

Blastweb Merkezi Elektronik Ateşleme Sistemi İle Emniyet ve Verimliliğin İyileştirilmesi

Improve Safety and Efficiency by The Blastweb Central Electronic Initiation System

A. Rapokhin, F. Akgün

Nitromak DNX Kimya San. A.Ş., Ankara

ÖZET: Madencilik teknolojisinde yaşanan gelişmeler sayesinde geçmişte ekonomik olmayan düşük tenörlü cevher yatakları ekonomik ve işlenebilir hale gelmiştir. Açık ocak madenciliğinin ekonomik ömrünü tamamlaması sonrasında yeraltı madenciliğine dönülebilmektedir. Yeraltı madenciliğinde son yıllarda yataklanmaya ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak daha derin ve düşük tenörlü madencilik de yapılabilmektedir.

Bahsi geçen gelişmelerden dolayı, birçok yeraltı maden işletmesi patlatma operasyonlarında emniyetin yükseltilmesi ve üretim sürecinde verimliliğinin artırılmasını hedeflemektedir. Benzer şekilde birçok işletmede maden sahası jeolojisi ve cevherleşme özellikleri sebebiyle geleneksel ateşleme metodları üretim beklentilerini karşılayamamakta ve işletmenin patlatma uygulamalarında yakalamayı hedeflediği standardı sağlayamamaktadır.

Son yıllarda patlayıcı madde ve patlatma uygulaması teknolojilerinde de gelişmeler görülmektedir. Özellikle ateşleme çözümlerinde ciddi ilerleme sağlanmıştır. Elektronik ateşleme sistemleri, madenlerin operasyonel ihtiyaçlarına cevap veren teknoloji olarak öne çıkmakta ve yerüstü/yeraltı madencilikte kullanımın yaygınlaşma hızı gün geçtikçe artmaktadır. Elektronik ateşlemenin sunduğu yüksek emniyet ve teknolojik avantajlar, birçok maden için plansız infilak risklerinin bertaraf edilmesi yanında ciddi operasyonel maddi kazançları da getirmektedir.

Bu çalışmada BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sistemi ve elektronik kapsüllerin uygulamasını ele alıp emniyet ve üretim süreci verimliliğine katkılarını değerlendirmektedir.

ABSTRACT: Developments in the mining technologies led to low grade ore deposits, previously uneconomic to mine, become feasible and operational. Mines commence underground mining operations once the open pit mining completes its economic lifecycle. Depending on the ore body structure and recent technological developments, underground mining operations performed on deeper levels and with lower grades.

Because of the aforementioned developments, a growing number of underground mines target improvements in safety of their blasting operations and efficiency of their production processes. In the same manner, mine geology and mineralization properties cause traditional initiation methods to fail to meet production expectations and desired standards of many underground mines.

Recent years witness developments in the explosives and initiation system technologies, particularly a significant improvement in the initiation solutions. Electronic initiation systems are front and center in providing technologies to meet operational requirements of mines, and there is an uptrend in the use of electronic initiation systems in both underground and open pit mining. Enhanced safety and technological benefits provided by the electronic initiation

systems, alongside elimination of unplanned detonation risks, are also allow significant operational financial benefits for many mines.

This study aims to discuss application of BlastWeb centralized electronic initiating system and electronic detonators and to evaluate their contributions to the efficiency and safety of production processes.

1 CEVHERLEŞME ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİM METODLARI

Ülkemizde yapılan metal madenciliğinde, cevherleşmenin orta-dik eğimli ve dar damarlı olmasından kaynaklı olarak üretim yöntemi, genellikle kazı dolgu ve/veya taban/tavan arınlı ara katlı kazı şeklinde uygulanmaktadır. Bununla birlikte maden yapısı, tek-çoklu rampadan ve/veya paralel ara kat oluşturma amaçlı hazırlık ve üretim galerilerden oluşmaktadır (Şimşir, 2015).

1.1 Maden Hazırlık ve Üretim Operasyonlarında Önem Verilen Hususlar

1.1.1 Patlatma uygulamasının emniyeti

- Ateşleme sisteminin dış etkenlere karşı duyarsız olması.
- Atımı vardiya içinde yapılan işletmelerde;
 - a. Kat tahliyesi ve ateşlemenin emniyetli lokasyondan yapılabilmesi (lokal patlatmalarda).
 - b. Diğer katlarda çalışan personeller için göçük riskine sebebiyet vermemesi.
- Atımı vardiya sonlarında yapılan işletmelerde, ateşlemenin ocak tahliye edildikten sonra yerüstünden gerçekleştirilebilmesi
- Yüzeyden elektrikli kapsül vasıtasıyla ilk ateşlemesi gerçekleştirilen patlatmaların, yetkisiz personelin müdahalelerine açık olup olmaması.

1.1.2 Uygulama kolaylığı

- Atım grubunda hızlı bağlantı yapılabilmesi
- Atım yapılması için minimum hamle
- Tekli/çoklu grup atım ve atım lokasyonu seçme esnekliği
- Çoklu grup atımlarında, atımın en kısa süre içerisinde tamamlanabilmesi.

1.1.3 Patlatma verimliliği

- Planlanan ilerlemenin sağlanması.
- Parça boyut dağılımı, yükleme/taşıma operasyonlarını ve kırıcı performansını etkilemesi
- Fazla sökülümün minimize edilmesi
- Cevher kayıplarının (patlatma sonrası askıda malzeme kalması ve/veya alınamaması) önlenmesi
- Kirlenme oranının düşürülmesi
- Yan Duvar ve tavan stabilitesi kaybı

2 GELENEKSEL ATEŞLEME SİSTEMLERİ

Yeraltı metal madenciliğinde, ateşleme sürecini 2 aşamaya ayırmak mümkündür – ilk ateşleme ve ayna/kat arası delik grubu ateşlemesi.

Yeraltı metal madenciliğinde birçok işletmede delik grubu ateşlemesinde delik içi elektriksiz kapsül ve infilak iletim aracı olarak infilaklı fitil kullanılmaktadır. İnfilaklı fitil, düşük maliyetli olup aynı zamanda yıllar boyu kullanımın verdiği güven ve kullanıcı alışkanlığı sebepleriyle öne çıkarken, elektriksiz (Nonel) kapsüller ise sabit gecikmeler ile kullanım kolaylığı

sunmaktadır. Ancak bu kombinasyon zorlu ve değişkenliği yüksek olan formasyonlarda çözüm olmaktan uzaktır. Bu konuyu başlıca 2 sebeple özetlenebilir;

- Patlayıcı maddelerin infilak anında yarattığı şok dalgasının yayılma hızı, kayaç formasyonlarına göre farklılık göstermektedir. Atım grubunda yer alan deliklerin infilak zamanlaması (Nonel gecikmeleri), şok dalgasının ilerleme hızı ile ne kadar uyumlu olursa, patlatma uygulaması sonuçları o kadar başarılı olacaktır. Elektriksiz kapsül gecikmelerinin etki ettiği kriterler arasında, parça-boyut dağılımı ve sağlanan üretim ilerlemesi sayılabilir. Elektriksiz kapsüllerin sabit olan ve seri halde artan gecikmeleri, belirli durumlar için gerekli esnekliği sağlayamamaktadır (Aksoy ve Aksoy, 2020).
- Elektriksiz kapsüller nominal gecikmeden sapabilmekte olup, bu sapma üreticiden üreticiye farklılık göstermektedir ve sektör ortalaması +/-%10 olarak kabul edilmektedir (Aksoy, 2019). İnfilak zamanlamasının net olarak tespit edilememesi, hedeflenen parça-boyutunda malzeme alınamamasına sebep olabilmektedir. Ayrıca fazla sökülme ve kirlenme oranında artış meydana gelebilmektedir. Buna ek olarak; çevre deliklerinin infilak zamanlamasının sapması, planlanan kesitin dışında kalan kayaçta çatlakların oluşumuna sebep olup, tahkimatlandırma maliyetlerinin artmasına ve ara katlı kazı esnasında delme-patlatma uygulamalarının zorlaşmasına yol açmaktadır (Holmberg vd., 2001)

Özetlemek gerekirse; sektörde kullanılan elektriksiz kapsül ve infilaklı fitil kombinasyonu, kullanıcı alışkanlığı ve kullanım kolaylığı noktalarında belirli avantajlara sahip olmakla birlikte, yeraltı üretim operasyonlarının gereksinimlerine karşı zayıf kalmaktadır.

Patlatma uygulamalarında ele alınması gereken bir diğer konu da ilk ateşlemedir. Ateşleyici ilk ateşlemeyi, işletme tarafından belirlenen emniyetli lokasyondan gerçekleştirmektedir. İlk ateşleme elemanı, infilaklı atım grubuna iletmekte ve grup ateşlemesini başlatmaktadır.

Ateşleme; vardiya sonu atımlarda ocak tahliyesi tamamlandıktan sonra, vardiya içi atımlarda ise atım bölgesi tahliye edildikten sonra yapılmaktadır. İlk ateşleme için genellikle aşağıda sıralanan 2 yöntemden biri uygulanmaktadır:

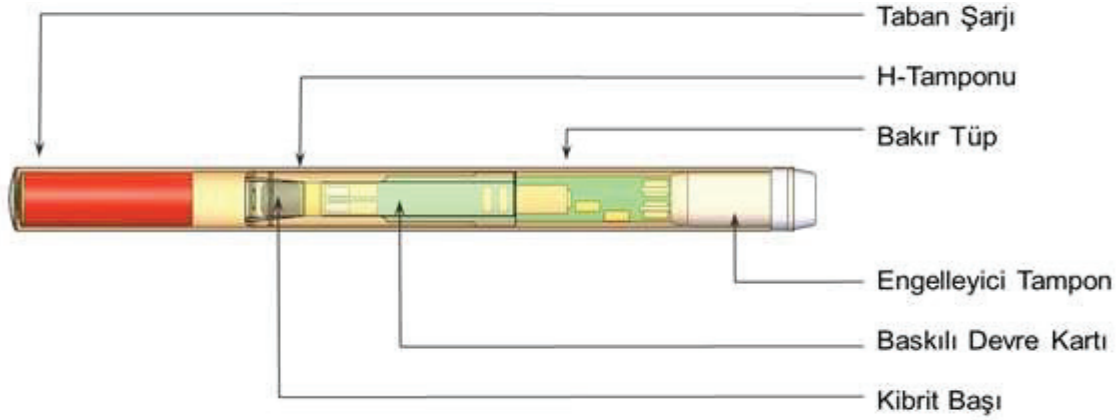
- Uzun metrajlı elektriksiz veya gereken uzunlukta zil teli bağlanan elektrikli kapsül vasıtası ile ilk ateşleme güvenli lokasyondan yapılmaktadır. Çoklu grup atımlarında ateşleyiciler aşağı katlardan yukarıya doğru ilerleyerek atım gruplarını sıra ile tek tek ateşlemektedirler. Bu yöntem ciddi zaman almasıyla birlikte patlatma uygulamasının verdiği titreşim ile oluşabilecek göçük ihtimaline karşı emniyet zaafiyeti ve kaza riski taşımaktadır.
- Ocak içerisine sabit bir ateşleme kablo sistemi döşenir. İlk ateşleme, bu kablo sistemine bağlanan elektrikli kapsül vasıtası ile yüzeyden yapılmaktadır. Bu yöntemde, patlatma esnasında yeraltında herhangi bir personel bulunmadığı için ilk metoda göre tartışmasız daha güvenli olup, ancak elektrostatik deşarj ve elektromanyetik etkileşim olması durumunda plansız ateşleme riski taşımaktadır.

İlk ateşleme elemanının atım grubuna bağlantısı, uzun süreli kullanıma bağlı olarak kazanılan el alışkanlığı sayesinde zaman tasarrufu sağlamaktadır. Ancak yukarıda belirtilmiş aksaklıkların bu süreçte yaşanması, ciddi emniyet risklerini beraberinde getirmekte ve/veya büyük zaman kayıplarına sebebiyet vermektedir.

Görüldüğü üzere iki yöntem de emniyet, pratiklik ve operasyonel verimlilik sunamamaktadır.

3 DYNO NOBEL ELEKTRONİK KAPSÜLLER VE ATEŞLEME SİSTEMİ

Teknolojik olarak Elektronik Ateşleme Sistemleri (EIS) bugün itibari ile mevcut olan en gelişmiş ve emniyetli ateşleme sistemleridir. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen Dyno Nobel firmasına ait sistemin birkaç ana özelliği ve bileşeni bulunmaktadır. Elektronik kapsül iç yapısı Şekil 1’de gösterilmiştir. (Şekil 1).



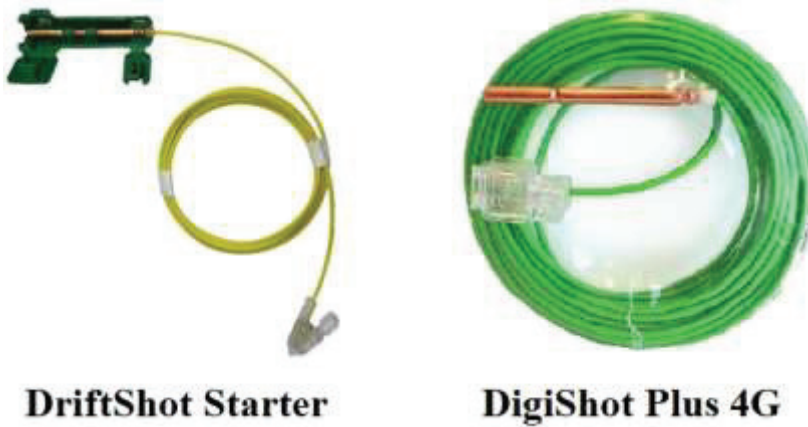
Şekil 1. Elektronik kapsül iç yapısı

3.1 Özel Başlık Mimarisi

- Bakır kovan
- Yüksek Voltaj Koruması
- Aşırı Akım Koruması
- Statik – Elektrostatik Boşalım (ESD) koruması
- Elektromanyetik Darbe (EMP) koruması
- Şifreli sinyal ile ateşlenme

3.2 DriftShot Starter (Başlatıcı) ve DigiShot Plus 4G (Delik İçi) Elektronik Kapsüller

- Yalnızca özel anahtar ile verilen ateşleme komutuna duyarlı olan sistem, özel başlık mimarisi sayesinde kontrolsüz ateşlenmeyi engeller.
- Esnektir. 0 ile 20000ms arasında, 1ms aralıkla gecikme atanabilir.
- Keskindir. İnfilak zamanlaması atanan gecikmeden sapmaz (Şekil 2).



Şekil 2. DriftShot starter ve DigiShot Plus 4G kapsüller

3.3 Blastweb – Merkezi Elektronik Ateşleme Sistemi

- Madenin iletişim ağına (fiberoptik, RF, WI-FI) entegre edilen Patlatma Kontrol Üniteler ağını kapsar (Şekil 3).
- Yerüstünden/yeraltından istenen lokasyondan ateşlemeye olanak sağlar.
- Çift yönlü iletişim ile 7 gün 24 saat iletişim kanallarının ve kapsüllerin kontrolüne olanak sağlar.
- Tekli/çoklu ateşleme olanağı sunar.
- Özel anahtar ile verilen ateşleme komutuna duyarlı olan sistem sayesinde kontrolsüz ateşlenmeyi engeller (Şekil 4).
- Detaylı raporlama özelliği mevcuttur.



Şekil 3. Patlatma kontrol ünitesi ve BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sistemi arayüzü



Şekil 4. BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sistemi özel anahtar çifti

4 DYNO NOBEL ELEKTRONİK KAPSÜLLER VE ATEŞLEME SİSTEMİ

Yeraltı madenciliğinde, maden ömrünün ilerlemesiyle stabilite problemleri, düşük tenör, operasyonel verimsizlikler yaşanmaktadır. Bu husus Madenleri, kullanılan yöntem ve çözümlerini gözden geçirmeye zorlamaktadır. İşletmeler yeni teknolojileri araştırıp, yeni çözümlerin saha özelliklerine ve hedeflediği standartlara uyumlu olup/olmadığını değerlendirip iyileştirme projeleri başlatmaktadırlar.

4.1 İşletmelerde Mevcut Kullanılan Sistem ve Yöntemler

“Geleneksel ateşleme sistemleri” bölümünde de ifade edildiği gibi işletmelerde ayna ve kat arası patlatmalarda çoğunlukla delik içi elektriksiz kapsül kullanılmaktadır. İlk ateşleme, ocak içinden uzun metrajlı elektriksiz kapsüller ile ve/veya yüzeyden merkezi olarak elektrikli ateşleme sistemi ile yapılmaktadır. Bu yöntemlerin zayıf noktaları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Plansız ateşleme riski.
 - a. Elektrostatik boşalım. Dünyanın çeşitli yerlerinde meydana gelen çok sayıda plansız ateşlenme olayının nedeni olarak tanımlanmıştır.
 - b. Elektromanyetik etkileşim. Harici güç kablolarından ve/veya diğer hatlardan gelen ani elektrik akımı olarak tanımlanmaktadır.
- Tek yönlü iletişim. Ateşleme yapıldığı anda hat ve kapsül durumu bilinmiyor olması belirsizliğe, emniyetsizliğe ve operasyon verimsizliğine yol açabilmektedir.
 - a. Ateşleme kablosunda oluşabilecek hasarlardan dolayı atımın kesilmesi durumunda; ateşleyicinin hatların kontrolünü gerçekleştirmesi ve şarjlanmış ayna bağlantılarını kontrol etmesi gerekmektedir.
 - b. Atım kesilmesi halinde bir sonraki vardiyanın iş planının aksaması.
- Çoklu atım yönetiminin esnek olmaması. Çoklu ayna atımlarında ilk ateşleme zamanlarının ayarlanamaması.
- Ocak içi ateşlemede çoklu ayna atımının uzun zaman alması.
- Elektriksiz kapsüllerin mevcut gecikmeleri ve aralıklarının, maden gereksinimlerine tam olarak cevap verememesi.
- Zorlu formasyonlarda elektriksiz kapsüllerin keskinlik eksikliğinin sonucu oluşabilecek fazla sökülme, cevher kaybı ve duvar/tavan stabilitesi kaybı problemleri.

4.2 Proje Hedefleri

Geleneksel ateşleme sistemlerindeki eksikliklerin farkında olan Tüprağ Efemçukuru Altın Madeni 2018 yılında, ateşleme sistemlerinin optimizasyonuna odaklanıp riskleri bertaraf eden ve üretim gereksinimlerini karşılayan sistemi hedeflemiş ve araştırma yürütmeye başlamıştır.

Efemçukuru maden yatağındaki altın cevherleşmesi birbirini kesen iki epitermal damar barındırmaktadır. Ana damar; bol miktarda yan kayaç, damar kırılmaları ve daha küçük boyutlu/katmanlı damar dokuları içeren, çok aşamalı yığılım (breş) cevher damarı olarak nitelendirilir. Damar, kontrollü bir fayın genişleyen segment yapısının içerisinde, hidrokırılmaya neden olmuş bol miktarda yığılımların ve aktif bir fay sisteminin içine doğru yerleşmiştir. Damar boyunca üç cevher zonu tanımlanmıştır. Bu zonlar 60°-68°'lik eğim yönleri arasında yüzeyden takip edilebilmektedir.

Cevher yatağının yüksek eğimli olmasından kaynaklı işletmede üretim yöntemi olarak kazı dolgu ve taban/tavan arınlı ara katlı kazı uygulamaktadır. Mevcut durumda maden 4 rampadan ve paralel arakat oluşturma amaçlı hazırlık ve üretim galerilerden oluşur.

Cevherleşme özellikleri ve operasyonel hedefler göz önünde bulundurularak Tüprağ Efemçukuru Altın Madeni Proje kapsamında aşağıdaki hedefleri belirlemiştir.

- Yüzeyde emniyetli bir noktadan merkezi patlatma,
- Planlanmamış ateşlenme risklerinin ortadan kaldırılması,
- Gelecekteki maden üretimini kapsayacak sistem esnekliği ve genişletilebilirliği.
- Ayna atımlarında fazla kazının önlenmesi
- Kat arası atımlarda cevher kayıplarının önlenmesi
- Kirlenme oranının düşürülmesi

Değerlendirmeler neticesinde işletmenin hedeflerine uygun olan sistemin BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sistemi olduğuna karar verilmiştir.

4.3 Proje Uygulaması

Projeyi 3 aşamaya ayırmak mümkündür:

4.3.1 BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sisteminin kurulumu

- Blastweb sisteminin montajı,
 - a. Madende mevcutta kullanılan iletişim hatlarının değerlendirilmesi ve fiber optik ağın BlastWeb için ana iletişim ağı olarak seçilmesi
 - b. Merkezi ve kat arası kablolama işlemleri
 - c. Patlatma kontrol ünitelerinin montajı
 - d. Yüzeyden ateşlemeye olanak sağlayan yazılımın maden serverlarına kurulması ve tüm sistemin entegre edilmesi
- BlastWeb Merkezi elektronik Ateşleme sisteminin devreye alınması,
 - a. Kullanıcı eğitimlerinin verilmesi.
 - b. Demo kapsüller ile madenin farklı lokasyonlarında ateşleme simülasyonları
 - c. Gerçek kapsüller ile test atımları

4.3.2 DriftShot starter kullanımı

Başlatıcı (starter) olarak DriftShot Starter kapsülleri ile aynaların vardiya sonunda kontrol odasından merkezi olarak ateşlenmesi. Bu aşamadan itibaren tüm patlatmaların BlastWeb merkezi ateşleme sistemi üzerinden yapılması.

4.3.3 DigiShot plus 4G (delik içi) kapsüllerin kullanımı

- Baş yukarı ve kör delik patlatmalarında DigiShot Plus 4G kapsüllerin delik içi kapsül olarak kullanılması.
- Elektronik kapsüllerin fazla sökülme ve tavan stabilitesini azaltacak çatlakların oluşumunu minimize etmek için, kontür deliklerinde kullanılması
- Planlanan ilerlemenin sağlanması ve parça boyutu optimizasyonu için aynada kullanılması

5 ETKİLER VE UYGULAMA SONUÇLARI

Nitromak DNX Kimya San. A.Ş. olarak Tüprağ Efemçukuru altın madeninde kurduğumuz ateşleme sistemiyle aşağıdaki sonuçlar sağlanmıştır;

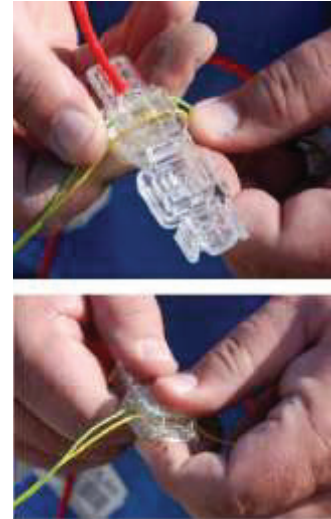
- Özel başlık mimarisi ve şifreli atım uygulaması ile plansız ateşlenme riski ortadan kalkmıştır.
- Şarjlanmış olan ayna önünde elleçleme minimuma indirilmiştir.
 - a. DriftShot Starter kapsülü zamanlama programlaması gerektirmeyen, ateşleme hattına klips ile bağlandığında atıma hazır duruma gelen bir kapsüldür (Şekil 5). Kapsül bağlantı bloğu içine yerleştirilmiştir. Blokta ayrıca infilaklı fitil için yuva bulunmaktadır. Fitil yuvaya yerleştirildiğinde bağlantı bloğu kapağını kapatmak yeterlidir.
- Ateşleme için geçen sürenin kısılması.
 - a. Çoklu ayna patlaması esnasında ateşleyici ekibi alt kotlardan başlayıp, rampadan yukarı çıkarak aynaları sırasıyla patlatmaktadır. Bu işlem iş güvenliği açısından risk taşımakla birlikte (olası göçük halinde personelin yeraltında olması) aralarında

mesafe olan aynalara ulaşımda, yolda geçen süreden dolayı zaman kaybına da sebep olmaktadır. BlastWeb merkezi ateşleme sistemi ve elektronik kapsül kullanıldığında, ateşleyici ekibi dolumu bitirdikten sonra başlatıcı (starter) kapsül bağlantısını yapıp sıradaki ayna dolumuna geçmektedir. Personelin ocaktan tahliyesi, son aynanın dolumu bittikten sonra yapılmaktadır. Ateşleyici ekibi ise son aynanın bağlantısını yapıp direkt yüzeye çıkarak kontrol odasından planlanan tüm aynaların patlatmasını yapmaktadır. Böylece hem tüm planlanmış aynaların patlatması kısa süre içerisinde (10-15 dakika) tamamlanmaktadır, hem de tahliyenin erkenden yapılmasına ihtiyaç duyulmayıp kazı, nakliye vb. operasyonel işlemlerin nerdeyse atım için ayrılan saate kadar yapılabilmesine olanak sağlanmaktadır. Bu husus orta ölçekli maden işletmesi için vardiya başına ortalama 30 dakika kadar zaman kazandırmaktadır.

- b. 3 vardiya çalışan bir işletmede, vardiya başına 30 dakika kazanç günlük olarak 1.5 saate denk gelmektedir. Bu kazanç yılda en az 450 saat - yaklaşık 18 iş gününe denk gelecektir.

Bu süre işletmenin tercihine bağlı olarak aşağıdaki şekilde değerlendirilebilir;

- ❖ Madenin planlı duruşları için (Makine ekipman bakımı, yol düzenleme çalışmaları, alt yapı bakımları vb.)
- ❖ Üretim artışı
- Çift yönlü iletişim ile bağlantı kayıplarında erken farkındalık sağlanmıştır.
 - a. Sistem 7 gün 24 saat tüm bağlantıları test etmektedir. Bu sayede hasar gören kablo, ünite, kapsül, vb. elemanlar vakit kaybetmeden değiştirilebilmekte ve operasyon kayıpsız devam etmektedir. Kayıp kaçınılmaz ise iş planlanması bu doğrultuda yapılmaktadır.
- Kat arası atımlarda cevher kayıplarının önlenmiş ve kirlenme oranı düşürülmüştür.



Şekil 5. Drift Shot starter bloğu ve zil teli bağlantısı

Delik gecikmeleri ve aralıkları, patlayıcı şarjının yarattığı şok dalgasının kayaç içinde ilerleme hızına bağlı olarak belirlenmektedir. Kapsüllerin keskinliği ise tasarlanan patlatmayı gerçekleştirmeye olanak tanımakta ve böylece tenörü yüksek olan bölgelerde askıda malzeme kalması veya cevher kirlenmesinin önüne geçilebilmektedir.

- a. Kirlenme oranı işletmeler arası farklılık göstermektedir. Kirlenme oranında %1'lik düşüşün getirebileceği olası kazancın büyüklüğü ile ilgili fikir vermek adına örnek bir hesap yapılırsa;

Kirlenme oranının %10 olduğu ve yıllık 500.000 ton cevher üretimi olan bir işletmenin, elektronik kapsül uygulamaları ile kirlenme oranında %1'lik bir düşüş sağlanması sonucu;

Yıllık üretimde %10'luk kirlenmeden kaynaklı kaybı 50.000 ton'dur. Bunun sonucunda üretim 450.000 ton olmaktadır. Ortalama tenör 5 gr/ton'dan alındığında yıllık 72.339,12 ons yapmaktadır.

Aynı koşullarda kirlenme oranındaki %1'lik düşüş sonucunda yıllık üretim 455.000 ton ve 73.142,9 ons olmaktadır.

Bu iki cevher üretim farkı 803.78 ons olmaktadır ve günümüz fiyatlarında yıllık (ortalama 1800\$) 1.446.804\$ tasarruf sağlamaktadır.

- Ayna atımlarında fazla sökümün önlenmesi.

Kapsüllerin gecikme keskinliği, kontür deliklerinin sapmasız olarak patlaması ve planlanan kazı arının dışına çıkmamasını sağlamaktadır. Böylece ayna tarama ve tahkimatlandırma uygulaması daha az vakit alıp, operasyonel tasarrufa olanak vermektedir (Şekil 6).



Şekil 6. İlerleme aynası kesiti

- Cevher atımlarında tavan çatlaklarının önlenmesi.

Planlanan kesitin dışına doğru oluşan çatlaklar; ara katlı kazıda, delme/patlatma uygulamalarında delik tıkanmasından askıda malzeme kalmasına kadar çeşitli problemler yaratmaktadır. Elektronik kapsülün ayna çevre deliklerinde kullanımı duvar/tavan çatlaklarını azaltmaktadır. Böylece maden ömrü boyunca en yoğun kullanılan yapıların (Ana rampa vb.) sürdürülebilirliği sağlanıp, bakım/onarım maliyetleri düşmektedir.

6 SONUÇLAR

Bu çalışmada geleneksel ateşleme metotlarının zayıf olduğu yönleri ve operasyonel beklentileri ve üretim beklentilerini karşılamamasının sebepleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Ateşleme sisteminin optimizasyonu gereklilikleri işletmeden işletmeye fark gösterebilmektedir.

BlastWeb merkezi elektronik ateşleme sistemi ve DriftShot Starter elektronik kapsül kombinasyonu TÜPRAG Efemçukuru madeninin patlatma uygulamalarının emniyetli şekilde gerçekleştirilmesini sağlamış ve operasyon verimliliğini arttırmıştır. DigiShot Plus 4G delik içi elektronik kapsüller vasıtası ile ara kat atımlarda patlatma verimliliği sağlanmıştır.

Elektronik ateşleme sistemleri, madenlerin operasyonel ihtiyaçlarına cevap veren teknoloji olarak günümüzde öne çıkmaktadır. Ancak teknolojik AR-GE çalışmaları devam etmektedir. Ticarileştirilmeye en çok yaklaşan kablosuz elektronik ateşleme sistemlerine yakın zamanda tanıklık edecektir. Tüprag Efemçukuru altın madeninde kurulan blastweb merkezi ateşleme sistemi bu teknolojilerin uygulanmasına ve entegre edilmesine olanak sağlayacaktır.

Genel itibariyle özellikle fazla damar kırılımları ve katmanlı damar dokuları bulunduran formasyonlarda, işletmelerin ateşleme sistemi optimizasyonu yatırım maliyetinden ziyade optimizasyon yapılmaması maliyet oluşturmaktadır. Kurulacak olan sistem ilk günden itibaren bu çalışmada bahsi geçen konularda avantajlarını göstermeye başlamakla birlikte geliştirilmekte olan ateşleme sistemleri teknolojileri için altyapı oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

- Aksoy G.G., 2019. Patlatma Dersi Ders Notları, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Aksoy G.G., Aksoy O., 2020. Patlatma Kaynaklı Titreşimlerin Tahmininde Sismik Kalite Faktörü Kullanımı, *MT Bilimsel Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 18, s.133-146.
- Holmberg R., Lee J., Persson PA., 2001. Rock Blasting and Explosives Engineering, *CRC Press*, New York.
- Şimşir F., 2015. Yer Altı Madencilik Yöntemleri, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, No:337, 1. Baskı, İzmir.

Altunizade–Bosna Bulvarı Metro Hattı Kontrollü Patlatma Faaliyetlerinin Değerlendirilmesi

Evaluation of Controlled Blasting Activities of Altunizade–Bosna Bulvarı Metro Line

M. A. Toktaş, M. Gürçan

Çelikler-Fernas-Güryapı Adi Ortaklığı, İstanbul

D. Boylu

Akademi Patlayıcı Mühendisliği, İstanbul

S. Bağdatlı, A. Kahriman

İstanbul Okan Üniversitesi, Patlayıcı Mühendisliği Bölümü, İstanbul

E. Erol, M. Sarıdede

Çelikler-Fernas-Güryapı Adi Ortaklığı, İstanbul

ÖZET: Bu çalışma; İstanbul ili, Üsküdar ilçesi sınırları içerisinde bulunan “Altunizade–Bosna Bulvarı Raylı Sistem Hattı İnşaatı ve Elektromekanik Sistemleri ile Araçlarının Temin, Montaj ve İşletmeye Almaya İşleri” kapsamında yeraltı ve açık saha patlatmalı kazı faaliyetlerini ele almaktadır. Proje kapsamındaki inşaat alanlarındaki inşaat faaliyetleri öncesinde çevredeki yapılar için risk analizi yapılmış ve bu analizler de dikkate alınarak çalışma bölgelerine özel patlatma tasarım modelleri oluşturulmuştur. Jeolojik yapı ve çevresel faktörler de dikkate alınarak lokasyona özel oluşturulan patlatma tasarımlarına göre gerçekleştirilen, patlatmalı kazılara ait titreşim ve hava şoku ölçümleri düzenli olarak takip edilmiştir. Hava şoku değerlerinin limitlerin altında nasıl kontrol altında tutulduğu ve bununla birlikte farklı shaftlara ait titreşim yayılım trendleri belirlenmiştir.

ABSTRACT: In this study; goes about underground and open-field blast excavation activities scope of "Altunizade–Bosna Bulvarı Rail System Line Construction and Supply, Installation and Commissioning of Electromechanical Systems and Vehicles" located in the borders of Üsküdar in İstanbul Province. Before the construction activities in the construction areas scope of the project, the risk analyzes were made for the surrounding structures and specific blasting design models were created for studying areas according to these analyzes. Vibration and air-shock values of the blast excavations according to specific blasting design models for location consider in geological structure and environmental factors regularly followed. The vibration values are kept under limit values and vibration propagation trends of different shafts were determined.

1 GİRİŞ

İnsanoğlu var olduğundan beri ihtiyaçlarını karşılayabilmek adına en önemli faaliyetleri ulaşım kabul edilmektedir. Ulaşım, günümüzde proje tasarımından ulaşım alternatiflerinin oluşturulmasına kadar araştırmalar yapan bir bilim dalı olarak kabul görür.

Kentleşmenin ve nüfus yoğunluğunun arttığı İstanbul’da buna bağlı olarak meydana gelen trafik problemleri, ulaşımında farklı alternatiflere ihtiyaç oluşturmaktadır. Bu ihtiyacı

karşılılamaya yönelik en iyi alternatiflerden biri de şüphesiz metrolardır. Metro inşaatları, maliyetli bir yatırım olup uzun yıllar hizmet vereceğinden projelendirilmesi ve uygulama aşamaları ekstra önemlidir. Aynı zamanda inşası uzun süreceği için bu süreçte halka verilecek rahatsızlık minimize edilerek çalışmalara devam edilmelidir.

Metro tünellerinde ve istasyon yapılarında gerek iş makinalarıyla mekanik kazı gerekse endüstriyel patlayıcılarla kontrollü patlatmalı kazı yapılır. Kazı yöntemi tercihi yapılırken kaya birimi ve tünel kesitleri göz önüne alındığı gibi maliyet ve zaman açısından da yaratacağı etki değerlendirilir. Günümüzde kontrollü patlatmalar kaya delme faaliyetlerinin yaklaşık %40'ını oluşturur.

Kontrollü patlatma faaliyetleri Patlayıcı Mühendisliği ilkeleri çerçevesinde gerçekleştirilmelidir. Yasal mevzuatlara ve yönetmeliklere uyulmalıdır. Patlatma öncesi ve sonrası gerekli tüm çalışmalar interdisipliner bir şekilde yönetilmelidir.

Hazırlanan bu çalışmada inşasına devam edilen bir metro projesinde gerçekleşen kontrollü patlatmalar değerlendirilecektir.

2 ÇALIŞMA SAHASI VE JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

2.1 Çalışma Sahasının Tanıtımı

Proje sahası, İstanbul İli; Üsküdar İlçesi sınırlarından geçmektedir. Altunizade Metrobüs İstasyonu konumundan başlayan güzergâh; Kısıklı ve Ferah mahallelerini takip ederek Bosna Bulvarı konumunda sona ermektedir. Metro projesinin istasyon konumlarının gösterildiği harita Şekil 1'de verilmiştir.

Proje 4.5 km uzunluğunda ve 4 istasyondan oluşan tek hatlı bir metro inşaatıdır. Hat üzerinde 4 şaft, ana hat tünelleri, peron tünelleri ve 4 adet aç-kapa tipi istasyon imalatı tamamlanacaktır. Güzergâh boyunca 1 adet karşılaşma bölgesi de planlanmaktadır.

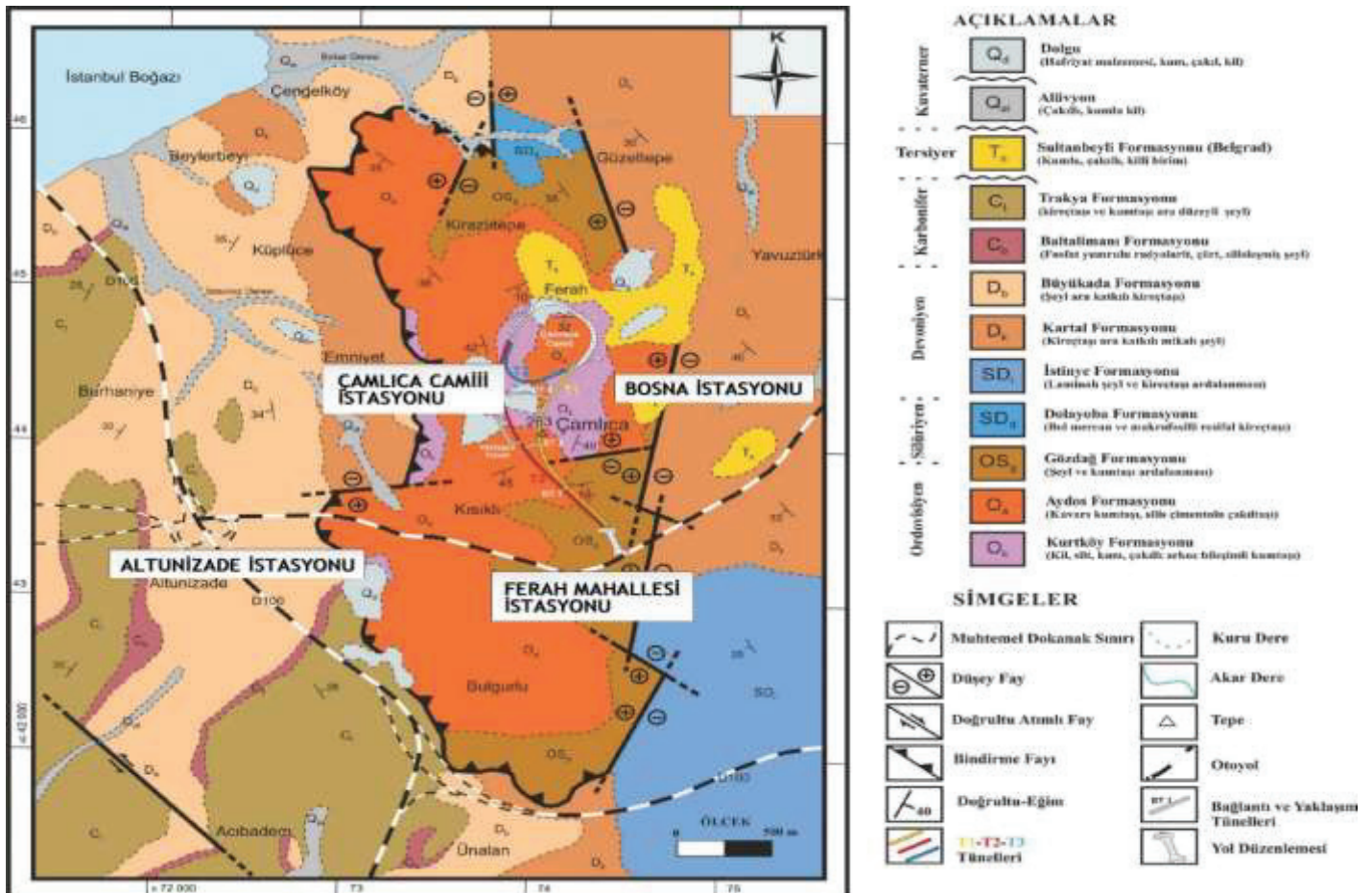


Şekil 1. Metro projesinin istasyon konumları

2.2 Çalışma Sahasının Jeolojik Yapısı

Çalışma bölgesinin temelinde, İstanbul'un doğusu (Kocaeli Yarımadası) ve Avrupa Yakasının sınırlı kısımlarına kadar uzanan "İstanbul Grubu" olarak adlandırılan Paleozoyik yaşlı kesintisiz sedimanter istif yer almaktadır (Özgül, 2011).

Paleozoyik yaşı birimleri İstanbul'un farklı bölgelerinde farklı kaya stratigrafik birimleri uyumsuz olarak örtmektedir. Paleozoyik istifin tabanında mor renkli, karasal ortamda depolanmış kırıntılı kayalardan oluşan, Alt Ordovisiyen yaşı Kurtköy Formasyonu yer almaktadır. Üstünde beyaz, bej ve kızılımsı sarı, turuncu renkli, silis çimentolu kuvars kumtaşı ve kuvars çakıltaşlarından oluşan kıyı-sığ-plaj ortamında depolanmış Alt Ordovisiyen yaşı Aydos Formasyonuna ait kırıntılı kayalar gelmektedir. Transgresyon ile birlikte istif üste doğru uyumlu biçimde lagün-sığ denizel ortamda depolanmış kuvarslı feldspat arenit ara düzeyli ve mercekli gri-yeşil renkli laminalı silttaşı-şeyl olan Orta Ordovisiyen-Alt Silüriyen yaşı Gözdağ Formasyonuna geçmektedir. Gözdağ Formasyonunun ince kırıntılı üst seviyeleri üzerine yanaldüsey geçişli olarak resif ortamında depolanmış bol fosilli, masif tabakalı kireçtaşlarından oluşan Orta Silüriyen-Üst Devoniyen yaşı Dolayoba Formasyonu gelmektedir. İstif devamında siya renkli (özellikle alt kesimlerinde iyi gelişmiş olan laminalı kireçtaşları, yüksek organik kapsamından dolayı koyu kül renkli), ince laminalı ve şeyl ara katkılı, orta katmanlı mikritik kireçtaşı düzeyleri değişen oranda ardalanma gösteren İstinye Formasyonu gelmektedir. İstifin üstünde mikali şeyllerden oluşan bol makrofosilli kül renkli, yer yer yeşilimsi ve üst düzeylerinde kireçtaşı ara katkılı yaklaşık 750 m kalınlığında Orta Silüriyen-Üst Devoniyen yaşı Kartal Formasyonu bulunmaktadır. İstif devamında şelf ortamında depolanmış Üst Devoniyen yaşı Büyükada Formasyonu masif çörtlü kireçtaşları ile başlayıp, yumrulu kireçtaşına geçmektedir. Birim üste doğru açık denizel ortamda depolanmış Alt Karbonifer yaşı Baltalimanı Formasyonunun fosfat yumrulu radyolaritli çörtlere geçmektedir. İstif üste doğru uyumlu olarak açık denizel ortamda depolanmış ince-kaba kırıntılı kayaların egemen olduğu kireçtaşı ara düzeyli ve merceklerin bulunduğu Alt Karbonifer yaşı Trakya Formasyonu ile son bulmaktadır. Paleozoyik istif, sıklıkla Kratese yaşı dayklar tarafından kesilmiştir (Şekil 2 ve 3). Çalışma alanında bulunan Paleozoyik istifin üzerine açılal uyumsuz olarak Tersiyer yaşı kum-çakıl düzeyli Sultanbeyli Formasyonu gelmektedir.



Şekil 2. Çamlıca Tepesi ve dolayının jeoloji haritası

Sistem	Seri	Formasyon	Üye	Simge	Kalınlık (m)	Litoloji	Açıklamalar	
Kuvaterner	Holosen	Dolgu		Q_d			Hafriyat malzemesi Blok büyüklüğü tutturulmamış, kum, çakıl, kil Uyumsuzluk	
		Alüvyon		Q_{al}			Çakıllı kumlu, kil Uyumsuzluk	
Tersiyer		Sultanbeyli		T_s			Kumlu, çakıllı, kili, yer yer bloklu az az tutturulmuş Uyumsuzluk	
Alt Karbonifer	Viziyen	Trakya	Küçükköy	C_t	>1000		Tübitik kumtaşı, silttaşı, şeyl	
			Kartaltepe		30		Siltleşmiş şeyl	
			Acıbadem		400		Şeyl ve Silttaşı	
	Cebeckköy						Cebeckköy üyesi : Kireçtaşı	
	Tunçyaylaklı	Baltalimanı		C_b	25-75		Fosfat yumrulu radyolarit, çört, siltleşmiş şeyl	
Üst Devoniyen	Üst Eyaletiyen Fameniyen	Büyükada	Ayineburnu	D_b	25-75		İnce yumrulu kireçtaşı	
			Yörükali		100		Siltleşmiş şeyl, çört	
			Bostancı		10-50		Çörtü kireçtaşı	
	Emsiyen Eyaletiyen		Kartal	Kozyatağı	D_k	750		Şeyl, kumtaşı, kireçtaşı Kireçtaşı, şeyl
Orta Silüriyen Üst Devoniyen		İstinye	Kaynarca	SD_1	75		İri yumrulu kireçtaşı, şeyl	
			Gebze		150		Kireçtaşı, şeyl	
			Sedefadası		75		Laminale kireçtaşı, şeyl	
		Dolayoba		SD_d	100		Rasifal kireçtaşı, şeyl	
Orta Ordovisiyen Alt Silüriyen		Gözdağ	Umurdere	OS_g	250-500		Mor silttaşı, şeyl, kumtaşı, kumlu kireçtaşı, polik şarnozit Şeyl, kumtaşı Kireçtaşı	
Ordovisiyen		Aydos		O_a	10-100		Kuvars kumtaşı, çakıllıtaşı	
		Kurtköy		O_k	1000		Feldspatlı kumtaşı, şeyl, çakıllıtaşı	

Şekil 3. Çalışma alanı ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti

Birimin üzerinde Kuvaterner yaşlı alüvyon çökelleri yer almaktadır. İstif, en üstte çeşitli boyutlarda tutturulmamış, kumlu, killi, çakıllı malzeme ve hafriyat malzemesi içeren dolgu ile sonlanmaktadır.

Çalışma alanı ve yakın çevresinde bulunan birimlere ait bilgiler aşağıda sunulmuştur. Çalışmanın ana konusu olan tünel kazı çalışmaları sırasında gözlenmeyen birimlere kısaca yer verilmiştir. Tünel güzergâhında karşılaşılan birimler hakkında daha detaylı bilgiler arazi ve laboratuvar verileri ile birlikte değerlendirilmiştir.

2.2.1 Kurtköy Formasyonu (Ok)

Kurtköy Formasyonu genel olarak arkoz bileşiminde kırıntılı kayalardan oluşur. İlk kez Haas (1968) tarafından birim için, İstanbul'un Asya yakasında Kurtköy dolayında geniş alan kaplaması nedeniyle, Kurtköy Formasyonu (Kurtköy Schichten) adı kullanılmıştır.

Daha sonra, Kaya (1978) ve Önal (1981 ve 1982) tarafından aynı coğrafya adı korunarak, sırasıyla "Kurtköy Arkoz Birimi" ve "Kurtköy Formasyonu" adlarıyla incelenmiştir. Kurtköy Formasyonu genel olarak mor renkli, kil, silt, kum ve çakıl boyutunda malzemeyi kapsayan arkoz bileşimli kırıntılı kayalardan oluşur. İstifin alt kesiminde kumtaşı ara katkılı, ince laminalı kıltaşı-miltaşı, üst kesiminde ise değişik boyutlarda çakıltaşı mercek ve ara düzeylerini kapsayan, kıltaşı-miltaşı arakatlı kaba kumtaşı egemendir.

Formasyonun üst bölümünde irili ufaklı mercekler ya da ara katkılar oluşturan yer yer geniş alanlar kaplayan çakıltaşları, morumsu, yeşilimsi renkli, genellikle iç yapısız, yer yer kumtaşı-miltaşı ara katmanlıdır (Özgül, 2011).

Yaklaşık kalınlığı 1000 m olan Kurtköy Formasyonu, arazide gözlenmeyen Bakacak Formasyonunun üzerine uyumlu olarak gelmektedir. Kurtköy Formasyonu üstten uyumlu olarak Aydos Formasyonu tarafından örtülmektedir. Alt Ordovisiyen yaşlı olan formasyon akarsu ortamında çökelmiştir (Gedik, 2001).

2.2.2 Aydos Formasyonu (Oa)

İstanbul'un özellikle Asya yakasındaki kesiminin dağlık alanlarını ve büyük tepelerini oluşturan kuvars arenit çeşitli araştırmacılar tarafından genellikle, büyük bölümü kuvars arenitlerden oluşan Aydos Dağı'nın adıyla incelenmiştir. Baykal ve Kaya (1965) "Ortokuvarsit Formasyonu", Kaya (1978) "Aydos Kuvars arenit Birimi", Önal (1981 ve 1982) "Aydos Formasyonu" adlarıyla incelemiştir.

Formasyon kuvars arenit, kuvarslı kumtaşından oluşur; yüzeylemelerinin önemli bir bölümünde, süt kuvars çakıllarını yoğun olarak kapsayan, silis çimentolu çakıltaşı düzeyi ile başlar. Çeşitli kesimlerinde değişen oranda ara katkılar halinde killi milli şeyl kapsar. Çapraz tabakalanma, sekonder kızıl-mor renklere, orto-kuvarsit istiflemesinde oldukça sık rastlanır. Orto-kuvarsitin kalınlığı 300 metre olarak tahmin edilmektedir (Kaya, 1978). Genellikle yüksek eğimli dağ ve tepeleri oluşturan kuvarsitler sık eklem ve çatlaklıdır. Aydos Dağı, Kayış Dağı, Alemdağ, Dragos Tepesi, Çamlıca Tepeleri, Yakacık, Kurtköy, Beykoz, Başbüyük, Paşaköy, Kınalıada, Büyük Ada'da, Ömerli Beldesi güney-güneybatısında, Darlık Barajı güneyinde, Gebze kuzeybatısında Gaziler Tepesi gibi birçok tepenin doruğunu oluşturur. Formasyon çalışma bölgesinde Çamlıca Tepesi'nde geniş alan kaplamaktadır.

Aydos Formasyonu, altta Kurtköy Formasyonu ile uyumlu, üstte ise Gözdağ Formasyonu ile uyumlu olarak yer almaktadır. Üst Ordovisiyen yaşlı formasyon kıyı-plaj ortamda depolanmıştır.

2.2.3 Dolayoba Formasyonu (SDd)

İstif birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve değişik adlandırmalar almıştır. Önalın (1981 ve 1982) tarafından ise Dolayoba Formasyonu adı altında çalışılmış olup bu çalışmada da bu isim kullanılmıştır. Dolayoba Formasyonu pembemsi-mor renkli bol mercan ve makrofosilli resifal kireçtaşlarını içerir. Bol mercan, krinoid ve brakyopodlu resifal biyoklastik kireçtaşı üyenin egemen kaya türünü oluşturur. Yer yer ince katmanlı, kızıl kahverengi kumlu killi şeyl ara katkılıdır.

Formasyon üst kesiminde kül rengi ve yer yer düzgün katmanlı oluşuyla alttaki pembe kireçtaşlarından ayrılan, kavkı kırıntılı ve mercanlı, ince şeyl arakatlı kireçtaşı düzeyleri bulunmaktadır. Birim çalışma alanında Çamlıca Tepesi'nin kuzeyinde sınırlı olarak yüzeylenir ve kalınlığı yaklaşık 100 m iken, resif ortamda depolanmış ve yaşı Orta Silüriyen-Üst Devoniyen'dir.

2.2.4 Sultanbeyli Formasyonu (Ts)

Formasyon, Özgül (2011) tarafından Sultanbeyli Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Birim daha önce farklı araştırmacılar tarafından incelenmiş ve farklı isimler verilmiştir. Formasyon, birbirleriyle yanal ve düşey geçişli, tutturulmamış kızıl ve sarı renk tonlarında blok, çakıl, kum, mil ve kil bileşenlerinden oluşur. Litolojik elemanlar temeldeki Paleozoyik formasyondan türeyen kırıntılar olup bunların kökeni; ortokuvarsit, arkoz, şeyl, grovak, çört ve kireçtaşı kaynak kayalarındır (Akartuna ve diğ., 1990). Sultanbeyli Formasyonu İstanbul'un Anadolu yakasında farklı lokasyonlarda Paleozoyik ve Mezasoyik yaşlı kaya birimlerini açısız uyumsuzlukla üstler. Formasyonun kalınlığı, taban topoğrafyası ve kaynak alana yakınlığına göre 20-30 m ile yaklaşık 150 m arasında değişir (Özgül, 2011).

2.3 RMR ile NATM Kaya Sınıflandırması ve Özellikleri

Proje kapsamındaki tüneller için Q (kaya kütleli niteliği) değerleri hesaplanmıştır. Q değerleri; kayaç kalite katsayısı, çatlak takım sayısı, çatlak pürüzlülük katsayısı, çatlak yüzeyinin durumu, çatlak suyu azaltma faktörü, gerilme değişim faktörü parametrelerine bağlıdır. Hesaplanan Q değerleri kullanılarak RMR değerleri hesaplanmış ve bu RMR değerleri kullanılarak tünel açımı sırasında yapılacak gözlem ve deformasyon ölçümlerine dayanan kaya sınıflaması yapılmıştır. Yapılan kaya sınıflamalarının (Q – RMR) eşleştirilmeleri Çizelge 1'de sunulmuştur. Bu çizelgeye göre tünel geçişi için ayrı ayrı destek türleri belirlenir.

3 PATLATMALI KAZI FAALİYETLERİ GENEL DEĞERLENDİRMESİ

Kontrollü patlatmalı kazı çalışmaları; shaft, tünel ve istasyon imalatlarında mekanik kazı yöntemlerinin yetersiz kaldığı durumlarda tercih edilir. Patlatmalı kazı çalışmaları bu durumlarda zaman ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Hava şoku, titreşim, taş fırlaması ve toz gibi çevresel sorunlar için önlemler alınmalıdır. Gerekli analizler yapıp bu çevresel sorunlar en aza indirilerek patlatma faaliyetleri gerçekleştirilir. Bu faaliyetler boyunca çevresel etkiler ölçülüp kayıt altına alınır.

Risk analizine yönelik metro hattı güzergahın yakın çevresinde benzer formasyona sahip olan daha önce kontrollü patlatma faaliyetlerinin gerçekleştiği Üsküdar – Ümraniye Metro Hattı ve Çamlıca Camii Tünelleri'nin değerlendirmeleri incelenmiştir. Bu incelemeler ışığında patlatma yapılacak yerlerin kesitleri de göz önünde bulundurularak delik çapı, delik boyu, gecikme başına kullanılacak en yüksek patlayıcı miktarı ve uygulanacak delik tasarım modelleri belirlenmiştir. Uygulanması ön görülen paternler ile Çizelge 2'den baz alınan değerlere göre titreşim ve hava şoku değerleri Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'nin eşik hasar limitlerinin altında kalacaktır. (Kahriman ve Bağdatlı, 2021)

Çizelge 1. Kaya sınıflamalarının Q-RMR eşleştirilmeleri

NATM Sınıflandırması	Kaya Türü ve Açıklamalar	NATM Sistemine Karşılık Gelen Q Değer Aralığı	NATM Sistemine Karşılık Gelen RMR Değer Aralığı
A1	A– Duraylı – Sonradan Az Sökülen Kaya Kütleleri: Bu sınıfta yer alan kaya kütleleri genellikle duraylı olup, elastik davranış gösterirler. Yersel iksa uygulanmaması durumunda, yerçekimi nedeniyle, yer yer sığ göçükler oluşabilir. Göçükler genellikle izole olmuş, önemsiz eklem yapıları nedeniyle oluşur. Elastik deformasyonlar hızla azalır.	1000 – 70.4	101 – 80
A2		70.4 – 10.0	80 – 65
B1	B– Gevrek Kaya Kütleleri: Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin davranışları, yapısal kenetlenme ve/vaya çekme dayanımı azlığından dolayı, hızlı ve gevşemeye ve ayrışmaya yatkındır.	10.0 – 4.0	65 – 58
B2	Hemen hemen tüm çevrede, boşluk çevresinde ikincil gerilmeler, kaya kütlelerinin dayanımını biraz aşmakta, bununla beraber bu zayıflık içerilere ulaşmamaktadır. İksa yapımının gecikmesi halinde artan çökmeler oluşur.	4.0 – 1.47	58 – 47
B3		1.47 – 0.11	47 – 29
C1	C– Baskılı Kaya Kütleleri: Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin davranışları genellikle, kaya basıncının yeniden dağılım süreci ve /veya deplasman sınırlamaları sonucunda oluşan gerilmelerin kaya dayanımından daha büyük olduğunu gösterir. Kaya kütleleri aşırı gerilme altında kalmasından dolayı, kabuk atma, burulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zayıflık mekanizmaları oluşur.	0.11 – 0.03	29 – 20
C2		0.03 – 0.016	20 – 15
C3		0.016 – 0.008	15 – 10
C4	Çatlamaya veya dökülmeye eğimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenlere sahip kaya kütleleri bu gruba girer.	0.008 – 0.002	10 – 5
C5	Bu gruba giren kaya kütleleri, davranış ve kendini tutma süreleri, su sızıntılarından olumsuz yönde önemli ölçüde etkilenir.	0.002 – 0.001	5 – 2.5

Patlatmalı kazı esnasında oluşacak olan hava şoku ve maksimum parçacık hızı (PPV), patlatma yerine en yakın bulunan risk unsuru kabul edilen yapılara kurulan titreşim ölçer cihazlar yardımı ile ölçülür.

Ölçekli mesafe (SD); atım noktasının yeri ile istasyon noktasının yeri arasında mesafe (R) ile gecikme başına kullanılan maksimum patlayıcı (W) miktarının ilişkisiyle elde edilir (Eşitlik 1).

Çizelge 2. Altunizade – Bosna Bulvarı Metro hattında yapılacak kontrollü patlatmalarda gecikme başına kullanılacak maksimum patlayıcı madde miktarının tahmini

Mesafe (m)	Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği Eşik Hasar Limiti (mm/s)	Gecikme Başına Kullanılabilecek Maksimum Patlayıcı Miktarı (kg)			
		Aydos Formasyonu PPV=395xSD ^{-1.06}	Kurtköy Formasyonu PPV=252.82xSD ^{-1.117}	Dolayoba Formasyonu PPV=5584xSD ^{-1.91}	Sultanbeyli Formasyonu PPV=411,3xSD ^{-1.218}
10	15	0.2	0.6	0.2	0.4
20		0.8	2.5	0.8	1.7
30		1.9	5.7	1.8	3.9
40		3.3	10.2	3.3	7.0
10	20	0.4	1.1	0.3	0.7
20		1.4	4.3	1.1	2.8
30		3.2	9.6	2.5	6.3
40		5.7	17.0	4.4	11.2

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

Ölçekli mesafeden faydalanılarak titreşim yayılım denklemi oluşturulup PPV değeri hesaplanabilir (Eşitlik 2).

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

Burada; K arazi iletim katsayısını ve β saha sönümlenme katsayısını ifade eder (Nicholls vd., 1971).

Yakın çevrede benzer formasyona sahip olan daha önce kontrollü patlatma faaliyetlerinin gerçekleştiği sahaların değerlendirmelerine göre belirlenen gecikme başına kullanılacak maksimum patlayıcı miktarları Çizelge 4'te verilmiştir.

Altunizade – Bosna Bulvarı Metro güzergahında farklı bölgelerin farklı formasyonlarında alınan patlatma kaynaklı titreşim ve hava şoku değerleri incelenip bilgisayar programı yardımıyla regresyon analizine tabii tutulup arazi iletim katsayısı ile saha sönümlenme katsayısı belirlenerek titreşim yayılım denklemi oluşturulmuştur.

Patlatmalı kazı öncesi; atım noktası ile ölçüm istasyon noktasının koordinatları proje planından alınmıştır. Bu koordinatlar ve gecikme başına kullanılacak maksimum patlayıcı madde miktarlarıyla ölçekli mesafe hesaplanmıştır. Oluşturulan titreşim yayılım denkleminde maksimum parçacık hızı tahmin edilmiştir ve olası bir çevre sorununun önüne nasıl geçildiği açıklanmıştır.

4 PROJE KAPSAMINDA UYGULANAN PATERN DETAYLARI

Proje kapsamında Kısıklı Mahallesi bölgesinde yer alan Şaft 2C ve Ferah Mahallesi bölgesinde yer alan Şaft 3'te üst yarı için tam ayna, taban-taban üstü ve patar atımları gerçekleştirilmiş olup risk analizinde belirtilen kısıtlamalar dikkate alınarak uygulanması ön görülen bazı atım paternleri sırasıyla Şekil 4a ve Şekil 4b'de gösterilmiştir.

Proje kapsamında gerçekleştirilen atımlarda belirtilen kısıtlamalar çerçevesinde çıkan ortalama kübaj miktarları Çizelge 3’te gösterilmektedir. Çizelge 2’de hesaplanan değerler ve atım ile en yakın risk noktası arasındaki mesafe göz önünde bulundurularak atımların başlangıçta gecikme başına 1.5 kg patlayıcı ile gerçekleştirilmesi kararlaştırılmıştır.

Çizelge 3. Farklı bölgelerde yapılan atımlardaki kesit alanı, ilerleme boyu, gecikme başına kullanılacak patlayıcı miktarı ve kübaj

Patern	Gecikme Başına Kullanılacak Patlayıcı Miktarı (kg)	Alan (m ²)	İlerleme (m)	Kübaj (m ³)
Şaft	1.5	54.67	2.5	136.68
Şaft	1.5	23.82	2.5	59.55
A Tipi Tam Ayna	1.5	30.22	2.5	75.55
A Tipi Patar	1.5	8.07	2.5	20.19
A Tipi Taban-Tabanüstü	1.5	13.00	2.5	32.50
A Tipi Taban-Tabanüstü	1.5	21.26	2.5	53.15
Atnalı Taban-Tabanüstü	1.5	25.00	2.0	50.00
Atnalı Taban-Tabanüstü	1.5	20.00	2.0	40.00

5 PROJE KAPSAMINDA UYGULANAN YÜZEY PATLATMA MODELİ

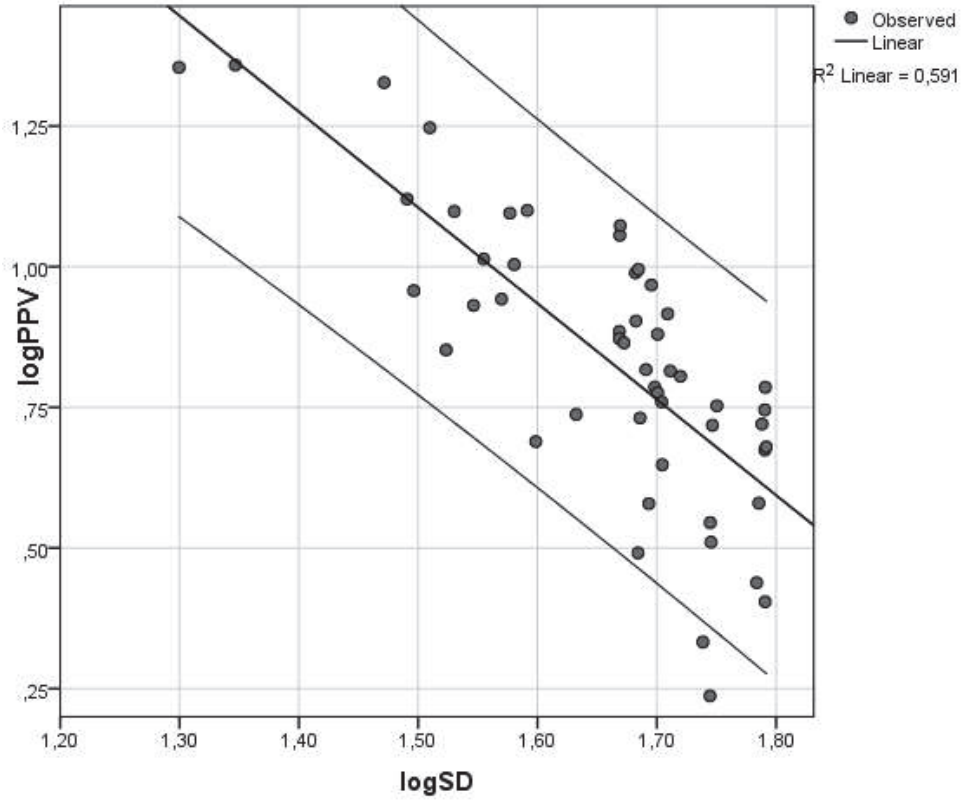
5.1 Şaft 2C ve Şaft 3’te Uygulanan Patlatma Tasarımı

Altunizade-Bosna Bulvarı raylı sistem hattı inşaatı işi kapsamında Şaft 2C ve Şaft 3 tünel üstyarı kazı çalışmalarında değişkenlik gösteren jeolojik yapının durumuna göre farklı patlatma modelleri planlanmıştır. A tip ve atnalı kesit tünellerde tam ayna, taban-tabanüstü ve patar atımlarında V-cut kesme modeli uygulanmıştır. Meskün mahallelerde atım yapılmasından dolayı ölçekli mesafe değerleri de göz önünde bulundurularak gecikme başına kullanılacak maksimum patlayıcı miktarı 2.2 kg iken A tipi kesit anahat tünellerinde tam ayna patlatma modeline göre özgül şarj 1.05 kg/m³, taban-tabanüstü patlatma modeline göre özgül şarj 1.12 kg/m³, patar patlatma modeline göre özgül şarj 0.99 kg/m³’tür. Atnalı kesit yaklaşım tünellerinde taban-tabanüstü patlatma modeline göre özgül şarj 0.9 kg/m³’tür. Şaftta kullanılan patlatma modeline göre özgül şarj 0.49 kg/m³’tür.

5.2 Şaft 2C’de Uygulanan Patlatmalı Kazılardan Elde Edilen Ölçüm Değerlerini Değerlendirme

Şaft 2C’de şaft açılırken, yaklaşım tüneli yapılırken ve ana hat tüneline Kısıklı’dan Bosna Bulvarı yönüne ilerlerken patlatmalı kazı faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Şaft 2C patlatmalı kazılarından 51 adet titreşim hızı verisi elde edilmiştir. Her patlatmalı kazı da uygun istasyon noktalarından titreşim ölçer cihazlar yardımıyla titreşim ve hava şoku değerleri kayıt altına alınmıştır. Her patlatma için atım ve istasyon noktalarının koordinatları, toplam ve gecikme başına kullanılan şarj miktarları ile titreşim, hava şoku ve frekans değerleri toplanıp yatay mesafe, SD gibi değerler hesaplanarak bir çalışma hazırlanmıştır. Bu çalışmadaki PPV ve SD değerleri kullanılarak SPSS uygulamasında regresyon analizine tabii tutulmuş ve sonuç olarak % 50 ve % 95 doğrulukta titreşim yayılım denklemleri Eşitlik 3’deki gibi bulunmuş olup elde edilen PPV-SD grafiği Şekil 6’da gösterildiği gibidir.

$$\%50 \text{ PPV} = 4591,98 \times \text{SD}^{-1.736} \quad (r=0.77) \quad \quad \quad \%95 \text{ PPV} = 11066.24 \times \text{SD}^{-1.736} \quad (r=1) \quad (3)$$



Şekil 6. Şaft 2C PPV ve SD ilişkisini gösteren grafik

Şaft 2C inşaat shaftı tarafından bacalanma etkisi ile artan hava şoku değerleri, shafttan yaklaşım tünellerine geçişlerde Şekil 7’te görüldüğü gibi kullanılan hava perdeleri ile kontrol altına alınmıştır. Bu olgu ölçümlerle de teyit edilmiştir. Çizelge 4’te bazı atımlardaki ölçüm sonuçları verilmiştir. Çizelgede ifade edilen 1 ve 2 no’lu atımlar perdesiz, 3 no’lu atım ise perdeli olarak gerçekleştirilen atımlara ait ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Perdeli uygulamada oldukça önemli oranda azalmış olan hava şoku değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4. Atnalı kesitli yaklaşım tüneline ait hava şoku değerleri

No	Tarih	Toplam Şarj (kg)	Gecikme Başına		Ölçekli Mesafe	Hava Şoku (dBL)	Perde Uygulaması
			Toplam Şarj (kg)	Mesafe (m)			
1	1.07.2022	45	1.5	74.4	60,8	139.9	Yok
2	4.07.2022	45	1.5	74.7	61.0	144.8	Yok
3	16.07.2022	45	1.5	75.6	61.7	135.5	Var

5.3 Şaft 3’te Uygulanan Patlatmalı Kazılardan Elde Edilen Ölçüm Değerlerini Değerlendirme

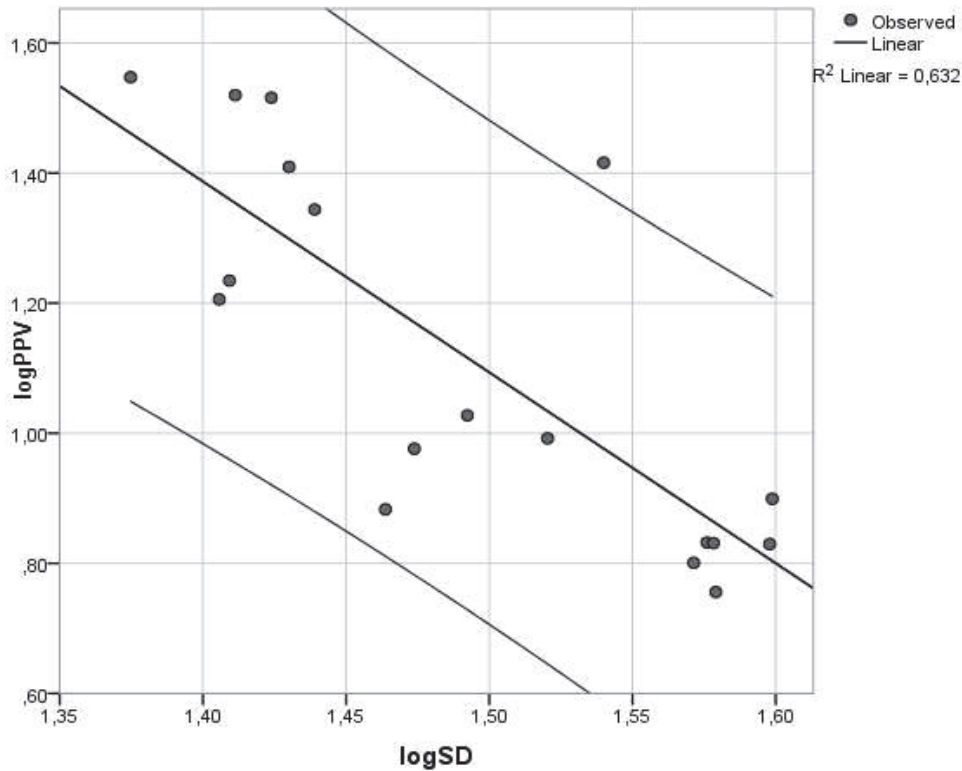
Şaft 3’te anahat tüneline hem ileri hem geri yönlerinde patlatmalı kazı faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Şaft 3 anahat tüneline geri yönü patlatmalı kazılarından 18 adet titreşim hızı verisi elde edilmiştir. Her patlatmalı kazı da ilerleme kilometresine uygun istasyon noktalarından titreşim ölçer cihazlar yardımıyla titreşim ve hava şoku değerleri kayıt altına alınmıştır. Her patlatma için atım ve istasyon noktalarının koordinatları, toplam ve gecikme başına kullanılan şarj miktarları ile titreşim, hava şoku ve frekans değerleri toplanıp yatay mesafe, SD gibi değerler hesaplanarak bir çalışma hazırlanmıştır. Bu çalışmadaki PPV ve SD değerleri kullanılarak SPSS uygulamasında regresyon analizine tabii tutulmuş ve sonuç olarak



Şekil 5. Hava şokunu minimize etmek için perde uygulaması

% 50 ve % 95 doğrulukta titreşim yayılım denklemleri Eşitlik 4'deki gibi bulunmuş olup PPV-SD grafiği Şekil 8'de gösterildiği gibidir.

$$\%50 \text{ PPV} = 312607.9 \times \text{SD}^{-2.928} \quad (r=0.80) \quad \%95 \quad \text{PPV} = 762079 \times \text{SD}^{-2.928} \quad (r=1) \quad (4)$$



Şekil 8. Şaft 3 PPV ve SD ilişkisini gösteren grafik

Çizelge 5. Şaft 2C ve 3'te gecikme başına kullanılacak maksimum patlayıcı madde miktarı

Mesafe (m)	Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği Eşik Hasar Limiti (mm/s)	Titreşim Yayılım Denklemine Göre Gecikme Başına Kullanılabilecek Maksimum Patlayıcı Miktarı (kg)	
		Şaft 2C PPV = 11066.24 x SD ^{-1.736}	Şaft 3 PPV = 762079 x SD ^{-2.928}
10	15	0.0	0.1
20		0.2	0.2
30		0.4	0.5
40		0.8	1.0
10	20	0.07	0.07
20		0.28	0.30
30		0.62	0.67
40		1.11	1.19

6 SONUÇLAR

Bu çalışma Altunizade-Bosna Bulvarı raylı sistem hattı güzergahında yer alan farklı formasyonlarda gecikme başına kullanılmış maksimum patlayıcı madde miktarları ile yapılmış atımlar esnasında titreşim ve hava şoku ölçüm değerleri alınarak patlatma kaynaklı çevresel sorunlarının limit değerlerin altında kaldığı ve bu değerlerin takibiyle kontrol altında tutulduğu gözlemlenmiştir.

Proje kapsamında patlatmaların gerçekleştiği her iki şaft için titreşim yayılım trendleri de belirlenmiştir. Bu denklemlere göre gecikme başına kullanılabilecek maksimum patlayıcı miktarları Çizelge 5'te verildiği gibidir.

Şaft 2C bölgesinde 65.80 m derinliğindeki şafttan yaklaşım tüneline girişte gürültünün derinliğe bağlı artışı gözlemlenmiştir. Risk unsurlarının bulunduğu bölgede yapılan ölçümlerle tespit edilen gürültü, tünel içerisinde perde uygulaması ile engellenmeye çalışılmış ve uygulama başarılı olmuştur.

KAYNAKLAR

- Akartuna, M., Yılmaz, O., Ulakoğlu, S., 1990, Kavacık (Beykoz-İstanbul) dolayının jeolojisi ve taş ocağı patlatmalarının çevre binalara etkisinin değerlendirilmesi, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Yerbilimleri Dergisi, 7 (1-2), 5-18.
- Baykal, F., ve Kaya, O., 1965, İstanbul silüriyeni hakkında, Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Türkiye Bülteni, 64, 1-8.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022. Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği.
- Gedik, İ., Timur, E., Duru, M., Alan, İ., Pehlivan, Ş., Altun, İ., Akbaş, B., Önalın, M., Özcan, İ., 2001, İstanbul Paleozoyik istifinde kocatöngel ve bakacak formasyonları, Kocaeli Yarımadası'nın Jeolojisi Projesi, 97-99.
- Kahrıman, A., Bağdatlı S., 2021. Altunizade – Bosna Bulvarı Raylı Sistem Hattı Tünelleri ve İstasyonları İnşaatı Patlatmalı Kazı Ön Tasarımı, İstanbul Okan Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- Kaya, O., 1978, İstanbul ordovisyeni ve silüriyeni, Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Enstitüsü, 4, 1-22.
- Nicholls, H.R., Johnson C. F. ve Duvall W. I., 1971, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures. Bulletin 656. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Önalın, M., 1981, İstanbul Ordovisyen ve Silüriyen istifinin çökme ortamları, Yerbilimleri Dergisi, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 161-177. Önalın, M., 1982, Pendik bölgesi ile adaların jeolojisi ve sedimentler özellikleri, İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi, Doçentlik Tezi, 156s.
- Özgül, N., 2011, Stratigraphy and some structural features of the İstanbul palaeozoic, Turkish Journal of Earth Sciences, 21, 817-866.

Eti Bakır A.Ş. Küre Yeraltı İşletmesi'nde Elektriksiz ve Elektronik Ateşleme Sistemlerinin Karşılaştırılması

Eti Bakır Corp. Comparison of Non-Electric and Electronic Initiation Systems in Küre Underground Mine

İ. Yurttaş, H. İ. İpekoğlu

Eti Bakır A.Ş. Küre İşletmesi, Cengiz Holding, Küre, Kastamonu

Ö. G. İlik

Kapeks Kimya Sanayi A.Ş

ÖZET: Eti Bakır A.Ş. Küre İşletmesi'nde yeraltı kazıları delme patlatma ve arakatlı göçertme yöntemi ile yapılmaktadır. Yer altı patlatma işlemleri, cevher aynalarında, pasa aynalarında ve katlar arası göçertme patlatmaları olmak üzere üç ana guruba ayrılmaktadır. Katlar arası ve hazırlık galerisi patlatmalarında elektriksiz ve elektronik ateşleme sistemleri ayrı ayrı kullanılarak deneme atımları yapıp patlatma sonrası sarsıntı analizi, ilerleme ve hacimsel üretim sonuçlarının incelenmesi hedeflenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmada ana patlatma parametreleri mümkün olduğunca aynı tutularak (delik sayısı, delik boyu, patlayıcı miktarı, delici operatörü ve ateşleyici) 840 Hwr aynasında ve 490-475 G15 kat arasında deneme atımları yapılmıştır. Sonuçlar iki farklı noktada kurulan titreşim ölçer cihazları ile kayıt altına alınarak delik davranışları ve üretim performansına etkisi irdelenmeye çalışılmıştır.

ABSTRACT: In Eti Bakır A.S. Küre Plant, underground operations are carried out by drilling, blasting and sublevel stoping method. Underground blasting operations are divided into three main groups as ore, waste development and sublevel stoping blasting. It was aimed to examine the results of vibration analysis, progress, and volumetric production after blasting by using non-electrical and electronic ignition systems separately in inter-floor and preparation gallery blasting.

In the study carried out, the main blasting parameters were kept the same as much as possible (number of holes, hole size, amount of explosive, drill operator and blaster), trial blasting were made at 840 Hwr development face and between 490-475 G15 floors. The results were recorded with vibration recorder devices installed at two different points, and its effects on hole behavior and production performance were tried to be examined.

1 GİRİŞ

Madencilik, tünel, yol ve inşaat çalışmaları başta olmak üzere birçok sektörde delme-patlatma çalışmaları olmazsa olmazdır. Teknolojik gelişmelerle birlikte patlayıcı sektörü de gelişmekte, ihtiyaçlar eksiksiz ve daha güvenli bir biçimde karşılanmaktadır. Küre İşletmesi'ndeki yeraltı hazırlık ve üretim kazı çalışmalarının büyük bir bölümünü patlatma operasyonları oluşturmaktadır. Patlatma sonucunda istenilen ilerleme, ayna kesitinin düzgünlüğü ve kırılan malzemenin parça boyutu; patlatma verimimizin temelini oluşturmaktadır. Patlatmanın sonrasında yapılacak olan nakliye ve tahkimat gibi çalışmalarda göz önünde bulundurulacak en

uygun patlatma planı hazırlanması önem arz etmektedir. Buna bağlı olarak patlatma sektöründeki gelişmeler yakından takip edilmekte en uygun malzeme seçimi ve yöntemi uygulanarak verimli bir patlatma hedeflenmektedir

2 KÜRE İŞLETMESİ

Kastamonu'da bulunan Küre İşletmesi 3 açık ve 1 yeraltı madeni ile üretime başlamıştır. Günümüzde açık ocak üretimi tamamlanmış olup üretim sadece yeraltından yapılmaktadır. Yeraltı ocağı Bakibaba, Aşıköy-1 ve Aşıköy-2 olmak üzere üç sektörden oluşmaktadır. Ancak Aşıköy- 1 ve Aşıköy-2 sektörlerindeki rezervlerin 2015 yılında tükenmiş olması sebebiyle sadece Bakibaba sektöründe üretim yapılmaktadır. Bakibaba sektöründe üretimi yapılan cevherin nakli, 2013 yılında tamamlanan, 960 metre uzunluğundaki kuyu ile gerçekleştirilmektedir. Bu kuyu Türkiye sınırları içerisinde açılan en derin kuyu olma özelliğine sahiptir.

2.1 Bölgesel Jeoloji

Küre Formasyonuna ait serpantin, gabro-diyorit ve bazalt birimlerinden cevherin konumu ile ilişkili olarak bazalt birimi içerisinde çalışılmaktadır. Bazaltlar Küre bölgesinde oldukça yaygınlardır. Stockwork cevherleşmenin ana kayacını ve masif (pirit-kalkopirit) zonun ise taban ve örtü kayacını oluştururlar. Ağsal saçınımın ana kayacı olan bazalt bölgelerinde kloritleşme, killeşme, serizitleşme, silisleşme, karbonat ve kuvars damarları ile yer yer dissemine pirit, spekülait ve manyetit görülmektedir. Ağsal saçınımlı bazaltlar üste doğru masif zon olarak devam eder. Aşıköy cevher yatağında bu zon Siyah Şeyl tarafından örtülürken, Bakibaba yatağında ise daha genç bazaltlar tarafından örtülmektedir. Aşıköy ve Bakibaba yatakları arasında kalan bölgeyi genç bazaltlar, yastık lavlar ve breşler kaplamaktadır. Siyah Şeyl çökel kayacı Aşıköy yatağında yaklaşık 150 m kalınlığındadır. Gri-Siyah renkte ve ince taneli ve ince tabakalıdır. Bazalt, Siyah Şeyl dokanağında Bazalt breşleri gözlenmektedir. Bölgedeki tektonizma, yatakta kıvrımlanma olarak gözlenmektedir. Kıvrım eksenleri kabaca K-G yönlüdür. Aşırı deforme olmuş koyu renkli bazalt biriminin bu kıvrımlanmalar nedeniyle olduğu düşünülmektedir.

2.2 Bakibaba Yeraltı Ocağı

Bakibaba Ocağı'nda 2007 yılında hazırlık çalışmaları başlamış olup, 2012 yılında da üretim çalışmalarına başlamıştır. Ocakta üretim cevher içinde sürülen galeriler ve bu galerilere paralel olarak sürülen alt galerilerin arakat göçertmesi yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Tam mekanize çalışılan ocakta galeri ilerlemeleri delme-patlatma metodu ile yapılmaktadır. Delme-patlatma sonucu elde edilen cevher yeraltı kamyonları ile yeraltı kırıcı ünitesine taşınmakta. Burada uygun boyuta indirilen cevher yatay ve dikey bantlarla cevher hazırlama tesisine, yer üstüne gönderilmektedir.

3 DELME VE PATLATMA UYGULAMALARI

Küre İşletmesi'nde pasa aynalarında, cevher aynalarında ve kat arası göçertmelerde olmak üzere 3 farklı patern kullanılarak delme ve patlatma yapılmaktadır. Cevher ve pasa aynalarında patlatma kesme yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Üretim delikleri birbirine paralel delinmekte ve buna ek olarak boş delikler (serbest yüzey oluşturma amacıyla) delinmektedir. Üretim deliklerinin çapı 48mm, boş deliklerinin çapı ise 102mm'dir. Katlar arası göçertme için açılan üretim delikleri 76mm-89mm, boş delikler ise 152mm olarak delinmektedir. Katlar arası dolmuş üst kattan aşağı doğru veya alt kattan yukarı doğru (baş yukarı) olacak şekilde 2 türlü

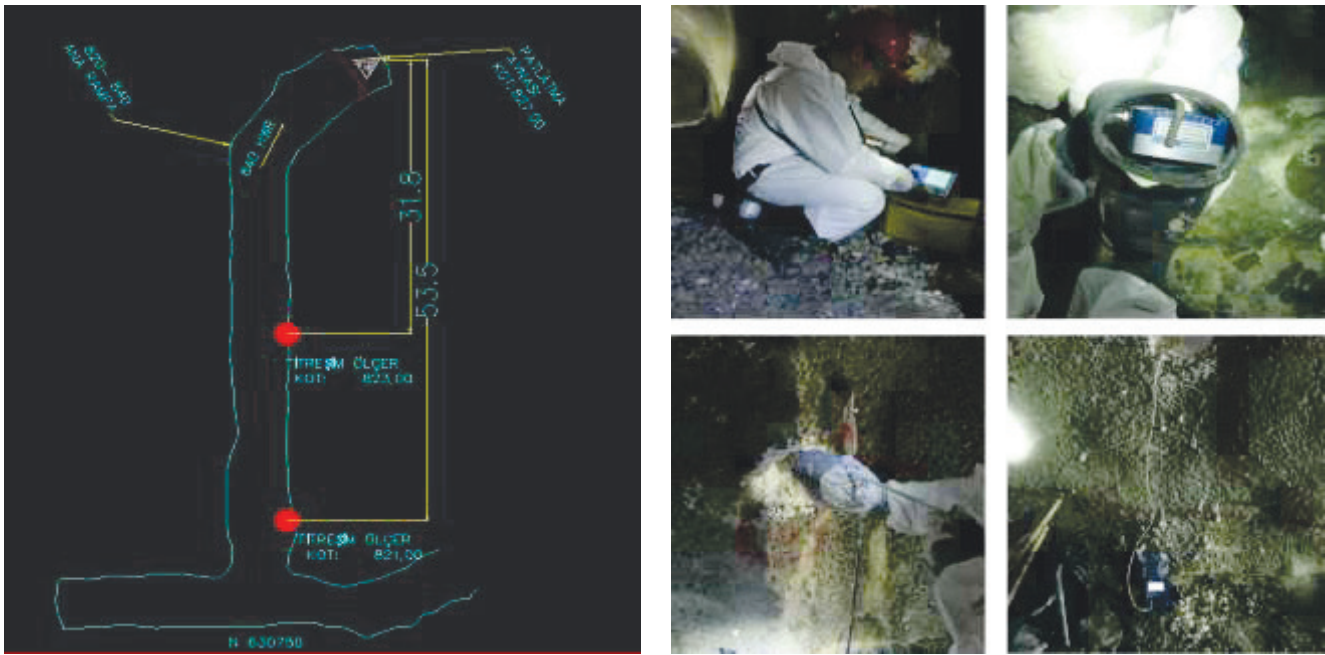
yapılabilmektedir. Patlayıcı madde şarjı sadece üretim deliklerine yapılmakta, boş delikler ise serbest yüzey oluşturmak amacıyla delindiği için bu deliklere patlayıcı şarjı yapılmamaktadır

3.1 840 Hwr Hazırlık Aynası Patlatma Uygulamaları

Tektonizma geçirmiş bazalt – gabrodiyorit formasyonuna sahip 840 Hwr 20 m² hazırlık ayna patlatmasında 1 adet elektriksiz ve 2 adet elektronik olmak üzere 3 adet patlama uygulaması gerçekleştirilmiştir. Belirlenen sabit sarsıntı istasyonlarından alınan kayıtlar ile patlatma deliklerinin davranışları gözlemlenmiştir. Patlama öncesi ve sonrası CMS (Cavity Monitoring System) ile ilerleme ve hacim ölçümleri alınarak patlatma performansına etkisi irdelenmiştir.

3.1.1 Hazırlık çalışması

Patlatma öncesi sabit istasyonların kurulması adına ön çalışma gerçekleştirilmiş olup Şekil 1’de görüldüğü üzere patlatma noktasından 31,8m ve 53,5m metre yatay mesafede iki adet sabit istasyon yeri belirlenmiştir. Her iki istasyon için galeri cidarına yerden 1 metre yükseklikte 152mm çapında 30cm derinliğinde delikler delinmiş ve jeofonlar alçı dolgusu ile deliklerin içerisine sabitlenmiştir. Buradaki amaç jeofonların ana kayaç gibi davranıp, zeminde oluşan yüksek frekans ve genlikteki titreşimin doğru bir hassasiyette kayıt altına alınması amaçlanmıştır.



