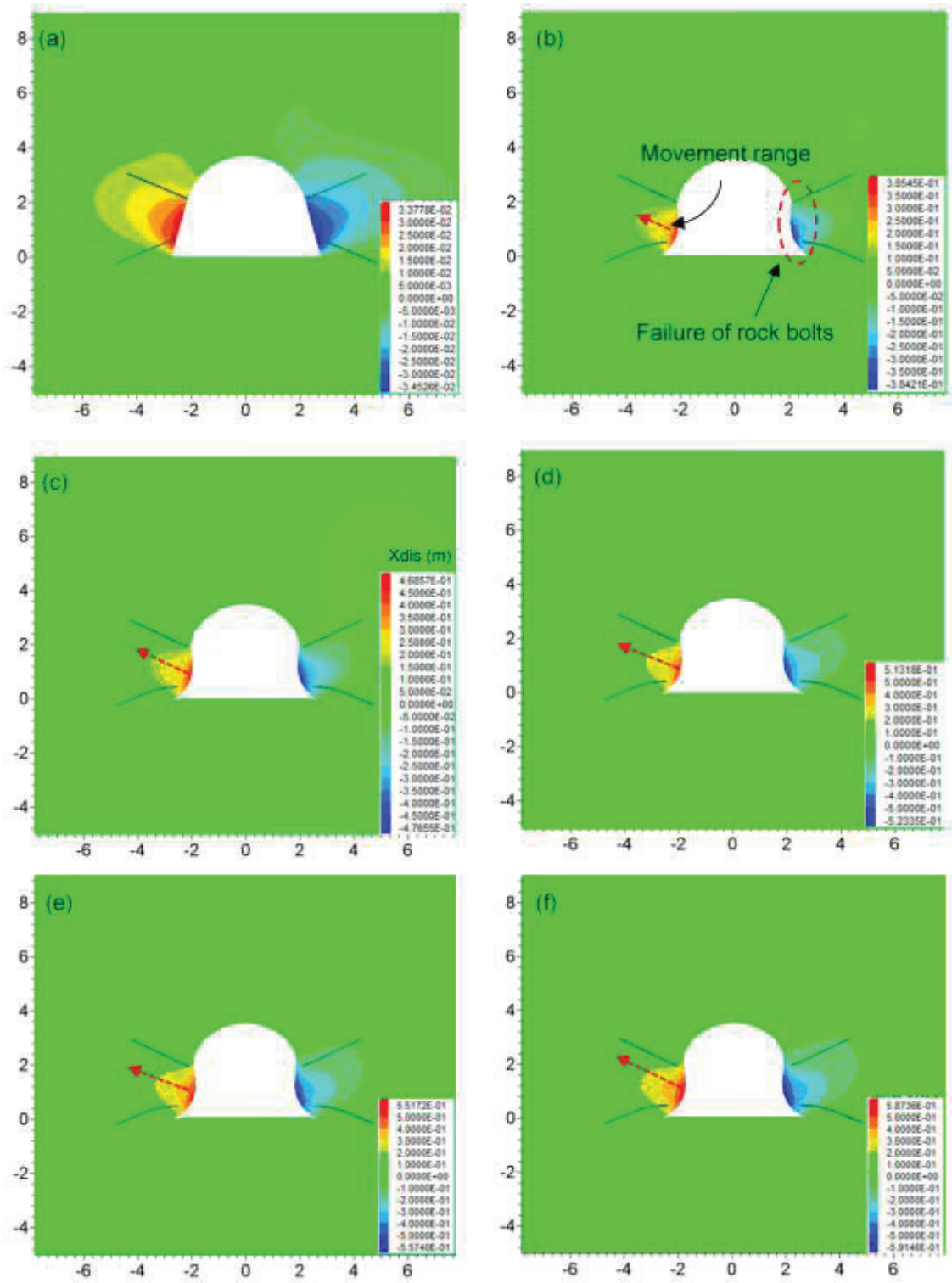
2. Aşama: (Dinamik, sıçramalı kırılma devresi) Gerilmeler altında, geçici ve aldatıcı bir kemerlenme oluşturan bölge içindeki herhangi bir kesimin kırılması, bu zonun tamamının aniden kırılarak, gevşemesine ve taşıma direncinin azalmasına neden olur. Böylece etkin gerilmelerin yoğunluk noktaları, boşluk çevresinden uzaklaşarak daha içerilere kayar. Bu durumda, gerilmelerin uç değerleri, gevşeme bölgeleri taşıma dirençlerinin belli bir bölümünü hâlâ koruduklarından, giderek azalır. Aynı ilkelerle; bu sıçramalı, kırılma bölgeleri oluşumu, gerilme uçlarının altına düşmesine kadar sürer gider. Boşluğun çevresi, üst üste geçen gevşeme halkalarıyla donanır (Vardar, 1981).

3. Aşama: (Kalıcı koruyucu kemerin oluşumu gerçek gerilme kemerlenmesi) Gerilme değerlerinin altına düşmesinden sonra, bu bölgelerde «pekleşme süreci» başlar. Statik denge tümüyle kuruluncaya kadar, gerilme ve deformasyonları homojenleştirici bir kararlı hareketlilik göze çarpar. Boşluğu çevreleyen, çok sayıdaki plastik bölge halkalarının üzerini, yüksek gerilmeleri taşıyabilen bir koruyucu kemer sarmar (Vardar, 1981).



Şekil 4. Zamana ve kayanın taşıma direncine bağlı olarak ikincil gerilme durumunun oluşumu ve duraylılık ilkeleri (Vardar, 1981)

Sun vd. (2020) çalışmasında derin kömür madeninde açılmış olan galerilerde duraysızlık ve deformasyon mekanizmasını sistematik olarak incelemişler ve hazırlık galerilerinin duraylılığının korunmasına yönelik bazı öneriler getirmişlerdir. Çalışmada hazırlık galerilerinde oluşan deformasyonların zamana bağlı davranışı nümerik modelleme ile incelenmiştir (Şekil 5). Analizlerde 3, 15, 30, 60, 150 ve 300 günlük zamana bağlı deformasyonlar belirlenerek, açıklık çevresinde gelişen plastik zonun kalınlıkları elde edilmiştir. Bu analizlerde özellikle açıklıkta oluşan deformasyonlar incelendiğinde galeri yan duvarlarını oluşturan kaya kütlelerinin reolojik davranışında kademeli olarak arttığı görülmüştür. Burada özellikle kömür içerisinde açılmış olan galeride kömür kütlelerinin deformasyonu ve plastik akış deformasyonu belirlenmeye çalışılmış ve ayrıca, galeri açıklığının deformasyon davranışı sadece yoldaki yer değiştirmeler ile sınırlı kalmayıp kaya kütlesi içerisinde de artışlar gözlenmiştir. Burada yapılan analizlerde galeri geometrisinin yanı sıra, kömür kütlelerindeki hareket aralığının artması (Şekil 5, kırmızı kesikli ok) sonucu 15 gün sonra kaya sapsamalarının tahkimat özelliklerini ve kullanımlarını yitirmiş olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Kömür galerisinde zamana bağlı yatay yer değiştirme büyüklükleri (eksen birimi, m; x yer değiştirme açıklaması, m: (a) 3 gün (b) 15 gün (c) 30 gün; (d) 60 gün; (e) 150 gün; (f) 300 gün (Sun vd., 2020)

1.2 Yöntem

Deformasyona uğramış mevcut galerilerin/tünellerin tamir tarama öncesi teknik açıdan incelenmesi amacıyla bir takım gözlem ve yerinde sondajlı inceleme çalışmaları 2021 ve 2022 yılları içerisinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm çalışmalar sonucunda öngörülen tamir tarama programı ve uygulama projeleri oluşturulmuş olup, halihazırda ekipler tarafından tamir-tarama ve yeniden tahkimat işlemleri Kasım 2022 itibarıyla sürdürülmektedir.

Bu kapsamda çalışma alanı 7 bölgeye ayrılarak, 3 farklı tip kesit için analiz/tasarım çalışmaları yapılmıştır. Bu kesitler kullanımda gerekli olan gabari ve kullanım olanaklarına uygun olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil 6).

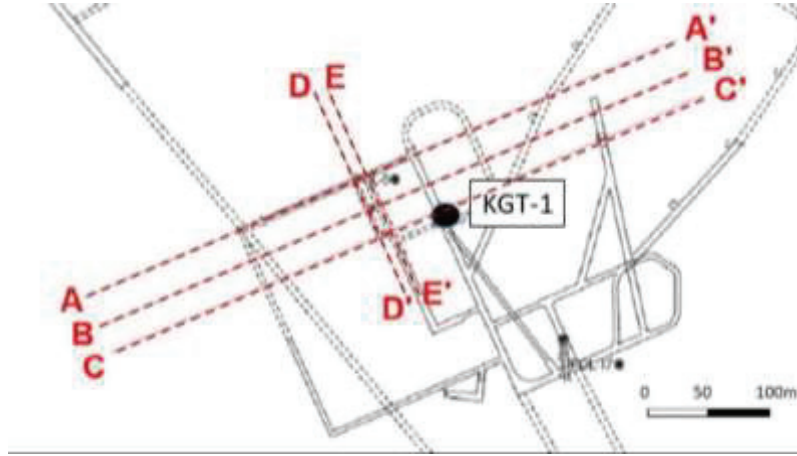


Şekil 6. Çalışma bölgeleri lokasyon haritası

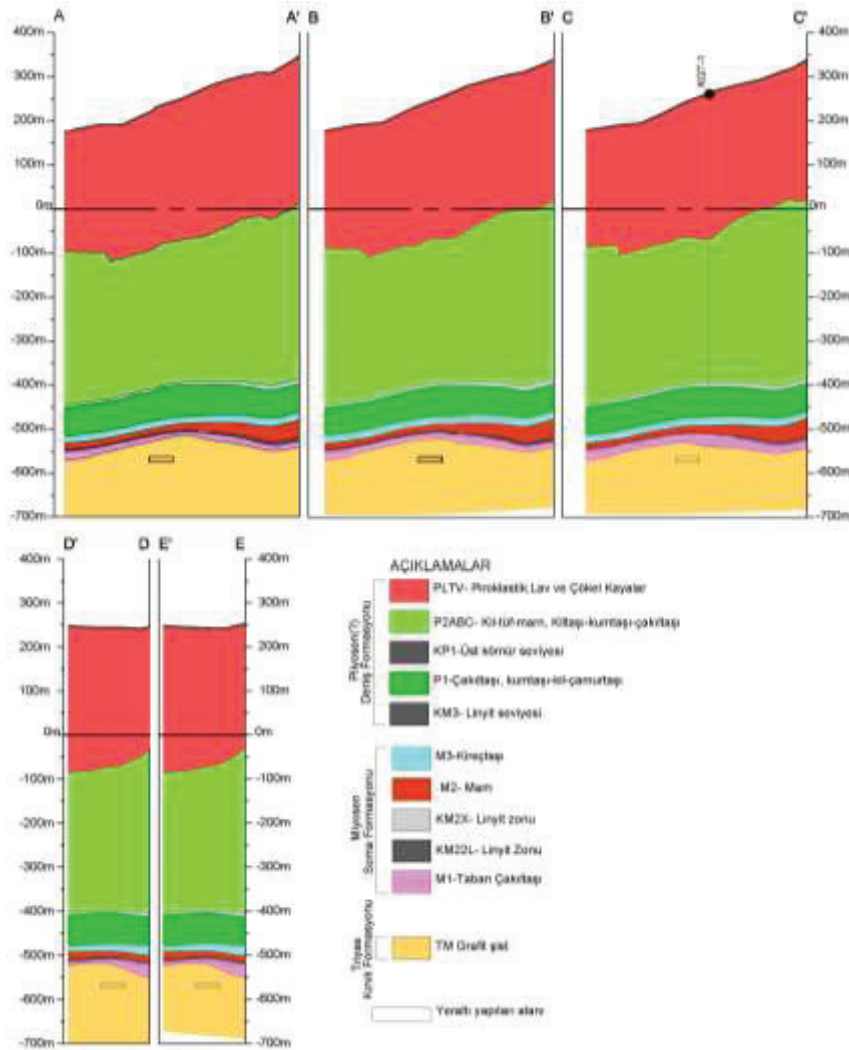
Tip-1 Pompa bölgesi olarak geçen kısım için bölgedeki mevcut şartlar göz önüne alınarak hazırlanmıştır. Tip-2 yaklaşık 25 m² alana sahip olacak bir kesit olarak tasarlanmıştır. Bu kesit 2. 4. 5. ve 7. bölgelerde kullanılacaktır. Tip-3 Kesiti havalandırma kanallarının bulunduğu 3. ve 6. Bölge tip kesitidir. Bu bölge havalandırma kanalları bulunmasından kaynaklı olarak daha geniş bir kesit alanına sahip olması gerekliliğinden dolayı yaklaşık 30 m² alana sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

2 JEOTEKNİK KOŞULLAR

Pompa istasyonu ve ilgili yapı alanında bulunan kaya türü dağılımları ve bunların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleme amacıyla jeoteknik maden modeline ve özellikle KGT-1 jeoteknik sondaj bilgilerine dayandırılmıştır (Şekil 7. ve 8).



Şekil 7. Pompa istasyonu ve ilgili yapı alanlarından geçen kesit yerleri ve KGT-1 sondaj yeri (Fugro, 2019)



Şekil 8. Pompa istasyonu ve ilgili yapı alanlarından geçen kesit yerleri ve KGT-1 sondaj yeri (Fugro, 2019)

Yapılar grafitişist içerisinde kalmaktadır. Grafitişist üzerinde ise Soma ve Pliyosen Deniz formasyonlarına ait volkanik ve çökel kayalar bulunmaktadır (Fugro, 2019).

Şekil 8’de pompa istasyonu ve ilgili yapı alanlarındaki jeolojik durum modeli verilmektedir. Modele göre yeraltı yapıları Triyas metamorfik kayaları içinde kalmaktadır. Metamorfik kayalar baskın olarak grafitişist ile temsil edilmektedir.

Pompa istasyonu ve ilgili yapılar yüzeyden yaklaşık 930 m derinde grafitişist içerisinde inşa edilmiştir. Grafitişist yapılar üzerinde 32-42 m arasında değişen kalınlıklarda devam etmektedir. Sonrasında ise Soma ve Deniz formasyonlarının birimleri farklı kalınlıklarda örtünün diğer kesimlerini oluşturmaktadır. Pompa istasyonu ve ilgili yapılar esas olarak grafitişist içerisinde bulunmakta ve önemli bir örtü kalınlığı oluşturmaktadır. Dolayısıyla, bu birim için yeraltı yapılarının tasarım parametreleri belirlenmiştir

Galeri alanlarında karşılaşılabilecek beklenen grafitişist birimine ait kaya kütle parametreleri tayini, Hoek ve Brown (2002) tarafından önerilen eşitliklere göre belirlenmiştir. Kaya kütle parametreleri tayin edilirken grafitişist birimine tayin edilen GSI değeri, birime ait sağlam bir kaya parçasının tek eksenli basınç dayanımı, malzeme sabiti, örselenme faktörü ve yine birime ait sağlam bir kayanın elastisite modülü gibi değerleri dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, kaya kütlelerine ait deformasyon modülü (E_m), kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (Φ) değerleri tespit edilmiştir (Çizelge 1).

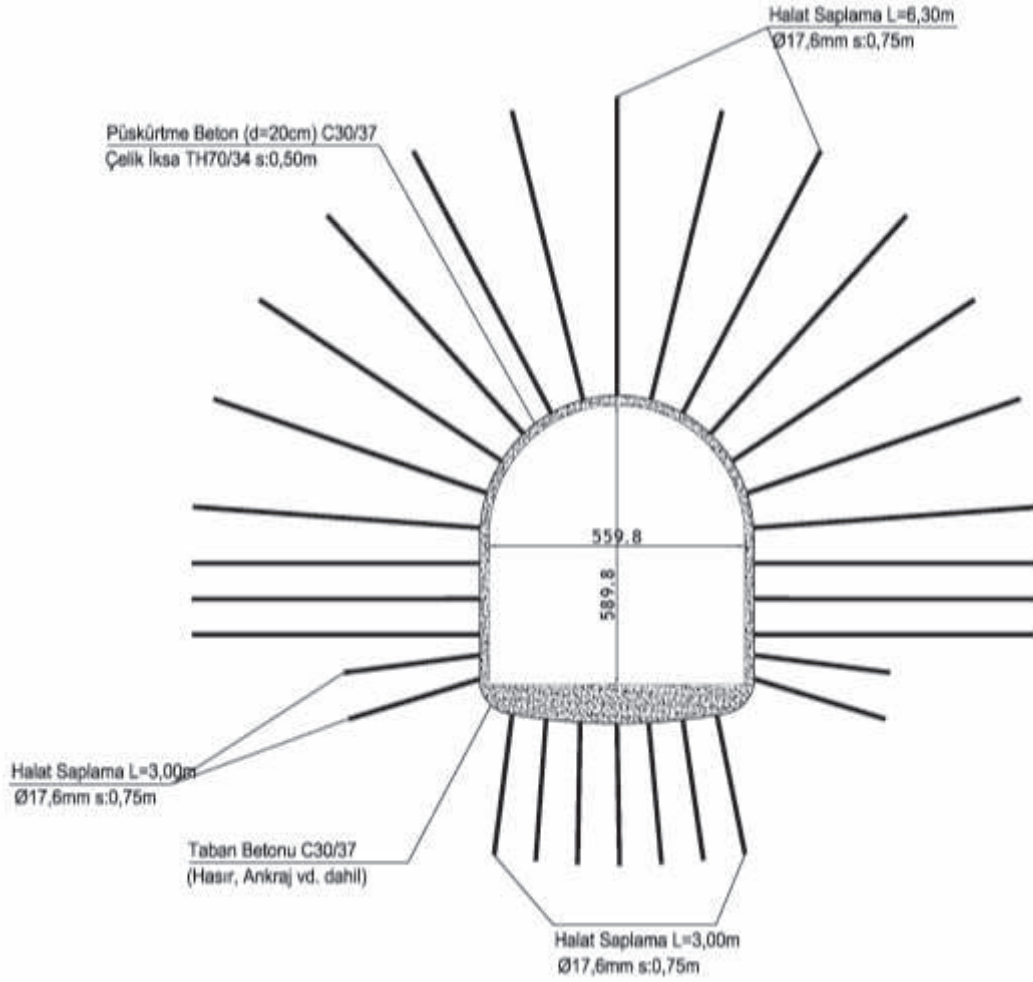
Çizelge 1. Grafitişist birimi kaya kütle parametreleri özet tablosu (Fugro, 2019)

TM							
GSI	Serbest Basınç Dayanımı (UCS) Mpa	Malzeme Sabiti (mi)	Örselenme Faktörü (D)	Elastisite Modülü (E_i)	Kohezyon (c) kPa	İçsel Sürtünme Açısı (Φ) (°)	Kaya Kütleli Deformasyon Modülü (E_m) Mpa
25	19	12	0,5	7,44	458	18	264

3 İNCELENEN GALERİLER İÇİN TARAMA VE TAHKİMAT SİSTEMLERİ

3.1 Pompa İstasyon Galerisi/Tüneli Uygulanmış Olan Tarama Öncesi Destek Sistemi

Aşağıda verilen kesit için pompa istasyon galerisinin/tünelinin uygulanmış olan destek sistemi verilmiştir (Şekil 9). Dış kaplamada 20 cm C30/37 püskürtme betonu, 0.5 m aralıklı TH34 çelik iksa, kesit üst yarısında 6.3 m uzunluğunda 17.8 mm çaplı 0.75 mm aralıklarda halat saplama ve taban ve alt yarının ilk iki sırasında 3 m uzunluğunda 17.8 mm çaplı 0.75 mm aralıklı halat saplama kullanılmış olduğu görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Pompa istasyon galerisi/tüneli için uygulanmış olan destek sistemi (Fugro, 2019)

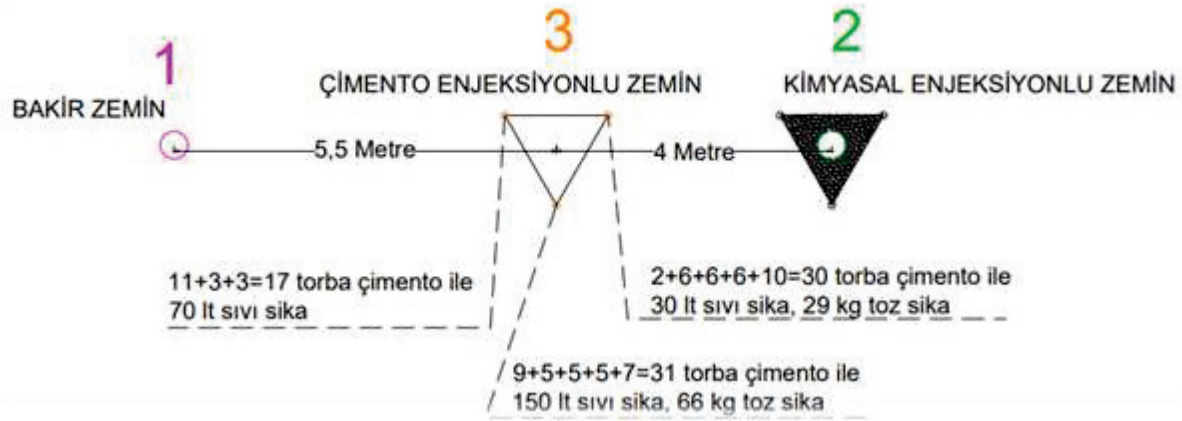
3.2 Tarama Öncesi Kaya Kütlelerini İyileştirmeye Yönelik Yapılan Çalışmalar

Enjeksiyon, güçlü ampirik özelliklere sahip en popüler jeoteknik süreçlerden biridir. Yeraltı suyu girişini yalıtım, yeraltı madenciliği ve yeraltı alanı geliştirmede toprak ve kaya kütlelerini yerinde güçlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Enjeksiyon amaçlı kullanılan malzemeler, çimento ve kimyasal bazlı olmak üzere iki genel kategoride sınıflandırılabilir. Çimento harçları, geniş boşluklu granüler zeminlerde veya geniş eklem açıklıklarına sahip eklemli kaya kütlelerinde başarıyla kullanılmaktadır. Kimyasal enjeksiyonlar ise çimento süspansiyonlarının enjekte edilemediği veya penetrasyonlarının çok sınırlı olduğu, çok küçük boşluk boyutu veya dar derzleri olan kaya kütlelerine sahip zeminlerde kullanılmaktadır. Tarama yapılacak ve yeniden destek tasarımı yapılan galeri için performans amaçlı olarak birden fazla zemin içi enjeksiyon denemesi gerçekleştirilmiştir.

Çimento ve kimyasal enjeksiyonun zemin içi penetrasyon ve konsolide durumu belirlemek amacıyla Şekil 10'da uygulama detayları verilen bir dizi deneme yapılmıştır. Çizelge 2'de ise Pompa galerisi çimento enjeksiyonu sondaj delgisi karot veri dosyası verilmiştir.

Yapılan çalışmalarda çimento enjeksiyonunun zemin içi sağlamlaştırma yönünden etkisi görülmemiştir. Tüm yapılan deneme çalışmaları sonucunda kimyasal enjeksiyonun zemin içerisinde göreceli olarak daha iyi sonuçlar verdiği belirlenerek galerinin taranması öncesi kimyasal enjeksiyon uygulamasının yapılmasında yarar görülmüş ve önerilmiştir.