Şekil 1 Sarsıntı ölçüm istasyonları

3.1.2 Patlatma Parametreleri

840 Hwr hazırlık galerisinde paralel kesme yöntemi kullanılmakta olup, 48mm delik çapına sahip 3,80m delik boyunda 55 adet üretim deliği ve 3 adet 102mm çapına sahip boş delik uygulaması ile patlama uygulaması gerçekleştirilmektedir. Yemleyici olarak 500 gr 50x220mm kapsüle duyarlı emülsiyon patlayıcı, ana patlayıcı olarak ise Anfo, son kesme uygulaması için ise 19x750mm kontur patlayıcı kullanılmaktadır. Her 3 patlatmada toplam 70 kg kapsüle duyarlı emülsiyon patlayıcı, 125 kg Anfo ve 8 kg kontur patlayıcı kullanılmıştır.

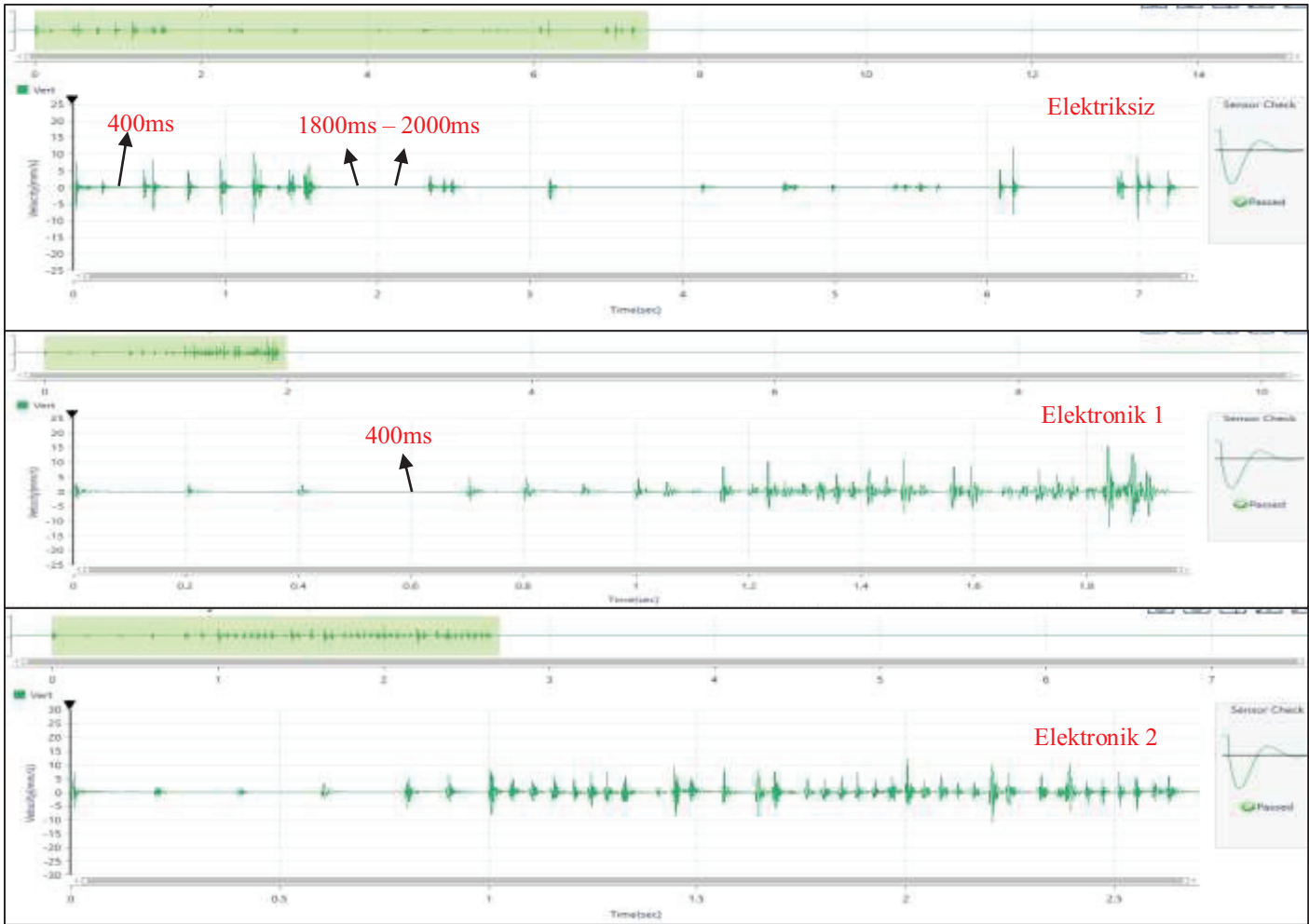
Yapılan patlatmalarda amaç değişkenleri sabit tutup gecikme süresi değişikliğinin patlatma performansına etkisini gözlemlemektir. Her 3 patlatmaya ait gecikme süresi dağılımı Çizelge 1’de görülmektedir.

Çizelge 1. Patlatmalara ait gecikme düzeni

Patlatma Bölgelerine Göre Delik Türleri	Elektriksiz Min.-Max. Gecikme Süresi (ms)	Elektronik 1 Min.-Max. Gecikme Süresi (ms)	Elektronik 2 Min.-Max. Gecikme Süresi (ms)
Kesme Delikleri	100-1000	100-1300	100-1300
Tarama Delikleri	1200-3000	1360-1930	1340-2260
Çevre Duvar Delikleri	4000-4500	1940-1950	2300-2468
Tavan Delikleri	5000-5500	1955-1968	2470-2484
Taban Delikleri	6000-7500	1970-1982	2526-2686

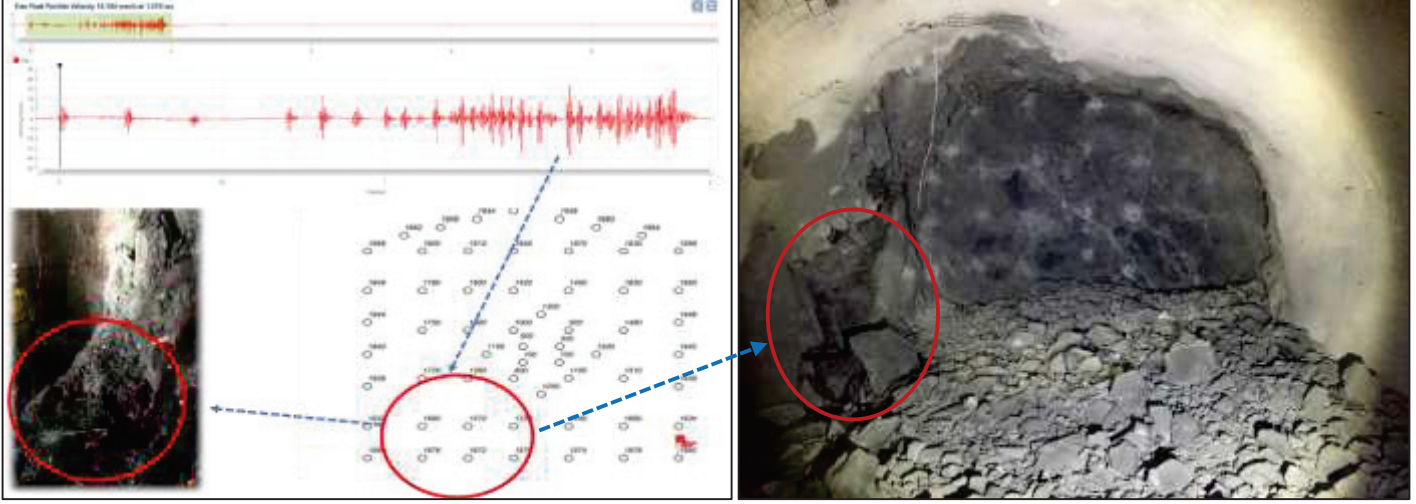
3.1.3 Patlatma sonuçları ve değerlendirilmesi

Patlatmalara ait sarsıntı çıktıları analiz edilmiş ve her deliğin patlatma sırasında yaratmış olduğu genlik gözlemlenmeye çalışılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü üzere elektronik ateşleme sistemi ile gerçekleştirilen patlatmalara ait gecikme sürelerinin daha doğru ve tutarlı olduğu görülebilmektedir. Elektriksiz ateşleme sistemi ile gerçekleştirilen patlatmaya ait sarsıntı kaydı irdelendiğinde 400ms, 1800ms ve 2000ms tanımlanan deliklerden herhangi bir kayıt alınamadığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde Elektronik 1 de de 400ms tanımlanan delikten herhangi bir veri elde edilememiştir. Herhangi bir atım kesmesi olayının mümkün olmadığı elektronik ateşlemede de aynı delikten veri alınamamasının sebepleri başka bir başlık altında irdelenmeli ve değerlendirilmelidir.



Şekil 2. Gecikme süresi ve sarsıntı genliği

Sarsıntı diyagramına bakıldığında elektronik ateşleme sistemi ile gerçekleştirilen patlatmalar elektriksiz ateşleme ile yapılan patlatma ile kıyaslandığında kesme bölgesindeki deliklerin daha az genlik ve tarama bölgesindeki deliklerin daha homojen bir genlik dağılımı gösterdiği görülmektedir. Ayrıca Elektronik 1'deki maksimum genliğin 1900ms civarında olduğu görülmektedir. Şekil 3'te maksimum genliği meydana getiren topuk ve patlatma sonucu cidarda fazla kırılmaya sebebiyet verdiği görülmektedir.



Şekil 3. Maksimum genlik ve patlatmaya etkisi

Patlatmalara ait ilerleme ve kazı hacmine ait CMS ölçümü sonuçları Çizelge 2'de özet olarak görülmektedir.

Çizelge 2. Patlatma sonrası doğrusal ve hacimsel ilerleme

Atım İsimleri	Doğrusal İlerleme (m)	Hacimsel Üretim (m ³)	Kesit Alanı (m ²)
Elektriksiz	3.1	75.20	24.20
Elektronik 1	3.6	69.36	19.26
Elektronik 2	3.7	75.00	20.27

Gerçekleştirilen patlatmalara ait veriler irdelendiğinde elektronik ateşleme sistemi ile yapılan yüksek hızlı patlatmalarda, homojen sarsıntı genlikleri her deliğin bütünsel yapısı bozulmadan enerjisini kayaca iletebildiği ve bunun sonucunda homojen bir kırılma meydana getirerek uygun bir ilerleme ve cidar meydana getirdiği söylenebilmektedir. Elektriksiz ateşleme sistemi ile gerçekleştirilen patlatmalarda zayıf sarsıntı genliklerinin uzun bekleme süresi sonrası meydana gelen bozulmuş yapısal delik bütünlüğü ve/veya yük mesafesinin parçalanmayı olumsuz yönde etkilediği söylenebilmektedir. Patlatma sonrası alınan CMS ölçümleri ile %17 doğrusal ilerleme artışı ve %18 aşırı sökülmenin azalması sonucu bu teoriyi destekler niteliktedir.

3.2 490-475 G15 Katlar Arası Üretim Patlatması

Kat arası patlatma uygulamaları 490-475 G15 katları arasında elektriksiz ateşleme sistemleri kullanılarak 1 sıra, elektronik ateşleme sistemleri kullanılarak 1 sıra ve 2 sıra olmak üzere kat arası sıra atımları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ikincil katlarda sarsıntı miktarını arttırmadan belirlenen sabit sarsıntı istasyonlarından alınan kayıtlar ile patlatma deliklerinin davranışları gözlemlenmiştir. Patlama öncesi ve sonrası CMS (Cavity Monitoring System) ile ilerleme ve hacim ölçümleri alınarak, patlatma performansına etkisi irdelenmiştir.

3.2.1 Hazırlık çalışması

Patlatma öncesi sabit istasyonların kurulması adına ön çalışma gerçekleştirilmiş olup Şekil 4'te görüldüğü üzere atım sonucu oluşan titreşimi ölçmek için kuş uçuşu 83m, 96m mesafede 2 adet istasyon kurulmuştur. Bu cihazlar beton ve kaya zemine alçı ile sabitlenmiştir.



Şekil 4. Sarsıntı istasyonları ve konumları

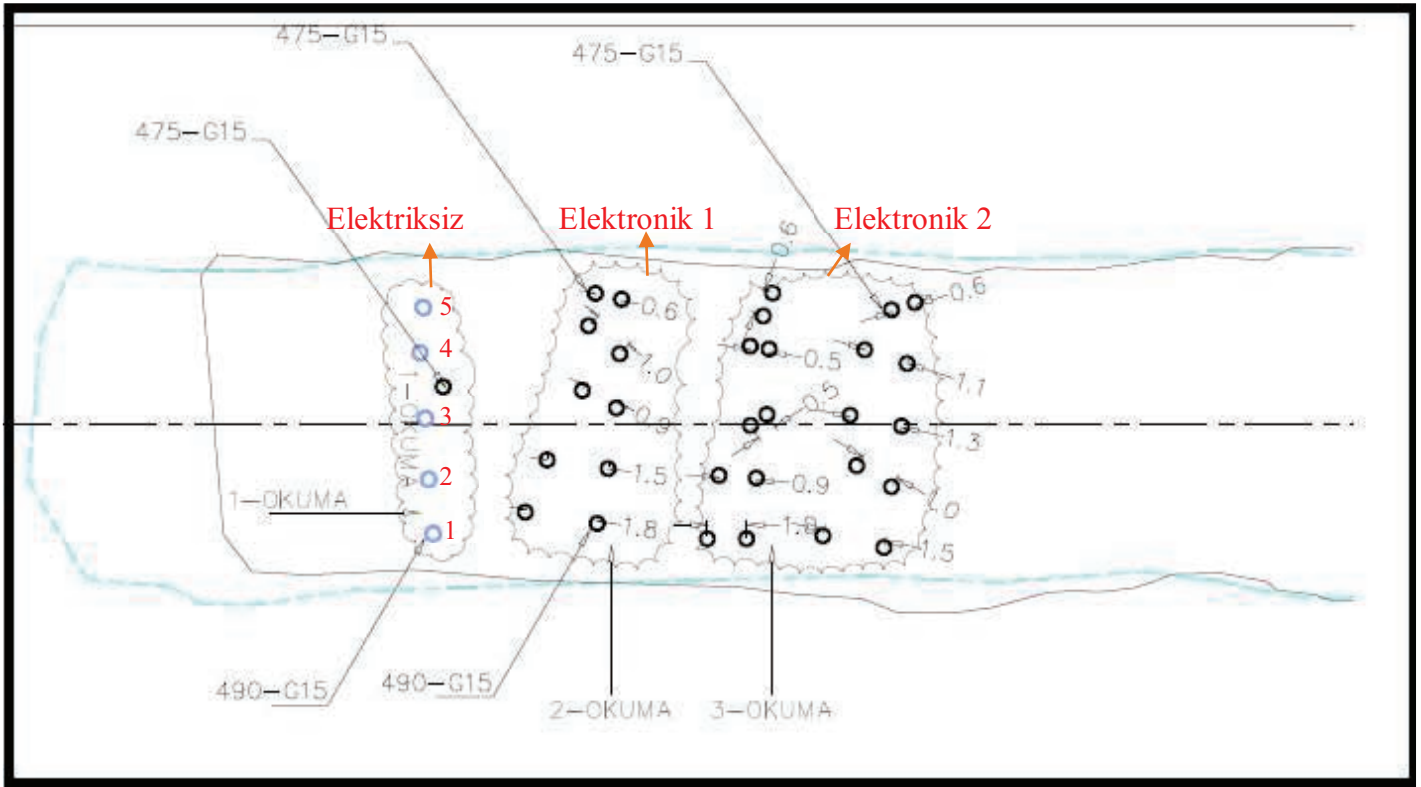
3.2.2 Patlatma parametreleri

Katlar arası patlatmalarda, 1 sıra elektriksiz ateşleme sistemi ile 1 sıra ve 2 sıra elektronik ateşleme sistemi olmak üzere toplamda 3 adet sıra patlatması gerçekleştirilmiştir. Sıralar arası mesafe 2.5m olup, patlatmalarda yemleyici olarak 500 gr 36x420mm kapsüle duyarlı emülsiyon patlayıcı, ana patlayıcı olarak ise Anfo ve Anfo S patlayıcı kullanılmaktadır. Her iki kat arası 15m olup delik boyları 15m olarak delinmektedir. Her delikte, kolon boyunca infilak hızının korunması için 7m şarj sonrası ara sıkılamasız ikinci bir yemleme yapılmaktadır. Her patlatmaya ait özet patlatma parametreleri Çizelge 3'te görülmektedir.

Çizelge 3. Patlatma parametreleri

Patlatma Adı	Delik Çapı (mm)	Delik Sayısı (Adet)	Maks. Yük Mesafesi (m)	Birim Zamanda Patlayan Maks. Patlayıcı Miktarı (MIC) (Kg)
Elektriksiz (Tek Sıra)	89	5	2.60	65
Elektronik 1 (Tek Sıra)	89	5	2.90	87
Elektronik 2 (2 Sıra)	89	10	3.50	70

Şekil 5'te gerçekleştirilen patlatmalara ait delinen delik konumları ve delik sapmaları görülmektedir.



Şekil 5. Delik konumları ve sapma miktarları

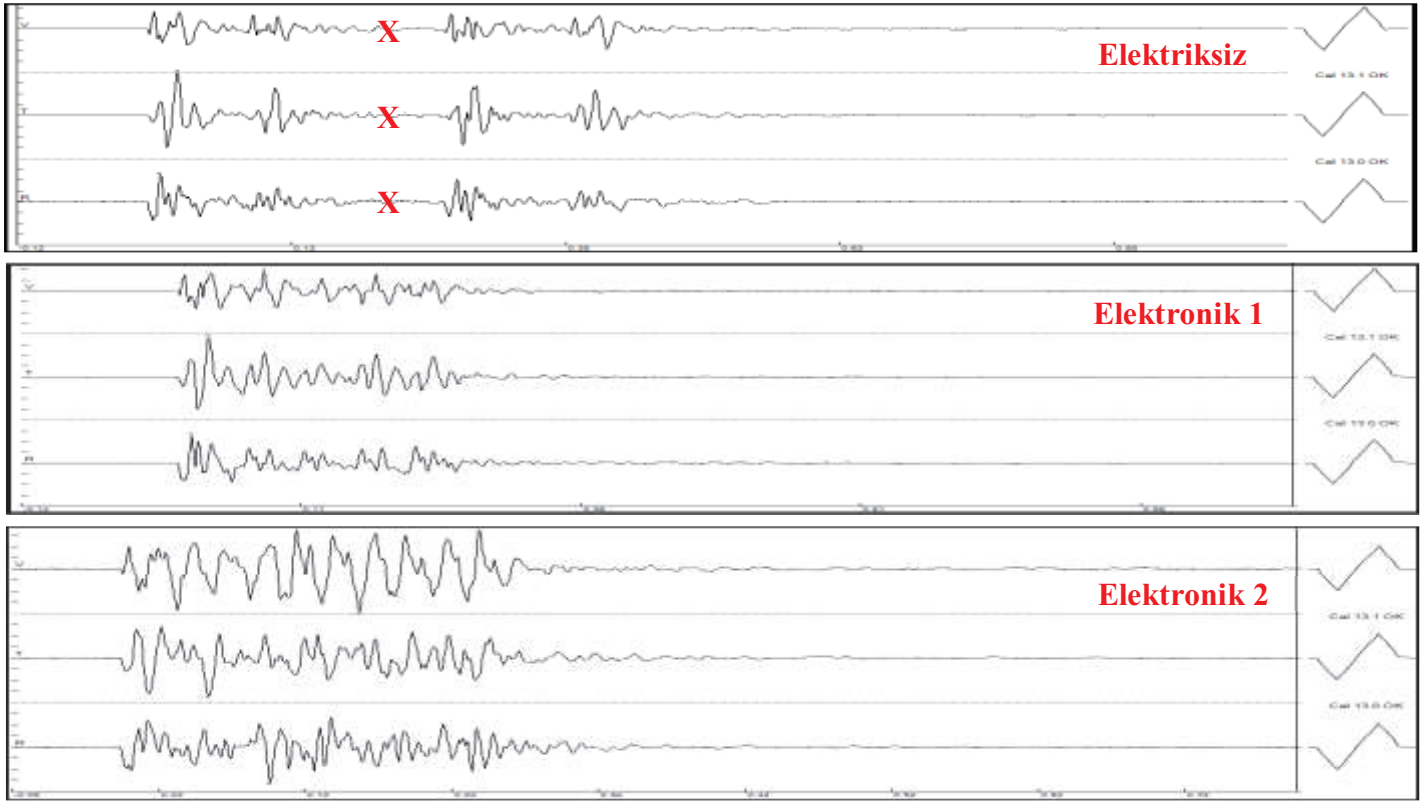
Çizelge 4'te patlatmalara ait deliklere tanımlanan gecikme süreleri görülmektedir. Elektriksiz ve elektronik 1 denesinde her deliğe ait yemlemelerde aynı gecikme süresi tanımlanmış olup elektronik 2'de yemlemeler arası 3 ms gecikme süresi farkı ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4. Patlatmalara ait gecikme süreleri

Patlatma	Yemleme Konumu	1.	2.	3.	4.	5.
Elektriksiz	Üst	400ms	200ms	100ms	300ms	500ms
1. sıra	Alt	400ms	200ms	100ms	300ms	500ms
Elektronik 1	Üst	300ms	200ms	100ms	150ms	250ms
1. sıra	Alt	300ms	200ms	100ms	150ms	250ms
Elektronik 2	Üst	203ms	153ms	103ms	128ms	178ms
1.sıra	Alt	200ms	150ms	100ms	125ms	175ms
Elektronik 2	Üst	328ms	278ms	228ms	253ms	303ms
2.sıra	Alt	325ms	275ms	225ms	250ms	300ms

3.2.3 Patlatma sonuçları ve değerlendirilmesi

Patlatmalara ait sarsıntı çıktıları analiz edilmiş ve her deliğin patlatma sırasında yaratmış olduğu genlik gözlemlenmeye çalışılmıştır. Şekil 6'da ikinci ölçüm istasyonu olan 96m'den alınan sarsıntı dalga formları görülmektedir. Görüldüğü üzere elektriksiz ile gerçekleştirilen patlatmada 4. deliğe ait sarsıntı kaydı alınamamıştır. Kayıt alınamamasının sebepleri başka bir başlık altında irdelenmeli ve değerlendirilmelidir. Her bir delik davranışı irdelendiğinde elektriksiz ateşleme sisteminde her bir deliğin etkileşim içerisinde olmadığı, elektronik ateşleme sisteminde ise delikler arası etkileşimin daha fazla olduğu görülebilmektedir.



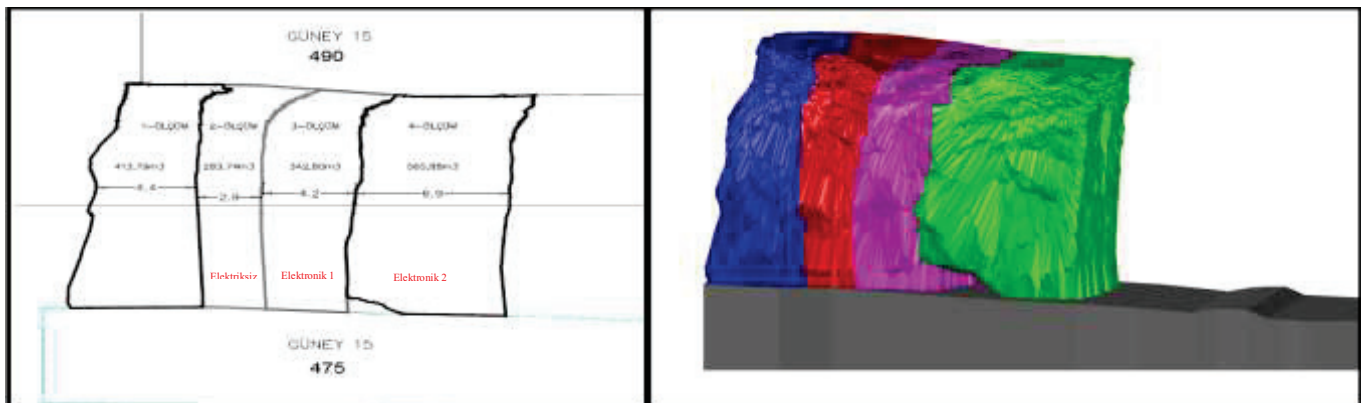
Şekil 6. Sarsıntı dalga formu

Gerçekleştirilen patlatmalara ait titreşim istasyonlarında kayıt alınan PPV_{max} değerleri Çizelge 5'te paylaşılmıştır.

Çizelge 5. Birim zamanda patlayan patlayıcı miktarı ve PPV_{max} kayıt verileri

	MIC (Kg)	1. İstasyon PPV _{max} -Hz	2. İstasyon PPV _{max} -Hz
Elektriksiz	65	5.35mm/s-73.1Hz	6.86mm/s-56.8Hz
Elektronik 1	87	7.67mm/s-68.3Hz	7.24mm/s-53.8Hz
Elektronik 2	70	6.50mm/s-68.3Hz	4.83mm/s-46.5Hz

Elektriksiz ve elektronik 2 patlatmasında birim zamanda patlayan patlayıcı miktarı ve sarsıntı sonuçları karşılaştırıldığında elektronik ateşleme sistemi ile yapılan patlatmada MIC değerinin %7 artması sonucu sarsıntı sonucunun 1. İstasyonda %18 arttığı 2. İstasyonda ise %42 azaldığı görülmektedir. Bu farklılık istasyon konumları ve delik sapmalarından dolayı değişen yük mesafelerinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Şekil 7 de patlatma sonucu CMS ölçüm sonuçları ve modeli, Çizelge 6'da ise özet ölçüm sonuçları görülmektedir.



Şekil 7. CMS ölçüm sonuçları

Çizelge 6’da elektriksiz ateşleme sistemi ile yapılan patlatma ile iki sıra elektronik 2 patlatması irdelendiğinde kat arası üretim miktarının %99 arttığı, titreşim dalga formu irdelendiğinde titreşim maruziyet süresinin %45 azaldığı görülmektedir.

Çizelge 6. Patlatma sonrası CMS ölçümleri

	İlerleme (m)	Hacim (m ³)
Elektriksiz	2.9	284
Elektronik 1	4.2	343
Elektronik 2	6.9	566

4 SONUÇLAR

490-475 G25 katlar arası üretim patlatması ve 840 Hwr hazırlık aynası patlatma uygulama denemelerinde elektronik ateşleme sistemi ve elektriksiz ateşleme sistemi kullanımı ile gerçekleştirilen patlatma sonuçları; ilerleme, kazı hacmi ve titreşim dalga formu üzerinden irdelenmiş ve değerlendirilmiştir.

840 Hwr hazırlık aynasında elektronik ateşleme sistemi ile yapılan patlatmalarda gecikme süresi ve konumlarının değiştirilmesi sonucu doğrusal ilerlemenin %17 arttığı ve aşırı sökülmenin ise %18 azaldığı, aynı zamanda titreşim dalga formunun özellikle tarama ve çevre deliklerinde daha homojen bir davranış gösterdiği görülmektedir.

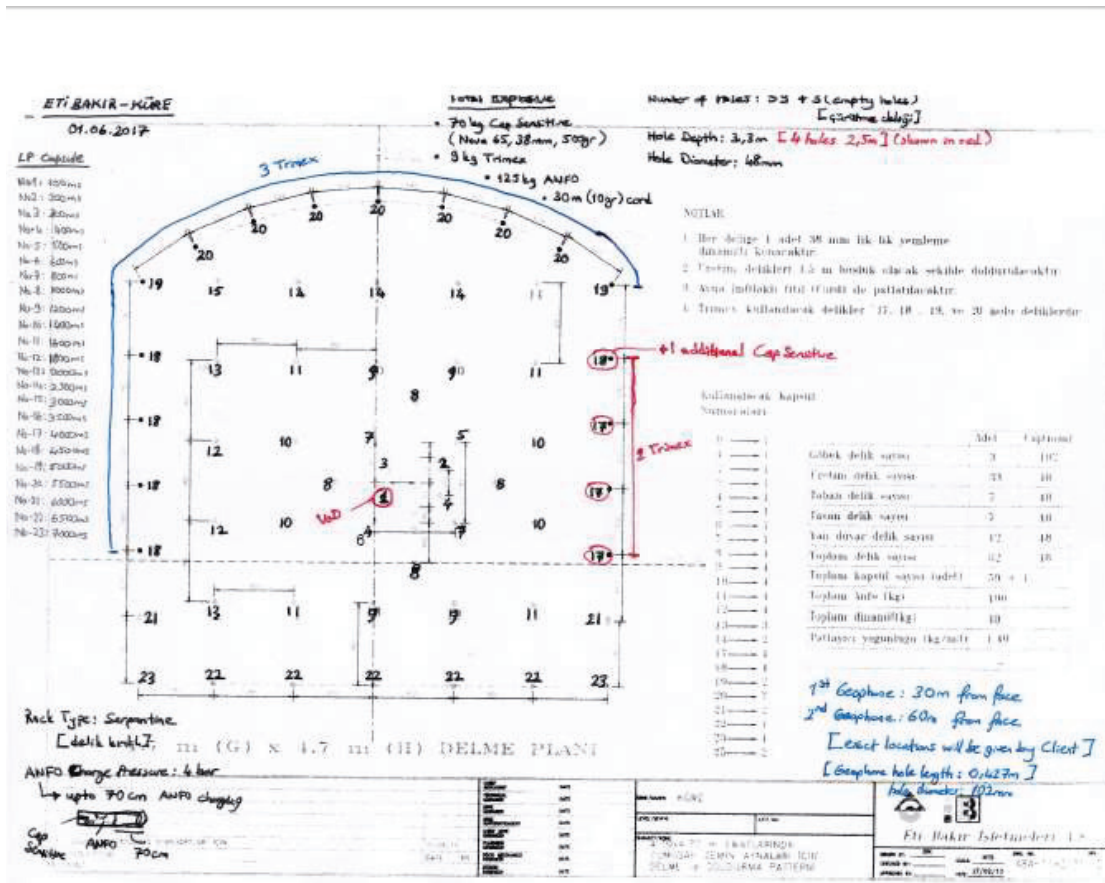
490-475 G25 katlar arası üretim patlatması yapılan patlatmalarda elektriksiz ateşleme sistemi ile yapılan tek sıra patlatması ile elektronik ateşleme sistemi ile yapılan 2 sıra patlatma sonuçları karşılaştırıldığında, üretim miktarının %99 arttığı, titreşim maruziyet süresinin %45 azaldığı görülmüştür. Patlatma sonucu oluşan PPV_{max} titreşim genliğinin 1. İstasyonda %18 arttığı 2. İstasyonda ise %42 azaldığı görülmektedir. Bu sonuç sarsıntı istasyonu doğrultusunda 1,5 metreye ulaşan delik sapmalarında dolaylı değişen yük mesafesi ve patlatma noktası ile istasyon 2 arasında yer alan ikincil stope ve hazırlık galerinin üretim sürecinin devam etmesi varlığının titreşim genliğini manipüle ettiği düşünülmektedir. Genliğe ait frekans değerinin düşmesi bu düşüncüyü destekler niteliktedir.

Elektriksiz ateşleme sistemi gerçekleştirilen her iki grup patlatmasında sarsıntı kaydı alınamamış delikler dikkat çekmektedir. Bu durum delik geometri parametrelerinde yaşanan sapmalar, delik geometrisindeki uygunsuzluklar veya elektriksiz ateşleme sistemindeki gecikme sapmaları kaynaklı olabileceği değerlendirilmektedir. Bu durumun sebeplerinin ayrıca değerlendirilmesi ve irdelenmesi gerektiği düşünülmektedir.

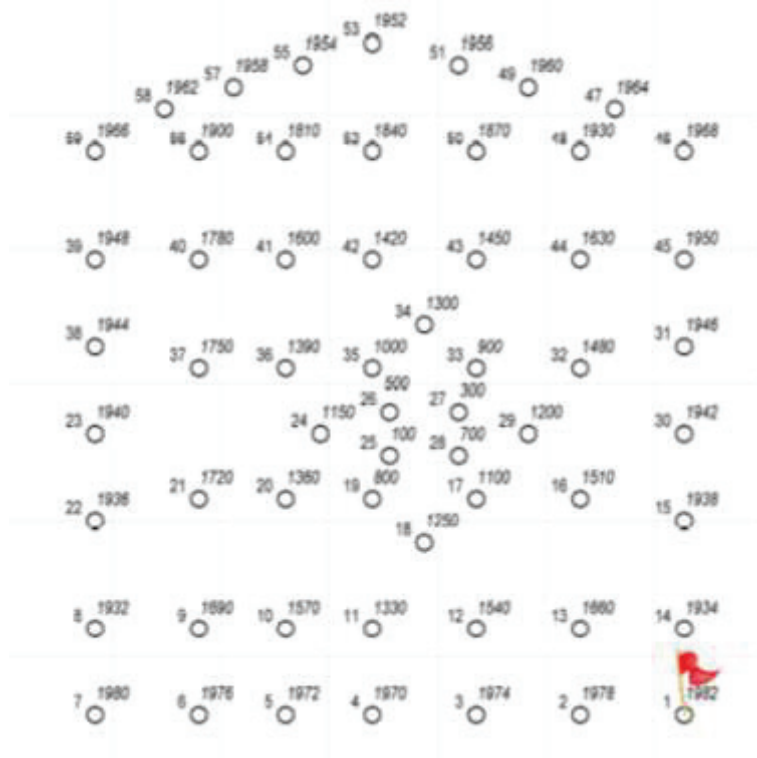
KAYNAKLAR

- İlik, Ö.G, Düzgün, Ö, Gençtürk, B, 2018. Bir Yeraltı Maden İşletmesinin Galeri Patlatmalarında Elektronik Ateşleme Sistemi Kullanılarak İyileştirilmesi, *UYAK 2018*, s.263-265, İstanbul.
- Demir G, Yılmaz M, Şen M, 2015. Eti Bakır A.Ş. Küre Yeraltı İşletmesinde Gerçekleştirilen Patlatma Uygulamalarının İncelenmesi, 8. *Delme Patlatma Sempozyumu*, s.319-334, İstanbul.

EK 1.



Elektriksiz deliklere ait detay gecikme süreleri



1. Elektronik deliklere ait detay gecikme süreleri



2. Elektronik deliklere ait detay gecikme süreleri

Göztepe-Ataşehir-Ümraniye Metro Hattı Şehir İçi Kontrollü Patlatmalı Kazı Faaliyetlerinin Değerlendirilmesi

Evaluation of Controlled Blasting Activities of Göztepe-Ataşehir-Ümraniye Metro Line

H.Ş. Çaylak, B. Boran, İ. Sefer, T. Haşçelik

GNM, İstanbul

A. Kahrıman, S. Bağdatlı

İstanbul Okan Üniversitesi, Patlayıcı Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, İstanbul.

F. K. Keküllüoğlu

Akademi Patlayıcı Mühendisliği, İstanbul.

R. Sağlam, S. Tuncer

Slovenya.

H. Koç, K. S. Delice, N. Kaner

EMAY Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., İstanbul.

ÖZET: Patlatmanın kaçınılmaz olduğu taş ocakçılığı, madencilik, inşaat altyapı kazıları, kuyu-tünel, boru hattı, baraj, metro gibi çeşitli sektörlerde; yersarsıntısı ve hava şokundan kaynaklanan çevre problemleri ile sıkça karşılaşılmakta ve tartışılmaktadır. Nüfus artışı ve şehirleşmeye paralel olarak bu tür gerçek ya da psikolojik rahatsızlıklar giderek de yoğunlaşmaktadır. Dolayısıyla ekonomik ve emniyetli bir patlatma, aynı zamanda bu tür sorunları da elimine etmek durumundadır. Bu nedenle, iyi bir patlatmadan beklenen en önemli unsurlardan biri de atımın çevresel etkiler açısından emniyetli olmasıdır. Bu çalışmada, İstanbul İli Anadolu Yakasında inşa halinde olan, Göztepe-Ataşehir-Ümraniye metrosunun 60. Yıl Parkı İstasyonunda bulunan açık saha ve tünel kazılarında gerçekleştirilen patlatmalı kazılar incelenmiştir. Yakın çevrede bulunan risk unsurları belirlenmiş, uygun patern çizilmiş ve herhangi bir gecikme aralığında kullanılacak en fazla patlayıcı madde miktarını belirlenmiştir.

ABSTRACT: In various sectors such as quarrying, mining, construction infrastructure excavations, well-tunnel, pipeline, dam, subway, where blasting is inevitable; Environmental problems caused by ground tremors and air shocks are frequently encountered and discussed. Parallel to population growth and urbanization, such real or psychological disorders are intensifying. Therefore, an economical and safe blasting must also eliminate such problems. For this reason, one of the most important factors expected from a good blasting is that the shot is safe in terms of environmental effects. In this study, blast excavations carried out in open field and tunnel excavations in the 60. Yıl Park Station of Göztepe-Ataşehir-Ümraniye metro, which is under construction on the Anatolian Side of Istanbul, were examined. The risk factors in the immediate environment were determined, the appropriate pattern was drawn, and the maximum amount of explosive material that could be used in any delay interval was determined.

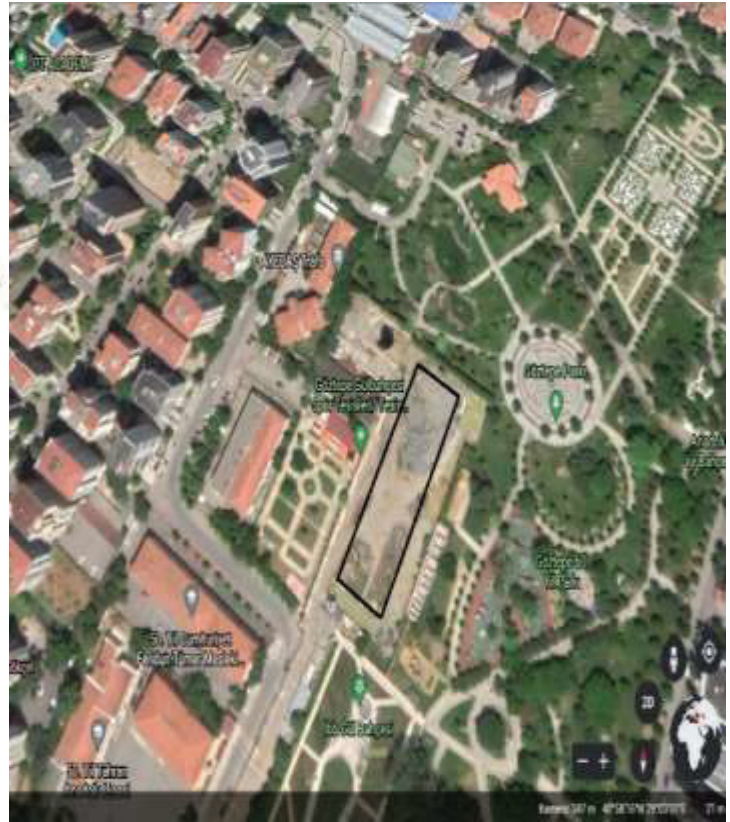
1.GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, İstanbul İli Anadolu Yakasında inşa halinde olan, Göztepe-Ataşehir-Ümraniye metrosunun 60. Yıl Parkı İstasyonunda bulunan açık saha ve tünel kazılarında gerçekleştirilen patlatmalı kazılar incelenmiştir. Yakın çevrede bulunan risk unsurları belirlenmiş, uygun patern çizilmiş ve uygun patlayıcı miktarları kullanılmıştır. İstasyonun çevresinde bulunan Ayedaş trafo merkezinin önemi, diğer risk unsurlarına göre daha da özel bir durumdadır; İstanbul Anadolu yakasına dağıtılan elektrikte önemli rol olan bu trafo merkezi için çalışmalar da daha özenle gerçekleştirilmiştir. Şantiye çevresinde bulunan bu Ayedaş trafo merkezi binasına gelen titreşim ve hava şoku değerleri özenle incelenmiş ve çalışmalara buna uygun bir şekilde dikkatli devam edilmiştir. Trafo merkez binası ile çalışma yapılan noktalar arasındaki en kısa mesafe 52 metredir. Şekil 1a ve Şekil 1b’de sırasıyla 60. Parkı İstasyonuna ait proje görüntüsü ve uydu görüntüsü verilmiştir. Çevredeki risk unsurları da bu şekillerde gözükmemektedir.



(a) Proje Görüntüsü



(b) Uydu Görüntüsü

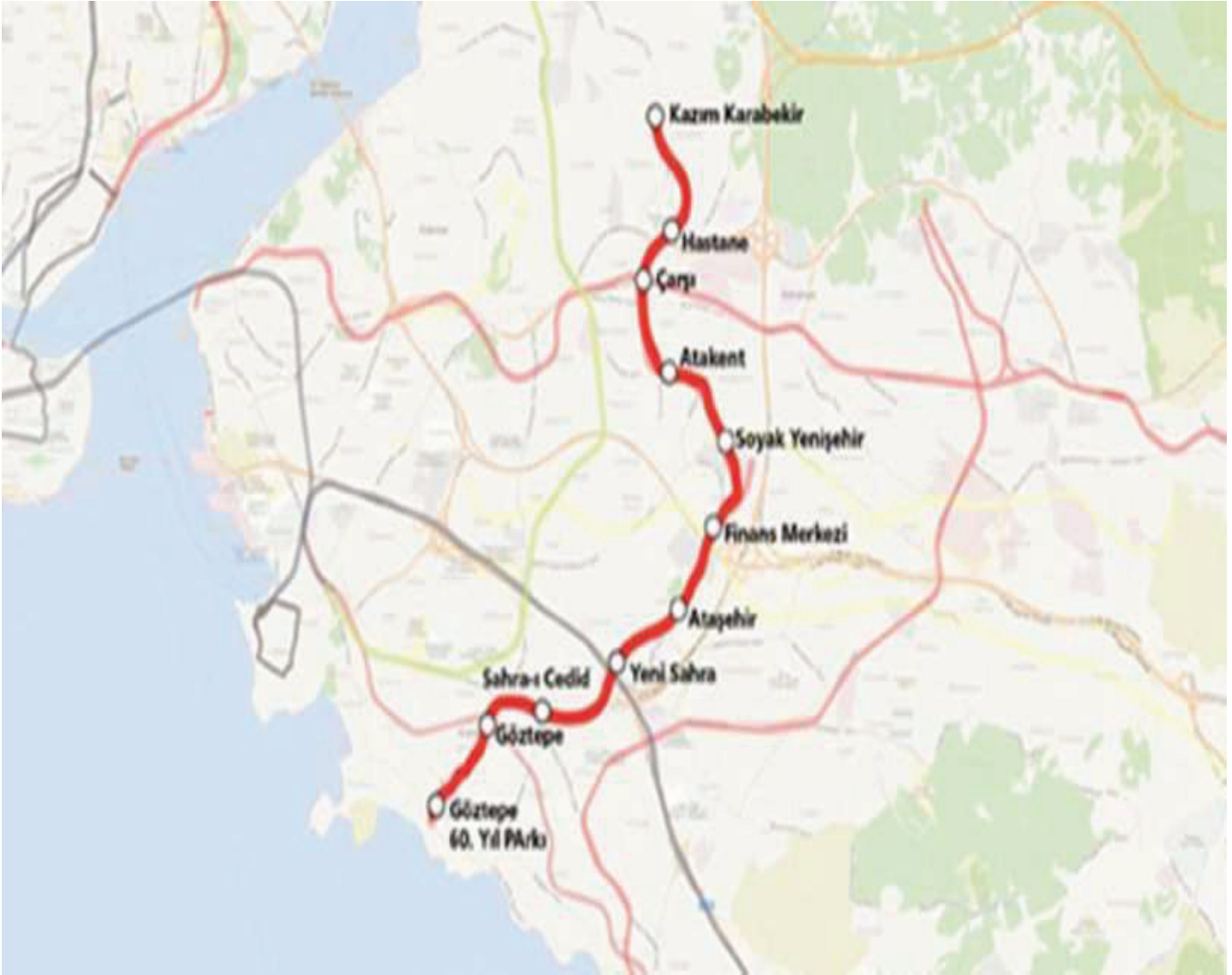
Şekil 1. Göztepe otopark açık saha ve çevresinde bulunan riskli yapılara ait görünüm

Yapılan bu çalışmalarda, Ayedaş trafo binası da dikkate alarak delik çapı, delik boyu, delikler arası mesafe, sıkılama boyu ve delik başına düşen maksimum patlayıcı miktarı gibi parametreler değerlendirilerek uygun patern çizilip, uygulanmıştır. Bu uygulamalar sonucunda trafo binasına gelen ve çevredeki risk unsurlarına gelen titreşim ve hava şoku değerleri minimal seviyeye indirilmiştir.

2. ÇALIŞMA SAHASI VE JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

2.1. Çalışma Sahası

Söz konusu metro projesi; Ümraniye İli Kazım Karabekir Mahallesi sınırlarından başlayarak güney doğrultusunda İstanbul Finans Merkezi'ne doğru, daha sonra ise, güney batı yönünde Ataşehir İlçesi sınırlarında ilerleyerek, Kadıköy İlçesi Göztepe Mahallesinde son bulmaktadır. Proje kapsamında Ümraniye-Ataşehir-Göztepe güzergahı üzerinde 13 km uzunluğundaki çift tüp, tek hat TBM tüneli, 2 adet tren depolama tüneli (NATM) ve 1 adet bağlantı tüneli (NATM) yapılacaktır. Proje kapsamında toplamda 11 adet istasyon yer almaktadır. Güzergahın işli olduğu uydu görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Güzergahın konumu

2.2. Güzergahın Yerel Jeolojisi

“Ümraniye -Ataşehir-Göztepe Metrosu İnşaat ve Elektromekanik Sistemler Temin, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri” kapsamında yapımı planlanan metro hatları güzergahında karşılaşılabilecek beklenen başlıca birimler; Kurtköy Formasyonu (Bakacak Üyesi, Süreyyapaşa Üyesi), Pelitli Formasyonu, Pendik Formasyonu ve Sultanbeyli Formasyonu olarak adlandırılan birimlerdir.

3.ARAŞTIRMADA UYGULANAN YÖNTEM

3.1. Açık Saha (Yüzey Patlatması)

“Ümraniye-Ataşehir-Göztepe Metrosu İnşaat ve Elektromekanik Sistemler Temin, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri” kapsamında istasyon yapıları açık saha kazılarında, patlatmalı kazı faaliyetleri sürdürülecek olan çalışma bölgenin koşulları göz önüne alındığında, mini basamak yöntemi uygulanması uygun görülmüştür.

Ana patlayıcı madde olarak temin olanaklarına da bağlı olarak ANFO veya muadili diğer patlayıcı maddelerin kullanılması ve her deliğin müstakil ateşlenmesine izin veren gecikmeli tercihen elektriksiz ateşleme elemanları kullanılmıştır.

Yapılan risk analizine ve çalışma sahasında şirketin makine ve ekipman şartlarına göre iki farklı delik çapı ve bunlara dayalı olarak da değişken mini basamak patlatma modelleri kullanılmış olup detayları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Şirket şartlarına göre uygulanabilecek önerilen mini basamak patlatma tasarım modelleri

Basamak yüksekliği	K (m)	1		2		3		4		5	
Delik çapı	d (mm)	64	76	64	76	64	76	64	76	64	76
Delik Uzunluğu	H (m)	1,4	1,6	2,7	2,7	3,8	3,8	5,0	5,0	6,2	6,2
Dilim Kalınlığı	B (m)	0,8	1,1	1,3	1,3	1,6	1,7	2,0	2,0	2,25	2,25
Deliklerarası Mesafe	S (m)	1	1,3	1,6	1,6	2	2	2,5	2,5	2,6	2,6
Sıkılama	h_0 (m)	1,1	1,2	1,3	1,3	1,6	1,7	2,0	2,0	2,25	2,25
Şarj Yoğunluğu	I_b (kg/m)	2,5	3,6	2,5	3,6	2,5	3,6	2,5	3,6	2,5	3,6
Şarj Miktarı	Q (kg)	0,75	1,44	3,5	5,04	5,5	7,56	7,5	10,8	9,88	14,22
Özgül Delme	b (m/m^3)	1,75	1,12	0,65	0,65	0,40	0,37	0,25	0,25	0,21	0,21
Özgül Şarj	q (kg/m^3)	0,94	1,01	0,84	1,21	0,57	0,74	0,38	0,54	0,34	0,49

*Risk noktalarına yaklaştıkça daha küçük basamak yükseklikleri ve mümkünse daha küçük delik çapları seçilmelidir.

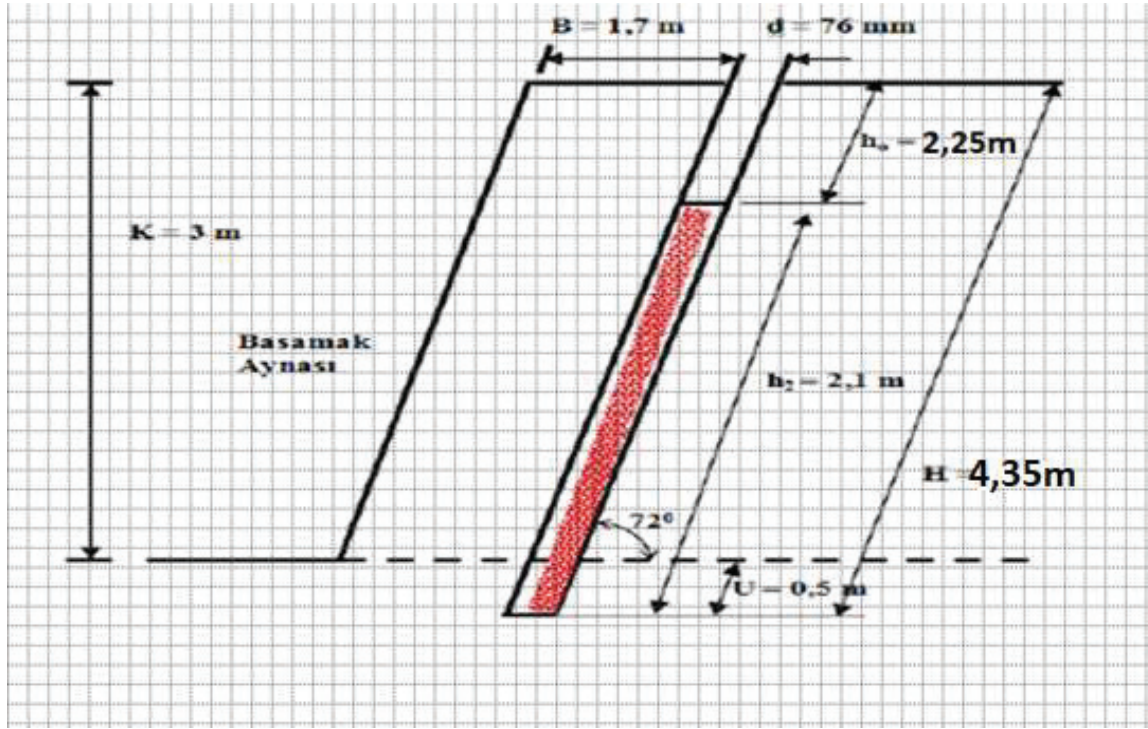
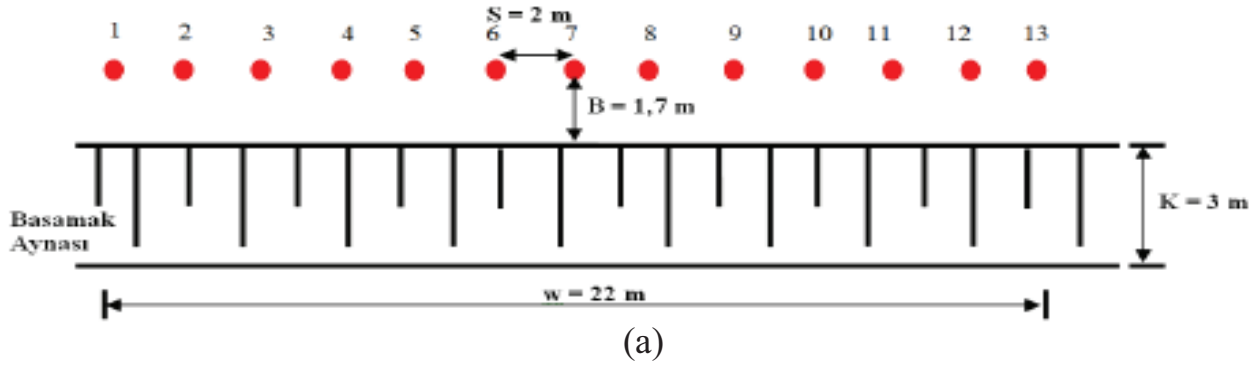
Söz konusu saha için risk unsuru taşıyan yapılara zarar vermemek adına kullanılmak üzere önerilen mini basamak patlatma tasarım modellerinden bir örnek plan ve kesit üzerinde Şekil 3a ve b’de gösterilmiştir.

Üretim delikleri ise 76 mm çapında (3 inç) delinmiş, delik dibine ise 50*225 mm boyutlarında 0.500 kg ağırlığında kapsüle duyarlı emülsiyon tipi patlayıcı madde yerleştirilmiştir (primer charge). Primer charge’a 7 metre uzunluğunda yüzey gecikmeli elektriksiz kapsül takılmıştır. Primer charge’ın üzerine anfo (deliklerin su durumuna göre suya dayanıklı ağır anfo) kullanılacak ya da duruma göre kullanılmayacaktır; sıkılama boyu da 2.25-2.75 metre bırakılmıştır. Sıralar arasında ise 4 metrelik yüzey gecikmeleri kullanılmıştır.

76 mm’ lik delgi çapında delindiğinde; Delikler arası mesafe 2.00 metre; sıralar arası mesafe 2.00 metre; fazla delgi 0.25 metre, sıkılama mesafesi 2.25-2.75 metre olarak patern oluşturulmuş, delik başına toplam patlayıcı madde miktarı 5.50 kg (0.500 kg primer charge + 3-5 kg anfo); özgül şarj ise 0.250-0.400 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.

65 mm’ lik delgi çapında delindiğinde; Delikler arası mesafe 1,00 metre; sıralar arası mesafe 1,25 metre; fazla delgi 0.50 metre, sıkılama mesafesi 2.00 metre olarak patern oluşturulmuş, delik başına toplam patlayıcı madde miktarı 1.00 kg (0.500-1 kg primer charge); özgül şarj ise 0.250-0.400 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Perde diplerine yanaşma durumunda uygulanması muhtemel ve çürütme delgileri delinecektir (Kahrıman, 2017).

Patlatma Tasarımı ;

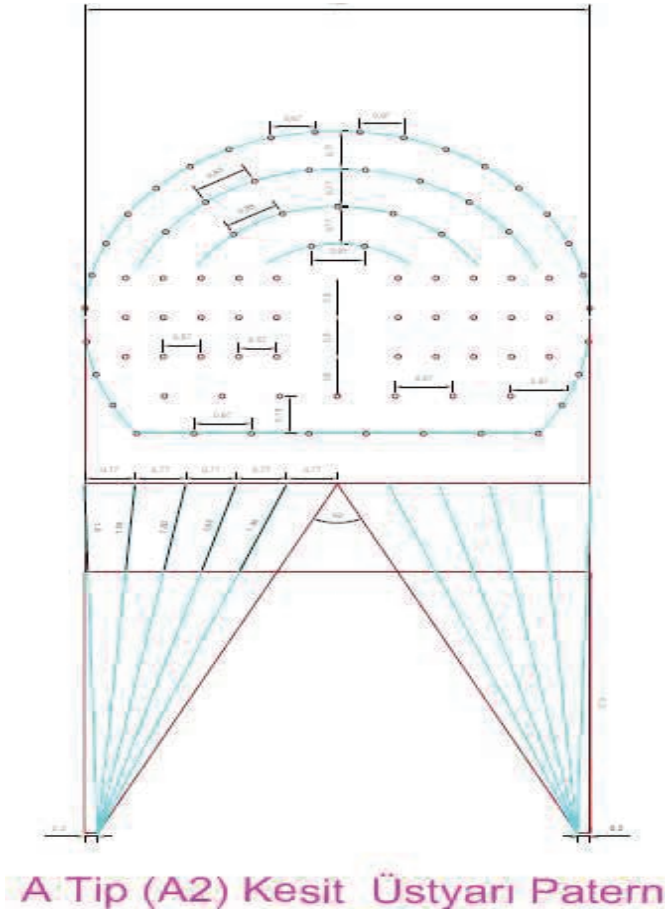


Şekil 3. Patlatma geometrisi (a) Plan görünüşü (b) Kesit.

3.2. Tünel Atım Paternleri

A tüneli için yaptığımız uygulamalarda 80 kilogram powergel magnum 365(38*400), 80 adet hendidet 4 metre (25/3500), 2 adet elektrikli kapsül 0 numara ve 1 adet(42 ms htd) 4 metre kullanılmıştır. Delgi boyları 1.80m uzunluğundadır. Şekil 4(a)'da A tipi (A2) tünele ait tasarlanan üstyarı paterni verilmiştir. Şekil 4(b)'de A tipi (A2) tünele ait patlatma öncesi fotoğraf verilmiştir.

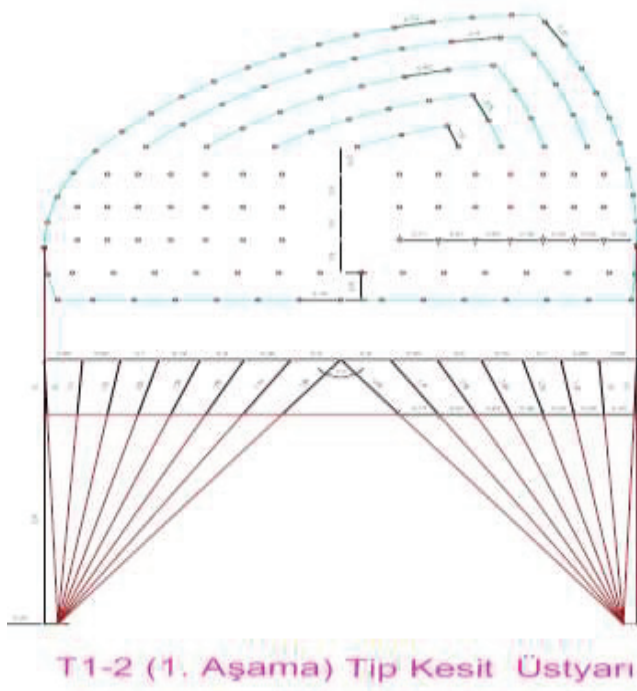
T1-2 1. Aşama tüneli için yaptığımız uygulamalarda 110 kilogram powergel magnum 365 (38*400), 130 adet hendidet 4 metre (25/3500), 2 adet elektrikli kapsül 0 numara ve 1 adet (42 ms htd) 4 metre kullanılmıştır. Delgi boyları 1.60-1.70m arasındadır. Şekil 5(a)'da T1-2 (1. Aşama) tünellerde uygulanan üstyarı paterni verilmiştir. Şekil 5(b)'de ise T1-2 (1. Aşama) ise bu tünel tipine ait tünel fotoğrafı verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 4. (a) A tip (A2) Kesit üstyarı paterni (b) A tip tünel fotoğrafı

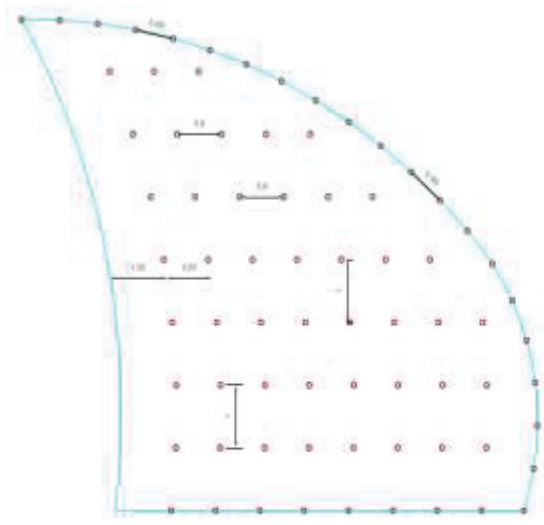


(a)

(b)

Şekil 5.(a) T1-2(1. aşama) Tip kesit üstyarı paterni (b) T1-2 (1. aşama) tünel fotoğrafı

T1-2 2. Aşama tüneli için yaptığımız uygulamalarda 75 kilogram powergel magnum 365(38*400), 80 adet hendidet 4 metre (25/3500), 2 adet elektrikli kapsül 0 numara ve 1 adet (42 ms htd) 4 metre kullanılmıştır. Delgi boyları 1.60-1.70m arasındadır. Şekil 6a'da T1-2 (2. Aşama) tünellerde uygulanan üstyarı paterni verilmiştir. Şekil 6b'de ise bu tünel tipine ait tünel fotoğrafı verilmiştir.



T1-2 (2. Aşama) Tip Kesit Üstyarı

(a)



(b)

Şekil 6.(a) T1-2 (2. aşama) tip kesit üstyarı paterni (b) T1-2 (2. aşama) tünel fotoğrafı

4 ÖLÇÜM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Projede gerçekleştirilen her atım için titreşim ölçüm cihazları ile en yakın risk unsurlarının bulunduğu noktalara cihazlar kurulmaktadır. Kurulan cihazlar sonucunda yapılan her çalışmada gerekli ölçümler alınıyor. Çizelge 2'de açık saha atımları için ve Çizelge 3'te tünellerdeki atımlar için yapılan ölçüm tablosu verilmiştir. Tablodan maksimum parçacık hızı, hava şoku gibi değerler incelenmiştir. Çizelge 2'de ve Çizelge 3'te yapılmış olan 202 atımdan seçilmiş 10 adet ölçüm sonuçları tablo halinde verilmiştir. (Bieniawski, 1984).

Patlatma paterni, yukarıda detaylı olarak açıklanan atımlar sonucunda, kayaç içi titreşimlerin oluşturduğu parçacık hızı, deplasman, ivme ve frekans değerleri, kayıt cihazları ile tespit edilmiştir. Titreşim ve hava şoku ölçümü yapılan atımlarda, cihazların kaydettiği değerler; çevredeki tesis ve yapılara etki derecelerini tahmin ve mukayese etmek amacıyla, TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetimi yönetmeliği'ne göre değerlendirilmiştir. Kayıt alınan atımlardan bazılarının parçacık hızı bileşenlerini, frekans değerlerini ve hava şoku değerlerini içeren bilgiler, Çizelge 2'de ayrıntılı olarak verilmiştir. (Bieniawski, 1984).

Patlayıcı madde atımları sırasında ölçüm istasyonunda 140 dBL'den yüksek değerlerde sestən rahatsız olma, pencere camı kırılmaları, binalarda hasar meydana gelebilmektedir (Kahrıman vd., 2014).

Kazı sahasında yapılan atımlar sırasında cihazların mikrofonu zemine yerleştirilerek ölçülen hava şoku değerleri 140 dBL altında kaydedilmiştir. Bu değerlerden, atımların, seçilen ölçüm istasyonlarına göre çok daha uzakta bulunan çevredeki tesis ve yapılarda herhangi bir hasar oluşturmayacağı gibi, cam kırılmaları, sestən rahatsız olma gibi durumların da meydana gelmeyeceği anlaşılmıştır.

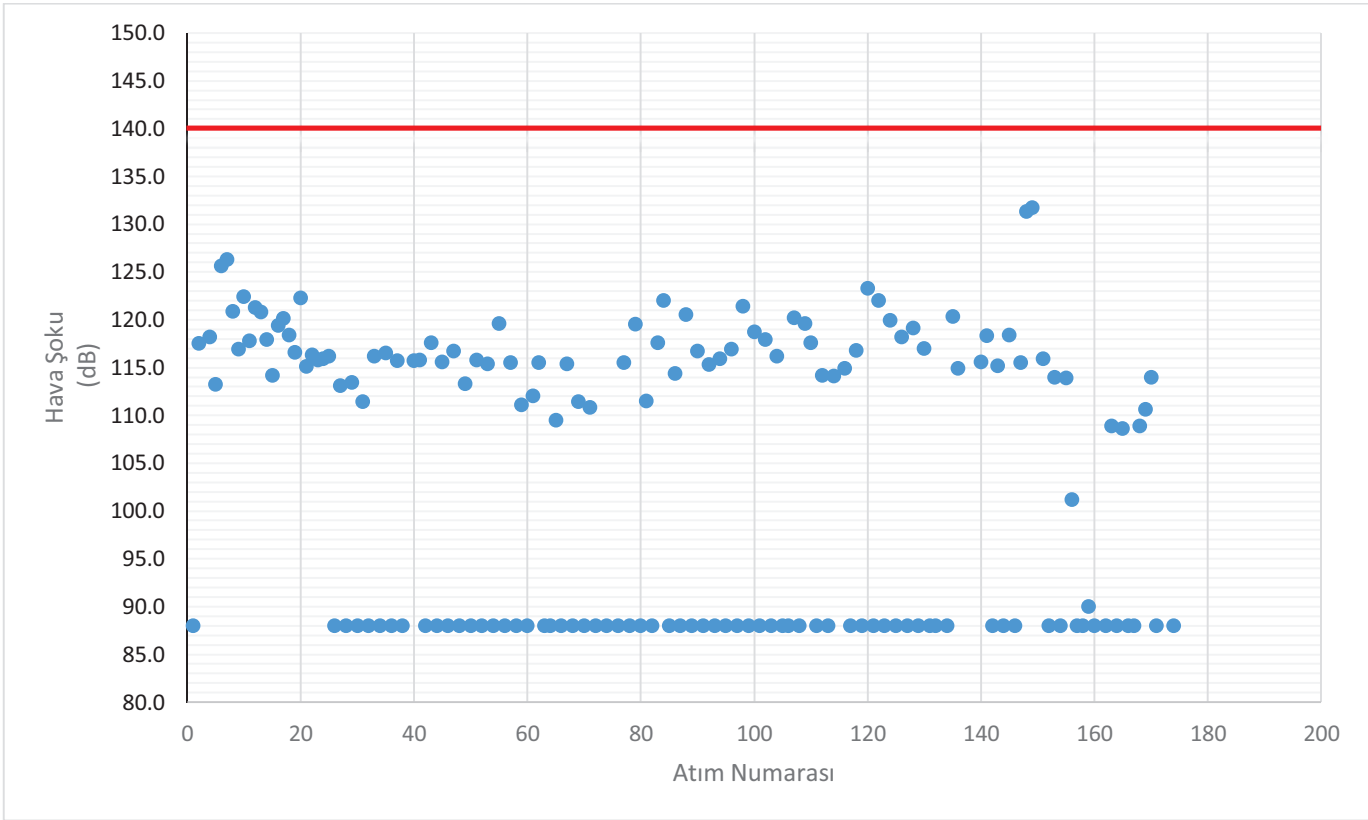
Çizelge 2. Ölçüm sonuçları açık saha

Tarih	Saat	Enine (PVT) (mm/s)	Frekans (f) (Hz)	Düşey (PVV) (mm/s)	Frekans (f) (Hz)	Boyuna (PVL) (mm/s)	Frekans (f) (Hz)	Max. Parçacık Hızı (PPV) (mm/s)	Frekans (f) (Hz)	Hava Şoku (dB)	Toplam Şarj (kg)	Gecikme Başına Toplam	Mesafe (R) (m)	Ölçekli Mesafe (SD)	Yatay Mesafe	Ayna Adı	Ayna KM
12.08.2021	19:03	4.41	100	7.33	64	8.90	100	8.90	100	88.0	160	2.5	58.36	33.69	53.9	Açık Saha	4. Bölge
18.09.2021	18:26	4.42	60	6.28	42	7.87	64	7.87	64	88.0	140	2.5	56.63	32.70	53.9	Açık Saha	5. Bölge
10.09.2021	18:05	5.96	78	8.65	60	10.35	78	10.35	78	88.0	140	2.5	56.63	32.70	53.9	Açık Saha	4. Bölge
29.12.2021	10:47	4.72	68	8.55	30	8.89	28	8.89	28	88.0	50	2.5	61.17	35.32	60.7	Açık Saha	5. Bölge
12.01.2022	18:02	8.85	56	5.05	23	13.40	44	13.40	44	88.0	30	2.5	71.56	41.32	67.9	Açık Saha	4. Bölge
13.01.2022	16:05	12.82	35	7.68	33	11.66	37	12.82	35	88.0	75	2.5	69.32	39.73	65.5	Açık Saha	4. Bölge
31.01.2022	13:47	7.33	33	6.78	24	8.31	40	8.31	40	88.0	50	2.5	67.61	38.12	63.2	Açık Saha	5. Bölge
18.03.2022	16:03	7.37	43	6.10	47	9.02	47	9.02	47	119.7	75	2.5	66.43	42.01	66.4	Açık Saha	5-6. Bölge
23.03.2022	14:54	1.51	37	1.62	93	7.62	64	7.62	64	102.8	75	2.5	80.26	50.76	80.2	Açık Saha	5-6. Bölge
24.03.2022	18:29	6.99	39	11.18	51	8.89	32	11.18	51	116.6	75	2.5	66.43	42.01	66.4	Açık Saha	5-6. Bölge

Çizelge 3. Ölçüm sonuçları açık saha

(Tarih)	Saat	Enine (PVT) (mm/s)	Frekans (f) (Hz)	Düşey (PVV) (mm/s)	Frekans (f) (Hz)	Boyuna (PVL) (mm/s)	Frekans (f) (Hz)	Max. Parçacık Hızı (PPV) (mm/s)	Frekans (f) (Hz)	Hava Şoku (dB)	Toplam Şarj (kg)	Gecikme Başına Toplam	Mesafe (R) (m)	Ölçekli Mesafe (SD)	Yatay Mesafe	Ayna Adı	Ayna KM
1.11.2021	12:41	10.11	41	12.33	24	9.45	51	12.33	24	112.1	80	3	43.82	25.30	32.9	N2 Hat 1	0+315.20
1.10.2021	10:40	10.64	85	11.57	68	8.84	85	11.57	68	106.0	80	3	45.01	25.99	35.2	N2 Hat 1	0+381.10
24.08.2021	16:59	9.95	100	11.16	85	8.43	93	11.16	85	108.1	80	3	40.71	23.50	30.0	Hat 1 Geri	0+411.70
5.07.2021	12:13	15.04	64	11.08	78	14.26	64	15.04	64	88.0	70	3	45.29	26.15	30.2	T1.2 2.Aşama	0+504.80
9.07.2021	10:56	3.50	51	4.28	41	5.56	60	5.56	60	102.9	70	3	63.54	36.68	55.6	T1.2 2.Aşama	0+515.80
3.06.2021	13:26	15.95	51	13.50	78	15.18	64	15.95	51	88.00	95	3	85.00	49.07	78.1	T1.2. 1.Aşama	0+526.80
23.06.2021	10:16	6.85	73	6.66	64	6.49	31	6.85	73	104.3	75	3	77.20	44.57	71.8	T1.2. 2.Aşama	0+419.80
23.04.2021	10:30	15.51	85	15.00	73	17.12	79	17.12	79	108.10	110	3	50.54	29.18	40.53	T1.2 1.Aşama	0+487.60
7.01.2021	16:09	10.09	73	7.78	85	10.82	100	10.82	100	88.00	80	3	157.56	90.97	155.04	Hat2 İleri	0+299.10
18.01.2021	16:34	11.94	57	9.91	51	13.84	68	13.84	68	118.70	80	3	85.92	49.61	80.76	Hat2 İleri	0+332.10

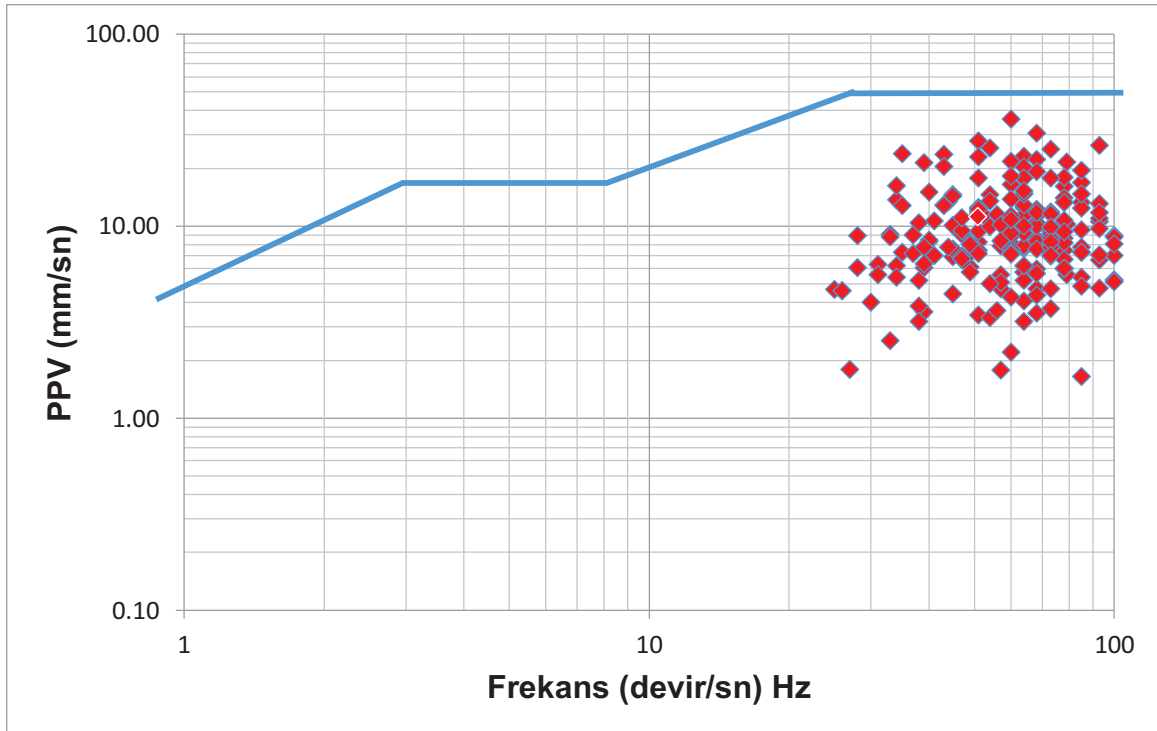
Şekil 7’de açık saha atımlarda ölçülen hava şoku değerleri verilmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak hava şoku değerleri genel olarak 110-125 dBL aralığında olduğu görülmektedir. (Kahrıman, 2017).



Şekil 7. Ölçülen hava şoku değerleri

4.1 Atımların Hasar Kriterlerine Göre Değerlendirilmesi

Çizelge 2’de verilmiş olan açık saha atımlarında ölçülmüş olan maksimum parçacık hızları ve frekans değerleri Şekil 5’te incelenmiştir. Bir önceki yönetmelik olan T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği Normuna Göre 60. Yıl Açık Saha İstasyonundan Alınan Verilerin Grafik Üstündeki Konumları Şekil 8’de verilmiştir (Bieniawski, 1984).



Şekil 8. Ölçülen titreşim değerleri

4.2 Atım Sonuçlarının İstatistiksel Analizi

Bu çalışma kapsamında kaydedilen ve oluşan yersarsıntısı ölçüm sonuçları Çizelge 2’de sunulmuştur. Parçacık hız bileşenleri (boyuna, enine, düşey ve maksimum) oluşum frekansları dikkate alınarak daha önce bahsedilen uluslararası genel kabul görmüş normlarla mukayesesi yapılmıştır. Bu çalışmaya ek olarak parçacık hızı tahmini için gecikme başına düşen en yüksek patlayıcı madde miktarı ve kaynak ile ölçüm istasyonu arasındaki uzaklıklar dikkate alınarak türetilen ölçekli mesafe ile parçacık hızı arasındaki ilişki incelenmiştir.

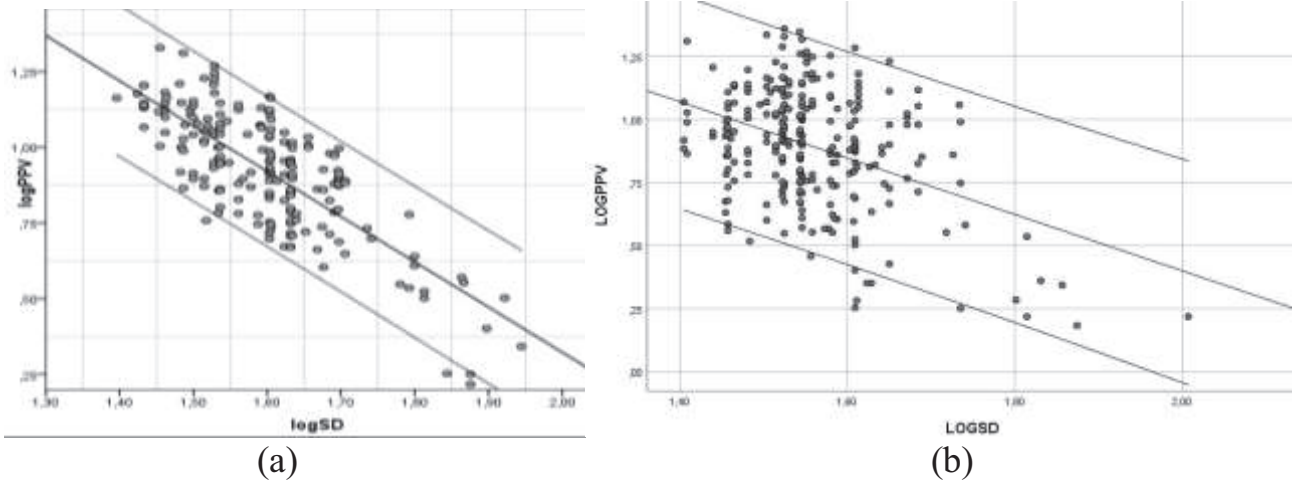
Çizelge 2’deki verilerden hareketle ölçülen maksimum parçacık hızı ile ölçekli mesafe veri çiftleri kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda, yapılacak kontrollü patlatma tasarımlarında, parçacık hızı tahmininde kullanılması önerilen çalışma sahasının sabitleri sırasıyla açık saha ve tünel için sırasıyla Eşitlik 1 ve 2’deki formüllerle ifade edilmiştir. Şekil 9(a)’da açık saha için, Şekil 9(b)’de tüneller için grafik verilmiştir.

Açık Saha Patlatmaları için

$$PPV = 3556 \times SD^{-1,849} ; (r=)0.606 \quad (1)$$

Tüneller için

$$PPV = 1099 \times SD^{-1,119} ; (r=) 0.518 \quad (2)$$



Şekil 9.(a)Açık saha için PPV-SD ilişkisi (b)Tüneller için PPV-SD ilişkisi

Eşitlik 1’de görüldüğü üzere, açık saha için yapılan hesaplamada çalışılan sahanın sabitleri $K= 3556$ ve $\beta = -1,849$ olarak bulunmuştur, tüneller için Eşitlik 2’deki formüle ise $K=1099$ ve $\beta= -1.119$ olarak bulunmuştur. Oldukça anlamlı sayılabilecek korelasyon katsayısı ile sonuçlanmış olan bu regresyon ifadeleri, söz konusu işletmede titreşim ölçer cihazı kullanılmadığı durumlarda, herhangi bir atımdaki gecikme başına kullanılan belirli miktardaki bir patlayıcı maddenin oluşturacağı titreşimin hızının belirli bir uzaklıktaki değerinin ne olacağını tahmin etmede çok önemli bir yaklaşım olarak rahatlıkla (kabul edilebilir limitlerdeki bir sapma ile) kullanılabilir. 202 atım sonucunda elde edilen bu yaklaşımların yeni veriler ile sahanın derinleşmesi de dikkate alınarak zaman esaslı olarak güncelleştirilmesi gözden uzak tutulmamalıdır.

5 SONUÇLAR

Nüfus artışı ve kentleşmeye paralel olarak, modern dünyanın ihtiyacı olan büyük inşaat ve tesislerin yapımı ile birlikte endüstrinin ihtiyacı olan maden kaynaklarının üretilerek insanlığın hizmetine sunulması sırasında, geçmişte olduğu gibi günümüzde, hatta gelecekte de patlatmalı kazı çalışmalarının kaçınılmaz olduğu bilinmelidir. Bu yüzden; patlamadan kaynaklanan

çevresel etkilerin belirlenmesine yönelik yer sarsıntısı ve hava şoku ölçümleri büyük önem taşımaktadır.

Bu yönde yapılan çalışmalara örnek olarak seçilen araştırma sahasında, kısmi olarak elde edilen ölçüm sonuçları, T.C standartı ile analiz edilmiş ve patlamalı kazı çalışmaları sırasında, izlenen paternlerdeki atımların meydana getirdiği titreşim ve hava şokunun, ölçüm alınan noktalar itibariyle söz konusu saha civarındaki trafo merkezi tesisleri başta olmak üzere, çevredeki yapılarda etkili olamayacağı belirlenmiştir. Ancak, bu tür çalışmalarda, kontrollü atım tasarımlarının ve kayıt cihazı kullanımının önemi, özellikle ihtilaflı durumların çözümünde, gözden uzak tutulmamalıdır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu araştırmaya olanak sağlayan Gülermek-Nurol-Makyol Adi Ortaklığı yetkilileri'ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Bieniawski Z. T., 1984. Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, USA.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022. Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği.
- Ceylanoğlu, A., Kahriman, A., 1996, Measurement and Analysis of Ground Vibration Induced by Bench Blasting in a Celestite Open-pit Mine in Turkey, Fourth International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, October 7-11, Volume 1, s 283-290, Cagliari, Italy.
- Johnston, G.J., Durucan, Ş., 1994. The Numerical Prediction, Analysis and Modelling of Ground Vibration Induced by Blasting, Third International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, 18-20 October, İstanbul.
- Kahriman, A., Görgün, S., Karadoğan, A., Tuncer, G., 2000. Estimation Particle Velocity on The Basis of Blast Event Measurement For An Infrastructure Excavation Located Nearby Istanbul, First World Conference on Explosives And Blasting Technique, 6-8 September, Munich, Bavaria, Germany.
- Kahriman, A., Karadoğan, A., Tuncer, G., Görgün, S., Güven, S., Ferhatoğlu, A., Gezbul, T., 2002a. Evaluation of Damage Risk of the Ground Vibration Induced by Blasting in a Quarry, Second International Conference Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, 9-15 June, s. 365-377, Varna, Bulgaria,
- Kahriman, A., Tuncer, G., Görgün, S., Karadoğan, A., 2002b. Monitoring and Analysing Ground Vibration Induced by Different Blasting Excavation Activities, Seventh International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, October 7-10, s 385-394, Cagliari, Italy,
- Kahriman, A., Tuncer, G., Görgün, S., Karadoğan, A., Özdemir, K., 2003. Evaluation of The Ground Vibration Attenuation Produced From Blasting For The Different Rock Masses, Proceedings of The Twenty-Ninth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, 2-5 February, Vol. I, s. 193-201, Nashville, Tennessee, USA.
- Kahriman, A., Bağdatlı, S., Ağustos 2017. Ümraniye–Ataşehir–Göztepe Metrosu Tünelleri ve İstasyonları İnşaatı Patlatmalı Kazı Ön Tasarımı, İstanbul Okan Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul.

Şehir Merkezlerindeki Tünel İnşaatlarında Gerçekleştirilen Patlatma Uygulamalarında Elektronik Kapsül Kullanımı

Use of Electronic Detonators in Blasting Applications in Tunnel Constructions in City Centers

E. Elmacı, O. Kadıoğlu
Kırlioğlu Kimya San. ve Tic. A.Ş.

F. Aydın, Ö. Aytekin
Fernas İnşaat A.Ş.

A. Karadoğan, Ü. Özer, M.C. Özyurt, Z. Sertabipoğlu
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

ÖZET: Şehirlerin, gelişimine ve nüfus artışına paralel olarak, ulaşım ihtiyaçları da artmaktadır. Bugün tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de şehir içi ulaşım karmaşık bir hale gelmiştir. Sürdürülebilir bir şehir işi ulaştırma planında ulaşım amaçlı yerüstü yapıları kadar metro, tünel gibi ulaşım amaçlı yeraltı yapıları da önemlidir. Önceki yıllarda, daha önce çevresel nedenler ve teknik imkânsızlıklar nedeniyle şehir merkezlerinde yapımı imkânsız veya çok zor gibi görünen tünel projeleri, inşaat ve tünel teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde çok daha kolay ve düşük maliyetle tamamlanır olmuştur. Ancak bu tip projelerin vazgeçilmez faaliyetlerinden olan delme-patlatma yönteminin kullanılması, bazı çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Bu problemler arasında en fazla gündeme gelen konu ise, patlatma kaynaklı yer sarsıntısıdır.

Bu çalışma Trabzon ilinde inşaatı devam eden bir karayolu tüneli projesinde, patlatma kaynaklı yer sarsıntısı ve diğer çevresel etkileri minimize etmek amacıyla elektronik kapsül kullanılarak yer sarsıntısının ve diğer çevresel etkilerin minimize edilmesini ve güvenli şekilde projenin noktalanmasını hedeflemektedir. Elektronik kapsül kullanımının patlatma tasarımında sağlamış olduğu gecikme esnekliği ile yer sarsıntılarının çevresel etki bakımından kontrol altına alınması ve uygulamada sağlamış olduğu kolaylıklar belirtilmiştir.

ABSTRACT: In parallel with cities' development and population growth, their transportation needs are also increasing. Today, urban transportation has become more complex in Turkey as it is in the world. In a sustainable urban business transportation plan, underground structures for transportation purposes, such as subways and tunnels, are as important as aboveground structures for transportation purposes. Tunnel projects, which previously seemed impossible or very difficult to construct in city centres due to environmental reasons and technical impossibilities, have been completed much easier and at lower cost thanks to the developments in construction and tunnel technologies. However, the drilling-blasting method, one of the indispensable activities of such projects, also brings some environmental problems. The most common issue among these problems is ground shaking caused by blasting.

This study aims to minimize ground shaking and other environmental effects by using electronic detonators to minimize blast-induced ground shaking and other environmental effects in a road tunnel project under construction in Trabzon province and to punctuate the task safely. It is stated that the delay flexibility provided by using electronic detonators in the detonation design, the control of ground vibrations in terms of environmental impact and the convenience it provides in practice.

1 GİRİŞ

Modern hayatın bir sonucu olarak şehir içlerinde büyük inşaat ve alt yapı projelerinin yapılması ihtiyacı da her geçen gün artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla faaliyete geçen mühendislik projelerinin artmasına paralel olarak, artan ve genellikle kaçınılmaz olan patlatmalı kaya kazısı işleri, çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Bunlar arasında en fazla şikâyet konusu olan patlatmadan kaynaklanan yer sarsıntısıdır. Yer sarsıntıları depreme benzer etkiler yapmaktadır. Dolayısı ile oluşan yapı hasarları benzerlik göstermektedirler. Patlatma ile oluşan sarsıntılar taşıdıkları enerji düzeyinde hasara neden olmaktadır.

Patlatmadan kaynaklanan çevre problemlerinin birçoğu yapısal hasarlar üzerine yoğunlaşmaktadır, ancak bölgede bulunan tüm canlıların üzerinde de psikolojik etkiler yarattığı göz ardı edilmemelidir. Bu ve benzeri nedenler şikâyetleri de gündeme getirebilmektedir. Gündeme gelen bu haklı veya haksız şikâyetler, teknik elemanların uğraşması gereken en önemli problemlerinden biri haline gelmiştir. Bu sorunlardan dolayı zaman zaman üretim faaliyetleri aksamakta, hatta işletmeler tazminat ödemek gibi problemlerle karşı karşıya kalmaktadır. 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.

Mühendislerin temel amacı bir işi güvenli, verimli ve ekonomik olarak yapmaktır. Bu amaçların önde geleni olan güvenlik, konu insan sağlığı ve hayatı olunca diğer amaçlara nazaran özel bir önem arz etmektedir. Bu gerçekler, insan yaşam alanlarına yaklaşan hatta iç içe yürütülen bu faaliyetlerde çevresel etkilerin titizlikle değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bilinçli ve duyarlı işletmeler, patlatmaların yarattığı olumsuz etkileri asgari düzeyde tutabilmek ve çevreye zarar vermemek için gerekli ölçüm, değerlendirme ve önlem alma çalışmalarını yapmak ya da yaptırmak zorundadırlar.

Fernas İnşaat A.Ş.'nin yüklenicisi bulunduğu “Trabzon-Erzurum (Trabzon-Gümüşhane Arası) Devlet Yolu İşi Bünyesinde Yapılan Değirmendere Tüneli Yapım İşi” kapsamında, çalışma sahasının çevresi ve bölgede bulunan tüm canlılar üzerinde hissedilen sorumluluk bilinciyle, patlatmaların meydana getirdiği yer sarsıntıları ve diğer çevresel etkileri minimize etmek amacıyla elektronik kapsül kullanılmış, bu sayede elde edilen gecikme esnekliği ve uygulama kolaylığı ile yer sarsıntıları çevresel etki bakımından kontrol altına alınmıştır. Bu çalışma, söz konusu tünel inşaatında elektronik kapsül ile yapılan patlatma operasyonlarını açıklamaktadır.

2 ÇALIŞMA SAHASI

“Trabzon-Erzurum (Trabzon-Gümüşhane Arası) Devlet Yolu İşi Bünyesinde Yapılan Değirmender Tüneli Yapım İşi” Km: 0+000 – G 4+293,74 İ 3+030.22 arasında yer almaktadır. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Trabzon-Erzurum (Trabzon-Gümüşhane arası) Devlet Yolu İşİ Bünyesinde yapılan Değirmendere Tüneli Km: 0+000 – G 4+293.74 İ 3+030.27 yer bulduru haritası

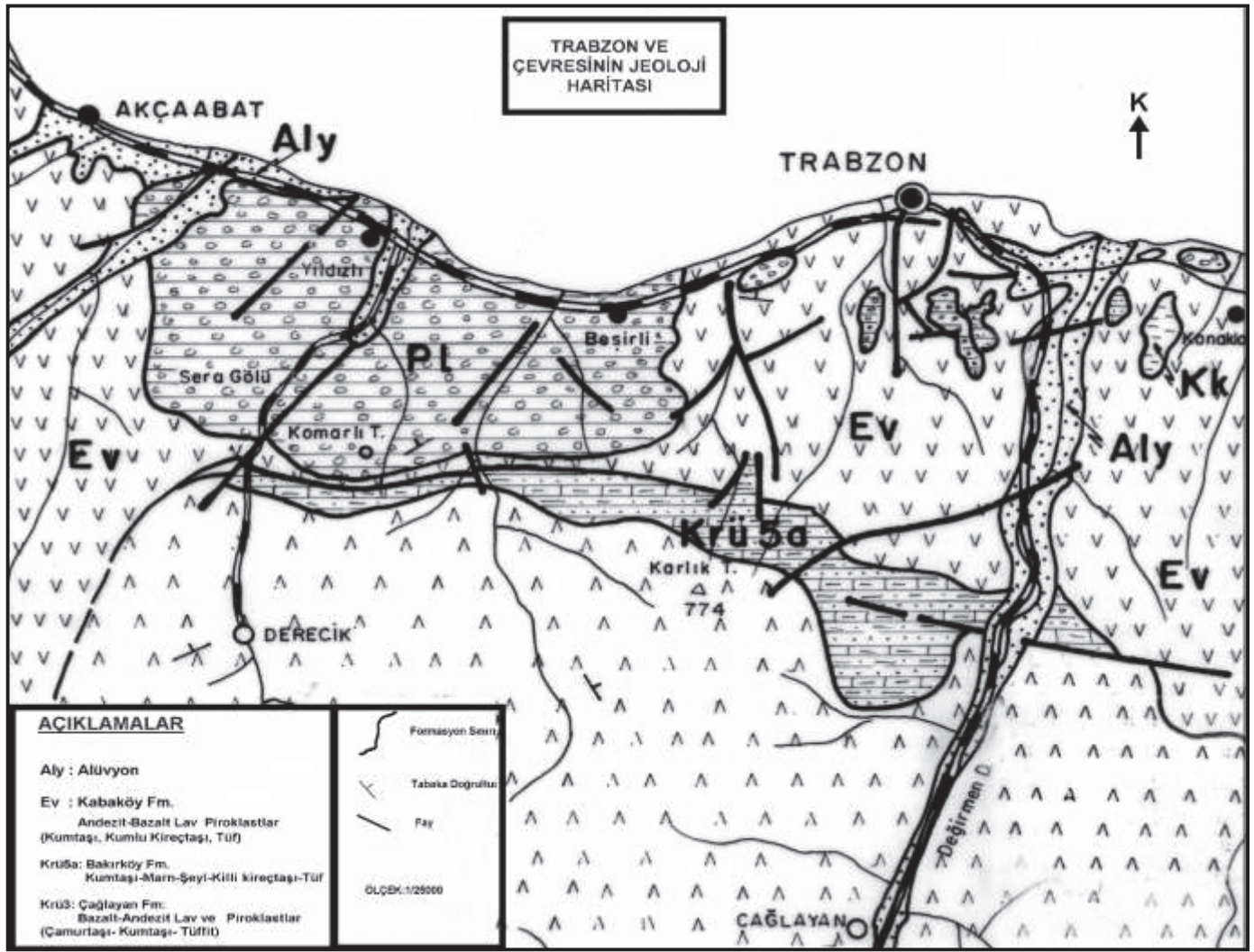
Değirmendere Tüneli Üst kretase yaşlı Çağlayan ve Bakırköy formasyonları ile bu birimi açısız uyumsuzlukla üzerleyen Kabaköy formasyonu (Ev) içinde açılacaktır. Tünel güzergahının yer aldığı kesimde, Km:2+240-2+830, Km:3+075-3+190 ve Km:3+320-3+400 arasında Pliyo-Kuvaterner Ayrılmamış Birimler (Plk) örtü halinde gözlemlenmektedir. Değirmendere Tüneli Kabaköy Formasyonunu oluşturan Aglomera (Ev) içinde açılacaktır. Çalışma alanının geliştirilmiş jeoloji haritası Şekil 2’de sunulmuştur.

Kabaköy Formasyonu (Ev): İnceleme alanının kuzey bölümünde; Trabzon yöresi, Vakfıkebir, Beşikdüzü güneyi, Yomra ve Araklı, civarında yüzeyleyen bu birim, kumtaşı-kumlu kireçtaşı ve marn ara seviyeleri içeren gri renkli andezit, bazalt, lav ve piroklastlarından oluşmuştur.

Özellikle lav ve breşler çatlaklı olup çatlak açıklıkları 0,5-20mm arasında değişmektedir. Çatlaklar yer yer dolgusuz, bazen de kil ve kalsit dolguludur. Egemen çatlak doğrultuları: K 20-40 D ve K 10-25 B, eğimleri ise; 30-40° ile 60-70° arasında değişmektedir. Formasyonun hafriyatı genelde zor ve orta zordur. Fiziksel ayrışmanın etkili olduğu bölümlerde ise kolaydır.

Formasyon üzerinde, Trabzon il merkezi güneyi ve Güney Doğusunda, yer yer aktif ve potansiyel heyelanlar izlenmektedir. Toprak kalınlığı genellikle 20-90 cm arasında olup, yer yer 1 m’den fazladır. Akifer özelliği yok denecek kadar az olan formasyon bulundurduğu az miktardaki, yer altı suyunu, üst kotlarda küçük kaynaklar şeklinde boşaltmaktadır.

Trabzon-Erzurum (Trabzon-Gümüşhane Arası) Devlet Yolu İşİ Bünyesinde Yapılan Km: 0+000 – G 4+293,74 i 3+030,27 arasında Değirmendere Tüneli (1+869-3+750 Sağ Tüp, L=1881.00 m ve 1+830-3+690 Sol Tüp, L=1860.00 m) için yapılan sondaj çalışmaları ışığında, söz konusu sondaj lokasyonlarından alınan örnekler üzerinde yapılan laboratuvar çalışmalarında elde edilen jeoteknik değerler aşağıdaki aralıklar içindedir (Çizelge 1). Çizelge 1’de görüldüğü üzere, tünel güzergahında yapılan sondaj çalışmaları neticesinde, kaya kütlesi



Şekil 2. Çalışma alanının genelleştirilmiş jeoloji haritası

özellikleri bakımından farklı sınıflar içerisinde yer alan kaya birimlerinden oluştuğu tespit edilmiştir (Anon, 2015a).

Çizelge 1. Tünel güzergâhındaki birimlerin jeoteknik özellikleri (Anon, 2015b)

Parametre	Değeri	Sınıfı
RQD (%)	0-100	Çok zayıf, zayıf, orta, iyi ve çok iyi
Birim Hacim Ağırlık (gr/cm^3)	2.11– 2.41	-
Serbest Basınç Dayanımı (σ_c), Mpa	3.73 – 52.54	Çok zayıf, zayıf ve orta
Elastisite Modülü (Em), Gpa	1.567 – 21.569	Çok zayıf, zayıf ve orta

3 PATLATMA TASARIMI

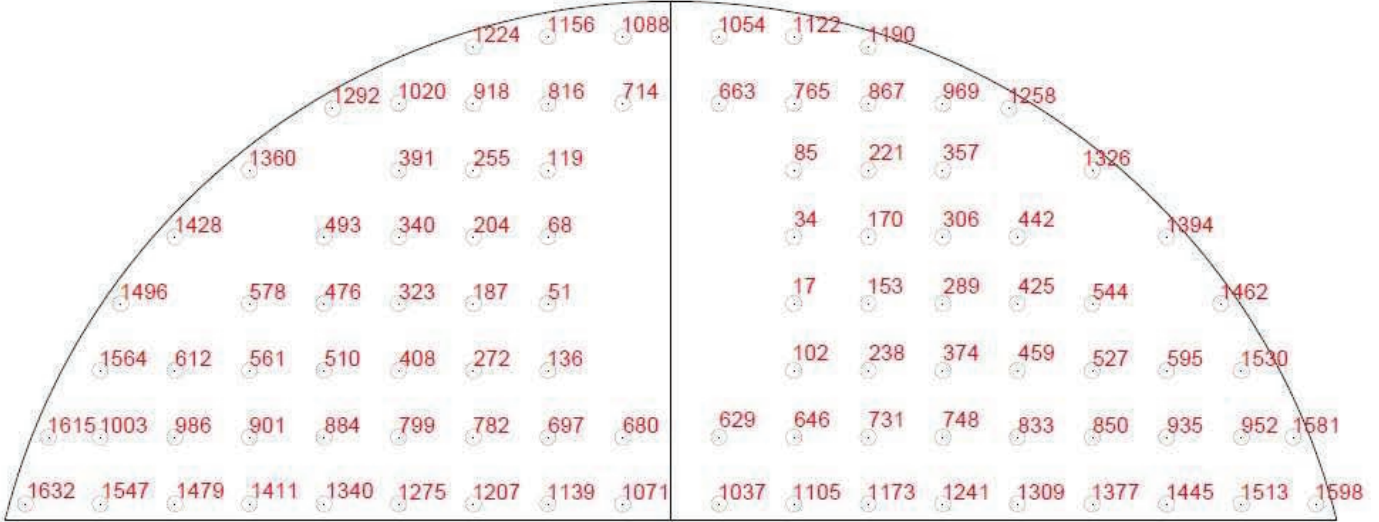
Fernas İnşaat A.Ş.'nin yüklenicisi bulunduğu “Trabzon-Erzurum (Trabzon-Gümüşhane Arası) Devlet Yolu İşi Bünyesinde Yapılan Değirmendere Tüneli Yapım İşi” kapsamında yapılması planlanan patlatma operasyonlarının ilk aşamasında, devlet yolu güzergahı ve çevresinde bulunan risk unsurları tespit edilmiştir. Sonra, proje süresince karşılaşılan jeolojik formasyona ait karakteristik özelliklerin de göz önünde bulundurulduğu risk analizi yapılmıştır (Özer vd., 2020).

Patlatılacak kayanın kütle özelliklerine bağlı olarak bir atımda delinen delik sayısı 85 adet ile 105 arasında değişmiştir. Delik çapı 45mm, delik boyu ise 2 metre uzunluğundadır. Her deliğe,

38 mm çapında ve 500 gr ağırlığında olan 3 adet kapsüle duyarlı emülsiyon patlayıcı şarj edilmiştir.

Tünel kazısında uygulanan delik paterni ve gecikmelere ait dizayn görünümü Şekil 3'te verilmiştir.

Devlet yolu güzergahı boyunca birçok risk unsurunun bulunması ve bu risk unsurları üzerindeki sorumluluk bilinciyle, elektriksiz ateşleme sistemlerinde söz konusu olan gecikme süresindeki sapma miktarının beraberinde getireceği sorunlar göz önünde bulundurularak patlatmalarda elektronik kapsüllerin kullanımına karar verilmiştir. Her deliğin ayrı gecikme aralıklarında patlatılması amaçlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 3. Patlatma operasyonlarında kullanılan gecikme dizaynı



Şekil 4. Elektronik kapsüllerin ayna boyunca hat üzerindeki görünümü

4 TİTREŞİM VE HAVA ŞOKU ÖLÇÜMLERİ

Değirmendere Tünelinde gerçekleştirilmekte olan patlatmalı kazı çalışmalarından kaynaklanan titreşimlerin ve hava şokunun hasar riski açısından değerlendirilmesi amacıyla, Değirmendere Tüneli Sağ Tüpte yapılan atımlar izlenmiş ve bu atımlarda titreşim ve hava şoku ölçümü yapılmıştır. Çalışma kapsamında; titreşim ve hava şoku ölçümü Instantel Minimate Plus Model titreşim ölçer cihazları tarafından ölçülmüştür. Titreşim ve hava şoku ölçüm cihazları, söz konusu çıkış tüneli güzergâhı üzerinde ve portal çıkışında belirlenen ölçüm istasyonlarına yerleştirilmiştir. Atım noktaları ile yer sarsıntısı ölçüm istasyonları arasındaki mesafe ise topoğrafik cihazlar kullanılarak belirlenmiştir.

Atımlarda kaydedilen parçacık hızı bileşenleri ve frekans değerleri, bu çalışmada söz konusu olan Değirmendere Tüneli Sağ Tüpte yapılan atımlar süresince yürürlükte olan Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'nde belirtilen Maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda patlama nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapının dışında yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

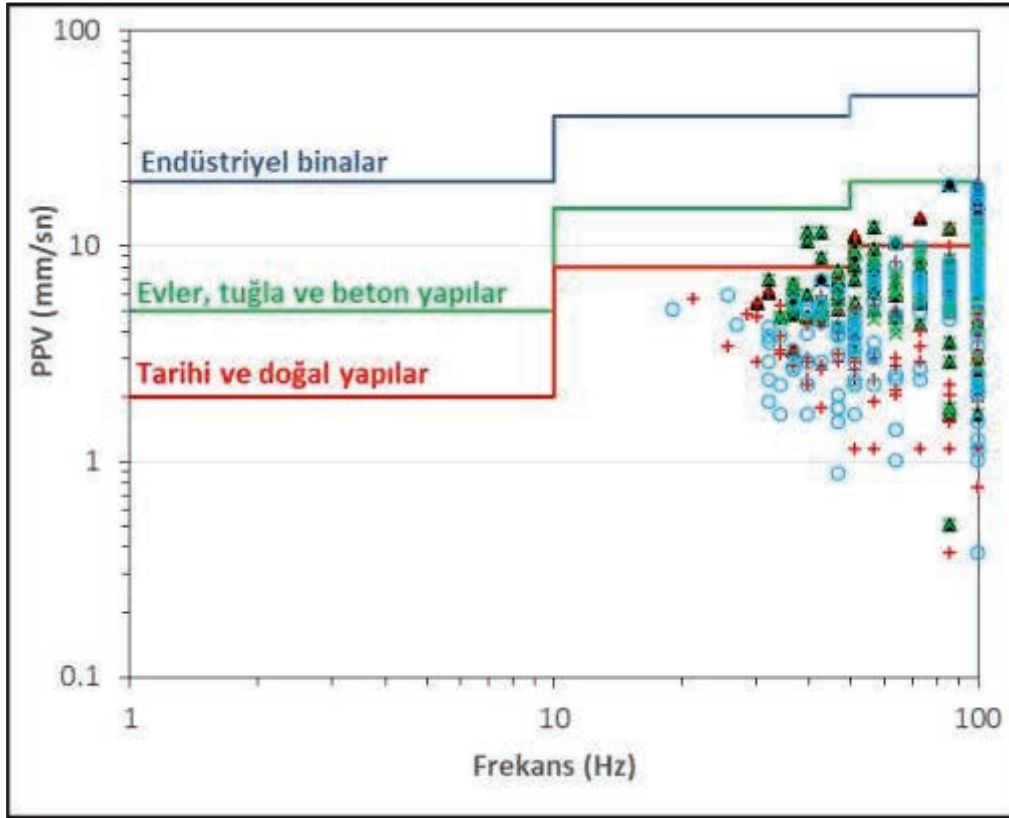
Çizelge 2. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2022) EK:I, Tablo-3: Maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda patlama nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapının dışında yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri

Yapı Tipi		Binaların Temelinde En Yüksek Titreşim Hızı (mm/s) (frekansa göre, f=Hz)			Tüm frekanslar için en üst katın döşemesinde (tabanında)
		f=1-10	f=10-50	f=50-100	
1	Endüstriyel binalar	20	40	50	40
2	Evler, tuğla ve beton gibi dayanıklı yapılar	5	15	20	15
3	Titreşime duyarlı olup 1. ve 2. Maddenin dışında kalan binalar, tarihi ve doğal yapılar	2	8	10	8

5 ÖLÇÜM SONUÇLARININ HASAR RİSKİ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışma kapsamında, söz konusu güzergâhta Değirmendere Tüneli aynası kazısında 133 adet atım yapılmış ve bu atımlarda 133 adet olay kaydedilmiştir. Kaydedilen olayların, çevredeki yapılara etki derecelerini tahmin ve mukayese etmek amacıyla; parçacık hızı bileşenleri oluşum frekansları da dikkate alınarak, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'nin 25/a maddesine göre risk değerlendirmesi yapılmıştır (Özer vd., 2022).

Araştırma kapsamında; Şekil 5'te söz konusu tünelde yapılan atımlarda istasyonlarda ölçülen parçacık hızı bileşenleri (Maksimum Parçacık hızı: PPV, Enine Parçacık hızı: PVT, Düşey Parçacık hızı: PVV ve Boyuna Parçacık hızı: PVL) ve frekans değerlerinin Çevre, ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'nin 25/a maddesinde verilen limitler kullanılarak çizilen grafik üzerindeki ilişkileri sunulmuştur.



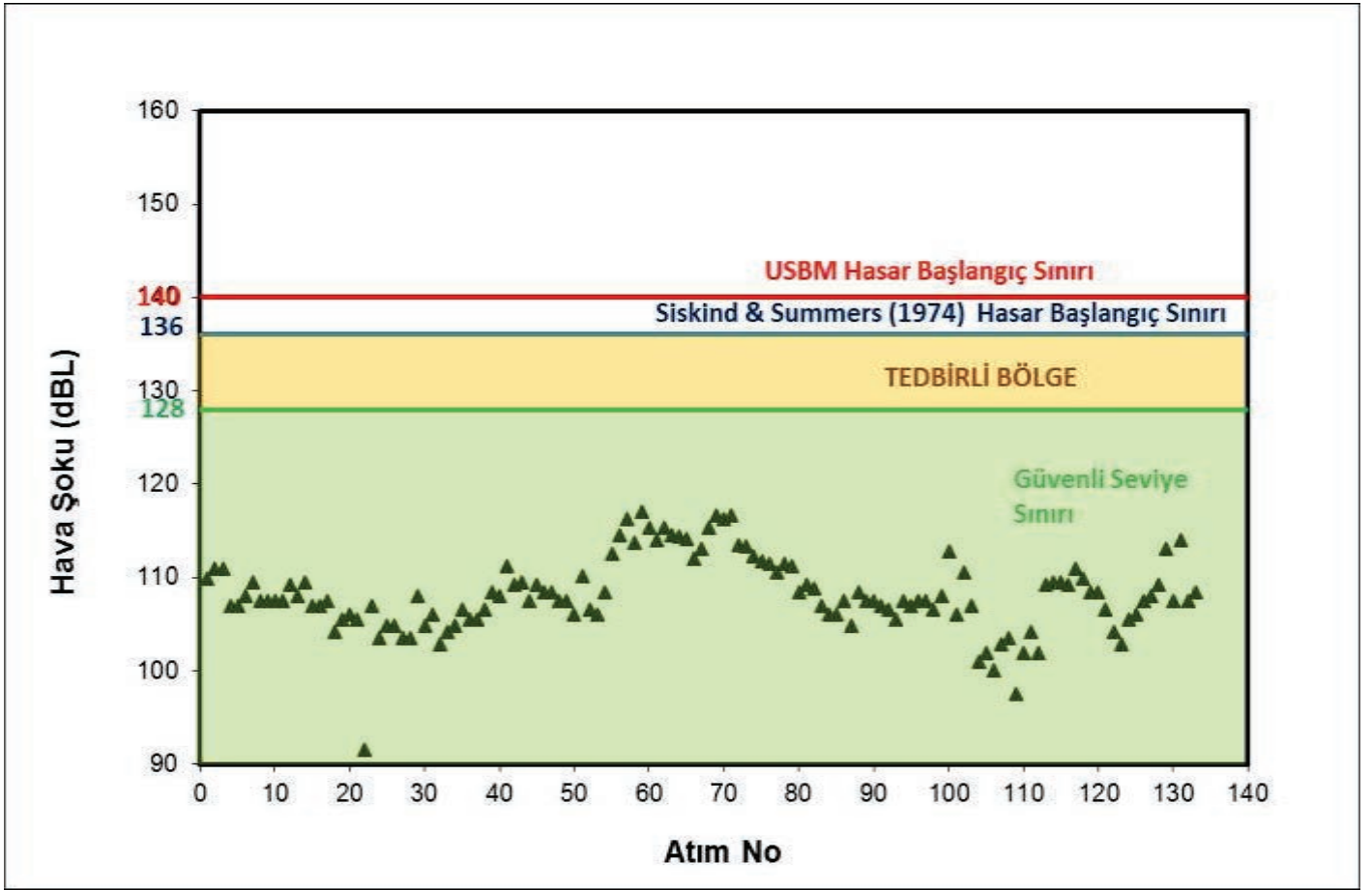
Şekil 5. Atımlarında kaydedilen parçacık hızları ve frekansların T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'ne göre yorumu

Şekil 5'te görüleceği üzere, çalışma esnasında Değirmendere Tünelinde yapılan tüm atımlarda kaydedilen titreşimlerin, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği normuna göre hasar başlangıç sınırının altında olduğu görülmüştür. Dolayısı ile çalışma esnasında Değirmendere Tüneli Sağ Tüpte yapılan atımların, çevre yerleşim birimlerindeki yapılarda ve binalarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.

Söz konusu Değirmendere Tüneli aynalarındaki yapılan örnek atımlardaki titreşim ölçer cihazları tarafından kaydedilen hava şoku değerleri ve çeşitli normlara (Siskind ve Summers, 1974; Siskind vd., 1980) göre değerlendirilmesi Şekil 6'da gösterilmiştir.

Çalışma esnasında yapılan atımlarda kaydedilen tüm hava şoku değerlerinin USBM'in sınır hava şoku değerinin altında kaydedilmesinden ötürü sahada yapılan tüm patlatmaların hava şoku açısından çevre yerleşim birimlerinde ve binalarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.

Şekil 7'de ise elektronik kapsülün kullanıldığı bir atımda kaydedilen bir olaya ait rapor sunulmuştur.



Şekil 6. Atımlarında kaydedilen hava şoku değerlerinin değerlendirilmesi



Event Report

Date/Time Vert at 09:30:19 September 2, 2022
 Trigger Source Geo: 0.510 mm/s
 Range Geo: 254.0 mm/s
 Record Time 2.0 sec at 1024 sps

Serial Number BE12923 V 10.72-8.17 MiniMate Plus
 Battery Level 6.3 Volts
 Unit Calibration January 5, 2015 by InstanTEL
 File Name N923JNQI.EJ0

Notes

Location:
 Client:
 User Name: Umit Ozer & Abdulkadir Karadogan
 General:

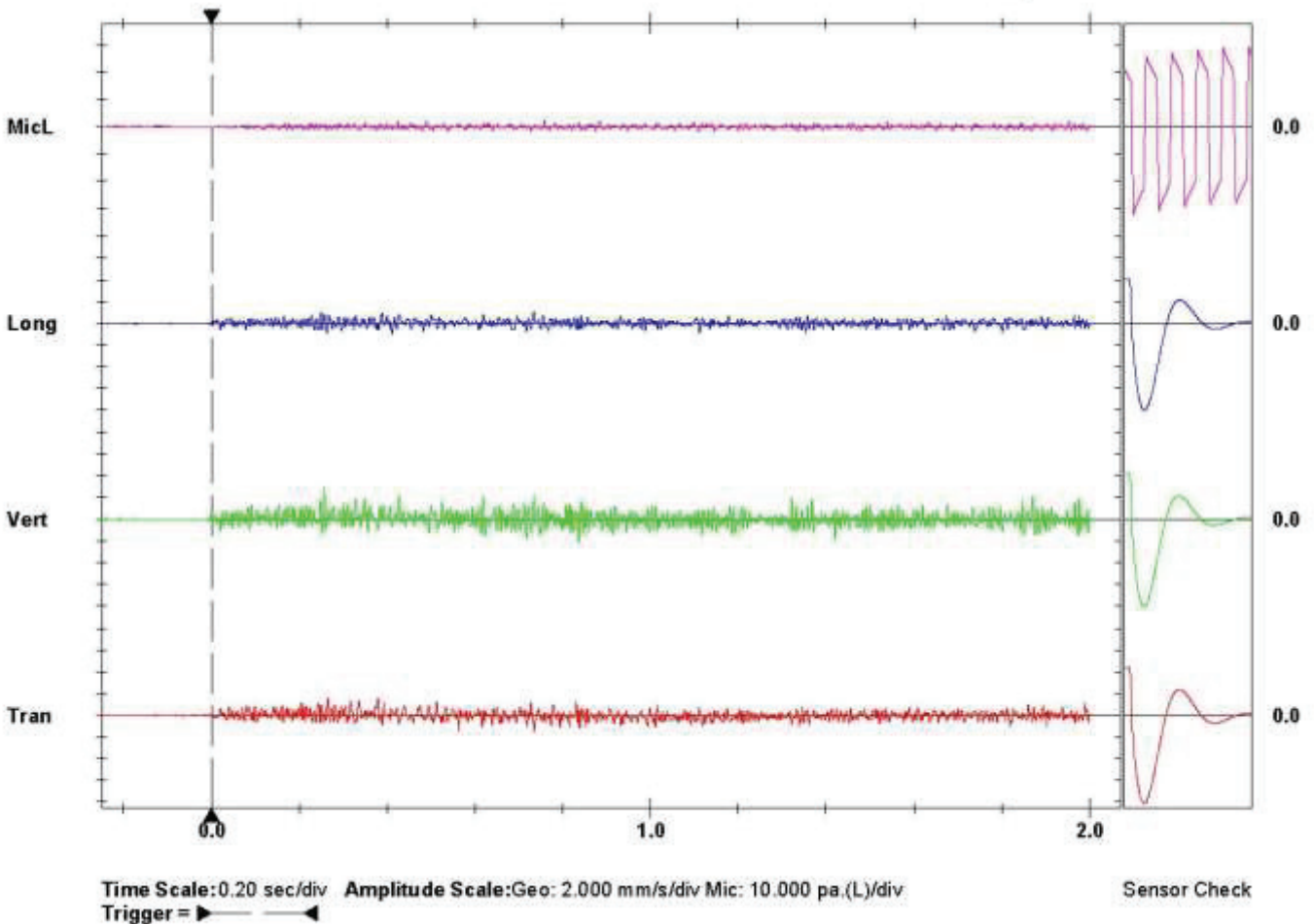
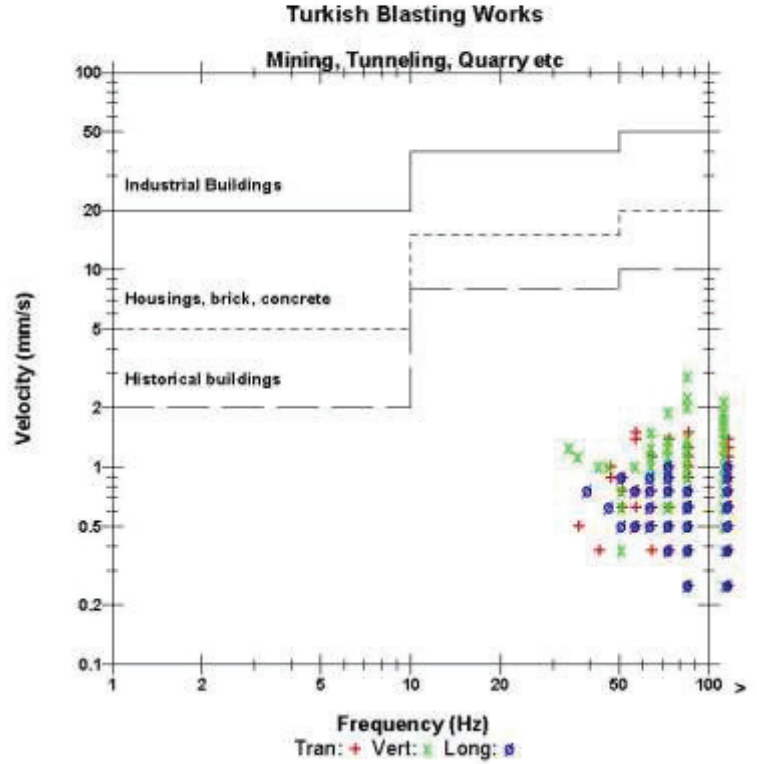
Extended Notes

Umit Ozer&Abdulkadir Karadogan

Microphone Linear Weighting
 PSPL 101.0 dB(L) at 0.758 sec
 ZC Freq 85 Hz
 Channel Test Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 511 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.524	2.921	1.016	mm/s
ZC Freq	85	85	>100	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.265	0.257	0.249	sec
Peak Acceleration	0.106	0.186	0.080	g
Peak Displacement	0.004	0.005	0.003	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.5	7.5	7.3	Hz
Overswing Ratio	3.4	3.8	3.9	

Peak Vector Sum 2.976 mm/s at 0.257 sec



Şekil 7. Örnek bir patlatma sonucu titreşim raporu

6 SONUÇLAR

Fernas İnşaat A.Ş.'nin yüklenicisi bulunduğu "Trabzon-Erzurum (Trabzon-Gümüşhane Arası) Devlet Yolu İşi Bünyesinde Yapılan Değirmendere Tüneli Yapım İşi" kapsamında, çalışma sahasının çevresi ve bölgede bulunan tüm canlılar üzerinde hissedilen sorumluluk bilinciyle, patlatmaların meydana getirdiği yer sarsıntıları ve diğer çevresel etkileri minimize etmek amacıyla elektronik kapsül kullanılmış, bu sayede elde edilen gecikme esnekliği ve uygulama kolaylığı ile yer sarsıntıları çevresel etki bakımından kontrol altına alınmıştır.

Çalışma süresince yapılan patlatmalar ve alınan ölçümler gösteriyor ki böylesine önem arz eden hassas bir projede uygulanan elektronik kapsülün doğru parametreler ile birlikte projenin sorunsuz bir şekilde devam etmesi sağlanmaktadır.

7 KAYNAKLAR

Anon, 2015a. Sondaj Logları, Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.

Anon, 2015b. Zemin ve Kaya Mekaniği Deneysel Sonuçları Raporu", Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.

Özer Ü, Karadoğan A, Özyurt MC, Sertabipoğlu Z, 2022. Trabzon-Erzurum Devlet Yolu İşi Bünyesinde yapılan Değirmendere Tüneli Yapım İşi Kapsamında Patlatmalı Kazılardan Kaynaklanan Titreşim ve Hava Şokunun Ölçümü ve Değerlendirilmesi, İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Döner Sermaye Projesi.

Özer Ü, Karadoğan A, Özyurt MC, Şahinoğlu ÜK, Sertabipoğlu Z, 2020. Trabzon-Erzurum (Trabzon-Gümüşhane Arası) Devlet Yolu İşi Bünyesinde Maçka Yolu (Değirmendere KöprülÜ Kavşağı) Ayrımı-Kanuni Bulvarı Bağlantı Yolu Şevleri İşi Kapsamında Risk Analizine Dayalı Patlatma Ön Tasarımı, İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Döner Sermaye Projesi.

Siskind, D.E., Summers, C.R., 1974. Blast Noise Standards and Instrumentation, *Bureau of Mines Environmental Research Program, Technical Progress Report 78*, U.S. Department of the Interior, (May 1974).

Siskind, D E, Stachura, V J, Stagg, M S, Kopp, J W., 1980. Structure response and damage produced by airblast from surface mining, United States: N. p.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022. Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği, Resmi Gazete, Sayı: 32029.

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu Sancaktepe Şehir Hastanesi İstasyonu İnşaatında Çevreye Duyarlı Patlatma Uygulamaları

Environmentally Sensitive Blasting Applications in Construction of Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Sancaktepe City Hospital Station

Z. Sertabipoğlu A. Karadoğan, Ü. Özer, M. C. Özyurt, Ü. Kalaycı Şahinoğlu
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, Büyükçekmece-İstanbul

Y. Kahraman, G. Kalaycı, E. Çelik
Doğuş İnşaat ve Tic. A. Ş., İstanbul

ÖZET: Bu çalışmada, Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu Projesi kapsamında Sancaktepe Şehir Hastanesi İstasyonu bölgesindeki açık kazılarda yapılması planlanan patlatma operasyonları açıklanmıştır. Kazı alanının şehir merkezinde olmasından dolayı çevrede bulunan pek çok yapının yanı sıra, kazı sınırında bulunan fore kazıklar ve kazı alanı içinde Tünel Açma Makinesi (TBM) ile açılan tünel hattı gibi birçok risk unsurunun olması sebebiyle patlatma kaynaklı çevresel etkilerin kontrol altında tutulması ihtiyacı doğmuştur. Bu kapsamda, ilk önce, patlatma sonucunda meydana gelecek titreşime dayalı risk analizi yapılmış, ve bu risk analizine dayalı patlatma ön tasarım modelleri önerilmiştir. Yapılan ön tasarımlar, sahada deneme atımları ile test edilmiştir. Deneme atımları ile kaya davranışı incelenmiş ve patlatma kaynaklı titreşim ve hava şoku değerleri kaydedilmiştir. Titreşim verileri kullanılarak sahaya özgün titreşim yayılım denklemi ortaya konmuştur. Özgün titreşim yayılım denklemine ve kaya davranışına göre, patlatma ön tasarımları geliştirilerek uygulamada kullanılabilecek hale getirilmiştir. Bu sayede, kazı süresince patlatmanın çevresel etkilerinin minimize edildiği ve söz konusu risk unsurlarında meydana gelecek yapısal hasarın önüne geçildiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

ABSTRACT: In this study, blasting operations planned to be carried out in open excavations in the Sancaktepe City Hospital Station within the scope of the Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Subway Project are explained. Since the site is in the city center, there are many risk factors, such as the bored piles at the excavation border and the tunnel line opened with the Tunnel Boring Machine (TBM) in the excavation area, as well as many structures in the surrounding, so a necessity to keep blast-induced environmental impacts has arisen. . In this context, firstly, a risk analysis based on blast-induced vibration, and blasting preliminary design models based on this risk analysis were proposed. The preliminary designs were tested in the field with trial shots. In these shots, rock behaviour was investigated, and blast-induced vibration and air shock values were recorded. Using the vibration data, a site-specific vibration propagation equation has been established. According to the vibration propagation equation and rock behaviour, blasting preliminary designs were modified and made usable in practice. This way, a study was carried out in which the blast-induced environmental effects were minimized, and the structural damage to the risk factors in question was prevented during the excavation.

1 GİRİŞ

Metropol şehirlerin gelişmesiyle birlikte artan nüfusa paralel olarak konut, ulaşım ve alt yapı ihtiyacının arttığı günümüzde, bu ihtiyacı karşılamayı yönelik yapılan kazılarda karşılaşılan

kaya birimlerinin jeolojik yapısı gereği mekanik kazının yapılamadığı yerlerde patlatmalı kazı kaçınılmaz hale gelmiştir (Öz, 2015; Özer vd., 2018).

Patlatmalı kazı sert ve sağlam kaya kütlelerinin kazısı için mekanik kazıya göre daha verimli, zaman ve maliyet açısından da daha tasarrufludur (Öz, 2015). Fakat patlatma neticesinde hava şoku, gürültü, titreşim, kaya fırlaması, psikolojik rahatsızlıklar gibi bir takım çevresel etkiler ortaya çıkmaktadır (Küçük ve Aksoy, 2017). Özellikle yerleşimin yoğun olduğu şehir merkezlerinde bulunan patlatmalı kazılarda, risk noktalarının çok olması, patlatmanın çevresel çıktılarının uygun yöntemlerle değerlendirilerek minimize edilmesinin önemini arttırmaktadır (Özer vd. 2018; Kalaycı vd., 2013, Özer vd., 2016). Çevresel duyarlılık dikkate alındığında, patlatmalı kazı çevresinde belirli bir mesafede risk unsuru olabilecek bir yerleşim biriminin ya da tesisin, patlatma sonucunda oluşacak yersarsıntısı, taş savrulması ve hava şoku gibi sonuçlardan etkilenmemesi için, patlatma tasarımının en iyi şekilde yapılmış olması gerekmektedir (Günay, 2015; Khandelwal ve Singh, 2007; Karadoğan vd, 2012; Özer vd. 2017).

Patlatma tasarımında titreşim karakteristiği belirleyici bir faktördür ve hasar oluşumunda, titreşimlerin yayılmış olduğu malzemenin yapısı en önemli rolü oynar. Her malzeme aynı frekans ve titreşim büyüklüğünde aynı hasarı almaz. Bunun nedeni malzemelerin içyapısı, yani titreşimlerin yayılma ortamıdır (Dowding, 1985; Karadoğan, 2008; Özer vd. 2017)

Bu çalışmada, Doğuş – Yapı Merkezi – Özaltın Adi Ortaklığı'nın yüklenicisi bulunduğu Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu Projesi kapsamında Sancaktepe Şehir Hastanesi İstasyonu bölgesindeki açık kazılarda yapılması planlanan patlatma operasyonları açıklanmıştır. Kazı faaliyetlerinin sürdürüldüğü alanın şehir merkezinde olmasından dolayı çevrede bulunan pek çok yapının yanı sıra, kazı sınırında bulunan fore kazıklar ve kazı alanı içinde Tünel Açma Makinesi (TBM) ile açılan tünel hattı gibi birçok risk unsurunun olması sebebiyle patlatma kaynaklı çevresel etkilerin kontrol altında tutulması ihtiyacı doğmuştur.

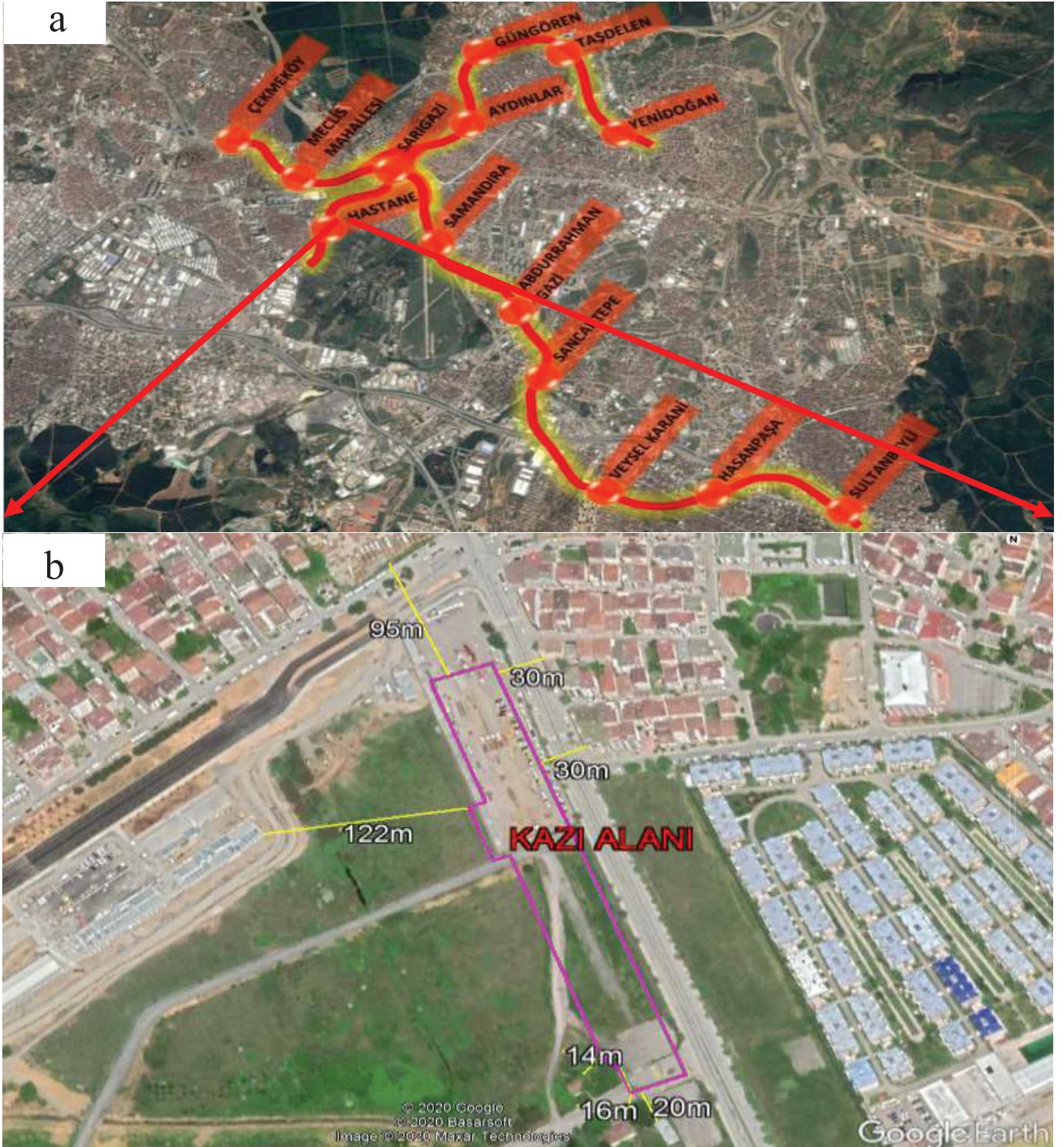
Çalışma kapsamında, söz konusu patlatmalı istasyon kazısının, sahasının çevresinde bulunan yapılarda ve saha sınırındaki fore kazıklara 6 m mesafeye kadar olan bölgeler kritik bölge olarak kabul edilmiş ve bu sınırdan daha yakın bölgelerde hasarlara neden olmamak adına patlatma yapılmaması gerektiği düşünülmüş ve buna göre patlatma ön tasarım modelleri önerilmiştir. Yapılan patlatma ön tasarımları, sahada yapılan atımlar ile test edilerek kaya davranışı incelenmiş ve patlatma kaynaklı titreşim ve hava şoku değerleri ölçülmüştür. Test atımlarının sonuçlarından hareketle, kazı sahasına özgü maksimum parçacık hızı (PPV) tahmin denklemi elde edilmiştir. Elde edilen tahmin denklemi kullanılarak, yeni değerlendirme ve tasarımlar yapılarak saha içerisinde ve kazı sınırında bulunan fore kazıklara 4 m mesafeye kadar patlatma yapılabileceği görülmüş ve kritik bölge sınırı 6 m den 4 m ye çekilmiştir. Ayrıca, saha içerisindeki TBM ile açılacak tünellere yakın bölgeler için de patlatma tasarımları yapılmış ve uygulanmıştır. TBM ile açılacak tünellere hasar vermemek amacıyla, TBM yakınında yapılan patlatmalarda elektronik kapsüller kullanılarak gecikme süresindeki olası sapmanın önüne geçilmesi amaçlanmış, böylece gecikme başına şarjın daha da düşürülebileceği patlatmalar planlanmıştır. Yapılan patlatma ön tasarımları, sahada yapılan atımlar ile test edilerek patlatma kaynaklı titreşim ve hava şoku değerleri ölçülmüştür. Ölçülen frekans ve maksimum parçacık hızı (PPV) değerleri, çalışmaların yapıldığı tarihlerde yürürlükte olan T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği”ne göre değerlendirilerek, patlatma kaynaklı titreşimlerin kazı çevresinde bulunan yapılar üzerinde olumsuz bir etkisi olup olmadığı belirlenmiştir.

Böylelikle kazı sahasına ait parçacık hızı (PPV) tahmin denklemleri elde edilmiş ve bu ilişkiler kullanılarak sahanın kazı sınırında çok daha kritik mesafelerde bulunan fore kazıklara ve saha içerisindeki TBM ile açılacak tünellere yakın yapılacak patlatmalar için özgün patlatma tasarımları uygulanarak patlatma kaynaklı titreşimlerin ve hava şokunun kontrol altında tutulması hedeflenmiştir.

2 ÇALIŞMA SAHASI VE JEOLojİSİ

2.1 Çalışma Sahası

Çekmeköy- Sancaktepe - Sultanbeyli Metro Hattı Projesi İstanbul İli Çekmeköy, Sancaktepe ve Sultanbeyli İlçeleri sınırları içindedir. Proje güzergahı Meclis Mahallesi İstasyonundan başlayarak, sırasıyla Sarıgazi İstasyonu, Sancaktepe Şehir Hastanesi İstasyonu, Sancaktepe İstasyonu, Samandıra Merkez İstasyonu, Veysel Karani İstasyonu, Hasanpaşa İstasyonundan gelecek Sultanbeyli İstasyonunda son bulmaktadır. Yaklaşık uzunluğu 11 kilometredir. Güzergah boyunca, çift tüp ana hat tünelleri Hat 1 ve Hat 2 şeklinde devam etmektedir. Güzergahta hatlar arası mesafeler 10 m ile 33 m arası değişmektedir (İBB, 2023). Çalışma



Şekil 1. (a) Çekmeköy- Sancaktepe - Sultanbeyli Metro Hattı proje güzergahı (Alpkökin, 2019) ve (b) İstasyon kazısı inceleme alanı

sahası Sancaktepe İlçesinde bulunmakta olan Sancaktepe Şehir Hastanesi İstasyonudur. Metro Hattı Proje güzergahı Şekil 1(a)'da ve istasyon inceleme alanı ise Şekil 1(b)'de gösterilmiştir.

“Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli (CSS) Metro Projesi” kapsamında Sancaktepe Hastane İstasyonu kazısı toplam 26 adet patlatmalı açık saha kazısıyla yapılmıştır. Kazı sahasının doğusunda yaklaşık 30 m, batısında yaklaşık 122 m, güneyinde yaklaşık 14-20 m ve kuzeyinde ise yaklaşık 95 m mesafede risk unsurları bulunmaktadır (Şekil 1(b)). Ayrıca kazı sahası sınırı boyunca fore kazıklar ve kazı alanı içinde TBM ile açılan tünel hattı bulunmaktadır.

2.2 Sahanın Jeolojisi

Çalışma sahasının üst kotlarında yüzeye doğru Sultanbeyli formasyonu, Dudullu üyesine (Tsd) ait açık kahverengi, krem rengi, yumuşak, yüksek plastisiteli, daha çok üst düzeylerinde kireçli, az siltli tekdüze kilden oluşur. Seyrek olarak ince kum arakatlıdır. Yukarı Dudullu'da bazı temel kazılarında killer içerisinde, boyları 5-10cm'ye varan, yuvarlanmış kuvarsit çakıllı mercekler izlenmiştir. Çalışma sahasının alt kotlarında ise Pelitli formasyonuna (SDp) ait gri-koyu gri renkli sağlam-orta sağlam kireçtaşı birimi bulunmaktadır (ESAY, 2020).

2.3 Kayanın Patlatılabilirliği

Çalışma sahasında, patlatmalı kazı yapılacak birim olan kireçtaşı için tek eksenli basınç değerleri 25.70–54.00 MPa (ortalama 36.5 MPa) olup genelde orta sert- sert sınıfında oldukları, söylenebilir. Formasyonun sert ve sağlam yapısı sebebiyle, teknik ve ekonomik nedenlerden dolayı istasyon kazısının kontrollü patlatma tekniği ile yapılması gerekmektedir (ESAY, 2020; Özer vd.,2020).

3 MAKSİMUM PARÇACIK HIZI TAHMİNİ

Patlatma kaynaklı titreşimin büyüklüğünü ifade etmek için en önemli indeks maksimum parçacık hızıdır, PPV ile ifade edilir. PPV, yönetmeliklerde belirtilen maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda patlatma nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapıda yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri aştığında çevreye zarar verebilir. Proje süresince yürürlükte olan Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'nde belirtilen Maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda patlama nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapının dışında yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda patlama nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapının dışında yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri

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

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

*** Bu değerler, 30 Kasım 2022 tarih ve 32029 sayılı Resmi Gazete' de yayınlanan Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği ile beraber değişmiştir.*

Patlatmadan kaynaklanan yer sarsıntılarının önceden tahmin edilmesi, yer sarsıntılarının önlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Birçok kişi ve kuruluş bu amaçla çeşitli araştırmalar yapmış ve ölçekli mesafeye bağlı maksimum parçacık hızı tahmininin en iyisi olduğu sonucuna varmışlardır. Maksimum parçacık hızı tahminine yönelik geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan ampirik ilişki Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$PPV = k (SD)^{-\beta} \quad (1)$$

Burada; PPV maksimum parçacık hızı (mm/sn), SD ölçekli mesafe, k ve β ise saha sabitleridir. Çalışma sahasının sabitleri ise ölçülen maksimum parçacık hızı ve ölçekli mesafe değerlerinin (en az 30 nokta ya da atımla) ilişkilendirilmesi sonucunda belirlenmektedir. Bulunan bu değerler, kontrollü patlatma tasarım ve uygulamalarında, titreşim ölçüm aletinin olmadığı durumlarda; bazı pratik tabloların hazırlanması suretiyle uygulayıcılara büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Ölçekli mesafe (SD), bir defada patlayan veya gecikme başına düşen maksimum patlayıcı madde miktarı (W) ve patlatma noktasına olan mesafe (R) arasındaki ilişki ile hesaplanır (Eşitlik 2).

$$SD = R\sqrt{W} \quad (2)$$

4 RİSK ANALİZİ

Bu çalışma kapsamında, Sancaktepe Hastane istasyonu patlatmalı açık kazısı nedeniyle atım lokasyonlarına yakın mesafelerde yer alan çevredeki yapılarda oluşabilecek hasarlara yönelik risk analizi yapılmıştır. Analizde mümkün olan en uygun parametreler kullanılarak en olumlu durumda oluşabilecek sarsıntı etkilerinin kabul edilebilir olup olmadığı tahkik edilmiştir.

Şekil 1(b)'de kazı alanı çevresindeki riskli yapıların mesafeleri gösterilmektedir. Buna göre kazı sahası çevresinde en yakın yapı 14 m mesafe olup, ayrıca kazı sınırında fore kazıklar bulunmaktadır. Beton yapılar için gerek USBM'in gerekse T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" ne göre öngörülen 19 mm/s'lik parçacık hızı, çalışma sahasında bulunan fore kazıklar için ise 50 mm/sn'lik parçacık hızı değeri eşik hasar limiti olarak alınmış ve değerlendirmeler bu esaslara göre yapılmıştır. Bu kapsamda, kazı sahasındaki hakim jeolojik formasyonlarla benzer özellik gösteren ve söz konusu çalışma alanına yakın bir bölgede yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilen tahmin denklemi, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" hasar limiti göz önünde tutularak kullanılmıştır.

Verilen yaklaşıma göre kazı sahası sınırında bulunan fore kazıklar için eşik hasar limiti olan 50 mm/s ve çeşitli mesafelerde bulunan betonarme yapılar için eşik hasar limiti olan 19 mm/s aşılmaması için kullanılacak gecikme başına en fazla şarj miktarları tahmini Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2'den da anlaşılacağı gibi, fore kazıklara 6 m mesafede kullanılacak gecikme başına en fazla patlayıcı miktarı 3.3 kg, 7 m mesafede 4.5 kg olacaktır. İstasyon kazısı çevresinde, risk oluşturabilecek yapılara 14 m mesafede yapılacak atımlarda kullanılacak gecikme başına en fazla patlayıcı madde miktarı 3.7 kg iken, bu değer 30 m mesafede 16.9 kg, 122 m mesafede 279.2 kg olacaktır. Buradan da anlaşılacağı gibi patlatma geometrisi tasarımlarının mini basamak uygulaması şeklinde mesafenin fonksiyonuna bağlı bir değişken olarak düzenlenmesi gerekmektedir.

Çalışma sahası için Çizelge 2'de denklemi verilen yaklaşım kullanılarak önerilen patlatma tasarım modellerinde hesaplanan gecikme başına kullanılacak en yüksek patlayıcı madde miktarlarının yapılacak patlatmalarda kullanılması durumunda, risk arz eden yapıların mesafelerine göre elde edilecek maksimum parçacık hızları (PPV) Çizelge 3'te verilmiştir.

Hesaplanan tahmini oluşabilecek Maksimum Parçacık Hızı değerleri, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" nin belirlediği eşik hasar limitinden daha düşüktür.

Çizelge 2. İstasyon kazısında mesafenin fonksiyonu olarak gecikme başına kullanılabilir en fazla şarj miktarları

Mesafe (m)	Risk Noktası Adı	Kullanılan Yaklaşım	Çevresel Gürültü Yönetmeliği Eşik Hasar Limiti (mm/sn)	W	
6	Kazı sahası sınırında bulunan fore kazıklar	$PPV = 217.83 \times (R / W^{0.5})^{-1.227}$	50	3.3	
7				4.5	
8				5.8	
9				7.4	
10				9.1	
11				10.5	
15				20.4	
20				36.3	
14	Güney Yönünde En Yakın		19	19	3.7
30	Doğu Yönünde En Yakın Bina				16.9
95	Kuzey Yönünde En Yakın Bina	169.3			
122	Batı Yönünde En Yakın Bina	279.2			

Çizelge 3. Tasarım modelindeki gecikme başına şarj miktarına göre PPV tahmini

Mesafe (R) (m)	Risk Noktası Adı	W(kg)	Maksimum Oluşabilecek Parçacık Hızı (PPV) Tahmini (mm/sn)
6	Kazı sahası sınırında bulunan fore kazıklar	2.5	42.4
7		2.5	35.1
8		2.5	29.8
9		2.5	25.8
10		2.5	22.7
11		10.5	48,6
15		10.5	33.2
20		10.5	23.3
14	Güney Yönünde En Yakın Bina	10.5	36.2
30	Doğu Yönünde En Yakın Bina	15.5	18.0
95	Kuzey Yönünde En Yakın Bina	15.5	4.4
122	Batı Yönünde En Yakın Bina	15.5	3.2

Dolayısıyla, söz konusu saha için önerilen patlatma tasarım modelleri, patlatmalı kazı yapılacak noktanın saha genelinde risk söz konusu olan çevre yerleşim alanlarındaki yapılara olan mesafelerine göre kullanılabilir.

5 PATLATMA ÖN TASARIMI

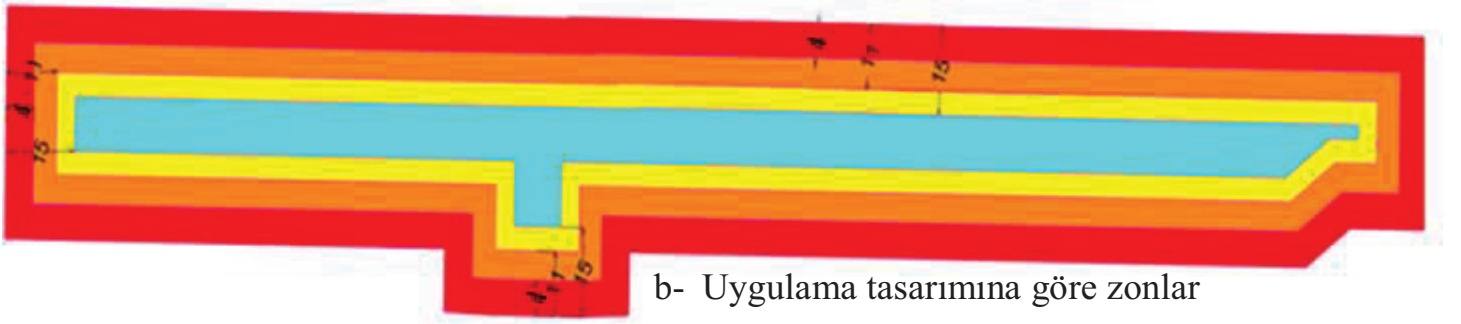
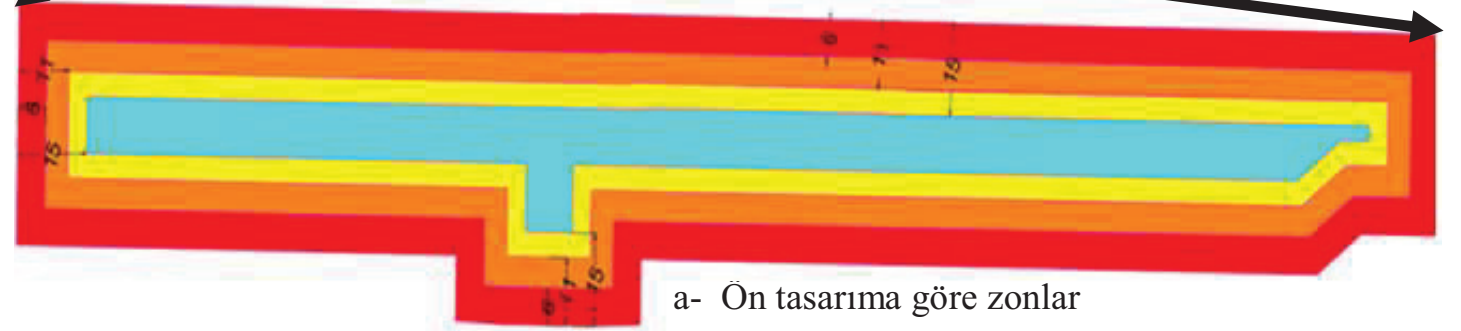
Risk analizine göre, söz konusu sahada üretim patlatmalarında risk unsurları gözetilerek uygulanabilecek üç ayrı patlatma ön tasarım modeli önerilmiş olup detayları Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelge 4'te sunulan tasarımların uygulanacağı bölgeleri gösteren plan haritası ise Şekil 3'de sunulmaktadır. Tasarımlarda kademeli basamak tasarımları kullanılmış ve kullanılan

tüm delikler 89 mm çapındadır. Patlayıcı madde olarak ANFO ve ateşleme elemanı olarak da elektriksiz kapsül sisteminin kullanılması planlanmıştır.

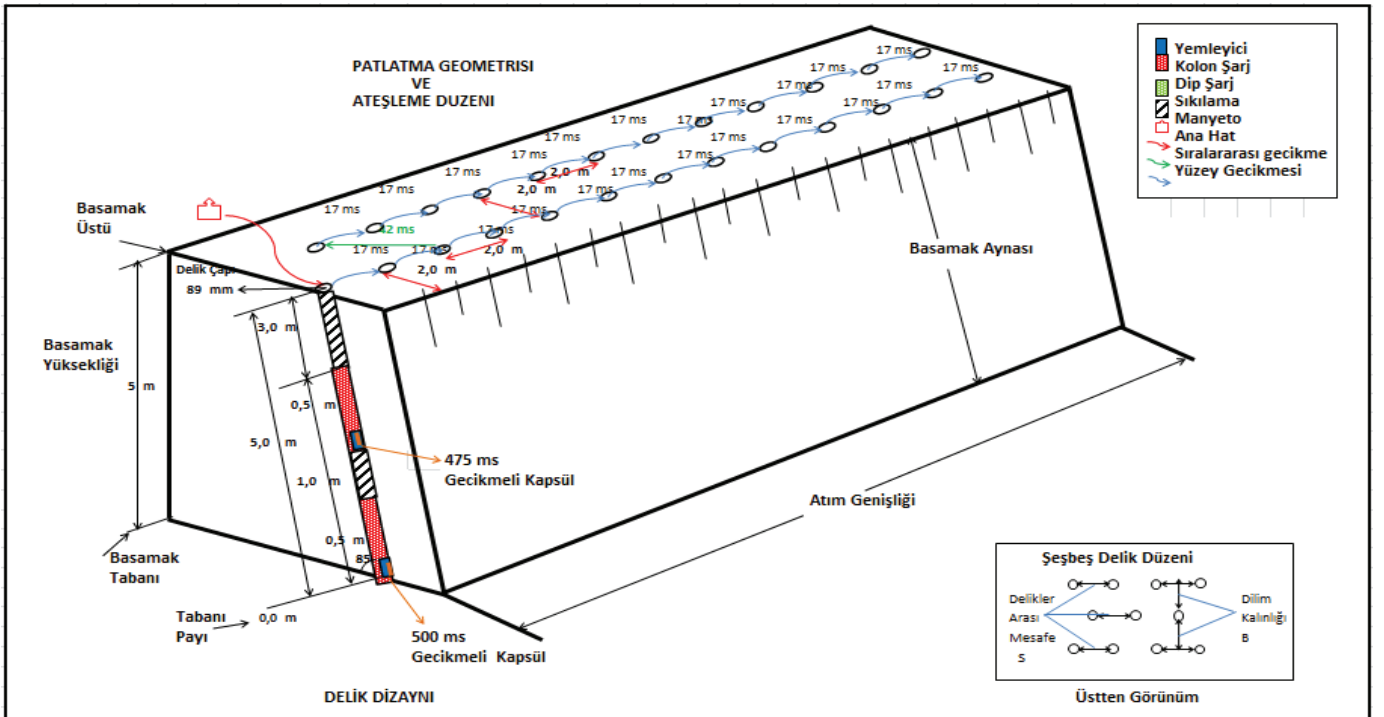
Risk analizi yapılarak elde edilen ve Çizelge 2’de verilen değişik mesafelerde gecikme başına kullanılması gereken en yüksek patlayıcı madde miktarları dikkate alındığında, üretim patlatmaları için Çizelge 4’te önerilen patlatma ön tasarımları söz konusu kazı alanı içerisinde fore kazıklara 6 m mesafeye kadar belirlenen ve kritik bölge olarak adlandırılan bölüme kadar belirlenen bölgelerde yapılabilecek patlatmada kullanılabilir (Şekil 2-a). Şekil 2-a’da belirlenen bölgelerde söz konusu sahada fore kazıklara 6m mesafeye kadar önerilen patlatma tasarım parametrelerinin plan görünümüleri Şekil 3, 4 ve 5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. Saha şartlarına göre önerilen üretim patlatmaları ön tasarım modelleri

	TASARIM 1	TASARIM 2	TASARIM 3
Patlayıcı Madde Türü	ANFO	ANFO	ANFO
Patlayıcı Mad. Yoğunluğu (kg/dm ³)	800	800	800
Delik Eğimi (°)	85	85	85
Şarj Konstarasyonu, I _b (kg/m)	5	5	5
Delik Çapı, (mm)	89	89	89
Basamak Yüksekliği K (m)	5	5	10
Delik Taban Payı, U (m)	-	-	-
Delik Uzunluğu, H (m)	5	5	10
Dilim Kalınlığı, B (m)	2	2	2.5
Delikler Arası Mesafe, S (m)	2	2.5	3
Sıkılama Boyu, h ₀ (m)	3	3	3
Ara Sıkılama Boyu (m)	1	-	1
Yemleme (kg)	0.5	0.5	0.5
1. Kademe Şarj Boyu h ₂ (m)	0.5	2	3
2. Kademe Şarj Boyu (m)	0.5	-	3
Delik Şarj Miktarı Q (kg)	5	10.5	31
Gecikme Başına Maks. Şarj Miktarı (kg)	2.5	10.5	15.5
Özgül Şarj (kg/m ³)	0.25	0.42	0.41
Özgül Delme (m/m ³)	0.26	0.21	0.14
Risk Noktasına En Yakın Mesafe (m)	6-11	>11	>15



Şekil 2. Önerilen tasarımların uygulanacağı bölgeleri gösteren plan haritası (Birim: metre)



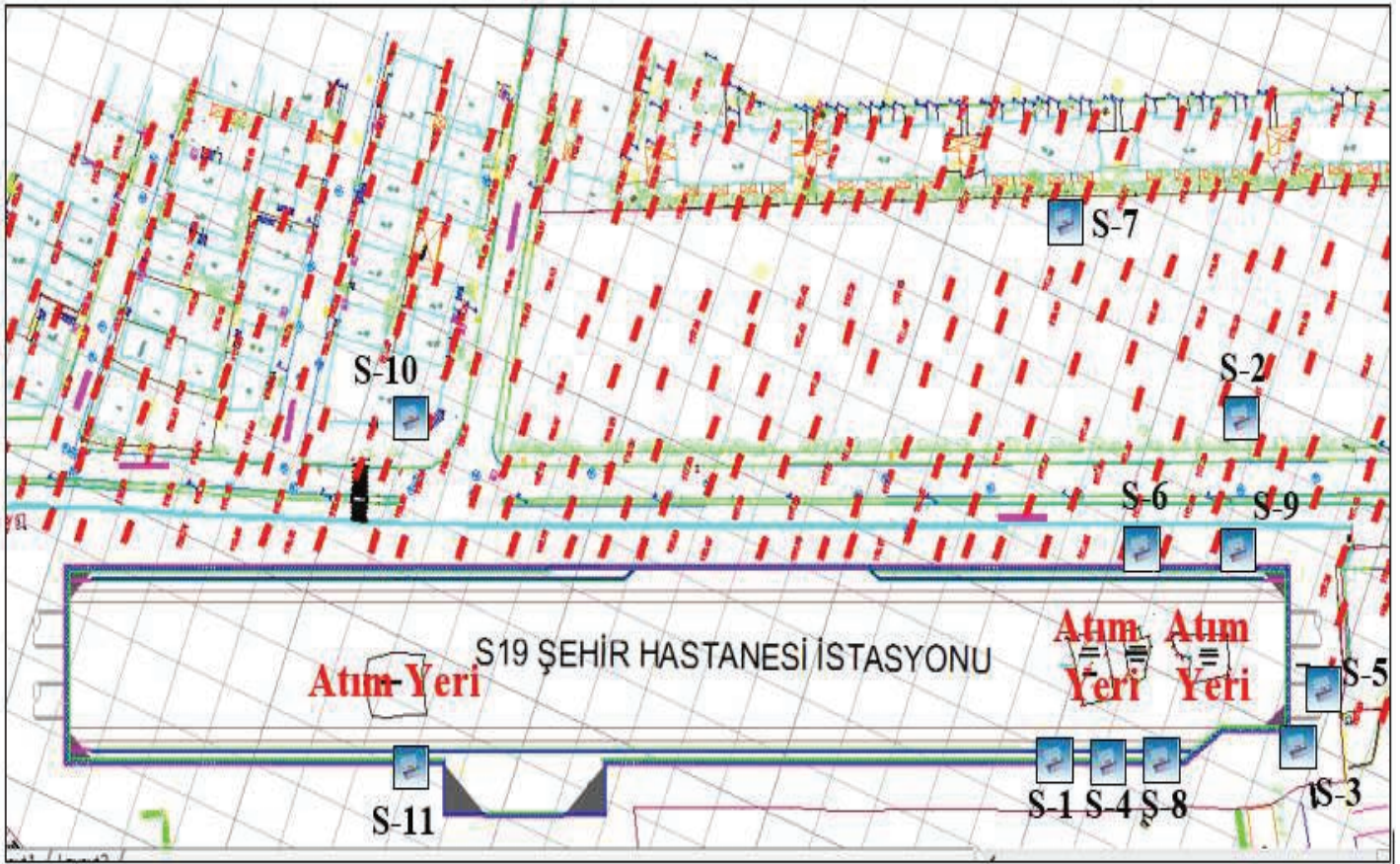
6 TEST ATIMLARI

Araştırma kapsamında Sancaktepe Hastane İstasyonu'nda patlatmalı kazı çalışmaları sırasında uygulanan 4 adet test atımın paternleri, delik düzenleri ve patlayıcı şarjları gözlemlenmiştir. Ayrıca, saha çevresinde bulunan riskli yapıların bulunduğu noktalarda ve kazı sınırındaki fore kazıklara titreşim ölçer cihazlar yerleştirilerek 4 atıma ait toplam 12 olayın parçacık hızı, frekans ve hava şoku değerleri kayıt cihazları ile kaydedilmiştir. Atım bölgesi ve ölçüm istasyonlarını gösterir plan Şekil 6'da gösterilmiştir. İzlenen 4 test atımında kaydedilen 12 olayın maksimum parçacık hızı (PPV), frekans (f), hava şoku (SPL_{dB}), ölçekli mesafe (SD) değerlerini içeren bilgileri Çizelge 5'de verilmiştir.

Test verilerden hareketle; ölçülen maksimum parçacık hızı ile ölçekli mesafe veri çiftleri kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda, bölgede yapılacak kontrollü patlatma tasarımlarında, parçacık hızı tahmininde kullanılması önerilen çalışma sahasının sabitleri Eşitlik3'deki formüllerle ifade edilmiştir.

$$PPV = 392.11 \times SD^{-1.152} \quad (r = 0.91) \quad (3)$$

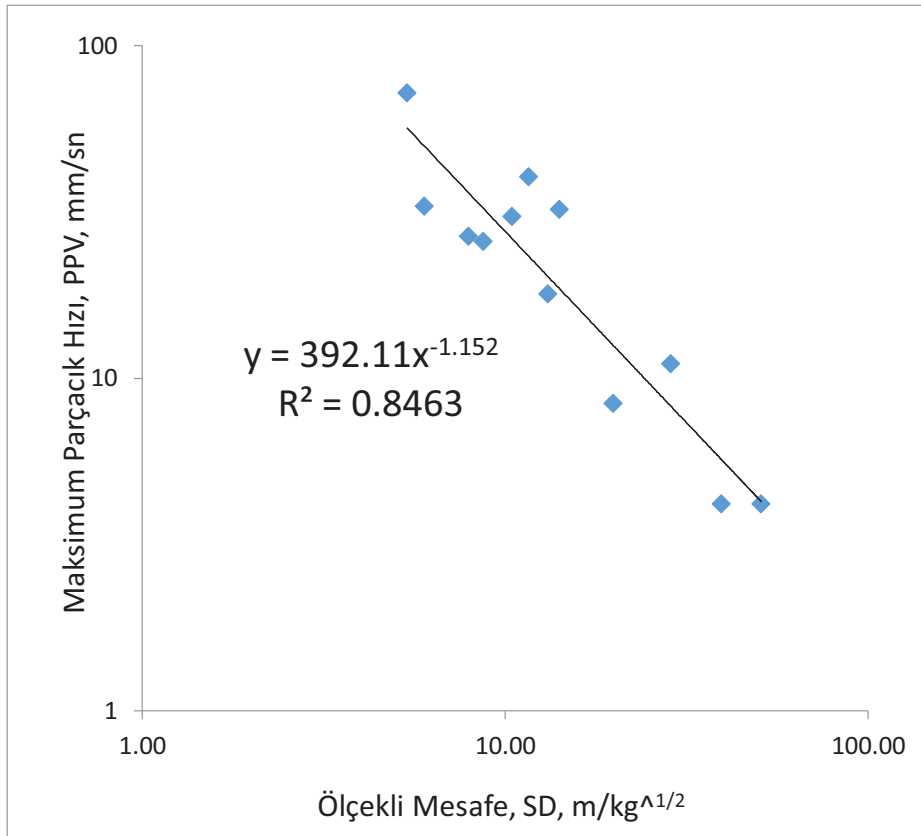
İyi bir korelasyon katsayısı ile sonuçlanmış olan bu formül, bölgede titreşim ölçer kullanılmadığı durumlarda; herhangi bir atımdaki gecikme başına kullanılan belirli miktardaki bir patlayıcı maddenin yaratacağı titreşimin hızının belirli bir uzaklıktaki değerinin ne olacağını tahmin etmede önemli bir yaklaşım olarak rahatlıkla (kabul edilebilir limitlerdeki bir sapma ile) kullanılabilir. Literatüre uygun olarak oldukça iyi korelasyon katsayısıyla elde edilen bu fonksiyonun grafiksel görünümü de Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Sancaktepe istasyonu açık kazısında yapılan test atımlarında ölçüm istasyonlarının konumları

Çizelge 5. Sancaktepe istasyonu açık kazısında test atımlarına ait bilgiler, titreşim ve hava şoku ölçümleri

Atım No	Titreşim Ölçer Modeli	PPV (mm/sn)	F (Hz)	SPL _{dB} (dB)	W (kg)	R (m)	SD	İstasyon No
1	BE10687	72.14	73.14	133.0	390	17.43	5.38	1
	BE10708	17.91	21.33	122.9	390	42.47	13.11	3
	BE10772	32.26	46.55	131.0	390	45.72	14.11	2
2	BE10688	4.191	24.38	118.2	190	87.98	50.80	7
	BE10687	30.61	51.20	131.9	190	18.09	10.44	4
	BE10708	40.39	34.13	126.5	190	20.10	11.60	6
3	BE10772	11.05	39.38	124.3	190	49.64	28.66	5
	BE10687	25.78	36.57	135.0	462	20.45	8.72	8
	BE10708	26.67	100	126.3	462	18.60	7.93	9
4	BE10688	4.191	34.13	116.3	462	92.37	39.39	7
	BE10687	8.382	22.26	125.6	330	46.55	19.85	10
4	BE10687	32.89	18.29	134.7	330	14.03	5.98	11



Şekil 7. Sancaktepe istasyonu açık kazısında yapılan test atımlarına ait PPV-SD ilişkisi

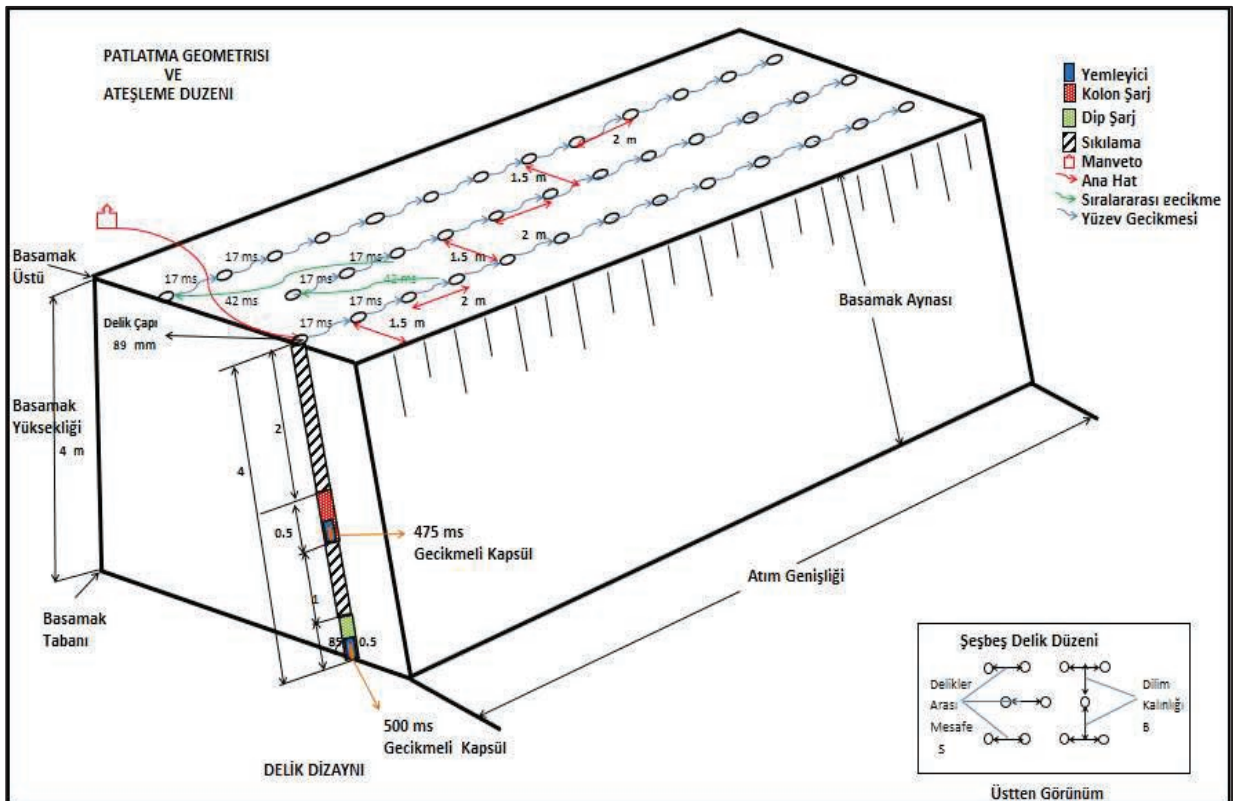
Elde edilen tahmin denklemi kullanılarak, yeni değerlendirme ve tasarımlar yapılarak saha içerisinde ve kazı sınırında bulunan fore kazıklara 4 m mesafeye kadar patlatma yapılabileceği görülmüş ve kritik bölge sınırı 6 m den 4 m ye çekilmiştir (Şekil 2-b). Söz konusu sahada açık kazı patlatmalarında fore kazıklara 4m mesafe gözetilerek uygulanabilecek patlatma tasarım modeli önerilmiş olup detayları Çizelge 6’te verilmiştir. Önerilen patlatma tasarım parametrelerinin plan görünümleri Şekil 8’de gösterilmiştir.

Çalışma sahasında patlatmalı kazıların söz konusu bölgede TBM ile açılacak tünellere etkisinin olmaması için, açık kazılarda uygulanacak patlatma tasarımında elektronik kapsüllerin kullanılarak gecikme süresindeki olası sapmanın önüne geçilmesi amaçlanmıştır, böylece gecikme başına şarjın daha da düşürülebileceği patlatmalar planlanmıştır. Sahada açık kazı

patlatmalarında TBM ile açılacak tünellere yakın yapılacak risk unsurları gözetilerek elektronik kapsüle uygulanabilecek patlatma ön tasarım modeli önerilmiş olup detayları Çizelge 7’te verilmiştir. Önerilen patlatma tasarım parametrelerinin plan görünümü Şekil 9’da gösterilmiştir.

Çizelge 6. Fore kazıklara 4 m. mesafeye kadar uygulanabilecek patlatma tasarımı

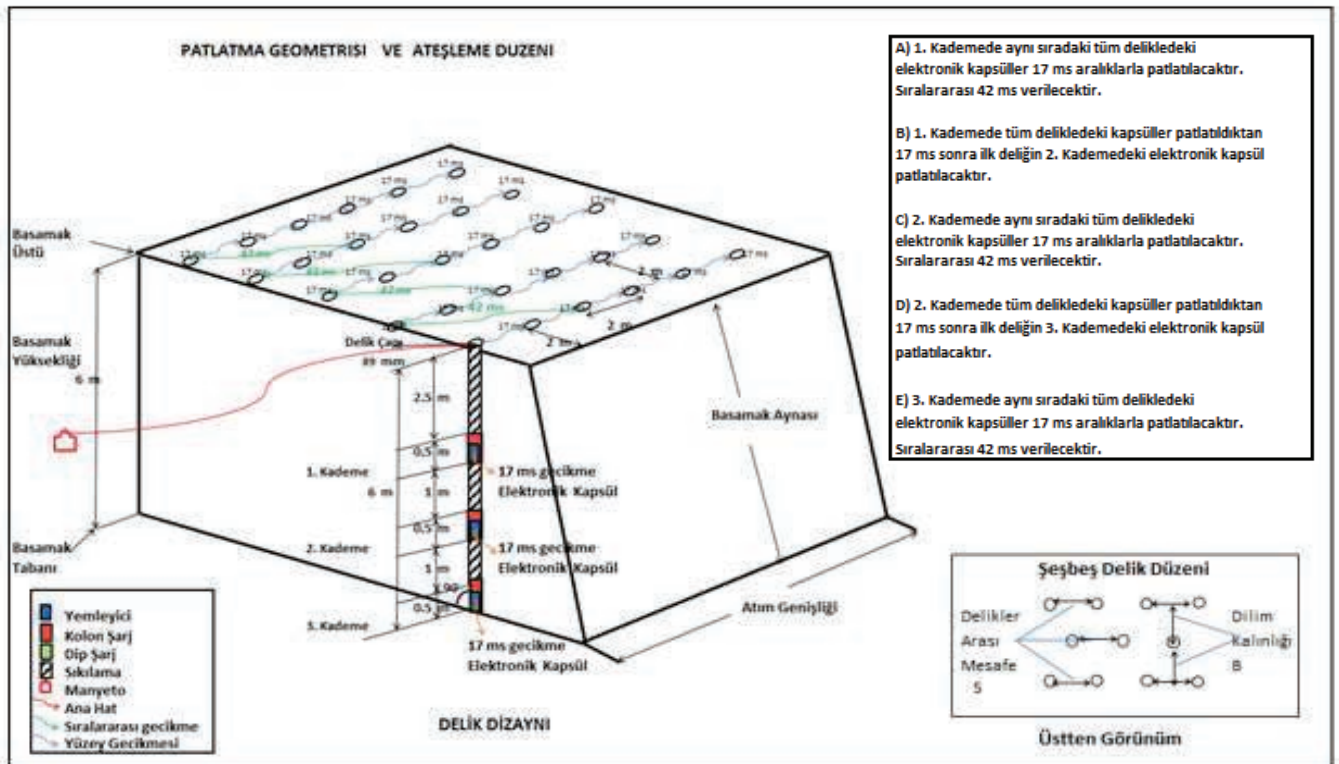
PARAMETRELER	TASARIM
Patlayıcı Madde Türü	ANFO
Patlayıcı Mad. Yoğunluğu (kg/dm ³)	900
Delik Eğimi (°)	85
Şarj Konstarasyonu, l_b (kg/m)	5.6
Delik Çapı, (mm)	89
Basamak Yüksekliği K (m)	4
Delik Uzunluğu, H (m)	4
Dilim Kalınlığı, B (m)	1.5
Delikler Arası Mesafe, S (m)	2
Sıkılama Boyu, h_o (m)	2
Ara Sıkılama Boyu (m)	1
1. Kademe Şarj Boyu h_2 (m)	0.5
1. Kademe Yemleme (kg)	0.5
1. Kademe Şarj Miktarı (kg)	1.25
1. Kademe Toplam Şarj Miktarı (kg)	1.75
2. Kademe Şarj Boyu (m)	0.5
2. Kademe Yemleme (kg)	0.5
2. Kademe Şarj Miktarı (kg)	1.25
2. Kademe Toplam Şarj Miktarı (kg)	1.75
Delik Toplam Şarj Miktarı Q (kg)	3.5
Gecikme Başına Maks. Şarj Miktarı (kg)	1.75



Şekil 8. Fore kazıklara 4 m mesafeye kadar uygulanabilecek patlatma tasarımı

Çizelge 7. TBM ile açılacak tünellere yakın elektronik kapsüllerle uygulanabilecek patlatma tasarımı

PARAMETRELER	TASARIM
Patlayıcı Madde Türü	Powergel 650
Patlayıcı Mad. Yoğunluğu (kg/dm ³)	1250
Delik Eğimi (°)	90
Delik Çapı, (mm)	89
Basamak Yüksekliği K (m)	6
Delik Uzunluğu, H (m)	6
Dilim Kalınlığı, B (m)	2
Delikler Arası Mesafe, S (m)	2
Üst Sıkılama Boyu, h _o (m)	2.5
1. Ara Sıkılama Boyu (m)	1
2. Ara Sıkılama Boyu (m)	1
1. Kademe Şarj Boyu h ₂ (m)	0.5
1. Kademe Yemleme (kg)	0.5
1. Kademe Şarj Miktarı (kg)	1.25
1. Kademe Toplam Şarj Miktarı (kg)	1.75
2. Kademe Şarj Boyu (m)	0.5
2. Kademe Yemleme (kg)	0.5
2. Kademe Şarj Miktarı (kg)	1.25
2. Kademe Toplam Şarj Miktarı (kg)	1.75
3. Kademe Şarj Boyu (m)	0.5
3. Kademe Yemleme (kg)	0.5
3. Kademe Şarj Miktarı (kg)	1.25
3. Kademe Toplam Şarj Miktarı (kg)	1.75
Delik Toplam Şarj Miktarı Q (kg)	5.25
Gecikme Başına Maks. Şarj Miktarı (kg)	1.75

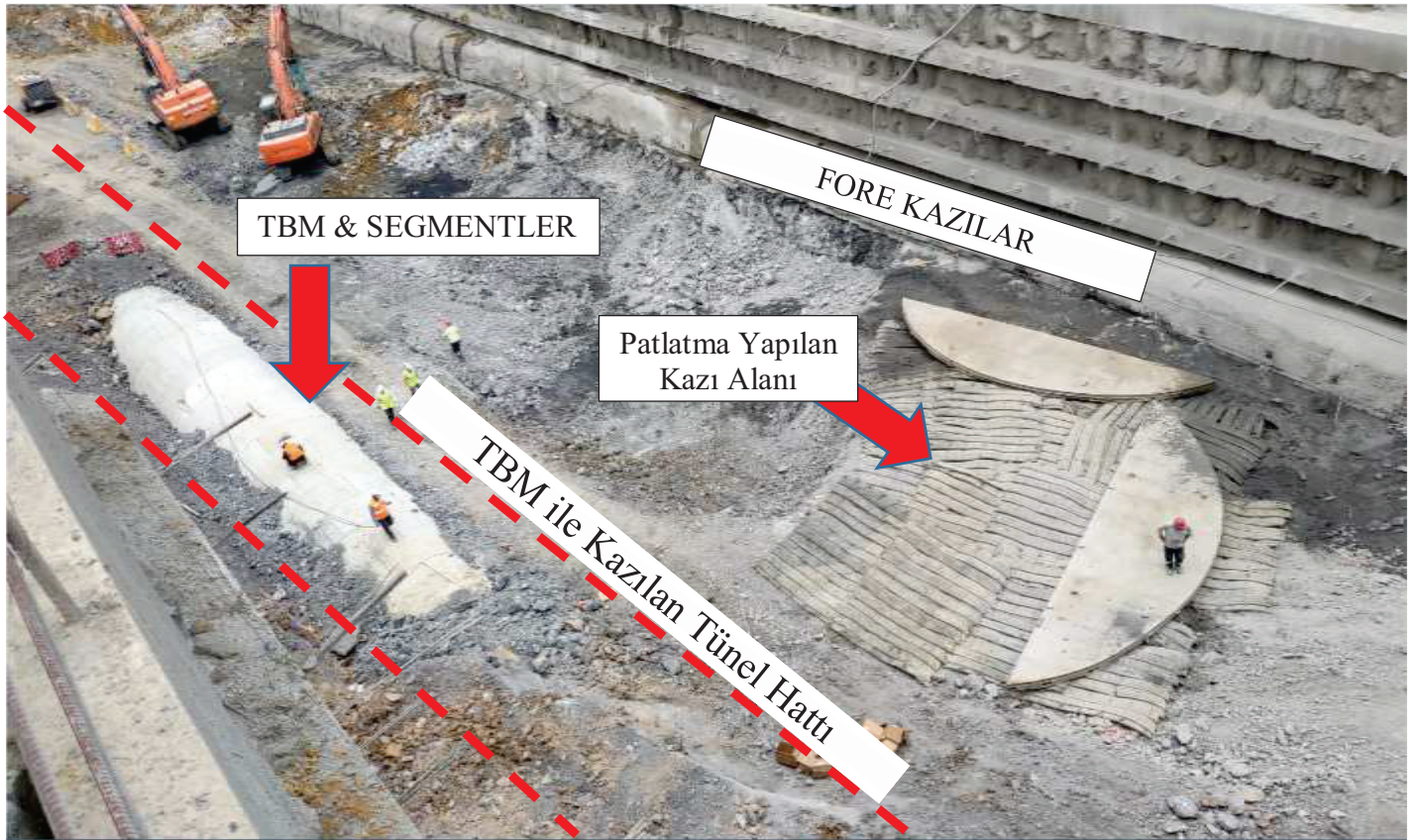


Şekil 9. TBM ile açılacak tünellere yakın elektronik kapsüllerle uygulanabilecek patlatma tasarımı

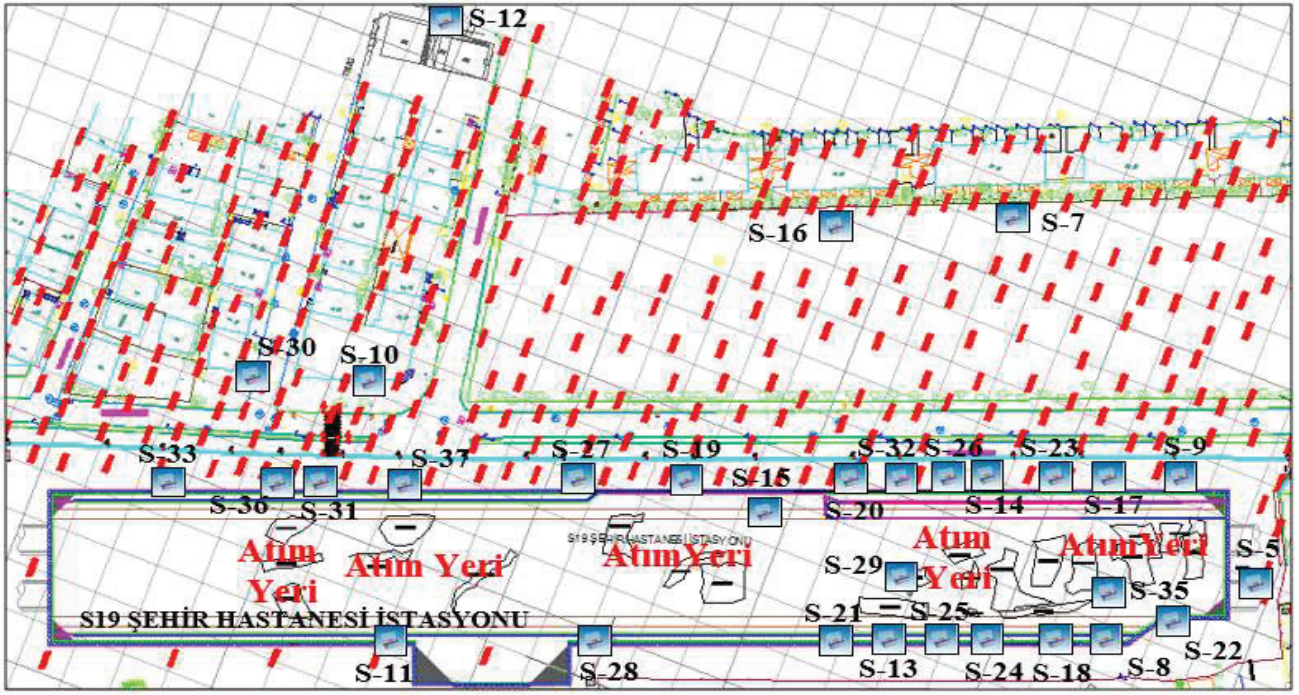
7 PROJEDE ÖLÇÜLEN DEĞERLERİN HASAR RİSKİ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışma kapsamında, Sancaktepe Hastane İstasyonu'ndaki patlatmalı kazı çalışmaları sırasında test atımlarından sonra oluşturulan sahaya özgü titreşim yayılım denklemi kullanılarak her bir atım tasarlanmış ve sahada 22 atım gerçekleştirilmiştir. Yapılan atımlar kritik bölge içerisinde (fore kazıklara 4m mesafede) ve TBM ile kazılan tünellere yakın bölgelerde (Şekil 10) gerçekleştirilmiştir. Saha çevresindeki riskli yapıların bulunduğu noktalar, kazı sınırındaki fore kazıklara ve TBM ile kazılan tünel hattına titreşim ölçer cihazlar yerleştirilerek 22 atıma ait toplam 62 olayın parçacık hızı, frekans ve hava şoku değerleri kaydedilmiştir. Atım bölgesi ve ölçüm istasyonlarını gösterir plan Şekil 11'de gösterilmiştir.