Şekil 10. Çimento ve çift bileşenli kimyasal enjeksiyon uygulama koşulları

Çizelge 2. Pompa galerisi/tüneli çimento enjeksiyonu sondaj delgisi karot veri dosyası

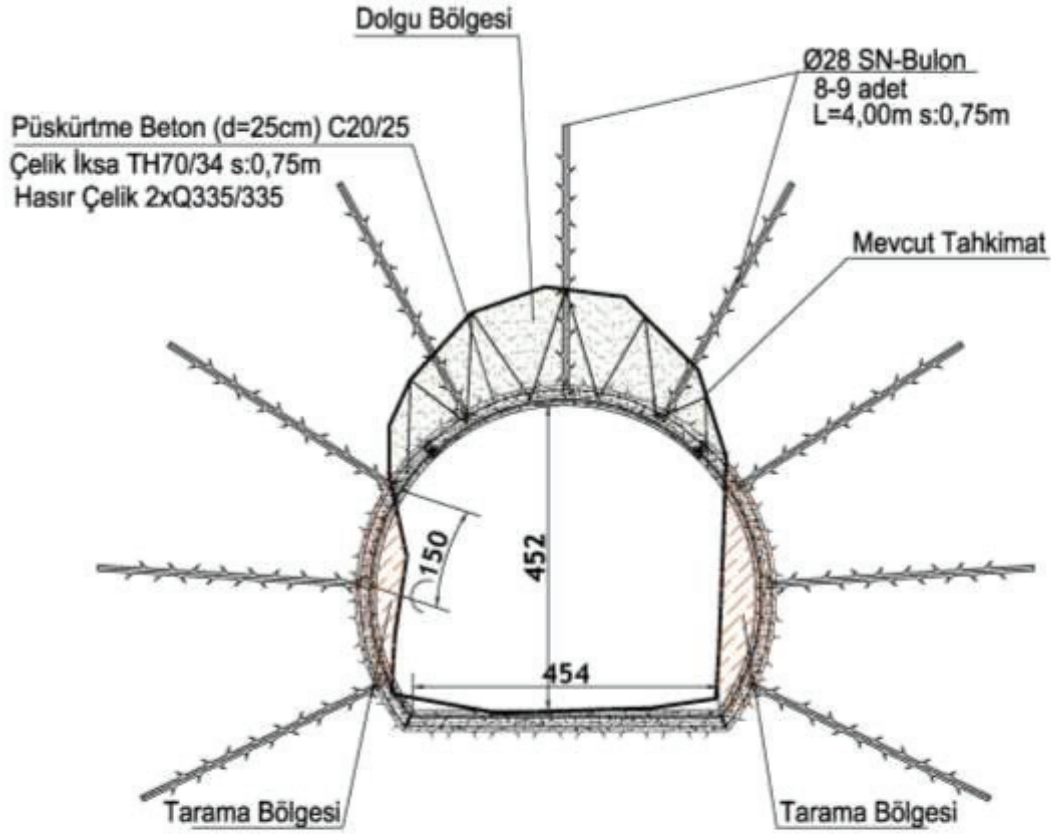
Tarih: 21.04.2		Kuyu Pompa Galerisi Çimento Enjeksiyonu Karot Kontrol Sondajı									
Jeolog											
Sandık No	Manevra Başlan	Manevra Son	Tabakanın Başlan	Tabakanın Son	Tabak a	REC (cm)	RE C	RQD (cm)	litho cod	Açıklamalar	
1	4,00	4,2	4,00	4,2	20,00	20	100	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
2	4,20	4,6	4,20	4,6	40,00	27	68	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
2	4,60	5,1	4,60	5,1	50,00	50	100	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
2	5,10	5,4	5,10	5,4	30,00	40	100	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
2	5,40	6,0	5,40	6,0	60,00	50	100	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
2	6,00	6,5	6,00	6,5	50,00	50	100	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
2	6,50	7,0	6,50	7,0	50,00	50	100	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
2	7,00	7,5	7,00	7,5	50,00	37	74	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
2	7,50	8,0	7,50	8,0	50,00	33	66	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
3	8,00	8,5	8,00	8,5	50,00	24	48	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
3	8,50	9,0	8,50	9,0	50,00	43	86	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
3	9,00	9,5	9,00	9,5	50,00	41	82	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
3	9,50	10,	9,50	10,	50,00	41	82	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
3	10,00	10,	10,00	10,	50,00	35	70	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
3	10,50	11,	10,50	11,	50,00	47	94	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
3	11,00	11,	11,00	11,	50,00	44	88	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
3	11,50	12,	11,50	12,	50,00	50	100	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
4	12,00	12,	12,00	12,	50,00	46	92	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
4	12,50	13,	12,50	13,	50,00	50	100	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
4	13,00	13,	13,00	13,	50,00	43	86	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
4	13,50	14,	13,50	14,	50,00	50	100	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
4	14,00	14,	14,00	14,	50,00	41	82	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
4	14,50	15,	14,50	15,	50,00	50	100	0	GROV	Grovak, koyu gri renkli, kırıklı-	
Ortalama REC(%)						88					

3.3 Tarama Çalışmaları ve Yeni Destek Tasarımı

Yapılan tüm ön çalışmalar sonucunda 3 bölgeye ayrılan galerilerden/tünellerden 1 inci bölge olarak tanımlanan bölümünün taranması önerilmiştir. Tarama işleminin iş güvenliği ve işçi sağlığı bakımından dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmesi de vurgulanarak öncelikle kimyasal enjeksiyon ile gerilme dağılımı bozuk olan ve oldukça bloklu ve parçalı dağılmış halde bulunan galeri/tünel yan duvarlarındaki birimlerin konsolide edilmesi işlemi uygulanmıştır.

Uygulama projesi müellifi olan Progeo (2022) ile birlikte yürütülen tasarım çalışmaları sonunda, tarama yapılan galerinin/tünelin mevcut planlanmış kesitinin teknik açıdan tüm bileşenler dikkate alınmış (üretim koşulları, iş güvenliği, havalandırma, lojistik v.b.) ve kesitin bir miktar küçültülerek tasarımı yapılmıştır (Onargan, 2022).

Galerinin yerinde açılıp belli bir deformasyona uğramış olması sebebiyle yeni yapılacak olan tahkimatta kullanılacak profiller, sabit iksa olarak tasarlanmıştır. Tahkimat kalıcı sistem olarak çalışacağından ve bölgenin yüksek deprem aktivitesine sahip olması göz önünde bulundurularak, tünel kesiti statik ve dinamik koşullar için modellenmiş ve numerik analizleri yapılmıştır.



*Destekleme sağlaması amacıyla 1. bölge mevcut iksa ve yeni destek elemanları arasında kalan boşluğa yapılacak köpük dolgu öncesi çelik iksaların profiller ile birbirine bağlanması önerilmektedir.

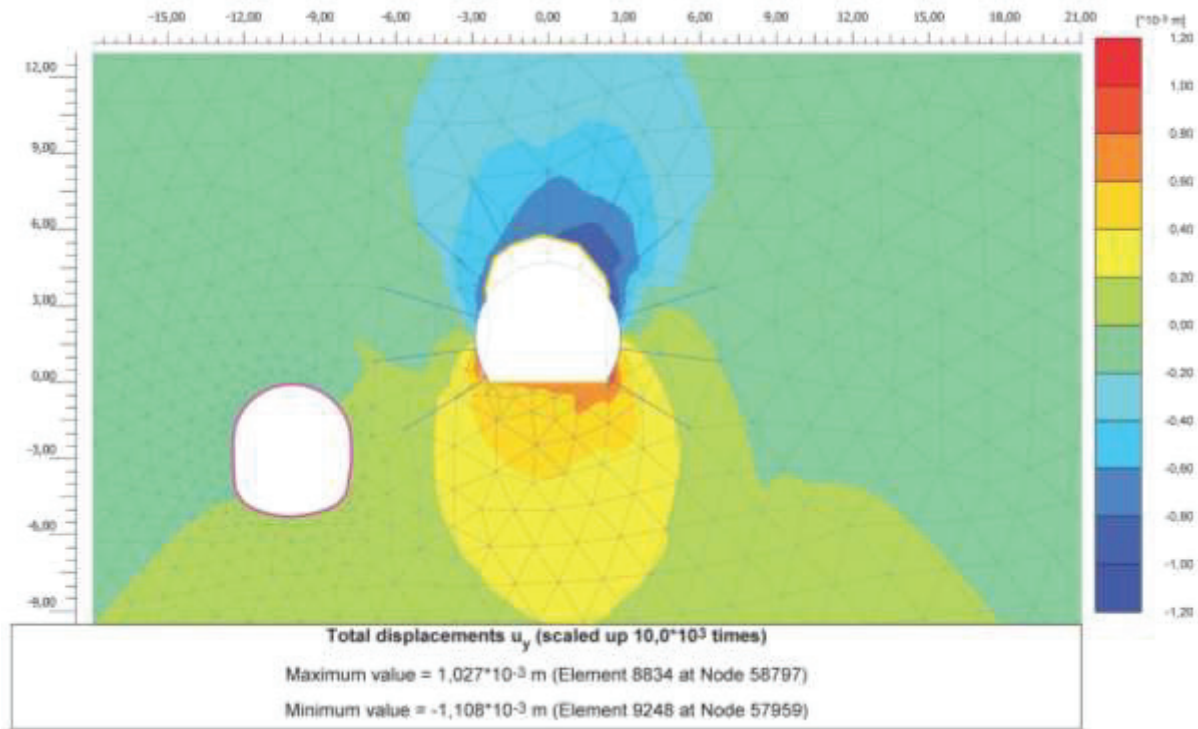
Şekil 11. Tarama galerisi/tüneli tasarım kesiti (Progeo, 2022)

Analizlerinde kullanılacak birimlerin c (kohezyon), ϕ (içsel sürtünme açısı), γ (birim ağırlık) ve E (elastisite modülü) değerleri mevcut durumda meydana gelen deformasyonlara göre yorumlanarak RocLab programı yardımıyla belirlenmiştir.

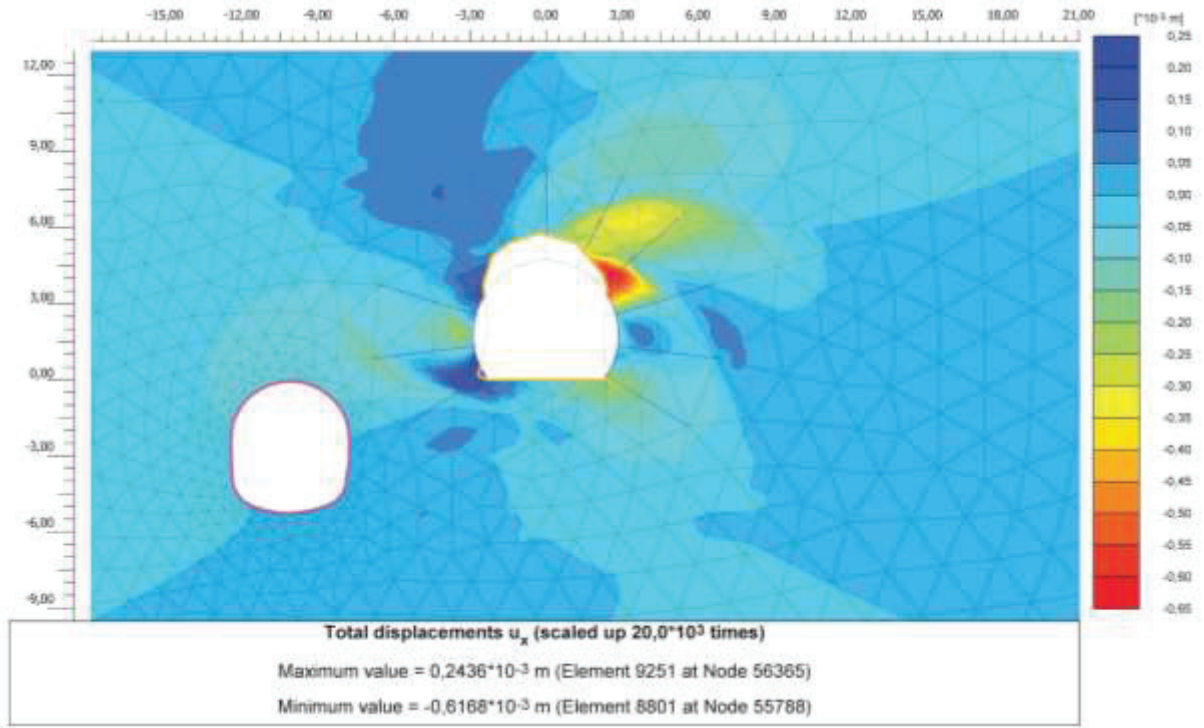
Çizelge 3. Birimlere ait kaya kütle parametreleri özet tablosu (Progeo, 2022)

Jeolojik Birim	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	GSI	m_i	Kohezyon (kPa)	Sürtünme Açısı (°)	Deformasyon Modülü (kPa)
Piroklastik, Lav Ve Çökel	25.0	35	15	1114	29.47	971.900,00
Kil-Tüf-Marn, Kıltaşı-Kumtaşı-Çakıltaşı	38.8	35	12	1602	27.59	704.260,00
Üst Kömür Seviyesi	21.13	25	4	466	16.47	159.220,00
Çakıltaşı,Kumtaşı-Kil-Kireçtaşı	32.3	35	12	1333	27.59	430.950,00
Marn	50.5	25	10	1958	26.09	2.075.350,00
Linyit Zonu	62.0	35	7	2121	23.26	851.690,00
Taban Çakıltaşı	21.13	25	4	466	16.47	159.220,00
Grafit Şist (Metamorfizmaya Uğramış Kıltaşı)	19.9	35	21	992	32.37	387.850,00
Grafit Şist (Metamorfizmaya Uğramış Kıltaşı)	41.0	35	7	1221	24.85	903.850,00

Grafitşist birimindeki bölüm için, ampirik yöntemler ile elde edilen destek sistemleri ve parametreler kullanılarak sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Analizler yapılırken mevcut durumda bulunan destekleme sistemi dikkate alınarak tasarım yapılmıştır. Ayrıca 1. Bölgeye paralel olarak ilerleyen pompa emiş galerisi analiz modelinde bulundurulmuş galerilerin birbirlerine olan etkileşimleri de yapılan analizlerde dikkate alınmıştır (Şekil 12 ve 13). Şekil 14’de ise saha uygulaması verilmiştir.



Şekil 12. İncelenen bölümde nümerik analiz ile elde edilen düşey deformasyon değerleri (Progeo, 2022)



Şekil 13. İncelenen bölümde nümerik analiz ile elde edilen yatay deformasyon değerleri (Progeo, 2022)



Şekil 14. Tarama galerisi/tüneli tasarım projesinin uygulanmış hali

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Derin kömür madenlerinde farklı tehlike türleri sonucunda risklerin yüksek olduğu bilinen bir husustur. İncelenen kömür madeni Türkiye'nin faaliyette olan en derin yeraltı kömür madenlerinden biridir. Derinliğe ve tektonizmaya bağlı olarak yerinde birincil gerilme durumlarının yüksek olduğu madende açılan yeraltı açıklıklarında gerilmelere bağlı yüksek deformasyonlar meydana gelmesi durumunda ayrıntılı analizlerin yapılması zorunludur. Polyak yeraltı kömür işletmesinde bugüne kadar yerinde yapılan incelemeler sonucunda tasarlanan ve uygulamaya konulan destek (tahkimat) sistemlerinin davranışları hakkında belirli bir tecrübe ve buna bağlı ampirik yaklaşımlar yazarlar tarafından belirlenmiştir.

Tarama yapılan 1 inci bölge pompa galerisinde/tünelinde galeri/tünel yan duvarları açılarak tarama işlemi gerçekleştirilmiş ve daha sonra kapalı ring oluşturacak şekilde TH 34 U profil geçme bağı ile çift kat hasır çelik, püskürtme beton ve SN ve IBO bulonlar ile tahkimat sistemi oluşturulmuştur. Tahkimat Sistemi ile kaya kütle etkileşimi halihazırda izlenmektedir. Şimdiye kadar yapılan gözlemlerde destek (tahkimat) sistem davranışının beklenen sınırlarda olduğu görülmektedir. Ancak, zamana bağlı davranışının da önümüzdeki süreçte izlenmesinde yarar görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Fugro, 2019. Polyak Eynez Enerji Elmadere Yeraltı Kömür İşletmesi Pompa İstasyonu Galerisi, Savak Yapısı, Emiş Cebi ve Emiş Galerisi Proje Hesap Raporu, Fugro Sial Yer Bilimleri Müşavirlik ve Mühendislik, 76 s, Ankara.
- He, M. ve Sousa, L.R., 2012. Large Deformation Analysis in Deep Coal Mines In China, Innovative Numerical Modelling in Geomechanics – Ribeiro e Sousa et al. (eds) © 2012 Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-61661-4, pp 333-353, London,
- He, M.C. 2006a. Rock Mechanics and hazard control in deep mining engineering in deep mining. 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Ed. Leung and Zhou, Singapore, p. 18. (in CD-Rom).
- Onargan, T., 2022. Polyak Eynez A.Ş. – Kınık / Elmadere kuyu dibi akrosaj ve bağlantı galerileri (tünelleri) tamir-tarama çalışmaları hakkında bilimsel ve teknik görüş raporu. Dokuz Eylül Üniversitesi Döner Sermaye Danışmanlık Hizmetleri, İzmir.
- Progeo, 2022. İzmir İli Kınık İlçesinde Bulunan Polyak Eynez Maden İşletmesi Tünellerine Ait Jeolojik – Jeoteknik Hesap Raporu, İzmir İli Kınık İlçesinde Bulunan Polyak-Eynez Maden İşletmesi Tünel Projelerinin Hazırlanması İşi, Progeo Proje Mühendislik Müşavirlik Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., 338 sayfa, Ankara.
- Sun, Y., Li, G., Zhang, J., ve Xu, J., 2020. Failure Mechanisms of Rheological Coal Roadway, Sustainability 2020, 12, 2885; doi:10.3390/su12072885
- Vardar, M., 1977. Zeiteinfluß auf das Bruchverhalten des Gebirges in der Umgebung von Tunneln. Inst. Boden und Felsm. Uni. Klie Heft 72.
- Vardar, M., 1981. Kayanın Zamana Bağlı Kırılma Davranışlarının Madenlerdeki Kaya Yapılarının Stabilitésine Olan Etkisi. Maden Fakültesi, Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Mekaniği Kürsüsü, İTÜ; İstanbul. ([d27688c61c5a172_ek.pdf \(maden.org.tr\)](https://www.maden.org.tr/ek/27688c61c5a172_ek.pdf))

First Experience in Turkey on The Use of Tunnel Reflection Seismic in Underground Mining

J. Hecht-Méndez

Amberg Technologies AG, Regensdorf-Watt, Switzerland

T. Dickmann

Amberg Technologies AG, Regensdorf-Watt, Switzerland

ABSTRACT: Geological exploration during the production stage of an underground mining projects is an important task for getting information about the ore bodies and the rock mass condition of the ore deposit. The most common prospecting method is the drilling of exploratory boreholes in extensive campaigns. However, they are time consuming and costly. Apart from probe drilling, there are a few methods that can be used in such a confined environment. One proven technology used in tunnelling works is Tunnel Seismic Prediction (TSP). By recording the full wave field of reflected body waves, it is possible to predict rock quality in terms of rock mechanical properties. In spring 2022, this technology was demonstrated at an underground mine in Turkey. Major tasks were to test its capabilities in the mine environment, to know the rock characteristics and to investigate the possibilities of TSP in the exploration of ore deposits.

1 REFLECTION SEISMIC IN UNDERGROUND MINES

The seismic reflection method has been extensively used for 1) ore prospection and 2) investigating the geometry of geological structures in hard rock environments (Ahmadi, 2015). In this method, seismic signals are generated at a given location and recorded by a series of sensors (e.g. geophones) deployed in form of arrays. Commonly, the seismic data acquisition layout corresponds to a profile located on the surface as shown in Figure 1a. The main advantage of the method relies on its high penetration depth (Malehmir et al., 2012). By analyzing reflected or diffracted waves traveling through the underground, imaging of geological structures is possible. Investigating the occurrence, spatial disposition and geometry of those geological structures is important for mitigating geological risk associated to underground works and for ore prospection in case that mineral deposits are associated to these structures.

In mining projects, reflection seismic is commonly employed in the exploratory phase. However, once the mine development starts as either open pit or underground, its applicability becomes limited. Particularly in underground mining, the use of surface seismic in production stage is almost impossible due to higher overburden as the mine deepens, presence of tunnels, shafts and caverns and the mine production process itself. Nevertheless, owing to the demonstrated reliability of the method, it becomes reasonable to look for alternatives for applying the method from “inside” the mine infrastructure.

1.1 Special Considerations For Mineral Prospection

As with any other geophysical technique some aspects must be carefully considered when applying them to specific targets. In case of mineral exploration, understanding such factors helps identify the applicability of the method and its capabilities and limitations. From our

experience, the following aspects are among the most important one for applying reflection seismic for ore prospection.

Type of commodity and genesis of the ore deposit: The type and genesis of the deposit plays a significant role. Reflection seismic shows its larger applicability in metallic ore deposits compared to other type of deposits. In massive ore deposits, for example, it can help delineate the boundaries of the deposit rather than the ore body itself at scales of meters to kilometers. In turn, if the ore mineral is associated to fractures, e.g., ore bodies in veins or within fault zones (lode deposits), seismic can be used for identifying the ore body directly in scales varying from meters to decameters. For disseminated deposits the use of seismic may not deliver useful information.

Physical properties of the ore deposit and host rock: In order to obtain reflections from a given boundary, enough contrast in the physical properties of density and wave velocities (acoustic impedance) should exist for instance between a host rock and an ore body.

Geometry and spatial disposition of the ore deposit: a favorable orientation of the investigation target with respect to the seismic layout used for data acquisition is fundamental. In order to map an ore deposit correctly, reflection signals from its entire perimeter would be required, which is technically very demanding and not feasible in practice. Therefore, the seismic array should be somehow deployed in a way that allows obtaining as much reflection signals as possible covering a large portion of the ore deposit.

Infrastructure of the mine development: As for surface seismic, the branched network of tunnels, shafts and caverns in underground mines poses a challenge for reflection measurements carried out directly from the underground infrastructure. In the best case, the volume to be investigated is free of additional tunnels and galleries. Although this requirement is not always easy to fulfil, various exploitation methods used in some developments seem to be more suitable for the use of seismic, e.g., underground caving. In the initial stage of sub level caving, seismic investigation can be done from the main gallery approaching the ore body. In later stages, further surveys may be directly done in each production drift.

2 TUNNEL SEISMIC PREDICION

The Tunnel Seismic Prediction method is based on seismic reflection that is used to map the structural features in the surrounding rock from inside of tunnel by observing and evaluating elastic body waves. With this method, an investigation range of 100 to 200 m ahead of the tunnel/gallery face and 50 m in the lateral directions from the axis of gallery is possible. The method requires a controlled seismic source such as dynamite or specialized impact hammer. The wavefronts travelling through the ground as compressional and shear waves (P- and S-waves) are reflected from interfaces having contrast in their physical properties. The ground motion caused by reflected waves is measured with 3-component sensors (accelerometers). By capturing the reflected elastic waves and their corresponding travel time, information about the rock mechanical parameters of the ground can be derived and important geomechanical parameters such as the dynamic modulus of elasticity, Poisson's ratio, shear modulus and bulk modulus can be determined. In hard rock, the TSP method has proven to be a reliable tool for performing seismic reflection measurements in the subsurface (Dickmann, 2020). The layout of a tunnel seismic reflection survey is shown in Figure 1b.

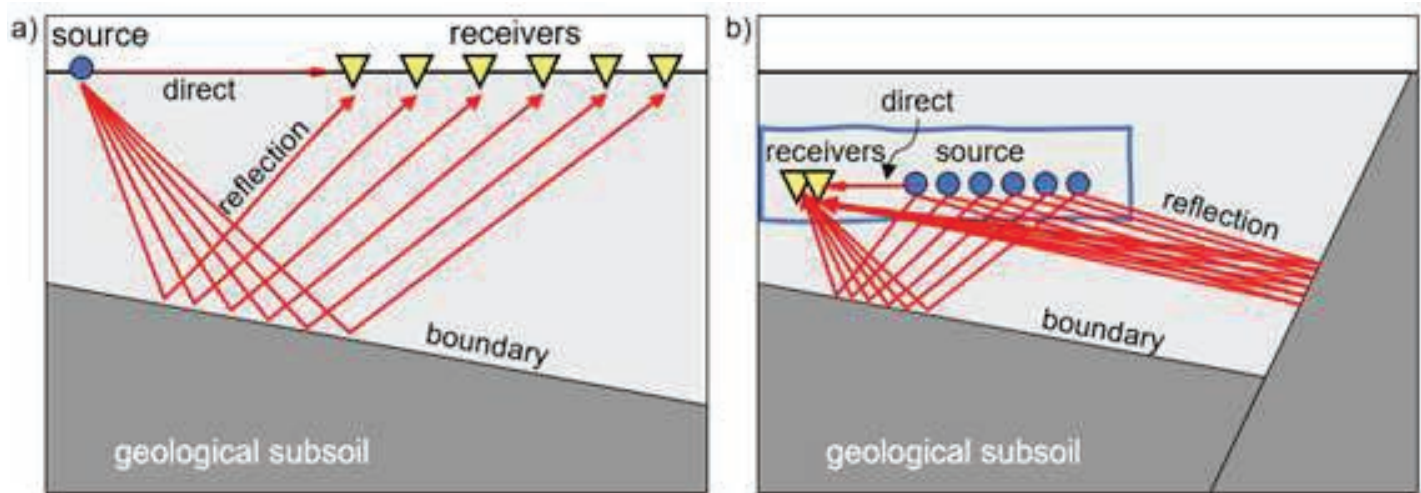


Figure 1. a) Seismic layout from the surface, b) Tunnel reflection seismic layout

Inside the tunnel, a series of closely spaced source points are used to generate seismic energy. Generally, one shot line along a tunnel wall is sufficient to obtain reliable data. However, it is meaningful to provide a second shot line in opposite wall in case of complex geological conditions or special applications. Like other methods, TSP is also subject to certain geological conditions. The TSP layout works most accurately for rock boundary orientations that intersect the tunnel axis at moderate to high angles. A certain strike and dip angle ($>25^\circ$) with respect to the tunnel axis must be assumed to become predictable by TSP.

3 SITE INFORMATION

The job site located in Turkey corresponds to an important Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) ore deposit regarded as one of the toughest underground mines since barren rock is clay. It is one of the major copper ore deposits and provides also other type of minerals such as zinc and lead. It consists of metamorphic rocks (mica schist and marbles) and volcanic and sedimentary rocks (pillow lavas and mudstone).

The copper field is located on a fault zone. This zone, of about 30 - 60 km wide, elongates from west to east along 500 km. Stratigraphically, the mine starts with pyrite-chalcopyrite scattered claying and chloritization. From top to bottom, pyrite, pyrite + chalcopyrite, pyrite + chalcopyrite + sphalerite, pyrite + chalcopyrite + magnetite or only magnetite diffused claying - chloritization and ends with occasional crack filling mineralization. The mineral mass dips $50^\circ - 60^\circ$ north. Mineralization fully occurs within pillow lavas.

3.1 Local Geology

In the gallery where the seismic campaign was done, high variability in rock types and rock mass condition is reported. According to the site's engineers, the first 35 meters from beginning of the gallery are dominated by moderately fractured clay-pyrite Basalt. It is followed by about 12 meters of Claypyrite – Chalcopyrite (one of the mineralization layers) and the remainder 12 meters of barren Clay rock. The latter two groups correspond to a weaker ground, that is moderately to highly fractured. The average overburden is about 300 m.

4 METHODOLOGY

4.1 Location and description of the seismic layout

Due to the size of the mine development, selection of the most suitable tunnel section or gallery for execution of the seismic campaign was not straightforward. At least two main criteria should be considered: 1) Presence of only rock mass ahead of the face for about 200 m and 50 m laterally from the gallery where the seismic measurement should be done, and 2) the ore deposit (body) should lie ahead of the face at a reasonable distance (< 100 m). Even though both criteria could not be fully satisfied, a suitable place was found after exchange of the geophysics staff with the mine management. The selected tunnel section (Gallery A) corresponds to a production gallery of a length of about 65 m and a section of 15 m². This gallery is part of a number of galleries following the same azimuth and spaced about 35 meters from each other in horizontal and similar distances between each production level. These galleries are then placed in the ore body.

Figure 2a depicts the tunnel axes as input in the associated software of the TSP system. The current infrastructure situation was resembled as real as possible using the software. For the sake of simplicity only production galleries near the Gallery A were recreated. Axes of each gallery were reconstructed using a few reference points in global coordinates as provided by the mine operator. The main tunnel connecting all galleries at each level was recreated using the software's tools. Figure 2b shows the tunnel models for all galleries and main tunnel. The section of Gallery A was measured directly in the field during data acquisition, and it was used for all drives. The face position of all galleries was almost identical at the time of the seismic campaign. Hence, the presence of the galleries around the seismic layout should not represent a big limitation for the evaluation.

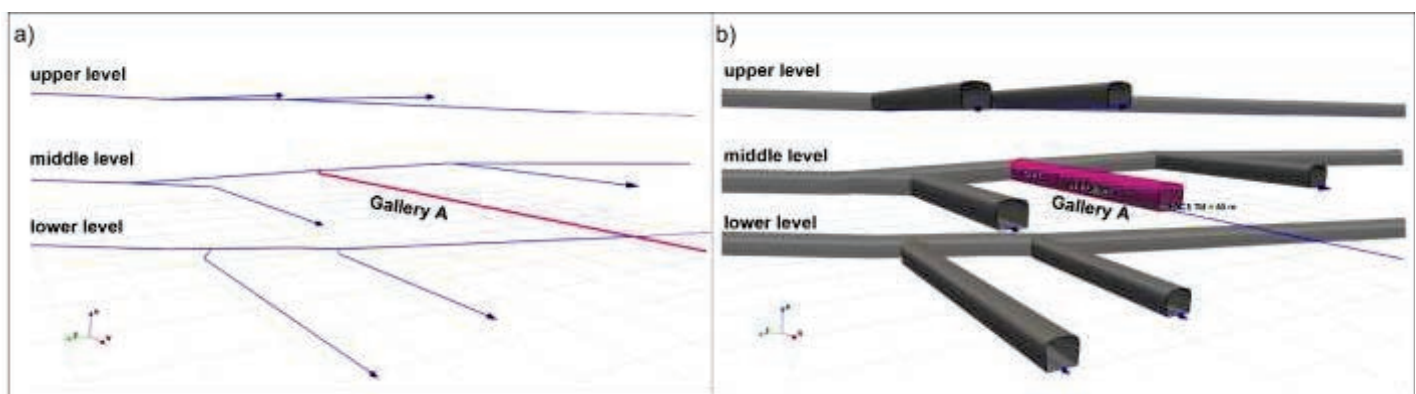


Figure 2. a) Tunnel axes of all production galleries and main tunnels surrounding the Gallery A. The axis of the Gallery A (highlighted) was prolonged as required for seismic data processing, b) Tunnel models for all axes showing the current face position of each production gallery

Figure 3 shows the TSP layout in the Gallery A. One shot line with 24 shot holes (left tunnel wall) was used for data acquisition starting as close as possible to the tunnel face. The niche-like section observed along the model correspond to over-excavation due to poor ground. Ideally, a straight section is preferred for preparing the shot hole line, however, due to the proximity of the other gallery in the right-hand side, it was decided to prepare the shot line in the left side, despite the over-excavation. Shot hole depth varied between 1.4 and 1.8 meter into the rock mass. Four seismic sensors were installed in about 2 meter deep bore holes on both tunnel walls. The spacing between shot holes were kept between 1.2 and 1.9 meters and distance between receiver holes was 4.0 and 5.6 meter for left and right tunnel wall, respectively.

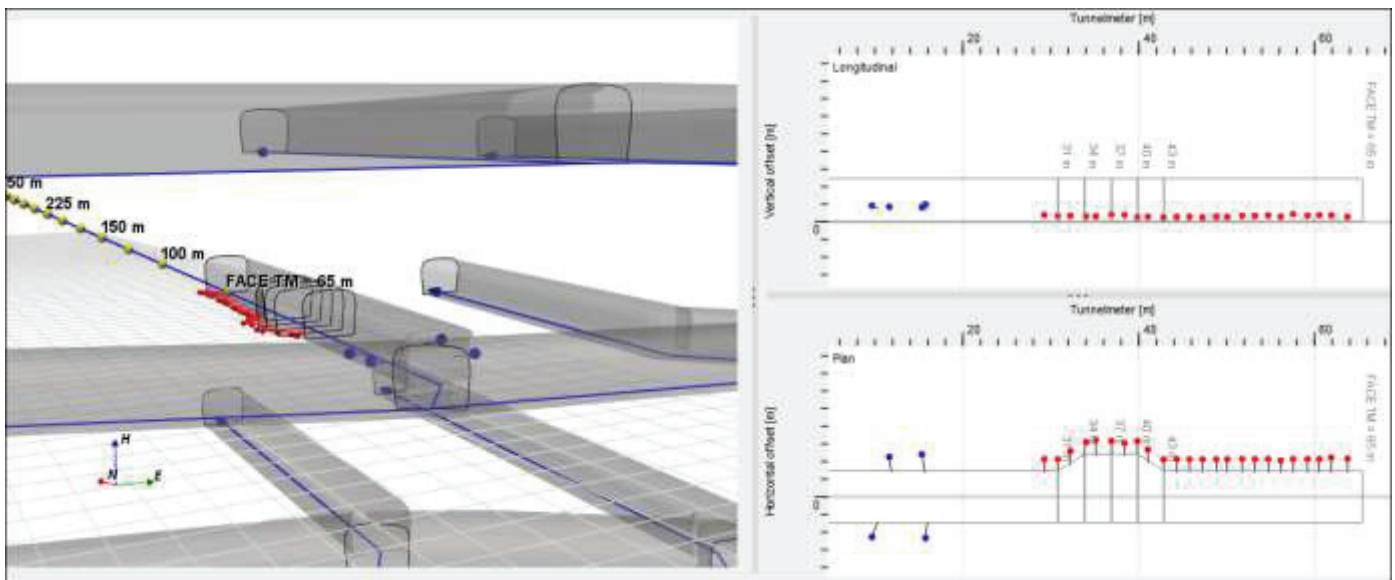


Figure 3. TSP layout (blue dots: 3C receivers; red dots: seismic source points)

4.2 Seismic data acquisition

TSP data can be acquired using two different approaches: single shot and multiple shot recording or SSR and MSR, respectively. In the SSR approach, shot holes are blasted individually. In the patented MSR method, a group of shots is blasted sequentially in five to six holes, allowing a five times faster data acquisition (e.g., 15 minutes compared to 60-70 minutes downtime). Due to the poor rock mass condition encountered in all the boreholes, and the lack of evidence of seismic response from the media for this site, it was decided to pursue the SSR approach. An advantage of this method in poor rock conditions is that it allows better adjustment of the explosive charge to be used in each shot hole. One shortcoming is the higher time requirement for data acquisition.

After all boreholes had been prepared and checked, the TSP system was put into operation. The explosive type of Superpower 90 with a detonation velocity of 3.500 ± 500 m/s and electric instantaneous detonators were used as seismic source. Firstly, an explosive with higher detonation velocity of 6.000 m/s (detonating cord) was tested in the first shot hole. However, due to the lower power of the detonator, the explosive charge was not detonated. Hence, only the superpower explosive could be used. All shot holes were successfully blasted increasing the explosive charge of 100 gram from near offsets (shortest distance to receivers) towards the face (largest distance to receivers) of 400 gram.

Table 1. Timetable of activities at campaign site (does not include drilling time)

Activity	Time period (min)
TSP receiver installation	30
TSP 303 Plus system setup and check	15
Recording of 1 st shot point	10*
Loading & recording of SP 2 - 24	115*
Geometry measurement and system take down & pack up	45

*Time period in blue represents the actual down time



Figure 4. Left: TSP receiver assembly by field geophysicist, right: TSP recording unit

4.3 Data quality and processing

The raw data quality was moderate. The signal-to-noise ratio (SNR) is moderate to low. A very high decay of the maximum amplitudes was observed as advancing through the shot holes. Decay of the amplitudes is due to attenuation of the seismic energy as the waves travel through the rock mass. The high decay in this campaign was partially compensated by increasing the charge size as commonly done in TSP measurements. However, for safety reasons a maximum of 400 g was used. Attenuation effect is commonly related to the lithology and rock mass conditions along and around the seismic layout. For instance, in a compact and competent rock mass, high magnitudes with low amplitude decay might be expected. In this campaign, low maximum amplitudes are most related to the presence of weak ground (chalcopyrite and clay) and to the fracturing that is dominating along the TSP layout.

The first breaks of all traces which represent the first arrival of the seismic wave following the shortest path from shot hole to the receivers, i.e. the direct wave, show highly variable arrival times. This variability is most likely related to inaccuracies of the trigger time induced by the blasting machine. TSP data recording uses a sample rate of 48 kHz (20.8 μ sec). Hence, inaccuracy in the trigger time affects the seismic traces. In addition, the significant changes in rock mass condition and ground type along the TSP layout may also impact the first arrival times.

The raw data is characterized by a low frequency content. A significant seismic signal is found between 200 and 400 Hz. The low frequency content impacts the spatial resolution or the capability of recognizing two consecutive reflectors or boundaries for a given geological structure. Reasons for the low frequency content are associate with the type of lithology, the rock mass condition, the type of explosive and the coupling of seismic sources. For this campaign, probably the type of explosive, the fractured rock mass along the TSP layout and the type of ground play an important role. Raw data show moderate presence of the airborne sound wave. Although other production galleries were located at short distances (from 12 to 25 meters) laterally and above and below the Gallery A, no significant impact in the raw data was observed.

The processing of TSP data followed its standard workflow that commonly takes 2-3 hours. After appropriate data quality control, two special digital filters are applied. Once data has been cleaned, automatic selection of the first arrivals is done allowing the estimation of P- and S-wave reference velocities along the TSP layout. Due to the inaccuracies in the first arrival times and poor rock mass condition, estimation of the reference velocities was little cumbersome. Hence, two reference velocities were selected for further processing.

Further processing steps comprise alignment adjustments of seismic traces, event extraction in time domain and separation of P- and S-waves via a polarization analysis. Processed seismic

data is then passed onto specialized 3D processing routines, where velocity analysis and seismic data migration of a user-defined 3D-model is done. Finally, the software automatically extracts so-called reflectors which are interpreted, and rock property calculations of relevant reflectors are obtained.

5 RESULTS

5.1 Velocity models

Figure 5 depicts plan and longitudinal 2D sections (left and right) extracted from the P- and S-wave (V_p : top and V_s : bottom) velocity 3D models centered on the axis of Gallery A. Estimated V_p ranges between 2'430 m/s and 3'400 m/s with a reference value of 2'900 m/s while V_s ranges between 1'500 m/s and 2'050 m/s with reference 1'680 m/s. Since the reference value is calculated from the direct wave arrivals, this value can be associated with the rock conditions prevailing along the TSP layout which in this case correspond to a mixing ground varying from clay-pyrite basalt, chalcopyrite and clay.

As this is the first TSP campaign at this site and there are no other references on representative seismic velocities for the different ground types, it is difficult to assess how representative the estimated reference value is. Since some clay-pyrite basalt and clay are reported by the site engineers, a comparison with typical V_p for those ground materials can be done. Figure 6 shows two tables with seismic velocity values for different types of ground materials and type of rocks. As can be seen, the reference velocities estimated for this campaign are far below typical values, for instance for Basalt. The reference values estimated for this campaign are only within reported range of clay material.

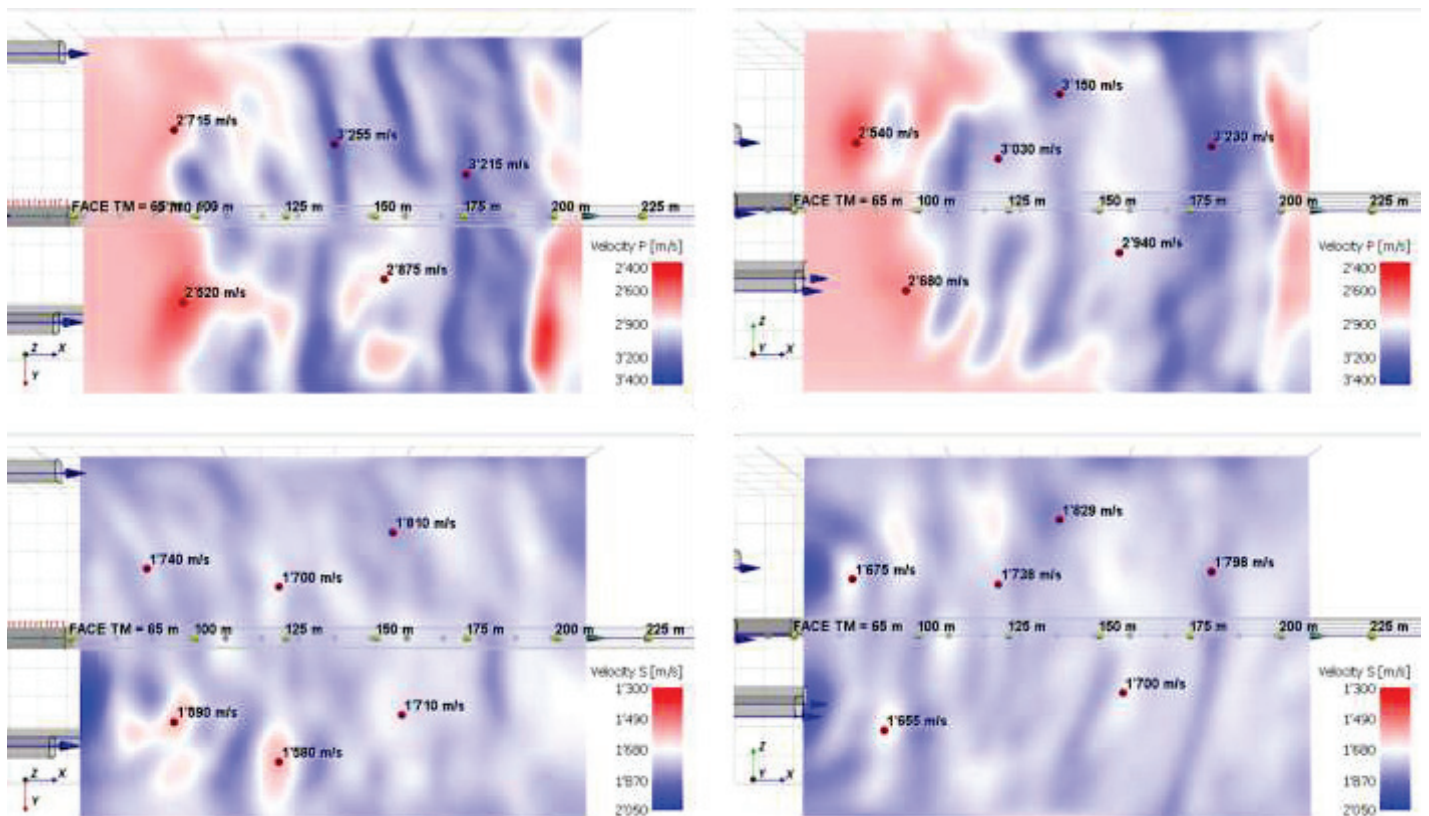


Figure 5. Top and bottom: 2D plane of the velocity distribution of the P- and S-wave, respectively. Left and right: Plan and longitudinal views, respectively. The red markers indicated velocity values at given positions.

Since the reference velocity likely corresponds to a rather weak rock mass, the colormap was accordingly set, i.e., all values below 2'900 m/s are reddish coloured while bluish correspond to values above that threshold. Hence, dark red areas correspond to velocity anomalies in the velocity field, commonly refer to as Low Velocity Zones (LVZ). Such LVZs may be commonly associated with changes in the rock condition (e.g. weaker material) or presence of geological structures such as fault zone, cavities, etc. V_p shows more variation than V_s along the prediction range. Hence, further discussion focuses on this parameter. For the next 35 to 40 m ahead of the face along tunnel axis, slightly lower velocities (2'750 m/s) stay the same. Starting at 100 m, velocities increase to values $> 3'000$ m/s indicating an improvement in the rock mass condition or transition to other type of ground material, e.g. clay-pyrite basalt. A LVZ is found 20-30 m right of the tunnel axis, about 30 m ahead of the face. This LVZ seems to extend above the tunnel section for about 10 m. It could be related to a weakness layer which may cross the tunnel section. Between 140 m and 170 m, velocities slightly decrease reaching similar values as in the layout which may be correlated to similar rock condition as experienced in the last 20 m excavated material (chalco-pyrite and clay). This is followed by an increase in velocities probably related to a more competent rock mass, possibly Basalt. Towards the end of the prediction range, a second LVZ is observed located principally at the right-hand side and intersecting the tunnel section vertically. Due to its proximity to the model boundary this last section should be carefully considered.

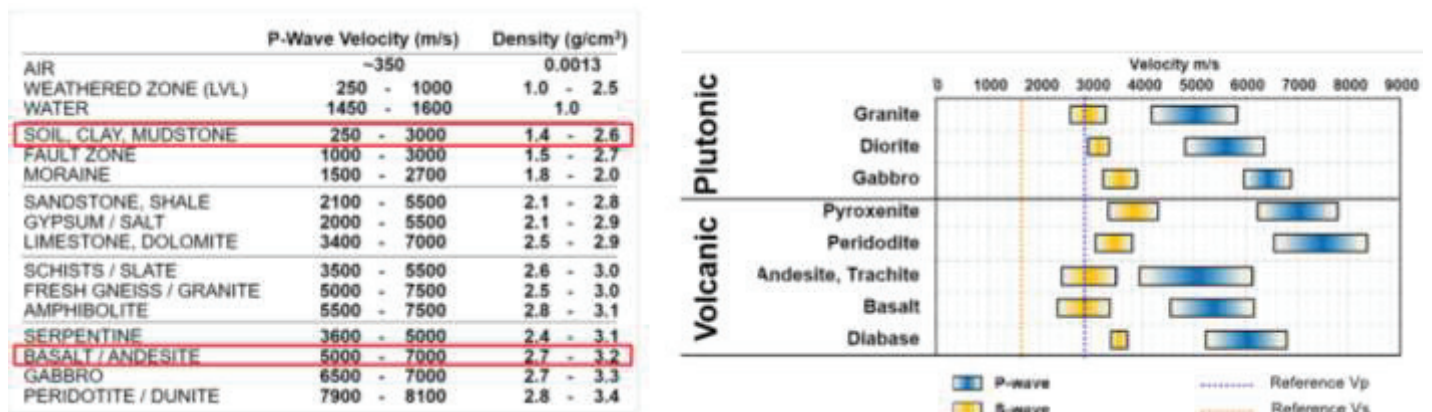


Figure 7 shows a 3D view of V_p including a surface rendering holding apparent LVZs and their spatial distribution (render value= 2'750 m/s). Depicted render surface corresponds to volumes with values $< 2'750$ m/s. As it can be seen, the first LVZ is approximated located between 80 and 100 m local distance and the second one towards the end of the model. These zones may correspond to areas dominated by weaker material where most of the mineralizations may be found. Ahead of the first LVZ possibly, a more competent rock related to the host rock (basalt) dominates.

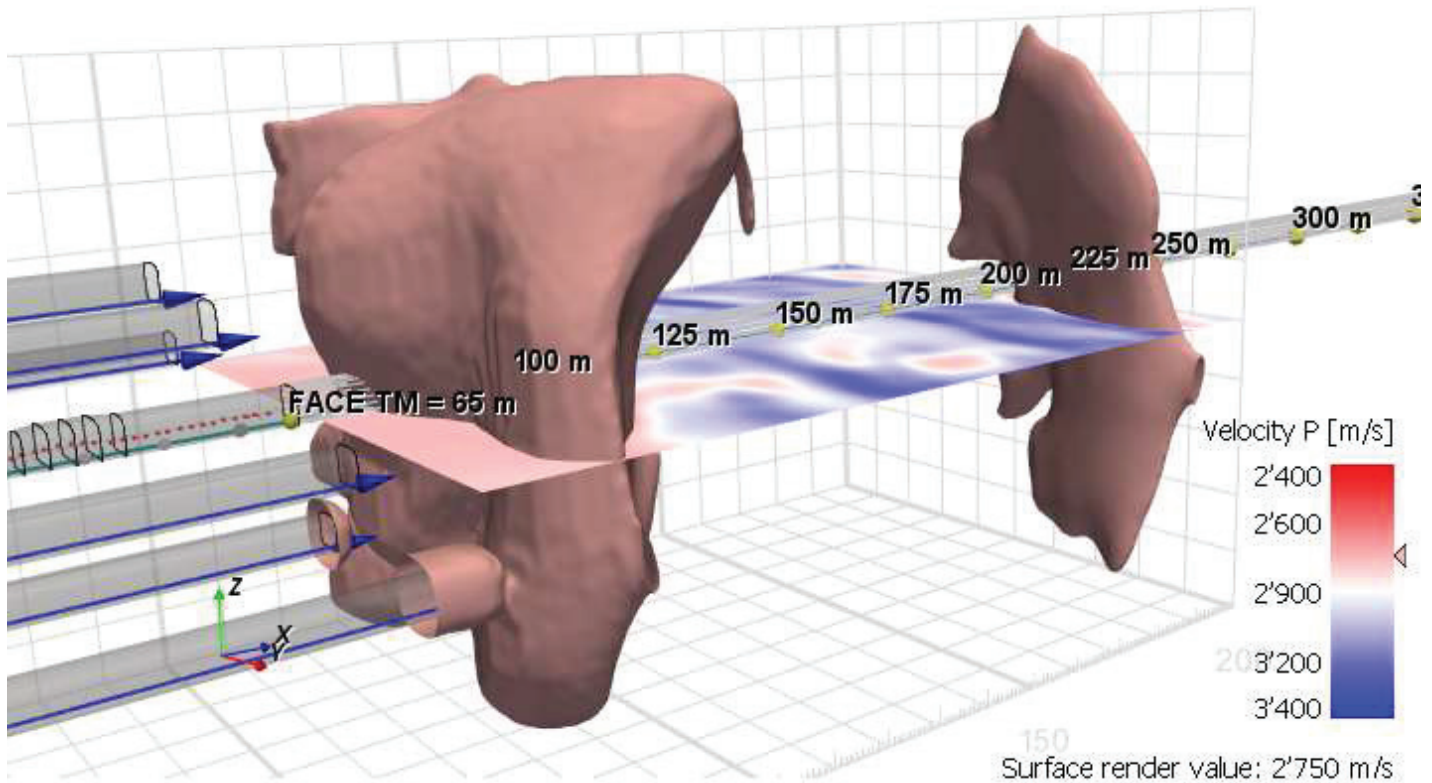


Figure 7. Three-dimensional perspective view of V_p including a surface rendering which holds apparent low velocity zones (render=2.750 m/s).

5.2 Geo-mechanical parameters and seismic data based geological interpretation

Based on the mathematical relationship between elastic parameters, density and seismic velocities, important geo-mechanical parameters can be estimated. The software Amberg TSP Ease automatically extracts a number of reflectors previously set by the user. The reflectors represent areas from which significant portions of energy were reflected back to the receivers. Hence, they can be correlated to boundaries between materials with different physical properties. In other words, areas with increasing fracturing, faults, formational changes, etc.

For this campaign extraction of 12 reflectors was set. Each of these reflectors has associated parameter values. Figure 8 (top) shows property charts of V_p , V_s , Poisson's ratio, dynamic Young's modulus, shear and bulk modulus associated with the reflectors shown in the bottom of the figure. Plan and longitudinal 2D views (bottom) show interpreted reflectors upon the geological model based on the evaluation of the reflectors done by the interpreter. Most significant reflectors are kept and clustered in order to obtain seismic zones which are relevant for the tunnel excavation. In this model, three major zones are distinguished: a weaker zone with low rock mass stiffness (lower dynamic Young's modulus) related to the Basalt with clay filling along fractures; a slightly improving zone with increasing rock mass stiffness (higher dynamic Young's modulus) related to a slightly more competent Basalt and weakness zones. Since the weakness zone might be controlled by the presence of more fractures, higher accumulation of mineralization within these weakness zones may not be disregarded. As for the water-bearing zones, no significant increases in Poisson's ratio are observed, which leads to the cautious conclusion that water-bearing layers do not occur along the prediction range.