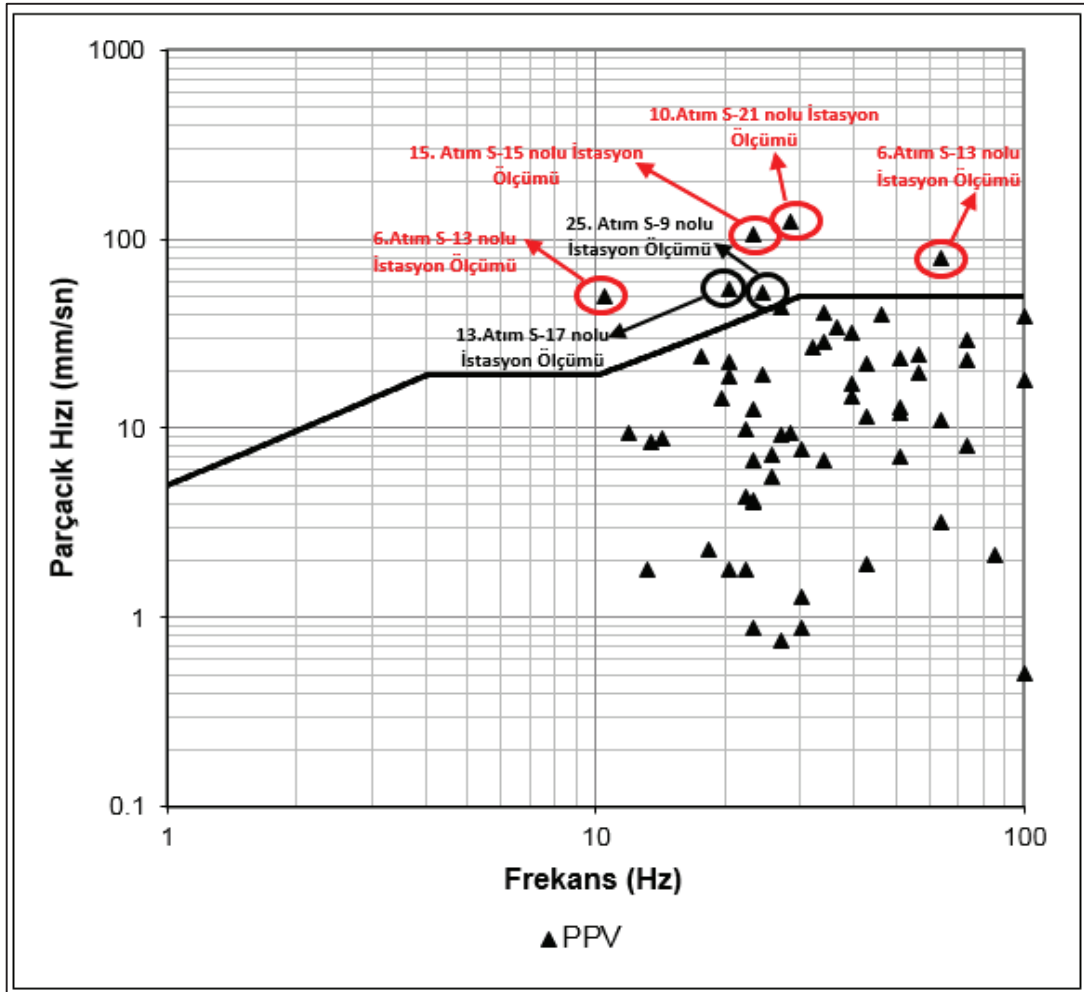
Patlatma faaliyetlerinin, söz konusu saha çevresinde bulunan yapılara olumsuz etkilerinin olup olmadığının belirlenmesi amacıyla, 22 atıma ait toplam 62 olaya ait frekans ve parçacık hızı (PPV) değerleri T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı "Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği"ne göre değerlendirilmiştir (Şekil 12). Şekil 12'de görüleceği üzere, ölçüm noktalarında kaydedilen değerler (6. Atımda S-13 ve S-14, 10. Atımda S-21, 13. Atımda S-17, 15. Atımda S-15 nolu ve 25 Atımda S-9 nolu saha içindeki ölçüm noktaları kaydı hariç) T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği normuna göre hasar sınırının altında çıkmıştır. Dolaysıyla, çalışma esnasında yapılan atımların, saha içerisindeki TBM, TBM Segmentleri ve Fore Kazıklar ile çevre yerleşim birimlerindeki yapılarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmıştır.



Şekil 10. Sancaktepe istasyonu açık kazısında yapılan bir atımın fore kazık ve TBM ile açılan tünel hattına göre konum

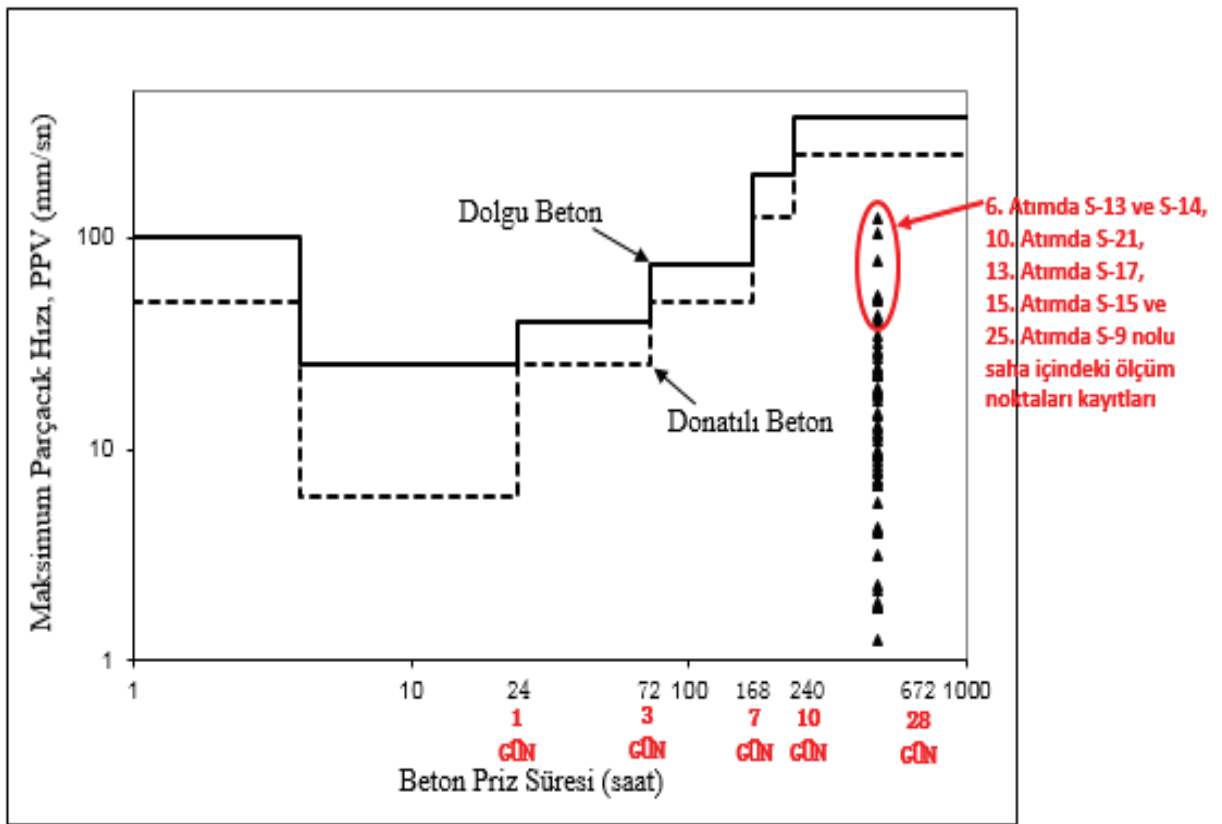


Şekil 11. Sancaktepe istasyonu açık kazısında yapılan atımlarda ölçüm istasyonlarının konumları



Şekil 12. Sancaktepe Hastane İstasyonu açık kazı atımlarında kaydedilen parçacık hızları ve frekansların T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yorumu.

Sancaktepe Hastane İstasyonu açık kazısında saha içinde fore kazık üzerinde belirlenen 13 ve 14 nolu ölçüm noktasında 6. Atımda, 21 nolu ölçüm noktasında 10. Atımda, 17 nolu ölçüm noktasında 13. Atımda, 15 nolu ölçüm noktasında, 15. Atımda ve 25 nolu ölçüm noktasında 25. Atımda kaydedilen ve Şekil 8’de T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği normu sınırının üzerinde çıkan titreşim değerinin ve diğer tüm saha içinde fore kazıklar üzerinde kaydedilen değerlerin fore kazıklara etkisini ortaya koymak adına, beton priz süresine dayalı titreşim taşıma kapasitesinin ifade edildiği Oriard (1980)’in çalışmasından faydalanılmıştır. Bu çalışmaya göre, kaydedilen değerlerin beton priz süresine bağlı olarak maksimum parçacık hızı limitleri açısından değerlendirilmesi Şekil 13 ve Çizelge 8’de verilmiştir. Sancaktepe Hastane İstasyonu kazısında saha içinde fore kazıkların betonunun 10 günden daha fazla süre önce döküldüğü kabul edilmiştir. Şekil 13’de görüleceği üzere, Sancaktepe İstasyonu saha içinde fore kazıklar üzerinde belirlenen ölçüm istasyonlarında kaydedilmiş olan maksimum parçacık hızlarının, 10 gün ve sonrası donatılı beton süreleri için belirlenen 250 mm/sn’lik maksimum parçacık hızı sınırının çok altında kaldığı ve fore kazıklar için hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.

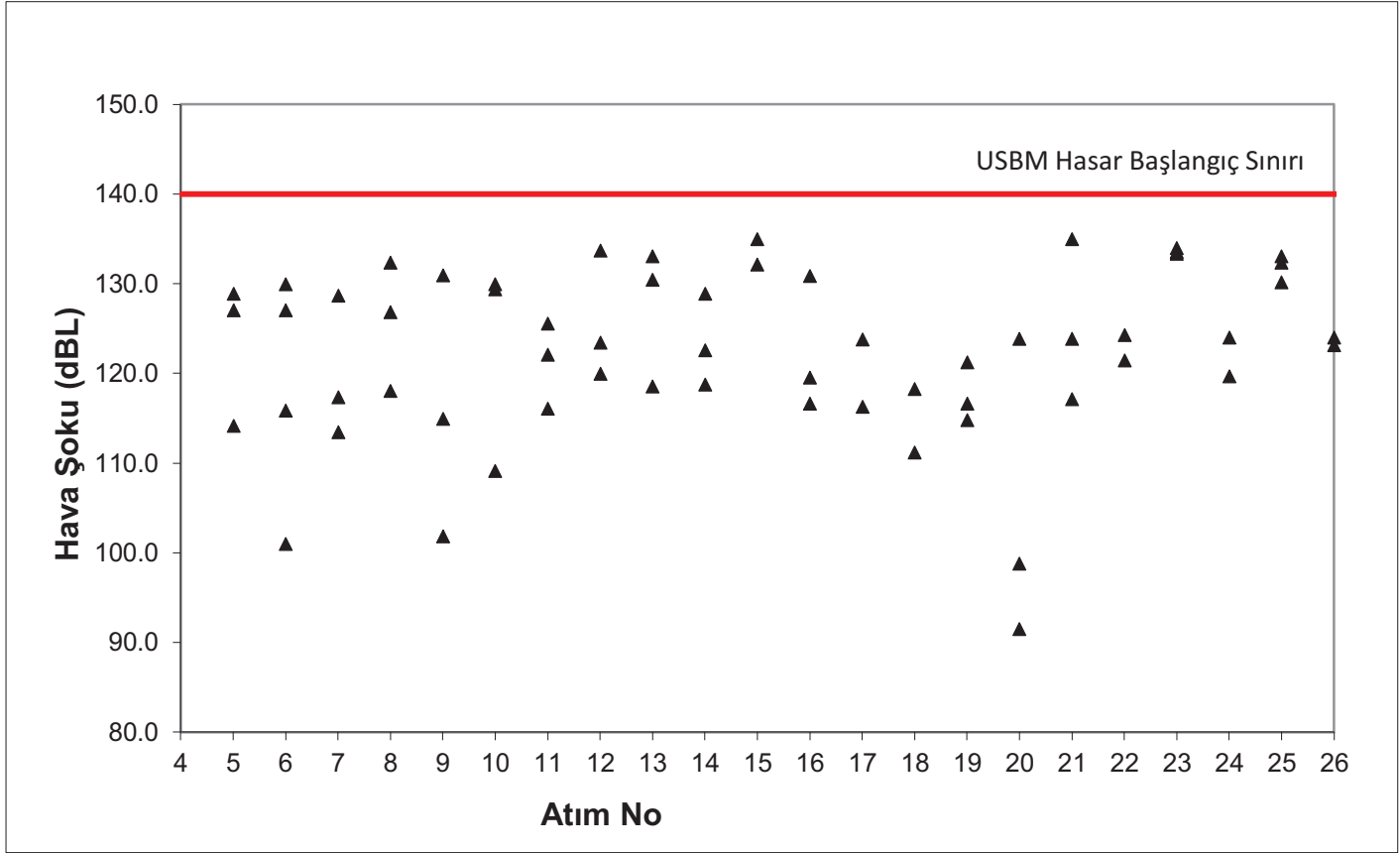


Şekil 13. Beton priz süresine göre maksimum parçacık hızı limitleri (Oriard, 1980)

Çizelge 8. Beton priz süresine göre maksimum parçacık hızı limitleri

Beton Priz Süresi (saat)	Maksimum Parçacık Hızı, PPV, (mm/sn)	
	Dolgu Beton	Donatılı veya Yapısal Beton
0-4	100	50
4-24	25	6
24-72 (1-3 gün)	40	25
72-168 (3-7 gün)	75	50
168-240 (7-10 gün)	200	125
240-672 (10 gün ve sonrası)	375	250

Çalışma kapsamında, söz konusu sahada titreşim ölçer cihazları tarafından hava şoku değerleri ölçüm sonuçları da kayıt edilmiştir. Çalışma esnasında Sancaktepe Hastane İstasyon Bölgesi açık kazılarında yapılan patlatmaların hava şoku açısından USBM'in sınır hava şoku değeri altında kalmıştır (Şekil 14). Dolayısı ile çevredeki yerleşim birimlerindeki yapılar, binalar, saha içindeki fore kazıklar ve TBM ile açılan tüneller üzerinde etkili olamayacağı anlaşılmıştır.



Şekil 14. Sancaktepe Hastane İstasyonu açık kazı atımlarında kaydedilen hava şoku değerlerinin USBM normuna göre toplu değerlendirmesi.

8 SONUÇLAR

Bu çalışmada, söz konusu patlatmalı istasyon kazısının, sahasının çevresinde bulunan yapılarda ve saha sınırındaki fore kazıklara 6 m mesafeye kadar olan bölgeler kritik bölge olarak kabul edilmiş ve bu sınırdan daha yakın bölgelerde hasarlara neden olmamak adına patlatma yapılmaması gerektiği düşünülmüş ve buna göre patlatma ön tasarım modelleri önerilmiştir. Yapılan patlatma ön tasarımları, sahada yapılan 4 adet test atımın paternleri, delik düzenleri ve patlayıcı şarjları gözlemlenmiştir. Ayrıca, saha çevresinde bulunan riskli yapıların bulunduğu noktalarda ve kazı sınırındaki fore kazıklara titreşim ölçer cihazlar yerleştirilerek 4 atıma ait 12 olayın parçacık hızı, frekans ve hava şoku değerleri kayıt cihazları ile kaydedilmiştir. Test atımın sonuçlarından hareketle, yüksek korelasyon değeri veren ($r=0.91$) kazı sahasına ait parçacık hızı (PPV) tahmin denklemi elde edilmiştir. Elde edilen tahmin denklemi kullanılarak, yeni değerlendirme ve tasarımlar yapılarak saha içerisinde ve kazı sınırında bulunan fore kazıklara 4 m mesafeye kadar patlatma yapılabileceği görülmüş ve kritik bölge sınırı 6 m den 4 m ye çekilmiştir. Ayrıca, saha içerisindeki TBM ile açılacak tünellere yakın bölgeler için de patlatma tasarımları yapılmış ve uygulanmıştır. TBM ile açılacak tünellere hasar vermemek amacıyla, TBM yakınında yapılan patlatmalarda elektronik kapsüller kullanılarak gecikme süresindeki olası sapmanın önüne geçilmesi amaçlanmış, böylece gecikme başına şarjın daha da düşürülebileceği patlatmalar planlanmıştır. Çalışma sahasında 22 atım kritik bölge içerisinde (fore kazıklara 4m mesafede) ve TBM ile kazılan tünellere yakın olarak gerçekleştirilmiştir.

Saha çevresinde bulunan riskli yapıların bulunduğu noktalarda, kazı sınırındaki fore kazıklara ve TBM ile kazılan tünel hattında titreşim ölçer cihazlar yerleştirilerek 22 atıma ait 62 olayın parçacık hızı, frekans ve hava şoku değerleri kayıt cihazları ile kaydedilmiştir. Ölçülen frekans ve en yüksek parçacık hızı (PPV) değerleri, söz konusu tarihlere yürürlükte olan T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği”ne göre değerlendirilerek, patlatma kaynaklı titreşimlerin kazı çevresinde bulunan yapılar üzerinde olumsuz bir etkisi olup olmadığı belirlenmiştir. Ölçüm noktalarında kaydedilen değerler (6. Atımda S-13 ve S-14, 10. Atımda S-21, 13. Atımda S-17, 15. Atımda S-15 nolu ve 25 Atımda S-9 nolu saha içindeki ölçüm noktaları kaydı hariç) T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği normu sınırının altında çıkmıştır. Dolayısıyla ile, çalışma esnasında yapılan atımların, çevre yerleşim birimlerindeki yapılarda herhangi bir hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.

Sancaktepe Hastane İstasyonu açık kazısında saha içinde fore kazık üzerinde belirlenen 13 ve 14 nolu ölçüm noktasında 6. Atımda, 21 nolu ölçüm noktasında 10. Atımda, 17 nolu ölçüm noktasında 13. Atımda, 15 nolu ölçüm noktasında, 15. Atımda ve 25 nolu ölçüm noktasında 25. Atımda kaydedilen ve T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği normu sınırının üzerinde çıkan titreşim değerinin ve diğer tüm saha içinde fore kazıklar üzerinde kaydedilen değerlerin fore kazıklara etkisi beton priz süresine bağlı olarak maksimum parçacık hızı limitleri açısından değerlendirilmiştir. Sancaktepe Hastane İstasyonu kazısında saha içinde fore kazıkların betonunun 10 günden daha fazla süre önce döküldüğü kabul edilmiştir ve Sancaktepe İstasyonu saha içinde fore kazıklar üzerinde belirlenen ölçüm istasyonlarında kaydedilmiş olan maksimum parçacık hızlarının, 10 gün ve sonrası donatılı beton süreleri için belirlenen 250 mm/sn’lik maksimum parçacık hızı sınırının çok altında kaldığı ve fore kazıklar için hasar riski taşımadığı anlaşılmaktadır.

Titreşim ölçer cihazları tarafından hava şoku değerleri ölçüm sonuçları da kayıt edilmiştir. Çalışma esnasında Sancaktepe Hastane İstasyon Bölgesi açık kazılarında yapılan patlatmaların hava şoku açısından USBM’in sınır hava şoku değeri altında kalmıştır. Dolayısıyla ile çevredeki yerleşim birimlerindeki yapılar, binalar, saha içindeki fore kazıklar ve TBM ile açılan tüneller üzerinde etkili olamayacağı anlaşılmıştır.

Çalışmada görüldüğü üzere, çevresinde ve içerisinde patlatmanın etkilerinden korunması gereken yapı(lar) bulunan kazı sahalarında, yapılara hasar vermeden kontrollü patlatma yapmanın mümkün olduğu, ancak bunun sadece mühendislik biliminin ve teknolojisinin bir arada kullanılmasıyla sağlanabileceği, kritik yapıların çok yakınında dahi patlatmaların yapılabileceği görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışma sırasında her türlü yardımda bulunan İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi Dekanlığı’na, T.C: İstanbul Büyükşehir Belediyesi’ne Ve Doğuş – Yapı Merkezi – Özaltın Adi Ortaklığı yetkililerine teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Alpkökin P., 2019. Raylı Sistemlerin Mevcut Durumu, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistem Daire Başkanlığı, <https://www.ibb.istanbul/Uploads/2019/10/1.-DOc.DR.PELiN-ALPKoKiN--RAYLI-SiSTEMLERiN-MEVcUT-DURUMU.pdf> (Erişim Tarihi 10.01.2023).
- Dowding, C.H, 1985. Blast Vibration Monitoring and Control. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, pp. 119-126.
- ESAY, 2020. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu İle Sarıgazi (Hastane)-Taşdelen-Yenidoğan Metrosu İnşaatı Jeoteknik Veri Raporu (1-2), Esay Mühendislik Enerji Tic. Ltd. Şti., 2020.
- İBB, 2023. <http://cssmetrosu.com/hakkinda.html>, (Erişim Tarihi 10.01.2023)

- Günay B., 2015. 3. Boğaz Köprüsü ve Kuzey Marmara Otoyolu Projesinde yapılan patlatmalı kazılardan kaynaklanan titreşimlerin ölçülmesi ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi, Okan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, ss. 173.
- Kalaycı, Ü., Özer, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C. 2013. Beylerbeyi-Küçüksu Atık Su Tünelinde Patlatma Kaynaklı Titreşim Analizi, VII. Delme Patlatma Sempozyumu, 1-4 Kasım, Cilt.1, ss.117-124, Eskişehir, Türkiye.
- Karadoğan, A., 2008. Patlatmadan Kaynaklanan Titreşimler İçin Ulusal Yapı Hasar Kriterleri Oluşturulabilirliğinin Araştırılması, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Karadoğan, A., Özer, Ü., Kahrıman, A., 2012, Patlatma kaynaklı titreşimlerin tahmini için farklı kayaların saha sabitlerinin belirlenmesi, İstanbul Yerbilimleri Dergisi (E.A: İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi), cilt.25, ss.9-23.
- Khandelwal M, Singh T.N, 2007. Evaluation of blast-induced ground vibration predictors, Soil Dyn Earthq Eng 27(2007):116–125.
- Küçük K., Aksoy C. O., 2017. Şehir içi tünel inşaatlarındaki kazılarda patlatma tasarımı ve titreşim modellemesi, Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 19, Sayı 57,ss.1035-1052.
- Oriard, L.L., 1980. Observations on the performance on concrete at high stress levels from blasting. Proceedings of the Sixth Conference on Explosives and Blasting Technique. International society of Explosives Engineers, 1-10
- Öz, M., 2015. Temel kazı patlatmalarından kaynaklı çevresel sorunlar, alınabilecek tedbirler ve patlatmada iş güvenliği uygulamaları, Okan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, ss. 149.
- Özer Ü, Karadoğan A, Sertabipoğlu Z., Kalaycı Şahinoğlu, Ü., Özyurt, M.C, 2020-2021. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi-Taşdelen-Yenidoğan Metrosu İnşaat ve Elektromekanik Sistemler Temin, Montaj, ve İşletmeye Alma İşleri İşi Projesi Kapsamında Patlatmalı Kazılardan Kaynaklanan Titreşim ve Hava Şokunun Ölçümü ve Değerlendirilmesi, İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Döner Sermaye Projesi.
- Özer, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C., Sertabipoğlu, Z., Şahinoğlu Kalaycı, Ü., Sefer, İ., Zaif, B.C., Durdu, A., Kişi, A., Günay, M. K., Karadoğan, H., Özkul, O., Bayındır, O., Yurttaş, M., Çevik, İ., Şireci, S., Şahin, S., Kanlıçay, E., 2018. Kuzey Marmara Otoyolu, Cebeci tüneli patlatmalı kazısında gecikme aralığının parça boyut dağılımı ve ilerleme üzerine etkisinin analizi, 4. Uluslararası Yeraltı Kazıları Sempozyumu & Sergisi, İstanbul, Türkiye, 13 - 14 Eylül 2018, ss.307-313.
- Özer, Ü., Kalaycı Şahinoğlu, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C. 2016. Kentsel alanda patlatmalı kazılarda proje adımları, 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, 13-14 Ekim 2016, vol.1, ss.162-170, Kütahya, Türkiye.
- Özer, Ü., Karadoğan, A, Kalaycı, Ü., Özyurt, M.C., 2017. Bir şehir içi patlatmasında sismik verilerin değerlendirilmesi, İstanbul Yerbilimleri Dergisi (E.A: İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi), cilt.27, sa.2, ss.89-101, 2017 (SSCI).
- Özer Ü, Karadoğan A, Sertabipoğlu Z., Kalaycı Şahinoğlu, Ü., Özyurt, M.C, 2020. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu İle Sarıgazi (Hastane)-Taşdelen-Yenidoğan Metrosu İnşaat ve Elektromekanik Sistemler Temin, Montaj Ve İşletmeye Alma İşleri” Projesi Kapsamında Sancaktepe Şehir Hastanesi İstasyonu Açık Kazılarında Risk Analizine Dayalı Patlatma Tasarımı, İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Döner Sermaye Projesi.

**RISK, ENVIRONMENT, OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY,
RISK, ÇEVRE, İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ**

Açık Kazılarda Meydana Gelebilecek Deformasyonların Sebepleri ve Alınabilecek Önlemler (Çekmeköy-Sultanbeyli Metrosu'nda Kazanılmış Tecrübeler)

Causes of Deformations That May Occur in Open Excavations and Measures to be Taken (Experiences from Çekmeköy-Sultanbeyli Metro Line)

H. G. Selman

Doğuş İnşaat ve Ticaret A.Ş., Tasarım Şefi - İnşaat Yüksek Mühendisi, İstanbul

N. Aktepe

Tekfen Mühendislik, İnşaat Mühendisi, İstanbul

ÖZET: İstanbul'da özellikle son yıllarda artan bir şekilde büyük hacimli yeraltı ulaşım yatırımları yapılmaktadır. Özellikle sıklıkla göç alan bu şehirde nüfus artışına bağlı olarak ulaşım ihtiyaçları ve ulaşım seçeneklerinin artırılması önem arz etmektedir. Çekmeköy – Sultanbeyli Metrosu da bu hedefle projelendirilen ve yapım işi devam eden metro hatlarından biridir. Her istasyonun kazı ve inşai imalatları bulunduğu zemin koşullarına göre belirlenmekte ve değişkenlik göstermektedir. Aynı şekilde istasyon kazıları sırasında karşılaşılan problemler de (deformasyon, oturma, göçük vb.) münferit olmakta ve saha koşullarına göre farklı çözümler üretilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında Çekmeköy - Sultanbeyli Metro'sunda bu anlamda kazanılmış tecrübeler yer verilerek iki istasyonda meydana gelen deformasyonların incelenmesi, sebepleri araştırılmış ve alınan önlemler açıklanmıştır.

ABSTRACT: In recent years, large-volume underground transportation investments have been made in Istanbul. It is important to increase the transportation needs and transportation options due to the increase in population, especially in this city that receives migration frequently. Çekmeköy - Sultanbeyli Metro is one of the metro lines that were designed with this aim and the construction work is ongoing. The excavation and construction works of each station are determined according to the ground conditions and vary. Likewise, the problems encountered during station excavations (deformation, settlement, dent etc.) are also isolated and different solutions can be produced according to site conditions. Within the scope of this study, the experiences gained in the Çekmeköy-Sultanbeyli Metro are included, and the deformations occurring in the two stations are examined, the causes are investigated, and the measures taken are explained.

1 SANCAKTEPE İSTASYONU PROJE DETAYLARI

Mühendisliğin toplumlara en büyük katkılarından biri toplumların hareket edebilirliğini sağlamaktır. Metro sistemleri ile ulaşımın sağlanması ise hem çevre dostu hem de sürdürülebilir olmasının yanı sıra şehir planlama açısından değerlendirildiğinde sıkışık kentleşmelerde, alan kazanımları sebebi ile tercih edilen ulaşım yöntemlerindedir. Bu çalışma kapsamında Anadolu Yakası'nın ikinci metrosu ve Türkiye'nin ilk sürücüsüz metrosu "Üsküdar-Çekmeköy Metro Hattı"nın devamı, Çekmeköy- Sultanbeyli Metro Hattı'nın dördüncü istasyonu olan Sancaktepe İstasyonu'nun kazı ve destekleme süreçleri irdelenmiştir.

1.1 Çekmeköy-Sultanbeyli Metro Projesi

Son yüzyılda toplumların en temel ulaşım aracı olan ve medenileşmenin ölçütü sayılan metro sistemleri içerisinde dikkate değer önemde mühendislik ve mimarlık planlamaları söz konusudur. Metro istasyonu tasarlamak, yer üstünden farklı olarak, zemin, yer altı su seviyesi, geçilen güzergah, yer üstü ile etkileşim gibi değişik parametreleri göz önünde bulundurmaya gerektirir. Çekmeköy-Sultanbeyli Metro Projesi Anadolu Yakası'nın ilk sürücüsüz metrosu olan Üsküdar-Çekmeköy Metro'sunun devamı niteliğinde olup; 16300 m TBM tünel ve 9100m NATM tünel işi mevcuttur. Anahat üzerinde 8 istasyon ve 3 tane kruvazman makas yapısı yer almaktadır.



Şekil 1. Proje alanı yer buldurusu

1.2 Sancaktepe (Abdurrahmangazi) İstasyonu Kazı-Destek Sistemi ve Genel Durum

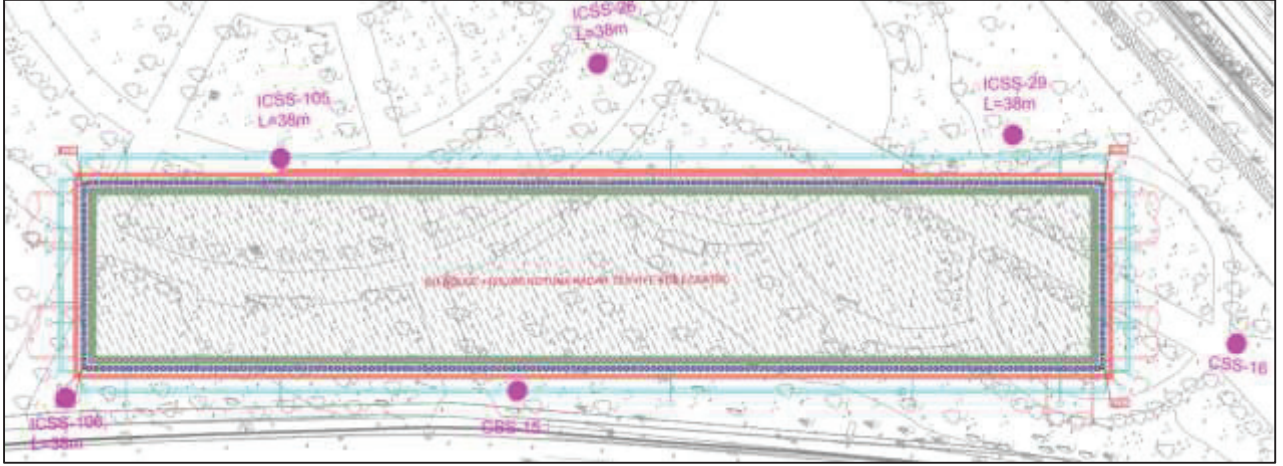
Çalışmaya konu Sancaktepe İstasyonu geçici iksa inşaatı kapsamında kazı destek sistemi imalatlarına Ekim 2017' de başlanılmıştır. İstasyon ve iksa sisteminin geometrisi dikdörtgen olup, boyutları kısa cephede 27 m ve uzun cephede ise 150 m 'dir.

Geoteknik gözlem amacıyla 9 adet inklinometre, 33 adet reflektör ve 13 adet yük hücresi yerleştirilmiştir. Periyodik olarak gözlem noktalarından okumalar yapıлып kazı destek sisteminin performansı sürekli olarak izlenmiştir. Sancaktepe İstasyonu her iki yönde çalışacak tünel açma makinelerinin kurulumunun yapılacağı istasyon olarak planlanmıştır.

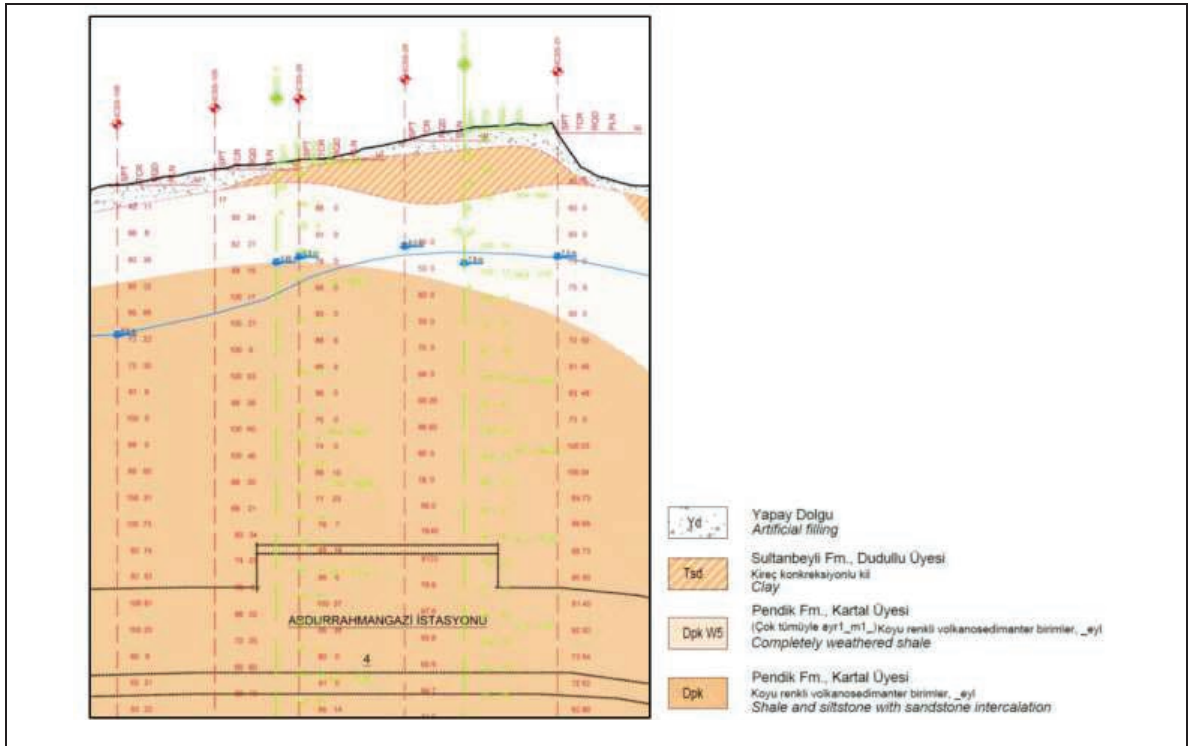
1.3 Zemin Profili

Sancaktepe İstasyonu için yapılmış olan sondajlara ait sondaj planı Şekil-4'te verilmiştir. Zemin araştırma çalışmalarında yapılan 6 adet CSS-15, CSS-16, ICSS- 26, ICSS-29, ICSS-105, ICSS-106 araştırma sondajı ile parametreler ve zemin profili değerlendirilmiştir.

Sahada problem yaşanan cepheye en yakın sondaj olarak CSS-15 değerlendirmede dikkate alınmıştır. Yüzeyde dolgu, dolgunun altında ise kumlu/çakıllı kil, daha sonra ayrılmış kumtaşı-kireçtaşı ve en alt seviyede orta-sağlam kireçtaşı görülmektedir. Zemin profili Şekil 5'te verilmiştir.

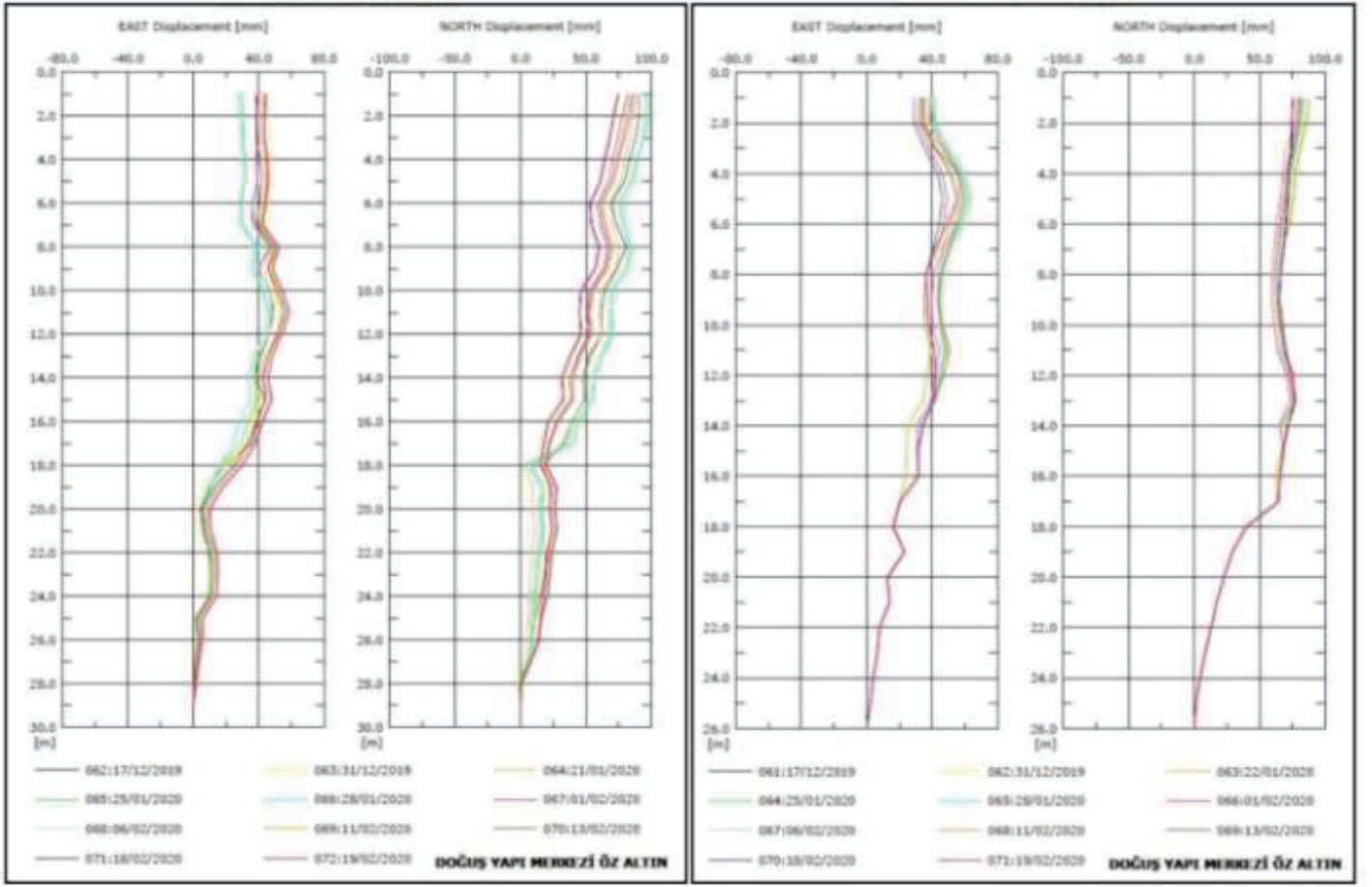


Şekil 4. Sondaj planı



Şekil 5. Jeolojik kesit

Yatay ve düşeyde hareketlerin okunduğu cepheye yakın CSS-15, CSS-16 numaralı sondajlar referans alınarak analizlere esas olacak şekilde tabaka kalınlıkları 0,0 – 1,40 m arasında **dolgu**; 1,40-5,80 m arasında **kumlu/çakıllı kil**; 5,80-20,00 m arasında **ayrışmış kumtaşı-kireçtaşı**; 20,0 m derinlikten sonra ise **orta sağlam kireçtaşı** olarak tanımlanması uygun görülmüştür.



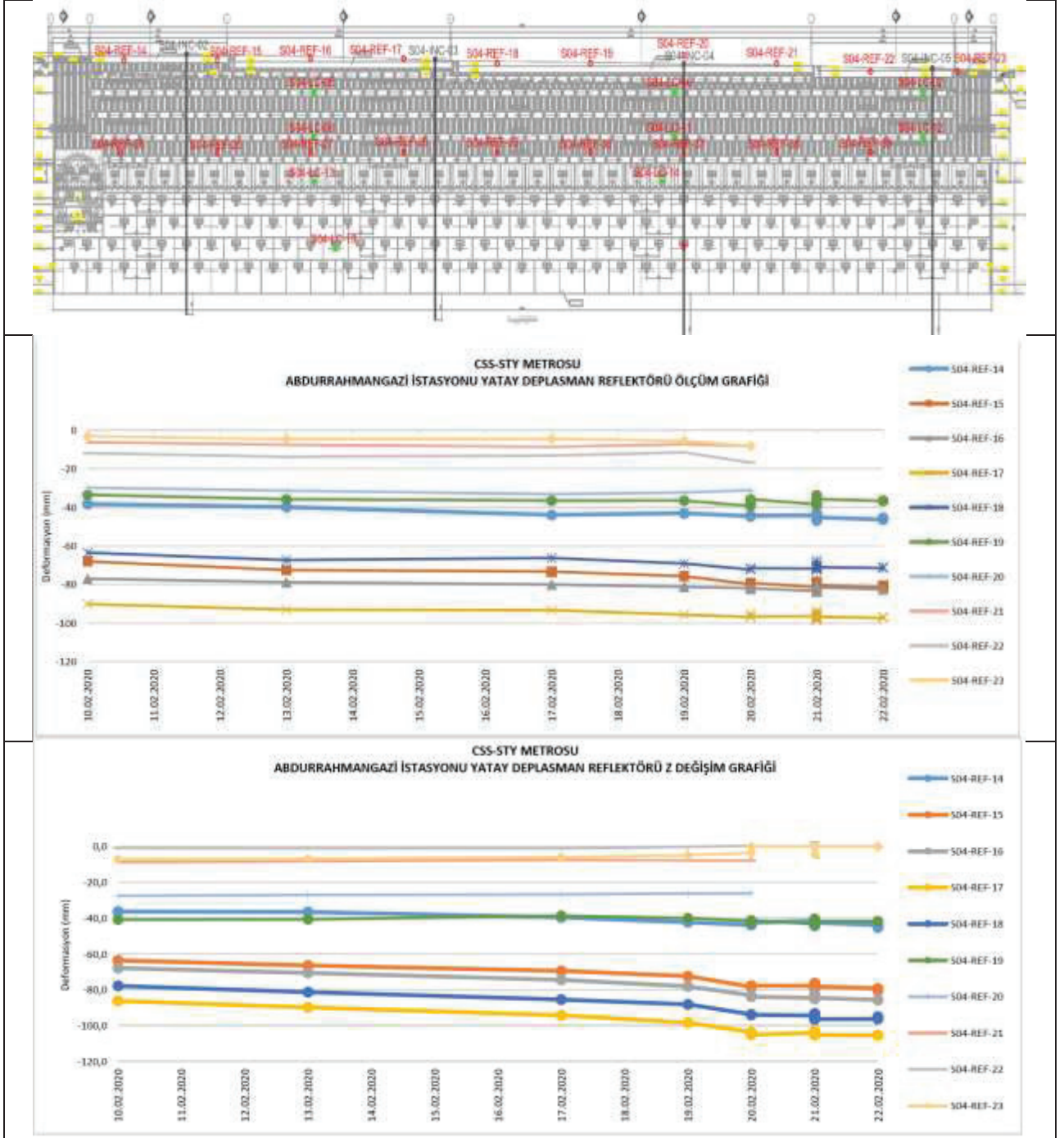
Şekil 7. 19.02.2020 tarihli inklinometre okumaları (INC-02 ve INC-03)



Şekil 8. Sevenler caddesinde gözlenen çatlaklar

Sevenler Caddesi cephesinde yerleştirilen reflektörlerden de yatay ve düşey deplasman okumaları alınmıştır. Bu okumalar Şekil 9’da verilmektedir. INC-02 ve INC-03 etrafındaki reflektörlerden alınan okumalar; yatay deplasman değerlerinin 8-10 cm ve düşey deplasman değerlerinin 7-9 cm mertebesinde değiştiğini göstermektedir. (Şekil-7, Şekil-9)

İlk aşamada söz konusu okumalar neticesinde, inklinometre ile reflektör okumalarının birbirini desteklediği görülmüş, cadde üzerinde de gözle görülür çatlakların da gözlenmesi ile beraber kazı derhal durdurulmuş ve iksa sisteminin alt parçasını oluşturan püskürtme betonlu perde yapısının önü, geri dolgu yapılarak neredeyse kendi üst kotuna kadar doldurulmuştur.



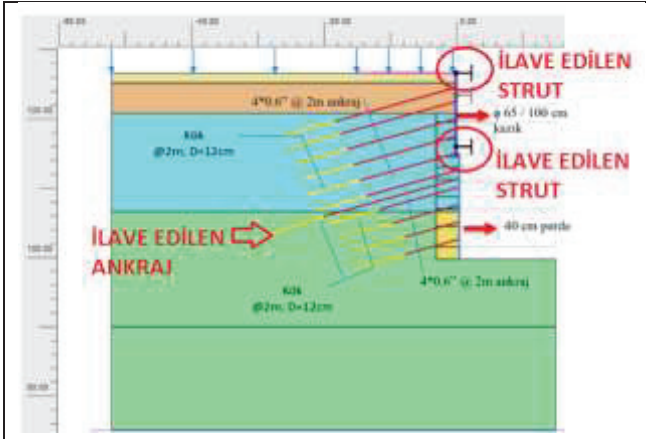
Şekil 9. Sevenler Caddesi cephesindeki reflektörlerden alınan yatay ve düşey deplasman okumaları

2.2 Sayısal Analizler ve Alınan Önlemler

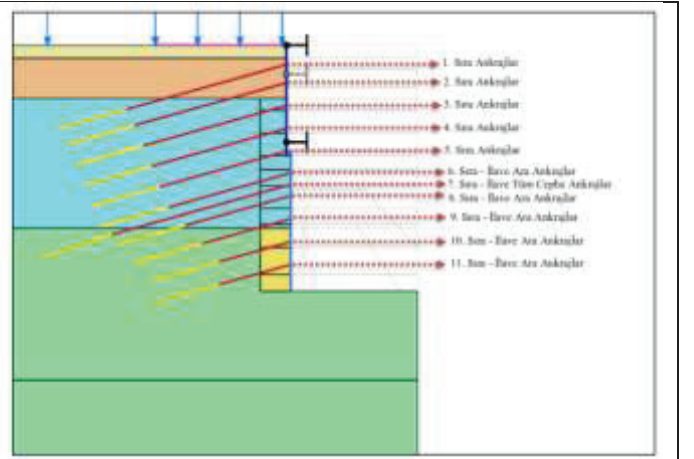
Söz konusu cephe hareketinin analizi ve hareketi önleyici faaliyetler hususunda destek alınması için İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölüm Geoteknik Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU tarafından analizler gerçekleştirilmiştir.

Geri analizler yardımıyla, iksa sisteminde ölçülen deplasman değerleri ile uyumlu bir deplasman profili hesaplanabilmiştir. Hesaplanan sayısal model kullanılarak inşaat sonuna yönelik bir tespit çalışması yapılmıştır. İksa deplasmanlarını sınırlayarak; ilave önlemlerin neler olabileceği, farklı uygulama alternatifleri de değerlendirilerek seri analizler ile çalışılmıştır. Bu analizler neticesinde belirlenen en makul öneri aşağıdaki şekli ile belirlenmiştir:

- İksa sisteminin üst parçasını oluşturan kazıklı iksa yapısı, 27 m olan kısa açıklık da uygun geometride olduğu için, boru destek elemanlar ile iksa içinden güçlendirilecektir.
- İksa sisteminin alt parçasını oluşturan püskürtme betonlu perde yapısının önü, geri dolgu yapıldığı için neredeyse kendi üst kotuna kadar doldurulmaktadır.
- Alt parçadaki ankraj aralıklar 4 m'de bir olduğu için mevcut ankrajların aralarına girilerek ilave ankrajlar yapılmasına karar verilmiştir. Yeni ankrajlar ile sistemi güçlendirmek iksa hareketleri bakımından fayda sağlayacaktır.
- Püskürtme beton perde üzerindeki load cell okumalarına göre zorlanan 6 no.lu ankraj sırasının yükünü hafifletmek üzere 111.5 kotuna ilave bir ankraj kuşağı daha yapılması planlanmıştır.



Şekil 10. Alınan önlemlere ait sayısal model



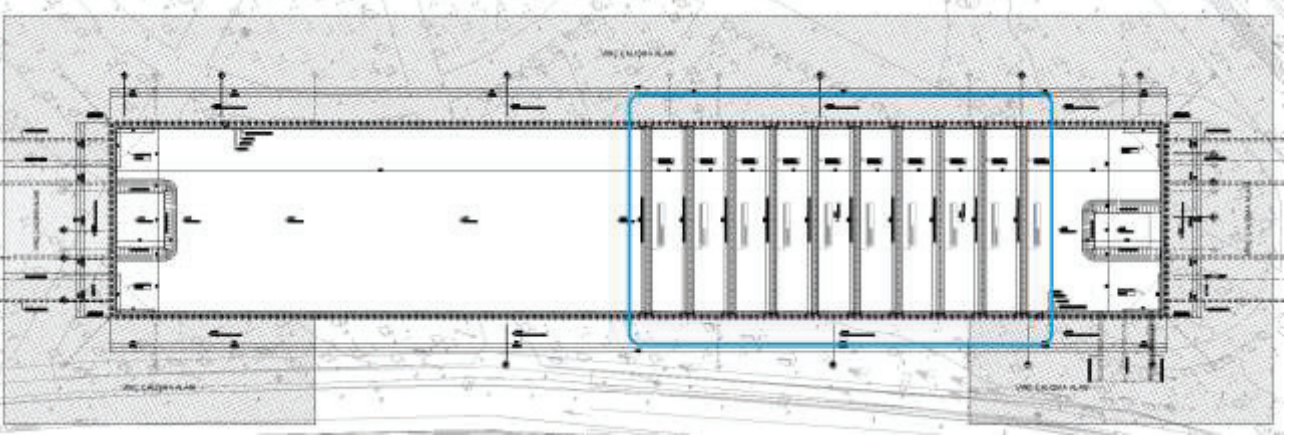
Şekil 11. Ankraj sıklaştırması yapılan kotlar ve imalat sıralaması

3 SAHA UYGULAMALARI

Geri analiz ile mevcut duruma ulaşıldıktan sonra aşamalı analizler ile aşağıda belirtilen ilave imalatlar da modele eklenerek temel kotuna ulaşan bir analiz yürütülmüş ve sonucunda deformasyonun devam etmemesi, güvenlik önlemlerinin alınması, ilave iksa imalatlarının belirlenmesi sonrasında kazının güvenle tabana ulaşabilmesi aşağıda sıralanan imalatlar yapılmıştır.

1. Saha +110.70 m kotuna kadar kazı destek sistemi önünde 8 m genişliğinde topuk bırakılmıştır.
2. 4.sıra ile 5. sıra kuşak kirişi arasına 6 m aralıkla 1000 mm çapında 10 adet ilave strut montajı yapılmıştır.
3. Başlık kirişine mevcut strutlara ilave olarak 6 m aralıkla 1000 mm çapında 6 adet strut montajı yapılmıştır.
4. +112.50~+102,50 m kotları arasında kalan ankrajlara $Sh=2,00$ m olacak şekilde ilave ankrajlar yapılmıştır.

5. +111,25 m kotunda 40cm x 60cm ebatlı kuşak kirişine bağlı $Sh=2,00$ m olacak şekilde yeni ankrajlar yapılmıştır.
6. +101,35 kotunda $Sh=1,50$ m ve $\varnothing 32$ ilave zemin çivisi imalatı yapılmıştır.



Şekil 12. Strut uygulanan bölge

4 DEĞERLENDİRMELER

Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi (Hastane) – Taşdelen – Yenidoğan Metrosu İnşaat ve Elektromekanik Sistemler Temin, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri” kapsamında yapımına devam edilmekte olan “Abdurrahmangazi İstasyonu Geçici Kazı Destek Sisteminin” iksa sisteminde ve arkasındaki cadde üzerinde ölçülen deplasmanlarda artış gözlenmiştir. İksa yapısının F-J aksları arasındaki düşey elemanlarda ölçülen deplasmanlar ile Sevenler Caddesi asfaltı üzerindeki çatlaklar proje kriterlerini aşan değerlere ulaştığı için gerek çevredeki yapıların gerekse iksanın kendi güvenliği bakımından önlem alınması gerektiğine karar verilerek imalatlar durdurulmuştur. Özellikle F-H aksları arasında, cephenin alt kotları geri dolgu malzeme ile doldurulmaya başlanılmıştır.

Deformasyonun kök sebeplerine inildiğinde, inklinometre okumalarına göre iksa sisteminin üst parçasını oluşturan kazıklı sistem ile iksa sisteminin alt parçasını oluşturan püskürtme betonlu perde yapısının her ikisinde deplasmanlar yüksek mertebelindedir. Her iki iksa sistemi arasında yeterli soketlenmenin imalat sırasında sağlanamadığı anlaşılmaktadır.

Çalışmaya konu edilen Sancaktepe (Abdurrahmangazi) İstasyonu geçici iksa inşaatı kapsamında kazı destek sistemi imalatlarına Ekim 2017’de başlanılmış olup inşaat faaliyetlerine halen devam edilmektedir. Sahada yeraltı suyunun etkili olduğu cephe görüntülerinden ve zemin etüt raporlarından anlaşılmaktadır. Sahada korozyona uğrayarak sıyrılan ankrajlar ve ankraj kamaları olduğu gözlenmiştir. Sahada çalışmalarının beklenilenden daha uzun sürmesine bağlı olarak kaybedilen sürede, çelik malzemede gözlenen korozyonun, yük kayıplarına neden olması da ikinci önemli kök sebeplerden biridir.

Kazıklı üst parça ve püskürtme betonlu alt parçadan oluşan iksa yapısının alt parçasını oluşturan püskürtme beton imalatı sırasında, ayrıışmış kumtaşı malzemenin kolayca sökülebildiği ve 40 cm’lik perdeyi oluşturmak için kumtaşı birimde beklenilenden fazla miktarda döküntü olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, incelenen iksa yapısında, benzer iksa sistemlerinde gözlenenlere kıyasla çok daha fazla miktarda düşey deplasman okunmuştur. Düşey deplasmanlar iksa sisteminin yatay deplasmanları ile birlikte toplam deplasman değerinin daha da artmasına neden olmaktadır. 7-9 cm mertebesine ulaşan düşey deplasmanların iksa yapısında ve asfaltta gözlenen çatlaklar üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Zeminin öngörülenden fazla ayrıışması dökülebilir olması da deformasyonu arttıran unsurlardan olmuştur.

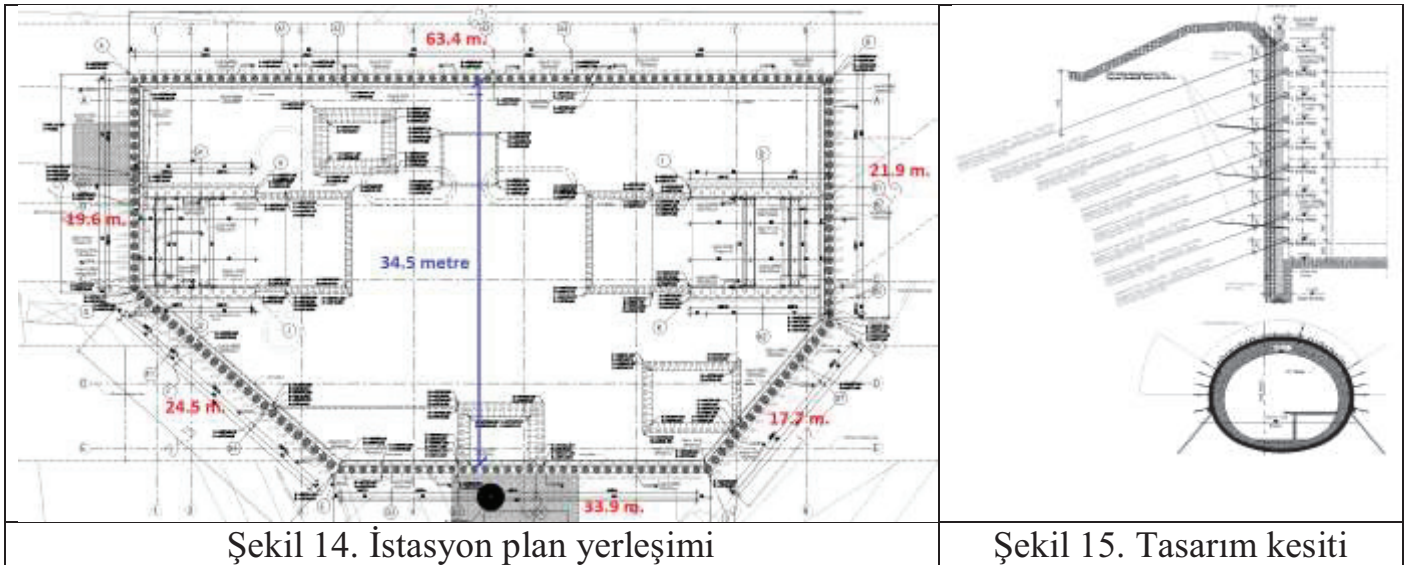
5 SULTANBEYLİ İSTASYONU PROJE DETAYLARI

Çalışmaya konu Sultanbeyli İstasyonu geçici iksa inşaatı kapsamında kazı destek sistemi imalatlarına 21.06.2021 tarihinde başlanılmıştır. İstasyon ve iksa sisteminin geometrisi düzgün değildir, 6 kenarlıdır.



Şekil 13. Proje alanı yer buldurusu

Geoteknik gözlem amacıyla 7 adet inklinometre, çeşitli sayıda reflektör ve yük hücresi yerleştirilmiştir. Periyodik olarak gözlem noktalarından okumalar yapıp kazı destek sisteminin performansı sürekli olarak izlenmiştir.



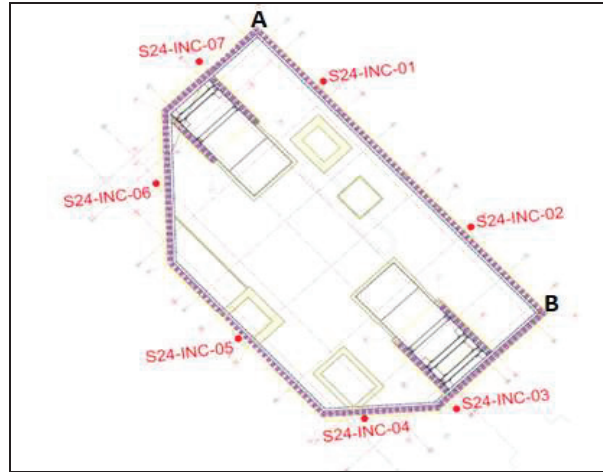
İstasyonun yerleşim olarak en uzun cephesi 63.4 metre olup; TEM Otoyolu'na paraleldir. Diğer cepheler de bölgenin üst yapı ve çevre yolları yerleşimine göre düzenlenmiştir. (Şekil-14) İstasyonun kısa doğrultudaki açıklığı 34.5 metre'dir.

5.1 SULTANBEYLİ İSTASYONU KAZI-DESTEK SİSTEMİNDE DEFORMASYON GÖZLENMESİ VE TAKİP EDİLEN SÜREÇLER

Sultanbeyli istasyonu konkors kazısı sırasında gerçekleştirilen deformasyon kontrollerinde yatay ve düşeyde beklenenden daha fazla hareket tespit edilmiştir ve bu doğrultuda tahkik analizleri yapılmıştır. Yerinde yapılan incelemeler ve deformasyon okumaları birlikte değerlendirildiğinde bu hareketin projede verilen sınırların üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

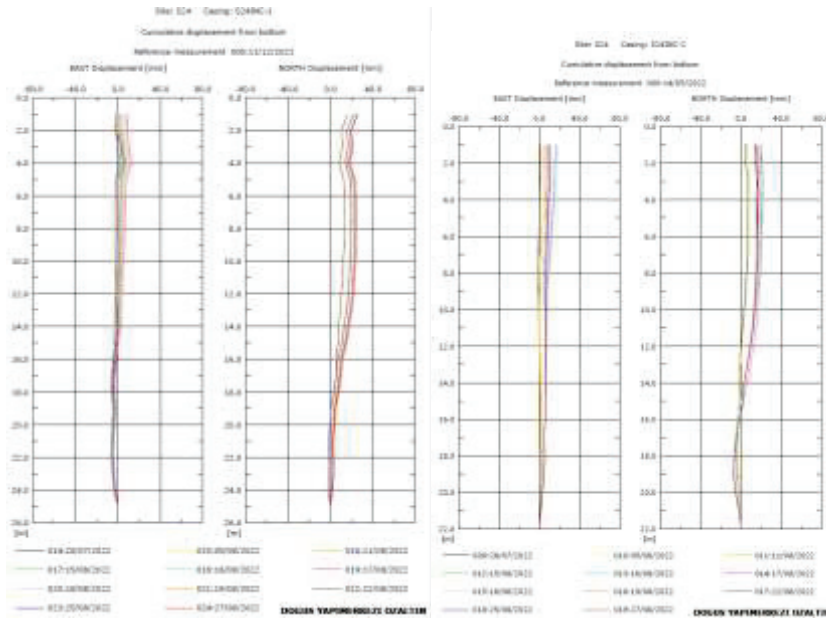
5.2 Deformasyon Okumaları

Söz konusu deformasyon istasyonunun TEM OTOYOLU kenarındaki A-B Cephesinde meydana gelmiştir.



Şekil 16. İnklinometre yerleri

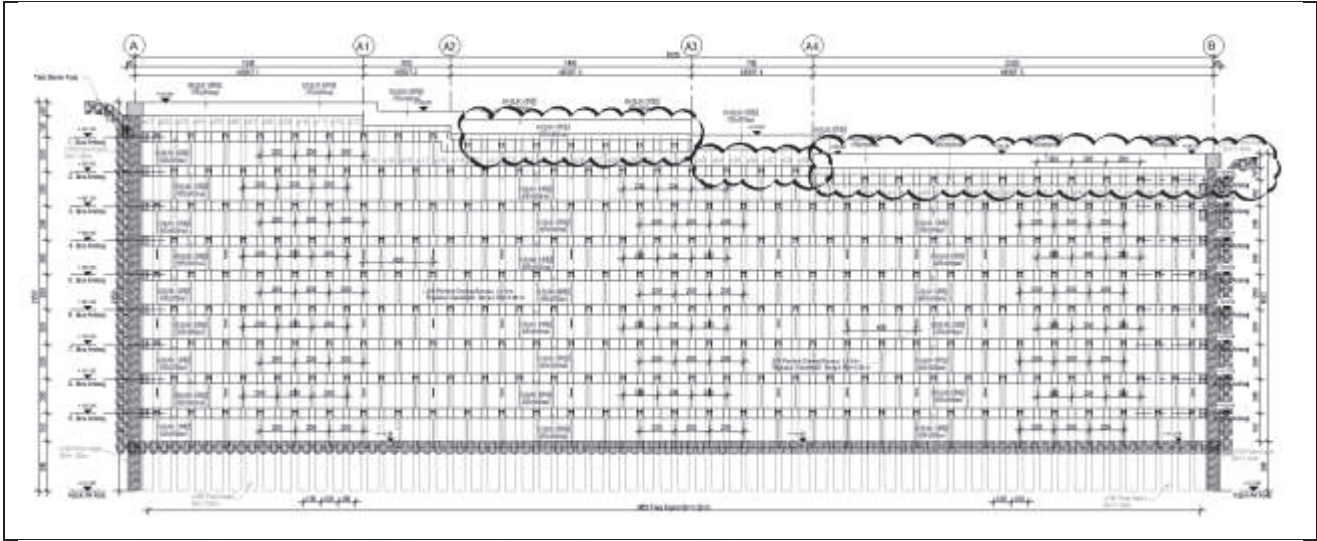
Bu cephede yer alan 2 adet inklinometre okumaları incelendiğinde ortalama 20mm yatay deplasman ölçülmüştür. (Şekil-17)



Şekil 17. A-B cephesi inklinometre okumaları

Aynı cephedeki reflektör okumaları ise inklinometre okumaları ile desteklenmese de 65-50 mm arasında değişkenlik göstermiş olup; başlık kirişi- yer betonu arasında ayrılmalar gözlenmiştir (Şekil 19).

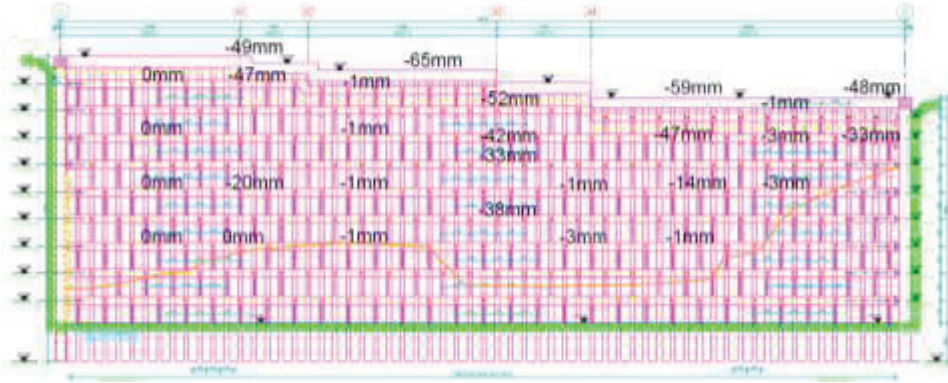
Söz konusu A-B cephesinde ilk sıra kuşak kirişlerindeki ankrajların altyapılarla etkileşimini azaltmak için ilk tasarıma göre kotları aşağıya alınarak kazıklardaki konsol mesafesi 2,8m – 3,2 m arası değişkenlik gösterecek şekilde arttırılmıştır. Revize tasarımda başlık kirişi seviyesindeki tasarım deplasman değerleri 4,43cm olarak tespit edilmiştir. Yapılan ölçümler 65 mm – 50 mm arasında değişkenlik gösterdiğinden ve ilgili cephe TEM Otoyolu yanında olduğundan kazı durdurularak deformasyonun ilerlememesi adına önlem faaliyetleri için koordinasyonlar yapılmıştır.



Revize edilen analizler sonucunda beklenen deplasman değerleri aşağıda sarılanmıştır.

	Kesit4_01 (konsol 2.8m)	Kesit4_02 (konsol 3.2m)	Kesit4 (mevcut tasarım)
Deplasman d/H	3.86/1862=2.07e-3	4.43/1772=2.5e-3	3.33/1862=1.79e-3

Şekil 18. Revize tasarım deplasmanlar



Şekil 19. AB cephesi reflektör okumaları (25.08.2022)

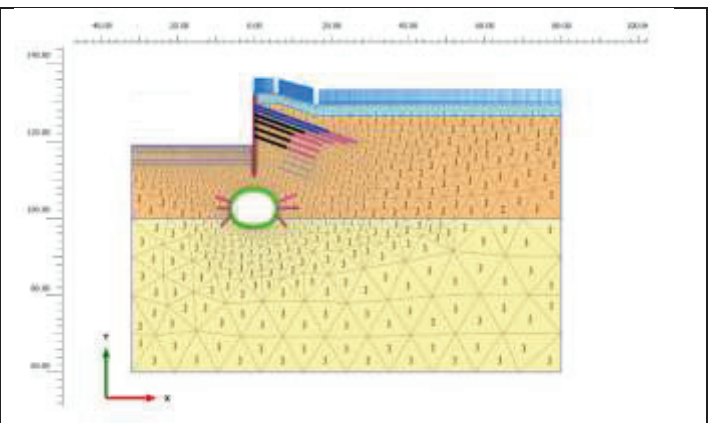
5.3 Zemin Profili

İstasyon üzerinde yapılan 2 adet sondaj ve inceleme alanında gerçekleştirilen saha ve laboratuvar çalışmaları incelendiğinde, proje alanında en üst kottan itibaren sırasıyla dolgu, Killi Siltli Kum ve devamındaki birim Çok Ayrışmış Kumtaşı bulunmaktadır. Tasarıma esas zemin / kaya birimleri Şekil-20’de verilmektedir.

Zemin/Kaya profili ve parametreleri – ICSS 55						
İdealize Zemin Profili – ICSS55 Sondajına göre						
Başlangıç	Bitiş	Zemin Tipi	γ (kN/m ³)	c' (kPa)- tasarım	φ' (°)	E' kPa (tasarım)
0	2.7	Dolgu	18	1	28	15000
2.7	40.0	Killi Siltli Kum	20	10	35	70000

Zemin/Kaya profili ve parametreleri – ICSS 56						
İdealize Zemin Profili- İdealize Zemin Profili – ICSS56 Sondajına göre						
Başlangıç	Bitiş	Zemin Tipi	γ (kN/m ³)	c' (kPa)- tasarım	φ' (°)	E' kPa (tasarım)
0	3.0	Dolgu	18	1	28	15000
3.0	32.0	Killi Siltli Kum	20	10	35	70000
32.0	40.0	Çok Ayrışmış Kumtaşı	24	50	32	70000

Şekil 20. Tasarım parametreleri



Şekil 21. Sayısal model

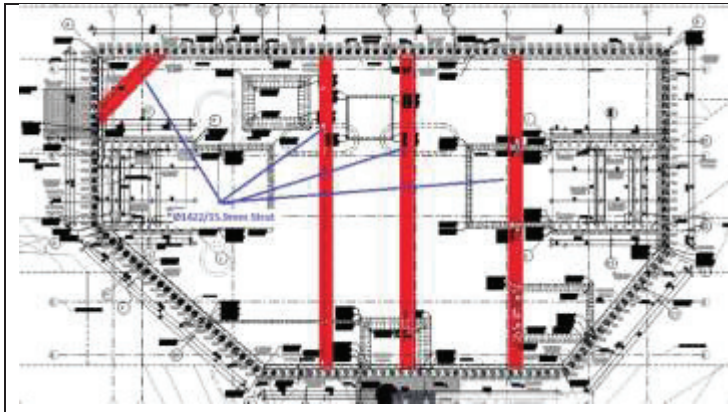
5.4 Sayısal Analiz

Projede verilerden daha derin kazı kademelerinin oluşması ve cephenin topuk seviyesi olmadan açık bırakılması gibi nedenlerden ötürü +119.00 kotunda reflektörler aracılığıyla yaklaşık 50 mm deformasyon olduğu belirlenmiştir. Verilen kazı kotunda bu deformasyon değerini elde edecek şekilde, geri analiz yöntemi kullanılarak kesit hesapları düzenlenmiş ve yeni zemin parametreleriyle hesaplar tekrarlanmıştır. A-B Cephesi Kesit-4 (Şekil-21) analizinde inklinometre ve reflektör ölçümlerinden elde edilen deformasyon miktarlarının ortalaması (48mm) kullanılmıştır. Ölçüm yapılan seviyede kazı +119.0 kotuna ulaşmıştır. Tüm analizler Tekfen Mühendislik A.Ş. tarafından yapılmıştır.

Geri analizlerde deformasyonu sınırlandırmak amacıyla strut elemanı kullanılmıştır. Başlık kirişi bölgesinde modellenen strut yardımıyla, A-B cephesinin üst kısmında oluşan deformasyonda herhangi bir artış olmadan, iksa sistemi deformasyonunun kabul edilebilir sınırlar içinde kalması sağlanarak kazı taban kotu seviyesine (+113.88) inilmesi hedeflenmiştir.

6 SAHA UYGULAMALARI

Sahada deformasyon ölçümleri tasarım projeksiyonunu aştığı andan itibaren kazı durdurulmuştur. Saha gözlemleri çeşitli uzmanlarca yapılmış ve okumalar sıklaştırılmıştır. Sayısal analiz sonucuna göre Şekil 21’de gösterildiği plan yerleşimine uygun olarak 4 adet Q1422-15,9mm strut atılmasına karar verilmiştir. Projeye göre hazırlanan strutlar yerine yerleştirilerek kazı devam ettirilmiştir ve taban kotuna inilebilmiştir.



Şekil 22. Öneri Strut Yerleşimi



Şekil 23. Sahada Strut Uygulaması

7 DEĞERLENDİRMELER

Çekmeköy – Sancaktepe – Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi (Hastane) – Taşdelen – Yenidoğan Metrosu İnşaat ve Elektromekanik Sistemler Temin, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri” kapsamında yapımına devam edilmekte olan “Sultanbeyli İstasyonu Geçici Kazı Destek Sisteminin” iksa sisteminde ölçülen deplasmanlarda artış gözlenmiştir. İksa yapısının A-B aksları arasındaki kazıklardaki deplasmanlar proje kriterlerini aşan değerlere ulaştığı için gerek çevredeki yapıların (bilhassa TEM OTOYOLU) gerekse iksanın kendi güvenliği bakımından önlem alınması gerektiğine karar verilerek imalatlar durdurulmuştur.

Deformasyonun kök sebeplerine inildiğinde, cephenin hemen altındaki peron tünellerinde de kazının devam ettiği, her iki hattın gelen tünel kazısının birleştirilerek tünel açma işleminin aynı zamanlarda tamamlanmasının (tünel kazısı – konkors kazısı etkileşimi) iksaya deformasyon olarak etkisi olabileceği değerlendirilmiştir.

Çalışmaya konu edilen Sultanbeyli İstasyonu'nda cephelerdeki ankraj imalatının, süresel kısıtlardan dolayı ve inklinometre okumalarının proje sınır değerlerinin çok altında olması sebebi ile cephe kazılarının önünün projede önerilen miktardan fazla açılmasının dolayısı ile desteksiz cephe uzunluğunun fazla olmasının da bu deformasyonları arttırdığı görülmüştür. Kazı alanı çevresindeki mevcut altyapı hatları sebebiyle projede verilen ankraj kotlarının değiştirilmesi/alt kotlarda imal edilmesi sebebi ile özellikle başlık kirişi seviyesindeki yatay deformasyonların arttığı görülmüştür.

Yapılan revize analizlerde kazı kotu +119.00 seviyesindeyken başlık seviyesinden ilave strut elemanı kullanılarak deformasyonun sınırlandırılması amaçlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre ilave strut elemanı sonrasında kazı taban kotundaki (+113.88 kotu) maksimum deformasyon 63 mm olarak elde edilmektedir.

+119.00 kotundan itibaren iksa sisteminin strut elemanı ile desteklenmesi deformasyonun kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasını sağlamıştır.

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 Doğuş İnşaat ve Tic. San. A.Ş.'ye olmak üzere projeye sağladıkları katkılar sebebi ile Sayın Kubilay KELEŞOĞLU ve Tekfen Mühendislik Geoteknik Grubu çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Keleşoğlu, K., 2020, *Abdurrahmangazi İstasyonu İksa Sisteminde Meydana Gelen Hareketlerin Değerlendirilmesi ve Alternatif Çözüm Önerileri Hususunda Geoteknik Rapor*, İstanbul Üni-Cerrahpaşa, İstanbul

Experimental Investigation of the Relationship Between Tunnel Volume Loss and Soil Arching in Sandy Ground

G. Khandouzi

School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

M.H. Khosravi (corresponding author)

*School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran;
Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran*

H. Mahmudi

School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT: By excavating a tunnel, soil arching happens and the stress field changes. Soil arching is defined as a transfer of forces from mobilized parts in the soil to stationary portions through development of shear stresses. Many valuable investigations have performed on soil arching around underground excavations. However, the relationship between the tunnel volume loss and soil arching is rarely experimentally investigated. Therefore the current research is an attempt to shed more light on the meaningful relationship between tunnel volume loss, soil arching, the formation of slip surface and the load exerted on the tunnel crown using physical modelling. The earth pressure variations around the tunnel were recorded through a series of soil pressure transducers and the ground deformation was monitored by image processing. According to the results, the density of the soil has a direct influence on the soil arching and a reverse effect on the ground deformation.

1 INTRODUCTION

Arching is one of the most well-known phenomena in granular materials observed on the field and experimental scale (Terzaghi, 1943). There are two types of arching in soil mass: active arch, where the minor principal stress paths are continuous and passive arch, where the major principal stress trajectory is continuous (Khosravi et al., 2018). Active arching occurs when the structure is more compressible than the surrounding soil, and arching can decrease the loads on a buried structure by as much as 95 percent. Passive arching happens when the soil is more compressible than the structure and arching can increase the load by several hundred percent (Evans, 1984; Tien, 1996).

Soil arching is a transfer of load from mobilized parts in the soil to a stationary portion. When the mobilized part moves downward relative to the stationary ones, an upward shear stress along the slip surfaces at the interface of the mobilized and stationary area is developed. This shear stress transfers a portion or full weight of the mobilized part to the stationary portion. This stress redistribution is often named positive soil arching. The positive soil arching changes the load distribution on underground structures, which affects their stability and deformations. Therefore, knowledge of the soil arching effect is necessary to comprehend the load-transfer mechanism around the underground structures (Han et al., 2017).

Soil arching was first discovered in a grain silo in France by military engineers. They found that the silo only carried a part of the full weight of grains. A similar event was observed in

buried pipe projects, in which the load on the top of the buried pipe was lower than the weight of the overburden soil (Marston and Anderson, 1913). Later, Terzaghi (1936) researched the soil arching phenomenon using a trapdoor experiment testing setup. His test results specified that when the trapdoor displacement increased, more than stress redistribution, the slip surfaces of the mobilized part were changed too. Costa et al. (2009) with experimental results and from previous research including Terzaghi (1936), Evans (1983), Vardoulakis et al. (1981), Stone and Wood (1992), Tanaka and Sakai (1993), and Santichaiant (2002) explained that the slip surface formation for trapdoors under deep conditions differed obviously from the shallow conditions. The slip surface for shallow conditions consists of the formation of multiple slip surfaces. Instead, for deep conditions, it includes the formation of a single slip surface (Costa et al., 2009).

Terzaghi (1943) simplified the curved slip surfaces into straight lines. The shape and height of the slip surfaces (i.e., dashed curves) change from 1 to 3 with the downward movement of the trapdoor, as shown in Figure 1. The vertical stress on the trapdoor, with the consideration of the soil arching, can be predicted by Equation 1 (Han et al., 2017).

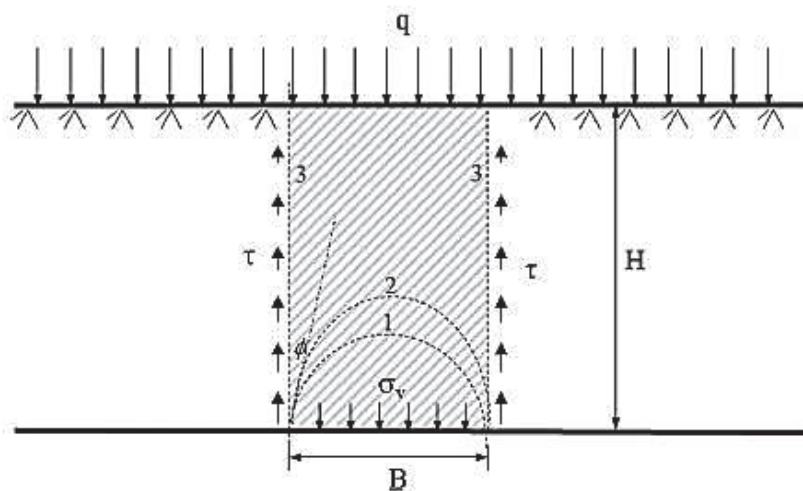


Figure 1. Schematic of trapdoor model considering soil arching (Han et al., 2017)

$$\sigma_v = \frac{B(\gamma - 2c/B)\gamma}{2k\tan\phi} (1 - e^{-2k\tan\phi H/B}) + qe^{-2k(\frac{h}{B})\tan\phi} \quad (1)$$

Where σ_v = vertical stress, B = width of the mobilized portion, c = effective cohesion of soil; ϕ = effective friction angle of soil, H = height of the mobilized part, q = surcharge on the surface, γ = unit weight of soil and k = lateral earth pressure coefficient.

Several methods have been suggested to improve Terzaghi's method. For example, Ladanyi and Hoyaux (1969), Evans (1983), Iglesia et al. (2013) tried to modify the Terzaghi's equation with consideration of soil arching effect under various conditions.

Iglesia et al. (2013) performed centrifuge tests to investigate the progress of soil arching with the displacement of the trapdoor and suggested a GRC (ground reaction curve), which is classified into four stages: (1) initial soil arching, (2) maximum soil arching (i.e., the minimum stress on the trapdoor), (3) stress recovery, and (4) ultimate state. GRC is defined as a curve that describes the pressure changes or progressive development of the soil arching ratio with the relative displacement. Han et al. (2017) simplified the GRC into three lines and discover that Terzaghi's equation forecasted the ultimate condition well at the trapdoor displacement equal to 10 % of the trapdoor width.

Rui et al. (2016) researched on the progress of soil arching in sand using 2D physical models and realized that the layouts of soil arching depended on trapdoor width, fill height (shallow and deep condition), and trapdoor displacement. Zhang et al. (2016) stated that the shearing bands extended from the corners of the trapdoor changed from inward oblique curves to vertical lines as the trapdoor displacement increases from several millimeters to a few centimeters, and then to outward oblique lines. The outward oblique lines only happened at sufficiently large displacements for large depth, or at limited displacement for small depth. Khatami et al. (2019) using the experimental result including Terzaghi (1943), Iglesia et al. (2013), Rui et al. (2016) and Zhang et al. (2016) classified the layout of soil arching into two classes: the inclination angle of shear or slip surfaces from vertical in the soil is either equated to the angle of internal friction, φ , or the dilation angle, ψ . Rui et al. (2019) performed a 2D trapdoor tests without and with geosynthetic reinforcement and found a localized deformation layout when geosynthetic reinforcement was used. Also, Al-Naddaf et al. (2019) performed a 2D trapdoor test without and with geosynthetic reinforcement. He presented that the displacement of the trapdoor led to the progressive mobilization of soil arching. He also showed that the geosynthetic reinforcement reduced soil arching mobilization due to the change of the soil deformation. This phenomenon resulted in increasing the applied surface load required to destroy soil arching.

So far, many analytical, experimental and numerical simulations of soil arching have been conducted under different conditions including fill height (shallow and deep condition), trapdoor width, soil internal friction angle, soil density, while little attention has been given to the soil arching mobilization, the slip surface formation and the load exerted on the tunnel crown. To better understand the effect of tunnel convergence and cover per diameter on soil arching mobilization, this paper presents a series of plane-strain (2D) physical model tests to investigate the partially and fully mobilized soil arching, the formation of slip surface and the load exerted on the tunnel crown.

2 PHYSICAL MODELING

2.1 Model Test Setup

The experimental setup used to simulate tunnel volume loss schematically was illustrated in Figure 2. The model container has dimensions of 30cm in width, 120cm in length, and 145cm in height. To observe the soil deformation during applying the tunnel volume loss, the front side of the container consisted of a transparent acrylic plate. Different components of the experimental setup are illustrated in Figure 2.