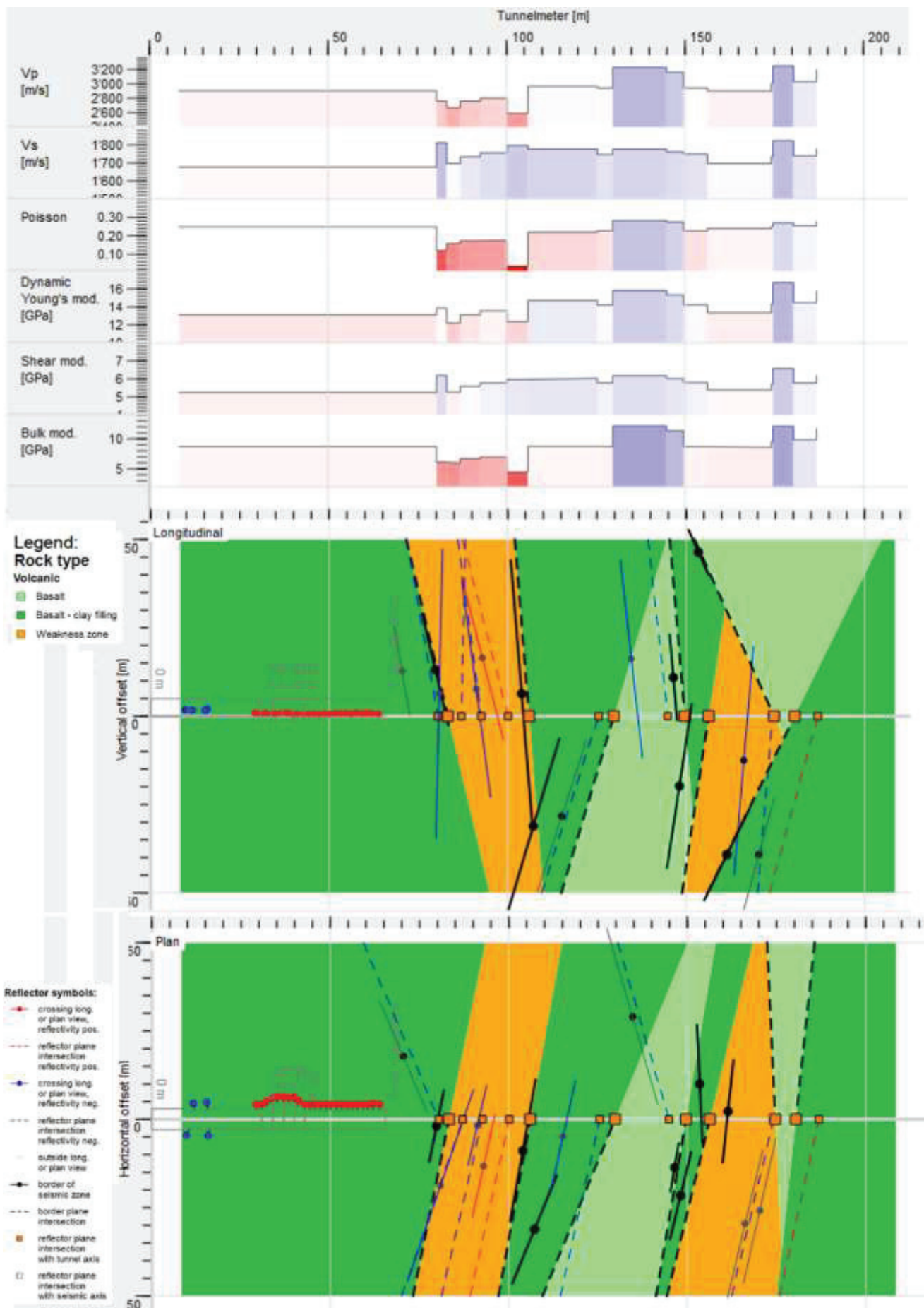


Figure 8. (Top) Property charts of Vp, Vs, Poisson’s ratio, dynamic Young’s modulus, shear and bulk modulus, which are associated with the reflectors shown in the bottom. (Bottom) Plan and longitudinal 2D views with interpreted reflectors upon the geological model based on the evaluation of the reflectors.

6 CONCLUSIONS

The seismic measurement performed at this mine development allowed to confirm the applicability of the technique in this environment. Common characteristics of a deep underground mine, such as existence of many galleries or expectation of extremely compact and competent rock that may cause oversteering in the signal were not evidenced in this first campaign. In contrast, the weak to very weak rock texture along the array affected the recorded data features, resulting in limited spatial resolution and penetration of the signal. Nevertheless, it was possible to make a prediction about the stiffness of the rock, the type of rock and the presence of water-bearing bodies for the next 120 meters. Data acquisition was done in about 2 hours representing important time savings compared to time demanding long probe drills.

According to the results and preliminary interpretation, the current drivage continues for about 35 meters in similar conditions as experienced along the TSP layout, i.e. clay-pyrite Basalt and layers of Claypyrite and Chalcopyrite (mineralization layer). At zones with decreasing stiffness, either higher presence of ore minerals may be found or increasing fracturing (possibly clay filled) occurs. Due to the rather lower spatial resolution, a clear differentiation between ore mineral rocks, host rock and barren rock was not possible. Hence, it is recommended to perform short probe drills in those areas where decreasing rock stiffness were identified. The results presented here may support understanding of the rock mass conditions for the surrounding galleries.

According to feedback from the site engineers, the seismic results helped reduce the number of exploratory boreholes drilled in Gallery A by about 60 % compared to other production galleries. In addition, rock mass deformation was diminished by saving the number of probe drills and a decrease of about 60% of water consumption was achieved by saving the number and depth of probe drills. Hence, a significant contribution to environmental aspects may be granted by applying this technology.

This first experience in an underground mine in Turkey contributed significantly to the understanding of the capabilities and current limitations of the method in this setting. Important insights about the field work, data characteristics and processing were collected and serves as basis for improving the methodology for further measurements and adapting the tunnel reflection seismic for underground mine reflection seismic.

REFERENCES

- Ahmadi, O., 2015. Application of the Seismic Reflection Method in Mineral Exploration and Crustal Imaging. Contributions to Hardrock Seismic Imaging, Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 1269 (ISBN 978-91-554-9290-8.), Uppsala, 76 p.
- Dickmann, T., 2020. Using seismic exploration to predict geological risk along tunnels and underground spaces, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering, 173, 5, pp. 11-16.
- Malehmir A, Durrheim R, Bellefleur M, Urosevic M, Juhlin C, White D, Milkerit B, Campbell G., 2012. Seismic methods in mineral exploration and mine planning: A general overview of past and present case histories and a look into the future, Geophysics, 77, 5, pp. 173-190.
- Schön J.H., 2015. Physical Properties of Rocks. Fundamentals and Principles of Petrophysics, 2nd ed., Elsevier, Amsterdam, 512 p.

Yeraltı Kömür Madenciliğinde Galeri Açma Makinelerinin Güvenli Kullanımı

Safe Handling of Roadheaders in Underground Coal Mining

E. Kahraman, Y. Türk

Polyak Eynez A.Ş., İstanbul

ÖZET: Madencilik ve inşaat çalışmalarının en önemli faaliyetlerinden biri de kazı çalışmalarıdır. Teknolojinin gelişimine bağlı olarak kazı çalışmalarında galeri açma makineleri kullanılmaya başlanmıştır. Galeri açma makinelerinin kullanımı ile kazı çalışmaları birim zamanda kazı miktarını artırarak, verimliliği artırmaktadır. Galeri açma makinesi kullanımı ile galeri açılması çalışmalarının güvenli ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için dikkat edilmesi gereken birçok husus bulunmaktadır.

Çalışma kapsamında galeri açma makineleri ile ilgili bazı tanımlamalar verilmiş ve bu makinelerle galeri kazısı çalışmalarının güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için uygulamaya yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.

ABSTRACT: Excavations are amongst the most important parts of any mining and civil projects. Due to new advancements in roadheader's technology, these machines are being used widely in new projects. By using roadheaders, during the excavation time intervals, the amount of excavated material is increased, therefore the efficiency of excavation projects are improved. To have more secure and efficient excavation Projects, there are so many factors that should be considered.

In this study, some terms related to roadheaders described. Practice guidelines presented to help performing safe excavations using roadheaders.

1 GİRİŞ

Kömür hem yakıt olarak hem de elektrik üretiminde kullanılan önemli bir enerji kaynağıdır. Ülkemizde kömüre dayalı termik santrallerin elektrik üretimine payı 2025 yılında % 51.7 ve 2035 yılında % 34.2 olacağı tahmin edilmektedir. 2030 yılına kadar 1.7 GW yerli kömür santralının sisteme dahil olacağı öngörülmektedir (ETKB, 2022). Elektrik üretiminde bu kadar önemli bir yeri olan kömür, ülkemizde çoğunlukla yeraltı madenciliğinden elde edilmektedir. Önümüzdeki yıllarda da yüzeye yakın kömür rezervi azalacağından, yeraltı kömür madenciliği daha fazla yaygınlaşacaktır.

Yeraltından verimli ve güvenli bir şekilde kömür üretimi uygun güvenlik donanımlarına sahip mekanize kazı ekipmanlarının kullanılması ile mümkündür. Metro ve tünel kazılarında da kullanılmakta olan galeri açma makineleri, mekanize yeraltı kömür madenciliğinde hazırlık çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Uygun koşullarda kullanılan galeri açma makineleri ile kazı çalışmalarında birim zamanda kazı miktarında artış olduğu için, verimlilikte de ciddi artışlar meydana gelmiştir. Kahraman vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada Çayırhan Linyit İşletmesinde galeri açma makineleri ile yapılan kazı çalışmalarında, 16 m²' lik bir galeride 21 cm/yevmiye ve 25 m² kesitli galeride ise 18 cm/yevmiye işçilik performansına ulaşıldığı, Dosko Mk2b marka/model galeri açma makinesi ile 6.78 m³/sa ortalama kazı hızına ulaşıldığı belirtilmiştir.

Galeri açma makineleri tam cephe galeri açma makinesi ve kısmi kesit kazı yapan galeri açma makineleri olmak üzere esas olarak iki başlık altında değerlendirilebilmektedir. Tam cephe galeri açma makinesi yeraltı metro, tünel, vb. kazı çalışmalarında kullanılmaktadır. Yeraltı madencilik çalışmaları kapsamındaki hazırlık kazılarında kısmi kesit kazı yapabilen kollu galeri açma makineleri kullanılmaktadır. Kollu galeri açma makineleri bomu üzerinde bulunan kesici kafa ve keskiyer yardımı ile kazı yapabilen, kazı malzemesinin yükleme sistemi aracılığıyla zincirli konveyöre yüklenmesini sağlayan ve üzerindeki ek üniteler yardımı ile tahkimat malzemesinin (profillerin) tavana kaldırılmasını sağlayan ekipmanlardır. Kombine bir sistem olarak galeri açma makinelerinin güvenli bir şekilde çalıştırılması, hem kazı çalışmalarının verimli hem de güvenli bir şekilde sürdürülebilmesini sağlamaktadır.

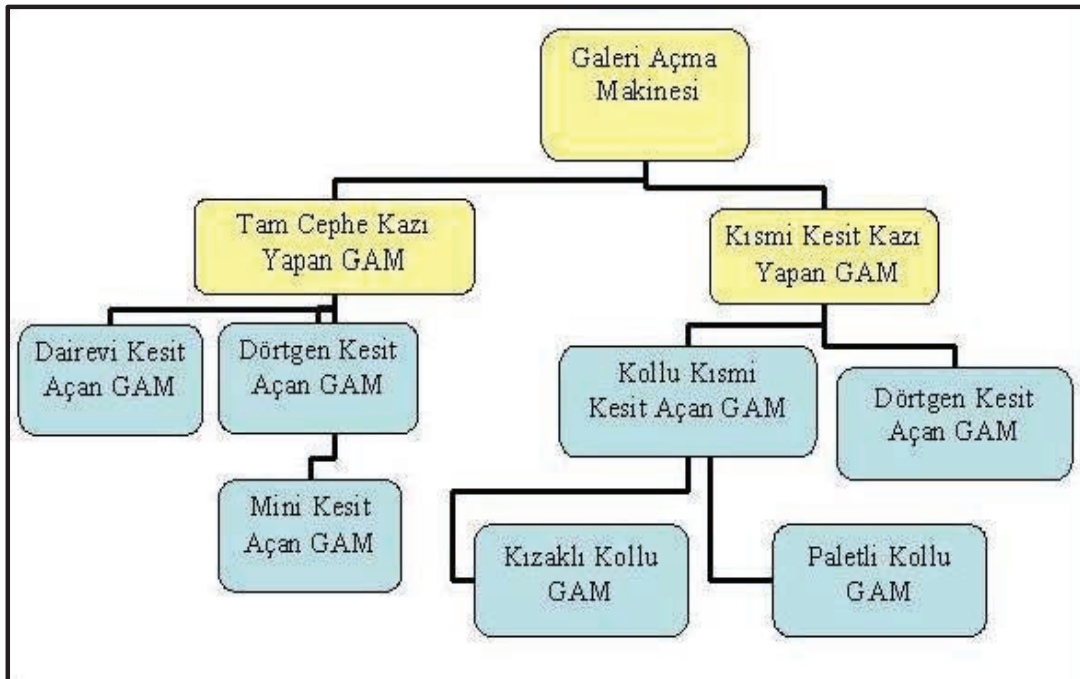
Mekanize galeri açma çalışmalarında madenciliğin doğasından kaynaklı risklerin yanında galeri açma makineleri ve yardımcı ünitelerinin kurulumu, işletimi, tamir-bakımı ve demontajı çalışmalarında elektrik enerjisi, basınçlı su, kazıdan çıkan toz, vb. özel tehlike ve/veya riskler de mevcuttur. Tehlike ve risklerin bilinmesi ve önleyici tedbirler alınması, iş kazaları ve meslek hastalıklarının meydana gelmesini engelleyecektir.

Çalışma kapsamında galeri açma makinesi ile mekanize kazı çalışmaları tanımlanmış, bu makinelerin işletimi ile hazırlık kazıları sürecinde tehlike, riskler ve alınması gereken önlemler tanımlanmıştır. Elde edilen bilgiler ışığında uygulamaya yönelik makinenin güvenli işletimi ve güvenli kazı çalışmaları ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

2 GALERİ AÇMA MAKİNELERİ İLE KAZI ÇALIŞMALARI

2.1 Yeraltı Kazılarında Kullanılan Galeri Açma Makineleri

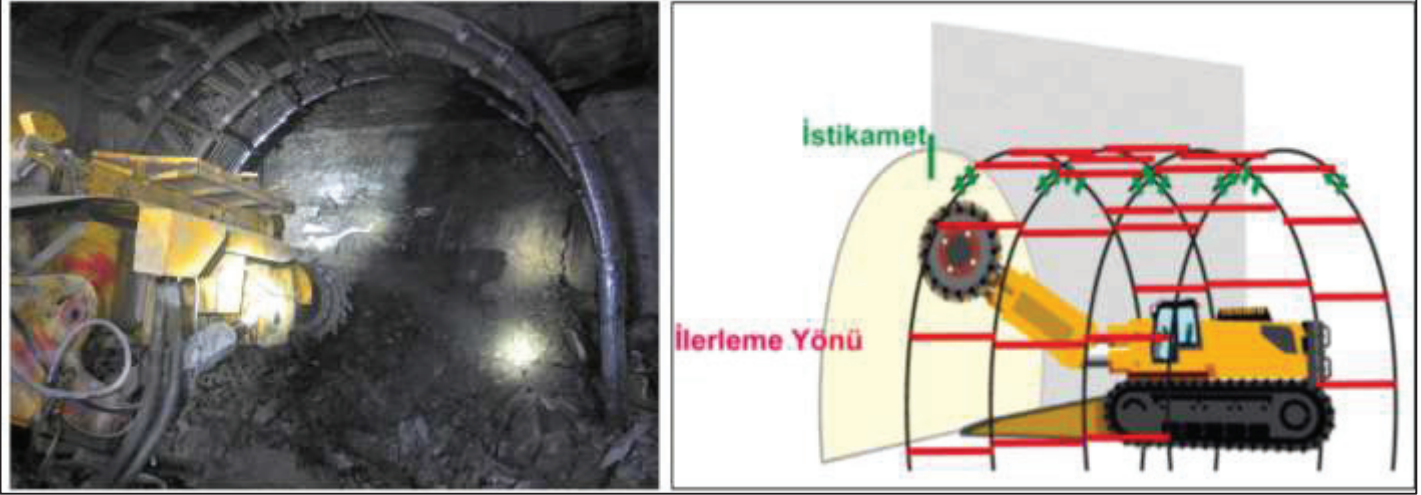
Galeri açma makineleri kazı yaptığı kayacın sertliğine göre ve açtığı/kazdığı kesitin şekline göre/kesitin açılış durumuna göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Kollu galeri açma makineleri ağırlıklarına göre hafif (20-30 ton), orta (30-75 ton) ve ağır (>75 ton) olarak sınıflandırılmaktadır (Tunçdemir, 2002). Kesici kafaların bom eksenine göre dönüş yönleri temel alınarak spiral tip (arına paralel) ve tambur tip (arına dik) olmak üzere iki türde bulunmaktadır. Makinelerin sınıflandırılması ile ilgili derlenmiş bilgilerden elde edilmiş olan bir akış diyagramı Şekil 1' de sunulmuştur.



Şekil 1. Galeri açma makinelerinin kazı kesitine göre sınıflandırılması (Kahraman, 2012)

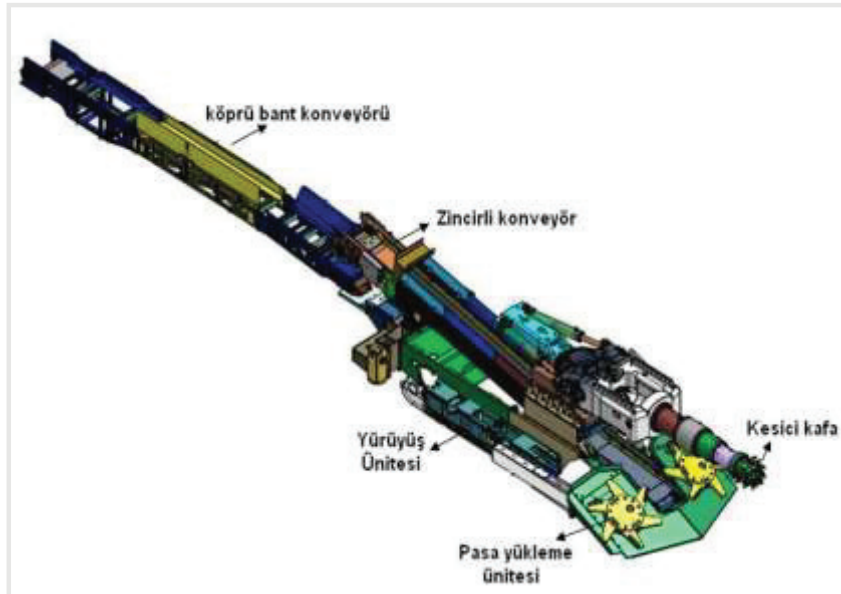
Tam cephe kazı yapan galeri açma makinelerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle genellikle kısa galerilerin açılmasında fazla tercih edilmemekte, metro ve uzun tünel açma çalışmalarında kullanılmaktadır.

Yeraltı kömür madenciliğinde hazırlık çalışmalarında genellikle paletli kollu galeri açma makineleri kullanılmaktadır (Şekil 2). Kesme kafaları hareketli bir kol üzerinde bulunan bu makineler, kollu galeri açma makineleri, kısmi cepheli galeri açma makineleri, bomlu galeri açma makineleri ve seçimli kazı makineleri isimleri ile anılmaktadır.



Şekil 2. Mekanize galeri açma çalışmalarının temsili şematik görünüşü

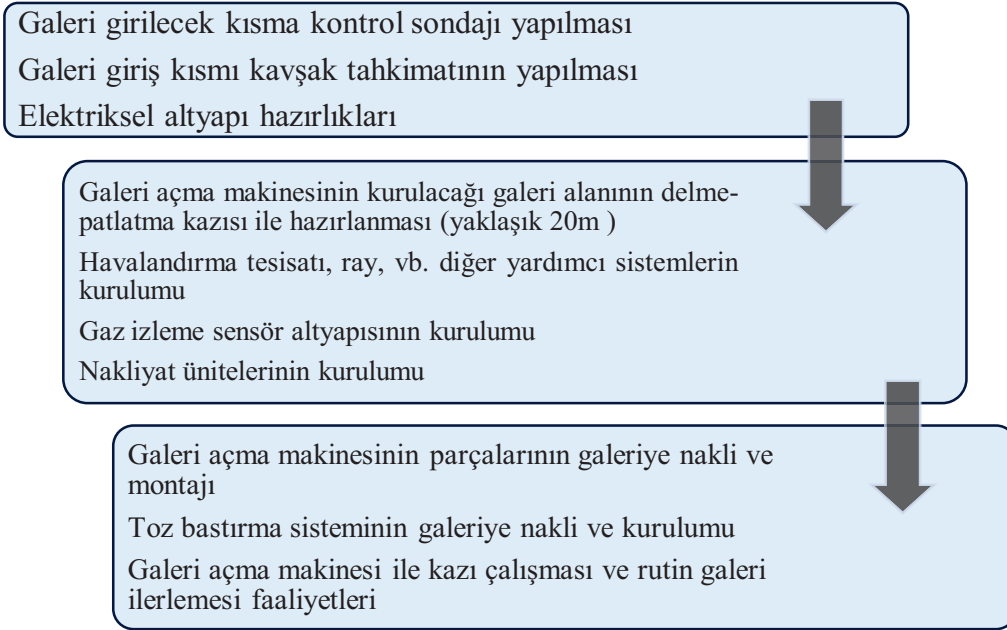
Galeri açma makineleri genel olarak kesici kafa, kazılan malzemenin yükleme ünitesi, yürüyüş ünitesi, nakliyat ünitesi gibi birimlerden oluşmaktadır. Galeriyi açma makinelerinin kısımlarını gösteren genel çizim Şekil 3’ de verilmiştir (Kahraman, 2012).



Şekil 3. Galeriyi açma makinelerinin genel kısımları (Kahraman, 2012)

2.2 Kollu Galeriyi Açma Makineleri İle Hazırlık Galerileri Açılması

Kollu galeriyi açma makinesi ile mekanize galeriyi açma çalışmaları, galeriyi giriş kısmının yapılması/ilki kurulum ve ilerleme amaçlı normal kazı çalışması olmak üzere iki şekilde değerlendirilebilir. İlk kurulum için iş akış şeması Şekil 4’ de ve normal kazı sürecindeki iş akış şeması Şekil 5’ de verilmiştir. Bu iş akış şemalarının önden bilinmesi sürecin güvenli yönetimi için tehlike ve risklerin, dolayısıyla alınacak önlemlerin belirlenmesinde ciddi öneme sahiptir.

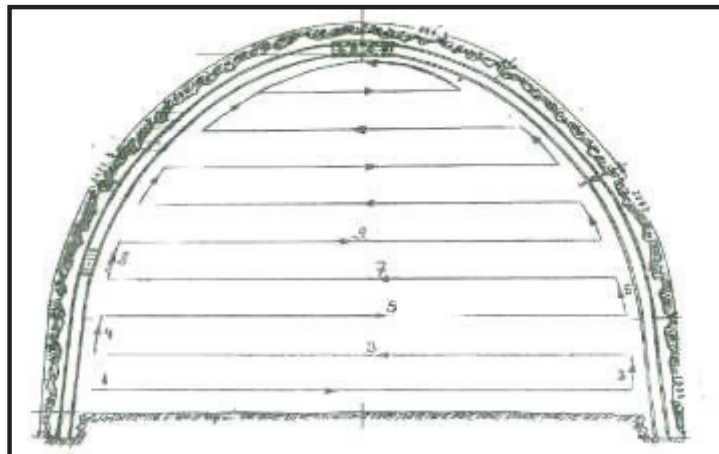


Şekil 4. Galeri giriş kısmının açılması/ilk kurulum genel iş akış süreci



Şekil 5. Mekanize galeri açılması çalışmalarını genel iş akış şeması

Galeri açma makinesi ile kazı yapılmasında arının formasyonu (sert, yumuşak, vb.) dikkate alınarak değişik kazı uygulama şekilleri mevcuttur (Şekil 6).



Şekil 6. Sert formasyonda kollu galeri açma makinesi ile arında kazı uygulama şekli (Kartal, 1993)

Kazı sonucu ortaya çıkan malzeme (kömür, yan kayaç) makinenin yükleme ünitesi aracılığıyla makine üzerindeki zincirli konveyöre yüklenmekte, buradan makineye akuple bant konveyöre (köprü bandı) aktarılmakta ve daha sonra da diğer bant konveyörlere aktarılarak, ocak dışına çıkarılmaktadır.

İşyerinin Tahkimat Yönergesi/Prosedürü' nde belirtilmiş olan kadar kazı yapıldıktan sonra, makinenin bağ kaldırma aparatı da kullanılmak suretiyle kazı yapılan alana TH profil tahkimatı yapılmaktadır. Buna ilave olarak, gerekli görülmesi halinde halat saplama, püskürtme beton uygulaması, vb. tahkimat uygulamaları da yapılmaktadır.

Mekanize bir galeride monoray nakliyatı için tavana ray hattı monte edilmektedir. Galeride basınçlı hava ve su hatları demir borular ile teşkil edilmektedir. Buna ilave olarak, ihtiyaca göre galeri ilerlemesine bağlı olarak metan drenaj sistemi boruları, azot hattı, kül hattı, vb. boru hattı da kurulmaktadır. Galerinin ilerlemesine bağlı olarak galeri bant konveyör hattının uzatılması (bant kuyruk çekimi), boru ve ray hatlarının uzatılması, vb. yardımcı işlemler düzenli olarak yapılmaktadır.

2.3 Mekanize Galeri Açma Çalışmalarında Temel Risk Grupları

Yeraltı kömür madenciliğinde mekanize hazırlık kazılarında birçok tehlike ve risk bulunmaktadır. Genel madencilik koşulları göz önünde bulundurularak bazı temel tehlike/risk grupları Çizelge 1' de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Mekanize galeri açma çalışmalarında bazı temel tehlike ve riskler

Galeri Açma Makinesinin (GAM) işletiminden kaynaklı bazı tehlike ve riskler	
Makinede yangın tehlikesi	Makine ile çalışanların ezilmesi
Makinenin gürültüsü	Makineye dolanma tehlikesi
Makinenin titreşimi	Sıkışma noktası tehlikesi
Makinenin kesici kafasının çalışana zarar vermesi	Toz tehlikesi/meslek hastalığı riski
Elektrik tehlikesi	Patlamaya yol açma tehlikesi
Batan makinenin çıkarılması	Makine üzerinden çalışan düşmesi
Makinenin sıcak yüzeylerine temas	
Mekanize galerideki diğer aktivite ve sistemlerden kaynaklı bazı tehlike ve riskler	
Tavan akmaları/göçükler	Galeri havasının kirli hale gelmesi
Tavandan kavlak düşmesi	Galeri havalandırmasının devre dışı kalması
Ani su baskını	Kömürün kendiliğinden kızışması
Ani gaz geliri	Monoray hatlarının uygun olmaması
Bant konveyör hareketli kısımları	Tahkimat ünitesinin tavana kaldırılması
Püskürtme beton uygulamaları	Tahkimat ünitesi için direk dibi açma çalışmaları
Tali havalandırma sisteminin devre dışı kalması	Galeride tamir-tarama çalışmaları
Tali havalandırma hattının zarar görmesi	Monoray nakliyat ekipmanının kaynaklı riskler
Sıcak iş çalışmaları	Açık alevli yangınlar
Kimyasal köpük, enjeksiyon, vb. uygulamalar	Halat/kaya saplama uygulamaları
Tamir-bakım çalışmaları	Ray montajı/yüksekte çalışma

2.4 Galeri Açma Makinelerinin Kullanımında Alınması Gereken Önlemler

Galeri açma makinesi ile hazırlık galerileri kazısında alınması önlemler/dikkat edilmesi gereken bazı hususlar aşağıdaki çizelgede tanımlanmıştır (Çizelge 2). Çizelgede belirtilen kriterler genel tehlike ve riskler olup, galeri açma makinesinin kullanılacağı ocak koşulları da dikkate alınarak ayrıca risk analiz ve değerlendirme çalışmaları yapılarak süreç yönetilmelidir.

Çizelge 2. GAM' ın kullanımında bazı tehlike/riskler ve alınması gereken önlemler

Tehlikeler ve Riskler	Alınması Gereken Önlemler
➤ İşletmeye hazır makinenin yanında tutuşma kaynağı bulunması, yangın tehlikesi	➤ Yanıcı maddenin yeraltında bulundurulmamasının sağlanması, ➤ Sıcak iş çalışmalarının özel yönetilmesi, ➤ Yangından Korunma Planı kapsamında önlemler alınması, vb.
➤ Ezilme tehlikesi	➤ Makinenin işletimi sırasında operatörün görmediği kör bölgelerde (yükleme cihazı, konveyör, vb.) çalışan bulunmamasının sağlanması, ➤ Makinenin hareketlerinden önce sesli uyarı vermesi (Resmi Gazete. 2013a), ➤ Makinenin acil durdurma sistemlerinin sürekli çalışır durumda tutulmasının sağlanması (Resmi Gazete, 2013a)
➤ Makinenin gürültüsü, gürültü tehlikesi	➤ Gürültü ile ilgili ölçümlerinin yapılması, ➤ Çalışanların uygun kişisel koruyucu donanım (kulaklık) kullanmalarının sağlanması, ➤ Gürültü tehlikesi ile ilgili çalışanların bilgilendirilmesi (Resmi Gazete, 2013b)
➤ Çalışanların bulunduğu ortamda makinenin ilerletilmesi	➤ Makine ilerletilirken üzerinde sadece operatör bulundurulması, ➤ Makineyi ilerletirken bütün personelin güvenli alanda bulunmalarının sağlanması ➤ Makinenin acil durdurma sistemlerinin sürekli çalışır durumda tutulmasının sağlanması, vb. (Resmi Gazete, 2013a)
➤ Dolanma tehlikesi	➤ Çalışanların bol kıyafet giymesinin engellenmesi ➤ Çalışanların dönen parçaların etki (tambur) alanında bulunmasının engellenmesi ➤ Makinenin acil durdurma sistemlerinin sürekli çalışır durumda tutulmasının sağlanması, vb.
➤ Sıkışma noktası tehlikesi	➤ Makinenin açık noktalarının yanında çalışma yapmanın ve bulunmanın yasaklanması ➤ Makinenin kayan/hareket eden parçaların etki alanında bulunmanın yasaklanması
➤ Darbe tehlikesi	➤ Askıda/tavanda düşebilecek malzemelerin kontrollü bir şekilde düşürülmesi ➤ Çalışanların kişisel koruyucu donanım (baret) kullanmalarının sağlanması
➤ Parça fırlama tehlikesi/göze yabancı cisim girmesi nedenli kazalar	➤ Çalışanların bilgilendirilmesi ➤ Çalışanların kişisel koruyucu donanım (gözlük) kullanmalarının sağlanması
➤ Toz tehlikesi/meslek hastalığı riski (pnömokonyoz)	➤ Makinenin kazı sırasında arına su püskürtme sisteminin çalışır durumda olmasının sağlanması ➤ Hazırlık galerisi arına yeterli miktarda hava gönderilmesi ➤ Tozun bastırılması için ilave toz bastırma sistemi kullanılması ➤ Havadaki toz miktarının ölçme ve izleme çalışmaları ile izlenmesi
➤ Makine üzerinde çalışan bulunması/makine üzerinden düşerek yaralanma riski	➤ Makine hareket halinde iken makine üzerinde çalışan bulunmamasının sağlanması, ➤ Makine üzerinde çalışmalarda düşmeye karşı gerekli önlemlerin alınması, ➤ Makine üzerinde kayma, takılma ve düşmeye neden olabilecek malzeme bulundurulmaması
➤ Makinenin kesici kafasının üzerinde çalışan bulunması/kesici kafanın aniden çalışma riski	➤ Makinenin kesici kafası üzerinde çalışanın bulunabileceği platform monte edilmesi, ➤ Makinenin üzerinde operatör bulunmaz iken, makinenin enerjisinin kestirilmesi/kilitleme yapılması

➤ Zeminde batan makinenin çıkarılması/makineyi çekmek için kullanılan ekipmanların zincirlerinin kopma riski	➤ Çekme ünitelerinin (pnömatik calaskal) bağlandığı tahkimat elemanlarının (bağların) altında çalışan bulunmamasının sağlanması, ➤ Çekme ünitesinin zincirinin etki alanında çalışan bulundurulmaması.
➤ Patlama tehlikesi (içeriğinde yanıcı/patlayıcı düzeyde metan içeren ortamda voltaj taşıyan elektriksel bileşenlerin bulunması)	➤ Galeri açma makineleri uygun patlamazlık sertifikasına sahip olması (ATEX Grup 1 M2), (Resmi Gazete, 2013c) ➤ Makine üzerinde metan sensörünün ve açma sisteminin düzenli aralıklarla kontrolü, ➤ Ocak havasında patlayıcı ortam oluşmaması için uygun ve yeterli havalandırmanın sağlanması, kontrol sondajlarının yapılmış olması (Resmi Gazete, 2013c).
➤ Sıcak parça tehlikesi (Sıcak sıvı ve parçalara temas sonucu ağır yaralanma riski)	➤ Aydınlatma yüzeyleri, motorlar, pompalar, hidrolik ekipman ve hidrolik sıvı gibi sıcak sıvılar ve parçalara dokunulmaması için çalışanların bilgilendirilmesi, ➤ Eldiven, vb. kişisel koruyucu donanımların kullanımının sağlanması,
➤ Operatörlerin eğitim ve yetkinlik eksikliği (eğitilmiş ve yeterliliği olmayan operatörler tarafından makinenin kullanılması sonucu kaza riskleri)	➤ Galeri açma makinelerini kullanan personelin Tehlikeli ve Çok Tehlikeli İşlerde Galeri Açma Makineleri Bakım ve Operatörlüğü eğitimi almış olması ve/veya Galeri Açma Makinesi Operatörlüğü Seviye-4 mesleki yeterliliğine sahip olmasının sağlanması, ➤ Makineyi kullanabilecek yetkinliğe sahip olmasının sağlanması.

3 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Çalışma kapsamında yapılan araştırma ve incelemelerden aşağıda belirtilen sonuç ve değerlendirmelere ulaşılmıştır:

- i. Kömür uzun bir süre daha elektrik üretimi ve yakıt olarak enerji üretiminde ülkemiz için bir kaynak olma durumunu sürdürecektir. Kömür yataklarımızın ekonomiye kazandırıldığı yeraltı kömür madenciliği çalışmalarının en önemli aşaması hazırlık kazılarının galeri açma makinesi ile yapılması, delme-patlatma yöntemine göre daha emniyetli ve daha verimli bir sistemdir.
- ii. Mekanize galeri açma çalışmaları verimli bir aktivite olmasının yanında, galeri açma makinesi ve bileşenlerinden kaynaklı birtakım ilave özel riskleri barındıran bir madencilik faaliyetidir.
- iii. Galeri açma makineleri ile kazı çalışmalarında, öncelikle risk analiz ve değerlendirme çalışmalarının yapılması, makine ve bileşenlerinin güvenli bir şekilde kurulumu, kontrol ve bakımlar, makinelerin yetkin ve eğitilmiş kişilere kullandırılması ve makinenin çalıştığı durumda çalışanların bulunacağı yerlerle ilgili sınırlandırmaların doğru yapılmış olması/etki alanından çalışan bulundurulmaması, vb. önemli güvenlik önlemleri ile sistem güvenli ve verimli bir şekilde işletilebilir.
- iv. Galeri açma makinesi kazı yüzeyine en yakın çalışan ekipman olması nedeniyle, olası metan gazı (veya yanıcı gaz geliri) durumu göz önünde bulundurulmalı, ekipman üzerinde bulunan metan sensörü sürekli çalışır halde tutulmalıdır. Makine uygun patlamazlık sertifikasına (ATEX Grup 1 M2) sahip olmalıdır.
- v. Galeri açma makineleri ile kazı çalışmalarında kazıdan çıkan tozun bastırılması için uygun toz bastırma sistemi kullanılmalı, tozun kaynağında önlenmesi için galeri açma makinesinin bomunda su püskürtme sisteminin çalışır durumda tutulması, çalışanlara kişisel koruyucu donanım (toz maskesi, vb.) kullandırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Kahraman, E., 2011. Çayırhan Yeraltı Linyit İşletmesi G Sahasında Hazırlık Çalışmalarının Değerlendirilmesi, 3.Maden Makinaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İzmir.
- Kahraman, E., 2012. Çayırhan Yeraltı Linyit İşletmesinde Kollu Galeri Açma Makineleri İçin Performans Tahmin Modeli Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Niğde.
- Kartal, İ., 1993. *Galeri Açma Makinesi Operatörü Yetiştirme Eğitimi, Türkiye Kömür İşletmeleri, Ankara.*
- Resmi Gazete, 2013a. İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği, Sayı: 28628, Ankara, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=18318&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> (erişim tarihi 29.01.2023)
- Resmi Gazete, 2013b. Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik, Sayı: 28721, Ankara, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=18647&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> (erişim tarihi 30.01.2023)
- Resmi Gazete, 2013c. Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, Sayı:28770, Ankara, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=18858&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> (erişim tarihi 30.01.2023)
- Tunçdemir, H., 2002. Kollu Galeri Açma Makinelerinin veya Benzer Makinelerin Cevher Kazısında Kullanımlarının Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Türkiye Ulusal Enerji Planı, 2022. TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Ankara, https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf (erişim tarihi 31.01.2023)

Yeraltı Madenciliğinde Fazla Kazıyı Önlemede ‘String Loading’ Uygulaması

‘String Loading’ Application to Prevent Overbreak in Underground Mining

Z. Demirci, A.Ç. Beşir

Tüprag Metal Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. Efemçukuru Altın Madeni, İzmir

ÖZET: Maden üretim çalışmalarının en önemli aşamasında delme-patlatma operasyonları yer almaktadır. Delme-patlatma operasyonları, hem malzeme boyutunun iyi ayarlanarak zenginleştirme aşamasında minimum enerji kullanılmasını hem de istediğimiz kesiti oluştururken geride kalan ana kayaca en az etkiyi vermeyi amaçlamaktadır.

Yeraltı madenciliğinde çalışan güvenliğini tehdit eden en önemli unsurlardan biri kavlak oluşumudur. Kavlak, ana kayacıtan ayrılan küçük ya da büyük kayaç parçalarıdır. Kavlaklanma, kayaçlardaki mevcut çatlaklar, su, oksitlenme gibi doğal sebeplerle kendiliğinden oluştuğu gibi kavlak oluşumuna en büyük etken patlatma operasyonlarıdır. İsteddiğimiz kazı kesitlerini oluştururken ana kayacın en iyi şekilde korunması gerekmektedir. Bu sebeple galeri/tünel patlatmalarında kazı kesitini oluştururken ana kayaca mümkün olduğunca az zarar vermek için çevre deliklerinde kesme etkisi yaratacak patlayıcılar veya yöntemler tercih edilmektedir. Madenimizde ana kayaca en az zararı vermek için ‘String Loading’ yöntemi uygulanmaktadır. String loading uygulamasında geniş çaptaki deliğe, daha küçük çaplarda patlayıcının şarj edilmesi yöntemi ile çevre deliklerinde kesme etkisi yaratılmaktadır. Galeri kesitinin üretim planına en yakın şekilde elde edilmesini sağlayan bu tekniğin fazla kazı, patlayıcı miktarı, ve havalandırma yönünden sağladığı katkı bu çalışmada değerlendirilmiştir.

ABSTRACT: Drilling-blasting operations constitute the most important stage of mine production. Drilling-blasting operations aim to use minimum energy for the mineral processing by optimizing the material size according to the design, and to give the least impact to the surrounding rock while creating the planned section.

Back and rib fall in underground mine is one of the most important factors that threaten the safety of mine workers. It is formed by small or large rock fragments separated from the body of rock. Blasting operations are the main reason of back and rib fall in addition to natural causes such as cracks in the rocks, water, and oxidation. During mining operations, the surrounding rock should be protected while creating the planned sections. For this reason, explosives or methods that will create a cutting effect in the perimeter holes are preferred to minimize the damage of the surrounding rock while creating the sections in drifting/tunneling. In Efemçukuru Gold Mine, the 'String Loading' technique is used to reduce the damage to the surrounding rock as much as possible. In the string loading application, a cutting effect is created at the face boundary by charging the bulk explosive with a smaller diameter into the perimeter holes. The contribution of this technique, which enables the section to be obtained in accordance with the production plan, has been evaluated in this study in terms of overbreak, explosive amount and ventilation.

1 TÜPRAG EFEMÇUKURU ALTIN MADENİNDE STRING LOADING ÇALIŞMALARI

1.1 String Loading

Günümüzde yeraltı madenlerinde ya da tünellerde ayna patlatmalarında kullanımı yaygınlaşmaya başlayan string loading tekniği ayna sınırını oluşturan çevre deliklerinin şarjında kullanılmaktadır (Stephen, 2013).

Ayna patlatmalarında uygulanan delikler görevleri bakımından dört gruba ayrılmaktadır. Bunlar göbek bölümünü oluşturan orta çektirme delikleri, göbek etrafında yer alan yardımcı delikler, taban delikleri ve galeri kesitini oluşturan çevre delikleridir. Özellikle kazı kesitinin planlandığı gibi oluşturulması amacıyla ayna sınırlarının kesme etkisiyle oluşturulması için çevre deliklerinde uygulanan şarj tekniği büyük önem taşımaktadır.

Delme patlatma operasyonlarında, çevre deliklerinde kullanılan string loading uygulaması ile diğer deliklere oranla daha az patlayıcı kullanılması ve özgül şarj miktarının düşürülmesi, planlanan kazı kesitinin ana kayaca en az zarar vererek oluşturulması, fazla kazı oluşmasının engellenmesi, patlatmadan sonra daha az hava kullanarak patlatma bölgesindeki kirlenen havanın temizlenmesi ve daha düzgün kesitler oluşturularak tahkimat elemanlarının planlanan miktarda kullanılması amaçlanmaktadır (Klaric,2015).

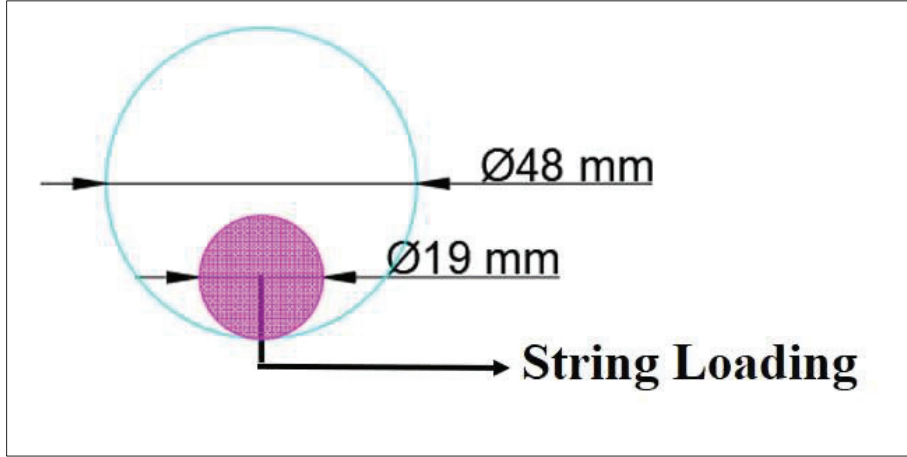


Şekil 1. String loading uygulama örnekleri

1.2 String Loading Uygulaması

Madenimizde üretim aynalarında tüm patlatma deliklerinin çapı 48mm, çürütme delikleri 127mm olarak uygulanmaktadır. Kullanılan patlayıcılar nonel kapsül, paket emülsiyon, bulk emülsiyon, infilaklı fitil ve elektronik kapsülden oluşmaktadır. Şarj operasyonunda öncelikle nonel kapsül paket emülsiyona takılarak sıkılama sopasıyla delik dibine gönderilir. Ardından şarj hortumu delik dibine sürülür ve şarj düğmesine basılarak deliğin ana patlayıcı olan bulk emülsiyon ile tam olarak doldurulması sağlanır. String loading yöntemi ile şarj edilen çevre deliklerinde ise string düğmesine basılarak hortum makaralar yardımıyla otomatik çekilerek, Şekil-1’de görüldüğü gibi bulk emülsiyonun delik içerisine hortum iç çapı (19mm) kadar serilmesi sağlanır. Bu yöntem ile çevre delikleri bulk emülsiyon ile delik cidarına kadar doldurulmaz. Ana patlayıcı olan bulk emülsiyon şarj hortumunun iç çapı kadar delik içerisine serilmiş olur. Hortumun otomatik çekilmesi Şekil-3’de gösterildiği gibi Dyno Miner pompa kullanıcı arayüz panelindeki PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) yazılım sistemi ile yönetilir. Şarj operasyonu sırasında kullanıcı arayüzünde delik çapı ve delik uzunluğu bilgileri

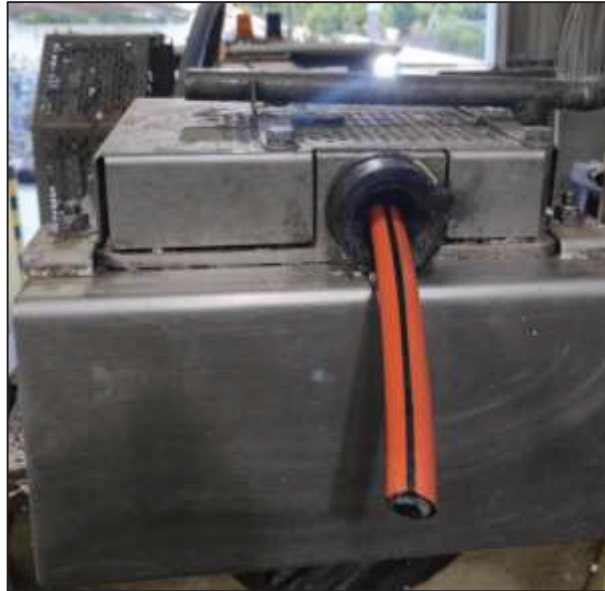
manuel olarak girilir. Hortum çekme hızı bu verilere göre otomatik olarak ayarlanmaktadır. Patlayıcı Dolum Ekipmanı Üzerindeki Hortum İtici-Çekici Makara Şekil-4'te gösterilmiştir.



Şekil 2. String Loading uygulanan şarj deliği kesiti



Şekil 3. Dyno miner pompa kullanıcı arayüzü

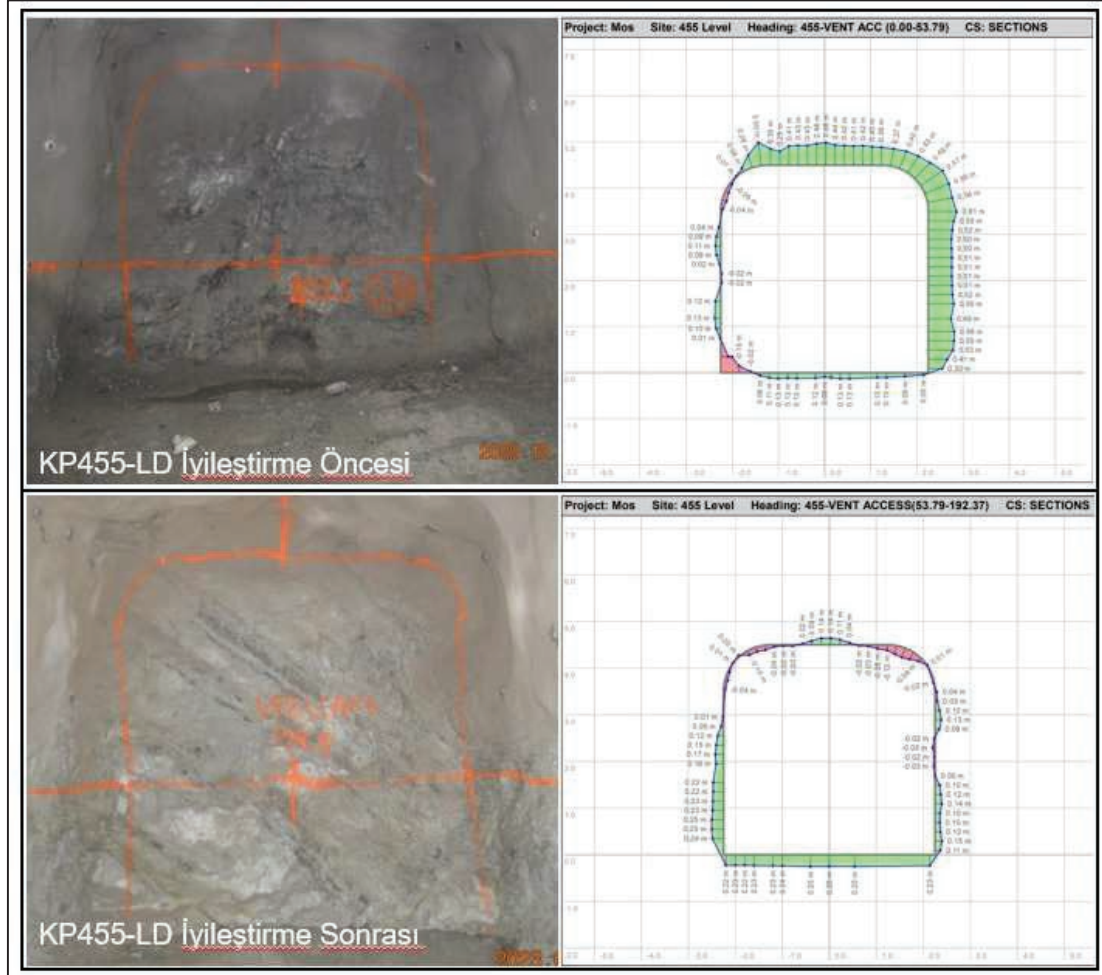


Şekil 4. Patlayıcı dolum ekipmanı üzerindeki hortum itici-çekici makara

2 STRING LOADING UYGULAMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Efemçukuru Altın Madeninde delme patlatma operasyonlarında uygulanan String Loading tekniğinin fazla kazı, patlayıcı miktarları ve havalandırma yönünden değerlendirilmesi için bir dizi çalışma yapılmıştır.