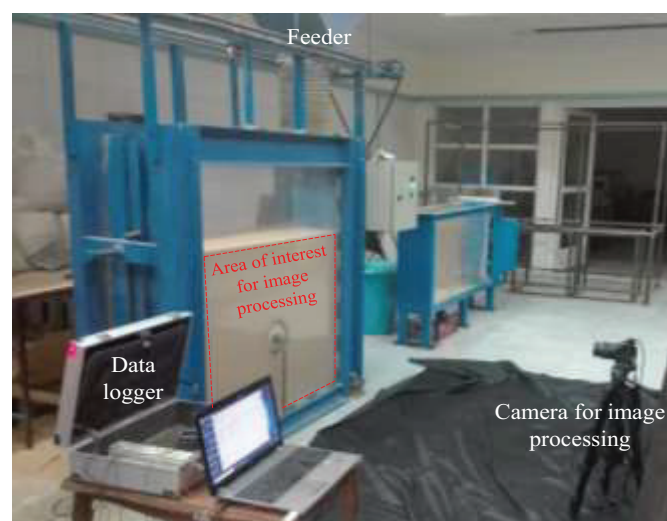


Figure 2. Setup of the physical model.

2.2 Model Material

The Firuzkuh silica sand with a uniformity coefficient of 2.3 and a mean particle size of 300 μm as a standard modeling soil in Iran was used in this study. The particle size distribution of the Firuzkuh silica sand No. 161 is presented in Figure 3. The dry sand has an internal friction angle of 36° and cohesion of zero.

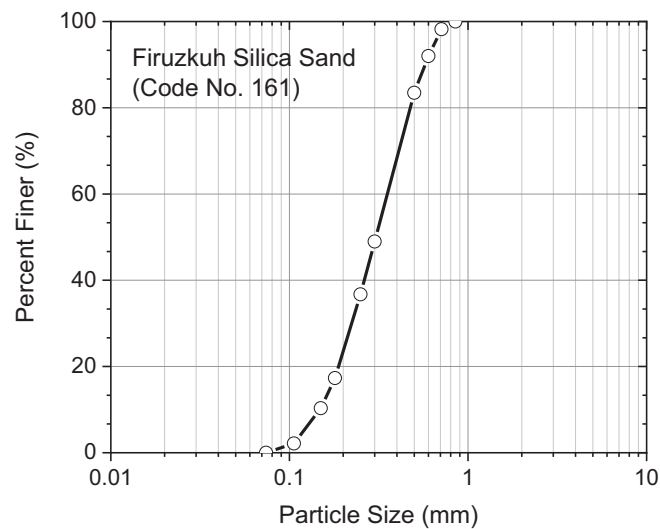


Figure 3. Particle size distribution of Firuzkuh silica sand used in this study

2.3 Model Preparation

In constructing the model, the sand pluviation method was used and the granular material was poured from a feeder under a specific falling height, illustrated in Figure 4. To achieve the uniform desired sand density, the whole model was filled under a constant feeder sweep rate of 1800 mm/min, a constant flow rate of 26 kg/min and a constant falling height of 100 mm. This process of preparation resulted in a uniform bulk density of $\rho = 1390 \text{ kg/m}^3$, corresponding to a relative density of $D_r = 10\%$ (representing a very loose sandy soil).

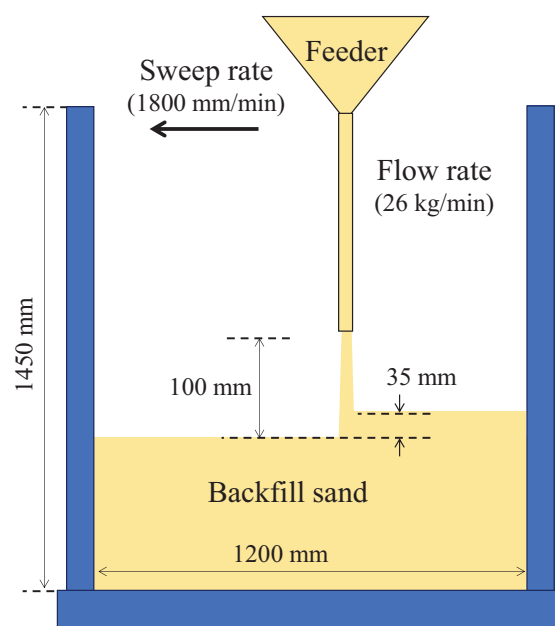


Figure 4. Model preparation for achieving a uniform bulk density of $\rho = 1390 \text{ kg/m}^3$.

2.4 Tunnel Volume Loss

The tunnel volume loss was simulated through a pack of conic wedges, as presented in Figure 5. The tunnel diameter can be reduced by drawing out the inner conic wedge. This technique is used by some other researches to simulate the tunnel convergence (Katoh et al., 1998; Boonsiri & Takemura, 2015). By this technique, the initial tunnel diameter of 180 mm was decreased to 160 mm, under a constant convergence speed of 1.33 mm/min.

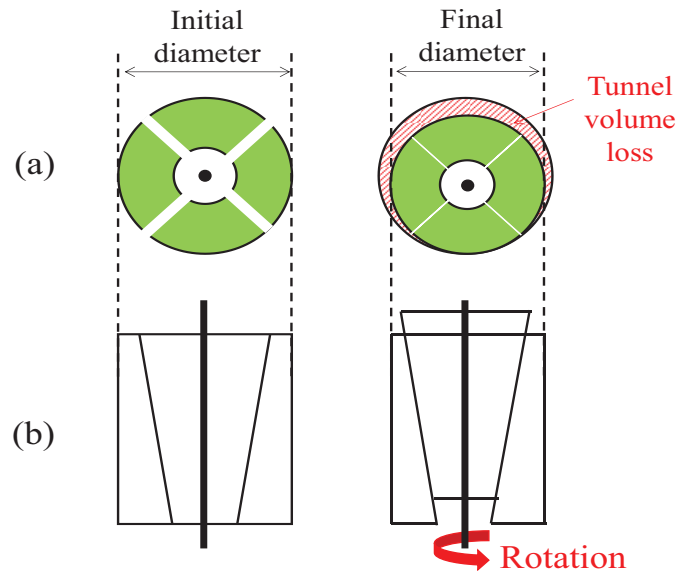


Figure 5. Tunnel volume loss simulation; (a) Front view, (b) plan view

2.5 Image Processing

The deformation contours were recorded by a camera and the displacement field was measured by the Particle Image Velocimetry (PIV) technique. This method, as a non-destructive method, is used for the estimation of deformation during physical modeling under both centrifugal (Marshall et al., 2012; Franza, 2016; Zhou, 2014) and 1-g conditions (Khosravi et al., 2011). A PIV camera was placed perpendicular to the front side of the container at a distance of 1 m, as presented in Figure 6. To prevent light reflection from a transparent acrylic plate and for higher resolution, a black curtain was hung behind the camera.

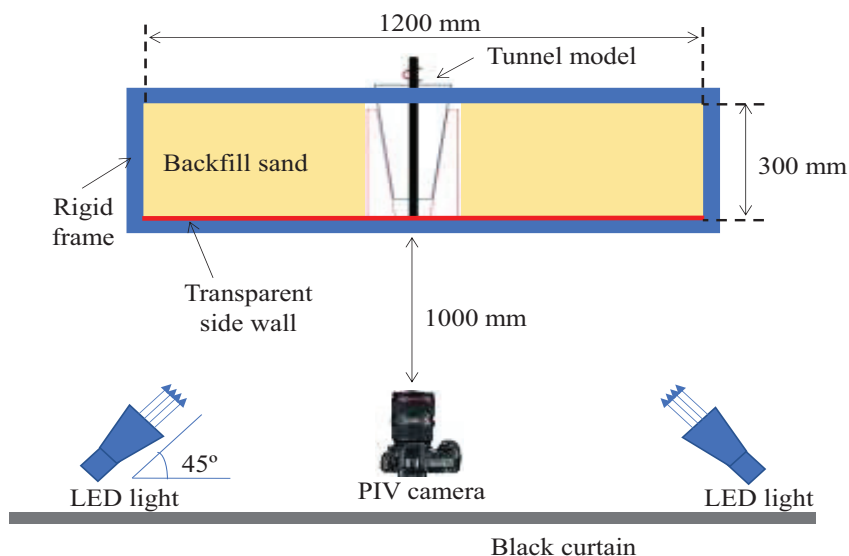


Figure 6. The image processing setup

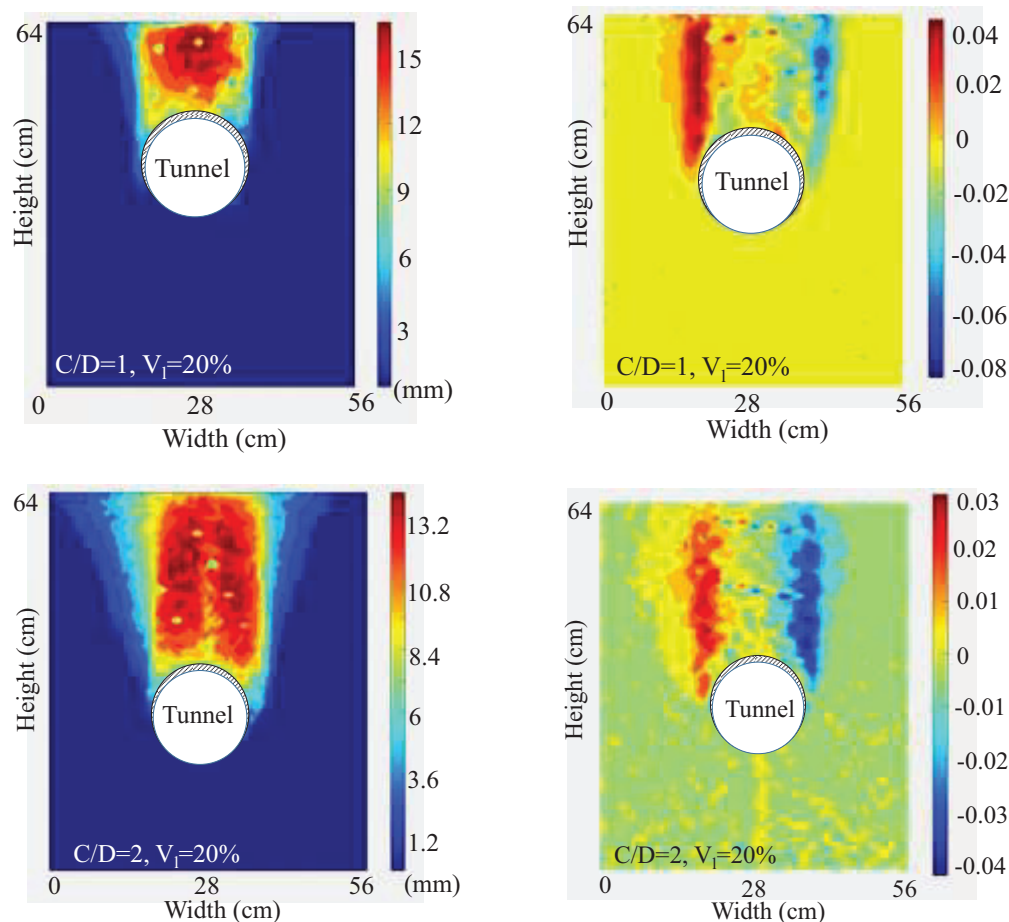
3 ANALYSIS OF TEST RESULTS

The tunnel volume loss (V_l) and cover per diameter (C/D) were selected as the governing variables in this research. To study the effect of these parameters on soil displacement, shear bands, soil arching, and tunnel pressure, several model tests were conducted.

Figure 7 shows the soil displacement field and shear strain contours at a tunnel volume loss of 20% under different $C/D=1, 2, 3, 4$.

The following observation can be summarized:

- For low cover per diameter ratios ($C/D=1$), the displacement field is localized at the tunnel centerline and is mostly in the zone between ± 10 cm offset from the tunnel centerline. For high cover per diameter ratios ($C/D=4$) the displacement field is spread out and is mostly in the zone between ± 28 cm offset from the tunnel centerline.
- For a known value of volume loss, the magnitudes of displacement and shear strain in low cover per diameter ratio is larger than that in high cover per diameter.
- For low cover per diameter ratios ($C/D=1$), the magnitude of displacement at the ground surface is almost equal to that near the tunnel crown, so the soil moves downward vertically as a rigid body in a chimney-like shape.
- When the cover per diameter increases ($C/D=4$), the displacement is localized above the tunnel and the displacement field decreases gradually toward the surface.
- Generally, the shear strains maximized at the tunnel shoulders (two sides of the tunnel). The shear bands extend from the tunnel to the ground surface with reducing values.



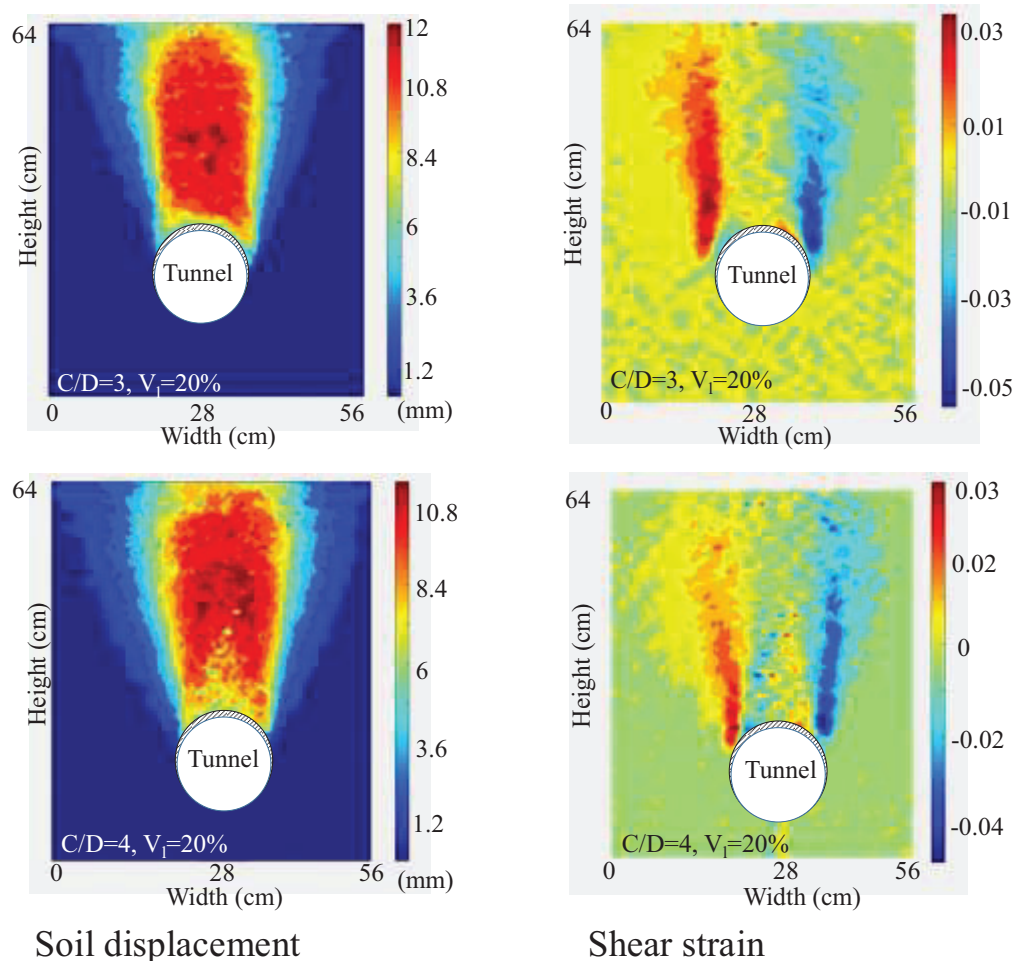


Figure 7. Soil displacement and shear strain contours under different C/D for the model tests with $D_r=10\%$ and $V_l=20\%$.

To consider the effect of volume loss on shear band development, the physical modeling were performed for $C/D=1, 2, 3, 4$ at a tunnel volume loss of 2.5, 5, 10% and the results are illustrated in Figure 8. According to this figure, the following observation can be summarized:

- The shear strain field at 2.5% volume loss shows that there is no significant difference in the shear strain for all four tests.
- At 5% volume loss, the development of shear band from the tunnel shoulder toward the surface becomes evident. Shear strain magnitudes are greatest near the tunnel shoulders and decrease along shear bands towards the surface.
- At 5% volume loss, for low cover per diameter ratio, the shear band extends near-vertically from the tunnel shoulders toward the ground surface while the wide shear band extends from the tunnel to the surface for higher cover per diameter ratios. This data supports the issue that for low cover per diameter the soil above the tunnel moves downwards as a rigid body in a chimney-like shape.
- At 10% volume loss, the shear band is better defined and a second shear band is visible for high cover per diameter that extends above the tunnel crown.

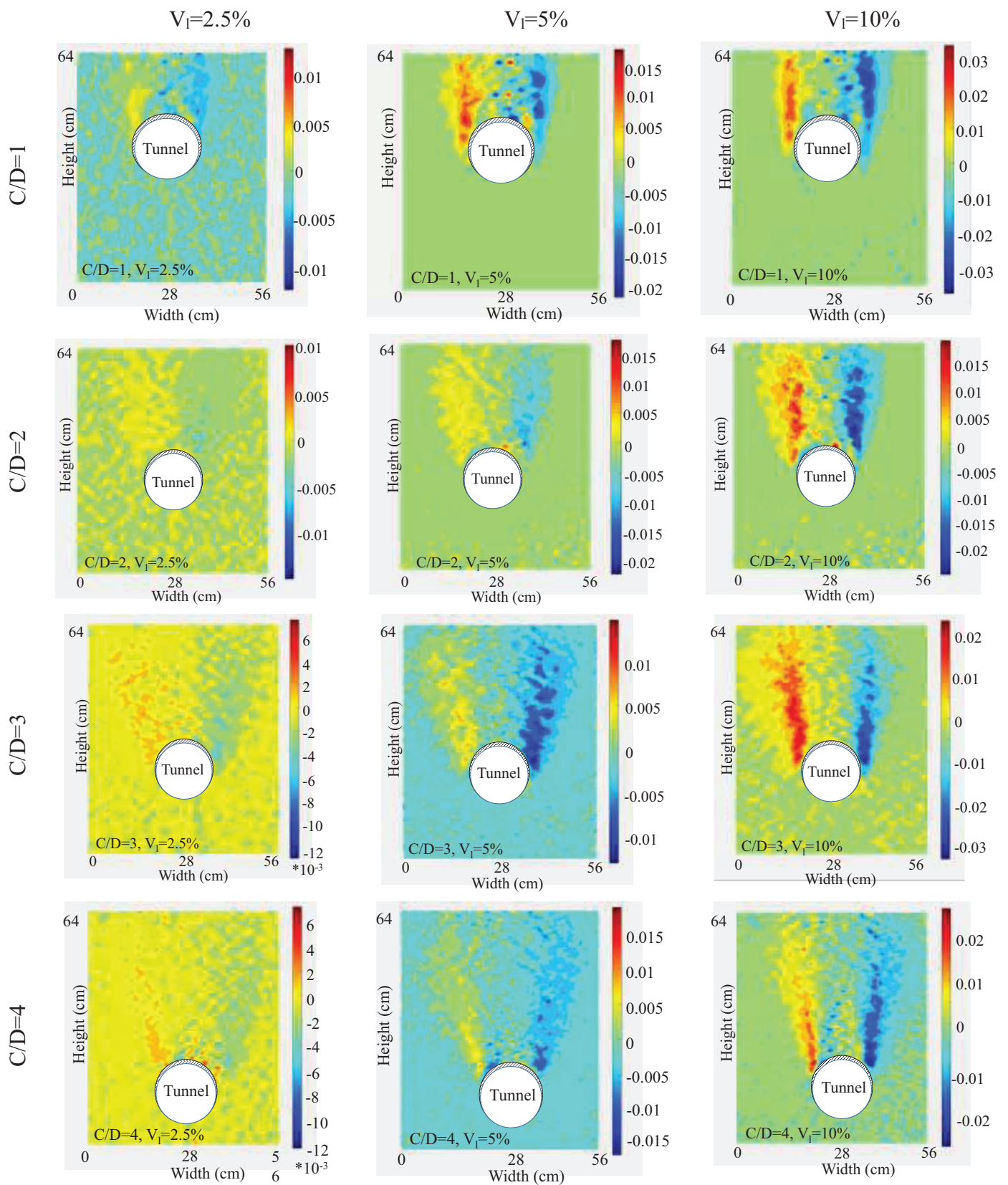


Figure 8. Shear strain contours under different C/D and V_i for the model tests with $D_r=10\%$

4 SOIL ARCHING AROUND THE TUNNEL

In view of the test results and their comparisons, it is obvious that the response of the soil near the tunnel crown contrasts with the surface. As depicted in Figure 7 and Figure 8, the

displacement contours exhibit a local deformation within the soil above the tunnel crown. This phenomenon above the tunnel crown may be related to soil arching.

Based on the concept of the soil arching effect (transferring stress from the yielding areas to the stable parts of the soil), the soil arching leads to load increase in the stable area. So, to make this phenomenon sensible, a set of pressure cells were used to measure the load along the tunnel spring-line in the horizontal direction as shown in Figure 9.

Figure 10 presents the change in the vertical stress on the sensors with increasing tunnel volume loss. Based on the experimental result, the tunnel convergence increases the vertical stress on the sensors. The reason is related to the soil arching effect.

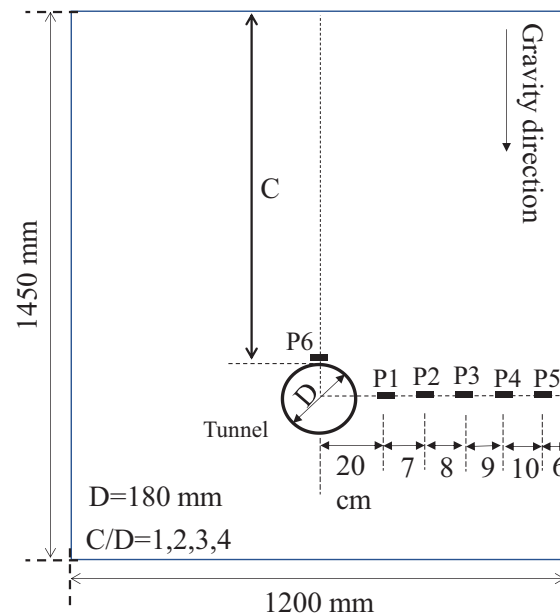


Figure 9. The position of sensor along the spring-line

Figure 10 depicts that in case (a), the highest vertical stress was recorded by sensors p1 and p2, which were located at distances of 20 and 27 cm from the tunnel centerline, respectively. In cases (b) and (c), the highest vertical stress was recorded by sensors p2 and p3, which were located at distances 27 and 35 cm from the tunnel centerline, respectively. It can be concluded that, by increasing the cover per diameter ratio, the stress arch get wider and a wider zone around the tunnel is disturbed. These results are consistent with the observations from image analysis presented in the previous section.

Due to the above mentioned phenomenon, it may be expected that the sensors p4 and p5 must record the highest vertical stress in the case (d), however the side effect of physical modeling lead to a reduction in pressure sensors p4 and p5 and the sensors p2 and p3 continued showing the highest values of vertical stress.

It is generally accepted that the shear stress in the soil depends on the relative displacement in the soil mass above the tunnel due to tunnel volume loss. Therefore, the degree of soil arching changes with the relative displacement. If the soil displacement is restricted, the shear stress in the soil medium should be lower than the shear strength, and soil arching at this condition is mentioned as partially mobilized soil arching. If the soil in the mobilized part is assumed at a yielding (i.e., ultimate) condition, and the shear stress at the interface is equal to its shear strength, soil arching at this condition is named fully mobilized soil arching (Han et al., 2017).

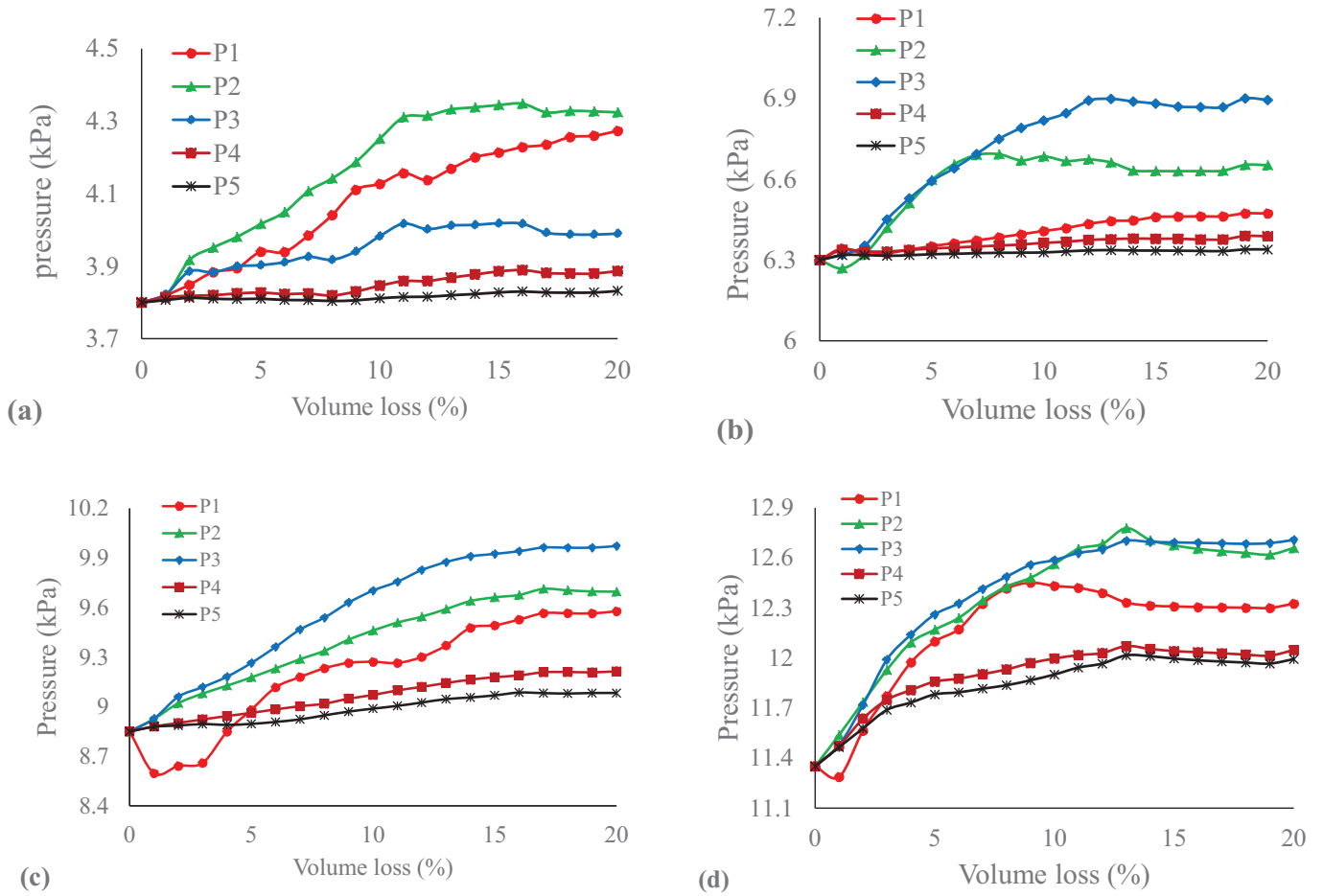


Figure 10. Stress distribution along the tunnel spring-line, (a) C/D=1, (b) C/D=2, (c) C/D=3, (d) C/D=4

Figure 11 shows the earth pressure change at the crown of the tunnel (recorded by P₆ in Figure 9) as the tunnel converges. Based on this figure, the earth pressure gradually decreases with tunnel convergence, and for a specific value, the tunnel pressure is minimal. This value corresponding to fully mobilized soil arching defines as critical volume loss. According to Figure 11, the critical volume loss is equal to 10% for C/D =4, and 13% and 16% for C/D=3 and 2, respectively.

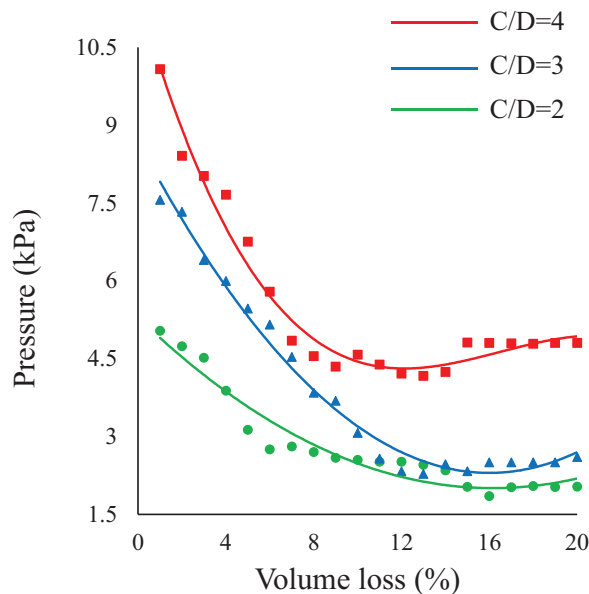


Figure 11. Vertical stress on tunnel crown versus tunnel volume loss

Figure 11 shows when the C/D is equal to 4, the minimum pressure exerted on the tunnel crown is 4.5 kPa and the minimum tunnel pressure is equal to 2 kPa for $C/D=2$. Therefore, when the C/D increases, the minimum load exerted on the tunnel crown increases. This phenomenon indicates that soil arching forms at a far distance from the tunnel crown. This result is compatible with the results of the sensors installed along the tunnel spring-line in the horizontal direction as shown in Figure 10 (When the C/D increase, the sensor 2 and 3 show high pressure)

5 CONCLUSIONS

A physical modeling setup was used for the simulation of tunnel convergence in sandy soils. A series of physical model tests were performed using Silica sand. The effect of the cover per diameter ratio and the tunnel volume loss on the shear strain and the ground deformation were examined. The ground deformation was analyzed through particle image velocimetry as a non-destructive technique. Based on this research, the main results are summarized as follows:

- The soil arching plays an important role in the description of tunneling-induced displacement mechanisms. This phenomenon leads to the load transfer from the mobilized part to the stationary area. It changes the stress field and causes load reduction on the tunnel crown.
- The soil arching leads to a local concentration of displacements in the soil above the tunnel crown and the transition from a chimney-like displacement field to a wide displacement field with increasing C/D .
- In general, ground displacement due to tunnel convergence tends to expand vertically within the arching zone. In the case of shallow tunnels, the arching causes the soil restricted to the vertical shear bands to move downward as a rigid body in a chimney-like shape.
- On the other hand, in the case of deep tunnels, the soil arching is moved to a far distance from the tunnel crown and the soil above the arching expands towards the ground surface in a wide pattern. In this case, the wider shear bands form, and the soil deformation is not localized anymore.
- The shear band initiates from the tunnel shoulder and extends toward the surface with tunnel volume loss. When the critical volume loss is achieved, the shear stress is equal to its strength, and fully mobilized soil arching forms.
- As the cover to diameter ratio increased from $C/D=2$ to 4, the critical volume loss was reduced from 16% to 10% but the minimum load on the tunnel crown increased. This phenomenon indicates that as C/D increases, the stress arch moves away from the excavation boundary.

REFERENCES

- Al-Naddaf, M., Han, J., Xu, C., Jawad, S., Abdulrasool, G., 2019. Experimental Investigation of Soil Arching Mobilization and Degradation under Localized Surface Loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, [https://doi: 10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002190](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002190).
- Boonsiri, a., Takemura, J., 2015. A Centrifuge Model Study on Pile Group Response to Adjacent Tunneling in Sand, *Japan Society of Civil Engineers*, 3, pp.1–18, [https://doi:10.2208/journalofjsce.3.1_1](https://doi.org/10.2208/journalofjsce.3.1_1).
- Costa, Y.D., Zornberg, J.G., Bueno, B.S., Costa, C.L., 2009. Failure Mechanisms in Sand over a Deep Active Trapdoor, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, [https://doi: 10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000134).
- Evans, C.H., 1984. An Examination of Arching in Granular Soils. Thesis (M.S.) Massachusetts Institute of Technology, 235p, <http://hdl.handle.net/1721.1/45181>.
- Franza, A., 2016. Tunneling and Its Effects on Piles and Piled Structures. PhD thesis. University of Nottingham, England, 279p.
- Han, J., Wang, F., Nadfaf, M., Xu, C., 2017. Progressive Development of Two-Dimensional Soil Arching with Displacement, *International Journal of Geomechanics*, [doi:10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001025](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001025).
- Iglesia, .R., Einstein, H.H., Whitman, R.V., 2013. Investigation of Soil Arching with Centrifuge Tests. *Journal*

- of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140(2):04013005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000998](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000998).
- Katoh, Y., Miyake, M., Wada, M., 1998. Ground deformation around shield tunnel. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Centrifuge Modelling (Centrifuge'98).
- Khatami, H.R., Deng, A., Jaaksa, M., 2019. An Experimental Study of the Active Arching Effect in Soil Using the Digital Image Correlation Technique. *Computer and Geotechnics*, 108, pp.183-196. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.023>.
- Khosravi, M.H., Pipatpongsa, T., Takahashi, A., Takemura, J., 2011. Arch Action Over an Excavated Pit on a Stable Scarp Investigated by Physical Model Tests, *Soils and Foundations*, 51 (4), pp.723–735, <https://doi.org/10.3208/sandf.51.723>.
- Khosravi, M.H., Bahhaddini, M., Kargar, A.R., Pipatpongsa, T., 2018. Soil Arching Behind Retaining Walls under Active Translation Mode: Review and New Insights. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, IJMGE 52-2, <https://doi/10.22059/ijmge.2018.264011.594754>.
- Ladanyi, B., and B. Hoyaux 1969. A Study of the Trap-Door Problem in a Granular Mass, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 6, No. 1, pp.1-14, <https://doi: 10.1139/t69-001>.
- Marston, A., Anderson, A.O., 1913. The Theory of Loads on Pipes in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe, Issue 31 of Bulletin no. 31, Engineering Experiment Station, 31, 181p.
- Marshall, A., Farrell, R., Klar, A., Mair, R., 2012. Tunnels in Sands: The Effect of Size, Depth and Volume Loss on Greenfield Displacements, *Geotechnique*, 62 (5), pp.385–399, <https://doi: 10.1680/geot.10.P.047>.
- Rui, R., Tol, F.V., Xia, Y. Y., Eekelen, S. J. M., Hu, G., 2016. Investigation of Soil-Arch Development in Dense Sand by 2D Model Tests, *Geotechnical Testing Journal*, vol 39, no 3, <https://doi: 10.1520/GTJ20150130>.
- Rui, R., J. Han, S. J. M. van Eekelen, and Y. Wang. 2019. Experimental Investigation of Soil Arching Evolution in Unreinforced and Geosynthetic Reinforced Pile-Supported Embankments, *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(1):04018103. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002000](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002000).
- Stone, K. J. L., and Muir Wood, D. 1992. Effects of Dilatancy and Particle Size Observed in Model Tests on Sand. *Soils and Foundations*, 32(4), pp.43–57, https://doi: 10.3208/sandf1972.32.4_43.
- Santichaianaint, K. 2002. Centrifuge Modeling and Analysis of Active Trapdoor in Sand, PhD thesis, Department of Civil Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado at Boulder.
- Terzaghi, K., 1936. Stress Distribution in Dry and in Saturated Sand Above a Yielding Trap-Door, Proceedings, First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Massachusetts, pp. 307-311.
- Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc, New York & London, pp. 66-76, <https://doi: 10.1002/9780470172766>.
- Tanaka, T., and Sakai, T. 1993. Progressive Failure and Scale Effect of Trap-door Problems with Granular Materials, *Soils and Foundations*, 33(1), pp.11– 22, <https://doi.org/10.3208/sandf1972.33.11>.
- Tien, H.J., 1996. A Literature Study of The Arching Effect, Thesis (M.S.) Massachusetts institute of technology, National Taiwan University, 196p, <http://hdl.handle.net/1721.1/39056>.
- Vardoulakis, I., Graf, B., and Gudehus, G., 1981. Trap-door Problem with Dry Sand: A Statical approach based upon model kinematics, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 5, pp. 57–78, <https://doi.org/10.1002/nag.1610050106>.
- Zhou, B., 2014. Tunneling-Induced Ground Displacements in Sand, PhD thesis, University of Nottingham, England, 227p.
- Zhang, H., Zhang, P., Zhou, W., Dong, S., Ma, B., 2016. A New Model to Predict Soil Pressure Acting on Deep Burial Jacked Pipes, *Tunneling and Underground Space Technology*, 60, pp.183-196, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2016.09.005>.

Sapanca-Geyve Arası Yüksek Hızlı Tren Tünelleri İnşaatı GT5 Şantiyesi Tüneli Kazı Destekleme Aşamasında Karşılaşılan Problemler ve Bunlara Karşı Alınan Önlemler

Construction of High-Speed Train Tunnels Between Sapanca-Geyve GT5 Construction Site Problems Encountered in The GT5 Construction Site Tunnel Construction and Measures Taken Against These

E. Aycan

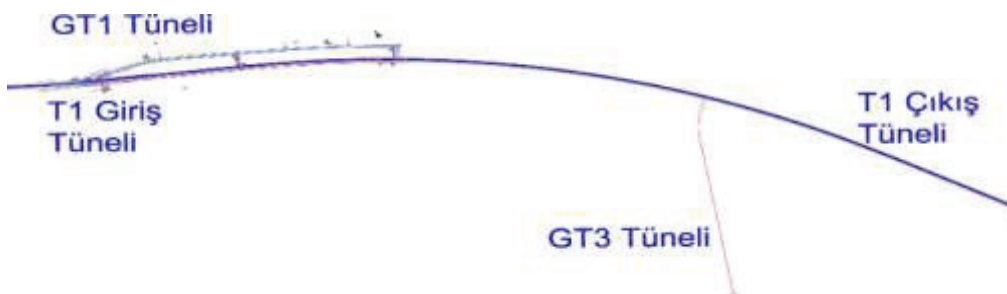
Soner Temel Mühendislik İnşaat ve Tic. A.Ş., Sakarya)

ÖZET Sakarya’da Sapanca-Geyve arası Kuzey Anadolu fay hattının etki alanında yüksek hızlı tren tünelleri inşaatında güvenlik tüneli 5 şantiyesinde yapımı devam eden tünelin inşaatında yaşanan sorunlar, uygulanan ilerleme metotları anlatılmıştır. Ön desteklemeli tünel kazı-destekleme işleri esnasında öngörülen tünel batma miktarının yaklaşık 3.5 katına çıkan batmalar karşısında yerinde alınan önlemler anlatılmıştır. Bu metotların deformasyonlara etkileri incelenmiştir. Alınan ilave önlemler ve önlemlerin üretim hızına etkileri konuları tartışılmıştır.

ABSTRACT The problems experienced in the construction of the tunnel, which is under construction at the safety tunnel 5 construction site in the construction of high-speed train tunnels in the area of influence of the North Anatolian fault line between Sapanca-Geyve in Sakarya, and the progress methods applied are explained. During the pre-supported tunnel excavation-support works, the precautions taken against the sinkings, which are approximately 3.5 times the predicted tunnel sinking amount, are explained. The effects of these methods on deformations were investigated. The additional measures taken and the effects of the measures on the production rate were discussed.

1 PROJENİN TANIMI

Proje Sakarya ilinde Sapanca-Geyve arasında yapımı devam eden iki tüpten oluşmaktadır. Bu iki tüp T1 (2880 m) ve T2 (4664 m) olarak adlandırılmaktadır. T1 tüneli giriş ve çıkış olarak adlandırılan iki ayna da kazı yapılarak ilerlemektedir (Şekil 1). Giriş aynasında 304 m, çıkış aynasında 863 m tünel yapılmış olup, 2880 m tünelin toplam 1167 m’lik bölümü yapılmıştır. Bu tüneller ile birlikte iki güvenlik tüneli imalatı da eş zamanlı olarak devam etmektedir.



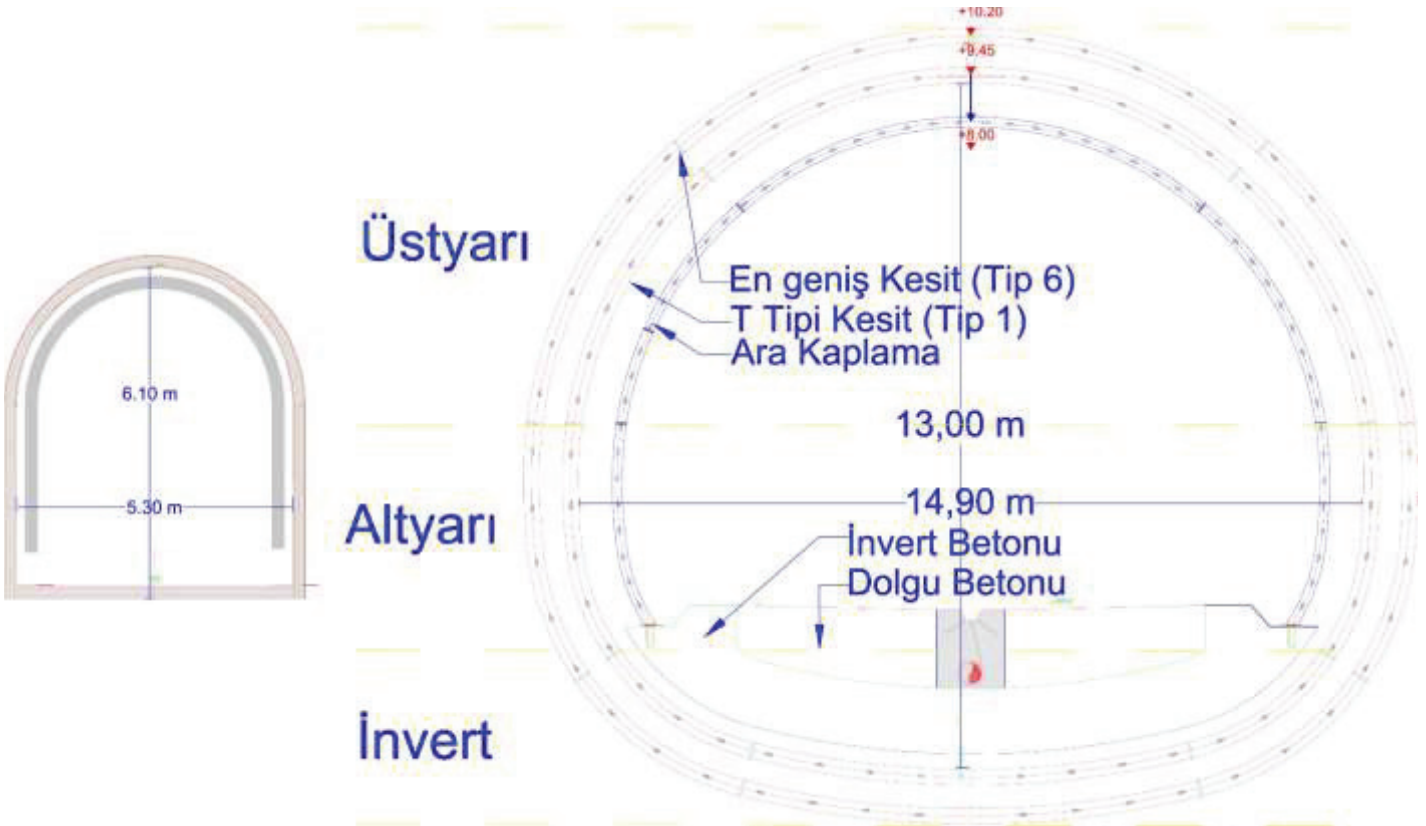
Şekil 1. T1 tünelinin planı

T2 tüneline aynı şekilde giriş ve çıkış aynaları mevcuttur (Şekil 2). Bu aynaların dışında GT5 güvenlik tüneline daha hızlı ilerlemesi adına ileri ve geri ayna açılması planlanmıştır. Giriş aynasında 623 m, çıkış aynasında 1285 m ve GT5 te geri aynasında 103 m tünel yapılmış olup, 4664 m tüneline toplam 2011 m'lik bölümü yapılmıştır. Bu tüpte GT5 ve GT6 güvenlik tünelleri bitmiş olup GT4 tüneline devam etmektedir.



Şekil 2. T2 tüneline planı

Projede iki tip tünel kesit imalatı yapılmaktadır. Güvenlik tünellerinde at nalı tipi (Genişliği 5.30 m, yüksekliği 6.10 m, alanı 29.30 m²) kesit ile tek aşamada yapılmaktadır (Şekil 3). Hızlı trenin kullanacağı tünel ise T tipi kesit (Genişliği 14.90 m, yüksekliği 13.00 m, alanı 157.80 m²) üç aşamada yapılmaktadır (Şekil 3). Bu aşamalar üstyarı, altyarı ve invert şeklinde adlandırılmaktadır. Kazı aşamaları sonrası invert betonu, ara kaplama ve kemer betonu ile tahkimat tamamlanmaktadır.



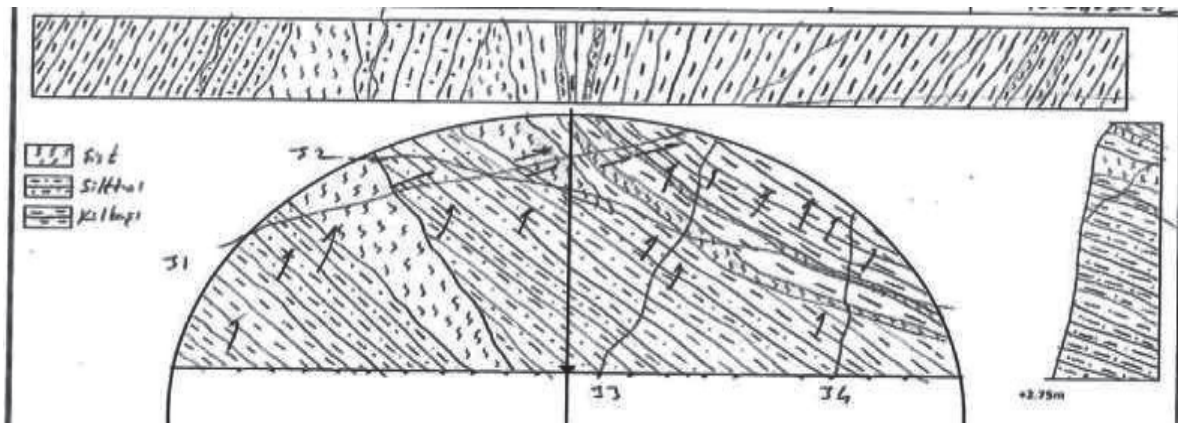
Şekil 3. Solda at nalı tip kesiti ve sağda T tip kesiti

2 BÖLGENİN JEOLojİSİ

Bölgenin yapan Bölgenin en genç çökellerini oluşturan karasal çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı ardanmasıdır. Safranbolu ve Karabük civarındaki sırtlarda korunmuş olarak gözlenen birimin bu kesimlerde tip kesitleri izlenir. İnceleme alanında Adapazarı'nın güneyinde geniş yüzlekler sunar. Önceki çalışmalarda Karapürçek formasyonu (Qk), Örencik formasyonu (Tplö) ve Ilgaz formasyonu (Tı1) ile denestirilen bu birim alüvyon yelpazesi ve akarsu dolgularından oluşur. KAF zonunda Neojen öncesi temel kayaların üzerine açısız uyumsuzlukla gelen birim Geç Pleyistosen yaşlı Sakarya Nehri sekileri ve Holosen dolguları tarafından uyumsuz olarak üzerlenir. Birimin tabanı kötü boylanmış, gri, boz, sarımsı renkli çakıltaşı ile gri, siyahımsı, sarı, kahve renklerinde kumtaşı, siltaşı ve koyu gri, siyah, yeşil ve mavimtırak gri renklerdeki kıltaşı ardanmasından oluşan alüvyon yelpazesi çökelleridir. Birimin tabanını oluşturan, Değirmendere üyesi olarak da adlandırılan kaya türleri yanal ve düşey yönde geçişlidir. Değirmendere üyesi, formasyonun Kumbaşı üyesi ile yanal geçişlidir. Üstte yerel uyumsuzlukla Hendek üyesi tarafından aşındırılmalı dokanakla örtülür. Sakarya Nehri boyunca yüzeylenen akarsu yatağı ve taşkın ovası çökelleri Kumbaşı üyesi olarak tanımlanır. Gri, boz, açık renklerde çakıltaşı, gri, sarımtırak ve kahve renklerde kumtaşı, siltaşı ve koyu gri, siyah ve yeşilimsi renkli kıltaşı ardanmasından oluşan üye Değirmendere üyesi ile yanal geçişlidir. Karapürçek formasyonunun en genç üyesi olan Hendek üyesi, alüvyon yelpazesi çökellerinden oluşmaktadır. Kırmızı, kahve ve sarımsı renklerinde, kötü boylanmış, gevşek ve az tutturulmuş çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı ve siltaşından oluşan üye, renkleri dolayısıyla formasyonun diğer üyelerinden kolayca ayırt edilebilmektedir. Adapazarı çek-ayır havzası güneyinde formasyonun diğer üyelerine oranla daha az tektonik deformasyon gösteren üye, Sakarya Nehri'nin Geç Pleyistosen yaşlı akarsu şekilleri ve Holosen çökelleri tarafından açısız uyumsuzlukla üzerlenmektedir.

2.1 Tünel Jeolojisi

Tünel inşaatının yapıldığı güzergahta Örencik formasyonu hakimdir. Kırmızı, sarımsı kırmızı, kahve renkli konglomera, kumtaşı, çamurtaşı ardanması ile temsil edilir. Birim genelde çok az tutturulmuş olup, orta-kalın tabakalanma gösterir. Yer yer tabakalanması belirsizdir. Çakıltaşları aşınmalı tabanlı, kötü boylanmalı olup çakılları yuvarlak-az yuvarlaktır. Üste doğru kumtaşlarına ve çamurtaşlarına derecelenme gösterir. Kumtaşlarında sarımsı kırmızı renk baskın olup, ince-orta-kaba tanelidirler. Kumtaşı tabakalarında paralel ve çapraz laminalar sıkça gözlenir. Örencik formasyonu kendinden yaşlı tüm birimler üzerinde açısız uyumsuz olarak yer alır. Formasyon 50-100 m arasında bir kalınlığa sahiptir. Ayna genel olarak kuru kilden oluşmaktadır. Su muhtevası yapılan deneyler sonrası %14 çıkmıştır. Aynada yer yer fosil içerikli kil tabakaları mevcuttur. Soldan sağa doğru 45 dereceye yakın yataklanmalar mevcuttur. Bu yataklanmalar arasında aderans zayıftır. Aynanın orta bölge hizasında aynanın solundan



Şekil 4. Sahada karşılaşılan bir aynanın çizimi

sağına doğru eğimli kumlu kil tabakası mevcuttur (Şekil 4 ve 5). Aynada cilalı yüzlü, çok zayıf dayanımlı, çok ayrılmış silt ve kilaşı bu tabakalar arasında ayrılmış yapraksı yapıda şist birimleri yer almaktadır. Ayna çok az nemli olup süreksizlik ve eklemler mevcuttur.



Şekil 5. Aynadaki tabakaların ve formasyonun görünümü

3 TÜNEL KAZI-DESTEKLEME SIRASINDA KARŞILAŞILAN PROBLEMLER

Projede çalışılan diğer şantiyelerde aylık ortalama ilerleme 4-5 set (18.0-22.5 m) mertebesinde dir. Bu GT5 şantiyesinde T2 geri aynasında ise 2 set (9 m) üstüne çıkamamıştır. Bunun en temel sebebi deformasyon oluşumunun proje değerlerinde kalmamış olmasıdır. Projede ön görülen maksimum deformasyon değerleri, güvenlik tünellerinde 15 cm, ana hatta ise 20 cm olarak hesaplanmıştır. Tünel bu değeri aştığında tünelde aşamalar arası mesafelere bakmaksızın ringin kapatılması gerektiği projede belirtilmiştir. Aşamalar arası mesafe açık olamadığından diğer tünellerde olduğu gibi eş zamanlı çalışmalar yapılamamıştır. Tüneli proje değerlerinde ilerletmek için, aşamalar arası mesafe açılmaya çalışıldığında, projede belirtilen maksimum deformasyon değerini aşmış ve tünel içerisinde çatlamlar meydana gelmiştir. Projede belirtilen Üstyarı-Atyarı mesafesi 20-25 m, Altyarı-İnvert 10-15 m mesafesi ve Üstyarı-Ara Kaplama (Ara Kaplama: Profil iksa, çelik sac ve beton ile yapılan kemerleme çalışması) mesafesi 35-40 m olarak belirtilmiştir. Deformasyonun 20 cm yaklaştığında ara kaplama yapılması gerektiği belirtilmiştir. Sahada ise mesafeler Üstyarı-Atyarı mesafesi 9 m, Altyarı-İnvert 1.5 m mesafesi ve Üstyarı-Ara kaplama mesafesi 12 m olarak devam etmiştir. Bu kısa mesafeler aralığında çalışmalar yapılırken, bir önceki çalışmanın bitmesini beklemek zorunda kalınmıştır.

Ana hat tüneline başlamadan önce, at nalı tipi tünelden ana tünel kesitine geçişi sağlamak için (Şekil 6) yükselme ve genişleme yapılmaya çalışılmıştır. Zemin şartlarının da etkisi ile yükselme ve genişlemede ilave tahkimatlar yapılması gerekmiştir. Ayna stabilitesi için, ayna zemin çivileri, ayna robotleri ise proje değerinin iki katı sayıda yapılmıştır. Güvenlik tüneli içinde radyal yönde zeminin farklı katmanlarından tutunması amacıyla 12 m, 15 m ve 18 m ibo bulon imalatları yapılmıştır. Kazı sırasında ayna sökümlerinden kaynaklı iksa montajları

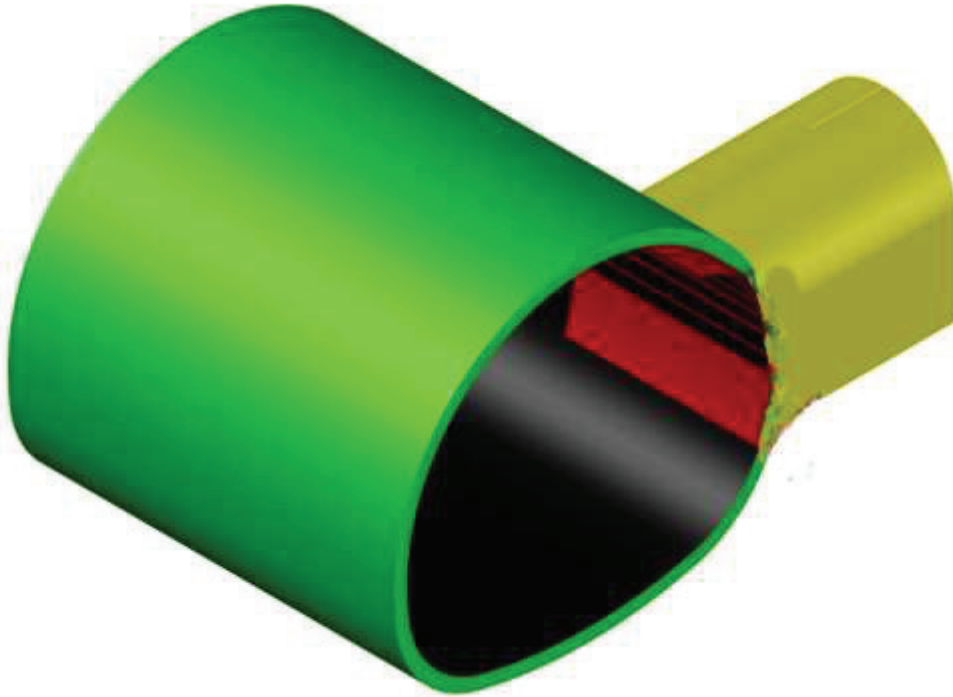
yukarıdan aşağı, kademeli ayna kapatılarak, parça parça montaj yapılmıştır. At nalı tip kesitten ana hatta geçişte ayna robot delgisi parçalı kırılarak delgi ve enjeksiyonlar yapılmıştır.

İnşaatına devam eden GT5 şantiyesindeki ana hat tünelin başlangıcında proje değerinin 5 katına kadar deformasyonlar oluşmuştur. At nalı tüneli ve ana hat tüneli içinde kırılmalar ve çatlamlar meydana gelmiştir. Bu durum redüksiyon (Güvenlik tüneli-ana hat bağlantısı) bölgesine uygulanan tahkimatın deformasyona yenildiğini göstermiştir. Bu çatlamlar, kırılmalar olmasına rağmen, tünelde imalat aşamasında yapılan ve çekme testlerinde olumlu sonuç vermesine karşın ibo bulonlar da hareket belirtileri gözlenmemiştir.

Ana tünele güvenlik tüneline giriş yapılmıştı ve ilave tahkimatlar ile redüksiyon bölgesi daralarak giriş çıkış için kullanılan yol 5.30 m'den 3.20 m daraltılmak zorunda kalmıştır.

Ayna sökülmelerinin önüne geçmek adına çeşitli boylarda zemin çivileri uygulanmıştır. Bu uygulamalar neticesinde zemin ile enjeksiyon arasında oluşan sürtünmenin toplam batmaya karşı koyma kapasitesi düşük olduğu izlenimi yerinde edinildiğinden 18 m lik zemin çivilerinin yapılması zorunlu hale gelmiştir. Ayna zemin çivilerine karşın ayna sökülmelerinin devam ettiği zamanlarda aynaya emniyet püskürtme beton uygulanmıştır. Ancak emniyetin yetersi olduğu aynalarda, ayna yukarıdan aşağı kademeli olarak kazılmıştır. Kazılan bölgeler çelik hasır ve püskürtme beton uygulanarak kapatılmıştır. İksa kurulumu için gerekli bölgenin aynası tahkim edildikten sonra iksa montajı yapılmıştır.

Tünelde anolar arası geçişlerde kırılmaların yaşanması nedeniyle ilave destekler yapılmaya çalışılmıştır. Aşamalar arası mesafe kısa tutulduğunda ise imalat aşamalarında ki işler daha yavaş yapılır hale gelmiştir. Tünelde iş akışının yavaş ilerlemesi ringin kapatılma süresini uzatmıştır. Bu durum devam eden deformasyonun önüne geçmeyi geciktirmiştir. Deformasyonun durma noktasına gelmesi, ring kapatılması ve ara kaplama yapılıp betonun dökülmesinin ardından mümkün hale gelmiştir.



Şekil 6. At nalı tip kesitten T tip kesite geçiş (Güvenlik tüneline ana hatta bağlantı)

Atnalı tüneli kesit itibariyle iki araç (mikser ve kamyon) yan yana geçişe uygun dizayn edilmemiştir. Bundan dolayı hafriyat kamyonu, beton mikseri, içeri malzeme nakli için gereken iş makineleri arasında oluşacak trafiğin önüne geçmek gerekmiştir. Bu trafiği azaltmak adına bant konveyör kurulmuştur. Malzeme nakli tünel kesiti uygun ölçülerde olmadığından stok yapılamamıştır. Güvenlik tüneli bitinceye kadar ve ana hat tüneli 50. m ulaşana kadar, mikserler geri geri tünele (480 m) gelmek zorunda kalmıştır. Mikserlerin geri geri gelmesi, beton sevkiyatında her mikserde, 30 dk içeri girmesinde zaman kaybettirmiştir (Şekil 7 ve 8).



Şekil 7. Güvenlik tüneline girilerek T2 tüneline geçiş Şekil 8. T2 tüneline girilerek güvenlik tüneline geçiş

4 PROBLEMLERE KARŞI ALINAN ÖNLEMLER

4.1 Batmaya Karşı Alınan Önlemler ve Sonuçları

4.1.1 İbo bulon

Tünel içi oturumların önüne geçmek adına projeye ilave olarak radyal yönde ibo bulon dahil edilmiştir. İbo bulonlar ilk başta 9 m yapılmıştır. Ölçümler takip edildiğinde deformasyonun devam ettiği ancak ibo bulonlarda zorlanmaların meydana gelmediği gözlenmiştir. Bu durum karşısında ibo bulon boyu 12 m ve delgi çapı 51 mm'den 76 mm çıkarılmıştır. Çekme testleri ile kontrol edildiğinde 29 tonluk çekmeye karşılık verdiği gözlenmiştir. Buda bize tünelin kütle halinde oturduğunu göstermiştir.

4.1.2 Eğik kendi delen süren

Oturumların devam etmesi ile birlikte ibo bulonlara destek olması için projedeki yanlara kendi delen sürenlere ilave destek eğik kendi delen süren yapılmıştır (Şekil 9). Oturumların önüne geçmesi amacıyla, oturma kazığı gibi çalışması için invert kazı aşaması sonrasında tabana kendi delen süren uygulaması yapılmıştır (Şekil 10).



Şekil 9. Eğik kendi delen süren uygulaması



Şekil 10. İnvirt aşamasında oturma kazığı uygulaması

4.1.3 Bandaj iksa

Tünel içi deformasyonlara bağlı batma olmuştur. Bu batmalar neticesinde özellikle set geçişlerinde çatlamlar ve kırılmalar meydana gelmiştir (Şekil 11). Deforme olan bu kısımların dayanımı arttırmak için set geçiş bölgelerine bandajlama uygulanmıştır (Şekil 12). Deformasyona yenilen bölgedeki tahkimatı kalınlaştırarak deforme olan bölge desteklenmiştir. Bandaj işlemi Şekil 11’de görüldüğü gibi bir durum olduğu aşamaya göre 1. kademe invert iksasına, altyarı iksasına ve invert iksasına oturtularak kırılan bölge desteklenmiştir. Bu sayede deformasyon yavaşlatılmıştır. Ara kaplama betonu yapılanaya kadar bölgenin daha güçlü olması sağlanmıştır.



Şekil 11. Bandaj iksa uygulaması öncesi oluşan çatlak



Şekil 12. Bandaj iksa

Bandaj iksa kurulumu kırık bölgeyi ortalayacak şekilde çelik hasır montajı yapılmıştır. İki iksa kullanılmış olup kırığın sağına ve soluna denk gelecek konumda ve imalatın hangi aşamasında yapılacağı durumuna göre sabitlenmiştir. Bandajın altında kalan ibo bulonlar manşon ile uzatılmıştır ve püskürtme beton uygulanmıştır. Püskürtme beton sonrası uzatılan ibo bulonların plakları takılarak bandaja destek sağlanmıştır.

4.1.4 Mütemudi giriş yapımı

Üstyarı imalatı tamamlanıp altyarı imalatına geçildiğinde hızlı oluşan batmaların önüne geçmek için, üstyarı iksalarının altına tüm iksaları birbirine bağlayacak NPI500 profil kullanılmıştır. Bu profil ile altyarı kazılarında kazısı yapılmış iksaların yapılmamış olan iksadan destek alması amaçlanmıştır (Şekil 13 ve 14).



Şekil 13. Üstyarı iksa mütemudi giriş uygulaması



Şekil 14. Üstyarı-altyarı iksa bileşiminde mütemudi giriş montajı



Şekil 15. Üstyarı aşamasında mütemudi giriş uygulaması

Altyarı imalatı yapılırken, üstyarıda batma yaşanmaktadır. Altyarı iksa kazısı yapıldığında mütemudi giriş, altyarı kazısı yapılmamış üstyarı iksaları ile kazısı yapılmamış zeminden mesnet olarak altyarı kazısı yapılmış üstyarı iksalarının batması engellenmeye çalışılmıştır (Şekil 15).

4.1.5 Birinci kademe invert uygulamaları

Tünel yapımı süresinde tüm setlerde 1. kademe invert yapılmıştır. İlk başlarda çift kat çelik hasır ve minimum 30 cm kalınlıkta püskürtme beton ile yapılmıştır. Bu uygulamanın yetersiz olduğu gözlemlenince geçici invert tahkimatına NPI200 profil ilave edilerek 1'er atlamalı yapılmıştır. Tahkimatın Şekil 16'da görüldüğü gibi, sistemin zorlanmalara yenilmesi engellenememiştir. Bu durumlar değerlendirildiğinde sisteme dahil edilen geçici 1. kademe iksalar NPI300 kullanılarak dışa büküm yapılmıştır (Şekil 17). Bu sayede sistem geçici olarak

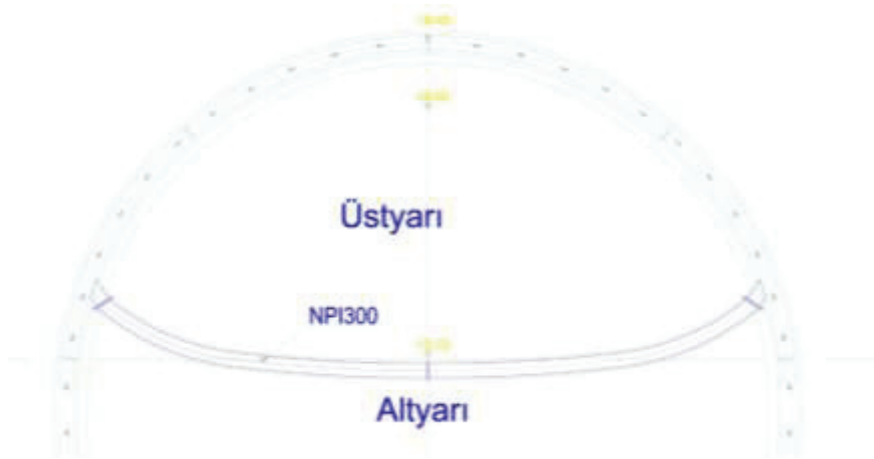
kısa süreliğine kapatılmıştır. Bu durum sistemin önceki setlere göre %35-45 arasında daha az batmanın olmasına neden olmuştur.



Şekil 16. Üstyarı düz geçici invertte deformasyon



Şekil 17. Üstyarıda uygulanan dışa kavis oluşan geçici invert



Şekil 18. Üstyarı aşamasında 1. kademe invert

1. kademe invert yapılması ile birlikte radyal yönde oluşan çatlak ve kırıkların oluşumu azalmıştır (Şekil 18). Bandaj yapılma ihtiyacı ortadan kalmıştır. Altyarı kazılarında 1. Kademe invert iksaları kırılmadan önce altyarı yapıлып, sonrasında iksa sökümü yapılarak, iksaların topuk görevinde çalışması sağlanmıştır.

4.2 Ayna Sökülmelerine Karşı Alınan Önlemler ve Sonuçları

4.2.1 Ayna kapama

Tünel kazılarında bilindiği üzere ayna açık olduğunda, dış macunu örneğinde olduğu gibi dışarıdan baskı oluştuğunda açık olan ağızdan macun çıkmaya çalışır. Tünelde de benzer durum karşısında ayna açık ise deformasyonlara neden olmuştur. Deformasyonların yoğun olduğu bu tünelde kazı şeklini değiştirip her iksada ayna kapama değişik şekillerde yapılmıştır. Öncelikle klasik kazı ayaktan eksene yapılmış daha sonra ayna kapama yapılmıştır. Başka bir yöntem ise klasik olarak ayna ayaktan eksene kazı yapıp ayna hafriyatı alınmadan yukarıdan aşağı ayna kapatılarak inilmiştir. Ancak bu iki yöntemde de ayna kazısı tamamen yapılmış olduğu için aynada stres oluşmuştur. Bu stres ayna kapatılırken ani dökülmelere neden olmuştur. Son olarak ayna kazısı olağan kazıların aksine eksenden aşağı kademeli kazılıp her kazılan bölge çelik hasır ve püskürtme beton ile kapatılarak kazı aynası açılmıştır. Bu çalışma ayna emniyetini sağlamış olsa da deformasyonların devam etmesine engel olamamıştır.

4.2.2 İlerleme adımı ve set boyu

Deformasyon ölçümleri sonrasında tünel içi hareketi önlem için öncelikle set (ano) boyları kısaltılmıştır. 75 cm olan ilerleme adımı 50 cm düşürülmüştür. 4.5 m olan set boyu 3 m olarak devam etmiştir. Buradaki amaç, metretülde ki tahkimat miktarını arttırarak sistemin daha dayanıklı olması sağlanmıştır. Ancak set boyunun kısa olması, kendinden delen süren yapılabilmesi için gerekli olan yükselmeyi yapmak çalıştığımız zemin şartlarında mümkün olamamıştır. 16 derece açı ile delinmesi gerekirken 25 derece açı ile delgiler yapılmıştır. Bu durum kazı sırasında kendi delen sürenin etki mesafesini etkilediğinden ileri yönlü sökümlerin artmasına neden olmuştur. 4.5 m ilerleme ile 75 cm lik delgi arını oluşması gereken yerde 3 m ilerleme ile bu arın oluşturulmaya çalışılmıştır. İlerleme adımının azaltılması, imalat süresinde farka neden olmamıştır. Aynı zamanda daha kısa mesafe tünel yapılmasına neden olmuştur.

4.2.3 Ayna zemin çivisi

Ayna tahkimatı olarak projede ayna konsolidasyon enjeksiyonları yer almıştır. Bu durum ayna zemininin çoğunluğu kil olduğundan zeminde konsolidasyon mümkün olmamıştır. Ayna emniyeti için aynaya ilk başlarda 9 m lik ayna zemin çivisi yapılmıştır. Oluşan sürtünme kolonu bu metrajda etkili olmamıştır. Bu sonuçtan sonra ayna zemin çivisi 12 m ve 15 m denenmiştir (Şekil 19) ve 18 m boyunda zemin çivisinin oluşturduğu sürtünmenin toplam batmaya karşı koyma kapasitesinin yüksek olduğu izlenimi yerinde edinilmiştir. Ayna kapamalarda aynanın stabil kalması açısından yardımcı olmuştur. İlk olarak aynaya 2 m² de bir yapılmıştır. Bu durum aynanın kendini tutmasında yetersiz kalmış ve 1 m² de bir olarak yapılmaya devam edilmiştir.

Ayna zemin çivisi ilk olarak $\Phi 14$ lük nervürlü demir kullanılarak yapılmıştır. Donatının enjeksiyon içinden sıyrılmaması için ankraj halatları gibi $\Phi 14$ nervürlü demir 3 grup yapılarak kullanılmıştır. Ancak aynaya bağlanan hasır ile zemin çivisi için kullanılan nervürlü demir bağlantısı aynada oluşan deformasyon sonucu sıyrıldığı tespit edilmiştir. Bu sıyrılmamanın olmasını engellemek için delgi içlerine ibo bulon kullanılmaya başlanılmıştır. İbo bulon başlarına daha fazla yüzeye temas ederek daha fazla destek alması amacıyla ibo bulon plaka arkasına 1'er m boylarında profil monte edilerek torklama yapılmıştır (Şekil 20).

5 TÜNEL İNŞAATI SIRASINDA OLUŞAN DEFORMASYONLAR

Projede deformasyon toleransı ana tünelde maksimum 20 cm olarak kabul edilmiştir. Projeye göre tünel içinde oluşan deformasyon bu değere yaklaştığında "Ara kaplama yapılmalıdır" şeklinde belirtilmiştir. Tünel içinde oluşan deformasyonlar kapanma değil batma eğilimi göstermiştir. Şekil 21 ve 22 'de üstyarıda ve invert betonda deformasyona bağlı çatlaklar gösterilmiştir. Deformasyon bulonlarından alınan okumalarda değişkenlik gösteren kot değerleridir. Deformasyon bulonları montajı yapılanaya kadar oluşan deformasyonlar ise ilk iksa kurulumu sırasında kesit alınıp, ikinci kat çelik hasır montajı öncesi tekrar aynı iksanın kesiti alınarak üst üste atılarak aradaki farka bakılması işlemi sonrası belirlenmiştir.

Oluşabilecek deformasyonların önüne geçmek için proje ara mesafelerinin altında olunmasına rağmen deformasyonlar proje değerinin üzerinde kalmıştır.

Kazı aşamalarında ringin kapalı olmadığı setler hızlı batma gösterirken ringin kapalı ancak ara kaplamanın yapılmadığı setler daha yavaş batmaya devam etmiştir. Ara kaplama yapıldıktan sonra kazı aynasına yaklaşık 50 m mesafeye kadar ara kaplama yapılmış bölgelerde de mm bazında da olsa deformasyon devam ettiği ölçülmüştür. Bu nedenle en hızlı şekilde ringin kapatılması ve ara kaplamanın yapılması gerekmektedir. Deformasyonların ortalama %70'i üstyarı imalatından altyarı yapılanaya kadar geçen sürede oluşmuştur (Çizelge 1-3).



Şekil 19. T2 tüneline ayna zemin çivisi uygulaması



Şekil 20. T2 tüneline enjeksiyon priz sonrası profil destekleme



Şekil 21. Üstyarı bölgesinde oluşmuş deformasyona bağlı çatlaklar



Şekil 22. İnvvert betonunda deformasyona bağlı oluşan çatlak

Çizelge 1. Üstyarıda 1. kademe iksa uygulanmayan ve uygulanan bazı setlerin karşılaştırılması

	Set No	Deformasyon Bulonu Montajından Önce	İlk 30 Gün	İlk 30 Gün Toplam Def.	Oran
DIŞ BÜKEY 1. KADEME İNVERT ÖNCESİ	Set 1	465 mm	100 mm	565 mm	18.83 mm/gün
	Set 6	150 mm	278 mm	428 mm	14.27 mm/gün
	Set 7	100 mm	289 mm	389 mm	12.97 mm/gün
	Set 10	50 mm	360 mm	410 mm	13.67 mm/gün
	Set 11	190 mm	402 mm	592 mm	19.73 mm/gün
	Set 16	120 mm	409 mm	529 mm	17.63 mm/gün
	Set 17	150 mm	247 mm	397 mm	13.23 mm/gün
DIŞ BÜKEY 1. KADEME İNVERT SONRASI	Set 18	10 mm	88 mm	98 mm	3.27 mm/gün
	Set 19	30 mm	176 mm	206 mm	6.87 mm/gün
	Set 20	20 mm	230 mm	250 mm	8.33 mm/gün
	Set 21	20 mm	237 mm	257 mm	8.57 mm/gün
	Set 22	20 mm	217 mm	237 mm	7.90 mm/gün

Çizelge 2. Üstyarıda 1. kademe invert iksa uygulanmayan ve uygulanan bazı setlerin karşılaştırılması

	Set No	Altyarı Yapılana		Altyarı Kazısından		İnvert Tamamlanma	
		Kadar Toplam	Batma ve Yüzdesi	İnvert Tamamlanana	Kadarki Sürede	İnvert Tamamlanma	Sonrası Toplam
				Toplam Batma ve	Yüzdesi	Batma ve Yüzdesi	
DIŞ BÜKEY 1. KADEME İNVERT ÖNCESİ	Set 1	691 mm	71%	184 mm	19%	103 mm	11%
	Set 6	372 mm	69%	160 mm	30%	7 mm	1%
	Set 7	372 mm	67%	161 mm	29%	24 mm	4%
	Set 10	423 mm	57%	318 mm	43%	6 mm	1%
	Set 11	635 mm	59%	426 mm	39%	18 mm	2%
	Set 16	663 mm	95%	18 mm	3%	18 mm	3%
DIŞ BÜKEY 1. KADEME İNVERT SONRASI	Set 17	442 mm	75%	93 mm	16%	54 mm	9%
	Set 18	161 mm	36%	227 mm	51%	58 mm	13%
	Set 19	289 mm	57%	165 mm	33%	53 mm	10%
	Set 20	396 mm	73%	36 mm	7%	107 mm	20%
	Set 21	409 mm	79%	70 mm	14%	36 mm	7%
	Set 22	306 mm	71%	99 mm	23%	24 mm	6%

Çizelge 3. Üstyarıda oluşan deformasyonların aşamalara göre miktar ve oranları

Set No	Ölçüm Süresi	Toplam Deformasyon	Altyarı Yapımına Kadar Geçen Süre	Altyarı-İnvert Yapımına Kadar Geçen Süre	Altyarı Yapımına Kadar Oluşan Batma Yüzdesi	İnvert Yapımına Kadar Oluşan Batma Yüzdesi	İnvert Yapımına Sonrası Batma Yüzdesi
Set 1	458 Gün	978 mm	113 Gün	1 Gün	89%	1%	10%
Set 2	420 Gün	538 mm	71 Gün	1 Gün	86%	1%	14%
Set 3	143 Gün	657 mm	118 Gün	6 Gün	84%	12%	4%
Set 4	127 Gün	628 mm	103 Gün	12 Gün	79%	19%	2%
Set 5	109 Gün	634 mm	88 Gün	9 Gün	77%	22%	1%
Set 6	56 Gün	539 mm	36 Gün	11 Gün	69%	30%	1%
Set 7	112 Gün	557 mm	37 Gün	60 Gün	67%	29%	4%
Set 8	106 Gün	510 mm	69 Gün	17 Gün	74%	23%	3%
Set 9	60 Gün	420 mm	38 Gün	4 Gün	83%	10%	7%
Set 10	118 Gün	747 mm	51 Gün	57 Gün	57%	43%	1%
Set 11	110 Gün	1079 mm	43 Gün	58 Gün	59%	39%	2%
Set 12	102 Gün	878 mm	35 Gün	57 Gün	37%	62%	1%
Set 13	101 Gün	698 mm	59 Gün	34 Gün	58%	42%	1%
Set 14	80 Gün	719 mm	65 Gün	11 Gün	88%	12%	0%
Set 15	70 Gün	800 mm	58 Gün	8 Gün	94%	6%	0%
Set 16	149 Gün	699 mm	49 Gün	75 Gün	95%	3%	3%
Set 17	128 Gün	589 mm	84 Gün	18 Gün	75%	16%	9%
Set 18	122 Gün	446 mm	46 Gün	43 Gün	36%	51%	13%
Set 19	101 Gün	507 mm	45 Gün	22 Gün	57%	33%	10%
Set 20	97 Gün	539 mm	47 Gün	6 Gün	73%	7%	20%
Set 21	90 Gün	515 mm	56 Gün	12 Gün	79%	14%	7%
Set 22	78 Gün	429 mm	50 Gün	4 Gün	71%	23%	6%
Set 23	81 Gün	473 mm	53 Gün	9 Gün	67%	21%	12%
Set 24	70 Gün	453 mm	44 Gün	4 Gün	74%	16%	10%

6 ÇALIŞMA HIZININ YAPILAN İMALATLARA GÖRE ANALİZİ

Çalışma mesafeleri proje değerlerinin altında kalmıştır. Bu nedenle ringin kapatılması için çalışma yapıldığında mesafelerin çok yakın olması çalışmanın tek bölgede yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu durumda üstyarı çalışmaları bitirilip, altyarı yapılmasına, altyarı çalışmaları bitirilip invert yapılmasına ve invert kazı işlemleri bitirilip betonlama işlemlerine geçilebilmesi mümkün olmuştur. Buda ilerleme hızını ve aylık yapılan üretimi etkilemiştir (Çizelge 4). Son gelinen noktada tünel içinde stok ve manevra yapılabilir vaziyete gelmesinden sonra ortalama 45 günde 9 m tam kesit tünel yapılır hale gelinmiştir. T2 tüneline kazı-tahkimat işlemlerine başlanıldığı gün “12.07.2021” itibariyle 30.12.2022 tarihine kadar 536 gün (17.87 ay) çalışılmıştır. Aşağıdaki tablodaki ilerleme oranları gösterilmiştir.

Çizelge 4. Üstyarı, altyarı ve invert kazı aşamalarının kübajları ve ilerleme hızları

	İlerleme	Alan	Kübaj	Ortalama Kübaj	Ortalama İlerleme	Ortalama İlerleme
Üstyarı Kazısı	103.49 m	94.79 m ²	9809.61 m ³	18.30 m ³ /Gün	5.79 m/Ay	0.193 m/Gün
Altyarı Kazısı	84.74 m	74.93 m ²	6349.23 m ³	11.85 m ³ /Gün	4.74 m/Ay	0.158 m/Gün
İnvert Kazısı	83.24 m	35.06 m ²	2918.23 m ³	5.44 m ³ /Gün	4.65 m/Ay	0.155 m/Gün
Toplam			19077.07 m ³	35.59 m ³ /Gün		

SONUÇLAR

Bu Çalışma konusu olan tünelde, bir metretül tam ring tünel yapabilmek için 1211 m delgi yapılmıştır. Üstyarıda 4.5 metreye 150 ton ağırlığında bir tahkimat (İksa, Çelik Hasır, Püskürtme Beton) uygulanmıştır. Bir metretül tam ring tünel için zemine, fazladan 1322 kg çimento enjeksiyonu (zemin içi çatlaklara ve boşluklara zemin konsolidasyonu) enjekte edilmiştir. Bu havzada bu özellikteki zeminde ara mesafelerin yakın tutulması en önemli detay olmuştur. Ara kaplama yapılarak invert aşaması yapılmış setlerde oluşacak hareketin önüne geçilmiştir. Burada kullanıldığı gibi ağır bir tahkimat kullanıldığında zemine batmaması için mutlaka 1. kademe invert iksası uygulamaları tahkimata dahil edilmesi düşünülmelidir. Örneğin; zemin oluşturacağı basmayı olmamış gibi düşünürsek bir set tahkimatın ağırlığı dahi tahkimatın batmasına yeterli gelmektedir. Bu ağırlıkta ki tahkimatın delgiler ve enjeksiyonları yapıp yanal tahkimatın mukavemet kazanana kadar geçen sürede en az miktarda batmasını, bu tahkimat elemanı önlemiştir (NPI300 profilden dışa kavisli 1. kademe invert uygulaması). 1. Kademe invert yapılmadan önce ring kapatılana kadar 18 mm/gün deformasyon olurken 1. Kademe invert sonrası 8 mm/gün mertebesine düşmüştür. 1. Kademe invertin sadece üstyarı aşamasında önceki setlere oranla %35 gibi büyük ölçüde sistemin batmasını yavaşlatma konusunda katkıda bulunmaktadır. Bu sistemde en önemli faktör en hızlı şekilde aynanın kapanmasıdır. Aynanın delgi ve diğer tahkimatlar yapılanaya kadar ayakta durabilmesini sağlamaktır. Ringin (Üstyarı-Altyarı-İnvert) tamamlanmasını en kısa zamanda yaparak deformasyon miktarı en düşük seviyelerde tutulabilmektedir. Bu şekilde ilerlendiğinde, aynada yapılan işlemlerin etkisi, ringin kapalı olduğu setlere etkisi ayna ile arasında ki mesafe arttıkça azalıyor ve deformasyonlar tünel ilerledikçe sönümleniyor. Bu şekilde yakın çalışmak ilerleme konusunda bu tünel için başberi ortalama 5.79 m/Ay olmaktadır. Buda deformasyonların artışını engellemede dezavantaj olmaktadır. Tünel aşamaları ne kadar hızlı yapılır ve ring kapatılırsa deformasyonlar bir o kadar düşük seviyelerde kalmaktadır (Çizelge 3). Tünel imalatının ilk safhalarında at nalı tipi tünelden T tipi tünel geçiş; tünel imalatı için gerekli inşaat malzemelerinin tünel içine sevki, tünel iç trafik, tünel içi manevra için çok önemlidir. Bu durumun önüne geçebilmek için daha geniş kesit kullanılmadığı ya da işin işleyişine göre gerekli mesafeden genişleme yapılmalıdır. Kamyon ve mikser manevraları için uygun cepler yapılarak trafik daha rahat halde olması sağlanmalıdır. Bu çalışmaya konu olan tünelde bu durumlar söz

konusu olmadığı için bant konveyör uygulanmış olup hafriyat kamyonu tünel trafiğine katılması önlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Arıoğlu, E., Yüksel, A., Yılmaz, A. O. 2008. Püskürtme Beton Bilgi Föyleri – Çözümlü Problemler, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayın No: 142, İstanbul, 296.
- Aycan, E. 2008. Tahkimat Sistemi Seçimi ve Bilgisayar Yardımı İle Galeri Ahşap Tahkimat Sisteminin Boyutlandırılması, Çukurova Üniversitesi, Adana, 57.
- Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., Yüce, E. 2007. 2. Ulaşımında Yeraltı Kazıları Sempozyumu Bildirileri Kitabı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayın No: 138, İstanbul, 604.
- Bilir, M. E., Kel, K., Kaymakçı, E. 2014. Türkiye 19. Kömür Kongresi Bildirileri Kitabı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Zonguldak, 463.
- Birön, C., Arıoğlu, E. 1999. Madenlerde Tahkimat İşleri ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 362.
- Yağcı, E. 2017. Yeraltı Havalandırması, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 336, İzmir, 402.
- Yılmaz, Ö. 1994. Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu (Genişletilmiş İkinci Baskı), TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, İstanbul, 394.

Yüksek Fırın Cürufunun Magnezyum Oksit ile İyileştirilmiş Temiz Kumun Mekanik Özelliklerine Etkisi

Effect of Blast Furnace Slag on Mechanical Properties of Magnesium Oxide Treated Clean Sand

A. S. Teker, Y. E. Çolak

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Geoteknik ABD., İstanbul

S. Çakır

Emay Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., İstanbul

ÖZET: Alüvyonlu kötü derecelenmiş kumda sıvılaşma, taşıma gücü yetersizliği, aşırı oturma gibi riskler bulunmaktadır. Yüksek boşluk oranı, danelerin şekilsel özellikleri ile jeomorfolojik yapısı bakımından bu tip zeminler çeşitli inşaat mühendisliği projelerinde dolgu malzemesi olarak kullanılmak için mühendislik olarak iyileştirilmelidir. Çimento bazlı kimyasal iyileştirme tekniklerine çevre kirliliği ve maliyet bakımından alternatif olarak bu çalışmada maliyeti düşük ve çevre dostu olan magnezyum oksit(MgO) ile puzolanik atık olan Yüksek Fırın Cürufu karışımları kullanılmıştır. Numuneler ağırlıkça kumun 2%, 4% ve 6% MgO ve 1% ve 2% Yüksek Fırın Cürufu ile optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak hazırlanmış, sonrasında 3 ile 7 gün oda şartları altında kürlenmişlerdir. Serbest Basınç Deneyine tabii tutulan numunelerde, uzun kür süresi ve yüksek fırın cürufu eklenmesi, danelerin birbirlerine bağlanmasını kolaylaştırmış, numune iç yapısının yoğun ve güçlü form kazanmasına olanak sağlamıştır. Böylece, numunelerin serbest basınç dayanımları ve Elastik Modülleri yükselmiş, iç reaksiyonlar sonucu su miktarı azalmış, gevreklik artmıştır.

ABSTRACT: There are risks such as liquefaction, low bearing capacity and high settlement in alluvial poorly graded sand. In terms of high void ratio, shape properties of particles and geomorphological structure, this type of soils should be engineered to be used as filling material in various civil engineering projects. As an alternative to cement-based chemical remediation techniques in terms of environmental pollution and cost, in this study, low-cost and environmentally friendly magnesium oxide (MgO) and blast furnace slag, which is pozzolanic waste, were used. The samples were prepared by mixing and compacting sand with 2%, 4% and 6% MgO and 1% and 2% Blast Furnace Slag by weight at optimum water contents, and then cured under room conditions for 3 to 7 days. In the samples subjected to the Unconfined Compression Test, the long curing time and the addition of blast furnace slag facilitated the bonding of the grains to each other, allowing an internal structure of sample to gain a dense and strong form. By this way, water content of the sample was decreased through chemical reactions, Unconfined Compressive strength, Modulus of Elasticity and brittleness increased.

1 GİRİŞ

Şehir yaşamının hızla gelişmesinin sonucu insanlar daha iyi koşullarda yaşamak amacıyla otoyollar, köprüler, tüneller, yüksek binalar vb. gibi yapılar inşa etmek durumunda kalmışlardır. Yapı zemininde taşıma gücü, sıvılaşma, oturma gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır (Alpyürür et al., 2018). Bu sorunlar geoteknik mühendisliği biliminin ana konusu olmuş ve sorunların çözüm yöntemini aramışlardır. Zemin iyileştirme sistemleri geçmişten bugüne gelişmektedir. Günümüzde uygulanan zemin iyileştirme sistemlerinde çimento, kireç vb. malzemeler kullanılmaktadır. Ancak küresel ısınma sebebiyle karbon emisyonunu azaltmak amacıyla teknoloji bu yönde alternatif malzeme ve enerji kaynaklarını geliştirme yoluna gitmiştir. Bu sebeple zemin iyileştirme işlerinde Magnezyum oksit ve sanayi atığı olan cüruf kullanılması değerlendirilmiştir. Magnezyum oksit inşaat sanayisinde uygun kürlenme koşulları sağlandığında bağlayıcılığı yüksek bir mineral olması sebebiyle bazı antik yapıların harç malzemesinde kullanılmıştır (Gürbüz et al., 2016). Cüruflar belirli metalürjik ürünlerin üretimi sırasında meydana gelen atık malzemelerdir. Bu malzemeler üretim prosesleri sebebiyle farklı moleküler yapıya ve kimyasal özelliklere sahip olurlar. Cüruflar hali hazırda beton teknolojisinde kullanılmaktadır. Kum içeriği yüksek zemin ile magnezyum oksit karıştırıldığında plastisite indeksinin azalır; serbest basınç dayanımı, Young modülünde artış olmaktadır. Bu iyileştirme magnezyum oksit inceliği ile kürlenme süresi ile direk ilişkilidir (Taha et al., 2015). Kil zeminler ile 6% oranında nano magnezyum oksit karıştırıldığında kilin mühendislik özelliklerinde önemli ölçüde artış olur. Kilin su içeriğinin artması iyileştirme miktarında azalmaya sebep olur (Gao et al., 2015). Laterit topraklar ile magnezyum oksit ve palmiye yağı aktivatör olarak kullanılarak stabilize edildiğinde mukavemet özellikleri önemli ölçüde artar. Toprağın boşluklarının M-A-S-H (Magnezyum Alimin Silika hidrat) jeli ile dolarak partiküller arası bağ güçlenir (Ezreig el al., 2022). Hızla gelişen dünyada ham maddeye olan ihtiyaç gittikçe artmaktadır. İnşaat sektöründe de alternatif yapı malzemeleri kullanılması inşaat mühendisleri tarafında sürekli olarak araştırılmaktadır. İyileştirme teknolojileri de buna bağlı olarak gelişmekte ve yeni teknikler üretilmektedir. Bu teknikler hem uygulama süresini kısaltma hem de daha iyi sonuçlar alma yönündedir. Magnezyum oksit uygun kürlenme koşullarında ve doğru şekilde zeminle buluşturulduğunda zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırmaktadır.

2 MALZEME VE YÖNTEM

Çalışmamızda ölü-yanmış tipi ve saflığı 98% olan magnezyum oksit (MgO), reaktif silisyum dioksit (SiO₂), demir oksit (Fe₂O₃) ve alüminyum oksit (Al₂O₃)'den oluşan puzolanik özelliğe sahip endüstriyel atık malzeme olan yüksek fırın cürufu (Çizelge 1) ile kötü derecelenmiş temiz kum kullanılmış olup, çeşitli endeks deneyleri ile zemin genel ve durumsal özellikleri Çizelge 2'de, dane boyutu dağılımı ise elek analizi deneyi yapılarak Şekil 1'de sunulmuştur.

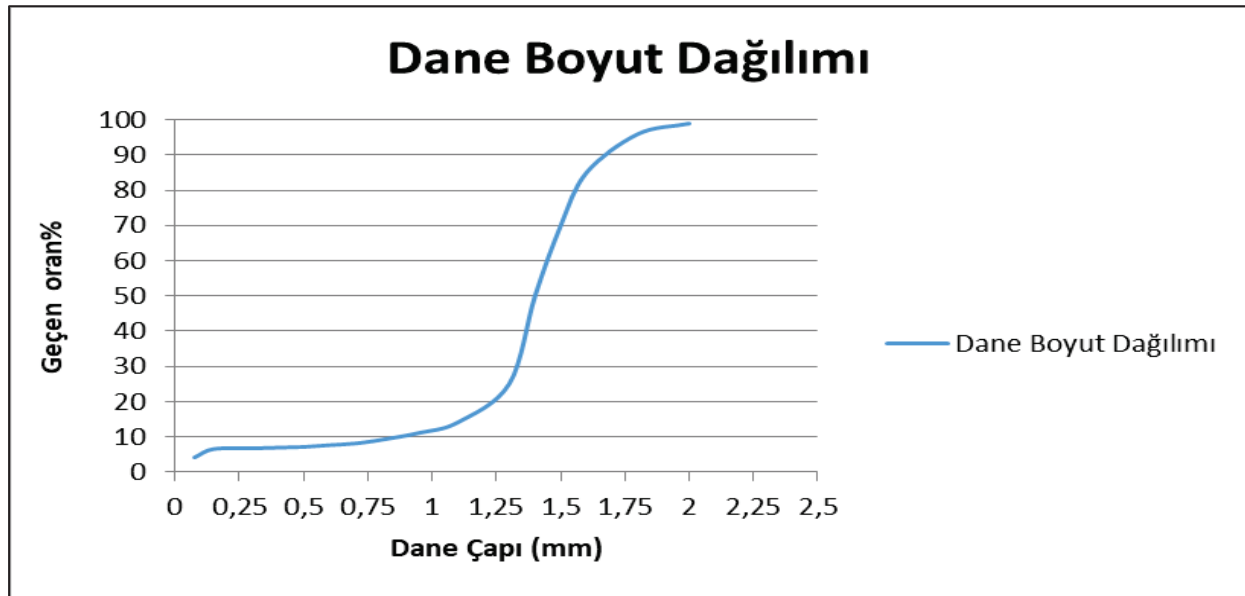
Elek analizi deneyi sonucunda zeminin, boşluklu yapılı kötü derecelenmiş gradasyona sahip orta-kalın daneler içeren alüvyonlu deniz kumu olduğu ortaya çıkmıştır. Bu tip kumlarda, sıvılaşma, düşük taşıma gücü, aşırı oturma gibi problemler görülebilmekte olup, mühendislik özellikleri iyileştirildiği takdirde inşaat projelerinde kullanılabileceği görülmektedir. Bunun dışında, puzolanların istenilen düzeyde bağlayıcılık özelliği gösterebilmeleri için, geçmiş çalışmalardan yola çıkarak reaktif SiO₂ miktarının kütlece %25' den az olmaması ve amorf yapıda olması gerekmektedir.

Çizelge 1. Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşimi	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂ (%)	35.00
Al ₂ O ₃ (%)	12.00
Fe ₂ O ₃ (%)	1.00
CaO (%)	40.00
SO ₃ (%)	9.00
Na ₂ O (%)	0.30
K ₂ O (%)	0.40
Kızdırma Kaybı (%)	1.00
Özgül Yüzey Alanı (cm ² /g)	4000-5000
Özgül Ağırlık (g/ cm ³)	2.94

Çizelge 2. Temiz kumun genel ve durumsal özellikleri

Zemin Özellikleri	Sonuçlar
Maksimum Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	1.612
Özgül Ağırlık (Gs)	2.682
Lab. Şartları Altındaki Boşluk Oranı	0.915
Maksimum Boşluk Oranı (emax)	0.981
Minimum Boşluk Oranı (emin)	0.751
Rölatif Sıklık (Dr) (%)	29
Optimum Su Muhtevası (%)	21.2
Uniformluk Katsayısı (Cu)	2.21
Süreklilik Katsayısı (Cc)	0.99
USCS Zemin Sınıflandırması	SP



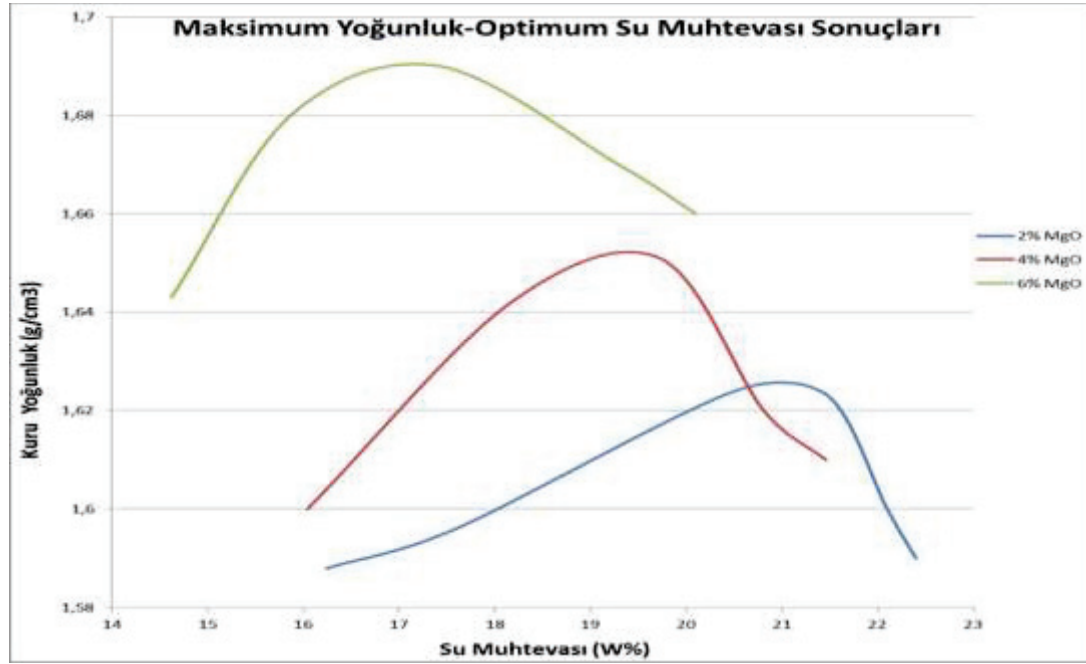
Şekil 1. Temiz kumun granülometri eğrisi

Numune hazırlığı öncesinde optimum su muhtevaları belirlenmesi amacıyla ön numuneler hazırlanmıştır. 2%, 4% ve 6% magnezyum oksit (MgO) ile karıştırılmış kuru temiz kum, Minyatür Harvard Kompaksiyon testi yapılarak, 5 tabaka halinde 25 vuruş halinde çeşitli su muhtevalarında sıkıştırılmış, böylece her bir MgO doz düzeyleri için optimum su muhtevaları

ve maksimum kuru yoğunluk belirlenmiştir. Ön numuneler için elde edilen sonuçlar Çizelge 3 ve Şekil 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3. Kum-MgO karışımlarına ait kompaksiyon sonuçları

MgO İçeriği (%)	Maksimum Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Optimum Su Muhtevası (%)
2	1.624	20.51
4	1.651	19.72
6	1.690	17.41

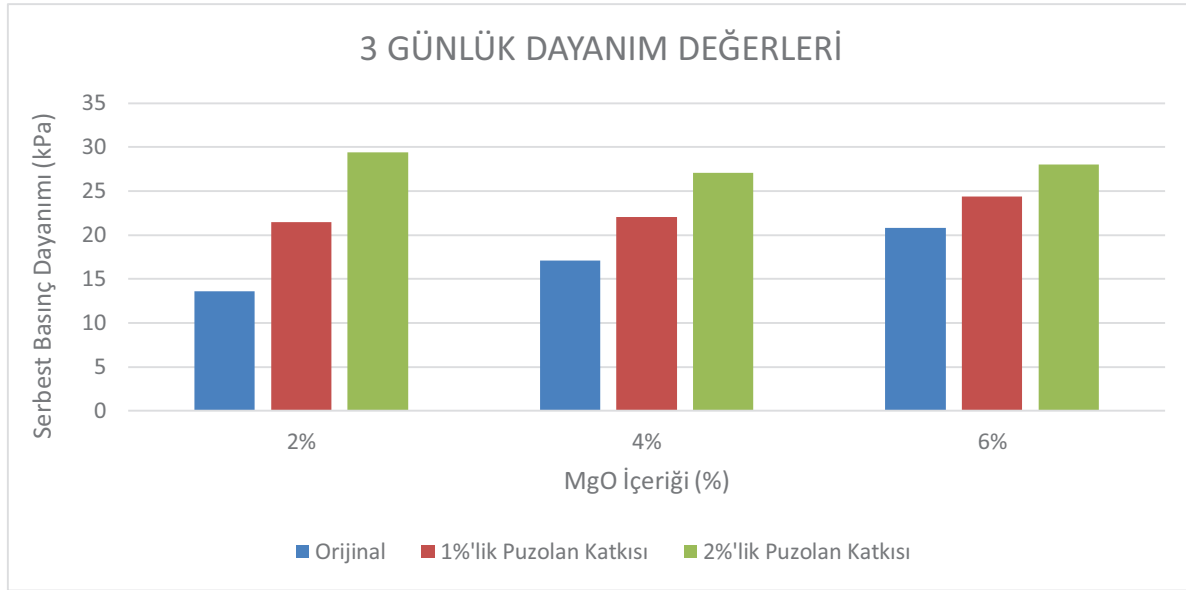


Şekil 2. Kum-MgO karışımlarına ait kompaksiyon testi sonuçları

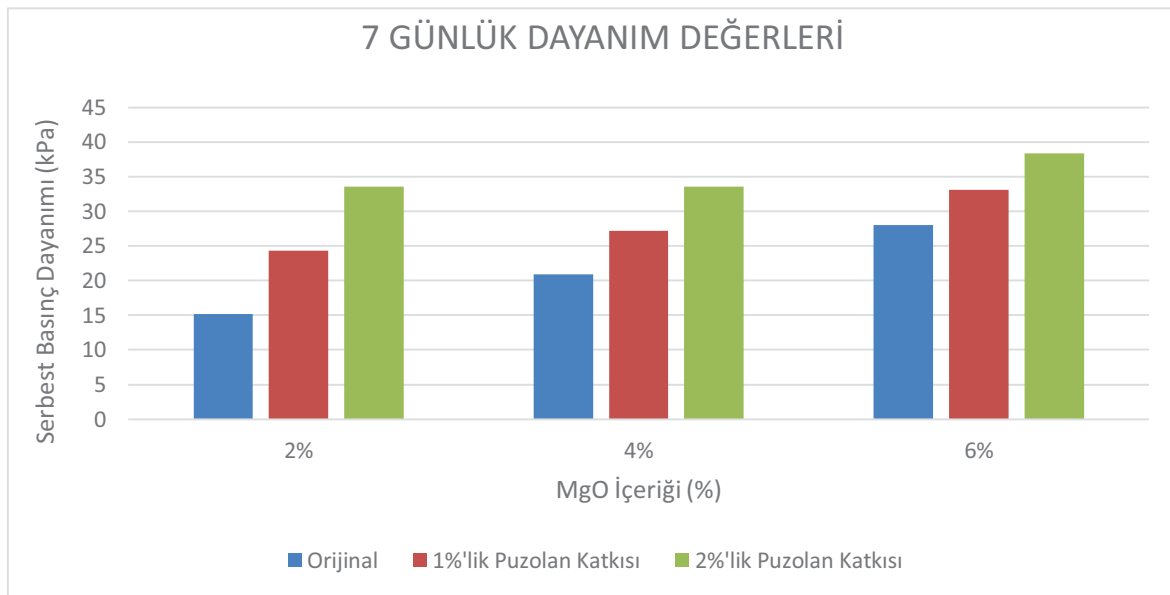
Bu çalışmada, magnezyum oksit ile iyileştirilmiş zeminlere yüksek fırın cürufunun etkisi incelenmiş olup, sırasıyla %1 ve %2’lik dozlarda (kuru kum ağırlığına) eklenerek iyileşmiş zeminin serbest basınç mukavemetine etkisi çeşitli kür sürelerinde bekletilerek incelenmiştir. Numuneler ilk etapta magnezyum oksit, kötü derecelenmiş kum ile 2%, 4% ve 6% oranlarında Thermomac mekanik karıştırıcı ile kuru formda karıştırılarak, 38 mm çap ve 76 mm boy ebatlarındaki kalıpta 25 vuruş/tabaka olmak üzere 3 tabaka halinde çeşitli su muhtevalarında sıkıştırılarak Minyatür Harvard Kompaksiyon teste tabi tutulmuşlardır. Her bir magnezyum oksit dozundaki optimum su muhtevası bulunduktan sonra, 2%, 4% ve 6% magnezyum oksit ile hazırlanan numunelere 1% ve 2% yüksek fırın cürufu eklenerek önce kuru formda karıştırılmış, ardından her bir durumdaki optimum su muhtevasında 5 dakika daha karıştırılarak homojenize edilmiş ve son olarak, önceki kompaksiyon şartları sabit tutularak kalıplanmıştır. Referans olması açısından yalnızca 2%, 4%, 6% magnezyum oksit dozlarıyla da numuneler hazırlanmıştır. Tüm numuneler 3 ile 7 günlük sürelerde 23 °C sıcaklık ve 41% nem altında küre tabi tutulmuştur. Gerekli süre tamamlandığında, kalıplar kesilerek numuneler çıkarılmıştır. Fiziksel ölçümleri yapılarak, geometrik özellikleri kaydedilmiş ve ASTM Standartlarıncı 1.27 mm/dakika gerinim kontrollü şartlar altında Serbest Basınç Deneyleri numuneler üzerinde yapılmıştır. Yük saati için kalibrasyonlar tamamlanarak, yük okumaları tamamlanmış ve yükleme esnasında kesit alanı düzeltmeleri sağlanarak yük-deformasyon verileri elde edilmiştir.

3 TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Çalışmada belirtilen yöntemler ve koşullarda gerçekleşen numune hazırlanması ile 3 ve 7 günlük kürlenmeleri sonrasında tek eksenli serbest basınç testine tabii tutulmuşlardır. Bu deney gerinim kontrollü şartlar altında 1.27 mm/dakika hızda gerçekleştirilmiş olup, elde edilen serbest basınç dayanım sonuçları Şekil 3 ve Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 3 günlük küre tabii tutulan numunelerin serbest basınç dayanımları

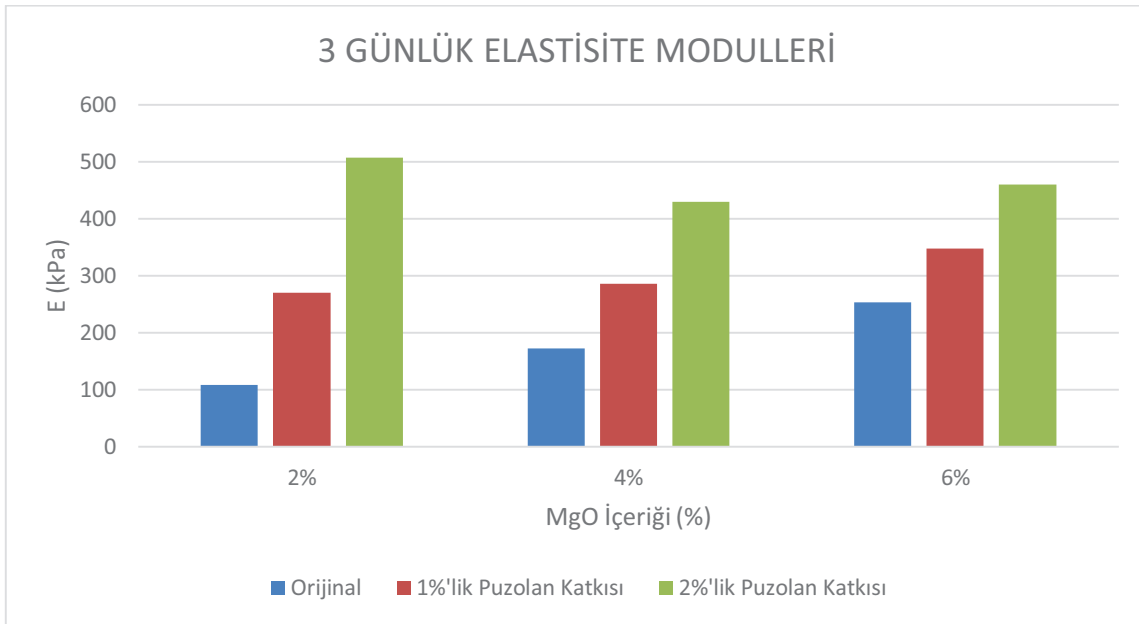


Şekil 4. 7 günlük küre tabii tutulan numunelerin serbest basınç dayanımları

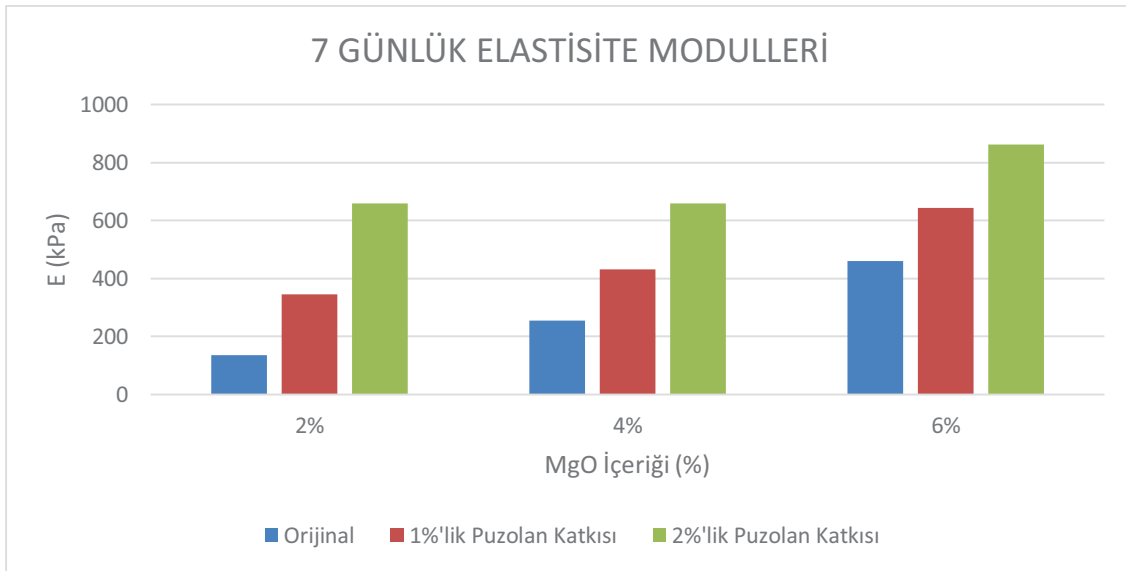
Elde edilen sonuçlar ışığında, optimum su muhtevasında MgO ile karıştırılarak kompakt edilen kötü derecelendirilmiş temiz kumun mekanik özellikleri noktasında Yüksek Fırın çürufunun olumlu yönde katkı sağladığı ortaya çıkmaktadır. 3 günlük kürlenmiş orijinal numunelerde(yalnızca MgO içeren) 2%-MgO içeriğinde serbest basınç dayanımı 13.57 kPa ile başlamış olup, 4%-MgO içeriğinde 25% artış ile 17.10 kPa seviyelerine ulaşarak, 6%-MgO içeriğinde ise 53% artarak 20.77 kPa dayanıma erişmiştir. Benzer şekilde, 7 günlük kürlenmiş orijinal numunelerde(yalnızca MgO içeren) her bir MgO içeriğinde serbest basınç dayanımı artarak ilerlemiş ve kür süresinin etkisi en çok yüksek MgO içeren 6% MgO numunesinde

görülmüştür. Bunlara ek olarak, MgO-kum karışımına 1% ve 2% düzeyinde eklenen Yüksek Fırın cürufunun 3 ve 7 günlük kürlemeler altında dayanıma etkisi pozitif ölçüde olmuştur. Dayanım mukavemeti olarak en çok artış 2% MgO içeren numuneye eklenen %2'lik puzolanda meydana gelmiştir. Bu artış 3 günlük kür altında 116% iken 7 günlük kür altında ise 120%'lere ulaşmıştır. En düşük puzolan etkinliği ise 6% MgO içeren numunelere eklenen 1%'lik puzolan karışımlarında gözlemlenmiştir. Bu düzeylerde artış 3 günlük kürlemede 17.3% iken, 7 günlük kürlemede ise %18.16'lara ulaşmıştır. Artış düzeylerinin yüksek MgO içeriklerinde düşük, düşük MgO içeriklerinde ise yüksek kalmasının tek sebebi puzolanın içeriğidir. Bu bakımdan, 6% MgO ve 1% Puzolan içeren numunedeki puzolan etkinliği, 2% MgO ve 1% Puzolan içeren numunedeki puzolan etkinliğinden çok daha azdır. Bu noktada kür süresi artması ile MgO-su arası hidrasyon tepkimesi için gerekli zaman sağlanmış olmakla birlikte, oluşan hidrasyon ürünleri ile puzolanlar arası partiküler etkileşime zemin hazırlandığı söylenebilir. Puzolanların dane boyutları, Mg(OH)₂ moleküllerinin oluşturduğu boşluklara ve kum porozlarına girebilecek boyutlardır. Bu bakımdan, puzolan miktarının artması ile gelişen mukavemetin temel sebebi, hidrasyon sonucu oluşan ve boşluklu bir formasyona sahip olan Mg(OH)₂ moleküllerinin yüksek fırın cürufu ile doldurularak kumun boşluklarında daha sıkı ve kompakt bir formasyon oluşturması olarak söylenebilir. Kür süresi ile ilgili olarak ise, ilk 3 günlük süreçte Mg(OH)₂'ler ve bunların boşluklarında yerleşmiş puzolanların optimum muhtevadaki temiz kumun mekanik etkilere karşı dayanımında etkili olması beklenirken, 7 günlük periyotlarda ise Mg(OH)₂-puzolan arası etkileşim ile oluşan Magnezyum-Silika-Hidrat (MSH), Magnezyum alimin hidrat (MAH) gibi ürünlerin kumun aksenel mukavemetine olumlu katkı sağlaması mümkündür. Uzun kür sonucunda oluşan bu ürünler, Mg(OH)₂'nin boşluklu yapısında meydana gelerek, dış etkilere karşı daha dayanıklı iç formasyonların oluşumuna katkı sağlayabilir. Numunelerin Elastik Modülleri ile ilgili de hesaplamalar yapılmış olup, her bir numunenin maksimum serbest basınç dayanımının, bu noktaya denk gelen gerinimlere bölünmesi ile elde edilmiştir. İlgili sonuçlar Şekil 5 ve Şekil 6 'de sunulmuştur.

Numunelerin mekanik dayanımları ile ortaya çıkan sonuçlara benzer olarak, yalnızca MgO içeriğinin artışı, sabit MgO dozu altında artan puzolan içeriği ve kür süresinin artışı Elastik Modülünü pozitif olarak etkilemiştir. Öncelikle yalnızca MgO içeren numunelerde 3 ve 7 günlük kür altında Elastik Modül değerleri yalnızca 2% MgO içeren numuneye ait 108.02 kPa'dan başlayarak, 6% MgO ve 2% Puzolan dozu içeren numuneye ait olan 862.76 kPa 'ya ulaşmıştır. Puzolan MgO içerik yüzdeliği olarak en düşük numune 6% MgO ve 1% Puzolan içeren numunedeki Elastik Modül yüzdelik artışı referans numunelere göre 3 günlük kürlemede 37.6%, 7 günlük kürlemede ise 39.6% olmuştur. En yüksek yüzdelik artış ise Puzolan/MgO oranı en yüksek olan 2% MgO ve 2% Puzolan içeren numunede ise 3 günlük kürde 369%, 7 günlük kürde ise 386.19% olarak gözlemlenmiştir. Serbest basınç dayanımlarında olduğu gibi, Elastik Modül değerinin de maksimum olduğu numune en yüksek 6% MgO ve 2% Puzolan içeren numune olmuştur. Bunun sebebi olarak ise, MgO miktarının artışı optimum şartlarda kompaksiyona uğramış boşluklu yapılı kötü derecelenmiş temiz kumdaki boşlukları hidrasyon tepkimesi ile oluşan Mg(OH)₂ katı çökelleri ile doldurması, bu çökel yapıdaki boşluklar ile kumun porozlarına nüfus eden dane çapı çok daha küçük Puzolanların dolgu malzemesi olarak etki etmesi ve bu boşluklara mümkün mertebede homojen olarak dağılarak homojen, sıkı ve daha kompakt bir morfoloji yaratması şeklinde açıklanabilir. Bu sayede kum



Şekil 5. 3 günlük küre tabii tutulan numunelerin serbest basınç dayanımları



Şekil 6. 7 günlük küre tabii tutulan numunelerin serbest basınç dayanımları

daneleri arasındaki sürtünme yüzeyleri artacak böylece dış yüklere karşı direnç artacaktır. Ayrıca yüksek MgO içeriklerinde (6% MgO), MgO kumun porozlarında daha geniş bir yüzeye etkiyecek ve bu sayede oluşan moleküler boşluklara sahip $Mg(OH)_2$ 'lerin partiküler formasyonu kum porozlarına göre daha çok yer kaplayacaktır. Buna bağlı olarak, yüksek fırın cürufu daneleri de kum porozlarından daha çok $Mg(OH)_2$ moleküler boşluklarına daha çok nüfus edebilecek ve kum boşlukları dış yüklere karşı direnci daha yüksek, birbiriyle iyi-bağlanmış partiküler komplekslerle dolmuş olabilecektir. Bu da 6% MgO, 2% Pozolan içeren numunede kum-kimyasallar arası etkileşimin daha geniş yüzeylere yayıldığı iç yapısı çok daha homojen bir formasyon oluşmasından dolayı dışarıdan etkiyen yükler bu homojen morfoloji içinde daha hızlı iletilerek numune dış etkilere daha hızlı direnç gösterebilmektedir. Bu sayede, kırılma anındaki gerinim diğerlerine göre çok daha düşük olmasından ve serbest basınç dayanımı da tüm numuneler içinde en yüksek olmasından ötürü bu numunenin Elastik Modülü en yüksek değer olan 862.76 kPa değerini vermektedir. Bunun dışında, kür süresinin 3 günlük tutulduğu durumda erken dayanımdan $Mg(OH)_2$ katı çökelleri ve çökeller arası boşluklar ile kum porozlarını dolduran dolgu görevindeki küçük dane boyutlarına sahip pozolanların kum

danelerin içsel sürtünmelerini arttırmasına dayanırken, 7 günlük kürlemelerde ise yüksek MgO içeriklerinde (4% ila 6% gibi) daha geniş kum porozlarına etkiyen Mg(OH)₂ hidrasyon ürünleri ile yüksek fırın cürufundaki SiO₂, Al₂O₃ gibi moleküller ile etkileşimi sonucu oluşan kompleks ürünler mukavemetin artmasında rol oynayabileceği önceki çalışmalardan yola çıkarak söylenebilir. Yine bu kompleks ürünler, numunenin erken kırılmasına yol açarak düşük kırılma gerinimlerinde yüksek serbest basınç dayanımına ulaşmasını sağlayabilir. Bu sayede, MgO ve puzolan içeriği ile kür etkisinin artışı iyileşmiş kumun daha da gevrekleşmesine yol açabilir. Böylece, iyileşmiş kum dolguları üzerinde inşa edilecek yapılar çok daha yüksek taşıma gücüne sahip bir zemine sahip olabilecek, hem de yüksek oturmalarda önüne geçilerek yapının bu oturmalardan göreceği olumsuz etkilerin azaltılabilir. Bu bilgiler ışığında, uzun kür süresi ve yüksek fırın cürufu eklenmesi, zemindeki su miktarını azaltarak, numunenin gevrekleşmesini sağlamıştır. Böylece, zemin daneleri birbirilerine daha sıkı bağlanarak daneler arası daha sıkı, yoğun ve güçlü bir formasyon oluşmasına imkân sağlamıştır. Dolayısıyla, daha fazla yüksek fırını eklenmesi numunelerin serbest basınç mukavemetini arttırmış olup, elastik modülünün gelişimine katkı sağlamıştır. Zamanında da etkisiyle, magnezyum oksit- yüksek fırın cürufu ve kum arasındaki kimyasal bağlar güçlenerek hem kötü derecelenmiş kumun boşlukları doldurulmuş, hem de daneler birbirlerine bağlanarak yüklemelere karşı yüksek direnç elde edilmiştir. Sonuç olarak, çalışmamızda kullanılan kum, deniz ve göl bölgelerinde çökelmiş boşluklu formasyona sahip kötü derecelenmiş formda olup taşıma gücü yetersizliği, sıvılaşma, şev stabilite problemleri ve aşırı oturma gibi riskler taşımaktadır. Boşluk oranının yüksek olması, jeomorfolojik yapısı, çökel tarihi ve danelerin şekilsel özellikleri sebebiyle bu türdeki zeminler inşaat mühendisliğinde efektif olarak kullanılabilmesi amacıyla hidrolojik, mekanik, fiziksel ve hatta kimyasal olarak ıslah edilmelidir. Silt ve kumlu zeminlerde yoğun kullanım hacmine sahip çimentonun üretimi esnasında havaya toz, karbondioksit, azot ve kükürt dioksitler yaydığı geçmiş çalışmalardan bilinmektedir. Bunun dışında, yüksek enerji kullanımı da maliyeti arttıran ve çimento kullanımının olumsuz yönlerinden bir diğeridir. Bunun dışında, karbondioksit gazının emilmesinde, yer altı suyu ıslahı ve çevreye zararlı asit içerikli kimyasalların stabilizasyonunda kullanılan çevre dostu magnezyum oksit (MgO) uygun üretim prosesleri kullanılarak maliyeti düşük bir alternatif olarak geoteknik mühendisliğinde kullanımı yaygınlaşmalıdır. Dolayısıyla, bu çalışma ile çevrimli veya statik dış etkiler altında aşırı yer değiştirmelere maruz kalabilen, kum kaynaması ile sonuçlanabilecek sıvılaşma gibi afetlerin yaşanabileceği boşluklu yapıları kötü dereceli alüvyon içeren denizsel bölge kumu bu çalışmada ilk etapta magnezyum oksit ile optimum su muhtevası ve kompaksiyon yapılarak mekanik olarak iyileştirilmesi sağlanmıştır. Buna ek olarak, yüksek fırın cürufu katkısıyla mühendislik olarak iyileştirilerek dayanımın gelişimi hızlanmış, inşaat mühendisliği üst yapıları ile yol gibi alt yapıların zemin-temel sistemlerinde, istinat duvarı ve toprak baraj projelerinde yapay dolgu malzemesi olarak kullanılması sağlanmaya çalışılmıştır. Elde edilen olumlu neticeler sonucunda, atık bir malzeme olarak yüksek fırın cürufu hem düşük maliyete sahip olup hem de yapı malzemesi sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak, Geoteknik Mühendisliği açısından da yeni çalışmalar yapılarak zemin iyileştirici kimyasallar üzerindeki etkisi incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- Abdussalam M., Mohd E., Mohamad A., Khaled I., Ehwaitat I., 2022, Performance of Tropical Laterite Soil Using Palm Oil Ash and Activator Magnesium Oxide Stabilizer, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 129
- Alpyürür M. Şenol A., 2018, Yüzeysel Zemin İyileştirmesinde Yeni Bir Malzeme Olarak Atık Gazbeton Kullanımı, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 9(2): 168-178
- Çankaya S., 2018, Çimento Üretiminde Çevresel Sürdürülebilirlik İçin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
- Taha M., Jawad I., Majeed Z., 2015, Treatment of Soft Soil with Nano Magnesium Oxide, Fifth International Symposium on Nanotechnology in Construction (NICOM 5), Chicago, USA

Derin Şaft ve Peron Tünel Kazılarının Geoteknik Açısından Değerlendirilmesi: İstanbul Kirazlı-Halkalı Metro Hattı Projesi Örneği

Geotechnical Assessment of Deep Shaft and Platform Tunnel Excavations: Kirazlı-Halkalı Metroline Project in Istanbul

S. Işık

Yüksel Proje, İstanbul.

O. Esen

İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Avrupa Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü, İstanbul.

ÖZET: Şehir içi metro hattı inşaat işlerinde, şaft açılması için yer seçimi, NATM yöntemiyle açılan tünellerde yapı-zemin etkileşimi ve oturma sorunları gibi birçok zor koşul ile karşılaşmaktadır. Dolayısıyla, yerinde geoteknik izleme ve ölçümler büyük önem arz etmektedir. Kirazlı-Halkalı Metro Hattı Projesi, İstanbul'un nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu, konsolide olmuş zemin koşullarında inşaat işlerinin yürütüldüğü bir metro projesidir. Bu çalışmada, konsolide zeminde şaft ve peron tünellerinin açılmasında karşılaşılan zorluklar ve bunların geoteknik açıdan bir değerlendirmesi açıklanmıştır. Çalışma kapsamında, söz konusu projeye ait Malazgirt İstasyon bölgesi çalışılmıştır. Deformasyon ölçümleri yapılan şaft yapısı 1. tahkimat sisteminde (geçici), örtü kalınlığı, mevcut binalardan kaynaklanan yayılı yük ve peron tünellerinin farklı kazı aşamalarının etkileşimi sonucunda meydana gelen deplasmanlar karşılaştırılarak, yapı-zemin ilişkileri incelenmiştir. Projede öngörülen deformasyon miktarları ile sahada ölçümler sonucu elde edilen deformasyon sonuçları mukayese edilerek, istasyon yapısındaki tahkimat sisteminin güvenilirliği ve yüzey ve binalardaki oturmalar değerlendirilmiştir.

ABSTRACT: Several difficult conditions are encountered during construction works including site selection for shaft excavations, structure-soil interactions and settlement problems during excavation of platform tunnels by NATM method. Therefore, on-site geotechnical monitoring and site measurements are of great importance. Kirazlı-Halkalı Metroline Project is carried out in consolidated ground conditions, where the population intensity is high. In this study, the difficulties encountered during excavation of shaft and platform tunnels in consolidated soil and a geotechnical evaluation of these are explained for the Malazgirt Station area. The temporary support system of the shaft structure, overburden thickness of platform tunnels, the distributed load arising from the existing buildings and displacements resulting from the interaction of different excavation stages of the platform tunnels were compared and the structure-soil relations were examined. Anticipated deformation data and field data were compared, support system reliability and deformations on the surface and buildings were examined.

1 GİRİŞ

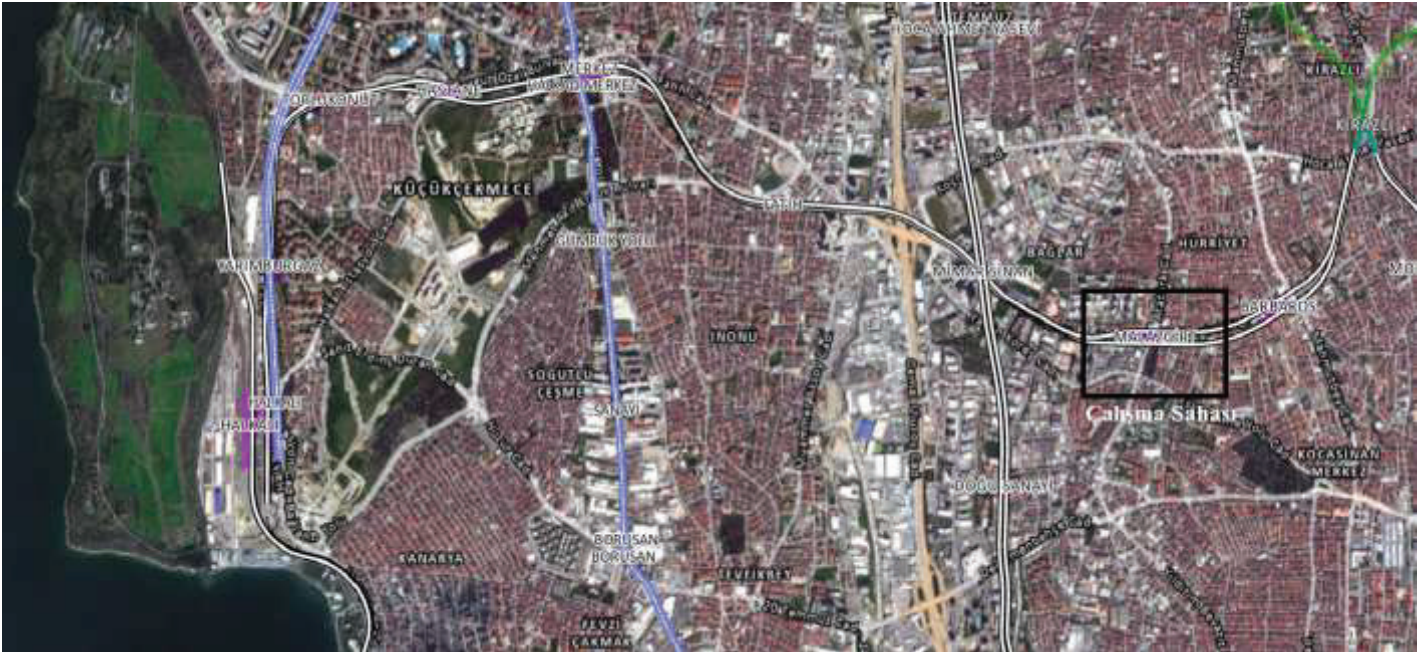
Her geçen gün hızla artan şehir içi nüfus ve bunun sonucunda oluşan ulaşım problemleri nedeniyle, Dünya'nın birçok kentinde geniş yeraltı ulaşım ağları oluşturulmakta ve ulaşım problemleri büyük ölçüde azaltılmaktadır (Guglielmetti ve diğ., 2007; Bilgin ve diğ., 2014).

İstanbul da Dünya'nın en büyük ve yapılaşmanın yüksek olduğu metropoliten şehirlerinden biri olup, özellikle son yıllarda artan şehir içi nüfus nedeniyle yeni yeraltı ulaşım ağlarının oluşturulması ya da mevcut hatların uzatılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Diğer bir yönden, şehir içi yapı stoğunun ve insan nüfusunun yoğun olduğu bölgelerde yeraltı kazılarının yapılması sırasında birçok problemle karşılaşmaktadır. En sık karşılaşılan problemler arasında, NATM tünel kazıları ya da istasyon yapıları için açılması gereken shaftların yerlerinin seçimi, yeryüzünde bulunan yapı stoğu ile peron tünelleri gibi yeraltı kazılarının etkileşimi ve bunların sonucunda yüzeyde oluşabilecek oturma problemleri sayılabilir (Burland, 2001; Mahmutoğlu, 2011; Topal ve Mahmutoğlu, 2021).

Bu çalışmada, şehir içi yeraltı kazıları sonucunda karşılaşılan sorunlar geoteknik açıdan değerlendirilmiş olup, söz konusu kazılar sırasında meydana gelen deformasyonların yüzeye ve yapı stoğuna etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, Kirazlı-Halkalı Metro Hattı Projesi ele alınmış olup, hattın en derin shaftlarından biri olan Malazgirt İstasyon shaftında gerçekleştirilen geoteknik saha çalışmaları sunulmuştur.

2 ÇALIŞMA SAHASININ JEOLJİSİ VE DURUMU

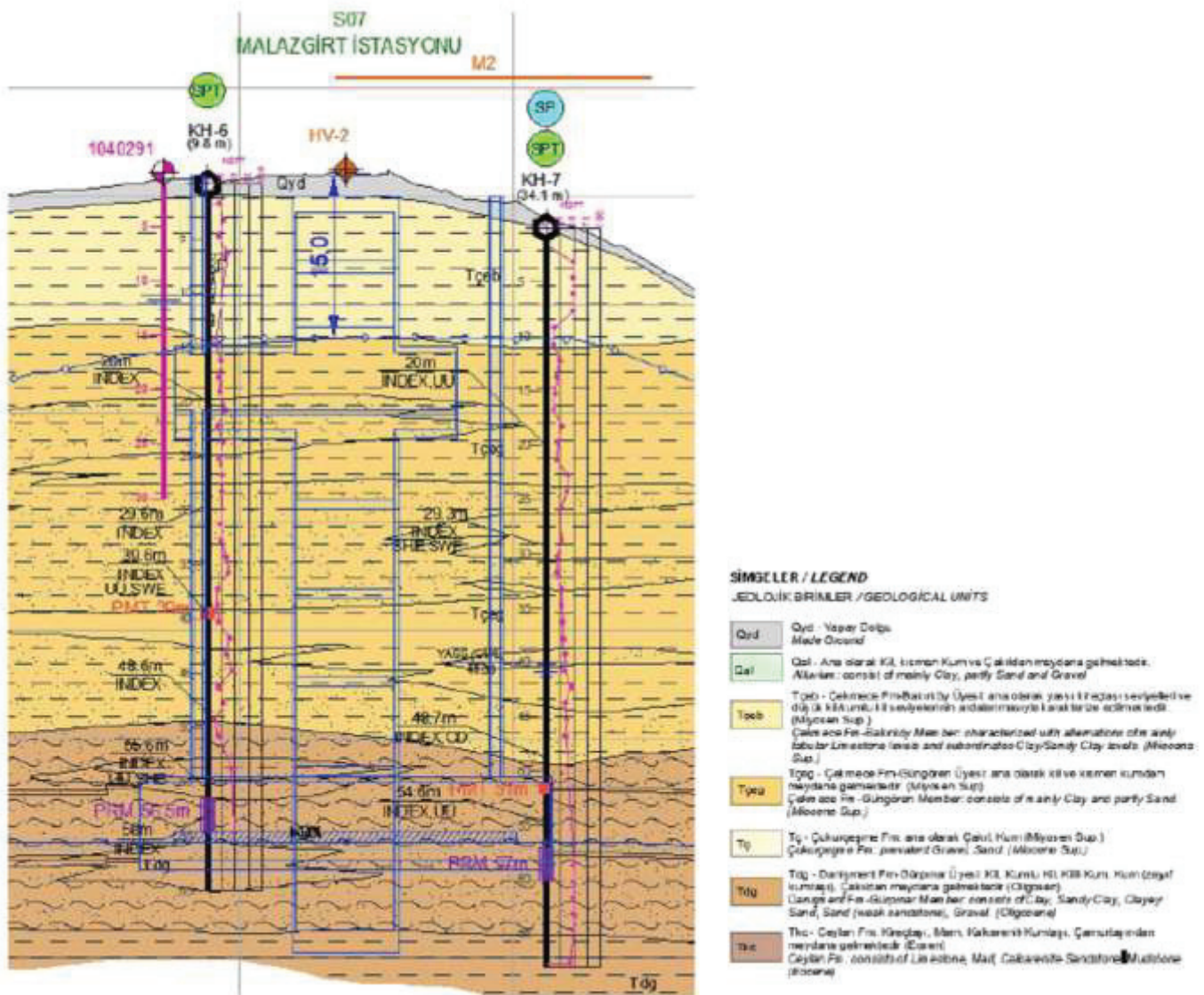
İstanbul'un nüfus ve yapı stoğu yoğunluğu yüksek olan Bahçelievler, Bağcılar ve Küçükçekmece ilçelerini kapsayan ve M1 metro hattı uzatması olan Kirazlı-Halkalı Metro Hattı Projesi (M1B) 9.7 km uzunluğunda olup, 9 istasyondan oluşmaktadır (Şekil 1). Çalışma kapsamında, hattın en derin istasyon shaftlarından biri olan Malazgirt İstasyonu, geoteknik açıdan değerlendirilmiştir.



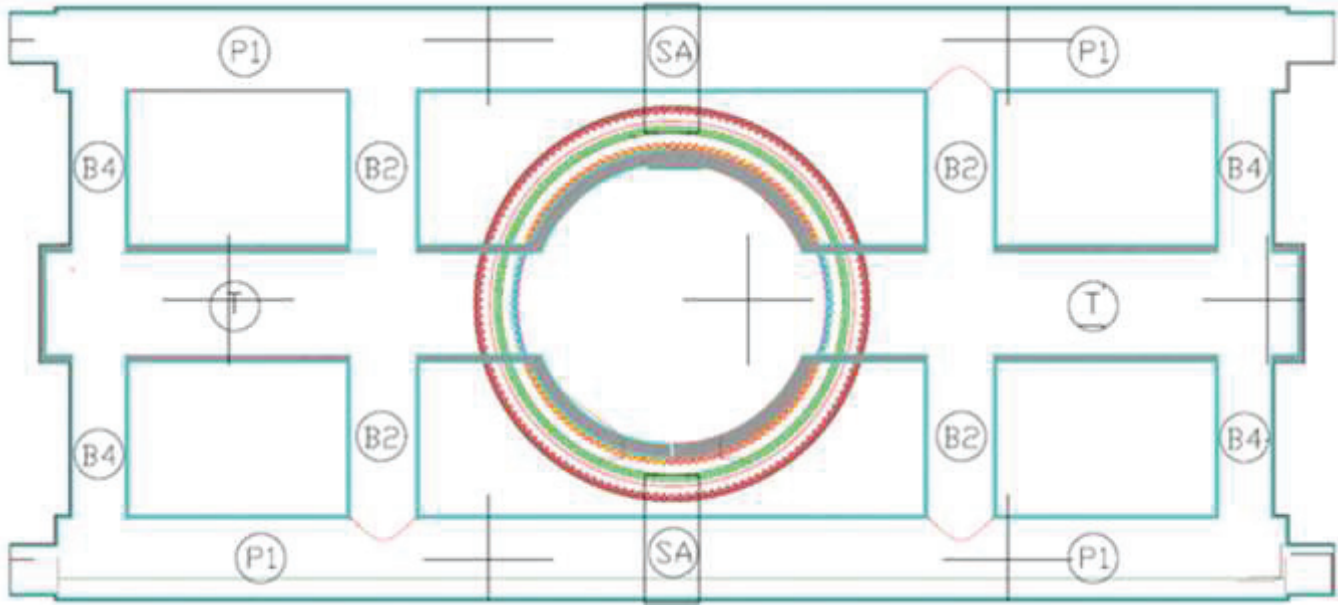
Şekil 1. Kirazlı-Halkalı Metro Hattı güzergahı ve çalışma sahasının konumu

Şekil 2'de Malazgirt İstasyonu'na ait stratigrafik kesit ile istasyonun detaylı özellikleri verilmiştir. Çalışma sahasının bulunduğu bölgede çok sert ve iyi konsolide yapıda bulunan Paleozoyik yaşlı Trakya Formasyonu temeli oluşturmaktadır. Eosen yaşlı Ceylan Formasyonu ve Soğucak kireçtaşı üyesi uyumsuz olarak Trakya Formasyonunu örtmektedir. Oligosen yaşlı Danişment Formasyonuna ait Gürpınar üyesi (kil egemen), Miyosen yaşlı Çukurçeşme Formasyonu (kum ve silt karışımı), Güngören (kil) ve Bakırköy (kireçtaşı, marn ve kil) üyelerine ayrılan Çekmece Formasyonu tarafından örtülmüştür. Yerleşim alanlarında çoğunlukla görülen dere vadilerindeki alüvyon ve güncel yüzey dolguları, bölge stratigrafisindeki en genç birimlerdir (GİR, 2015).

Şekil 3'te, Malazgirt İstasyon ve peron tünellerine ait kesit görünümü verilmiştir. Malazgirt İstasyonu'nda shaft kazısı tamamlanmış olup, halen peron kazıları (Kuzey ve Güney Peron) devam etmektedir. Söz konusu istasyon shaftı dairesel kesitli olup, geçici tahkimat (kazık + betonarme halka kiriş) sistemi formundadır. Peron tünellerinde ise tahkimat sistemi çift sıra çelik boru şemsiye kemer sistemi olarak tasarlanmıştır. Her bir peron kazısı ise zemin parametreleri, peron derinlikleri gibi parametreler göz önünde bulundurularak 4 aşamalı olarak tasarlanmıştır. Şu anda, Kuzey Peron kazısında, 1. aşamadaki ilerleme 72.37 m, 2. aşamada ise 58.12 m'dir. Güney Peron kazısında ise 1. Aşama ve 2. Aşama kazılar sırası ile 72.38 m ve 26.63 m'dir. Peron kazıları üzerindeki örtü kalınlığı ortalama 50,34 m olup, kazılar sırasında su ile karşılaşılmamıştır. Ancak, shaft duvarlarından düzensiz olarak su sızıntıları tespit edilmiştir. Peron tünel kazıları sırasında yapılan gözlemler neticesinde, Malazgirt shaftı çevresindeki sıkı konsolide ve geçirimsiz formasyonda su taşıyan tabaka bulunmadığı tespit edilmiş olup, oluşan su girişlerinin, örtü kalınlığını oluşturan zemin içerisinde birikmiş düşük miktarda yeraltı suyu ve/veya kum mercleklerinde bulunan su birikimlerinden kaynaklıdır. Sahada gözlenen söz konusu durum, zeminde oluşabilecek hacim kayıplarının düşük seviyede olmasına imkan sağlamaktadır. Peron kazıları üzerindeki örtü tabakası siltli ve killi sıkı zemin grubundadır. Ana formasyon üzerinde ise dolgu tabakası mevcuttur.



Şekil 2. Malazgirt İstasyonu'na ait stratigrafik kesit ve detaylı özellikleri.



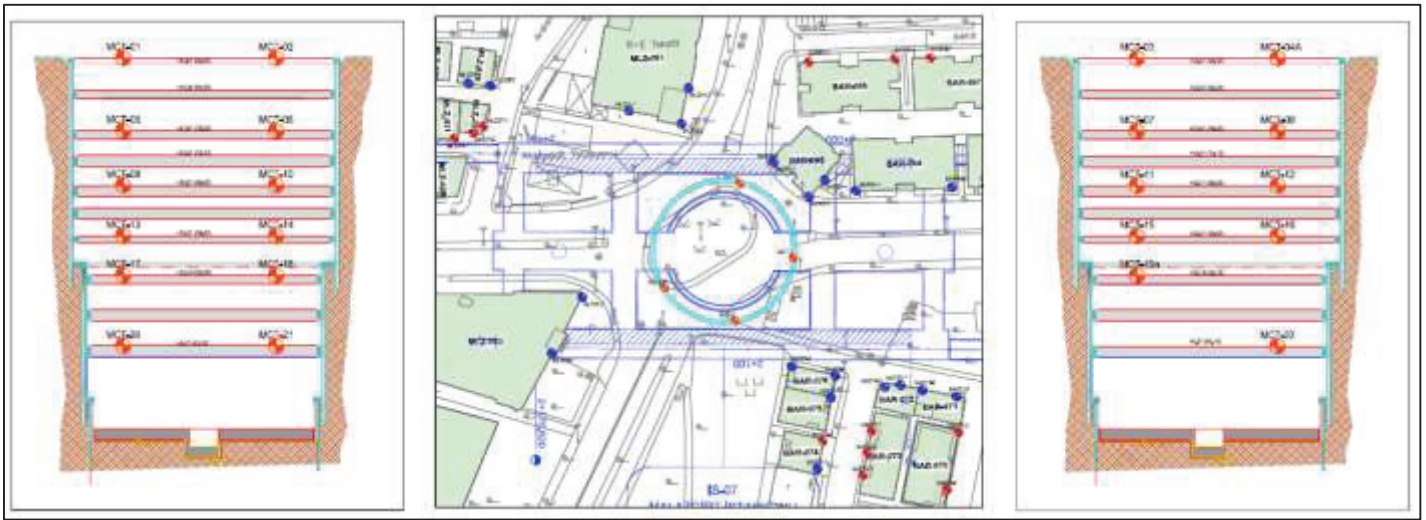
Şekil 3. Malazgirt İstasyon ve peron tünellerine ait kesit görünümü

3 SAHA ÇALIŞMALARI

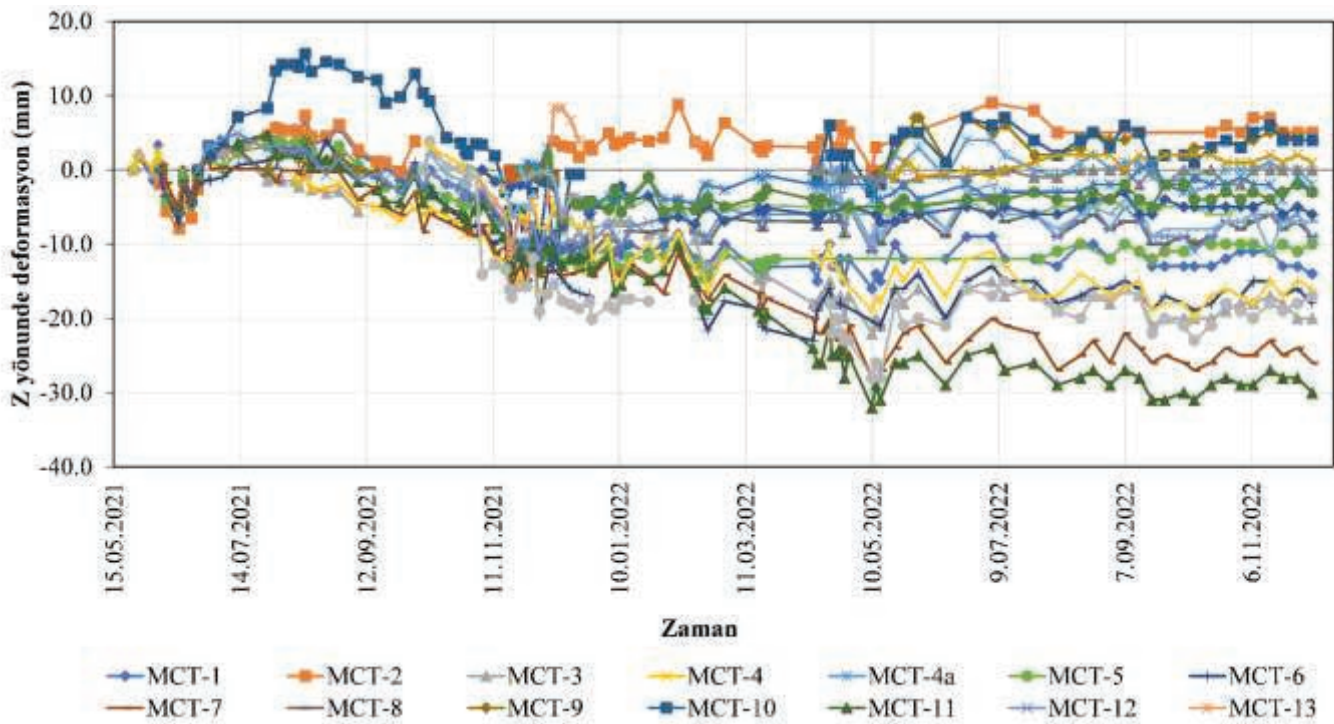
Proje kapsamında gerçekleştirilen geoteknik ölçümlerde kullanılan geoteknik ekipmanlar kullanım amaçlarına ve bölgelerine göre değişim göstermektedir. Malazgirt İstasyon kazı imatları sonucu oluşan deformasyonların yüzeydeki ve çevre binalardaki etkisini incelemek üzere; shaft ve peron tünellerinde bulunan 3D optik okuyuculardan, istasyon bölgesindeki yüzey oturma bulonlarından ve binalarda bulunan 3D optik okuyucular ile yüzey oturma bulonlarından faydalanılmıştır.

3.1 Shaft ve Peron Tünelleri

Şaft ve peronlarda geoteknik ölçümler düzenli aralıklarla yapılmaktadır. Malazgirt İstasyon şaftında bulunan 3D optik okuyucuların yerleşim planı Şekil 4'te verilmiştir. İstasyon şaftında farklı bölge ve seviyelerde bulunan 3D optik okuyuculardan okunan deformasyon değerleri +15 mm ile -32 mm arasında olup, sırasıyla, MCT-10 ve MCT-11 noktalarından elde edilmiştir. Başlık kirişinden itibaren artan derinlik yönünde 4. kuşak kirişinde bulunan optik okuyuculardan elde edilen veriler ışığında, şaftın kuzey-doğu ve güney-batı aksında önemli deformasyon davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu duruma göre, şaftın kuzey doğusunda bir +15 mm'lik bir kabarma ve güney batısında -32 mm'lik bir oturma meydana geldiği ölçülmüştür. Şekil 5'te Malazgirt istasyon şaftında kuşak kirişlerinde bulunan 3D optik okuyuculardan elde edilen deformasyon değerleri verilmiştir.



Şekil 4. Malazgirt İstasyon şaftına ait 3D optik okuyucu yerleşim planı



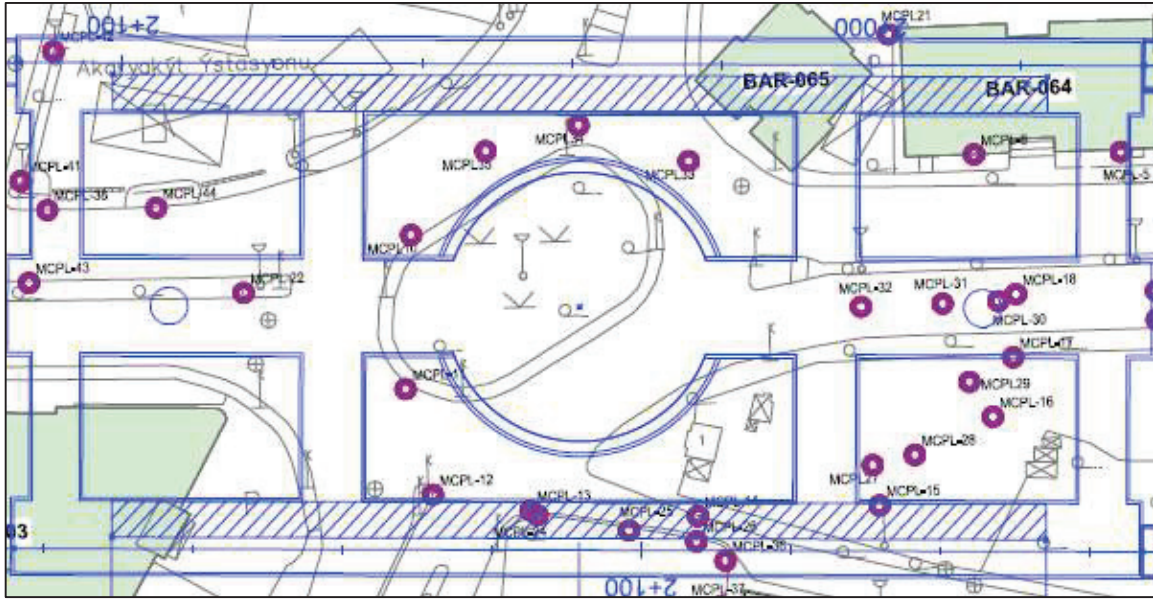
Şekil 5. Malazgirt İstasyon şaftına ait zamana dayalı deformasyon değerleri

Malazgirt İstasyonu kuzey ve güney peronlarına ait 3D optik okuyucu yerleşim planı Şekil 6'da verilmiştir. Hat-1 ve Hat-2'de belirli aralıklarla 5 adet optik okuyucu tavandan itibaren belli bir düzen içerisinde peron tünellerine monte edilmiştir. Hat-1'de ölçülen en yüksek oturma değeri P1-2+070 noktasından elde edilmiş olup, -15 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 7). Hat-1 peron tüneline gelen yük neredeyse homojen bir şekilde dağılmış olup, 1-5-6 ve 7 noktalarında birbirlerine çok yakın şekilde tavan yüküne karşı davranış göstermiştir. Dolayısıyla, tünelin cidarına doğru 2 noktasında söz konusu yükün azaldığı görülmüştür.

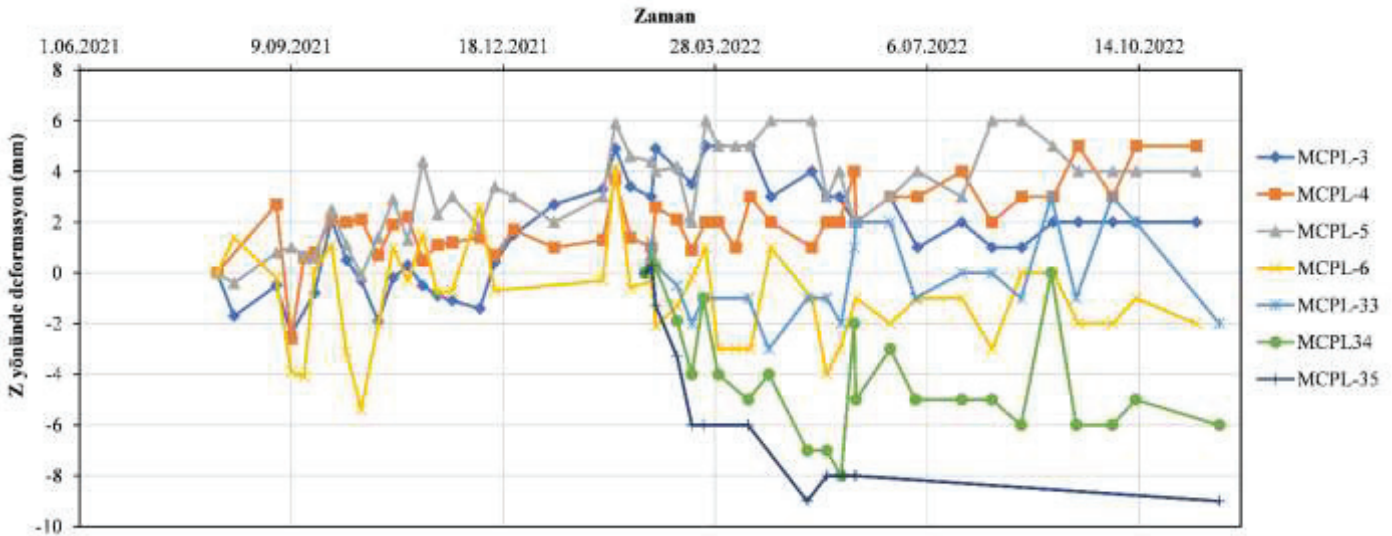
Hat-2'de ise en yüksek oturma değeri P2-2+099 noktasında -16,2 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 8). Burada tünelin tavandan derinliğe bağlı yüksek miktarda yük aldığı söylenebilir. Bu durumda bile Hat-2 peron tünelinin diğer bölgelerinde -16,2 mm değerinin altında seyrettiği tespit edilmiştir.

3.2 İstasyon Bölgesi ve Binalar

İstasyon shaftı çevresinde oluşan deformasyon gelişiminin izlendiği 7 adet yüzey oturma bulonundan (Şekil 9) elde edilen veriler sonucunda, en yüksek oturma değeri istasyon shaftının kuzeyinde bulunan MCPL-35 noktasında tespit edilmiş olup, -9 mm'dir (Şekil 10).



Şekil 9. Malazgirt İstasyonu zemin oturma bulonu yerleşim planı



Şekil 10. Malazgirt İstasyon çevresinde zamana dayalı oluşan oturma değerleri

Şaft ve peron kazı imalat çalışmalarının, Malazgirt İstasyon bölgesindeki binalara etkisini incelemek üzere, kazı imalatları açısından kritik olan BAR 63-64-65 proje numaralı binalar ele alınmıştır (Şekil 11). Söz konusu binalara toplam 13 adet bina oturma bulonu yerleştirilmiş olup, zamana dayalı davranışları Şekil 12'de verilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda en yüksek oturma değeri shaft bölgesine en yakın BAR-65 proje numaralı binada ölçülmüş olup, -17 mm olarak tespit edilmiştir. Sırasıyla etkilenme seviyesine göre BAR-64 proje numaralı binada en yüksek oturma değeri -6 mm olarak ölçülmüş olup, BAR-63 proje numaralı binada ise +5 mm kabarma tespit edilmiştir.

Malazgirt İstasyon bölgesinde bulunan binalarda yapılan gözlemsel teftişlerde zemin gerilmesinden kaynaklı çekme gerilmelerinin neden olduğu yapısal çatlaklara rastlanmıştır. Araştırma konusu olan binalarda yapılan tespitler sonucu, binaların kazılar öncesi çatlaklarının

KH projesinde konvansiyonel NATM tünel açma yöntemi, dikkatli ve iyi kontrollü tünel kazısı ile zemin hareketlerini tahmin edilenden daha düşük değerlerde, başarılı olmuştur. Dolayısıyla, öngörülen veriler ve son saha ölçüm verileri ile karşılaştırıldığında, S_{max} oturma değerleri çok daha düşük kalmaktadır.

Çizelge 1. Malazgirt İstasyonu peron tünel kazıları ile zemin yüzey ve bina yüzey oturma değerlerinin karşılaştırılması

Öngörülen Yüzey Oturma (Z) (mm)	Gerçekleşen Maksimum Yüzey oturma (Z) (mm)	Gerçekleşen Maksimum Bina Yüzey Oturma (Z) (mm)
48	+15,0 ; -32,0	+5,0 ; -170

Çizelge 2. Kuzey ve Güney peronlarında öngörülen ve gerçekleşen deformasyon değerlerinin karşılaştırılması

Kuzey Peron (Hat-1)			
Öngörülen Deformasyon (mm)		Gerçekleşen deformasyon (mm)	
$\pm \chi$	$\pm Z$	$\pm \chi_{max}$	$\pm Z_{max}$
43	72	+9,6 / -5,7	-15
Güney Peron (Hat-2)			
Öngörülen Deformasyon (mm)		Gerçekleşen deformasyon (mm)	
$\pm \chi$	$\pm Z$	$\pm \chi_{max}$	$\pm Z_{max}$
43	72	+7,0 / -15,6	-16,2

İzleme verileri üzerinde yapılan dikkatli bir inceleme, örtü tabakasının oturmaya olan katkısının küçük olduğuna işaret etmektedir. Genelde bölgenin zemin koşullarında konsolidasyon oturmaları derinlikle artış göstermekte olup, çoğunlukla tünele yakın zeminde veya tünel temelini altında oluşur. Fizibilite raporları çerçevesinde öngörülen deformasyon değerleri peron tünellerinin bulunduğu Danişment formasyonu için 72 mm'dir. Bu değer, örtü tabakasını oluşturan diğer zemin formasyonları için de geçerlidir. Tünel aynasındaki zeminin neden olduğu boyuna deplasman ve yatay deplasman maksimum değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Tünel aynasında ölçülen deplasman değerleri kuru zemin ve keskin sıkı zemin şartlarının özellikleri olarak yorumlanabilir. Derin peron ve shaft kazıları nedeni ile Malazgirt istasyonunun üzerindeki zeminde meydana gelen oturmalar, öngörülen oturma değerlerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

4 SONUÇ VE TARTIŞMA

Bir tünelin kazılması, tüneli çevreleyen zeminde gerilimin azalmasına yol açar ve sonuç olarak, toprak kütlesi kazıya doğru hareket eder. Tünel açmanın neden olduğu bu yer hareketleri genellikle, tünelin teorik olarak kazılan hacminin yüzdesi olarak ifade edilen zemin hacmi kaybı terimi ile karakterize edilir. Küçük gerinimlerdeki zemin sertliği/sıkılığının bozulması, ortaya çıkan zemin oturması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Böylece, sahada ölçülen

deformasyonlarda, bölgenin davranışına göre heterojen dağılımlı oturmalar (aynı düzlemde farklı oturmalar ve/veya oturma, kabarma vb.) meydana geldiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, Kirazlı-Halkalı Metro Hattı Projesi kapsamında Malazgirt İstasyonu için elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

- İstasyon yapısında gerçekleşen oturmaların (S_{max}), artan tünel derinliği ile azaldığı görülmüştür.
- Her bina için uygulanan oturma ölçümleri, bağımsız zemin oturma ölçümleri ile mukayese edilmiş, oturma eğrisinin bina rijitlikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır.
- Genel olarak zemin mukavemeti/sıkılığı azaldığında tünelin ovalleşmesi de artar. Tünel ovalleşmesi genellikle dikey olarak kısalmış ve yatay olarak genişlemiştir ve tünel hacminde bir değişiklik olmamıştır. Malazgirt istasyon tünellerinde kuru zemin koşullarından ötürü zemin mukavemeti/sıkılığı azalmadığından tünelin ovalleşmesi yüksek boyutlarda gerçekleşmemiştir.
- Tünel kazılarının iyi bir şekilde kontrol edildiği, yüzey oturmalarının kontrol edilebilir düzeyde olduğu ve şaft çevresi etki bölgesinde gerçekleşen yüzey oturmalarının öngörülen oturmalarından daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Zemin hareketlerini değerlendirmek için, zemin koşullarının ve inşaat sürecinin ayrıntılı bilgisinin hayati önemi bir kez daha teyit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., 2014. *Mechanical excavation in mining and civil industries*, CRC Press, ISBN 9781466584747.
- Burland, J., 2001. *Assessment methods used in design*. In: Burland J, Standing J, Jardine F (eds) *Building response to tunnelling: case studies from construction of the Jubilee Line Extension*, vol 1. projects and methods. Thomas Telford, London, pp 23–43.
- Geoteknik Değerlendirme Raporu (GİR), 2015. *Kirazlı Halkalı Raylı Sistem Hattının Uygulamaya Esas Kesin Proje Hizmetleri*, Zemin Araştırma ve Deprem Etütleri Raporu, No. 2B, 2015, İstanbul.
- Guglielmetti V., Grasso. P., Mahtap. A., Xu. S., 2007. *Mechanized Tunnelling in Urban Areas Design Methodology and Construction Control*. Taylor and Francis, eBook ISBN 9780203938515.
- Mahmutoğlu, Y., 2011. *Surface subsidence induced by twin subway tunnelling in soft ground conditions in Istanbul*. Bull Eng Geol Environ 70:115–131. <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0289-8>.
- Topal, C., Mahmutoğlu Y., 2021. *Assessment of surface settlement induced by tunnel excavations for the Esenler-Basakşehir (Istanbul, Turkey) Subway Line*. Environmental Earth Sciences 80:188 <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09509-6>.

Numerical Modeling in Fractured Aquifer Reservoir due to Environmental Management

P. Zafari

Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

E. Moosavi, M. Gholinejad

Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Research Center for Modeling and Optimization in Science and Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

B. Adibnejad

Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Due to the increase in greenhouse gases and the need to reduce its emission to manage environmental problems, CO₂ capture and storage technology are important. The presence of fractures in the reservoir causes finger congestion to increase dissolution in line with CO₂ storage. In this research, influence of permeability, during CO₂ injection into an aquifer crack reservoir has been simulated using COMSOL multi-physics 4.3 software. By reducing the permeability from 100 mD to 1 mD, Rayleigh is lower than the critical value, indicating the dominant molecular penetration force and the non-occurrence of the convection phenomenon. As the aperture of the aquifer is widened, it reaches the equilibrium concentration in a shorter time interval. In the aperture of 1mm after 50 years, there is no trace of reaching the equilibrium concentration. Therefore, aquifer permeability will have a significant impact on the onset of convective mixing time to increase storage safety.

1 INTRODUCTION

The production and emission of greenhouse gases like CO₂ through the atmosphere are the main causes of increasing temperature of the global warming (Bénard, 1900). Convection phenomenon in two-dimensional oil reservoirs were studied in single-phase. They evaluated the effects of fracture parameter (fracture aperture, fracture intensity and fracture connectivity) on the fluid combination changes. The numerical results indicate that displacement occurs at the fracture aperture, whereas the combination changes affect only the fracture opening. Moreover, continuous fractures remarkably affect the expanded fractures (Ghorayeb and Firoozabadi, 2000). The movement of convective currents in formations with various heterogeneities was investigated based on different cases of permeability distribution. Therefore, sinusoidal random functions were used to define permeability distribution. Finally, it presented the relationship between commencement and development of instabilities by formation properties such as the permeability of the formation (Simmons, 2001). The consequence of permeability changes in CO₂ trapping by natural convection due to the density and CO₂ migration in saline aquifers was studied numerically. The results presented that the geometry of geological formations has a greater effect on the amount of CO₂ trapped than the effective permeability of the formation (Han et al., 2010). Presented an analytical model of CO₂ movement under the cap rock owing

to groundwater flow in inclined reservoirs as well as CO₂ capturing. The results indicate that the effect of these hypotheses brings about the non-noticeable behavior of CO₂. This model was capable of achieving CO₂ storage efficacy on a macroscopic scale using the reservoir parameters (MacMinn et al., 2010). CO₂ dissolution was investigated through diagonal cracks in brine aquifer reservoir. The results indicate that the dissolution rate increases when the aperture is perpendicular and the contact surface is larger, and also, the mass transfer rate increases in more Rayleigh number (Watson et al., 2010). Examined CO₂ trapping as a result of dissolution in fissured aquifers by analytical solutions in porous media. Existence of a fracture in the aquifer model will increase the dissolution of CO₂ from 16.9% to 21.6% (Inding and Blunt, 2011). The phenomenon of instability and density difference was first presented. This phenomenon has been scrutinized for the sake of temperature changes by placing water between two parallel sheets that are near to one another. He increased the temperature of the lower sheet and found out that the thermal energy transited to the fluid through the thermal sheet conduction leads to fluid motion (Zhang, 2011). The effect of fracturing on CO₂ long term capturing in underground aquifer was evaluated. Vertical and horizontal hydraulic fractures as well as multiple transverse fractures in horizontal wells were modeled and the influences of fracture features, water injection and non-Darcy flow were correspondingly considered. The results indicate the upsurge of injection techniques in the track of storage capacity in brine aquifers through removing the restrictions of injection because of permeability and low thickness (Raziperchikolaee et al., 2013). The effect of fracture density, location of fracture and the fracture orientation on CO₂ dissolution in aquifer was evaluated. The results showed that the vertical fracture inside the aquifer will have a significant effect on the dissolution compared to the vertical fracture outside it. Also, the presence of diagonal fractures perpendicular to the border of the aquifer reduces the infiltration rate (Sebben et al., 2015). The porous and anisotropic 3D model of the convection phenomenon was simulated. The results indicate the effect of anisotropy in delaying the beginning of convection and fingering. Correspondingly, a heterogeneous model with a permeability of 0.01 to 10 mD was measured as a series of elliptical flow barrier hitches in the system. Through comparing the heterogeneous and anisotropic model, the onset time of convection in the heterogeneous state appeared earlier, which is practically akin to the isotropic model (Green and Ennis-King, 2018). The effect of density, orientation, permeability and surface roughness on dissolution CO₂ and finger diffusion was investigated. The results indicated that the presence of a fracture causes the fingers to compress to grow the permeability path. Besides, the aperture orientation increases the dissolution in the CO₂ storage direction. Similarly, matrix permeability has a dominant and positive effect on CO₂ storage in multiple fracture systems (Rezk and Foroozesh, 2019). Fingering behavior was carried out to investigate the effect of layer properties (thickness and permeability) on convective mixing and CO₂ dissolution in aquifer. The results indicate that, the presence of the low permeable layer under the upper layer with high permeability can enhance the rate of CO₂ dissolution up to 50% after the fingerings reach the lower layer. Nonetheless, this velocity is still much more (more than twice) than the dissolution velocity in the homogeneous with the same permeability of the lower layer. This means that the presence of a layer with high permeability. This subjects to accelerate the early dissolution of CO₂ (Taheri et al., 2021). Features of pervading periodically CO₂ into saline discharge were studied using a mechanical reservoir model, including pressure management and storage capacity. CO₂ Under the influence of well position in geological structure (Shchipanov et al., 2022).

In this article, the phenomenon of diffusion and checking concentration of CO₂ in a homogeneous reservoirs based on aperture rate and permeability rate have been measured according to the simulation. The results show how flow due to fractures is attributed to the downward movement of a heavier layer as a result of high density.

2 NUMERICAL SIMULATION

Due to CO₂ dissolution, a concentration gradient is formed and mass transfer takes place that it can be accessed through the transport of diluted species section in COMSOL software. Now, in order to model the CO₂ dissolution in the reservoir, we couple the Darcy flow with the mass transfer equations so that we can observe the convective process. Fluid movement in a porous medium is known as Darcy's equation (Eq. 1) and mass transfer in a porous medium is significant according to Equation 2.

$$v = -\frac{K}{\mu} (\nabla P - \rho g \nabla z) \quad (1)$$

Where v is Darcy velocity in $\frac{m}{s}$, K is permeability in m^2 , μ is viscosity in Pa.s, ∇P is pressure gradient in Pa, ρ is density (concentration function) in $\frac{kg}{m^3}$, g is gravitational acceleration in $\frac{m}{s^2}$ and z is vertical distance in m.

$$D\phi \nabla^2 C - v \nabla C = \phi \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

Where D is diffusion coefficient in $\frac{m^2}{s}$, C is concentration in $\frac{mol}{m^3}$ and ϕ is porosity.

Both density and viscosity are a function of salt concentration. In this model, constant viscosity is assumed. Also, density changes and its effect in Darcy's model are considered by Boussinesq linear approximation (Eq. 3).

$$\rho = \rho_0 + \beta \times C \quad (3)$$

Where ρ_0 is the density of the primary aquifer in $\frac{mol}{m^3}$ and β is coefficient of the density increase, the solubility function of soluble particle in aquifer in $\frac{Kg}{Kmol}$.

In order to simulate, the model has been considered while CO₂ is being dissolved in the aquifer according to the two dimensional space of the rectangular shape (15 m high and 30 m long). Figure 1 shows a view of the presented model. This aquifer reservoir with two apertures is placed in the depth of 1 km). In meshing part, the division of grades has been chosen as much as 0.2 m and the highest size of the grades is 0.5 m and the least ones is 0.001. There are 4800 elements and the grade type is of Extra Fine. A summary of the modeling process is shown in Figure 2.

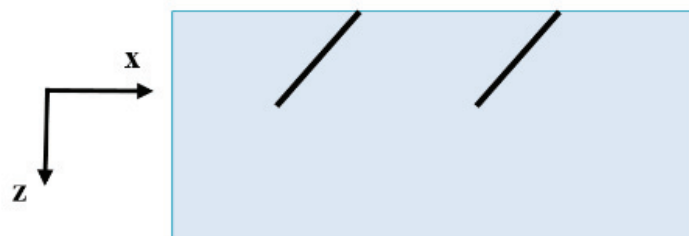


Figure 1. A view of the target model

In case the simulating condition is assumed to be homogenous like a saturated horizontal reservoir of water, the primary boundary conditions are as follows:

- Velocity is zero in all boundaries,
- There are not any concentration changes in lateral and lower boundaries,
- The CO₂ equilibrium concentration is stable at the upper boundary,

- At the time of zero, the fluid is still and the gas concentration is zero in the whole porous condition.

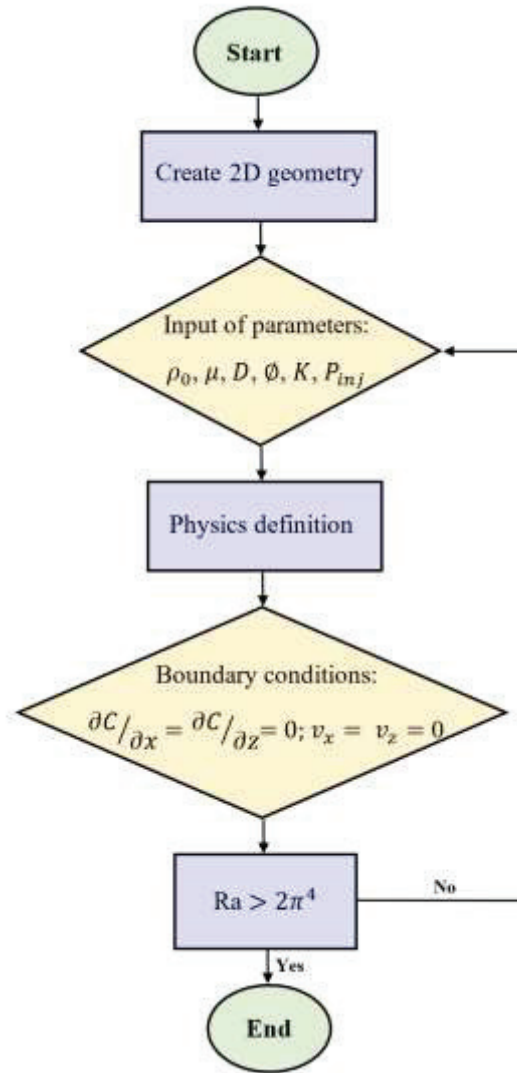


Figure 2. Flowchart of simulation

3 RESULTS

3.1 Sensitivity Based on Fracture Aperture

Remarking the input parameter (Tab. 1), CO₂ has been injected into the aquifer and the simulation duration has been estimated to be 50 years. Further, the concentration profile has been collected in different time intervals.

Table 1. Input parameters

Initial density aquifer (kg/m^3)	Velocity (cp)	Diffusion coefficient (m^2/s)	Porosity (%)	Permeability (mD)	Injection pressure (Pa)
1000	0.5	5×10^{-9}	0.15	100	10×10^6

Figure 3 shows the profile of CO₂ concentration with increasing aperture to 1 cm. as shown in Figure 3d, at a 1 cm opening, the fingerings become larger after 5 years; Though, CO₂ has not yet been fully dispersed and the convection phenomenon has not occurred. After 10 years, the convective flow begins as shown in Figure 3e, and these fingerings have a high concentration of CO₂ and due to their higher density than water without saturation CO₂, they move downwards because of the force of gravity. Water with a lower density goes up. After 30 years, the resultant fingerings form the joining points as displayed in Figure 3g, the conversion is made. Figure 3i diffusion the saturated system of CO₂ after 50 years and it is trapped in the aquifer reservoir for storing. Also, in Figure 4, after 10 years of injection, a larger part of the aquifer has been affected by carbon (Fig. 4e). According to the obtained results, it can be seen that the increase in aperture caused the channeling of carbon along the fracture and has a direct effect on fingering.

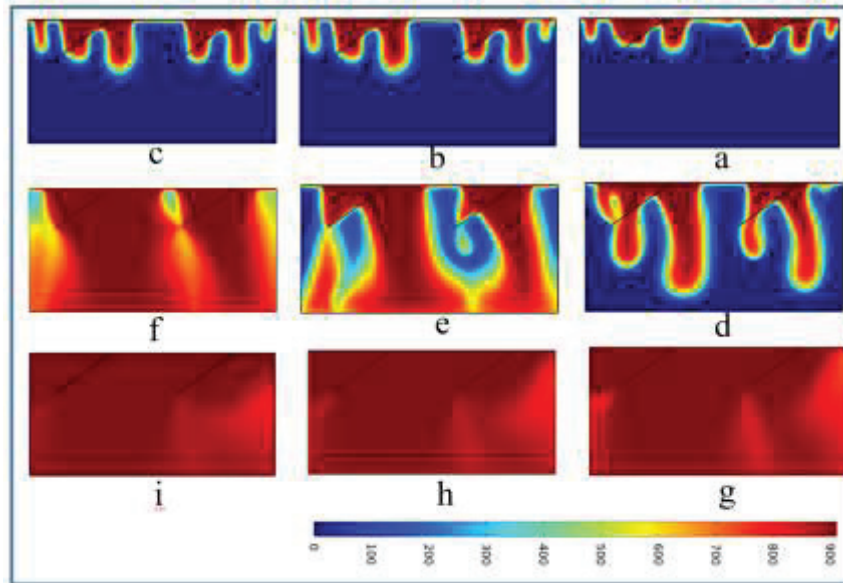


Figure 3. Profile of CO₂ concentration in the period of a) 1 year, b) 2 years, c) 3 years, d) 5 years, e) 10 years, f) 15 years, g) 20 years, h) 40 years and i) 50 years with 1 cm aperture

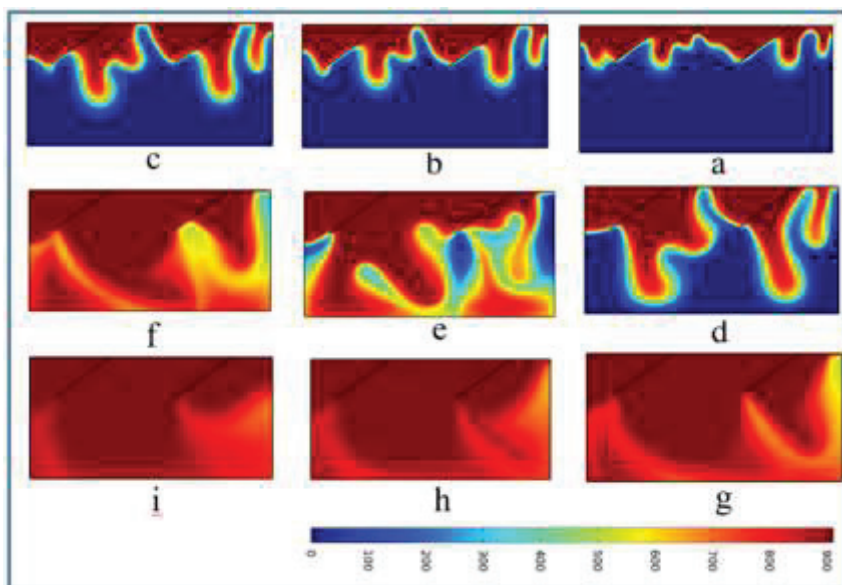


Figure 4. Profile of CO₂ concentration in the period of a) 1 year, b) 2 years, c) 3 years, d) 5 years, e) 10 years, f) 15 years, g) 20 years, h) 40 years and i) 50 years with 5 cm aperture

3.2 Sensitivity Based on Permeability

According to Figure 5, when the permeability is 1 mD, the penetration phenomenon dominates the entire environment and there is no effect of fingerings and hydrodynamic instability in the system and convection phenomenon has not occurred. As a result, the dissolution of CO₂ is very slow and this issue will reduce the security of CO₂ storage. Due to the fact that CO₂ is slowly being trapped in the formation water and finally it can find the opportunity leave this place and enter the atmosphere and the whole CCS project will fail. If there is only molecular diffusion and we don't witness the convection phenomenon, it may take thousands of years to saturate the entire aquifer with CO₂.