Madenimizde başarılı bir şekilde uygulamaya geçirdiğimiz iyileştirme çalışmalarından biri olan String Loading tekniğinin öncelikli hedefi fazla kazı miktarının en aza indirilmesidir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda formasyon değişikliğinin en az olduğu ana hazırlık aynalarında String Loading tekniğinin uygulandığı ve uygulanmadığı ilerlemelerden ölçümler ve fotoğraflar alınarak karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 5'te aynı aynanın farklı ilerleme metrelerinde görülen karşılaştırma çalışmasında; String loading tekniği uygulanmadan yapılan (iyileştirme öncesi) patlatmada 0,01 ile 0,61m arasında değişen tavana ve sağa açılmaların olduğu görülürken iyileştirme sonrası alınan ölçümde 0,01 ile 0,24m arasında değişen fazla kazı mesafeleri gözlemlenmiştir.



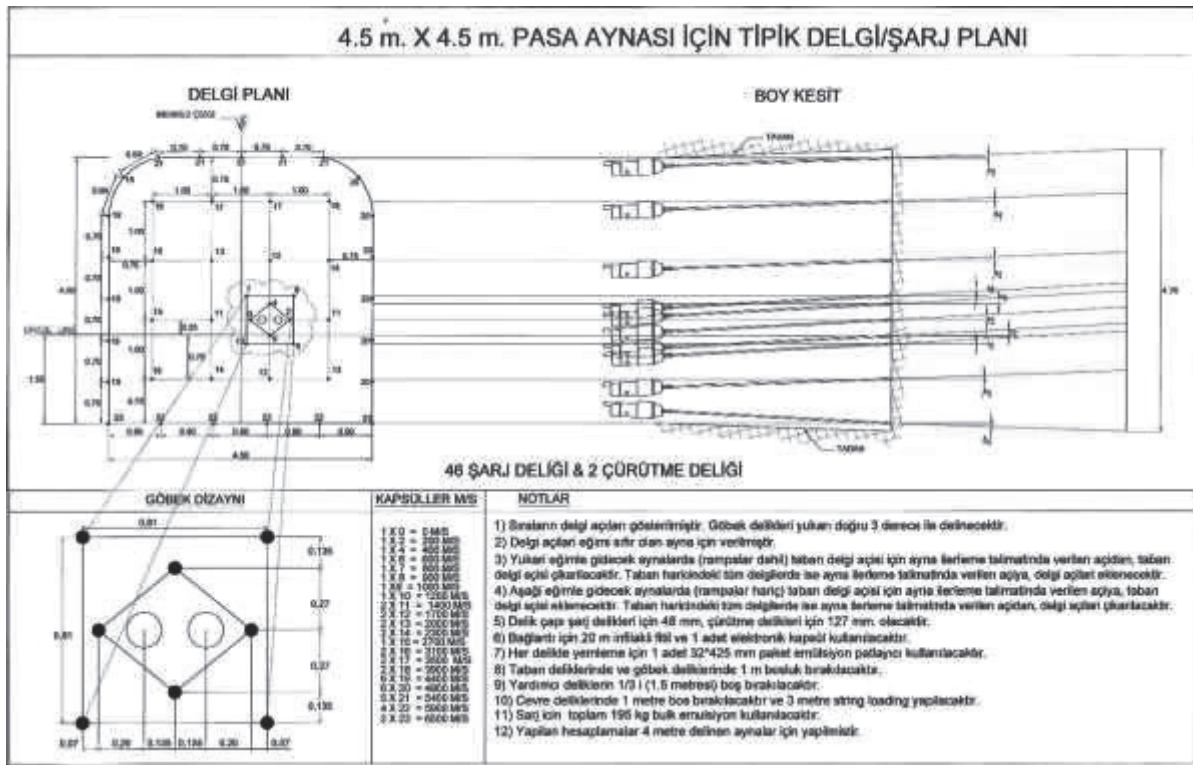
Şekil 5. String loading iyileştirme çalışmasına ait karşılaştırma örneği

Patlatma operasyonlarında gerçekleşen fazla kazı durumu pasa/cevher malzemenin nakliyesini de doğrudan etkilemektedir. Fazla kazının en aza indirilmesi ayna bazında gerçekleştirilen nakliye çalışmalarının planlanan zamanda yapılması amacıyla önem taşımaktadır. String Loading tekniğinin kullanıldığı iyileştirme çalışmasında atım başı fazla kazı oranlarının incelenmesi ve patlatma sonrası oluşan sefer sayısına yönelik değerlendirme örneği Çizelge 1'de sunulmuştur. 4,5x4,5m paternde (Bknz. Şekil 6) delinen KP455LD ve 597-WW hazırlık aynalarında çevre deliklerinin açıları sebebiyle açılan yüzey ortalama 4,64x4,64m ölçülerine ulaşmaktadır. Bu sebeple madenimizde hazırlık aynaları için belirlenen fazla kazı oranı toleransı %5'tir. Çizelgede her iki karelaaj için elde edilen tonajlara göre fazla kazı sefer sayıları hesaplanmıştır. 4,5x4,5m karelaajı için String Loading uygulanan aynalarda uygulanmadığı duruma göre yaklaşık %50 oranında daha az fazla kazı sefer sayısı ortaya çıkmaktadır. 4,64x4,64m karelaajda ise fazla kazı sefer sayısı string loading uygulamasıyla KP455-LD aynasında oluşmamaktayken 597-FWW aynasında 3 adettir.

Çizelge 1. Hazırlık aynalarında string loading çalışma öncesi ve sonrası karşılaştırması örneği

Ayna: KP455-LD	İlerleme (m)	Gerçekleşen (ton)	4,5x4,5m				4,64x4,64m			
			Plan (ton)	Fazla Kazı (ton)	Fazla Kazı Oranı %	Sefer Sayısı	Plan (ton)	Fazla Kazı (ton)	Fazla Kazı Oranı %	Sefer Sayısı
Çalışma Öncesi	52,85	3387	2997	390	13,03%	20	3186	201	6,31%	10
Çalışma Sonrası	52,85	3180	2997	183	6,12%	9	3186	-6	-0,19%	0

Ayna: 597-FWW	İlerleme (m)	Gerçekleşen (ton)	4,5x4,5m				4,64x4,64m			
			Plan (ton)	Fazla Kazı (ton)	Fazla Kazı Oranı %	Sefer Sayısı	Plan (ton)	Fazla Kazı (ton)	Fazla Kazı Oranı %	Sefer Sayısı
Çalışma Öncesi	21,65	1503	1228	276	22,45%	14	1305	198	15,17%	10
Çalışma Sonrası	21,65	1359	1228	132	10,72%	7	1305	54	4,14%	3



Şekil 6. 4,5x4,5 Hazırlık aynası için tipik delgi/şarj planı

Efemçukuru Altın Madeninde uygulanan hazırlık ve üretim ayna patlatmalarında çevre delikleri dışındaki tüm patlatma deliklerinde ana patlayıcı, delik cidarını tam dolduracak şekilde şarj edilmektedir. Çevre deliklerinde ise string loading tekniği gereği deliğe şarj edilen ana patlayıcı miktarı, diğer şarj deliklerine göre yaklaşık %50 daha az uygulanmaktadır.

Yapılan çalışmalarda string loading tekniğinin patlayıcı miktarındaki etkisini değerlendirebilmek amacıyla 44 adet ayna patlatması incelenmiştir. Çizelge 2’de delik sayıları ve patlayıcı miktarları sunulan 44 adet atımda String Loading tekniği uygulanarak atım başına ortalama 41 kg patlayıcının daha az kullanıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan ana patlayıcının azaltılmış olması maden havalandırmasına da olumlu katkı sağlamıştır. String

loading tekniği kullanılarak şarj edilen aynalarda patlayan bölgeyi temizlemek için gerekli havalandırma süresinde %2 iyileşme sağlanmıştır.

Çizelge 2. String loading tekniği kullanılarak şarj edilen aynalardaki patlayıcı miktarları

Atım No	Çevre Deliği Sayısı	Taban Deliği Sayısı	Göbek Deliği Sayısı	Yardımcı Delik Sayısı	SL Uygulanarak Oluşan Patlayıcı Miktarı (kg)	SL Uygulanmadan Oluşan Patlayıcı Miktarı (kg)	Patlayıcı Miktarı Farkı (kg)
3002	17	6	8	15	193,55	231,8	38,25
3003	17	6	8	15	193,55	231,8	38,25
3004	21	5	8	11	178,85	226,1	47,25
3006	21	6	8	11	184,55	231,8	47,25
3007	21	6	8	11	184,55	231,8	47,25
3008	22	6	8	11	187,05	236,55	49,5
3009	22	6	8	11	187,05	236,55	49,5
3012	18	9	8	22	246,4	286,9	40,5
3013	20	7	8	15	206,75	251,75	45
3014	18	6	8	19	215,05	255,55	40,5
3015	19	9	8	21	244,15	286,9	42,75
3016	19	5	8	14	188,1	230,85	42,75
3018	12	5	8	6	132,6	159,6	27
3019	22	9	8	34	313,4	362,9	49,5
3020	22	7	8	24	254,5	304	49,5
3021	16	5	8	8	152,1	188,1	36
3022	15	6	8	11	169,55	203,3	33,75
3023	19	6	8	18	212,8	255,55	42,75
3025	20	6	8	15	201,05	246,05	45
3026	19	8	8	19	228,95	271,7	42,75
3027	20	7	8	15	206,75	251,75	45
3028	21	8	8	19	233,95	281,2	47,25
3029	17	6	8	15	193,55	231,8	38,25
3030	16	6	8	11	172,05	208,05	36
3031	18	9	8	19	232,15	272,65	40,5
3041	20	7	8	15	206,75	251,75	45
3043	18	7	8	11	182,75	223,25	40,5
3045	21	9	8	29	287,15	334,4	47,25
3046	18	6	8	19	215,05	255,55	40,5
3048	14	6	8	11	167,05	198,55	31,5
3049	17	9	8	19	229,65	267,9	38,25
3051	17	5	8	13	178,35	216,6	38,25
3053	16	5	8	11	166,35	202,35	36
3054	17	7	8	15	199,25	237,5	38,25
3056	15	6	8	15	188,55	222,3	33,75
3057	14	6	8	11	167,05	198,55	31,5
3058	17	7	8	14	194,5	232,75	38,25
3059	16	7	8	14	192	228	36
3060	17	6	8	11	174,55	212,8	38,25
3061	16	6	8	11	172,05	208,05	36
3062	16	5	8	8	152,1	188,1	36
3065	20	6	8	15	201,05	246,05	45
3067	19	6	8	15	198,55	241,3	42,75
3070	16	7	8	13	187,25	223,25	36

Söz konusu çalışma kapsamında string loading tekniği kullanılarak şarj edilen 44 atım sonucu ile bu tekniğin uygulanmadığı atımlar fazla kazı yönünden karşılaştırılmış olup yapılan iyileştirme ile yaklaşık %2 oranında fazla kazı miktarının düşürüldüğü görülmüş olup istenilen kazı sınırlarının gerçekleşmesi sağlanmıştır. Ek olarak, iyileştirme sonucu yapılan analizlerde ayna hazırlık aşamasındaki kavlak alma operasyon sürelerinin ve nakliyede sefer sayısının azaldığı, dolayısıyla iş gücü, ekipman, zaman ve maliyet yönünden de olumlu katkı sağlandığı görülmüştür.

3 SONUÇ

Delme patlatma faaliyetleri, yeraltı madenlerinde ve tünelcilik çalışmalarında tüm operasyonların kalitesini etkileyen en önemli aşamadır. Gerçekleştirilen operasyonlarda özellikle galeri kesitinin üretim planlarına en yakın şekilde elde edilmesi amaçlandığından delme patlatma aşamasında uygulanan çevre deliklerinde uygulanan şarj tekniği büyük önem taşımaktadır. Efemçukuru Altın Madeninde galeri patlatmalarındaki çevre deliklerinde planlanan ayna sınırının elde edilmesi amacıyla çevre deliklerinde “string loading” tekniği uygulanmaktadır. Madenimizde yapılan çalışmalarda String Loading tekniğinin uygulanması ile fazla kazı miktarının %2 oranında düşürüldüğü analiz edilmiştir. Bu tekniğin uygulandığı aynalarda yapılan kavlak taraması operasyonlarında sadece yüzeysel kırılmaların gerçekleştiği, ana kayacın diğer yöntemlere göre daha az bozulduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla nakliye seferlerinde %50’ye varan oranda iyileşme sağlanmıştır. String loading tekniği ile şarj edilen patlatma deliklerinde diğer deliklere oranla yaklaşık %50 daha az patlayıcı kullanılmaktadır. Dolayısıyla String loading tekniği ile gerçekleştirilen patlatmalarda patlayıcı miktarında atım başına %17 oranında azalma gözlemlenmiştir. Ek olarak atım başına patlayıcı miktarının azalmasına bağlı olarak havalandırma süresinde de %2 verimlilik sağlanmıştır. Tüm operasyonlar bakımından değerlendirildiğinde söz konusu tekniğin kullanılması ile ayna kalitesinde iyileştirme sağlanmış olup maksimum selektif üretim hedeflerine yaklaşmıştır.

KAYNAKLAR

- Klaric,P, 2015, Improving Drive Stability Through Efficient Development Blasting Design and Practices, Proceedings of 11th International Symposium On Rock Fragmentation By Blasting,Sydney, 24-26 Ağustos 2015, sayfa 327-332.
- Stephen R.I, William A.H, Jeffrey C. Johnson, 2013, A New Perimeter Control Blast Design Concept For Underground Metal/Nonmetal Drifting Applications, Report Of Investigations, NIOSH, sayfa 38.

Yarı Mekanize Tahkimat Sistemi ve TTK Üzülmez Müessesesindeki Uygulaması

Semi-Mechanized Support System and Its Application in TTK Uzulmez Institution

Y. İskender, K. Karaman

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

A. Muslu

Türkiye Taşkömürü Kurumu, ÜTİM Asma Dilaver İşletmesi, Zonguldak

M. Konak

Emekli Maden Mühendisi, TTK, Trabzon

ÖZET: Zonguldak Havzasında bilinen ilk üretim Hazine-i Hassa adına 1848 yılında başlamıştır. Yıllar içinde çeşitli kişiler ve kurumlar tarafından üretim gerçekleştirilmiş olup 1983 yılında 96 sayılı KHK ile Türkiye Taşkömürü Kurumu Genel Müdürlüğü kurulduktan sonra günümüze kadar bu kurum çatısı altında üretim faaliyetleri sürdürülmüştür. Kasım 2016 tarihi öncesinde yapılan çeşitli fizibilite çalışmaları sonucunda bölgenin arazi şartlarının (Jeolojik ve mekanik özellikleri) yarı mekanize tahkimat sistemine uygun olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda Kasım 2016’da ilk olarak 3. Ocak bölgesinde yarı mekanize tahkimat sistemi uygulanmıştır. Uygulama ile 3. Ocak bölgesinde başarılı sonuçlar elde edilmiş ve sonrasında müessesede uygulaması mümkün olan diğer bölgelere de benzer sistemler kurulmuştur. Yarı mekanize tahkimat sistemi, tam mekanize kazıya uygun olmayan koşullarda kullanılabilir. Esnek çalışmaya olanak vermesiyle çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı ülkemizde uygulaması yeni olan yarı mekanize tahkimat sisteminin incelenmesi ve madencilik sektöründe çalışan meslektaşlarımıza sistem hakkında bilgilendirici doküman sağlamaktır.

ABSTRACT: The first known production in the Zonguldak Basin started in 1848 on behalf of the Hazine -i Hassa. Production has been carried out by various individuals and organizations over the years, and after the establishment of the General Directorate of Turkish Hard Coal Enterprise with the Decree No. 96 in 1983, production activities have continued under the roof of this institution until today. As a result of various feasibility studies carried out before November 2016, it was aimed to comply with the semi-mechanized support system of the land rules (geological and mechanical properties) of the region. In these places, in November 2016, the mechanized support system was first applied on the 3rd January half-ground. With the application, successful results were achieved in the 3rd January region and similar systems were established in other places where application was possible in the establishment. The semi-mechanized support system can be used in ways that are not suitable for fully mechanized excavation. It provides various advantages by providing flexible working opportunities. The application for this purpose is to examine the new semi-mechanized fortification system and to provide informative guidance about the system to our colleagues working in the mining industry.

1 GİRİŞ

TTK'nın üretim yapmakta olduğu Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda 1,4 Milyar tonluk bir kömür rezervi mevcuttur. Bu rezervin 1/3'ü kalın ve dik damarlarda toplanmaktadır. 1992 yılına kadar bu damarlarda yoğun emek, yüksek maliyetli ve üretim kayıplarının çok yüksek olduğu karatumba ve dişli ayak gibi klasik yöntemlerle üretim yapılmıştır. 1992 yılında havzanın yeniden yapılanması ve modernizasyon çalışmaları doğrultusunda Hava Patlatmalı Kazı Sistemi (HPKS) pilot olarak denenmiştir. Macar bir ekip tarafından yapılan bu ilk uygulama Mart 1992'deki grizu patlaması nedeniyle sonuçlandırılmamıştır (Akçın ve Özkan, 1999). Havzada 0 – 45° meyilli damarlarda ilerletimli-göçertmeli uzun ayak, yangına eğilimli damarlarda (Armutçuk ve Kozlu Müesseseleri) geri dönüşlü – göçertmeli uzun ayak yöntemleri ile üretim yapılmaktadır. Eğimi 45°'den büyük damarlarda esnek yarı mekanize tahkimat sistemi ile patlatmalı kazı yöntemi uygulanmaktadır. Havzada irili ufaklı çok sayıda fay ve sıklmalar mekanize yöntemlerin uygulanmasını engellemektedir. Üretim halen büyük oranda insan gücüne dayalı olarak gerçekleştirilmektedir (Özer vd., 2016). 90'lı yılların başında yapılan rehabilitasyon projeleri kapsamında uygulanmaya başlanan Hidrolik Direk ve Eklemli Çelik Sarma Tahkimat Sistemi ile arına dik tahkimat yöntemini yaklaşık 30 yıldır sürdürülebilir hale getirmiş olan Üzülmüş Müessesesinde 2015 yılından itibaren hidrolik direk eklemli çelik sarma tahkimat sisteminde ki deneyimlerinden elde edilen kazanımlarla, tavan plakalı hidrolik direkli çalışan bir tahkimat sistemi olan ve yarı mekanize tahkimat sistemi olarak adlandırılan tahkimat sistemlerine geçiş çalışmaları, yatırım programına konarak başlatılmıştır (Biol, 2022). Ülkemizde ilk olarak Zonguldak havzası, TTK Üzülmüş Müessesesi 3. Ocak bölgesinde Kasım 2016 tarihinde yarı mekanize tahkimat sistemi uygulanmıştır. Başarılı sonuçların elde edilmesinden sonra havzada uygulanabilirliği bulunan diğer bölgelerde de yarı mekanize tahkimat sistemi uygulanmaya başlamıştır.

2 ZONGULDAK KÖMÜR HAVZASI

Zonguldak Taşkömür Havzası, Batı Karadeniz sahilinde Ereğli-İnebolu arasında, yaklaşık 160 km doğu-batı yönünde yayılım sergilemektedir. İdari olarak Zonguldak, Bartın, Karabük ve Kastamonu illeri sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 5.1). Havzada TTK'nın Kozlu, Üzülmüş ve Karadon Müessese Müdürlükleri olmak üzere üç ana üretim tesisi bulunmaktadır. Havzada ulaşım açısından bir sorun bulunmamaktadır. Mevcut şehir ve ilçeler, asfalt yollarla birbirine bağlıdır. Havzada kurulu demiryolu ağı, taşkömürü üretim bölgelerinde insan ve malzeme nakliyesi bakımından büyük kolaylıklar sağlamakta ve aynı zamanda Zonguldak-Karabük-Ankara arasında şehirlerarası ulaşım olanak sağlamaktadır. Bölgede akarsu ağı oldukça zengindir. Bölgedeki kıltaşı, siltaşı, volkanik ve metamorfik birimler suyu tutmaları nedeniyle yüzey sellenmeleri fazlaca görülmektedir. Mevcut akarsu ağı, dendritik olup Karadeniz'e dökülmektedir. Yağışlı tipik Karadeniz iklimi havzada oldukça egemendir (Öztürk, 2014 ; Kurşunoğlu, 2019).

2.1 Zonguldak Kömür Havzası Genel Bilgileri

Ülkemizin en önemli taşkömürü rezervleri Zonguldak Havzası'ndadır. Havza, Karadeniz Ereğli'den başlayarak Kandilli, Zonguldak, Amasra, Pelitovası, Azdavay ve Söğütözü' ne kadar uzanan bölgeyi kapsamaktadır. Bölge, Karbonifer devrinde çökelmiş, Hersiniyen ve Alpin Orojenezleri'nin etkisiyle kıvrılmış, kırılmış ve çok karmaşık bir yapı kazanmıştır. Havzada 52 adet kömür damarı olup, bunların ancak 22 adeti üretime uygundur. Bu damarlara ait yatım ve kalınlıklar sırasıyla 0-90° ve 0.8 - 30 m arasında değişir. Mevcut üretimin % 66'sı kalınlığı 1.5 - 4 m arasında olan damarlarda yapılmaktadır. Bu damarların yatımları ise (20° - 45°) arasında değişmektedir. Üretim, +284 ve -560 kotlarında tamamen yeraltı işletmeciliğiyle

gerçekleştirilmektedir (Arıoğlu ve Yılmaz, 2002). Zonguldak Taşkömürü Havzası, ülkemizin enerji ve demir-çelik sektörünün önemli gereksinimlerinden biri olan koklaşabilir taşkömürü üretiminin yapıldığı stratejik öneme sahip bir maden havzasıdır (Biro, 2022).

2.2 TTK Üzülmez Müessesesi 'nde Çalışılan Kömür Damarları

Zonguldak il merkezinde bulunan müessesede 3 ayrı ocakta üretim yapılmaktadır. Bu ocaklar; 1. Ocak, 2. Ocak ve 3. Ocak olarak isimlendirilmiştir. 1. Ocak bölgesinde Taban Acılık damarında, 2. Ocak bölgesinde eğimi 55-60° olan Nasifoğlu dik damarında esnek yarı mekanize sistemi şiltlerin diyagonal olarak dizildiği ve ayak eğiminin 37° olduğu bir sistemle üretim yapılmaktadır. Yine 2. Ocak bölgesinde Sulu damarı da çalışılan damarlardan biridir. 3. Ocak bölgesinde ise üç kömür damarında toplamda beş ayakta üretim yapılmaktadır. Bu damarlar; Piriç, Çay ve Çay Piçi damarlarıdır. Üretim yapılan ayaklarda %90 oranında yarı mekanize tahkimat yöntemi kullanılmaktadır. Kömür üretimi ayaklarda delme patlatma yöntemi ile kömürün parçalanmasını sağlayarak emek ağırlıklı olarak zincirli oluklar kullanılarak nakliye vagonlarına buradan da kuyu sistemi ile tüvenan kömürün yeryüzüne nakliyesi sağlanmaktadır (Biro, 2022).

3 YARI MEKANİZE TAHKİMAT VE ÜZÜLMEZ MÜESSESESİ UYGULAMASI

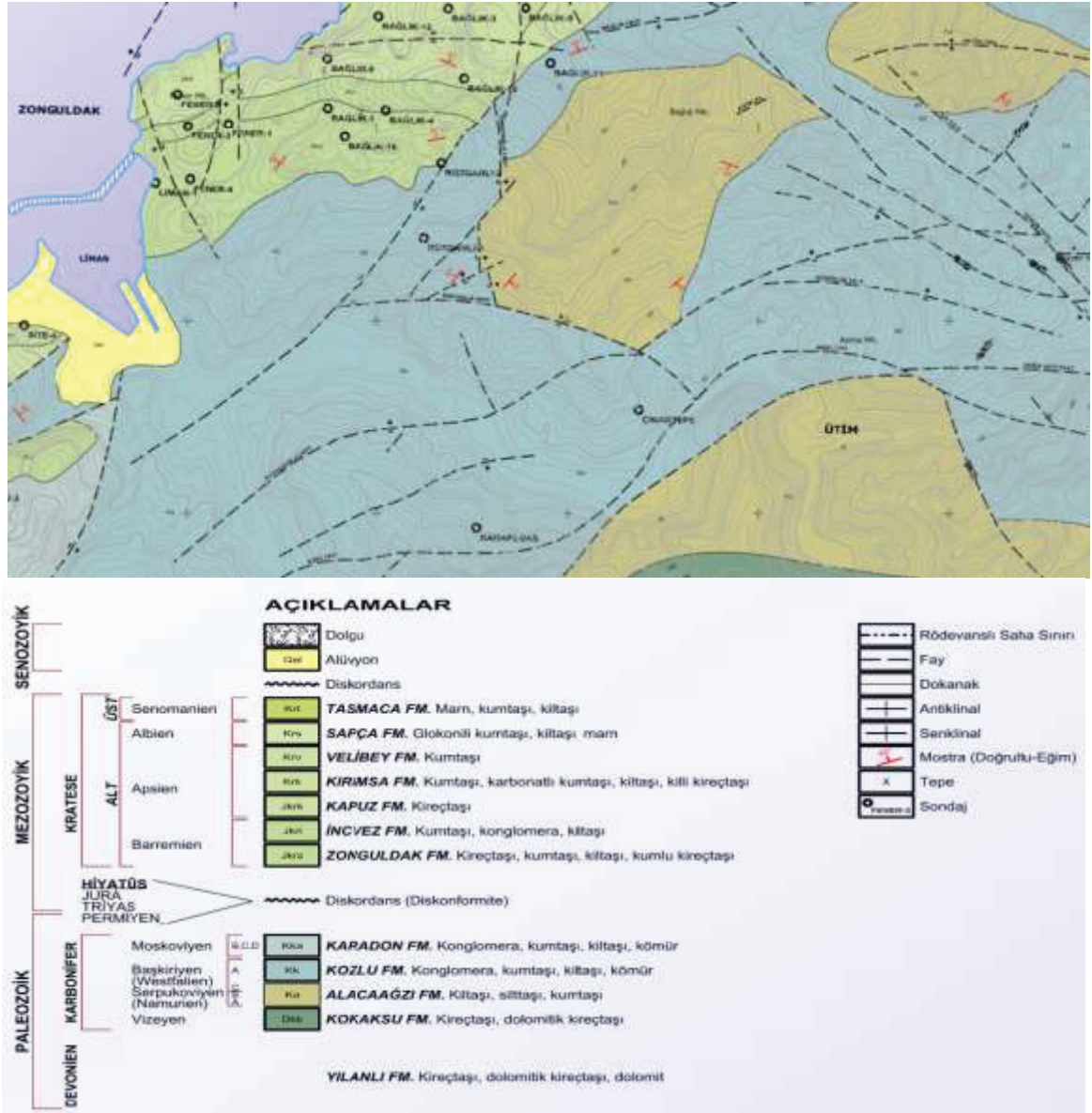
Yarı mekanize tahkimat, Zonguldak havzasında olduğu gibi (Şekil 1' de Zonguldak jeoloji haritasında faylanmalar kesikli çizgi ile gösterilmiştir.) çok sayıda faylanma gibi jeolojik koşullarının tam mekanize yöntemlerin uygulanmasına müsaade etmediği ortamlarda uygulanan, hidrolik direk çelik sarma ve klasik ahşap tahkimata oranla iş kolaylığı, iş güvenliği ve maliyet açısından başarılı sonuçlar veren bir yöntemdir.