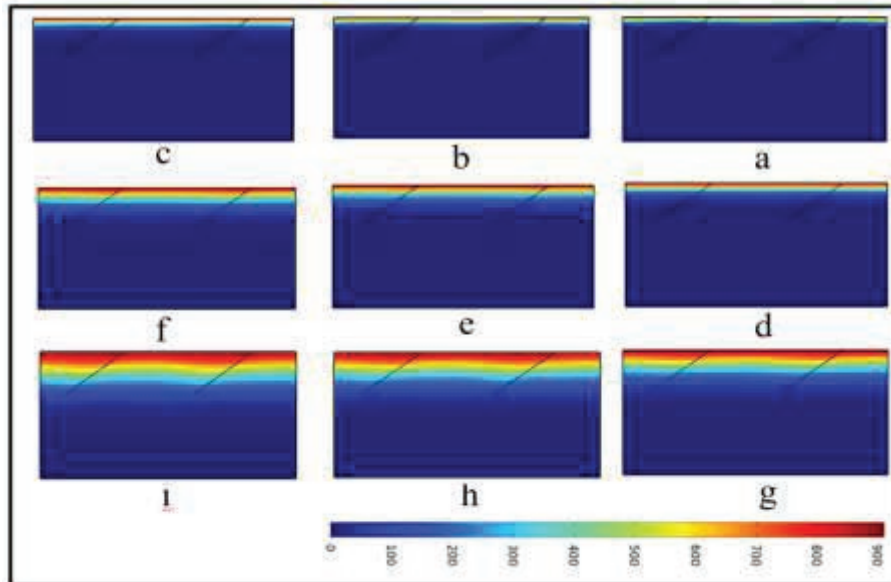


Figure 5. Profile of CO₂ concentration in the period of a) 1 year, b) 2 years, c) 3 years, d) 5 years, e) 10 years, f) 15 years, g) 20 years, h) 40 years and i) 50 years with 1 mD permeability

4 CONCLUSIONS

According to the boundary conditions of the problem in this modeling, the critical Rayleigh number is equal to $2\pi^4$. If the Rayleigh number is less than this value, convection flow will not occur and molecular diffusion is effective in mass transfer. If the Rayleigh number is greater than the determined critical limit, molecular diffusion is dominant at first. After a certain period of time, convective mixing will occur.

Convection phenomenon during the transfer of CO₂ mass in aquifer reservoir has been studied, focusing on the effect of the aperture and permeability. The results are summarized as below:

- Molecular diffusion of carbon in formation water increases the density of water. The presence of fluid with higher density in the upper part leads to occurrence of convective flow that increase the dissolution rate significantly.
- Since in carbon gas storage, gas dissolution rate in the reservoir is the target. Therefore, accelerating the formation of convective mixing is important. The presence of fractures in aquifer reservoir indicates the improvement of carbon dissolution and storage performance. In order to control environmental problems.
- As the aperture of the aquifer is widened, it reaches the equilibrium concentration in a shorter time interval and faster. After 50 years, it has reached the saturated condition.
- By reducing the permeability to 1 mD, the Rayleigh number is less than the critical level, in this case the molecular penetration dominates the system and after 50 years, only a small part above the aquifer causes dissolution. As a result, it will reduce safety in storage.

REFERENCES

- Bénard, H, 1900. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. *Gen. Sci*, pp.1261-1271.
- Ghorayeb, K, Firoozabadi, A, 2000, Numerical study of natural convection and diffusion in fractured porous media, pp. 12- 20.
- Green, P.C., Ennis-King, J., 2018, Steady Flux Regime During Convective Mixing in Three- Dimensional heterogeneous porous media fluids, pp. 58.
- Han, W.S, Lee, S.Y, Lu, C, McPherson, B.J, 2010. Effects of permeability on CO₂ trapping mechanisms and buoyancy-driven CO₂ migration in saline formations.
- Iding, M, Blunt, M. J, 2011. Enhanced solubility trapping of CO₂ in fractured reservoirs, *Energy procedia. Journal of Fluid Science and Technology*, pp.4961–4968.
- MacMinn, C.W, Szulczewski, M.L, Juanes, R, 2010. CO₂ migration in saline aquifers capillary trapping under slope and groundwater flow. *Journal of fluid mechanics*, pp. 329-351.
- Raziperchikolae, S, Alvarado, V, Yin, S, 2013. Effect of hydraulic fracturing on long-term storage of CO₂ in stimulated saline aquifers. *Energy*, pp. 1091–1104.
- Rezk, M.G, Foroozesh, J, (2019). Study of convective-diffusive flow during CO₂ sequestration in fractured heterogeneous saline aquifers, *Journal of natural gas science and Engineering*, pp.1875-5100.
- Sebben, M.L, Werner, A.D. Graf, T, 2015. Seawater intrusion in fractured coastal aquifers: A preliminary numerical investigation using a fractured Henry problem. *Advances in water resources*, pp. 93-108.
- Shchipanov, A, Kollbotn, L, Encinas, M, Fjelde, I, Berenblyum, R, 2022. Periodic CO₂ injection for improved storage capacity and pressure management under Intermittent CO₂ supply, pp.15- 566.
- Simmons, C.T, Fenstermaker, T.R, Sharp, J.M, 2001. Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: approaches, resolutions and future challenges, pp. 245–275.
- Taheri, A., Torsæter, O, Lindeberg, E, Hadia, N.J, Wessel-Berg, D, 2021. Effect of convective mixing process on storage of CO₂ in saline aquifers with layered permeability. *Advances in chemical research*.
- Watson, F.E, Hunen, S.A, Mathias, R.R, Jones, S.E, Daniels, (2010). dissolution from inclined fractures in saline aquifers.
- Zhang, M, Bachu, S, 2011. Review of integrity of existing wells in relation to CO₂ geological storage: what do we know?, *Journal of Greenhouse*, pp. 826–840.

İş Sağlığı ve Güvenliğinde Bilgilendirme

Information on Occupational Health and Safety

C. C. Göztepe, B. Erdem, S. Akyıldız
Maden Mühendisi, A Sınıfı İGU

ÖZET: Bilgilendirme; çalışma yapılacak ortama özgü koşullar dikkate alınarak dikkat edilmesi gereken iş sağlığı ve güvenliği kurallarının çalışana anlatıldığı ve talimat olarak tebliğ edildiği çalışmadır. Yine, “İş İzni” kapsamında yapılacak iş ve işlemler çalışmaya başlamadan önce çalışana (kişiye özel-işe/işleme özel- ortama özel) kısa süreli de olsa anlatılıyorsa, bu işlem de “bilgilendirme” eylemidir.

Yasal olarak çalışmaya başlamadan önce çalışanlara verilmesi gereken bilgilendirme 10/6/2003 tarih ve 25134 sayılı ile Resmi Gazetede de yayınlanarak yürürlüğe giren 4857 sayılı İş Kanunu, 30 Haziran 2012 tarih ve 28339 sayılı R.G. de yayınlanarak yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı Güvenliği Kanunu, 89/391/EEC sayılı AB Çerçeve Sözleşmesi ve 155, 176, 187 ILO Sözleşmeleri ile daha da işlevsel hale gelmiş ve idari ve hukuki yönden işyerlerinde uygulanması ve takibini gerektiren bir konuma yükselmiştir.

ABSTRACT: To inform; It is a work in which the occupational health and safety rules are explained to the employee and notified as an instruction, taking into account the conditions specific to the environment where the work will be carried out. Again, if the work and procedures to be done within the scope of "Work Permit" are explained to the employee (personal-job-specific-specific to the environment) before starting the work, even for a short time, this process is also an act of "informing". The information to be given to the employees before they start working legally, the Labor Law No. 4857, which was published in the Official Gazette dated 10/6/2003 and numbered 25134, and the Occupational Health and Safety Law No. 6331, which was published in the Official Gazette dated June 30, 2012 and numbered 28339, It has become more functional with the EU Framework Convention No. 89/391/EEC and ILO Conventions 155, 176, 187. It has risen to a position that requires its implementation and follow-up in workplaces in terms of administrative and legal aspects.

1 GİRİŞ

Öncesinde değişik ad ve şekillerde uygulanan Bilgilendirme Çalışmaları 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun yürürlüğe girmesiyle daha anlamlı hale gelmiştir.

Ancak, konuyla doğrudan ilgili yükümlü ve görevlilerin yaptıkları iş ya da işlemlerin yeteri kadar farkında olmadıkları veya hedef kişi ya da kişilerde yeterli farkındalık sağlayamadıkları görülmektedir. Konudan haberdar olmadığı söyleyenler ise yükümlü ya da görevliler içinde oransal olarak, büyük bir kitleyi oluşturmaktadır.

Dolayısıyla bilgilendirme, İSG uygulamaları içinde sıklıkla atlanan konular içindedir.

Bilgilendirmenin Mesleki Eğitim, İşe Başlama Eğitimi, Yapılan İşe Özel İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimleri ve Temel İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinden ibaret olduğu da varsayılmaktadır.

Gerçekte öyle mi?

Konuyla ilgili olarak AB Çerçeve Sözleşmesi (89/391/EEC) ile ILO Sözleşmeleri (155, 176, 187) incelenmiştir.

AB hukukunda çalışanların iş sağlığı ve güvenliği konusunda bilgilendirme yükümlülüğü 12 Haziran 1989 tarih ve 89/391 EEC sayılı *İşte Çalışanların Sağlık ve Güvenliklerini İyileştirmeye Yönelik Tedbirler Alınmasına İlişkin Çerçeve Yönergesinin 10. Maddesinde her almıştır.*

Ülkemizdeki İSG mevzuatı uyum çalışmaları sürecinde, iş sağlığı ve güvenliği açısından “dayanak” olarak alınan belge, 12 Haziran 1989 Tarih ve 89/391/EEC Sayılı Konsey Direktifi (1989)’dir.

89/391 sayılı Sözleşme’nin ulusal mevzuat’a yansması 2003 yılında yayımlanıp usul açısından 2004 yılında Danıştay’ca yürütmesi durdurulan İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği ve nihayetinde 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (2012)’dur.

Sözleşmede yer alan bilgilendirme amaçlı düzenlemelere, Kanun’da ve Yönetmeliklerde de ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

Mesleki mevzuat açısından “*Yerüstü ve Yeraltı Maden İşyerlerinde Çalışan İşçilerin Sağlığının Korunması ve İş Güvenliğinin İyileştirilmesine İlişkin Asgari Şartlar Hakkındaki 03.12.1992 Tarih ve 92/104/EEC Sayılı Konsey Direktifi*”nde yapılan bilgilendirme düzenlemelerine Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği (2013)’nde yer verilmiştir.

ILO Sözleşmelerinde de konuyla ilgili değinimler vardır. Burada temel iki sözleşme (ILO-155 ve ILO-187) ile mesleki sözleşme (ILO-176) incelenmiştir

ILO-155 sayılı Sözleşmede “*İşletmedeki işçi temsilcilerine, iş sağlığını ve güvenliğini sağlamak için yeterli bilgi verilmesi ve ticari sırları açıklamamak şartıyla kendilerini temsil eden kuruluşlarla bu bilgilerin istişare edilmesi*”,

ILO-187 sayılı Sözleşmede “*Her üye, ulusal politikasını belirlerken, ulusal şartların ve uygulamanın ışığında ve en fazla temsil kabiliyetine sahip işveren ve işçi kuruluşlarına danışarak, iş risklerini ya da tehlikelerini değerlendirmek; iş riskleri ya da tehlikeleri ile kaynağında mücadele etmek; bilgilendirme, danışma ve eğitimi içeren ulusal önleyici güvenlik ve sağlık kültürünü oluşturmak gibi temel ilkeleri geliştirecektir.*”

ILO-176 sayılı Sözleşmede ise “*İşçilerin fiziksel, kimyasal ya da biyolojik tehlikelere maruz kalabilecekleri yerlerde işveren, işleriyle ilgili tehlikeler, sağlık riskleri, uygun engelleyici ve koruyucu önlemler konusunda işçileri kapsamlı biçimde bilgilendirecektir*”, “*kendi güvenliklerini ya da sağlıklarını etkileyebilecek işyeri tehlikelerini bilmek ve bu konularda bilgilendirilmek*” ve “*ulusal yasa ve yönetmelikler uyarınca işçiler aşağıdaki haklara sahiptirler: işveren ya da yetkili mercinin elinde olup kendi güvenlik ya da sağlıklarını ilgilendiren bilgileri almak*” ve şeklinde düzenlemeler yapılmıştır.

2 BİLGİLENDİRME NEDİR? NE DEĞİLDİR?

Bilgilendirme kısaca çalışmaya başlamadan önce, çalışanlarca bilinmesi gerekenlerin çalışanlara aktarılmasıdır. İSG mevzuatında da açıkça belirtildiği üzere bilgilendirmenin çalışanlara, çalışma öncesi verilmesi ayrıca yasal bir zorunluluktur.

Bilgilendirilmesi gerekenler, temel İSG eğitimlerinde olduğu gibi çalışma süreci içinde çalışanlara verilemez. Eğitimler süreç içinde yapılabilir ancak bilgilendirmeler mutlaka çalışma öncesi yapılmalıdır.

Bu kapsamda çalışanın mesleğini yapabileceğini gösterir Mesleki Yeterlilik Belgesi yani Mesleki Eğitim, bilgilendirme değildir.

Çalışmaya başladıktan sonra en kısa süre içinde verilmesi gereken 16 saat süreli Temel İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimi, bilgilendirme değildir.

O halde, bilgilendirme; *çalışma yapılacak ortama özgü koşullar dikkate alınarak dikkat edilmesi gereken iş sağlığı ve güvenliği kurallarının çalışana anlatıldığı ve talimat olarak*

tebliğ edildiği çalışmadır. Bir başka deyişle, bilgilendirme; “kişiye özgü”, ortama özgü” ve “işe/işleme özgü” eğitimin verildiği ve talimatın tebliğ edildiği çalışmadır.

Bir örnek: Madencilikte kaynak işleri ya da kaynakçılık

- Kaynakçılık Tehlikeli ve Çok Tehlikeli İşler kapsamındadır. Madencilik, Çok Tehlikeli işyeri sınıfındadır.
- Kaynak işlemi, kömür tozu bulunan yeraltı kömür ocağında yapılacaksa; işlem öncesi, işlem anında ve işlem sonrasında dikkat edilmesi gereken iş sağlığı ve güvenliği kuralları konusunda kaynakçının eğitilmesi ve talimat tebliğ edilmesi ise bilgilendirme’dir.
- “İş İzni” kapsamında yapılacak iş ve işlemler çalışmaya başlamadan önce çalışana (kişiye özel-işe/işleme özel- ortama özel) kısa süreli de olsa anlatılıyorsa, bu işlem “bilgilendirme”dir.
- Birçok işyerinde “Toolbox Meeting (?), Toolbox (?), İşbaşı, İş Öncesi, İş Başında” gibi değişik isimlerle verilen kısa süreli iş sağlığı ve güvenliği eğitimleri Bilgilendirme midir? Eğer işe ve ortama özgü ise, “Evet” denilebilir. Aksi takdirde “Hayır”.

3 İSG MEVZUATINDA BİLGİLENDİRMENİN ZORUNLU OLDUĞU HALLER

2012 yılında 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun yayınlanmasından sonra yürürlüğe giren yönetmelik ve tebliğlerde bilgilendirmenin gerekli ve zorunlu olduğu hal ve durumlara özellikle vurgu yapılmıştır. Bunları sıralayacak olursak;

- Hayati ve özel tehlike bulunan yerler,
- Çalışanların sağlık ve güvenliğini etkilediği bilinen veya etkilemesi muhtemel konular,
- Ciddi ve yakın tehlikeye maruz kalan veya kalma riski olan durumlar,
- Tehlikeli ve çok tehlikeli sınıfta yer alan işyerlerinde; yapılacak işlerde sağlık ve güvenlik riskleri ile karşılanması halleri,
- Maden işyerlerinde (İşverenin Genel Yükümlülükleri, Çalışanların Yükümlülükleri, Patlama, Yangın ve Zararlı Ortam Havasından Korunma, Kaçış ve Kurtarma Araçları konularında)
- İş ekipmanları ve bu iş ekipmanlarının kullanımı,
- Kişisel koruyucu donanımları hangi risklere karşı kullanacağı konusu,
- Acil durumlar, acil durum planları ve oluşturulan ekipler,
- İşyeri bina ve eklentilerinde bulunması gereken asgari sağlık ve güvenlik şartları,
- Toz ve tozla mücadele,
- İşyerinde kullanılan sağlık ve güvenlik işaretleri,
- Elle taşıma yapılıyorsa,
- Yapı işyerlerinde/ alanında sağlık ve güvenlik ile ilgili alınan önlemler,
- 80 dB(A) ve üzerinde gürültünün olduğu durumlar,
- Mekanik titreşime maruz kalındığı durumlar,
- Kimyasal maddelerin etkilerinden kaynaklanan mevcut veya ortaya çıkması muhtemel risklerden çalışanların sağlığını koruma ve güvenli bir çalışma ortamı sağlama konuları,
- Kanserojen veya mutajen maddelere maruziyetinden kaynaklanabilecek sağlık ve güvenlik risklerinden korunması ve asgari gerekliliklerle ilgili,
- Ekranlı araçlarla çalışmalarda,
- Asbest söküm, yıkım, tamir, bakım, uzaklaştırma çalışmalarında,
- Çocuk ve genç işçi çalıştırıldığında,
- Sığınma odalarının olduğu yer altı maden işyerleri,
- Görevlendirilen veya hizmet alınan OSGB’de görev yapan kişiler ile bunların çalışma saatleri, görev, yetki ve sorumlulukları konusunda.

4 İSG MEVZUATINDA BİLGİLENDİRİLME KİMLERE YAPILMALIDIR?

2004 yılı ve 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun yayınlanmasından sonra yürürlüğe giren yönetmelik ve tebliğler de bilgilendirmenin kimlere yapılacağı konusuna da açıklık getirilmiş ve aşağıda sıralanan kişi ve gruplara bilgilendirme yapılması istenmiştir;

- Çalışanlar,
- Çalışan temsilcileri,
- Görevlendirdikleri kişi veya hizmet aldığı kurum ve kuruluşları,
- Başka işyerlerinden çalışmak üzere kendi işyerine gelen çalışanları ve bunların işverenlerini,
- Aynı çalışma alanını birden fazla işverenin paylaşması durumunda birbirlerini,
- Çıracak ve stajyerler,
- Ekipman kullanıcıları,
- Özel politika gerektiren gruplar,
- Müşteri ve ziyaretçiler,
- Çocuk ve genç işçinin velisi veya vasisi,
- Gebe ve emziren çalışan.

5 BİLGİLENDİRMENİN İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ MEVZUATINDAKİ YERİ

İSG ile ilgili yayınlanan ve yürürlüğe giren kanun yönetmelikler içinde, bilgilendirme ile ilgili hükümler sıklıkla ve ayrıntılı yer almaktadır.

5.1 Kanunlarda Bilgilendirme

İş sağlığı ve güvenliğinde bilgilendirme ile ilgili hükümler; 4857 sayılı İş Kanununda ve 6331 sayılı İş sağlığı ve Güvenliği Kanununda yer almaktadır.

4857 sayılı İş Kanununun, Çağrı üzerine çalışma ve uzaktan çalışma başlıklı 14. Maddesinde *‘İşveren, uzaktan çalışma ilişkisiyle iş verdiği çalışanın yaptığı işin niteliğini dikkate alarak iş sağlığı ve güvenliği önlemleri hususunda çalışana bilgilendirmek, gerekli eğitimi vermek, sağlık gözetimini sağlamak ve sağladığı ekipmanla ilgili gerekli iş güvenliği tedbirlerini almakla yükümlüdür’* denilmekte ve çağrı üzerine ve uzaktan çalışma yapanların işverence yapılan işe özgü iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili bilgilendirilmeleri zorunlu kılınmaktadır.

6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununda da bilgilendirmeye ayrıntılı yer verilmiştir.(4, 6, 16, 17, 18, 22, 23 ve 26. Maddeler)

Kavram Kanun’da;

- Bilgi,
- Bilgi verilmesi,
- Bilgilendirme,
- Eğitim
- Bilgi ve talimat şeklinde kullanılmıştır.

Ayrıca kanunda bilgilendirme sadece işyeri çalışanları(çalışanlar ve çalışan temsilcileri) ile sınırlı tutulmamış, görevlendirdikleri kişi veya hizmet aldığı kurum ve kuruluşları, uzaktan çalışma ilişkisiyle iş verdiği çalışanlar, başka işyerlerinden çalışmak üzere kendi işyerine gelen çalışanları ve bunların işverenlerinin de bilgilendirilmesini zorunlu kılmıştır.

İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununda bilgilendirmeye ilgili yer alan maddeler ve hükümleri aşağıdadır.

5.1.1 İşverenin genel yükümlülüğü

MADDE 4 – (1) İşveren, çalışanların işle ilgili sağlık ve güvenliğini sağlamakla yükümlü olup bu çerçevede;

a) Mesleki risklerin önlenmesi, eğitim ve bilgi verilmesi dâhil her türlü tedbirin alınması, organizasyonun yapılması, gerekli araç ve gereçlerin sağlanması, sağlık ve güvenlik tedbirlerinin değişen şartlara uygun hale getirilmesi ve mevcut durumun iyileştirilmesi için çalışmalar yapar.

d) **Yeterli bilgi ve talimat verilenler dışındaki çalışanların hayati ve özel tehlike bulunan yerlere girmemesi için gerekli tedbirleri alır.**

Kanun'un 4'üncü maddesi konunun genel çerçevesini çizmiş; 16'ncı maddesinde ise konuya ayrıntılı şekilde verilmiştir. Yönetmelik ve tebliğlerde ise 4'üncü ve 16'ncı maddelere ya doğrudan atıflar yapılmakta ya da ayrıca bir madde ile konunun önemi vurgulanmaktadır.

4.madde “Bilgilendirmenin yükümlüsü kimdir?” sorusunun da cevabını vermiş ve bilgilendirme kapsamında işvereni(işveren vekilini) yükümlü kılmıştır.

Özellikle 4.madde içinde yer alan ‘Yeterli bilgi ve talimat verilenler dışındaki çalışanların hayati ve özel tehlike bulunan yerlere girmemesi’ hükmü, bilgilendirmenin zorunlu olduğu en önemli hallerdendir.

Hayati ve özel tehlike bulunan yerler nerelerdir? Çalışma hayatında sektörlere özgü bu ifadeye uygun risk puanı yüksek olan özel yer ve durumlar olabilmektedir. Uygulamalarda en sık rastlananları içinde kapalı alanlar, parlayıcı patlayıcı ortamlar, yüksekte çalışmalar, tünel işlerinde kavlak çalışmaları sayılabilir.

Madde bu tür çalışmalar öncesinde çalışanların mutlaka bilgilendirilmesini ve talimatlandırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda hayati ve özel tehlike buluna yerlerle ilgili hazırlanmış özel (bilgilendirme)eğitimleri düzenlenebilir, konuya özel hazırlanmış talimatlar tebliğ edilebilir ve devamında iş izin kontrol formları hazırlanabilir.

5.1.2 İş sağlığı ve güvenliği hizmetleri

MADDE 6 – (1) Mesleki risklerin önlenmesi ve bu risklerden korunulmasına yönelik çalışmaları da kapsayacak, iş sağlığı ve güvenliği hizmetlerinin sunulması için işveren;

d) **Çalışanların sağlık ve güvenliğini etkilediği bilinen veya etkilemesi muhtemel konular hakkında; görevlendirdikleri kişi veya hizmet aldığı kurum ve kuruluşları, başka işyerlerinden çalışmak üzere kendi işyerine gelen çalışanları ve bunların işverenlerini bilgilendirir.**

5.1.3 Çalışanların bilgilendirilmesi

MADDE 16 – (1) İşyerinde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilmesi amacıyla işveren, çalışanları ve çalışan temsilcilerini işyerinin özelliklerini de dikkate alarak aşağıdaki konularda bilgilendirir:

- İşyerinde karşılaşılabilecek sağlık ve güvenlik riskleri, koruyucu ve önleyici tedbirler.*
- Kendileri ile ilgili yasal hak ve sorumluluklar.*
- İlk yardım, olağan dışı durumlar, afetler ve yangınla mücadele ve tahliye işleri konusunda görevlendirilen kişiler.*

MADDE 16 – (2) İşveren;

a) **12 nci maddede(tahliye) belirtilen ciddi ve yakın tehlikeye maruz kalan veya kalma riski olan bütün çalışanları, tehlikeler ile bunlardan doğan risklere karşı alınmış ve alınacak tedbirler hakkında derhal bilgilendirir.**

Görüldüğü üzere bilgilendirmenin ayrıntısına madde içinde yer verilmiş özellikle

‘Bilgilendirmede içerik(konu başlıkları) ne olmalıdır?’ sorusunun da cevabı verilmiştir. Dolayısıyla bilgilendirme özel eğitimleri ve/veya ilgili talimatlar yukarıda yer alan konu başlıkları dikkate alınarak hazırlanmalıdır.

Madde içinde yer alan bir başka önemli ayrıntı da ise asıl işverenin ciddi ve yakın tehlikeye maruz kalan veya kalma riski olan yerlerde alt işveren çalışanları da dâhil olmak üzere bütün çalışanlarına bilgilendirme yapması zorunluluğudur. Ciddi ve yakın tehlikeye maruz kalan veya

kalma riski olmadığı durumlarda ise asıl işverenin sadece alt işvereni bilgilendirmesi yeterli olacaktır.

5.1.4 Çalışanların eğitimi

MADDE 17 – (5) Tehlikeli ve çok tehlikeli sınıfta yer alan işyerlerinde; yapılacak işlerde karşılaşılabilecek sağlık ve güvenlik riskleri ile ilgili yeterli bilgi ve talimatları içeren eğitimin alındığına dair belge olmaksızın, başka işyerlerinden çalışmak üzere gelen çalışanlar işe başlatılamaz.

Madde içinde “bilgi”, “talimat” ve “eğitim” kavramları bir arada kullanılarak, bu üç işlemin önlem alma konusundaki önemleri bir daha vurgulanmıştır.

Ayrıca tehlikeli ve çok tehlikeli sınıftaki işyerlerinde yapılan çalışmalar, sağlık ve güvenlik risklerini içeriyorsa çalışanların mutlaka işle ilgili bilgi ve talimatlarında konu edildiği bir eğitim alması ve belgelendirilmesi zorunlu kılınmıştır.

5.1.5 Çalışanların görüşlerinin alınması ve katılımlarının sağlanması

MADDE 18 –(2) İşveren, destek elemanları ile çalışan temsilcilerinin aşağıdaki konularda önceden görüşlerinin alınmasını sağlar:

ç) Çalışanların bilgilendirilmesi.

İşveren “çalışanların bilgilendirilmesi” konusunda “destek elemanları ile çalışan temsilcilerinin” görüşlerini almakla da yükümlüdür.

5.1.6 İş sağlığı ve güvenliğinin koordinasyonu

MADDE 23 – (1) Aynı çalışma alanını birden fazla işverenin paylaşması durumunda işverenler; iş hijyeni ile iş sağlığı ve güvenliği önlemlerinin uygulanmasında iş birliği yapar, yapılan işin yapısı göz önüne alınarak mesleki risklerin önlenmesi ve bu risklerden korunulması çalışmalarını koordinasyon içinde yapar, birbirlerini ve çalışan temsilcilerini bu riskler konusunda bilgilendirir.

5.1.7 İdari para cezaları ve uygulanması

MADDE 26 – (1) Bu Kanunun;

g) 16 ncı maddesinde belirtilen yükümlülükleri yerine getirmeyen işverene, bilgilendirilmeyen her bir çalışan için bin Türk Lirası,

Bilgilendirme yapılmaması durumunda ise “idari para cezası” uygulanması söz konusudur.

5.2 Yönetmelik ve Tebliğlerde Bilgilendirme

İş sağlığı ve güvenliği yönetmeliklerinde de bilgilendirme konusuna özel önem verilmiştir.

Çalışanların İş Sağlığı Ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul ve Esasları Hakkındaki Yönetmeliğin işverenin yükümlülüklerinin yer aldığı 5 maddesinde ‘geçici bir süre ile çalışanları kendi işyerinde çalıştırmak üzere devralan işveren, devraldığı çalışanları ve işverenlerini iş sağlığı ve güvenliği risklerine ilişkin bilgilendirir. Ayrıca asıl işveren, alt işverenin çalışanlarına işe başlamadan önce işyerine özgü risklere ilişkin bilgi verir. İşveren, tehlikeli ve çok tehlikeli sınıfta yer alan işyerlerinde; yapılacak işlerde karşılaşılabilecek sağlık ve güvenlik riskleri ile ilgili yeterli bilgi ve talimatları içeren eğitimin alındığına dair belge olmaksızın, başka işyerlerinden çalışmak üzere gelen çalışanları işe başlatamaz.’ denilmektedir.

İş Güvenliği Uzmanlarının Görev, Yetki, Sorumluluk ve Eğitimleri Hakkındaki Yönetmelikte, İş Güvenliği Uzmanlarının görevleri ile ilgili ‘Çalışanlara yönelik bilgilendirme faaliyetlerini düzenleyerek işverenin onayına sunmak ve uygulamasını kontrol etmek’.

İfadesine yer verilmiş ve bu kapsamda çalışanların bilgilendirilmesi iş güvenliği uzmanlarının görev tanımı içinde yer almıştır.

İşyerlerinde Acil Durumlar Hakkındaki Yönetmeliğin, işverenin yükümlüklerinin yer aldığı 5.maddesinde ‘*Varsa alt işveren ve geçici iş ilişkisi kurulan işverenin çalışanları, müşteri ve ziyaretçiler ile işyerinde toplantı, seminer, konferans ve eğitim gibi toplu halde gerçekleştirilen faaliyetler için bulunan katılımcılar ve diğer kişilerin acil durumlar, tahliye planı, kaçış yolları, toplanma yerleri ve acil durum ekipleri hakkında bilgilendirilmesini sağlar*’. İfadesiyle bilgilendirilmesi gerekenler ve bilgilendirilmesi gereken konu başlıkları açıkça belirtilmiştir.

Yukarıda belirtilen yönetmeliklerin dışında aşağıda da yer alan yönetmeliklerde konu ile ilgili hükümlere ayrıntılı yer verilmiştir;

- Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği
- İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği
- İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği
- Kişisel Koruyucu Donanımların İşyerlerinde Kullanılması Hakkında Yönetmelik
- İş Sağlığı ve Güvenliği Hizmetleri Yönetmeliği
- İşyeri Hekimi ve Diğer Sağlık Personelinin Görev, Yetki, Sorumluluk ve Eğitimleri Hakkında Yönetmelik
- İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik
- Tozla Mücadele Yönetmeliği
- Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği
- Sağlık ve Güvenlik İşaretleri Yönetmeliği
- Çocuk ve Genç İşçilerin Çalıştırılma Usul Ve Esasları Hakkında Yönetmelik
- Gebe veya Emziren Kadınların Çalıştırılma Şartlarıyla Emzirme Odaları ve Çocuk Bakım Yurtlarına Dair Yönetmelik
- Elle Taşıma İşleri Yönetmeliği
- Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik
- Kanserojen veya Mutajen Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik
- Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik
- Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik
- Ekranlı Araçlarla Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik
- Asbestle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik
- Geçici veya Belirli Süreli İşlerde İş Sağlığı Ve Güvenliği Hakkında Yönetmelik
- Yeraltı Maden İşyerlerinde Kurulacak Sığınma Odaları Hakkında Tebliğ

6 SONUÇLAR

Bu bildiriye verilen öz bilgiler kapsamında sorulması gereken soru, “bilgilendirme yapılmasının sorgulandığı ve idari yaptırım uygulandığı İşveren” var mı? Cevap, kısa ve basit: Çoğunlukla Yok.

O halde, İşverenler, iş sağlığı ve güvenliği profesyonelleri, iş müfettişleri ya Kanun’u uygulamıyorlar ya da bilmiyorlar/okumuyorlar veya suç işliyorlar.

Mevzuat hazırlayıcısının bilgilendirmeye verdiği önemin göstergelerinden birisi de yükümlülüğünün yerine getirilmemesi durumunda uygulanacak “idari para ceza”larıdır.

Somut veriler olmamasına rağmen, iş kazalarının en önemli nedenlerinden biri, bilgilendirme yapılmamasıdır.

Muhakkak ki mesleki eğitilmiş personel çalıştırılması, iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin verilmesi ve iş sağlığı ve güvenliği talimatları tebliğ edilmesi vazgeçilmezlerimizdir. Ancak,

bilgilendirme de işyerlerinde uygulama ve takibi bakımından vazgeçilmezlerimiz arasında olması gereklidir.

KAYNAKLAR

6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012.

İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği, 2012.

Tehlikeli ve Çok Tehlikeli Sınıfta Yer Alan İşlerde Çalıştırılacakların Mesleki Eğitimlerine Dair Yönetmelik 2013.

İşte Çalışanların Sağlık ve Güvenliklerini İyileştirmeye Yönelik Tedbirler Alınmasına İlişkin 12 Haziran 1989 Tarih ve 89/391/EEC Sayılı Konsey Direktifi, 1989.

ILO İş Sağlığı ve Güvenliği ve Çalışma Ortamına İlişkin 155 Sayılı Sözleşme, 2004.

ILO 176 Sayılı Maden İşyerlerinde Güvenlik ve Sağlık Sözleşmesi, 1995,

ILO 187 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliğini Geliştirme Çerçeve Sözleşmesi, 2006.

Yerüstü ve Yeraltı Maden İşyerlerinde Çalışan İşçilerin Sağlığının Korunması ve İş Güvenliğinin İyileştirilmesine İlişkin Asgari Şartlar Hakkındaki 03.12.1992 Tarih ve 92/104/EEC Sayılı Konsey Direktifi, 1992.

Asbestle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik,

Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik,

Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul ve Esasları Hakkında Yönetmelik,

Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik,

Çocuk ve Genç İşçilerin Çalıştırılma Usul ve Esasları Hakkında Yönetmelik,

Ekranlı Araçlarla Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik,

Elle Taşıma İşleri Yönetmeliği,

Gebe veya Emziren Kadınların Çalıştırılma Şartlarıyla Emzirme Odaları ve Çocuk Bakım Yurtlarına Dair Yönetmelik,

Geçici veya Belirli Süreli İşlerde İş Sağlığı ve Güvenliği Hakkında Yönetmelik,

İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği,

İş Güvenliği Uzmanlarının Görev, Yetki, Sorumluluk ve Eğitimleri Hak. Yön.,

İş Sağlığı ve Güvenliği Hizmetleri Yönetmeliği,

İş Sağlığı ve Güvenliği Kurulları Hakkında Yönetmelik,

İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği,

İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik,

İşyeri Hekimi ve Diğer Sağlık Personelinin Görev, Yetki, Sorumluluk ve Eğitimleri Hakkında Yönetmelik,

İşyerlerinde Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik,

Kanserojen veya Mutajen Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik,

Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik,

Kişisel Koruyucu Donanımların İşyerlerinde Kullanılması Hakkında Yönetmelik,

Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği,

Sağlık ve Güvenlik İşaretleri Yönetmeliği,

Tozla Mücadele Yönetmeliği,

Bataryalı Elektrikli Transmikser Kullanımı ile Dizel Tüketiminin, Karbon Salımının ve Birim Maliyetin Azaltılması

Reducing Diesel Consumption, Carbon Emission and Unit Cost with the Usage of Battery-Electric Transmixer

T. Kibar, E. Üçok

Tüprag Metal Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. Efemçukuru Altın Madeni, İzmir

ÖZET: Sahamızda kullanılan mevcut dizel transmikserin kullanım ömrünün yakın zamanda tamamlanacak olması neticesinde, yeni ekipman olarak bataryalı elektrikli transmikser kullanımına geçilmesi kararlaştırılmıştır.

Bataryalı elektrikli transmikser satın alma maliyeti yüksek olmasına rağmen kullanımında bir çok avantaj bulunmaktadır. Örneğin; rampa aşağı sürüşlerde ekipmanın bataryalarını doldurabilmesi enerji verimliliği sağlar, dizel yakıt tüketimine karşılık kWh elektrik tüketiminin maliyeti düşüktür, planlı bakımlarda bakım gerektiren parçaları azdır.

Bataryalı elektrikli transmikser ile yapılan çalışmalarda, çalışma lokasyonundaki hava kalitesi artar, gürültü seviyesi azalır ve lokasyon çalışma sıcaklığı düşer. Bunun neticesinde daha kaliteli çalışma ortamı sağlanmış olur.

ABSTRACT: Utimac MF500 Transmixer equipment economic life will be completed in a near future, afterward it has been decided to purchase to the battery-powered electrical transmixer as a new equipment.

Although the equipment purchase cost is higher than the diesel powered one, It has a lot of advantages for running costs of the equipment and Health&Safety of operators which should be considered. Such as, being able to charge the batteries of the equipment while driving down the ramp provides an advantage in terms of energy efficiency. Planned maintenance cost is lower than diesel one because, less parts need to be maintained. Unit cost of electricity usage is very low from unit cost of diesel usage. The better air quality and working environment is provided by zero emissions, the noise level decreasing and the operating temperature of the location decreasing.

1 BATARYALI ELEKTRİKLİ EKİPMANLAR

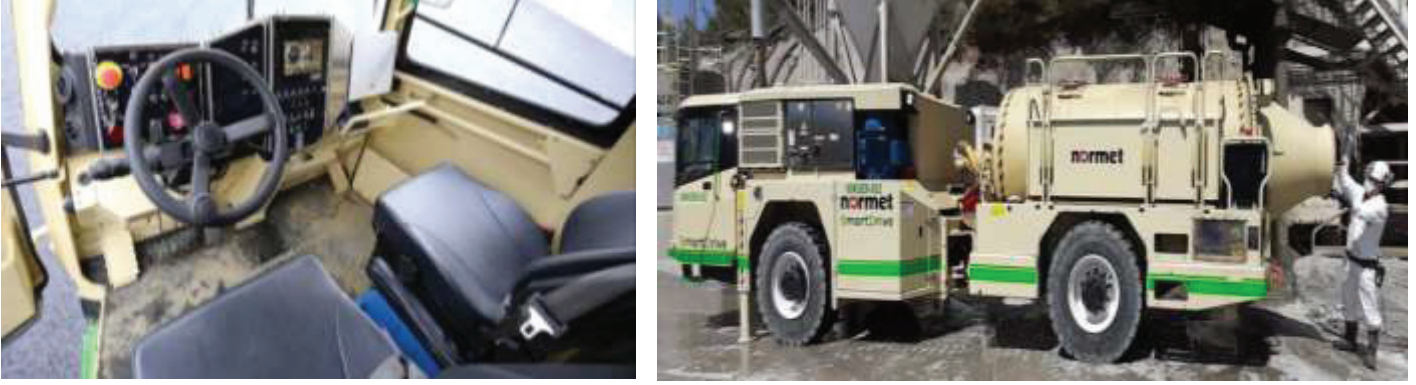
Artan araç sayısı ve buna bağlı olarak fosil kaynaklı yakıtların giderek tükeniyor olması alternatif yakıt arayışına sebep olmaktadır. Bu nedenle teknolojik gelişmelerden biri olarak elektrikli araçlar çözüm olarak görülmektedir. Günümüzde elektrikli ekipmanların sayısı gün geçtikçe artmaktadır.

Bataryalı elektrikli araçlar, tüm tahrik gücünü elektrik motorundan alan “tam elektrikli araçlardır.” Bu araçlarda, fosil yakıtlı motor bulunmamaktadır.

Enerjisini yeni nesil Lityum-İyon bataryalar ile depolayan ekipman, enerji verimliliği konusunda daha verimli bir çalışma sistemine sahiptir. İşletme maliyetleri olarak yakıt ve servis konusunda çok daha avantajlı olan iş makinesi, bakım maliyetleri olarak dizel iş makinelerine göre çok daha ekonomiktir.

1.1 Efemçukuru Altın Madeninde Bataryalı Elektrikli Transmikserin Tercih Edilme Sebepleri

Bataryalı elektrikli transmikserin Efemçukuru Altın Madeninde tercih edilmesinin sebepleri; düşük işletme maliyetleri, düşük yakıt tüketimi, yüksek verimlilik, sıfır emisyon, düşük gürültü seviyeleri, yokuş aşağı sürüşte enerji geri kazanımı, hızlı şarj özelliği, operatörün çalışma ergonomisini ve rahatını arttıracak kapalı kabin olması, ön hidrolik ayaklar, tambur uzaktan kumandası, kabin kliması, 3 açılı geri görüş kamerası, mesafe sensörü olarak sıralanabilir (Şekil 1).

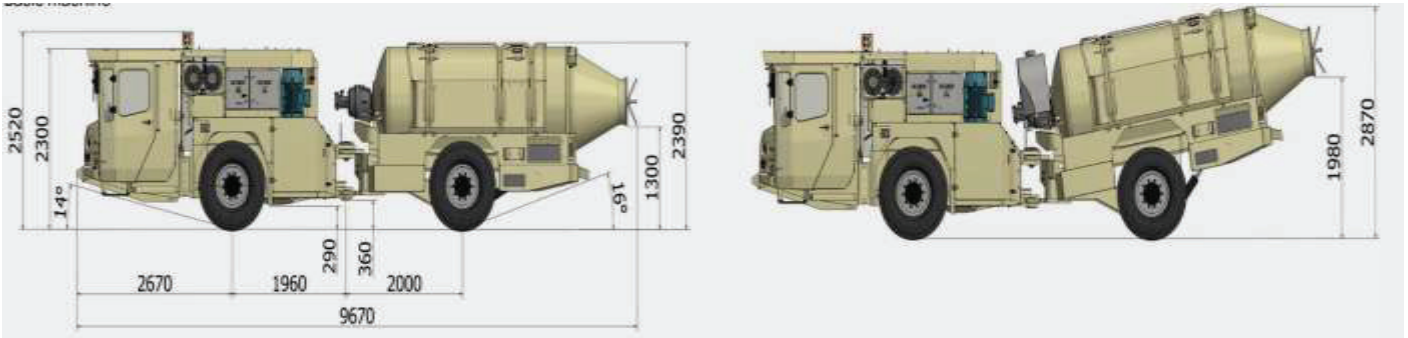


Şekil 1. Uimac MF500 Transmixer SD kabin içi ve dış görünüm

1.2 Uimac MF500 Transmixer SD Hakkında Genel Bilgiler

Normet MF500 SmartDrive, yeraltı madenlerinde hızlı ve güvenli beton nakliyesi için tasarlanmıştır (Şekil 2).

- MF 500 Transmikser SD 4.5 m³ beton taşıma kapasitesine sahiptir.
- Beton tamburunun dönüşü elektrikle kontrol edilir ve hızı 0 - 13 rpm arasında değişir.
- Ekipman 9.67 m uzunluğa ve 2.52 m yüksekliğe sahiptir. Tambur kaldırma özelliği sayesinde beton boşaltma yüksekliği 1.98 m'ye kadar yükseltilebilmektedir.



Şekil 2. Uimac MF500 Transmixer SD ölçüler

- Ekipmanda toplam 6 adet batarya bulunmakta ve bataryaların toplam ağırlığı 2.5 tondur.
- Ekipman herhangi bir lokal emisyon olmadan anında tork ve verimli çalışma sağlayan iki adet yüksek torklu doğrudan tahrikli elektrik motoru içermektedir. Elektrik motorları doğrudan akslara montelidir (Şekil 3). Ekipmanda 2 adet her biri 100kW olan elektrik motorları vardır.



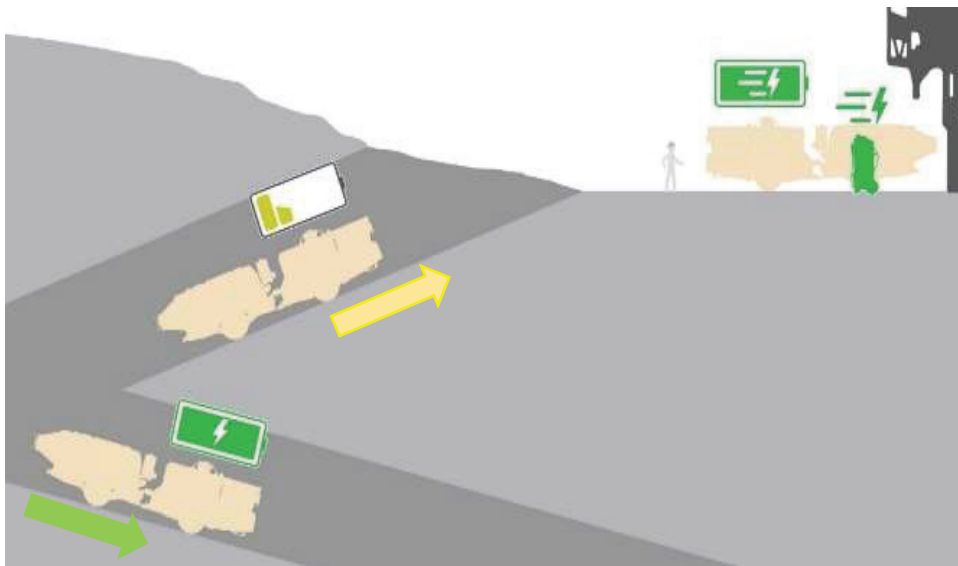
Şekil 3. Ekipman üzerinde yer alan elektrik motorların konumu

- Tambur hareketleri kabin için kontrol panelinden, yan gövde kontrol panelinden ve uzaktan kumanda üzerinden yapılabilmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Kabin içi ve yan gövde tambur kontrol paneli, uzaktan kumanda

- Bataryalar, rampa aşağı sürüş ve yavaşlama esnasında şarj edilir, bu da operasyonun toplam verimliliğini artırır (Şekil 5).



Şekil 5. Ekipman rampa aşağı ve yukarı sürüşlerde şarj durumları

- Ekipman hızlı şarj ünitesinden saatte maksimum 160 kW güç ile şarj edilebilmektedir.

1.2.1 Güvenlik

Ekipman üzerinde kurulu olarak bulunan güvenlik sistemleri vardır. Ekipman çalıştırılmadan önce güvenlik sistemleri kontrol edilir ve bu sistemlerde bir problem tespit edilmesi durumunda ekipman servis dışı bırakılır.

- Ekipman FOPS ve ROPS onaylı güvenlik kabineye sahiptir.
- Tüm elektrikli bileşenler en az IP65 sınıfına sahiptir.
- Ekipman üzerinde Ansul chekfire 110 yangın algılama ve söndürme sistemi bulunmaktadır. Kabin içerisindeki kontrol panelinden otomatik yangın söndürme sistemi testi yapılabilmektedir.
- Ekipman üzerinde; kabin içinde, yan gövde tambur kontrol panelinde ve uzaktan kumanda olmak üzere 3 adet acil durdurma bulunmaktadır. Acil durdurma aktifleştirildiğinde elektrik motorları durur ve hidrolik hareketler kesilir.
- Ekipmanın ön kısmında hidrolik ayaklar mevcuttur. Ekipmandan ayrılma durumunda veya operasyon sırasında kabin içi kontrol paneli üzerinden ayaklar basılmaktadır. Ayaklar tam toplanmadan park freni serbet bırakılamaz.
- Emniyet kemeri takılmadığında kontrol paneli üzerinde uyarı bildirimi çıkmaktadır.
- Kabin kapısı üzerinde emniyet switchi bulunmaktadır. Kabin kapısı kapatılmadan park freni serbest bırakılamaz.
- Sürüş başlamadan önce kabin için kontrol panelinde bulunan fren test düğmesi kullanılarak emniyet/park fren testi, servis fren testi yapılmaktadır. Ayrıca sürüşten önce elektrik motorları çalışmaz iken aracın durmasını sağlayan basınç akümülatörleri testi de yapılmaktadır. Bu testler tamamlandığında operatöre bilgi ekranından olumlu ya da olumsuz duruma yönelik bildirim düşmektedir.
- Kabin içerisinde yer alan bilgi ekranının kullanımı kolay ve basittir. Bilgi ekranı, operatör için hız, çalışma saatleri, sıcaklıklar, güvenlik alarmları ve uyarıları, bataryanın şarj durumu, elektrik motoru gücü/rejenerasyonu vb. gibi gerekli tüm bilgileri sağlar. Tüm bilgiler kaydedilir ve uzaktan erişilebilir.

1.2.2 Ekipman ile sürüş

Ekipman kapalı kabine sahip olması sayesinde operatör, toza ve gürültüye en az seviyede maruz kalmaktadır. Yine kapalı kabin ve kabin klimasının sağladığı termal konfor sayesinde, çalışma aynasından çıkan operatörün ana rampada üşmesinin önüne geçilebilmektedir. Ekipmanın motorlarının çok sessiz olması, sürüş esnasında herhangi bir problem oluştuğunda veya trafik karşılaşmalarında operatörün kolaylıkla fark etmesini sağlamaktadır.

Ekipmanın üzerinde bulunan yüksek çözünürlüklü kameralar, arka ve yan görüş için 3 farklı noktaya yerleştirilmiştir. Ayrıca ekipmanın arka tamponunda mesafe sensörü bulunduğu için işitsel uyarı da kabine ulaşabilmektedir. Bilindiği üzere yeraltı madenciliğinde ekipmanların kabileyetleri baz alınarak en ekonomik yoldan sürülen galeriler ile cevhere ulaşım sağlanmaktadır. Dizayn olarak Transmikser'in Spraymec ekipmana yanaşırken, operatörün çevresini kontrol etmesi kolaylaştığı gibi, Spraymec pompa kazanına son yanaşma esnasında Spraymec operatörü ile Transmikser operatörünün kaliteli görsel iletişim kurabilmesi iş güvenliğini olumlu anlamda iyileştirmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Ekipman sürüş kameraları

Ekipman, sürüş güvenliğini ve konforunu artıran ön aks süspansiyon sistemine sahiptir. Süspansiyon sistemi, tekerleklerden kabine giden titreşimi azaltır ve aracın yol tutuşunu iyileştirir. Süspansiyon sistemi, kullanıcı için güvenlik ve konfor ile birlikte araç kullanımına verimlilik ve hız kazandırmaktadır. Ayrıca Spraymec'e yanaşma manevrası yapılırken veya eğim iniş çıkışlarda döküş şutu ile Spraymec kazanının birbirine daha kusursuz yaklaşması yine ön aks yükseklik ayarı ile gerektiğinde mümkün kılınabilmektedir.

Ekipmanın maksimum hızı 20 km/s'dir. Ekipman 1.vitesde max 7 km/s, 2. vitesde max 16 km/s, 3. viteste ise max 20 km/s hız yapmaktadır.

Piller, rampa aşağı sürüşte rejeneratif fren sistemi sayesinde yavaşlama sırasında şarj edilir ve bu da işlemin toplam verimliliğini artırır. Sürüş esnasında operatör servis freni kullanmadan seferini tamamlayabilmektedir, bu sayede ekipmanın servis fren sistemi de yalnızca gerektiğinde kullanılarak kullanım ömrü önemli ölçüde uzatılabilmektedir.

1.2.3 Bataryaların şarj edilmesi

Ekipman, hızlı şarj ünitesinden maksimum 160 kW güç ile ve yeraltında enerji panosundan maksimum 30kW güç ile olmak üzere iki farklı yöntem ile şarj edilebilmektedir. Yeraltında enerji panosundan şarj alma işlemi, ekipmanın şarj seviyesinin %20 nin altına düşmesi ve yerüstünde bulunan şarj noktasına ulaşamama durumunda kullanılmaktadır. Ekipman üzerinde bulunan kablo ve enerji fişi enerji panosuna bağlanarak işlem gerçekleştirilir (Şekil 7).



Şekil 7. Ekipman şarjı

Hızlı şarj ünitesi yerüstünde beton santrali bölgesinde bulunmakta ve ekipman ile her beton alımı sırasında şarj işlemi yapılmaktadır. Hızlı şarj ünitesinde bulunan kablo ve enerji fişi ekipman üzerinde bulunan dolun noktasına bağlanarak şarj işlemi gerçekleştirilmektedir. Mikser ile 4.5 m³ beton alımı ortalama 20 dakika sürmekte, bu 20 dakikalık zaman içerisinde ekipman pillerinin %60'lık kapasitesi doldurabilmektedir. Ancak; yapılan testler sonucunda ekipmanın maksimum pil doluluk oranı %65 olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni ekipman madende rampa aşağı hareket etmeye başladığında pillerin doluluk oranı %80 seviyesine geldiğinde, ekipman pillere zarar vermemek için yavaşlamaktadır ve bu durum ulaşım süresini olumsuz etkilemektedir. Zaten ekipmanın daha az elektrik tüketimi sağlayarak kendi elektriğini üretebilmesi verimi arttırarak işletme maliyetini düşürmektedir.

2 BATARYALI ELEKTRİKLİ TRANSMİKSER KULLANIMININ AVANTAJLARI

2.1 Çevreye Duyarlılık

Bataryalı elektrikli araçların çalışma prensibi doğrultusunda debriyaj, şanzıman ya da egzoz borusunun bulunmaması dizel ekipmanlar ile arasındaki en büyük farkını oluşturuyor. Bu yönüyle bakıldığında elektrikli araçlar, egzoz gazı emisyonu yapmadığı için tamamıyla çevreye duyarlı bir özellik kazanıyor. Ekipmanın emisyonuz olması, yeraltı madeni işletmemizde genel havalandırma ihtiyacı 250 m³/sn iken %2 iyileştirme sonucu 245 m³/sn 'ye düşmüştür. Havalandırma ihtiyacındaki %2 iyileştirme yıllık yaklaşık 25.000kWh kazanç ile 10ton CO₂ salınımının azalmasını sağlamaktadır. (Bu veriler rampalardaki dönemsel üretim planları veya yeni bağlanan bağlantı yolları ile değişebilir.)

Efemçukuru Altın Madeni uzun dönem planlamasına göre, 1 yılda toplam 14.040m³, yani her vardiya için 13.5m³ püskürtme beton uygulaması ihtiyacı bulunmaktadır. Bu rakamlar baz alındığında Utimac MF500 Transmixer SD bu üretimi gerçekleştirmek için toplam 78.624 kWh elektrik tüketecektir. Utimac MF500 Transmixer dizel bu üretimi gerçekleştirmek için 50.143lt dizel yakıt tüketecektir (Çizelge 1'de görülen tüketim maliyetleri Ocak 2023 kWh ve mazot litre fiyatı baz alınarak hesaplanmıştır.) İki ekipmanın verimliliği ve enerji tüketimi karşılaştırıldığında elektrikli ekipmanın, doğaya en az 99.5 ton daha az CO₂ salınımı yaptığı kanıtlanabilmektedir.

Çizelge 1. Yıllık üretim için gereken tüketimler ve CO₂ salınımı

Elektrikli ile Dizel Transmikser Karşılaştırma	Utimec MF500 Transmixer SD	Utimec MF500 Transmixer	Fark
14.040 m ³ Başına Tüketim	78,624.00 kWh	50,142.86 lt	
14.040 m ³ Başına Maliyet	\$8,963.1	\$46,665.0	\$37,701.9
14.040 m ³ Başına CO ₂ Salınımı	36.50 ton	136.00 ton	99.50 ton

2.2 Düşük Enerji Tüketim Maliyeti

Sahamızda püskürtme beton operasyonunda çalışacak Transmikser operatörlerimizin yetkinlikleri tamamlandıktan sonra, hem gerçek zamanlı verimliliği ölçmek hem de enerji tüketim maliyetini en aza indirmek amacıyla testler yapılmıştır. 69 farklı lokasyonda yapılan bu testler, 252 m³ püskürtme betonu, toplamda 265 km mesafe dolu/boş şeklinde 76.4 saatte Utimac MF500 Transmixer SD ile taşınarak tamamlanmıştır. Bunun karşılığında bir yıllık geçmişe dönük veriler analiz edilerek Utimec MF500 dizel transmikserin saatlik gerçek yakıt tüketim verisi 10 lt/s olarak bulunmuştur. Utimec MF500 dizel transmikser aynı mesafedeki yolu rampa yukarı çıkarken 8 km/s ortalama ile tamamlayabilirken, elektrikli transmikser 15

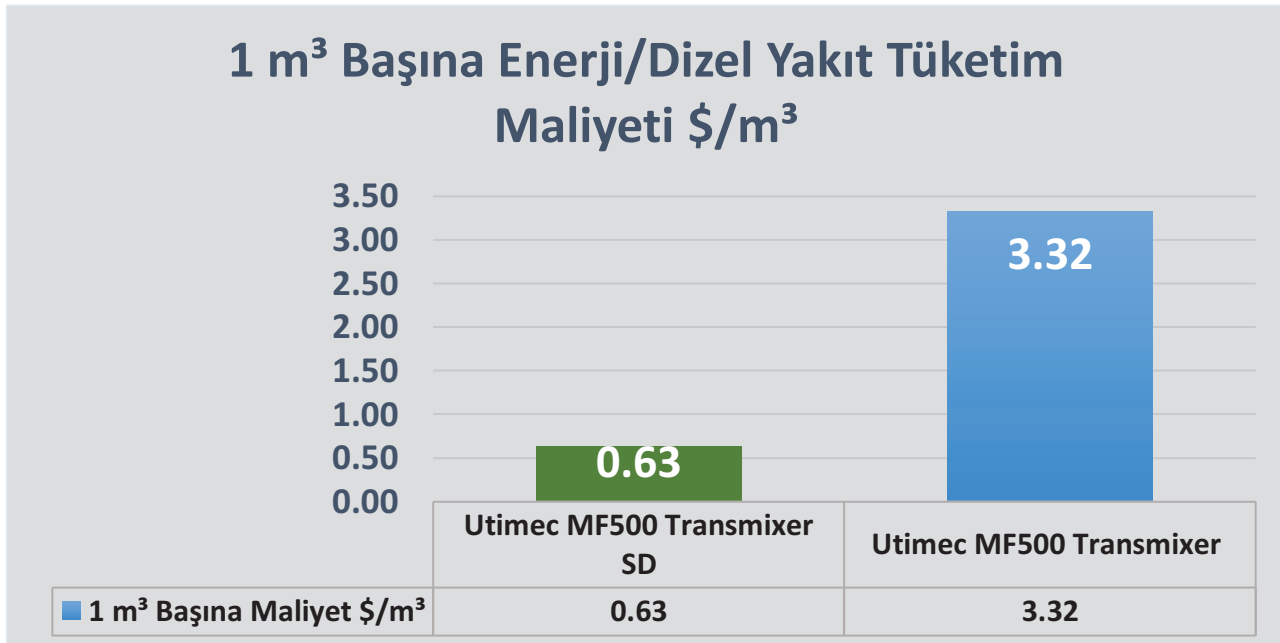
km/s ortalama hızı koruyabilmektedir. Bu yüzden 69 aynada yapılan test için dizel mikserin 14.6 saat daha fazla çalışması gerektiği öngörülmüştür.

Utimec MF500 Transmixer SD mikser 76.4 saatlik çalışma sonrasında 1,401.8 kWh enerjiyi şarj istasyonundan elde etmiştir ve bunun maliyeti \$159.81 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık Utimec MF500 Transmixer SD dizel ekipman ise 90 saatlik çalışma sonrasında 900 lt dizel tüketmiş ve bunun maliyetide \$837.6 olarak hesaplanmıştır. Madende 1 haftada yaklaşık 70 atım planlanarak gerçekleştirilmektedir bu sonuç doğrudan her hafta en az \$677 dolar daha az enerji tüketim maliyeti sonucunu verir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Yeraltı uygulamaları gerçek veriler

Uygulamalar	Utimec MF500 Transmixer SD	Utimec MF500 Transmixer
Püskürtme Beton (m ³)	252	252
Toplam Mesafe (km)	265.5	265.5
Ayna sayısı (adet)	69	69
Toplam süre (s)	76.4	90
Tüketim (kWh)	1,401.8	-
Tüketim (lt)	-	900
kWh/m ³	5.6	-
lt/m ³	-	3.6
Toplam Tüketim Maliyeti (\$)	\$159.81	\$837.58

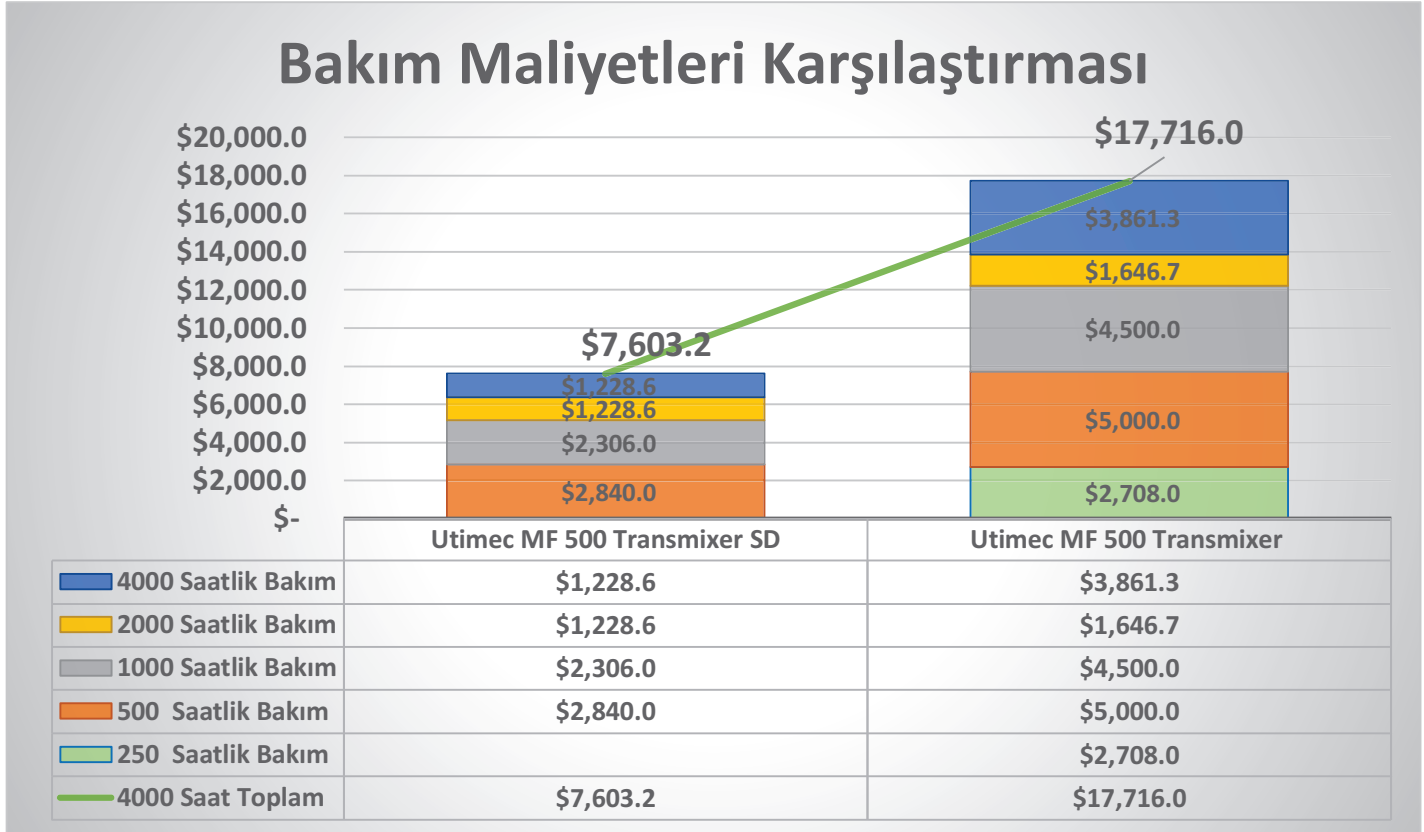
Bu uygulama ve sonuçlar neticesinde m³ başına maliyet hesaplaması yapıldığında dizel transmikser tüketim maliyeti elektrikli transmikser tüketim maliyetine göre 5.26 kat fazladır (Şekil 8).



Şekil 8. 1m³ Başına enerji/dizel yakıt tüketim maliyeti

2.3 Düşük Bakım Maliyeti

Mevcut uzun dönem planına göre yıllık üretim hedefini karşılayacak püskürtme beton uygulama miktarı 14.040 m³'tür. Bu değer her vardiya için ortalama 13.5m³ yani 3 tam dolu mikser kapasitesine denk gelmektedir. Bu planın yapılabilmesi için dizel transmikserin 5200 saat çalışmasının bakım maliyeti \$17.716, buna karşılık elektrikli transmikserin 4500 saat çalışması gerekmektedir ve maliyeti \$7.603'tür (Şekil 9).



Şekil 9. Bakım maliyet karşılaştırması

3 SONUÇLAR

Ekipman teknolojik özellikleri sayesinde sürüş güvenliğini arttırabilmekte, operatör sağlığı açısından yüksek ergonomi, termal konfor, düşük gürültü düzeyi, düşük ortam sıcaklığı ve sıfır zehirli gaz salınımı avantajları vardır. Ekipman dizel transmiksere göre yılda 109.50 ton daha az CO₂ salınımı yapılmasını sağlar ve bu sayede küresel karbon ayak izi azaltma hedeflerine cevap verebilmektedir. Bunun yanında, havalandırma ihtiyacını azalttığı için yıllık \$2.850 tasarruf sağlamaktadır. Ekipmanın tüketim maliyeti, dizel ekipmana oranla yıllık gereken püskürtme beton uygulaması için \$37.701 daha azdır, yıllık çalışma saati ihtiyacına göre ekipmanın bakım maliyeti \$10.000 daha azdır. Tüm maliyetler hesaplandığında elektrikli ekipmanın dizel ekipmana göre yıllık bazda \$50.551 daha az maliyetli olduğu görülmektedir. Elektrikli ekipman yaklaşık altı yılda satın alım esnasındaki farkı amorti edebilmektedir.

KAYNAKLAR

Efemçukuru Altın Madeni'nde yapılan gerçek zamanlı test sonuçları.
MF 500 Transmixer SmartDrive Instruction Manual.

The Application of Novel HS-EPS Yielding Elements for Tunnelling in Overstressed Weak Ground

M. Entfellner, C. Sertgöl, R. Knopf, H. Wannemacher
Implenia Austria GmbH, Salzburg, Austria

ABSTRACT: The application of a ductile shotcrete lining with yielding elements represents state-of-the-art support for tunnelling in overstressed weak ground conditions. The absorbing effect of the yielding elements avoids overstressing of the young shotcrete lining during the early curing process. A novel yielding element made of high-strength expanded polystyrene (HS-EPS) is introduced. The innovative system overcomes existing drawbacks in terms of weight and modular setup. This enables a rapid installation and on-site adaptation to react to actual deformation patterns and changing ground conditions. Recent experiences from their application in overstressed weak ground conditions are presented.

1 INTRODUCTION

Tunnelling in overstressed weak ground conditions under high in-situ stress is related to significant and long-term deformations of the lining. The range of displacements in such ground conditions highly depends on the applied excavation- and support concept (Radoncic, 2011), but can reach several tens of centimetres. The direct relation between rock pressure and deformation, as described with the convergence-confinement method (Fenner, 1938; Pacher, 1964), illustrates the advantage of the yielding principle in overstressed weak ground. By allowing a certain amount of deformation, tunnelling with reasonable support requirement is possible. The yielding principle is therefore the most suitable construction method in such ground conditions (Anagnostou & Cantieni, 2007).

2 DUCTILE SHOTCRETE LINING WITH YIELDING ELEMENTS

A closed shotcrete lining can withstand approximately 0.6 % to 0.8 % tangential strain, before cracks occur (Schubert & Brunnegger, 2017). To allow higher deformations/strains and thus reduce the support capacity requirement, yielding elements are applied in the shotcrete lining. The radial displacements caused by the rock pressure are transformed into a tangential closure of the ductile lining and absorbed by the yielding elements (Figure 1). Therefore, their load-dependent stiffness must be less at any time than the time-dependent stiffness of the shotcrete to avoid overstressing. As there is a direct interaction between displacement development (face-distance and time-dependent) and load-dependent stiffness of the yielding elements, a highly flexible excavation- and support concept during tunnelling is necessary.

Compared to steel sets, a shotcrete lining with yielding elements generates a high support resistance and allows for controlled deformations at an economic scale. This system enabled

successful tunnelling in many geotechnical challenging projects (Schubert, 1996; Wittke et al., 2005; Kovari, 2009; Barla et al., 2011).

Various types of yielding elements have been developed over the past three decades, with a mainly project-specific layout (Moritz, 2011). The elements either consist of steel, compressible concrete materials or a combination of both. These heavy elements require a considerable amount of time during the on-site installation. Their layout allows only minor flexibility when changing geological-geotechnical conditions are encountered.

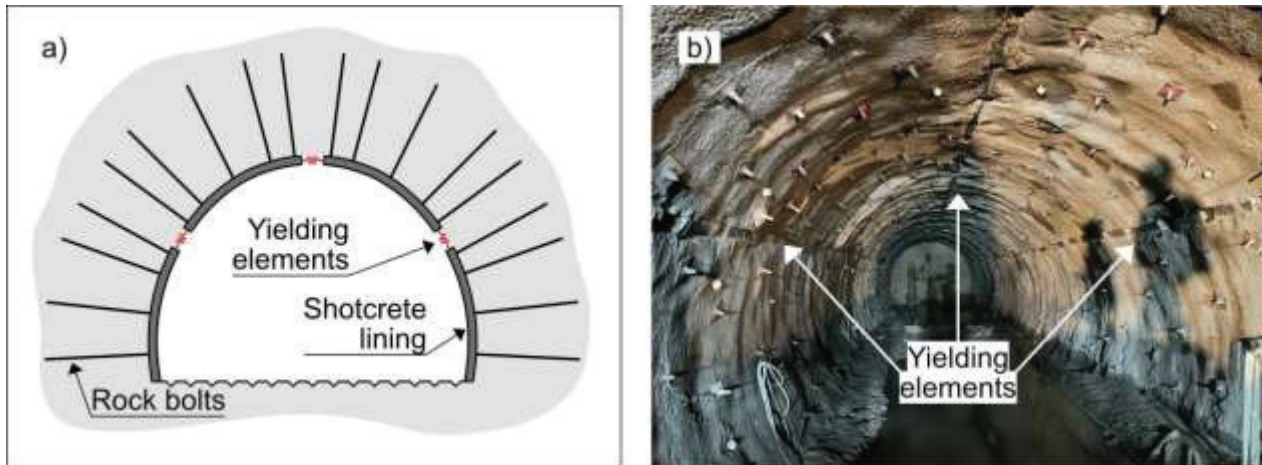


Figure 1. a) Schematic illustration of a ductile shotcrete lining with yielding elements; b) Example of a tunnel with 3 rows yielding elements in the top-heading; (Photo: Entfellner et al., 2022).

For successful tunnelling with a ductile shotcrete lining with yielding elements, a high level of geotechnical knowledge, daily 3D absolute displacement monitoring and a flexible construction process is necessary. The correct spatial placement in the cross-section of the elements and adequate installation are essential. Especially in anisotropic displacements in combination with slender yielding elements, shear failure of the lining induced by tilting of the elements was observed. Cracks and spalling of the shotcrete in the vicinity of the yielding elements can occur, if the stress-strain behaviour of the elements is too stiff. The frequently evaluation and optimization of the performance of the yielding elements during tunnelling is done by monitoring data interpretation.

The disadvantages of actual yielding elements indicated the following demands for optimisation: (i) reducing the weight for rapid and simple installation, (ii) increasing the flexibility of the stress-strain behaviour and (iii) increasing the stability against tilting. Based on the requirements listed above, a new yielding element was developed.

3 YIELDING ELEMENTS MADE OF HIGH-STRENGTH EXPANDED POLYSTYRENE

Polystyrene is a synthetic hydrocarbon polymer with a closed-form cellular structure and a high strength-to-weight ratio (Scheirs & Priddy, 2003). It is typically used in the construction industry for thermal insulation. The material's inherent mechanical stiffness properties are ideal for application in tunnelling. The strength and stiffness of expanded polystyrene (EPS) is directly depend on the specific weight of the material, ranging for tunnel application from approximately 100 kg/m³ up to 410 kg/m³. This density range refers to a High-Strength Expanded Polystyrene (HS-EPS).

3.1 Layout of the HS-EPS Yielding Elements

The novel yielding element, shown in Figure 2, consists of a group of horizontally arranged panels with a defined height of 50 mm. The panels have a cuboid shape with an arbitrary base area (length/width). Experience in various projects showed, that the preferable total height of all types of yielding elements should be in the range of 15 cm to a maximum of 30. The modular sandwich construction of the HS-EPS yielding element allows for project-specific dimensioning. The arrangement of the individual panels can be combined independently. Their combination significantly impacts the mechanical properties of the element, allowing a flexible adaption. This is the most vital technical benefit since it allows for achieving various stress-strain configurations to fit to practically all geotechnical conditions. The cuboid shape allows full-surface load transfer between the yielding element and the shotcrete lining. Differential deformations, either in longitudinal or radial directions, are imprinted or counterbalanced by the elastic flexibility of the material. Therefore, the element is less vulnerable to tilting or overturning in case of anisotropic displacements. Depending on the panel layout and size, the yielding elements have a weight of only 10-20 kg.

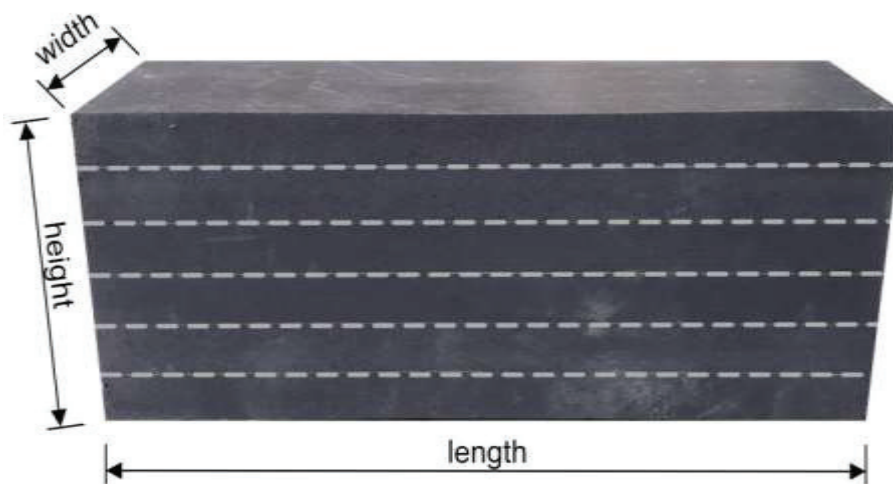


Figure 2. Layout of a HS-EPS yielding element with the dimension 800x250x300 mm (LxWxH) and a total weight of 10-20 kg.

3.2 Laboratory tests with HS-EPS Yielding Elements

The HS-EPS material shows a non-linear, hyper-elasto-plastic stress-strain behaviour under uniaxial compressive stress. The stress-strain behaviour can be divided into three phases (Chen et al., 2015), as presented in Figure 3. The initial deformation phase shows a linear-elastic behaviour. With increasing compressive stress, the material's yield point is reached in the range of 2 to 5 %. Within the plateau region, the stresses in the element increase only moderately, while deformation increases significantly. From a statically point of view, this is the most important section, as the yielding prevents overstressing of the shotcrete. Finally, the densification phase with a high stiffness increase concludes the deformation process.

The three-phase inherent stress-strain behaviour of HS-EPS fits ideally to the desired static requirements for ductile tunnel linings. This behaviour can be achieved with a simple cuboid shape of the element. Furthermore, polystyrene has good durability since it is non-biodegradable and chemically inert in soil and water (Horvath, 1994). Polymeric flame retardants are added to prevent ignition.

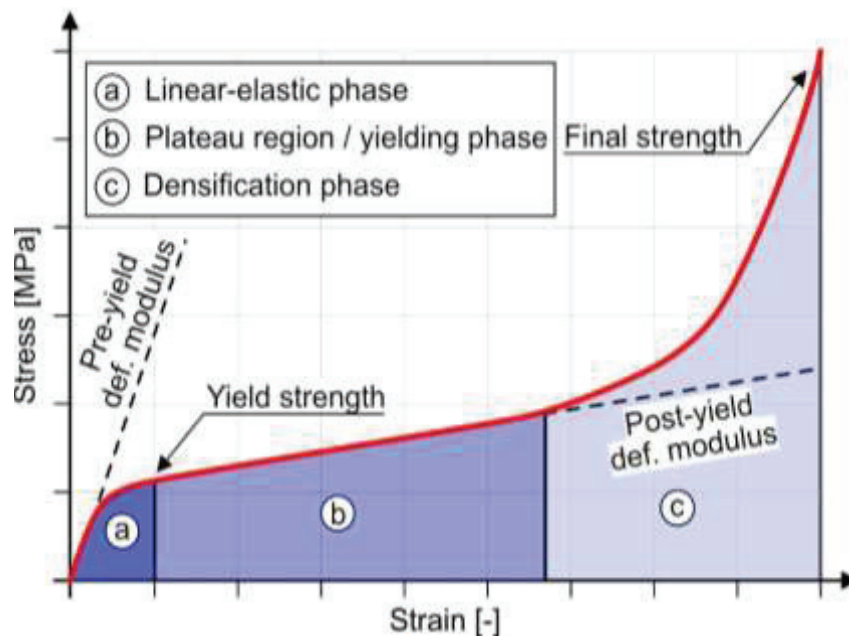


Figure 3. a) Typical stress-strain behaviour of HS-EPS showing linear-elastic, plateau and densification phase.

Small-scale and large-scale laboratory tests were performed to identify the specific material behaviour (Implenia & RWTH Aachen, 2020). With small-scale unconfined compressive strength tests, the yield strength, the pre-yield-deformation modulus and the yield modulus concerning the material's specific weight were analysed (Entfellner et al., 2022). The mechanical parameters are non-susceptible to the strain rates typically occurring in tunnelling ($\ll 1$ mm/min) (Ouellet et al., 2006).

The tests show the development of a horizontal compaction band in the centre of the sample as it is compressed (Figure 4). This allows absorbing stresses even at high strains. The lateral strain during compressive loading remains very low, suggesting pronounced axial compaction, which allows the utilisation of the material as a yielding element.

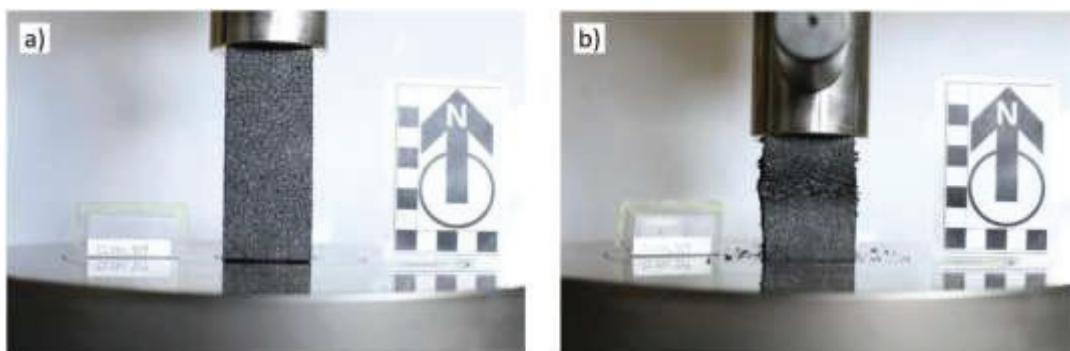


Figure 4. Small-scale unconfined compressive strength test with sample dimension of $42 \times 42 \times 100$ mm (L×D×H) and aspect ratio (H/D) of 2.4.

Large-scale unconfined compression tests investigated the specific stress-strain behaviour of various panel compositions. Homogenous elements act as “one” element, while within heterogeneous layered elements, the weaker panels initially start to deform. The density of the HS-EPS material is the governing parameter for the stress-strain response, allowing to control the stiffness requirements. With the modular arrangement of the panels, a wide range of stress-strain behaviour can be achieved (Figure 5). The tested range covers all stress-strain curves of available yielding elements on the market.

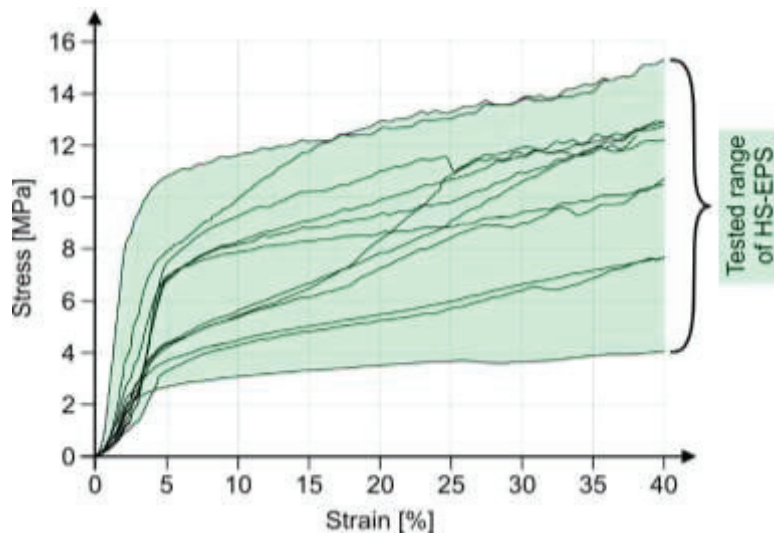


Figure 5. Stress-strain curves of tested HS-EPS yielding elements with various panel configurations.

4 IN-SITU APPLICATION OF THE HS-EPS YIELDING ELEMENTS

The novel HS-EPS yielding elements were first tested in a section with weak ground conditions at the Semmering Base Tunnel, Lot 1.1. The section is situated in a fault zone characterised by highly tectonically disturbed cataclastic mica schists at a moderate overburden of 160 m. The foliation strikes almost orthogonal to the tunnel axis and dips steeply against the heading direction, causing unstable face conditions with the demand for a sequential excavation with a top-heading, bench and invert excavation (Figure 6). The support consists of a 30 cm thick shotcrete layer, four rows of HS-EPS yielding elements and systematically arranged fully-grouted rock bolts. The yielding elements consist of a layered panel composition ranging from 230 kg/m³ up to 410 kg/m³ and an element dimension of 800x250x300 mm (LxWxH). They were situated symmetrically at the shoulders and upper sidewalls. The elements are installed between two lattice girders, fixed to the first layer of wire mesh, covered by a wooden plate and finally integrated into the shotcrete lining.

Monitoring included monitoring sections (MS) with nine targets each and two pressure cells mounted directly on the yielding elements to monitor the hoop stresses in the tangential direction of the lining. The monitoring targets are located close above and below each yielding element (YE).

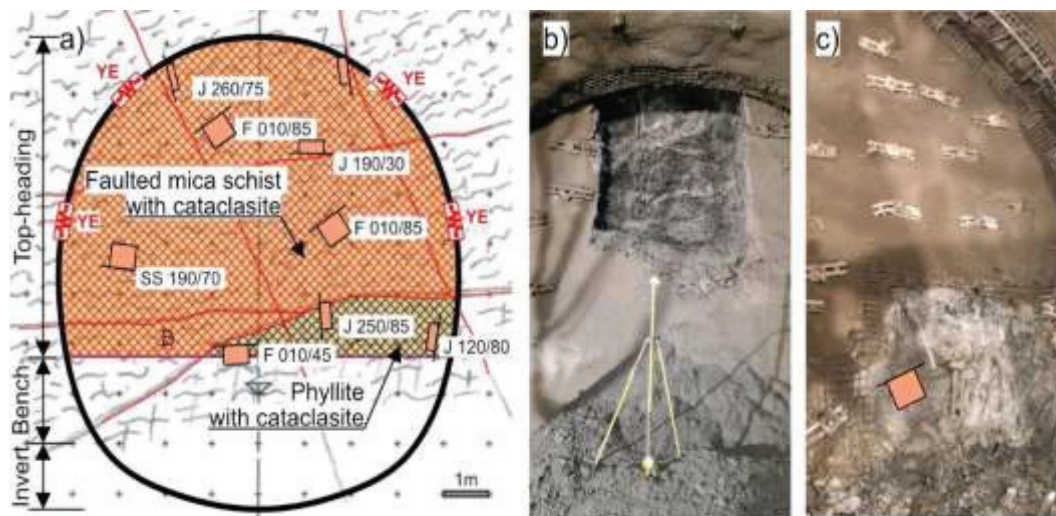


Figure 6. Top-heading advance with partial face excavation, showing a) geological cross-section; b) mechanical excavation of first subarea; and c) forelast subarea with steeply dipping foliation.

In Figure 7, the vector plots of displacements at MS 3649 are shown with 20x exaggeration. The section is characterised by comparable high deformations up to 210 mm. The relatively isotropic displacement pattern can be linked to the geological conditions encountered since the rock mass is more or less structureless due to the governing proportion of cataclasite. Only the marginal longitudinal-vertical (L-V) vector orientation against the direction of excavation indicates the direction of the foliation.

The three displacement vectors in the crown show an almost vertical settlement, causing a good compression of the yielding elements in the shoulders. After ring closure of the lining (kink at readings of lowest targets), the yielding elements in the upper sidewalls also experienced a higher compression.

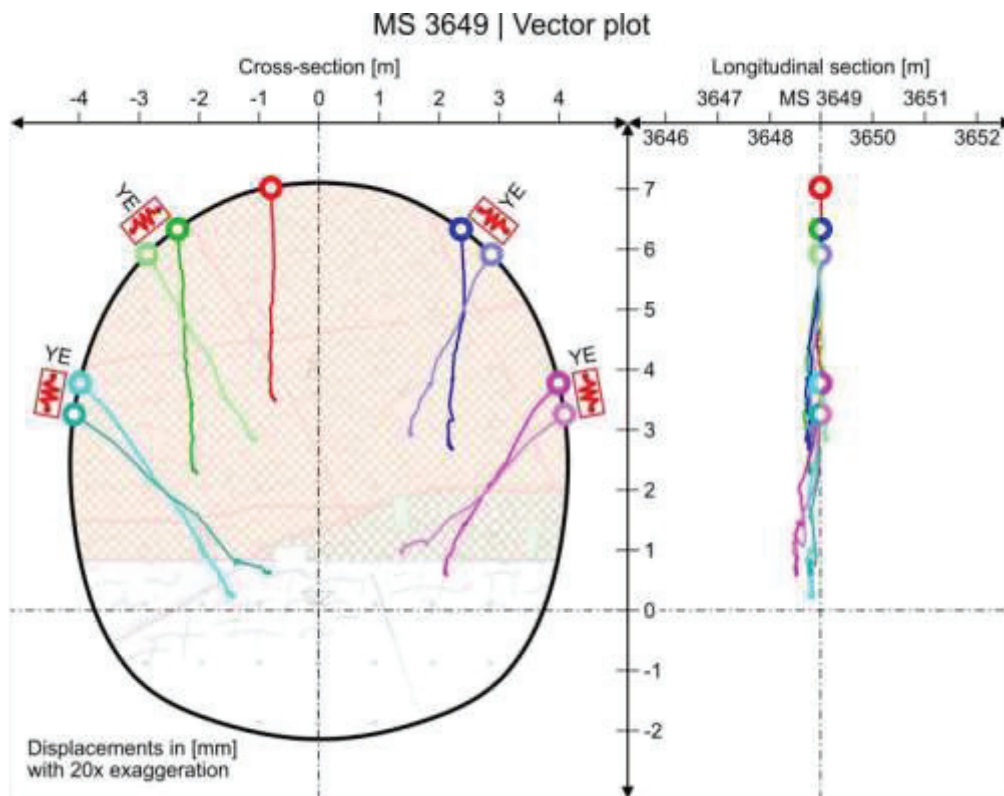


Figure 7. Vector plot with four rows HS-EPS yielding elements, showing displacements in cross-section with geology (left) and longitudinal section (right).