3.1 Kirişli Yarı mekanize Tahkimat Sistemi

Kirişli yarı mekanize tahkimat sisteminde ise tek tip tavan plakası kullanılmakta olup kirişler birbirlerine maşonlar ve bağlantı çubukları ile bağlandığından sistemin bütün olarak hareket etmesi esas olmaktadır. Şekil 2' de sistemin ayak içindeki durumu gösterilmektedir.

3.1.1 Kirişli yarı mekanize teknik bilgileri

Mekanize tahkimatta 290x96 mm boyutlarındaki tavan plakaları (şilt) 4'er adet hidrolik direk ile desteklenip iki kiriş ile birbirlerine montajlanarak ayak teşkil edilmektedir. Ayak boyunca yan yana dizilmiş şiltler mevcuttur. İki sıra kiriş şiltleri birbirine bağlayarak tahkimat bütünlüğünü sağlamaktadır. Her şiltte 2 tane ayna tarafında ve 2 adet göçük tarafında olmak üzere 4 adet hidrolik direk bulunmaktadır. Gerekmeye halinde ön kirişe ilave direk eklenmesi mümkün olmaktadır. Sistemde ortalama 250 bar basınç bulunmaktadır. Hidrolik sistemde kullanılan akışkan HFA tipi yanmaz hidrolik sıvı ilave edilmiş sudur ve bu akışkanın döngüsünü sağlayan yüksek basınç istasyonu pompalarıdır. Yüksek basınç pompalarından gelen bu akışkan basıncı sayesinde şiltler kazı yapılan arın yönünde ilerletilmektedir.



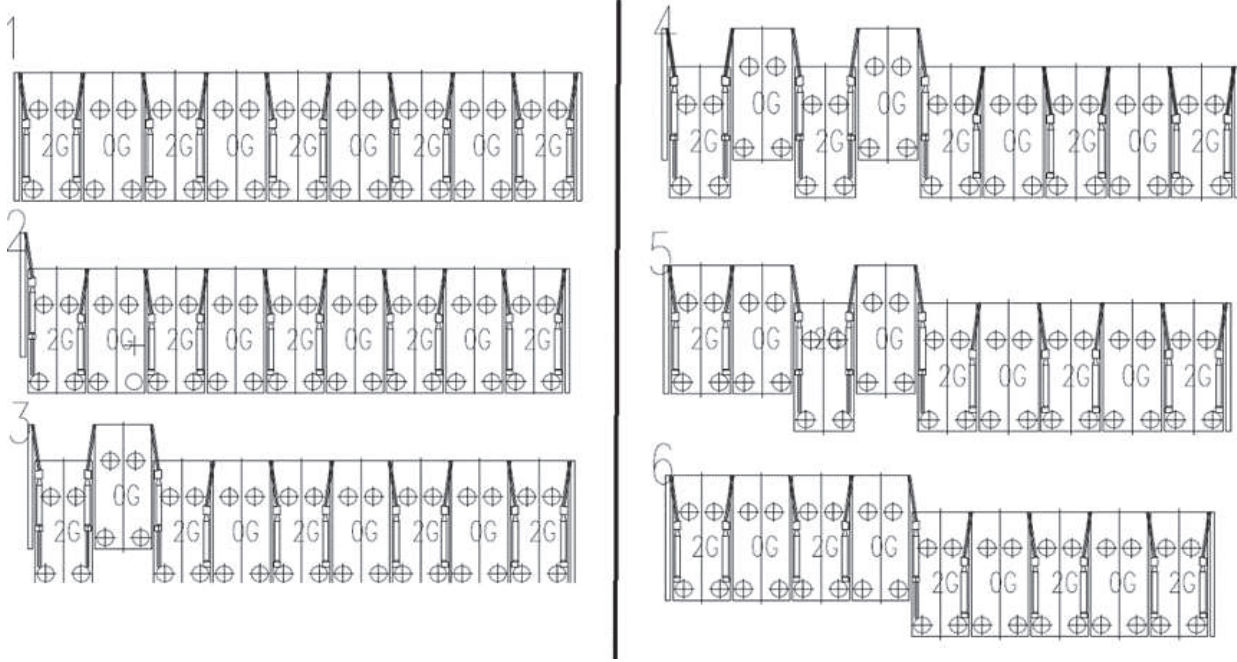
Şekil 1. Zonguldak jeoloji haritası kesiti



Şekil 2. Kirişli yarı mekanize tahkimat sistemi ayak içi görünümü

3.2 Üstten Yürütmeli Zincirli Yarı Mekanize Tahkimat Sistemi

TTK Üzülmez Müessesesi 'nde kullanılan zincirli yarı mekanize tahkimat elemanları 2G ve 0G tipi şiltlerden oluşmaktadır. Zincirli yarı mekanize, kirişli yarı mekanize tahkimata göre daha esnek olup ayak ilerlemesi sırasında biçimsizliklere göre kıvrılmaya müsaittir. Arına dik yöndeki hareket 2G tipi şiltler tarafından gerçekleştirilmektedir. 2G tipi şiltlerde bulunan pistonlar öncelikle yanındaki 0G tipi şiltleri arına doğru itmekte, sonrasında kendini de aynı mekanizma ile 0G tipi şiltlerden destek alarak arına doğru çekmektedir. Arına paralel yöndeki hareketi ise 0G tipi şiltler sağlamaktadır. Şekil 3' te zincirli yarı mekanize ayakta şiltlerin dizilimi ve ilerletimi gösterilmektedir.

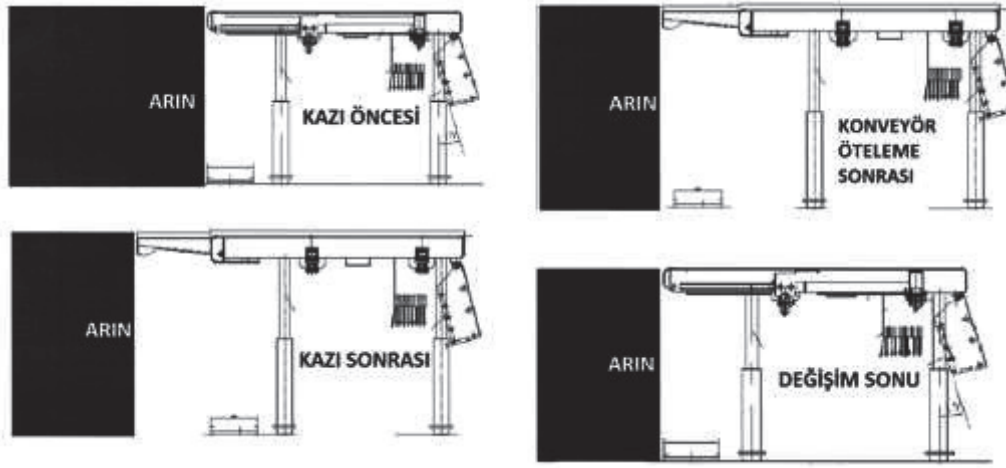


Şekil 3. Zincirli yarı mekanize sistemin ayak içi şilt dizilimi ve ilerletimi

3.3 Yarı Mekanize Tahkimat Sistemi ile Üretim Aşamaları

TTK Üzülmez Müessesesi 'nde üretim delme-patlatma yöntemiyle yapılmaktadır. Patlayıcı olarak sadece grizitun (anti grizu) dinamiti kullanılmakta bununla beraber patlatma sırasında tahkimat ekipmanlarının zarar görmemesi ve üretim yapılırken yeraltındaki duraylılığın bozulmaması adına; Bir atım için 1.2m den daha uzun delik delinmemekte ve patlatma öncesi ekipmanın arına dönük yüzü, hasarı önleyici bant konveyörlerden yapılan perde ile örtülmektedir.

Zincirli yarı mekanize tahkimat sisteminde üretim döngüsü günde 3 vardiya olacak şekilde sürdürülmektedir. Bu vardiyalardan 12-8 ve 16-24 vardiyanın arın üretilerek Şekil 4' te gösterilen kazı öncesi durumundan kazı sonrası durumuna kadar olan süreç icra edilir. 8-16 arasındaki vardiyada ise önceki vardiyada gerçekleştirilen üretim sonucunda 0.8m kazı boyu olan dilim üretilmiş ve şilt kapeleri arına kadar açık halde teslim alınır. Bu vardiya konveyörü ve tahkimat ünitelerini arına kadar ilerletip kapeleri kapalı arına kadar ilerletilmiş halde sistemi gelecek vardiyaya teslim etmektedir. Bu döngü kapsamında günde 2 vardiyada üretim ve bir vardiyada da üretime hazırlık işleri yapılmaktadır. Kirişli yarı mekanize tahkimatta ise benzer sistemin şilt tasarımından kaynaklı küçük farklılıkları söz konusudur. Kiriş tasarımından kaynaklı olarak zincirli oluk ön direklerin hemen arkasında konumlandırılmaktadır. Ön direklerle arka direklerin arasındaki mesafe daha fazladır. Bu da nispeten personele ayak içinde daha fazla hareket alanı sağlamaktadır.



Şekil 4. TTK Üzülmez Müessesesi zincirli yarı mekanize tahkimat ile üretim aşamaları

4 YARI MEKANİZE TAHKİMAT AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Yarı mekanize tahkimat sisteminin avantajları ve dezavantajları incelendiğinde;

- Çok katlı sistemde tavanda kalan kömürün ayak arkasından alınabilme kolaylığı sağlamaktadır.
- Tavandan blok düşmesi ile oluşacak kazalar minimuma inmektedir.
- Küçük kesitli bir galeriden geçirilebilmekte ve ayak içerisinde monte edilebilmektedir.
- Kirişli şiltler birbirlerine kiriş ile bağlandığından tahkimatın sağlamlığı güvenilirliği fazladır.
- Sisteminde çalışacak personel eğitilmiş olmalıdır.
- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Kurulum ve söküm aşamaları iş kaybına neden olmaktadır.
- Uygun damar koşulları ve rezerv miktarı önem arz etmektedir.
- Çalışma ortamı konforu yüksektir.
- İSG yönünden emniyetli çalışma ortamı sağlamaktadır.
- Tahkimat elemanlarından birinin arızası durumunda sistem durmaktadır ve arıza giderilene kadar iş kaybı oluşabilmektedir.
- Bölgede daha önce uygulanan klasik ahşap tahkimat sistemi ve Hidrolik direk çelik sarma tahkimat sistemine oranla ayak içi personel gereksinimi daha azdır.
- Bölgede daha önce uygulanan klasik ahşap tahkimat sistemi ve Hidrolik direk çelik sarma tahkimat sistemine oranla ayak içi personel kazalanma sayıları daha azdır.

5 SONUÇLAR

Geçmişten günümüze kurum kültürünün bir parçası olan sektörde kullanılan teknolojiyi takip etme ve kurum içinde operasyonlara uygun olan ideal sistemleri kullanma bilincinin sonucu karşımıza yarı mekanize tahkimat uygulamaları olarak çıkmaktadır. TTK ÜTİM Asma Üretim İşletmesinde 2016 yılı sonunda kullanılmaya başlanan, günümüzde ise üretimin büyük bölümün yapıldığı yarı mekanize tahkimat sistemleri tanıtılmış ve bunlar hakkında bilgiler verilip değerlendirilmiştir.

Sistem üzerine personelin tecrübesi yıllar içerisinde artmış, personel yarı mekanize tahkimat sistemini benimsemiştir. Bunun bir getirisi olarak sistemden maksimum fayda sağlanmaktadır. Mekanik ve elektrik teknik personelleri sistemde uzmanlaşmış ve sistem ile ilgili bakımlar kurum bünyesinde düzenli olarak yapılmaktadır. Sistemde yaşanan arızalara uzman ekip hızlıca çözüm üretebilmektedir.

Yarı mekanize tahkimat sisteminde, müessesede önceden uygulanan sistemlere oranla ayak içinde çalışan personel sayısında ciddi tasarruf olmaktadır.

MECHANICAL EXCAVATION METHODS / MECHANICAL TUNNELLING
MEKANİZE KAZI YÖNTEMLERİ / MEKANİZE TÜNELCİLİK

Improving Steering Ability of Current Tunnel Boring Machines Through Cutting Head Design on The Basis of Laboratory Findings

O. Z. Hekimoğlu

Emeritus Professor of Mining Engineering, Mugla Sıtkı Kocman University, Mugla, 48000, Turkey.

ABSTRACT: Previous laboratory rock cutting studies by discs revealed that remarkably high side forces were generated, due to occurrence of asymmetric cutting positions between adjacent discs. These high side forces, impose gross lateral forces directly on the cutter head axis, and consequently impairing the machine's steering ability and stability. Current tunnel boring machines are understood to encounter with such adverse side forces, since asymmetric cutting mode has been seen to be common nearly on all practical cutter heads. This aspect has not, however, been investigated in the published literature, though being an important issue. In this paper, a practical method of cutter head design was suggested for current tunnel boring machines in an effort to eliminate or minimize excessive side forces for improved steering ability, based upon the findings of previous laboratory investigations.

1 INTRODUCTION

Full-face tunnel boring machines (hereinafter will be mentioned as TBM in this paper) equipped with disc-type rolling cutters, are typical machines commonly employed for excavation of hard and abrasive formations in underground excavations. The magnitude of forces to be exerted on the tunnel face by the machine dictates machine characteristics such as power, size and capacity. The forces acting on the machine are generated at the rock tool interaction, and their magnitudes may be controlled by a proper arrangement of the cutter tools on the entire cutting head, known as cutter head design or tool lacing. Cutterhead design is, therefore, an important factor in mechanical excavation for efficient machine performance.

Basic parameters in rock cutting with discs are shown in Figure 1. Disc diameter (D), depth of penetration (p) and spacing between the adjacent discs (s) are the main parameters affecting the magnitude of disc forces, along with rock properties. Fundamental aspects of disc cutting will not be mentioned here, since they were well-described by previous investigations (Takaoka et al., 1973, Roxborough & Rispin 1973, Roxborough & Philips 1975, Ozdemir 1977, Bilgin 1977). In cutter head design whether with drag tools or roller type tools, it is an established concept that arrays of cutting tools are disposed on the surface of the cutting head to cut in sequences in an effort to gain a benefit from the action of preceding cutters. Under such circumstances, angular spacing between successive cutters (Θ) also needs to be considered in combinations with spacing and penetration.

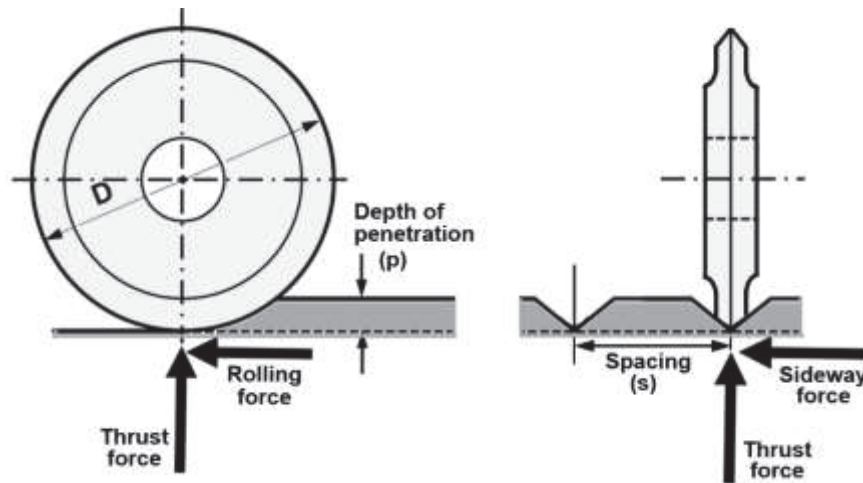


Figure 1. Description of some fundamental parameters considered in rock cutting with discs.

Some fundamental lacing parameters involved in cutter head design of TBMs are illustrated in Figure 2. The discs orientated perpendicularly or tangentially to the cutter head surface are known as the face cutters, whilst those progressively tilted towards the outermost periphery of the cutter head, in a manner as shown in the figure are called 'gauge cutters' which provide smooth transition from the face towards the corner to avoid confined cutting.

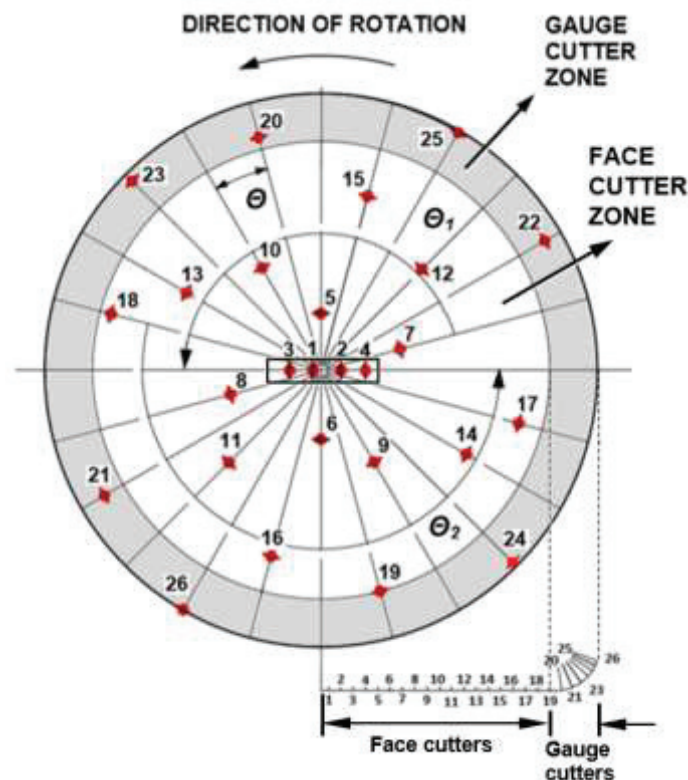


Figure 2. Projection of discs on the cutting head of an actual TBM, shown on a plane perpendicular to the axis of cutter head, and on a plane parallel to the axis of cutter head, respectively (Θ is angular spacing).

Comprehensive laboratory rock cutting investigations specifically focused on cutting position of discs on TBM cutter heads are scarcely found in the published literature, with the exception of two known studies which were conducted on certain aspects of TBM cutter head design, with

limited design parameters. The first investigation was carried out at Colorado School of Mines in U.S.A (Ozdemir, 1977) on comparing five different modes of cutting positions through linear cutting trials where adjacent discs are arranged to cut along a horizontal line and inclined lines at two different s/p ratios, respectively, as shown in Figure 3. The cutting trials were conducted at 2.54 mm constant depth of penetration and s/p ratios of 10 and 20, respectively, with a disc of 304.8 mm (12 inches) diameter and 90° disc angle. The surface of experimental rock which was Colorado Red Granite with 138 MPa uniaxial compressive strength, was preconditioned prior to the instrumented cuts. No significant differences were found between thrust and rolling forces in all modes, whilst side forces obtained from the modes 1, 3 and 5 (the asymmetric modes) exhibited higher values than those of Modes 2 and 4 (the symmetric modes). At s/p of 10, mean side forces obtained from the asymmetric Modes 3 and 5 were more than two folds of rolling forces measured for the symmetric Modes 2 and 4, while the side forces for the asymmetric Modes 3 and 5 were nearly three folds of the side forces for the symmetric Modes 2 and 4. The differences between these forces, however, tended to diminish at s/p of 20, in such that both side forces and rolling forces measured for the asymmetric Modes 1, 3 and 5 were about 50 % higher than those of symmetric Modes 2 and 4. This research study accordingly implied that notably high side forces are generated together with rolling forces when the adjacent discs are cutting in an asymmetric fashion.

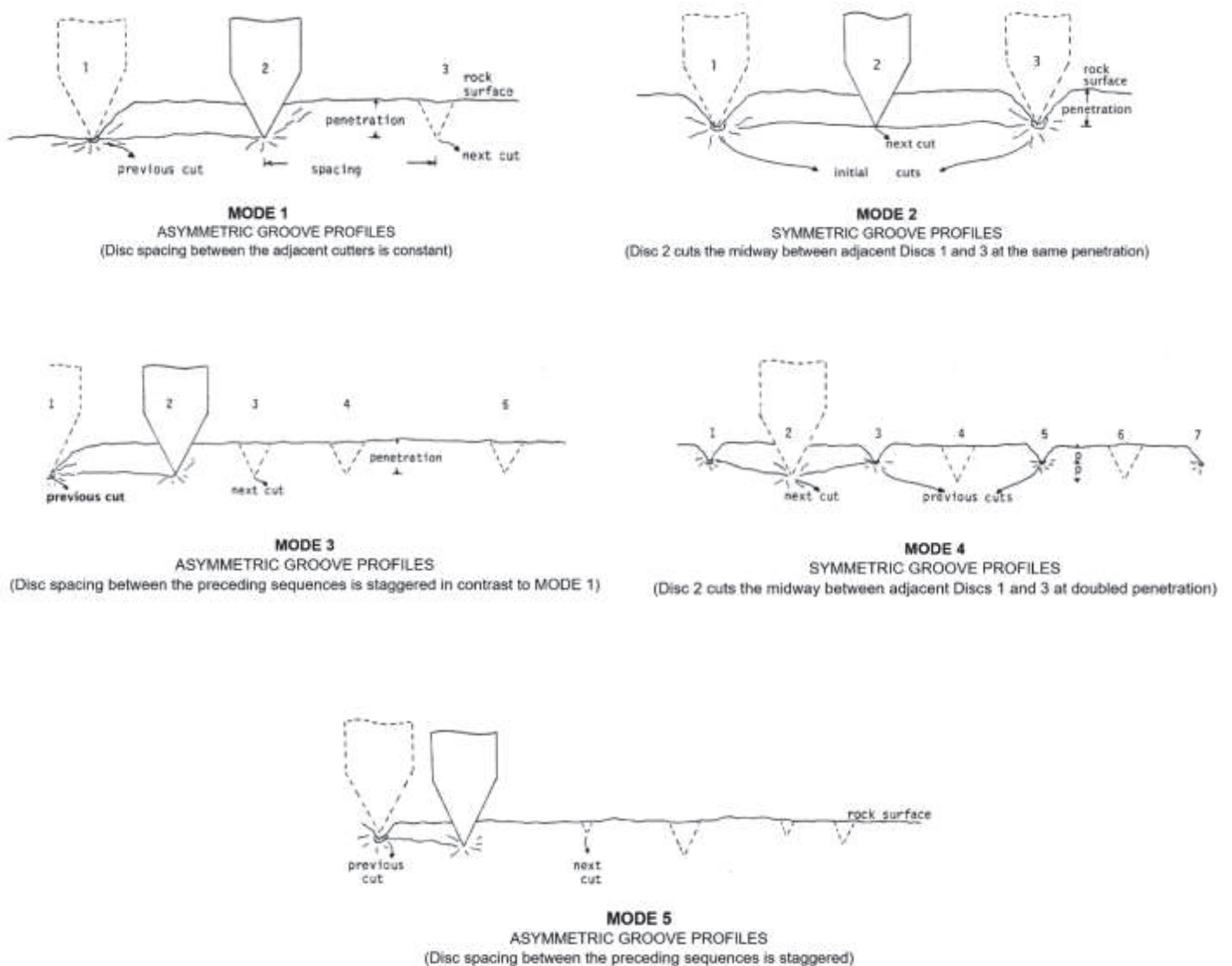


Figure 3. Comparison of five different modes of cutting positions (Ozdemir, 1977).

The other research was performed at the University of Newcastle Upon Tyne, UK, on full-scale laboratory simulation of TBM cutter heads (Fauvel, 1981). The trials were carried out at 5 mm depth of penetration on both level and sloped surface of a rock with 5.6° inclination angle, respectively. A 'V' type disc cutters with 60° edge angle and 300 mm diameter was used to cut a rock sample with 300 MPa uniaxial compressive strength. In unrelieved cutting mode, the mean side forces measured at 5 mm penetration were found to be less than 1 kN for level surface trials at which distinct symmetric groove profiles were exhibited, as shown in Figure 4. At the other hand, the mean side forces for sloped surface trials, were found to be in excess of 20 kN, where asymmetric groove profiles occurred. The mean side forces were about 50 % higher than rolling forces when cutting in unrelieved mode on sloped surface. Moreover, mean side forces tended to be minimum at around optimum s/p ratio, when cutting on trimmed horizontal surface in relieved mode. It is important to note that asymmetric grooves were also observed during inclined surface trials in relieved cutting mode. The findings of this investigation confirms those of the previous research by Ozdemir (1977) described above.

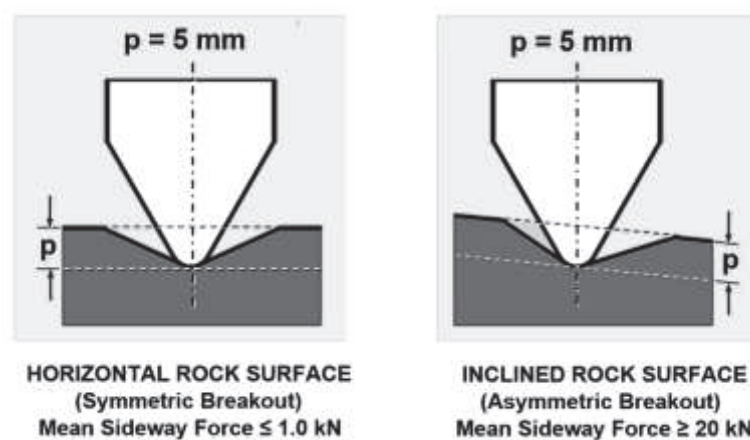


Figure 4. Breakout characteristic of an unrelieved cut.

The findings of afore-mentioned laboratory investigations clearly indicated the generation of excessive side forces due to asymmetric cutting action of disc cutters. It is inevitable that these high side forces result in gross radial loads acting perpendicularly to the cutter head axis, hence impairing steering action of TBMs. This effect may, though, be neutralized by a very well-balanced cutting had design when cutting an ideally homogeneous rock face, whereas this is not possible when operating in mixed face conditions, which is generally the case in practice. The current TBMs are understood to encounter with this problem, since asymmetric cutting has been dominant almost on all practical cutter heads. There is a strong need, in this respect, to adopt a rational method in an effort to eliminate or minimize the asymmetric cutting mode described by disc cutters in mixed face conditions, to achieve a better steering performance particularly when operating in mixed face conditions. There, however, exists no conclusive research introducing such a rational remedy to overcome this problem, in published literature.

In this paper, a practical method of cutter head design was suggested to eliminate or minimize excessive side forces for improved steering ability of current tunnel boring machines. The analyses described in the paper were based upon the findings of previous laboratory investigations on rock cutting with discs.

2 EVALUATION OF FUNDAMENTAL PARAMETERS IN CUTTER HEAD DESIGN OF TBMS

Distance between the adjacent discs (s) is one of the important parameters effecting the magnitude of disc forces, and is considered together with depth of penetration (p). The optimum

range of s/p ratio is also affected by rock characteristics, in such that it increases with rock brittleness. It was reported that s/p ratios between 10 and 20 is commonly considered in practice for TBM cutter heads (Rostami, 2008, Rostami & Chang, 2017).

The depth of penetration is one of the primary factor considered in cutting head design, and is defined as vertical distance from the cut surface to the tool edge in relation to the position of adjacent tools cutting along a horizontal line as in laboratory cutting conditions (Fig. 1). Laboratory investigations on depth of penetration and other fundamental parameters were mainly carried out in this fashion, and the results of these studies have been commonly considered in cutter head design of TBMs. It is, however, important to note that such tool positions appear to be different, if the actual cutting action of TBM cutter heads are taken into account.

The perimeter formed by the tip of adjoining disc cutters generally describe a slope rather than a horizontal line. This slope would inevitably be in the form of a consistent straight line starting from the centre disc up to the outermost face disc, if the angular spacing between the discs in all cutting sequences is equally arranged. This is, however, not the case with the tool lacing of the practical TBMs, since random angular spacing is generally adopted to locate the immediate neighbouring discs along a diameter in opposite radial positions to counterbalance each other. A TBM cutter head may be laced with equal angular spacing, but this equality may not account for the all cutters. This situation is depicted in Figure 2, on an actual TBM where the surface of the cutter head is equally divided at 15° angular intervals. The discs are generally arranged in two cutting sequences with diametrically counterbalanced manner, which is a common arrangement employed in practice. The odd-numbered successive cutters (1,3,5, and so on) form the first sequence, while the second sequence is constituted by even-numbered cutters (2,4,6, and so on). The Disc 6 which is the immediate neighbour of the Disc 5, is located at the opposite half of the diameter with 180° angular spacing to counterbalance the Disc 5. At the other hand, the angular spacing between the Disc 6 and Disc 7 is 105°. It should be noted that Disk 7 is the adjacent disc of Disk 5, since they are in the same sequence. Due to the differences in angular spacing, a slope with varying inclinations for the adjoining discs in a given cutting sequence, then, emerges, and the elevations of the tip of the adjoining discs, termed as relative penetration (p) will be different at each side. This is a form of asymmetric cutting as illustrated in Figure 5, where the breakout pattern of a disc on an actual cutter head of a TBM with 4 m diameter at 8 mm advance per revolution is shown. It is seen that the perimeter joining the tips of two adjoining discs of the same sequence (The Disk 1 and 2 in Figure 5) is no longer horizontal, and their respective elevations (p₁ and p₂) in relation to the disc of the next sequence (The Disc 3) is different. As a result of this, the Disc 3 emerges to cut in an asymmetric position with respect to its immediate neighbouring cutters, the Disk 1 and 2.

The slope angle of this perimeter can be given as follows:

$$\beta = \tan^{-1} [\text{APR} (\Theta_{n+1} - \Theta_n) / 360 S] \dots\dots\dots (1)$$

Where;

β = Slope angle of the perimeter (degree),

APR = Advance per revolution of the cutter head (mm),

Θ_n = Angular spacing between the disc n and the leading disc(s) of the given cutting sequence (degree),

Θ_{n+1} = Angular spacing between the next disc adjacent to disc n and the leading disc(s) of the given cutting sequence (degree),

S = Spacing between the adjacent disc of the same sequence.

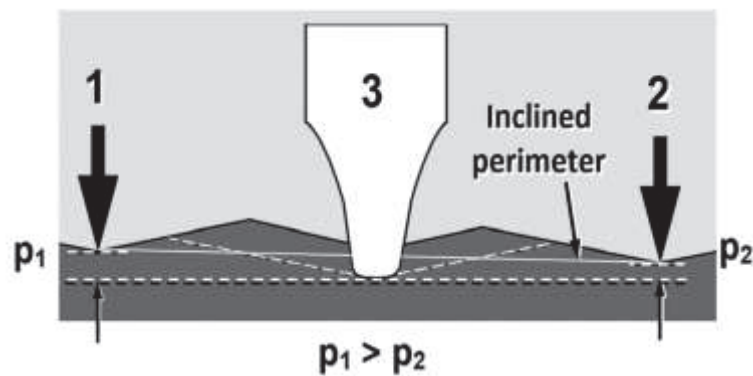


Figure 5. Asymmetric cutting and inclined perimeter observed on the breakout pattern of an actual TBM cutting head (numbers indicate the order of cuts).

Referring to Figure 5, the Disc 1 corresponds Disc (n), and the Disc 2 is Disc (n+1). S is the distance between Disc 1 and Disk 2, as to Equation (1). Moreover, the leading disc(s) are the first tools at the cutter head centre. The Discs 1 and 3 are the leading discs of the first sequence, while the Discs 2 and 4 are those of the second sequence, according to Figure 2.

Equation (1) indicates that angular spacing is the key factor in defining slope angles for a given advance per revolution. The slope angle of perimeters is, therefore, not consistent with all of the cutters, due to the different values of angular spacing. Moreover, the quantitative definition of depth of penetration as defined in laboratory conditions is not the same as that of practical TBMs, due to asymmetric cutting positions of discs. Accordingly, this analysis indicates that the discs fitted on the cutterhead of the current TBMs cut in an asymmetric position.

3 DISCUSSION

All of the face discs on the cutterheads of practical TBMs distinctly experience asymmetrical cutting position, except the first four adjoining set of discs in the centre which are known as the centre quad disks, as in Figure 2. It may, hence, be put forward that the current TBM cutter heads, are always subject to the effects of adverse radial loads leading to the machine steering problems particularly in adverse geological conditions.

Arranging the discs to cut in a symmetrical manner i.e. providing a disc with equal depth of penetrations at each side, either in the forms of Mode 2 or Mode 4 as depicted in Figure 3, is probably the best remedy to this problematic situation, since the side forces were significantly small or approaching zero at such symmetrical cutting positions. Fauvel (1981) suggested that this symmetrical conditions may be achieved by introducing a single conical angle on the cutter head less than the value of 5.6° as adopted in his experiments, or alternatively positioning the tool axes perpendicularly to the rock face rather than parallel to the advance direction. These suggestions would, unfortunately, not help to achieve this objective, due to two reasons. First of all, the whole adjoining discs should be allocated at equal angular spacing in an attempt to obtain such an inclined straight line relevant to the intended conical angle. This is, however, not possible, since a lacing pattern describing such a perfect straight line does not exist in practice, and the perimeters formed by the successive disks with the current cutter heads always take an irregular shape. Secondly, positioning the tools perpendicular to the rock face requires provision of tilt angles for all face cutters, and this consequently reflects the characteristics of cone or domed type cutter heads which have already been phased out.

The author of this paper suggests a practical method applicable to any lacing pattern employed by the current TBMs, with no alteration on the cutter head shell. In this method, each disc is

individually positioned to gain a symmetrical cutting position in accordance with its respective angular spacing relative to the adjacent cutter in the same cutting sequence. This would be accomplished by equalizing the relative depth of penetration of each tool to obtain a symmetrical cutting position, i.e. to obtain ' $p_1 = p_1$ ' condition, instead of ' $p_1 \neq p_1$ ', as noted in Figure 5. The main idea of this method may be explained by considering the lacing arrangement of the face discs on a 4m-diameter TBM cutter head currently used in practice, as shown in Figure 6. The profile shape of both the cutter head face and the corresponding perimeters formed by the tips of discs in each cutting sequence at 7.5 mm advance per revolution is illustrated, respectively, in Figure 7.

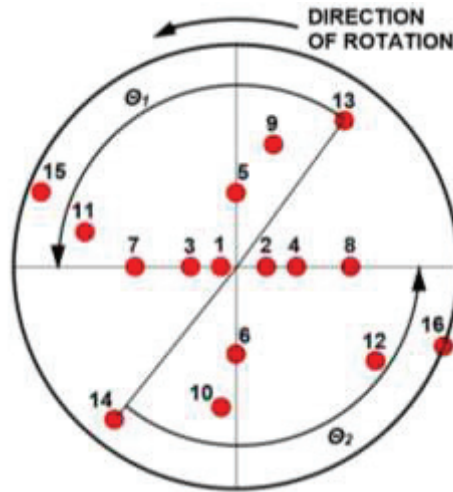


Figure 6. Projection of face discs on an actual cutter head employed in practice.

It may be seen that the adjacent disks which are arranged along a straight line on the flat face of the cutter head produce an irregular perimeter which results in adverse asymmetric cutting position. It will, then, be very logical to exchange the profile of the cutter head face with that of the resulted perimeter, i.e. the flat-faced cutter head profile will be slightly altered for each disc respectively in an effort to take the shape of the irregular perimeter, as depicted in Figure 8. The resulting perimeter, then, appears to be a pure straight line along which the discs cut in a symmetrical fashion exactly similar to Mode 4 in Figure 3.

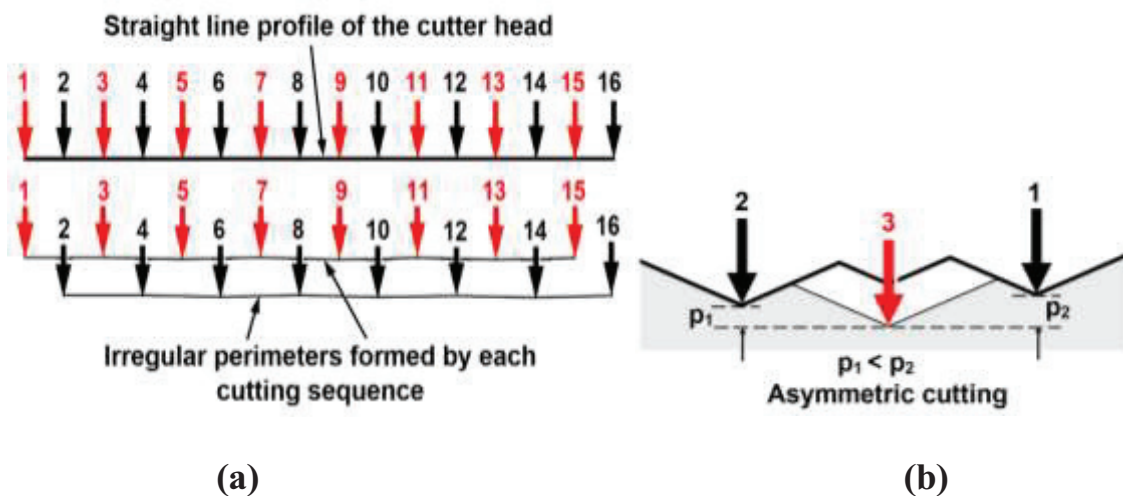


Figure 7. Depiction of tool cutting positions on an actual cutter head; (a) Projection of face discs on the flat face of the cutter head, and profile shapes of corresponding cutting perimeters of each cutting sequence, respectively, (b) resulting asymmetric cutting position (numbers indicate the order of cutting).

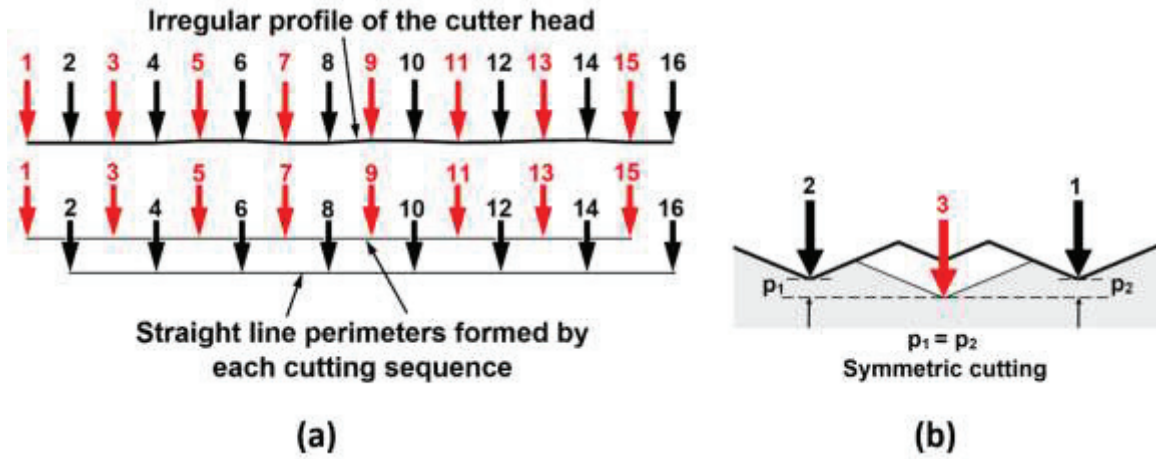


Figure 8. Conceptual depiction of the proposed method; (a) projection of face discs on the flat face of the cutter head, and corresponding straight line cutting perimeters of each cutting sequence, (b) resulting symmetric cutting position (numbers indicate the order of cutting).

This phenomenon may be accomplished by carrying out following steps:

(1) *Identifying the cutting sequences:* The discs with respect to their respective cutting sequences are required to be identified first, in accordance with the explanations in *Section 2*. It is very important to emphasize that cutting sequences should be constructed according to the direction of cutter head rotation.

(2) *Determining the angular spacing:* Angles between the discs of the same sequence is to be determined with respect to the leading cutter(s) of a given sequence in consideration with the direction of the cutter head rotation. As an example in Figure 2, the angle between the disc 7 and corresponding leading cutters (the cutter 1 and 3 in the centre quad) is Θ_1 , whilst that between the disc 18 and corresponding leading cutters (the cutter 2 and 4 in the centre quad) will be Θ_2 . Similar example is also shown in Figure 6, where Θ_1 is the angle between the disc 13 and corresponding leading cutters (the Discs 1, 3 and 7 on the same radius), while Θ_2 is the angle between the Disc 14 and corresponding leading cutters (the Discs 2, 4 and 8, all along the opposite radius).

(3) *Determining the profile height of adjacent discs:* The profile height of each cutter is to be determined relative to that of the leading disc(s) in the centre quad. It is important to emphasize here that the centre quad discs are fixed at the front most line, and they form the reference line for the all remaining discs. In other words, the centre quad discs have the highest profile height among all, whilst the all other discs are recessed respectively away from this reference line to the flat face of the cutter head. Each cutter has different profile height due to the different values of angular spacing, which consequently results in the generation of an irregular perimeter.

The profile height of a given disc relative to the leading disc may be calculated as follows;

$$H = \theta [APR / 360] \dots\dots\dots (3)$$

Where;

H = Profile height of a given disc (mm)

Θ = Angular spacing between the given disc and the leading disc(s) (degree),

APR = Advance per revolution of the cutter head (mm).

The cutter head with a slightly altered face profile is, then, obtained if the cutters are arranged with their respective heights along the cutter head face. In this way, the resulting cutting perimeters formed by the cutting sequences would emerge to be in the form of straight lines which result in symmetric cutting as depicted in Figure 8.

It is very important to emphasize that only the profile height of the individual cutters requires alteration, not the flat structure of the cutter head surface. First, the centre quad discs are risen all together at a value being equal to the advance per revolution, and this will, then, be progressively followed by the immediate neighbouring cutters, e.g. the discs Number 5 and 6 in Figure 2 and Figure 6, are heightened above the original flat surface towards the line of centre quad discs. It is to note that rising of each cutter can be simply achieved by placing a steel shim of appropriate dimension underneath of the whole disc shaft assembly. Furthermore, such shims of very small thickness are understood to be accommodated under the disc assembly on the current TBM cutter heads. The thickest shim is used only for the centre quad discs, while the shims of lesser thickness are required for all other discs. Notation of shim placement is given in Figure 9. Under such conditions, the thickness of a shim to be placed under a given disc cutter, t , can be obtained, as follows;

$$t = APR [1 - (\Theta / 360)] \dots\dots\dots (4)$$

A fixed value of advance per revolution is the key factor in this design concept to minimize the adverse side forces. Hence, the cutter head balance may be altered if the machine is required to be used in different ground conditions for another tunnelling project where the anticipated advance per revolution is no longer match the value considered for the original design.

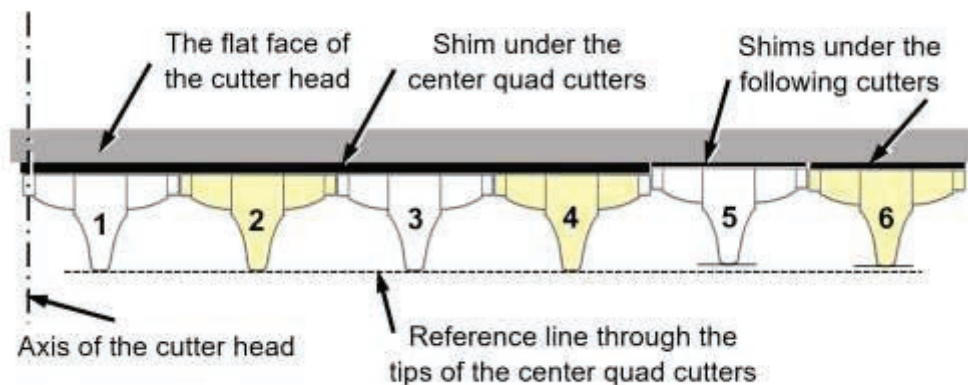


Figure 9. Notation of shim placement with respect to the sequential order of corresponding disc cutters.

With this concept, it is possible to simply adapt the lacing design of an already-manufactured cutter head for various face conditions where different advance per revolutions may be required. More importantly, it is prudential to keep the machine operating at the predetermined value of advance per revolution, as much possible as it can, throughout the course of cutting operation, though it is not always possible to control due to varying face conditions.

The benefit of symmetric cutting does not only lie in improved steering ability, it may also help to decrease the level of rolling forces, up to 50 % according to the previous laboratory findings, hence implying lower torque of the cutter head.

It is very important to note that the success of this concept was previously demonstrated during in-situ trials with chain saw machines in actual production operations in marble quarries. It was observed that, under near uniform conditions, tool wear and tool holder damage were remarkably reduced, and cutting speed of chain saw machine increased by 25%, when the

relative height of adjacent tools which were exactly calculated by Equation (4), were rearranged by simply placing shims of appropriate thickness well below 1 mm under the tool holders (Hekimoglu, 2014). As this practical study confirmed the effectiveness and practicability of this concept, to a certain extent, with drag tools, it is, then, inferred that similar results might also be obtained with TBM cutter heads, though the magnitude of tool forces experienced by chain saw machines is too small to compare with those of disc cutters. Despite enormous differences between the disc forces and those of chain saw machines, this concept is strongly believed to be valid also for TBMs, due to the fact that the main idea behind this method is to locate the cutter tools, whether discs or drag picks, at their correct cutting position in an effort to obtain optimum cutting conditions to eliminate or minimize adverse asymmetric and excessive tool forces. Moreover, it is very important to emphasize that the results of laboratory full-scale experiments on simulation of cutter heads employing drag tools exactly showed the same trend to that of disc cutting trials described in this paper, in such that the minimum side forces were the case if the adjacent tools are arranged to cut in a symmetrical cutting position (Hekimoglu & Ozdemir, 2004).

It is also important to note that a comprehensive analysis for cutting positions of gauge tools could not be carried out, due to the unavailability of extensive researches on this particular topic, with the exception of limited data provided by Fauvel (1981). The procedure adopted for face discs may, however, be employed for gauge cutters in an effort to benefit the advantages of symmetric cutting mode.

4 CONCLUSIONS

Previous laboratory rock cutting investigations showed that excessive side forces are generated when a disc performs the cutting action in an asymmetrical manner with respect to its neighbouring cutters. The side forces of this magnitudes exert gross lateral forces acting directly on the axis of cutter head, hence impairing steering action of the machine. These side forces may be neutralized or minimized, to a greater extent, by a very well-balanced cutterheads in uniform face conditions, whereas it is not possible to achieve this in mixed-face conditions which generally prevail in practice. The discs laced on the cutterheads of all current TBMs are seen to be subjected to excessive side forces, which manifest itself in the lacing patterns commonly employed in practice. Generation of such excessive side forces can well be greatly minimized if the adjacent discs are arranged to cut in a symmetrical fashion, and this objective can be achieved through a simple method explained in this paper. The proposed method can be readily adopted on any cutter head of TBM without any structural alteration and significant cost, and can greatly improve the steering ability of the current machines particularly in adverse geologic conditions.

ACKNOWLEDGEMENT

The author wishes to thank Dr. L. Ozdemir, formerly at Colorado School of Mines (USA), and Dr. O.R. Fauvel, formerly at the University of Calgary (Canada), for making their invaluable researches available in this field. Thanks is also due to Dr. O.R. Fauvel for his personal discussions along with providing the research documents. The views presented here are those of the author's own.

REFERENCES

- Bilgin, N. (1977). "Investigations into the Mechanical Cutting Characteristics of Some Medium and High Strength Rocks", Ph.D. Thesis, Univ. of Newcastle upon Tyne, June, 1977.
- Fauvel OR, (1981). Implications of Laboratory Rock Cutting for the Design of a Tunnel Boring Machine Cutter Head, Ph.D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne. July.
- Hekimoglu, OZ, (2014). Studies on increasing the performance of chain saw machines for mechanical excavation of marbles and natural stones, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 72, December, pp. 230-241.
- Hekimoglu, OZ, Ozdemir, L, (2004). Effects of Angle of Wrap on the Performance of Continuous Miners and Drum Shearers, *Trans. Inst. Min. Metall. A*, Vol. 113, No. 2.
- Ozdemir, L, (1977). Development of theoretical equations for predicting tunnel boreability. Ph.D Thesis, Colorado School of Mines.
- Rostami, J, (2008). Hard rock TBM cutterhead modelling for design and performance prediction, *Geomech Tunn* 2008;1(1):18–28.
- Rostami, J, Chang, (2017). SE, A Closer Look at the Design of Cutterheads for Hard Rock Tunnel-Boring Machines, *Engineering*. Volume 3, Issue 6, December 2017. Pages 892-904.
- Roxborough, FF, Rispin, (1975). A Mechanical cutting characteristics of the Lower Chalk, Report to the Transport and Road Research Laboratory of the Department of the Environment, University of Newcastle Upon Tyne (UK).
- Roxborough, FF, Phillips, H R, (1975). Rock Excavation by Disc Cutter. *Int. J. Rock Mech & Min. Sci*, Vol.12, pp.36-36.
- Takaoka, S, Hayamizu, H, Misawa, S. (1973). Rock Cutting by Disc Cutters, *Tunnel and Tunnelling*, pp. 181-85, March,