In Figure 8, the time-displacement plot of MS 3649 is shown. The high initial displacements at the left sidewall are related to the slight foliation superimposed by the low-grade anisotropy of the fault zone. Initial displacements were measured with 40 mm within 24 hours at a distance of 2 m to the tunnel face. The excavation of the bench and invert triggered a significant secondary increase in displacements, especially at the side walls. A state of equilibrium, with no additional increase in deformations, was observed when the excavation was interrupted temporarily. By continuing the excavation works, a slight deformation increase was observed. Deformations accumulated to a minimum of 160 mm (target no. 33 @ right shoulder) and a maximum value of 210 mm (target no. 4 @ left sidewall).

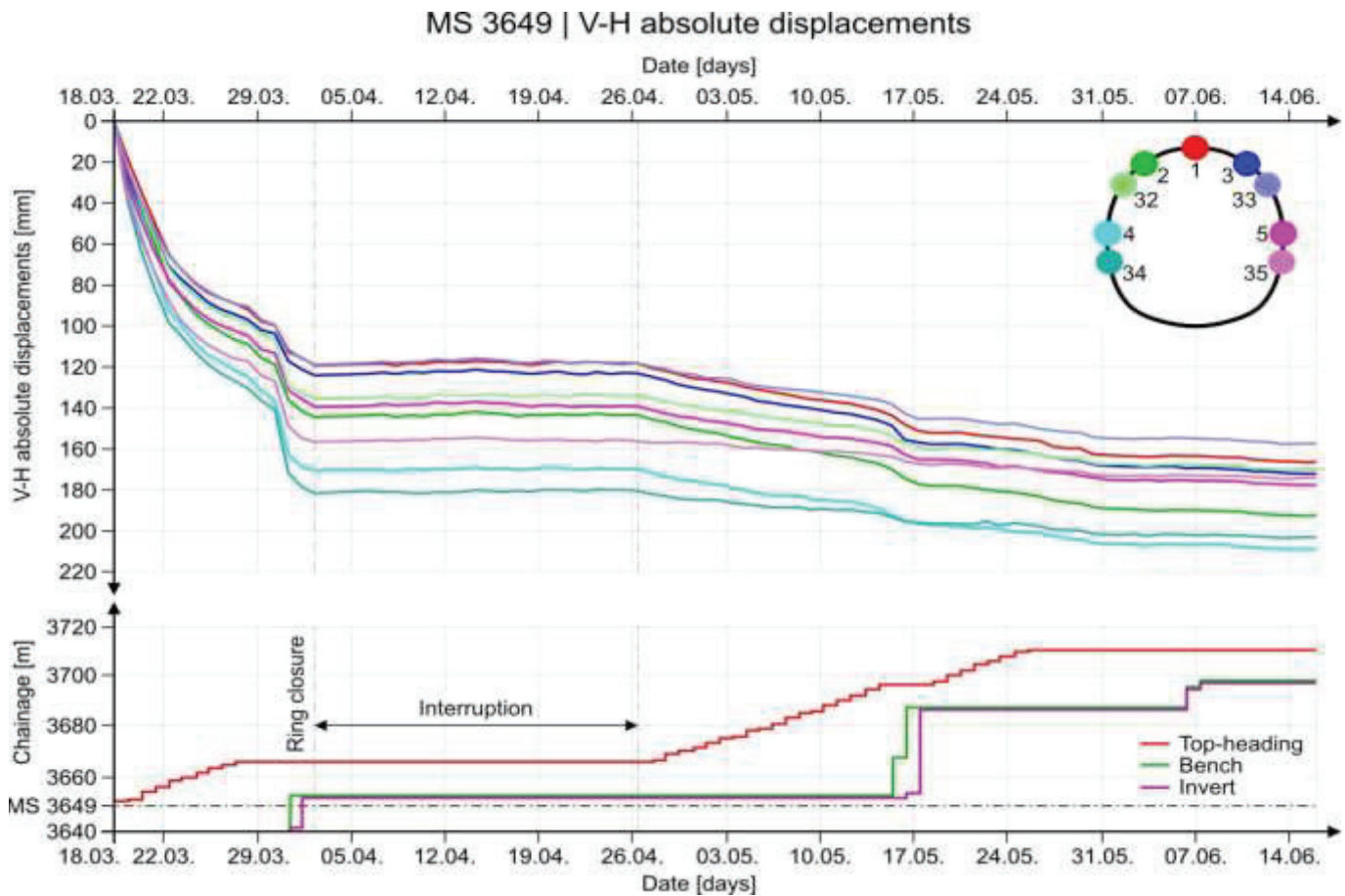


Figure 8. Time-displacement graph at monitoring section MS 3649, showing V-H absolute displacements (top) and construction phases (bottom).

5 CONCLUSION

The yielding principle allows controlled and economic tunnelling in overstressed weak ground conditions. Compared to other ductile systems, a shotcrete lining with yielding elements enables a good utilization of the support capacity. This reduces the magnitude of displacements, demanding less over-profiling.

To account for changing geological conditions, a high degree of geotechnical understanding to optimise the yielding elements' stress-strain behaviour and spatial positioning in cross-section is essential. In addition, a flexible excavation- and support concept during tunnelling is necessary. Existing products of yielding elements are inflexible in terms of rapid adjustment of the stress-strain behaviour and heavy to handle on-site, making the installation time-consuming.

Therefore, the novel HS-EPS yielding element was developed to compensate for these disadvantages.

The lightweight HS-EPS yielding element (~10-20 kg) significantly reduces the time-critical installation process during tunnelling, positively impacting costs and time. Furthermore, the modular configuration of the panels (sandwich construction) allows a flexible, project-specific adjustment of the stress-strain behaviour even on-site. The element size can also be chosen flexible and, if necessary, adjusted directly on-site. With the cuboid shape, a full-surface load transfer between the yielding element and shotcrete lining is guaranteed, thus providing more resistance against tilting in the case of high differential deformations.

The novel HS-EPS yielding elements have already been applied successfully in the geotechnically challenging Semmering Base Tunnel and Brenner Base Tunnel in Austria, as shown in Figure 9.

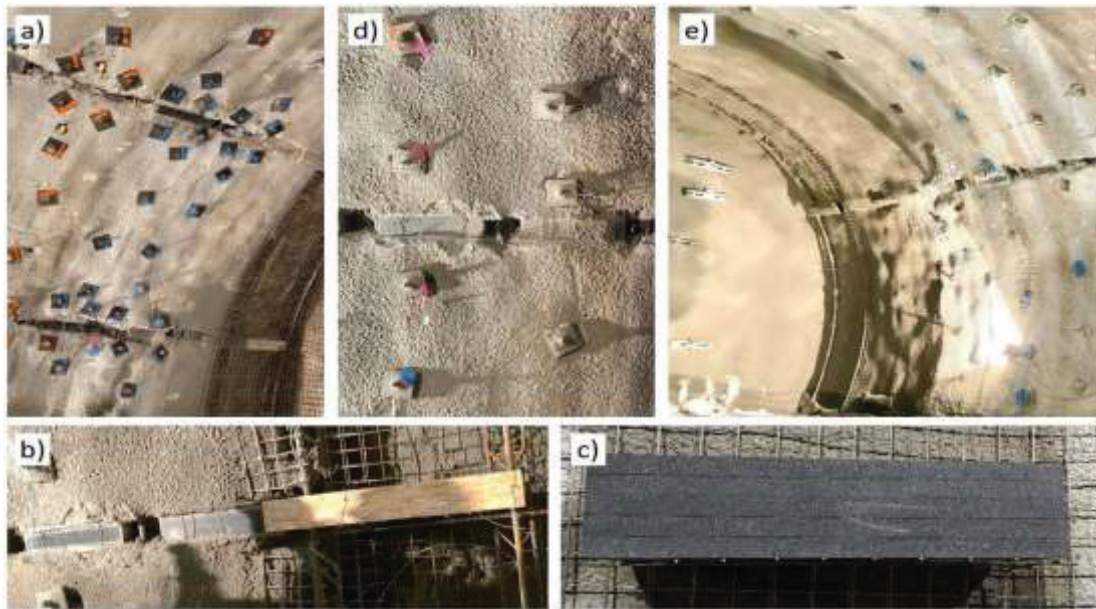


Figure 9. HS-EPS yielding elements, showing a) left sidewall with two rows of yielding elements; b & c) installation process; d) installed and deformed elements; and d) right sidewall with one row of yielding elements; (Photos: Entfellner et al., 2022).

REFERENCES

- Anagnostou, G. and Cantieni, L., 2007. Design and analysis of yielding support in squeezing ground. 11th ISRM Congress, Lisbon, Portugal.
- Barla, G., Bonini, M., Semeraro, M., 2011. Analysis of the behaviour of a yield-control support system in squeezing rock. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26(1): 146–154.
- Chen, W., Hao, H., Hughes, D., Shi, Y., Cui, J., and Li, Z.-X., 2015. Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene. *Materials and Design* 69: 170–180.
- Entfellner, M., Hamdi, P., Wang, X., Wannemacher, H., Amann, F., 2022. Investigating High-Strength Expanded Polystyrene (HS-EPS) as Yielding Support Elements for Tunnelling in Squeezing Ground Conditions. (in press).
- Fenner, R., 1938. Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdrucks. *Gluckauf* 74(32): 681-695.
- Horvath, J. S., 1994. Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: An Introduction to Material Behavior. *Geotextiles and Geomembranes* 13: 263–280.
- Implenia Austria GmbH and RWTH Aachen University, 2020. Technical report: Uniaxial compressive strength testing of HS-EPS Yielding Elements. (unpublished).
- Kovari, K., 2009. Design Methods with Yielding Support in Squeezing and Swelling Rocks. *World Tunnel Congress 2009*, Budapest, Hungary.
- Moritz, B., 2011. Yielding elements - requirements, overview and comparison. *Geomechanics and Tunnelling* 4(3): 221-236.
- Ouellet, S., Cronin, D., Worswick, M., 2006. Compressive response of polymeric foams under quasi-static, medium and high strain rate conditions. *Polymer Testing*, 25(6): 731–743.
- Pacher, F., 1964. Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues. pp. 149-161. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Radonic, N., 2011. Tunnel design and prediction of system behaviour in weak ground. Doctoral thesis, Graz University of Technology.
- Scheirs, J. and Priddy, D., 2003. *Modern styrenic polymers: Polystyrenes and styrenic copolymers*. Wiley.
- Schubert, W., 1996. Dealing with squeezing conditions in Alpine tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 29(3): 145–153.
- Schubert, W. and Brunnegger, S., 2017. New ductile tunnel lining system. In *Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2017*, Bergen, Norway.
- Wittke, W., Wittke-Schmitt, B., Schmitt, D., 2005. The 9 km long Kallidromo tunnel of the new highspeed railway line Athens- Thessaloniki, Greece, tunnel sections in squeezing ground. In Erdem and Solak (Eds), *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*: 321–326.

Gömülü Yapıların Deprem Etkisi Altındaki Davranışı

Earthquake Behavior of Buried Structures

T. T. Vatansever

Emay Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., İstanbul

T. Aksu Özkul

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET: Bu çalışmada, gömülü yapıların tasarımında ve projelerinde sıklıkla kullanılan serbest alan deformasyon metodu ve basitleştirilmiş çerçeve metoduna göre iki farklı zemin türü için analizler yapılmıştır. Bu yöntemlere ek olarak Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)'de dayanma yapılarına gelen yük kabulleri ile de gömülü yapı analiz edilmiştir. Perdeli çerçeveli sistemin göz önüne alındığı çalışmada, zemin parametreleri için Yıldız Metro İstasyonu ve Ataköy Metro İstasyonu bölgesine ait veriler kullanılmıştır.

Gömülü yapıların deprem analizinde TBDY-2018 dayanma yapılarına gelen yük kabullerinin kullanılması, genel kabul görmüş serbest alan deformasyon metodu çözümüne yakın ve yol gösterir nitelikte sonuçlar vermiş olup zemin şartlarının kötüleştiği bölgede genel olarak TBDY-2018 değerlerinin serbest alan deformasyon metoduna göre daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu da serbest alan deformasyon metodunun depremselliği az olan ve sağlam zemin olarak nitelendirilebilecek yerlerde basit ve etkili tasarım aracı olarak kullanılmasını doğrular niteliktedir. TBDY-2018'den gelen yük kabulleri ile yapılan çözüm farklı zemin türlerinde ve farklı kesit boyutlarında yapılacak yeni analizlere yol göstermesi açısından yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

ABSTRACT: In this study, which was carried out on two different soil types, analyzes were made according to the free field deformation method and the simplified frame method, which are frequently used in the design and projects of buried structures. In addition to these methods, the buried structure was analyzed with the load assumptions coming to the retaining wall in Turkey Building Earthquake Code (TBDY-2018). In the study, in which the shear wall-framed system is considered, the data of Yıldız Metro Station and Ataköy Metro Station region were used for the ground parameters.

In the earthquake analysis of buried structures, the use of load assumptions for TBDY-2018 retaining wall structures gave results that are close to the generally accepted free field deformation method solution and indicative. This confirms the use of the free field deformation method as a simple and effective design tool in places with low seismicity and which can be characterized as solid ground. The solution made with the load assumptions from TBDY-2018 can be considered as an innovative approach in terms of guiding new analyzes to be made in different soil types and different section sizes.

1 GİRİŞ

Ülkemiz nüfusunun büyük çoğunluğunun deprem bölgelerinde yoğunlaştığı bilinen bir gerçektir. Özellikle büyük kentlerde artan nüfus dikkate alındığında ulaşım ve park hizmetleri her geçen gün önem kazanmakta bunun sonucu olarak toplu taşımaya ve otoparklara duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak ve şehirlerin alanını etkin kullanabilmek için gömülü yapılar önem kazanmaktadır. Sismik aktiviteye maruz kalabilecek bu yapıların deprem etkisindeki davranışı birçok etkene bağlıdır. Bunların başında yapı türü, yapı boyutları, derinliği, zemin özellikleri, taşıyıcı sistem seçimi ve depremin büyüklüğü gibi parametreler gelmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de (TBDY-2018) dayanma yapıları tasarımında esas alınan yükler ile gömülü yapıların çözümünde kabul görmüş yöntemlerin başında gelen serbest alan deformasyon metodu ve basitleştirilmiş çerçeve yöntemlerini kıyaslayarak, deprem yönetmeliğinin kapsamına girmeyen yer altı yapılarına yeni bir yaklaşım getirmektir.

2 GÖMÜLÜ YAPILARIN SİSMİK ANALİZİ VE TASARIM İLKELERİ

Gömülü yapılar, yüzey yapılarına göre daha farklı özelliklere sahiptir. Örneğin; bir aç-kapa yer altı yapısı inşasında hem zemin hem yapı hem de yapının üzerine örtülen dolgu malzemesinin özelliklerinin birbirinden farklı olması gibi özellikler yer altı yapılarının yüzey yapılarına göre daha farklı mühendislik yaklaşımları ile tasarlanmasını gerekli kılar. Yer altı yapılarına yüzey yapılarından farklı yaklaşım getirilmesi deprem etkisi altında da geçerli olmaktadır. Yer altı yapılarının deprem etkisi altında davranışını incelemek için pratikte kullanılan ve literatürde önerilen çeşitli analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Gömülü yapıların deprem etkilerine göre tasarımında basit analitik elastik çözümlerden psödo statik veya eşdeğer statik çözümlere, yapı ve zeminin göreceli rijitlikleri ile zemin-yapı etkileşimini dikkate alan analizlere, gelişmiş ve daha kesin bir model kullanılarak zemin-yapı sisteminin tam dinamik sayısal analizini dikkate alan yöntemlere kadar çok geniş yelpazede çözüm yöntemi tercih edilmektedir.

2.1 Gömülü Yapıların Deprem Etkisi Altındaki Analizi

Yapı etrafını saran zeminin ataleti yapının ataletinden görece daha büyüktür. Bu nedenle gömülü yapının tepkisi de çevresini saran zeminin tepkisi ve geçici zemin deformasyonları tarafından büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu özellik yer altı yapılarının sismik davranışını yüzey yapılarına göre farklı kılmaktadır. Tünellerin veya aç-kapa yöntemi ile inşa edilen gömülü yapıların sismik tasarımında büyük miktarda kalıcı deformasyonlarla sonuçlanan yer göçmelerinin olmadığı varsayımı ile tasarımda sismik dalgaların jeolojik ortamda yol açtığı deformasyonlarla ilgilenilir. Bu deformasyonlar sismik dalgaların yumuşak yapay dolgularla etkileşimi ve yüzey dalgalarının oluşumu dolayısıyla oldukça karmaşıktır. Tasarım amaçları için bu karmaşık deformasyon davranışı basit biçimlere ayrılabilir. Yer altı yapıları sismik hareketler altında üç tip şekil değiştirme davranışı gösterir. Bunlar aksenal yönde sıkışma ve uzama, eğrilik, ovalleşme ve ötelenmedir (Hashash vd., 2001).

2.2 Gömülü Yapılar İçin Hedeflenen Performans Düzeyleri

Literatürde gömülü yapıların deprem tasarımı için iki ayrı senaryo depremi ve bunlara karşılık gelen iki ayrı performans hedefi Çizelge 1'de tanımlanmıştır.

- ODE- *İşletim tasarım depremi*: Yapının tasarım ömrü içerisinde makul (en az bir deprem) biçimde gerçekleşmesi beklenen yer hareketi olarak tanımlanır. Bu yer hareketinde hedef

yapısal sistemin servise devam etmesi ve yapının çok az hasar alması ya da depremi hasarsız atlatmasıdır.

- b. MDE – *Maksimum tasarım depremi*: Yapının tasarım ömrü içerisinde aşılma olasılığı (% 2) oldukça küçük olan yer hareketi olarak tanımlanır. Bu yer hareketinde öngörülen hedef yapısal sistemin deprem anında ve sonrasında kamusal güvenliği sağlamasıdır (Wang, 1993).

Çizelge 1. Deprem performans düzeyleri

Deprem Seviyesi	Beklenen Performans	
	Servis	Hasar
ODE	Devamlı	Minimum
MDE	Sınırlı	Tamir Edilebilir

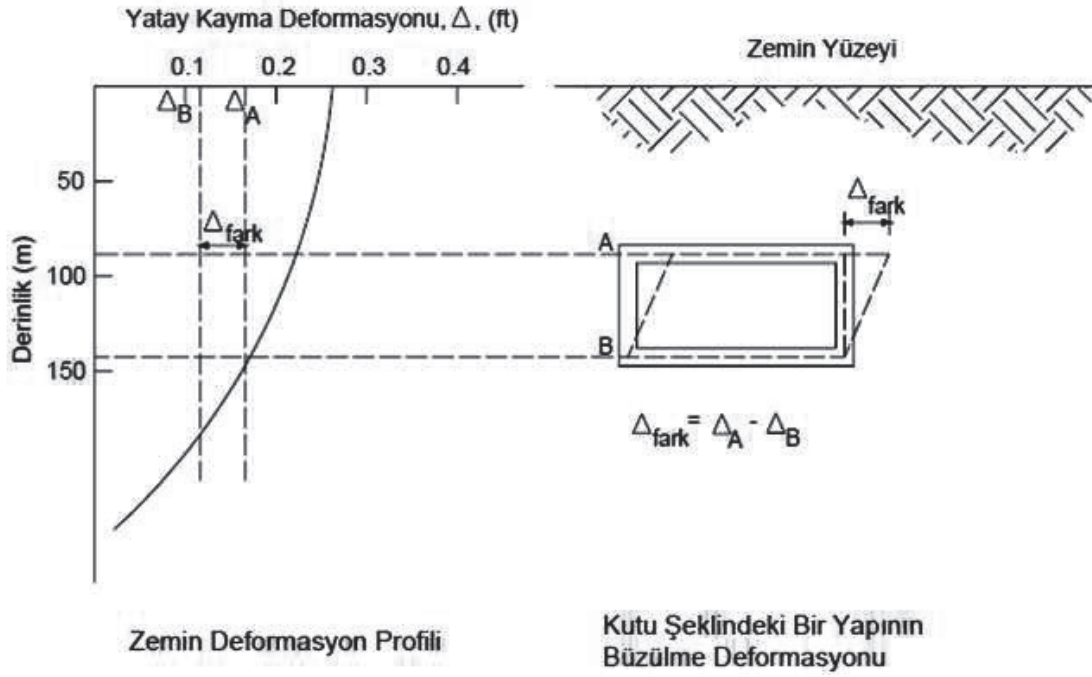
Devamlı servis kriteri, depremin hemen sonrasında yapının kullanıma sürekli açık kalmasını hedeflemektedir. Sınırlı servis kriteri ise, yapının depremden birkaç gün sonrasında sınırlı kullanımını, tam işletmenin ise kısa bir süre sonra sağlanabilmesini amaçlamaktadır. Minimum hasar seviyesi esasen elastik davranışı içermektedir. ODE deprem seviyesinde istenen performans kriterinin sağlanması için yapı deprem yükleri altında elastik ötesi davranışa geçmemelidir. Tamir edilebilir hasar seviyesinde tanımlanan hasarlar ve bu hasarların tamiri işletmeyi sadece minimum düzeyde etkileyecektir. Bu nedenle MDE depremi için can güvenliğini riske sokmayacak düzeyde elastik ötesi davranışa izin verilecektir.

2.2.1 Çalışma kapsamında kullanılan analiz yöntemleri

Gömülü yapılara gelen deprem etkilerini belirlemek için çeşitli analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olanları dinamik toprak basıncı metodu, serbest alan deformasyon metodu, basitleştirilmiş çerçeve metodu ve sonlu elemanlar yöntemi olarak sayılabilir. Bu çalışmada, TBDY-2018 Deprem Etkisi Altında Dayanma Yapılarının Tasarımı İçin Kurallar Bölümünde açıklanan yükler dikkate alınarak gömülü bir yapının çözümü irdelenmiş, ayrıca uluslararası alanda kabul görmüş yöntemlerden serbest alan deformasyon metodu ve basitleştirilmiş çerçeve metodu kullanılarak yapılmış çözümler ile kıyaslanmıştır.

2.2.1.1 Serbest alan deformasyon metodu

Serbest alan deformasyon metodu, serbest alan kayma deformasyonu ya da serbest alan bozulma deformasyonu olarak da bilinir. Bu yaklaşımda sismik dalgalardan kaynaklanan deformasyonlar, yapı ve kazı varlığını göz ardı ederek tahmin edilir. Ardından bu deformasyonlar yapıya tatbik edilir. Şekil 1’de gösterildiği üzere dikdörtgen kesitin, etrafındaki zemin ile eşit miktarda hareket edeceği varsayımına dayanmaktadır. Bu yöntem sismik yönden zemin bozulmalarının görece az görüldüğü bölgelerde ve deprenselliği az olan yerlerde, yapı esnekliğinin zeminden fazla olduğu durumlarda basit ve etkili tasarım aracı olarak kullanılır. Yapısal tepkiler yer değiştirme esasına dayandığından rijit yapılar daha büyük sismik yüklere maruz kalmaktadır. Bu nedenle rijit yapılar yerine esnek yapıların tercih edilmesi daha doğru olacaktır (Wang, 1993). Yöntem etrafındaki zeminler ile benzer rijitliğe sahip gömülü yapılar için önerilmektedir.

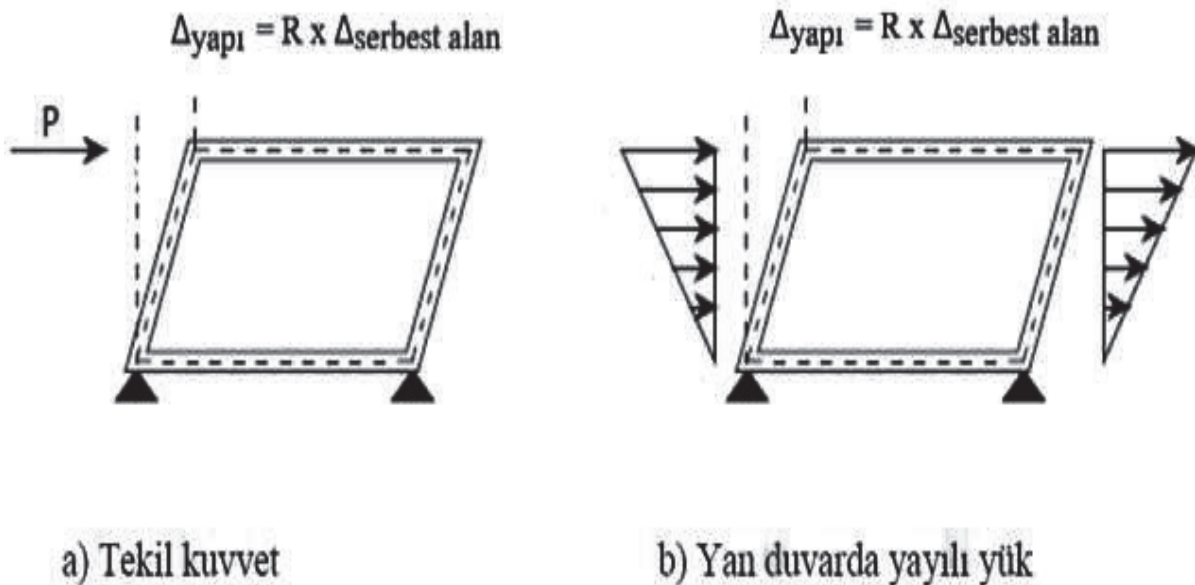


Şekil 1. Serbest alan deformasyon metodunda yanal hareket

2.2.1.2 Basitleştirilmiş çerçeve metodu

Basitleştirilmiş çerçeve yöntemi de diğer yöntemler ile kıyaslandığında geniş bir uygulama alanı bulmakta ve zemin-yapı tepkilerini göreceli olarak daha etkin bir şekilde belirlemektedir. Problem, sonlu elemanlar yöntemlerine göre daha kolay bir şekilde modellenebilmektedir.

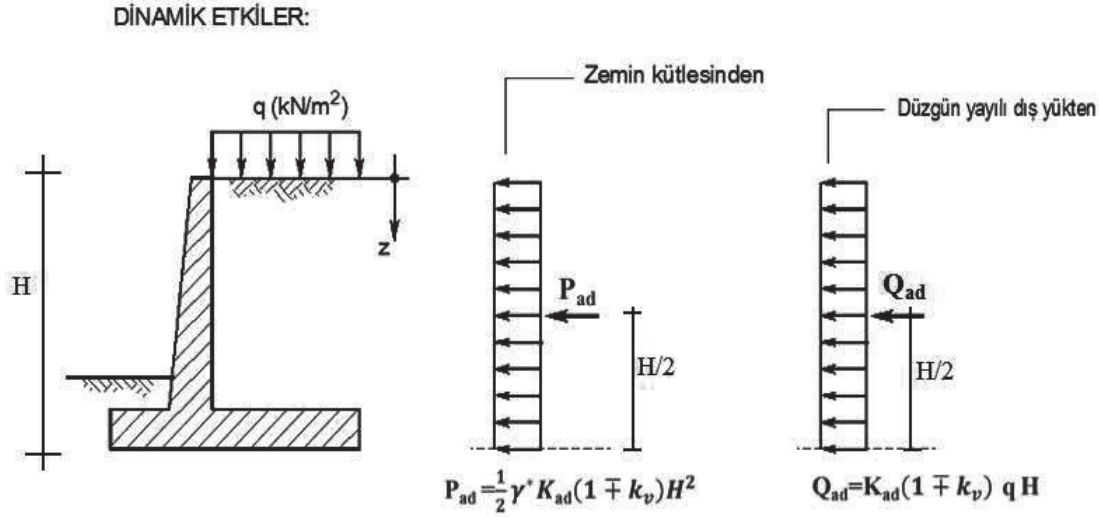
Bu yöntemde, ilk olarak yapıda deprem etkileri altında oluşması muhtemel deplasmanlar, zemin ile yapı arasındaki rölatif rijitliğe bağlı olarak bulunmakta ve sonrasında bu deplasmanlar nedeniyle oluşan kesit kuvvetleri statik analizle hesaplanmaktadır (Şekil 2). Zeminin deprem yükleri altında azalan kayma modülü (zeminin rijitliği) makul doğrulukla tahmin edildiği takdirde, bu yöntem, gömülü yapıların ön tasarımında başarıyla kullanılabilir (Ülgen vd., 2015). Wang (1993) tarafından tavsiye edilen prosedür yapı geometrisinin belirlendiği, zemin profilinin iyi bilindiği ve deprem kaydının seçildiği durumlarda uygulanabilir.



Şekil 2. Basitleştirilmiş çerçeve metodu yanal deformasyonlar

2.2.1.3 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'e göre çözüm

Yapıya etkiyen sabit ve hareketli yükler ile beraber 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde bahsi geçen "Deprem Etkisi Altında Dayanma Yapılarının Tasarımı İçin Kurallar" Bölümü esas alınarak yapıda deprem yükü olarak göz önüne alınacak olan hesaplar konu edilmektedir. Dayanma yapısına etkiyen statik ve dinamik toprak basınç hesaplarının üç boyutlu olarak modellenen yapıya uygulanması söz konusudur (Şekil 3).



Şekil 3. 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre dayanma yapılarına etkiyen dinamik yanal etkiler (depremlilik durumu)

3 GÖMÜLÜ BİR YAPININ TASARIMI

3.1 Taşıyıcı Sistem Özellikleri

Hesaplamalara konu olan yapı planda 21 metre uzunluğa ve 21 metre genişliğe sahiptir. Kat yükseklikleri 5.25 metre olup toplam yapı yüksekliği 11.5 metredir. Üç boyutlu olarak modellenen yapı sağlam ve zayıf kabul edilebilecek iki farklı zemin türünde analiz edilmiştir. Yapı elemanlarına ait kesitler seçilirken TS500 ve TBDY-2018'e göre ön boyutlandırma kontrolü yapılmıştır. Aşırı yüksek değerler ile karşılaşmamak adına Ataköy bölgesi zemin yapısına karşı gelen zayıf zeminde analize esas düşey taşıyıcı eleman boyutları Yıldız bölgesine karşı gelen sağlam zemindeki yapıya göre % 20 daha büyük seçilmiştir. İncelenen yapının taşıyıcı sistem tasarımı, üst döşemesi üzerindeki dolgu yükü, sıcaklık etkisi, statik yanal toprak basıncı ve deprem etkileri dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışmadaki amaç farklı yöntemlere göre hesaplanan deprem kuvvetlerinin etkilerinin karşılaştırılması olduğundan sürüş/karayolu hareketli yükleri ve yer altı suları ile mimari gereklilikler kapsam dışında tutulmuştur.

Yıldız İstasyonu için yapının toprakla temas eden çeperleri 100 cm kalınlığında betonarme perde olarak tasarlanmıştır. Yapı içerisinde yer alan düşey taşıyıcı elemanlar 100 x 100 cm boyutlarında betonarme kolonlardır. Yapının döşemeleri ara kat seviyesinde 50 cm, üst döşemede ise 100 cm kalınlığında kirişsiz plak olarak göz önüne alınmıştır. Yapının temel sistemi 100 cm kalınlığında plak temel olarak tasarlanmıştır.

Ataköy İstasyon bölgesinde ise toprakla temas eden dış çeperler 120 cm kalınlığında betonarme perde olarak tasarlanmıştır. Düşey taşıyıcı elemanlar 120 x 120 cm boyutlarında betonarme kolon seçilmiştir. Ara kat döşemesi 50 cm, üst döşeme kalınlığı ise 100 cm kalınlığında kirişsiz plak olarak göz önüne alınmıştır. Plak temel kalınlığı ise 150 cm'dir.

3.2 Yıldız İstasyonu Zemin Parametreleri (ZC)

Yıldız İstasyonu inceleme alanı kumtaşı-şeyl ardalaşmasından kurulu Trakya formasyonundan oluşmaktadır. Trakya formasyonu, ağırlıklı olarak, silt taşı (çamurtaşı), kumtaşı ve kilitaşı tabakalarının ardalaşmasından kuruludur.

Zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapıya en yakın olan TSK-17 sondajından (Yıldız İstasyonu jeoteknik hesap raporu) faydalanılmıştır. İstasyon temeli W2 ayrışma derecesindeki kaya birimine oturmaktadır. Kayaç birimler üzerine gelen yapılarda taşıma gücü hesapları yapılırken tek eksenli basınç dayanımları ve laboratuvar deneyleri göz önünde bulundurulmuştur. Düşey yatak katsayısı Bowles'un önerdiği formülle ($k_v = q_{em} \times 120$) 120.000 kN/m³ olarak hesaplanmış, güvenli tarafta kalınarak $k_v = 100.000$ kN/m³ olarak alınmıştır.

3.3 Ataköy İstasyonu Zemin Parametreleri (ZE)

Ataköy İstasyon bölgesi inceleme alanında en üstte ortalama kalınlığı 1,5 m olan dolgu malzemesi bulunmaktadır. Dolgu tabakasının altında kalınlığı 15 m'leri bulan yer yer kumlu, yer yer killi (orta sıkı kum ve katı kil) alüvyon tabakası, bu tabakanın altında ise Güngören formasyonuna ait sert kil tabakası bulunmaktadır. Düşey yatak katsayısı $k_v = 20.000$ kN/m³ olarak alınmıştır (*Ataköy İstasyonu jeoteknik hesap raporu*). Tasarımda göz önüne alınan ZC zemin parametreleri Çizelge 2'de, ZE zemin parametreleri ise Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 2. Yıldız İstasyonu tasarım için kullanılan zemin parametreleri

Zemin	Kot (m)	ϕ' (°)	c' (kPa)	γ (kN/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)
Dolgu	0.00 – 2.0	25	10	20	15
Kaya Kütlesi	2.0 – 15.50	35	34	24	125
Kaya Kütlesi	15.50 – 23.50	38	116	25	300
Kaya Kütlesi	23.50 – 33.50	35	149	25	400
Kaya Kütlesi	33.50 – 43.50	33	178	25	500
Kaya Kütlesi	43.50-53.50	31	204	25	600

Çizelge 3. Ataköy İstasyonu tasarım için kullanılan zemin parametreleri

Zemin	Kot (m)	ϕ' (°)	c' (kPa)	γ (kN/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)
Dolgu	0.00 – 1.50	25	5	18	15
Katı Kil	1.50 – 15.0	28	10	18	25
Sert Kil	> 15.0	28	15	19	40

3.4 Karakteristik Yükler

Tüm yükleme durumları için verilen yük değerleri karakteristik değerlerdir. TS498 ve TS9194'te verilen yükler karakteristik yükler olarak kabul edilmiştir.

3.4.1 Zati yükler

Kalıcı yükler yapı elemanlarının kendi ağırlığı, gömülü yapı üzerindeki dolgu ağırlığı, döşeme kaplama malzemeleri, duvarlar gibi kalıcı inşaat elemanlarını içerir. Bu yüklerin yaratacağı etkiler yapının ömrü boyunca sabit olacağından, yapı, bu yükleri sürekli ve güvenle taşıyacak

şekilde tasarlanmıştır. Yapı elemanlarının kendi ağırlığı, analiz sırasında program tarafından otomatik olarak birim ağırlık ve eleman boyutları kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplarda kullanılan birim ağırlıklar aşağıdadır:

$$\text{Betonarme} = 25 \text{ kN/m}^3 \quad \text{Geri Dolgu} = 18 \sim 20 \text{ kN/m}^3$$

3.4.2 Hareketli yükler

Hareketli yükler, insanlar, eşyalar ve araçlar gibi yapının bir parçası olmayan geçici yüklerden oluşmaktadır. Tasarımda genel olarak kullanılan hareketli yük değerleri aşağıda Çizelge 4 'de özetlenmiştir. Bu değerler daha önce Türkiye'de yapımı gerçekleştirilen metro istasyonu projeleri referans alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 4. Gömülü yapıda kullanılabilecek hareketli yük değerleri

Bilet Holleri ve Genel Dolaşım Alanları	6.0 kN/m ²
Personel Odaları, Ofisler, Tuvaletler	6.0 kN/m ²
Depo ve Yedek Odalar	6.0 kN/m ²
Yaya Yolları ve Yaya Rampaları	6.0 kN/m ²
Teknik Hacimler	6.0 kN/m ²

3.4.3 Sıcaklık değişim etkileri

Yer üstü yapıları için kullanılan sıcaklık değişimi değerleri yer altı istasyon yapılarının sıcaklık hesaplarında bir miktar azaltılarak dikkate alınmıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından İstanbul ili için 1929-2021 yıllarında elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Buna göre İstanbul'da yıl içinde gözlenen ortalama en düşük sıcaklık şubat ayında 3.1 °C, ortalama en yüksek sıcaklık ise ağustos ayında 28.9 °C olarak belirlenmiştir. Aradaki yaklaşık 25 °C'lik sıcaklık farkı artış ya da azalma şeklinde oluşabileceğinden yer üstü yapıları için yapılacak hesaplar sırasında sıcaklık değişimleri T1=25 °C ve T2=-25 °C olarak iki ayrı yük durumu şeklinde hesaplarda dikkate alınabilir. Gömülü yapılarda oluşacak sıcaklık farkları yer üstü yapılarına göre çok daha düşük olacaktır. Buna ilişkin istatistiksel veriler mevcut olmamakla birlikte çalışmada bahsi geçen gömülü yapıda bu değerler yaklaşık %30 azaltılarak T1= 18 °C ve T2= -18°C olarak hesaba katılmıştır.

3.4.4 Zemin yükleri ve hidrostatik yükler

Gömülü yapının tasarımı, zeminin yapı üzerine uyguladığı yüklere uygun olarak ele alınmıştır. Çalışmada hesaba konu olan tüm yöntemlerde toprak basınçları Coulomb toprak itkisi denklemleri kullanılarak hesap edilmiştir.

3.4.5 Deprem kuvvetleri

3.4.5.1. Serbest alan deformasyon metoduna göre yükleme durumları

Bu yöntemde izlenen adımlar aşağıda verilmiştir.

- Göz önüne alınan zemin türüne göre kesme dalgası (Cs) hızı seçilir.
- Pik zemin hızı değeri (vmax) AFAD'ın internet sitesinden (<https://www.turkiye.gov.tr/afad-turkiye-deprem-tehlike-haritalari>) ilgili bölgenin koordinatları girilerek belirlenir.

- Pik zemin ivmesi (as) hesabı için yapının yeryüzünden derinliğine bağlı olarak hesaplarda göz önüne alınacak katsayı belirlenir. Pik zemin ivmesi $as = 0.9v_{max}$ olarak hesaplarda dikkate alınmıştır.
- Pik parçacık hızı V_s deprem büyüklüğü ve zemin türüne bağlı olarak seçilecek katsayı ile beraber $V_s = m \cdot as$ olarak hesap edilir. Bu çalışmada V_s değerleri olarak kullanılan parametreler Yıldız İstasyonu ve Ataköy İstasyonu yerleşimleri esas alınarak AFAD'ın Türkiye Deprem Tehlike Haritalarından alınmıştır.
- Deprem anında oluşması muhtemel maksimum kayma şekil değiştirmesi $\gamma_{max} = V_s / C_s$ ile hesaplanır.
- Maksimum yer değiştirme model yüksekliği boyunca (h_{mod}), $\Delta_{FF} = h_{mod} \cdot \gamma_{max}$ olarak modele tatbik edilir.

3.4.5.2. Basitleştirilmiş çerçeve metoduna göre yükleme durumları

Bu yöntemde izlenen adımlar aşağıda verilmiştir.

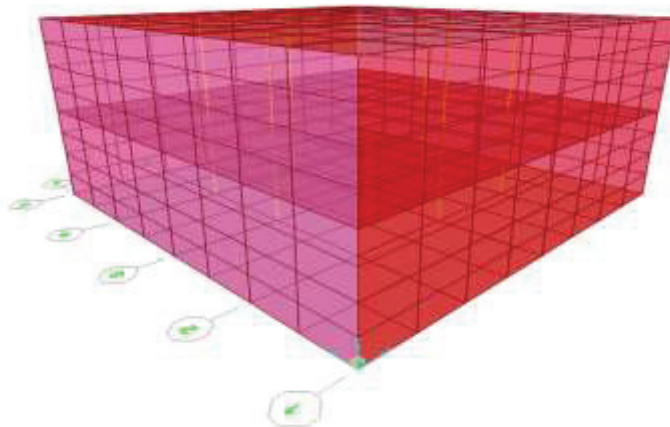
- Deprem etkisiyle meydana gelecek serbest alan deformasyonu Δ_{FF} hesaplanır.
- Yapıyı çevreleyen ortamın kesme modülü G_m hesap edilir.
- Toprakla yapı arasındaki göreceli rijitliği tarifleyen esneklik oranı R hesaplanır.
- Kayma katsayısı R ile yapının kayma deformasyonu (Δ_s) hesap edilir.
- Yanal deformasyonları elde etmek için hesaplanan Δ_s değeri yapıya eşdeğer üçgen veya tekil yük olarak tatbik edilmiştir.

3.4.5.3. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'e göre yükleme durumları

Bu bölümde TBDY-2018'e göre gömülü yapıda göz önüne alınacak deprem kuvveti yükü olarak kabul görecektir dayanma yapılarına etkiyen statik yanal etkilerle beraber dinamik yanal etkileri de dikkate alan yaklaşım izlenmiştir. Depremlili durum için zemin kütesinden ve düzgün yayılı dış yükten gelen etkiler yapı analizinde dikkate alınmıştır.

4 SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde SAP2000 sonlu elemanlar programı ile mimari gereksinimler göz ardı edilerek modellenen yapının betonarme elemanlarına ait iç kuvvet tesirleri ve analize dair çıktılar verilmiştir. Yüzeysel yer altı yapısı olarak tasarlanan modelin deprem hesabı için serbest alan deformasyon metodu, basitleştirilmiş çerçeve metodu ve 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği dayanma yapılarına gelen yüklerle çözümü göz önüne alınmıştır. Yapının analizi ve tasarımı için sistem 3 boyutlu olarak SAP2000 sonlu elemanlar programı yardımıyla modellenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Gömülü yapıya ait SAP2000 modeli

4.1 Yanal toprak basınçları ve deprem yükleri

Hesaplarda kullanılan yükler ve karakteristik değerler 3. Bölümde tanımlanmıştır. Yanal toprak basınçları ve deprem yükleri hesabı her bir yönteme ve zemine göre farklılık göstereceğinden ayrı ayrı gösterilmiştir.

4.1.1 Yıldız İstasyonu (ZC) zemin türüne göre yan al toprak basınçları

ZC zemin türünde hesaplanan yapı perdelerine etki eden yan al toprak basınçları Çizelge 5’de verilmiştir. Perdeye üst döşeme seviyesinde gelen toprak basıncı 20 kN/m² iken temel seviyesinde etkiyen toprak basıncı 137 kN/m² olmaktadır.

Çizelge 5. Yıldız İstasyonu (ZC) zemin biriminde yan al toprak basınçları

$K_0 (1-\sin\phi)$	0.426
γ (kN/m ³)	24
$P_{\text{üst}}$ (kN)	20
P_{temel} (kN)	137

4.1.2 Ataköy İstasyonu (ZE) zemin türüne göre yan al toprak basınçları

ZE zemin türünde hesaplanan yapı perdelerine etki eden yan al toprak basınçları Çizelge 6’da verilmiştir. Perdeye üst döşeme seviyesinde gelen toprak basıncı 20 kN/m² iken temel seviyesinde etkiyen toprak basıncı 142 kN/m² olmaktadır.

Çizelge 6. Ataköy İstasyonu (ZE) zemin biriminde yan al toprak basınçları

$K_0 (1-\sin\phi)$	0.593
γ (kN/m ²)	18
$P_{\text{üst}}$ (kN)	20
P_{temel} (kN)	142

4.1.3 Yıldız İstasyonu (ZC) serbest alan deformasyon metoduna göre sayısal hesaplamalar

Tasarımda kullanılan C_s değeri Kabataş-Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Hattı projesi kapsamında yapılan Yıldız İstasyonu Geoteknik Hesap Raporu’ndan alınmıştır. a_{max} (g) değeri ise AFAD’dan alınmıştır.

Çizelge 7. Serbest alan deformasyon metodu deprem tasarım parametreleri (ZC)

C_s (m/sn)	360
a_{max} (g)	0.339
a_s (g)	0.305
V_s (m/sn)	0.211
$\gamma_{\text{max}} = V_s / C_s$	0.000586
$\Delta_{\text{FF}} = h_{\text{mod}} \cdot \gamma_{\text{max}}$ (m)	0.00674

Tasarımda ZC zemin parametreleri dikkate alınan modelde, deprem yükü olarak tatbik edilecek maksimum yer değiştirme $\Delta_{\text{FF}} = 6.74$ mm olarak hesaplanmıştır.

4.1.4 Ataköy İstasyonu (ZE) serbest alan deformasyon metoduna göre sayısal hesaplamalar

Tasarımda kullanılan C_s değeri İkitelli-Ataköy Metro Hattı projesi kapsamında yapılan Ataköy İstasyonu Geoteknik Hesap Raporu'ndan alınmıştır. a_{\max} (g) değeri AFAD'dan alınmıştır.

Çizelge 8. Serbest alan deformasyon metodu deprem tasarım parametreleri (ZE)

C_s (m/sn)	180
a_{\max} (g)	0.494
a_s (g)	0.445
V_s (m/sn)	0.302
$\gamma_{\max} = V_s / C_s$	0.00167
$\Delta_{FF} = h_{\text{mod}} \cdot \gamma_{\max}$ (m)	0.0193

Tasarımda ZE zemin parametreleri dikkate alınan modelde, deprem yükü olarak tatbik edilecek maksimum yer değiştirme $\Delta_{FF} = 19.29$ mm olarak hesaplanmıştır.

4.1.5 Yıldız İstasyonu (ZC) basitleştirilmiş çerçeve metoduna göre sayısal hesaplamalar

Tasarımda kullanılan Δ_{FF} değeri serbest alan deformasyon metodundan alınmıştır. Yapıya tatbik edilecek yer değiştirme $\Delta_S = 21.1$ mm olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 9. Basitleştirilmiş çerçeve metodu deprem tasarım parametreleri (ZC)

Δ_{FF} (m)	0.00674
G_m (kPa)	3110400
R	3.17
Δ_S (m)	0.0211

4.1.6 Ataköy İstasyonu (ZE) basitleştirilmiş çerçeve metoduna göre sayısal hesaplamalar

Tasarımda kullanılan Δ_{FF} değeri serbest alan deformasyon metodundan alınmıştır. Yapıya tatbik edilecek yer değiştirme $\Delta_S = 58.8$ mm olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 10 Basitleştirilmiş çerçeve metodu deprem tasarım parametreleri (ZE)

Δ_{FF} (m)	0.0193
G_m (kPa)	583200
R	3.05
Δ_S (m)	0.0588

4.1.7 Yıldız İstasyonu (ZC) TBDY-2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre sayısal hesaplamalar

50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (tekrarlanma periyodu 475 yıl) DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için ZC zemin sınıfında hesaplanan değerler Çizelge 11'de verilmiştir.

Çizelge 11. TBDY-2018 ‘e göre hesaplanan değerler (ZC zemin sınıfı için)

S_{DS}	0.977
k_h	0.390
k_v	0.195
P_{as} (kN)	75
P_{ad} (kN)	100

4.1.8 Ataköy İstasyonu (ZE) TBDY-2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre sayısal hesaplamalar

50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (tekrarlanma periyodu 475 yıl) DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için ZE zemin sınıfında hesaplanan değerler Çizelge 12’de verilmiştir.

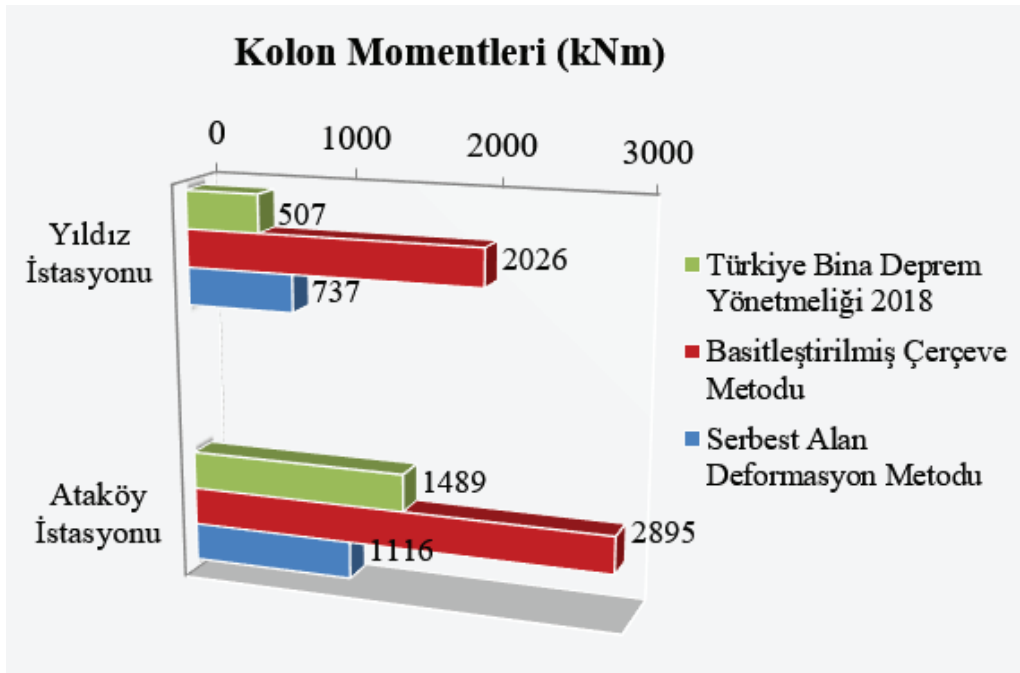
Çizelge 12. TBDY-2018 ‘e göre hesaplanan değerler (ZE zemin sınıfı için).

S_{DS}	1.128
k_h	0.451
k_v	0.226
P_{as} (kN)	75
P_{ad} (kN)	200

5 SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

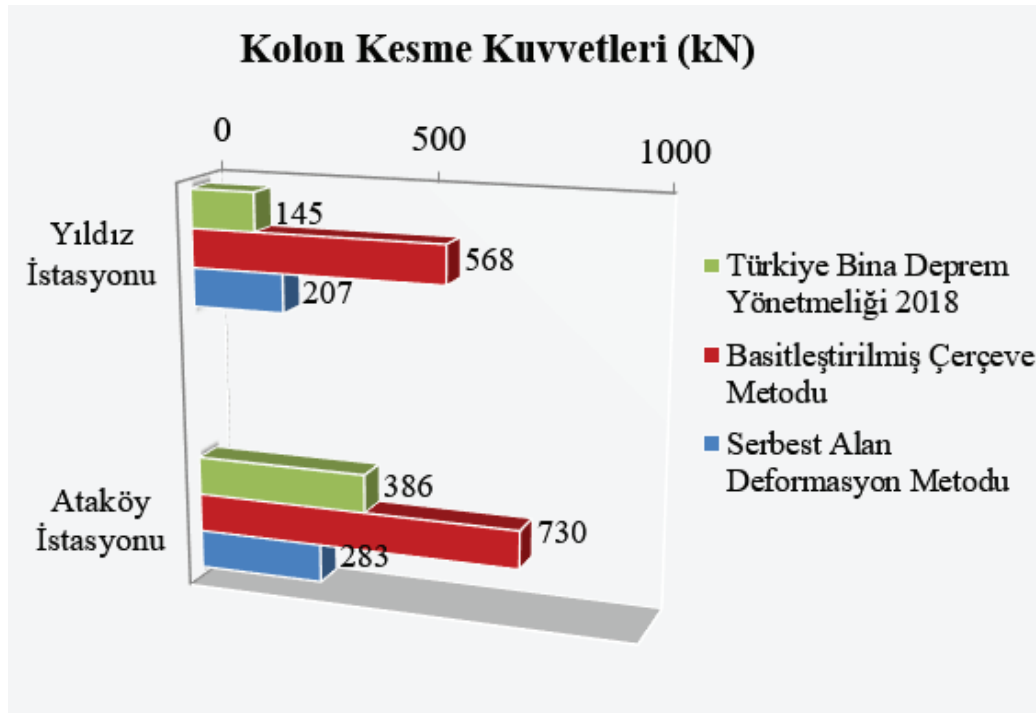
Çalışmaya konu olan gömülü yapının deprem yükleri altında analizi serbest alan deformasyon metodu, basitleştirilmiş çerçeve metodu ve TBDY-2018’e göre yapılmıştır. TBDY-2018’de deprem yükleri dayanma yapılarına gelen statik ve dinamik yüklere benzeşim yapılarak üç boyutlu olarak modellenen yapıya tatbik edilmiştir. Söz konusu analiz iki farklı zemin türü göz önüne alınarak yapılmıştır. Zemin türü olarak ZC sınıf zeminini temsilen Yıldız Metro İstasyon Bölgesi ile ZE sınıf zeminini temsilen Ataköy Metro İstasyon Bölgesi hesaplara konu edilmiştir. Zemin sınıflarının farklı olması ve zemin etkilerinden dolayı aşırı yüksek değerler ile karşılaşmamak adına ZE zemin bölgesindeki yapı elemanlarına ait düşey taşıyıcı betonarme kesitler ZC zemin bölgesindeki yapı elemanlarına nazaran %20 daha büyük seçilmiştir. Dikkate alınan üç yöntemde göre kolon momentleri ve kesme kuvvetleri, taban kesme kuvvetleri ve maksimum yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Maksimum yer değiştirmeler yapının en üst noktasının yaptığı yer değiştirmeler olarak göz önüne alınmıştır. Grafiklerde mavi renkli bar serbest alan deformasyon metodunu, kırmızı renkli bar basitleştirilmiş çerçeve metodunu, yeşil renkli bar ise TBDY-2018 sonuçlarını temsil etmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6’da verilen grafiklerde 0 – 5.75 m kotları arasında kolon momentleri ve kesme kuvvetleri incelenmiştir. Şekil 7’de taban kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Tepe noktası yer değiştirmeleri ise Şekil 8’de verilmiştir.

Yapıya ait kolon momentleri incelendiğinde (Şekil 5) ZC zemin sınıfında serbest alan deformasyon metodu değerleri TBDY-2018 değerlerine nazaran %15 ile %80 arasında daha yüksek çıkmıştır. Bu iki yöntem sismik yüklemenin daha yüksek olduğu basitleştirilmiş çerçeve metodu ile kıyaslandıklarında ise değerler oldukça düşük kalmıştır. ZE zemin sınıfında ise TBDY-2018 değerleri serbest alan deformasyon metoduna kıyasla %15- ile %70 aralığında daha yüksek çıkmıştır. Basitleştirilmiş çerçeve metodunda ise ZC zemin sınıfında olduğu gibi ZE tipi zeminde de değerler diğer iki yöntemde göre yüksektir.



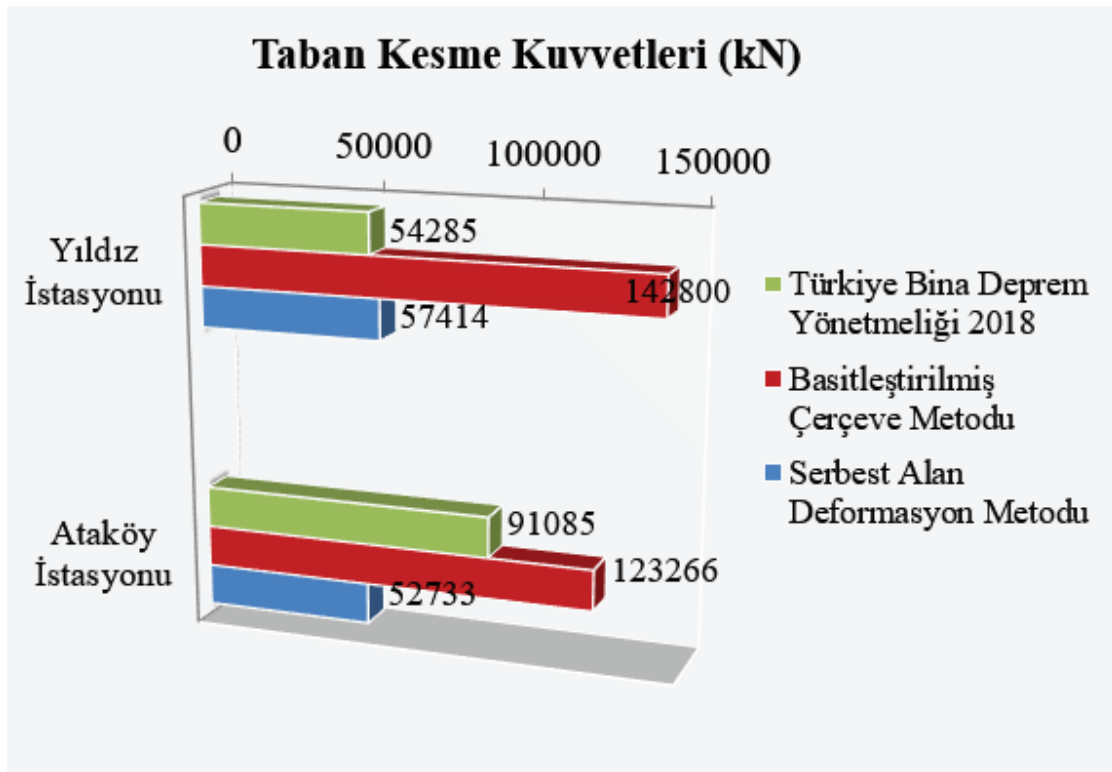
Şekil 5. Kolon momentleri

Yapının kolon kesme kuvvetleri de kolon momentlerine paralel olarak benzer sonuçlar göstermiştir. Zemin bozulmaları arttıkça TBDY-2018'e göre yapılan analiz serbest alan deformasyon metoduna göre daha yüksek sonuçlar vermiştir (Şekil 6).



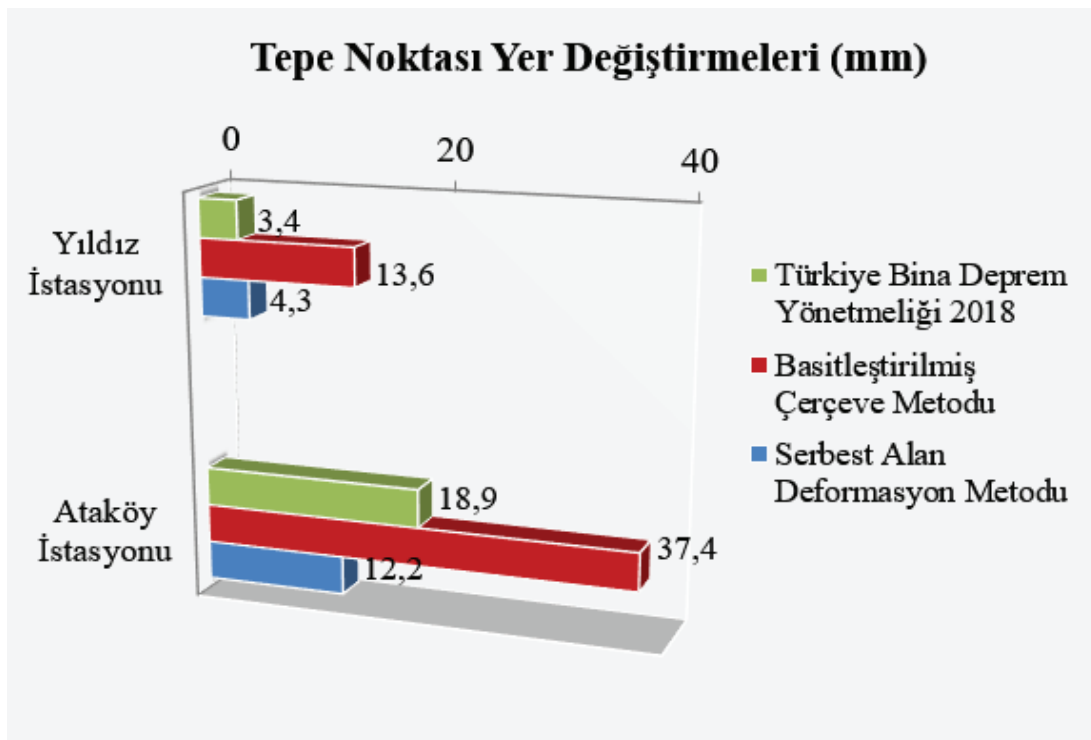
Şekil 6. Kolon kesme kuvvetleri

Taban kesme kuvvetleri kıyaslandığında en yüksek değerler ZE zemin sınıfında %15 ile %35 arasında değişen farklar ile basitleştirilmiş çerçeve metodunda bulunmuştur. ZE zemin sınıfında TBDY-2018 değerleri ile basitleştirilmiş çerçeve metodu değerleri birbirine daha yakın sonuçlar vermiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Taban kesme kuvvetleri

Yapının tepe noktası yer değiştirmeleri incelendiğinde ZC zemin sınıfında serbest alan deformasyon metodu değerleri TBDY-2018 değerlerine göre %26 ile %53 arasında daha yüksek, ZE zemin sınıfında ise TBDY-2018 değerleri serbest alan deformasyon metoduna göre %24 ile %55 arasında daha yüksek çıkmıştır (Şekil 8). Basitleştirilmiş çerçeve metodu değerleri ise esneklik oranı (R) ile doğru orantılı sonuçlar göstererek diğer iki yönteme nazaran değerleri yaklaşık 1.5 ila 2 katı kadar yüksek çıkmıştır.



Şekil 8. Tepe noktası yer değiştirmeleri

6 SONUÇLAR

İki farklı zemin türünde yapılan bu çalışmada gömülü yapıların tasarımında ve projelerinde sıklıkla kullanılan serbest alan deformasyon metodu ve basitleştirilmiş çerçeve metoduna göre analizler yapılmıştır. Bu iki yönteme ek olarak, TBDY-2018’de dayanma yapılarına gelen yük kabulleri ile de iki farklı zemin türünde analizler yapılmıştır. Grafiklerden de görüleceği üzere her üç yöntem sonuçlar bakımından incelendiğinde serbest alan deformasyon metodu ile TBDY-2018 değerleri genel olarak birbirine yakın mertebelerde çıkmıştır. Serbest alan deformasyon metodu ile basitleştirilmiş çerçeve metodu sonucu bulunan değerler literatürle uyumlu olmakla birlikte, basitleştirilmiş çerçeve metoduna göre yapılan çözümler oldukça güvenli tarafta kalmaktadır. Ancak bu yüksek sonuçlar inşa edilecek yapı maliyetini ve kesit boyutlarını önemli ölçüde etkileyebilecek düzeydedir. Bu iki yönteme ek olarak literatüre yeni bir yaklaşım kazandırmak amacıyla, TBDY-2018’de dayanma yapılarına gelen yük kabulleri ile yapılan analizde çıkan sonuçlar genel olarak serbest alan deformasyon metoduna yakın değerler vermiş olup zemin şartlarının kötüleştiği bölgede çoğunlukla TBDY-2018 değerlerinin serbest alan deformasyon metoduna göre güvenli tarafta kalan büyük sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu da serbest alan deformasyon metodunun deprenselliği az olan ve sağlam zemin olarak nitelendirilebilecek yerlerde basit ve etkili tasarım aracı olarak kullanılmasını doğrular niteliktedir. Gömülü yapıların deprem analizinde TBDY-2018 dayanma yapılarına gelen yük kabullerinin kullanılması, genel kabul görmüş serbest alan deformasyon metodu çözümüne yakın ve yol gösterir nitelikte sonuçlar ortaya koymuştur. Bu sonuçlar birden fazla zemin türünde ve farklı kesit boyutlarında yapılacak yeni analizlere yol göstermesi açısından olumlu bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

Ataköy İstasyonu Geoteknik Hesap Raporu

Hashash Y.M.A, Hook J.J, Schmidt B, Yao J.C, 2001. Seismic Design and Analysis of Undergorund Structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*

<https://www.turkiye.gov.tr/afad-turkiye-deprem-tehlike-haritalari>

Ülgen D, Sağlam S, Özkan M.Y (2015), Rijit Bir Yer Altı Yapısının Dinamik Yükler Altındaki Tepkisinin Santrifüj Deneyi İle Değerlendirilmesi, 6. *Geoteknik Sempozyumu*, Çukurova Üniversitesi, Adana

Yıldız İstasyonu Betonarme Uygulama Projesi Hesap Raporu

Yıldız İstasyonu Geçici Kazı Destek Sistemi Geoteknik Hesap Raporu

Wang J.N (1993), *Seismic Design of Tunnels*, June

Jeolojik Dayanım İndeksinden Faydalanarak Tehlike Haritası Oluşturulması

Hazard Map Application by Using Geological Strength Index

F. Büyükbaş, B. Dügencili, O. Özyurt

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

ÖZET: Yeraltı kömür madenciliğinde güvenli ve sürdürülebilir çalışma ortamının sağlanabilmesi için ortam koşullarının güvenliği büyük önem arz etmektedir. Galerilerin ilk açıldığı andan itibaren üretimin sonuna kadar bozulmadan durması, çalışma alan güvenliğinin sağlanmasının yanı sıra iş gücünden de tasarruf edilmesine yardımcı olur. Galeri açıklıklarının bozulmadan kalabilmesi için kayaç yapısının iyi analiz edilerek alınan sonuçlara göre tahkimat tasarımı oluşturulmalıdır. Kayaç yapısının analiz edilmesi madencilik faaliyetleri süresince devam etmesi gereken bir eylemdir ve düzenli olarak kayıt altına alınmalıdır. Bu sayede ilerlemeler boyunca hangi formasyonların geçildiği, hangi tahkimat metodunun uygulandığı ve uygulanan tahkimatın geçilen formasyon için uygun olup olmadığı incelenebilir. Yapılan incelemeler sonucunda hangi tehlikelerle ne zaman karşılaşılacağına dair fikir sahibi olunabilir ve zamanında önlemlerle gerekli tedbirler alınabilir. Bu çalışmada Polyak Eynez Yeraltı Linyit İşletmesi'nde jeolojik dayanım indeksinden faydalanarak yeraltını temsil edecek tehlike haritası hazırlanması ve değerlendirilmesi incelenmiştir.

ABSTRACT: Safe ambient conditions are very important for safe and sustainable work environment in underground coal mines. Stable galleries provide efficient use of man power and safe ambient conditions from the start of the first operations to the end of production on the galleries. For stable underground openings, rock formations are analyzed carefully and according to these analysis, proper support systems are formed. Rock formation examinations should be carried out throughout the mine life and these results must be recorded regularly. In this way, along the gallery advance, it is observed that which rock formation is passed, which support system is used and whether correct support system is used according to rock formation or not. Considering the results of these observations, there may be an understanding about which/where dangerous situations will occur and with this, necessary precautions are taken on time. In this study, preparation and evaluation of hazard map by using geological strength index are examined in Polyak Eynez Underground Lignite Mine.

1 GİRİŞ

Madencilikte diğer iş kollarında da olduğu gibi iş sağlığı, güvenliği ve işin sürekliliği önem arz etmektedir. Ancak madencilikte diğer iş kollarından farklı olarak çalışma ortamı sürekli değişiklik göstermektedir ve bu değişiklikler her zaman belirli bir plana göre ilerlememektedir. Yapılan mühendislik çalışmalarıyla, karşılaşılacak çalışma ortamları öngörülmeyle çalışılarak güvenli çalışma ortamları hazırlamak için gerekli tedbirler alınmaktadır. Bu amaçlı yapılan çalışmalardan biri kayaç duraylılığının sağlanmasıdır. Sondaj karot örnekleriyle başlayan bu süreç maden ilerlemesiyle devam etmekte ve maden faaliyetleri sonuna kadar sürmektedir. Gelişen teknoloji ile maden faaliyetleri başlamadan kayaç duraylılığına göre tahkimat tasarımları hazırlanabilmektedir. Maden alanının geneline göre yapılan bu tasarımlar, maden açıklıkları artıkça yapılacak detay çalışmalarla özel amaçlı tasarımlara evrilir. Yapılan

bu çalışmaların uygulanmasının takibi, hangi formasyonda hangi tahkimat sisteminin nasıl tepki verdiğini öğrenmek için önemlidir. Uygulamanın takibi ancak uygulanan tahkimatın ve kayaç yapısının düzenli kayıt altına alınmasıyla mümkün olabilir.

Kayaç yapısının takibi Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ve Kaya Kütle Puanı (RMR) ile yapılabilmektedir. Kayaç yapısının alacağı puanlarla oluşturulan bu takip sonucunda hangi bölgede kayaç yapısının tehlike oluşturduğu kayıt altına alınmış olur. Bu plan bize tehlikeli bölgeleri gösterdiği için tehlike haritası olarak adlandırılmaktadır. Tehlike haritası, maden ilerlemesiyle eş zamanlı olarak oluşturulmaktadır.

Yeraltı kömür madenciliğinde planlanan tahkimat tasarımının uygunluğunun kontrol edilmesinde tehlike haritasının önemli bir payı vardır. Kurulan tahkimatın, tasarlanan tahkimat tasarımına uygun olup olmadığının tespitinin istenmeyen göçükler ya da zamanla oluşan bozulmalar olmadan önce yapılması önemlidir. Bu gibi istenmeyen durumların ortaya çıkmaması için kurulan tahkimatların, tasarlanan tahkimat planı ile uyumluluğu ve kayaç yapısı ile olan uygunluğu sürekli takip edilmelidir. Bu sayede istenmeyen durumlar ortaya çıkmadan önce müdahale edilebilir ve ileride karşılaşılabilecek tehlikelerin önüne geçilebilir.

Bu çalışmada Polyak Eynez Kömür İşletmesinde tehlike haritasının oluşturulması ve tahkimat planına etkisi incelenmiştir.

2 TEHLİKE HARİTASININ OLUŞTURULMASI

Tehlike haritası, maden ilerlemesi sırasında geçilen kayaç yapısının GSI türünden puanlaması ile yapılmaktadır. RMR türünden daha detaylı puanlandırma yapılabildiği için işletmemizde kayaçlar RMR türünde değerlendirildikten sonra GSI cinsinden haritaya işlenmektedir (Eşitlik 1).

$$GSI = RMR - 5 \quad (1)$$

GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi RMR: Kaya Kütle Puanı

2.1 Birincil Alt Başlık Veri Toplama Yöntemi

2.1.1 RMR hesaplaması

RMR sınıflandırmasında (Bieniawski, 1989);

- Kayanın basınç dayanımı,
- Kaya kalite belirteci (RQD),
- Süreksizlikler (açıklığı, durumu, yönelimleri)
- Yeraltı suyu durumuna bakılarak değerlendirme yapılıır.

Kaya basınç dayanımı için analizler sırasında belirlenen ortalama dayanım değerleri esas alınmıştır.

- σ_c (kömür) = 18.79 MPa (RMR puanı = 2)
- σ_c (marn) = 59.4 MPa (RMR puanı = 4 – bozuk formasyon için)
- σ_c (marn) = 59.4 MPa (RMR puanı = 7 – sağlam formasyon için)
- σ_c (kiltaşı) = 18.08 MPa (RMR puanı = 2)

RQD değerinin tespiti için arının durumuna bakılarak değer ataması yapılmaktadır (Şek. 1). Arında, karot örneği alır gibi bir hat belirlenir ve bu hat içerisinde 10cm numune boyunun üzerinde kalacak sağlam kısımlar saptanır. Bu sağlam kısımların arına göre yüzdelik cinsinden ne kadarlık bir kısmı ifade ettiğine bakılır.

Süreksizlikler belirlenirken, süreksizliklerin açıklığına, uzunluğuna, pürüzlülüğüne, dolgu malzemesinin olup olmadığına ve bozulmasına bakılır. Arın kesit boyutlarının belirli olmasından dolayı süreksizlik uzunlukları 20m üstünde kabul edilir ve puanlamada değer

verilmez. Benzer şekilde arında kazı yapılır yapılmaz ölçüm yapılmasından dolayı süreksizliklerin bozulması yok kabul edilir. Süreksizlik açıklığı, dolgu ve pürüz durumları arın durumuna göre değerlendirilir. Şekil 1'deki örnekte dolgu malzemesi ve açıklık yoktur. Süreksizlik aralığı formasyondaki kırılmalara bakılarak 6cm'den düşük olarak değerlendirilir.



Şekil 1. Arında 10cm'den küçük kırıkları içerir alan

Yeraltı su durumu çatlaklardan sızan suyun pozisyonuna göre değerlendirilir. Şekil 1'deki örnekte arın kurudur. Arınlarda düzenli olarak yapılan bu çalışma çizelge 1 doldurularak kayıt altına alınır.

Çizelge 1. RMR tablosunun doldurulması

RMR			
	Derecelendirme	Ölçüm	Puan
1	UCS (Tek Eksenli Basma Dayanımı), MPa	18.08	2
2	RQD (Kaya Kalite Belirteci)	25	3
3	Süreksizlik Aralığı	<6 cm	5
4	Süreksizliklerin Durumu		
4.1	Süreksizliklerin Uzunluğu	+20m	0
4.2	Ayrılma	Yok	6
4.3	Pürüzlülük	Biraz Kaygan	3
4.4	Dolgu	Yok	6
4.5	Bozulma	Yok	6
5	Yeraltı Suyu	Kuru	15
6	Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme Puanı	<10°	-5
TOPLAM			41

2.1.2 Tahkimat Durumu Takibi

Tahkimat kontrolleri yapılırken ilk önce planlanan tahkimat tasarımında olması gereken verilerin kontrolü yapılır. Bunlar; çelik TH tahkimat aralığı, kablo saplama sayısı, püskürtme beton yapılıp yapılmadığı ve kullanılan hasır tel miktarıdır. Bu verilerin dışında arında hangi

formasyonun görüldüğü, kayaçtaki bozulma durumu, metan seviyesi ve arında bozulmayı etkileyen diğer bilgilere yer verilir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Zemin şartları kontrol tablosu

Zemin Şartları Kontrol Tablosu										
Tarih: 3.07.2022				Metre: 382,.00m			Lokasyon: CK 02 ATY			
Arın	Çelik Tahkimat	Kablo Saplama	P.B.* /Tel Hasır	Küçük Akmlar	Yan Duvarlarda Akma Malzeme	Büyük Kamalar/ Kavlaklar	Gerilme Göstergesi (Baskı, v.b)	Diğer (Su,gaz v.b.)	İlerlemede Yüksek Risk	
									E	H
KM 22L	50 cm	3 adet	Yok / Tavanda çift sıra, yanlarda tek sıra	Var	Var	Yok	Var	Su: Kuru Metan: %0,08		X
Risk Durumu:		X	Çalışma için ilerleme güvenli				Çalışma için ilerleme güvenli değil			
İzleme Gerekli mi?		X	Evet		Hayır		Acil			
<p><u>Diğer tehlikeler veya notlar:</u> Arında K25B fay geçişi görülmüştür. Formasyonun yapısından kaynaklı dökülme tespit edilmiştir. Sol duvarın üst kısmında yaklaşık 1-2m boşluk gözlemlenmiştir. Sağ duvar üzerinde küçük boşluk görülmüştür.</p>										
GSI		36	RMR	41		Hazırlayan: Onur Özyurt				

*P.B.: Püskürtme Beton

2.1.3 Tehlike Haritasının Oluşturulması

Her galeride haftada en az 2 inceleme yapılmaktadır. Yeraltında tektonik arızaların yoğun olmasından dolayı haftada bir ölçüm yetersiz kalmaktadır. İnceleme sonucunda 100 üzerinden verilen GSI puanı 4 ayrı seviyeye indirgenir. Çizelge 3'te kusur seviyesinin GSI değerlerine göre dağılımı verilmektedir. Kusur seviyesi hazırlanırken formasyon ayrımı yapılmaksızın aynı GSI aralıkları için aynı renk dağılımı kullanılmıştır. Bunun başlıca sebebi GSI sınıflandırmasının kayaç yapısını temsil etmesidir.

Çizelge 3. Kusur seviyesi ve GSI ilişkisi

Kusur seviyesi	Şartlar
Yeşil seviye	60<GSI
Sarı seviye	50<GSI<60
Turuncu seviye	30<GSI<50
Kırmızı seviye	GSI<30

GSI değerleri kayaçların dayanım indekslerini belirtmektedir. Dolayısıyla yeşil seviyeden kırmızı seviyeye doğru indikçe kayaç yapısı bozulmaktadır. Alt seviyelerde tahkimatların daha sağlam yapılması gerekmektedir. Zayıf yapılan tahkimatlar, kırmızı ve turuncu seviyelerde ilerleme yapıldıkça bozulma ihtimalinin yüksek olduğunu simgeler.

Saha çalışmaları sonucunda mühendislik ve yapısal jeoloji çalışmaları ile elde edilmiş olan sahaya ait tektonik fay haritası, hidrojeoloji ve gaz geliri tahmin planlarına dayalı olarak, planlamada gerçekleştirilmiş pano hazırlık ve pano içi galerilere ait hazırlık planında eldeki mevcut verilere dayalı kritik lokasyonların önceden kestirilmesi sonucu üretilmiş tabaka kontrolüne dayalı tehlike haritası oluşturulması gerekmektedir, (Onrgan, 2022).

İlerleme yapıldıkça kusur seviyeleri harita üzerine işlenerek plan üzerinde bozuk yapılar ve tehlike oluşturabilecek bölgeler belirlenir (Şek. 2). Oluşturulan bu bölgeler haftalık raporlamaya işlenir. Bölgeler jeoteknik yönden incelenerek haftalık bazda raporlanmaktadır.



Şekil 2. Tehlike haritası

3 HAFTALIK RAPORLAMA

Arınlarda yapılan incelemelerin ardından toplanan bilgilerin derlenip tek bir raporda sunulması gerekmektedir. Rapor formatında, hafta içinde yapılan tahkimat çalışmalarının yeterli seviyede olup olmadığı incelenmekte ve ardından gelecek ilerleme planında nelere dikkat edilmesi gerektiği belirtilmektedir (Çiz. 4 ve Çiz. 5).

Çizelge 4. Haftalık raporda tahkimat ve GSI bilgilerini içerir tablo

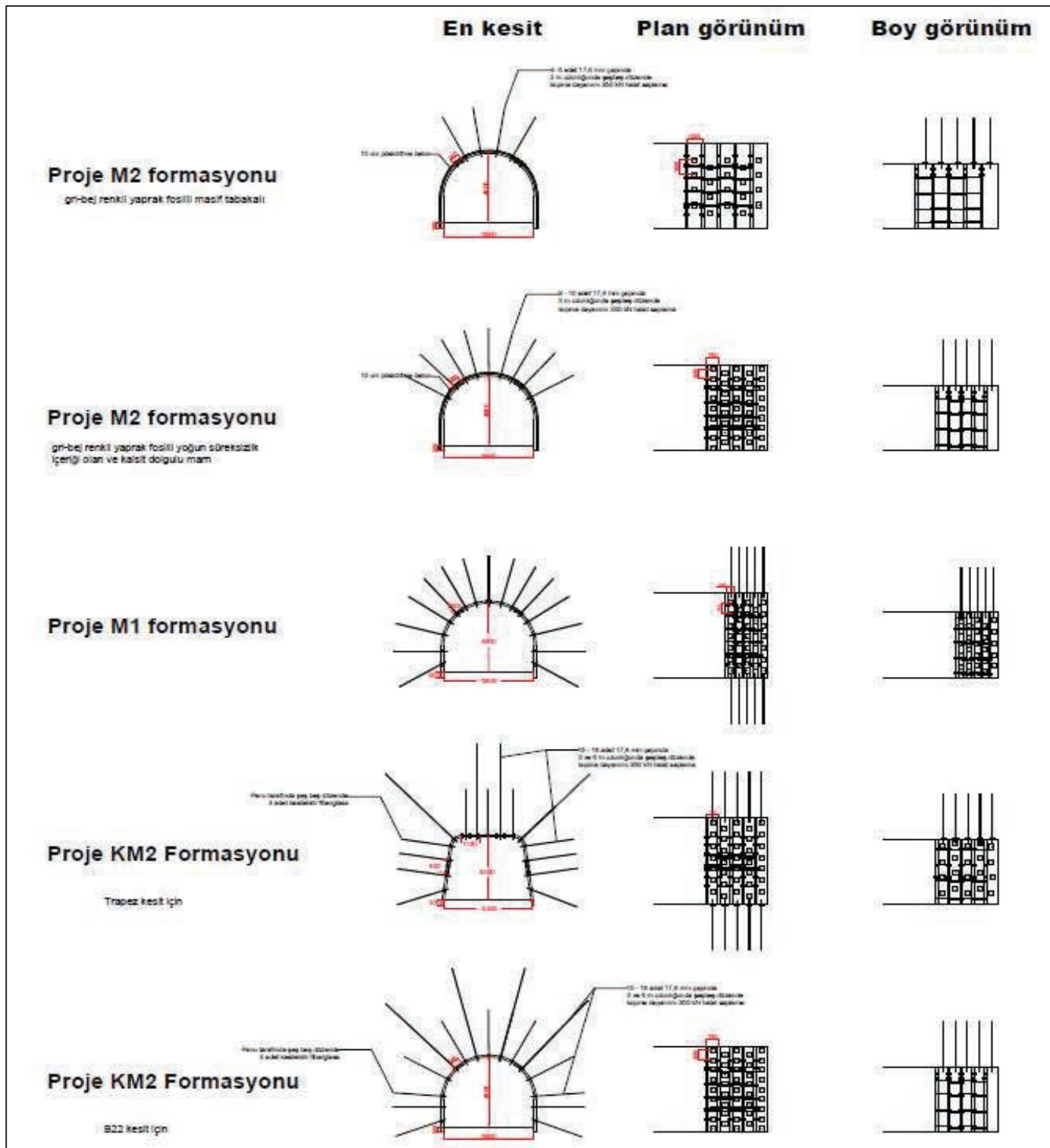
Ölçüm Tarihi	Pano Adı	Galeri Adı	Arın	Açıklık Metraj	Kontrol Unsurları				GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi)
					Tahkimat Durumu	Yenilme Durumu	Gaz Durumu	Su Durumu	
3.07.2022	CK	CK 02 ATY	KM22L	382 m	<p>Halat saplama: 3 adet</p> <p>Celik Hasır: Tavanda 2, yanlarda 1 sıra</p> <p>P.B.*: Yok</p>	Arında büyük parçalar halinde dökülmeler mevcut. 2m'yi bulan boşluklar vardır.	Metan: %0,08	Kuru	30<GSI<50

*P.B.: Püskürtme Beton

Çizelge 5. Haftalık raporda galeride gözlemlenen bozulmalar ve ilerleme planı

Ölçüm Tarihi	Pano Adı	Galeri Adı	Arın Formasyonu	Açıklık Metraj	Açıklama	İlerleme Planı
3.07.2022	CK	CK 02 ATY	KM22L	382 m	<p>Arında K25B fay geçişi görülmüştür. Formasyonun yapısından kaynaklı dökülme görüldü. Sol duvarın üst kısmında yaklaşık 1-2m boşluk gözlemlendi. Sağ tarafın üst kısımlarında küçük boşluk görüldü. KM2 formasyonuna uygun tahkimat yapılmamaktadır.</p>	Yakın mesafede yüksek atımlı fay beklenmemektedir. KM2 formasyonun alt kısımlarında ilerleme yapılmasından dolayı baskı ve vurma beklenmektedir. KM2 formasyonuna uygun tahkimat yapılmalıdır.

Çizelge 4 ve Çizelge 5'e ek olarak haftalık raporda tahkimat tasarımları da belirtilerek (Şek. 3) hatalı ya da eksik uygulamaların tespiti yapılabilir. Ayrıca tasarıma uygun yapılan tahkimatların da galeride bozulmanın önüne geçip geçmediğinin kontrolü yapılabilmektedir.



Şekil 3. Tahkimat tasarımı

4 TEHLİKE HARİTASI İLE KAYAÇ ÇEŞİDİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ

Kasım 2020’de arınlarda kayaç takibine ve Şubat 2021’de tehlike haritası uygulamasına başlandı. Bu süreçte, hazırlık galerilerinde geçilen kıltaşı (M1 formasyonu), kömür (KM2 formasyonu) ve marn (M2 formasyonu) yapıları incelendiğinde aynı GSI değerine sahip olsalar da baskı altında farklı davranış gerçekleştirmektedirler.

Turuncu seviye M1 formasyonu için taban kabarmalarının başladığı seviyedir. Turuncu seviyede, galeri ilk açıldığı dönemde görünen irili ufaklı dökülmeler zamanla hasır tellerin aralarında dökülmeye başlamaktadır. Kırmızı seviye genel olarak faylı M1 formasyonlarında

görünmekte ve tahkimatlarda bozulmalara sebep olmaktadır. Kırmızı seviyede tamir tarama çalışmalarına turuncu seviyeden daha erken ihtiyaç duyulmaktadır.

Turuncu seviye KM2 formasyonu için de taban kabarmalarının başladığı seviyedir. KM2 formasyonunda bulunan seviye de taban kabarmasına etki etmektedir. Aynı GSI değerine sahip galerilerde, KM2 tabanında yapılan ilerlemeler KM2 tavanında yapılan ilerlemelere göre daha fazla baskıya maruz kalmaktadır. KM2 tabanında yapılan ilerlemelerde turuncu kusur seviyesinden başlayarak tamir tarama ihtiyacı oluşmaktadır. İrili ufaklı dökülmeler hasır tellerin arasından dökülme de açılan boşluklar kömürün oksidasyonunu tetiklemektedir.

M2 formasyonunda turuncu seviyede ölçüm alınan tarih aralığında taban kabarmasına ihtiyaç duyulacak herhangi bir deformasyon oluşmamıştır. Kırmızı seviyede tavandan kavlak düşmeleri başlamaktadır.

5 SONUÇLAR

Yeraltı şartlarında, arınlarda ilerleme sırasında yapılan incelemelerin tekrar yapılması çoğu zaman mümkün değildir. Aynı bölgede püskürtme beton yapılmış olabilir ya da akan malzeme sonucunda yan kayaçlar görünmeyebilir. Bu sebepten dolayı ilk yapılan incelemenin doğru olması ve kayıt altına alınması büyük önem arz etmektedir.

Bir bölgede yapılan tarama, taramaya sebep olan durum bilinmeden yapılırsa ileriki zamanlarda tekrar tarama yapılmasına sebep olabilir. Galerideki bozulmanın sebebi, baskı ve gerilmelerin fazla olmasından kaynaklı ise tarama sonrası aynı tahkimat sisteminin kurulması hataya yol açacaktır. Benzer şekilde galeride tamir taramaya sebep olan durumla başka bir arında karşılaşılması durumunda tahkimat düzeni eskiye göre iyileştirilerek yapılmalıdır.

Tahkimatların, kayaçların durumuna göre verdiği tepkiyi analiz etmek için taban yollarına çelik TH tahkimatların üzerine deformasyon ölçüm istasyonları kurulmuştur. Ancak kurulan istasyonların üzerine püskürtme beton yapılması, çelik TH tahkimatlarda tamir tarama yapılması ve baskının ve taban kabarmasının galeri kesitini daraltmasından dolayı ölçüm noktalarından veri alınamaz duruma gelmektedir. Veri alımlarının düzenli olmamasına sebep olan bu gibi durumlardan dolayı hangi formasyonda tahkimatın nasıl bir bozulma gösterdiği şimdilik incelenememektedir. Tahkimat tasarımının belirlenmesine katkı sağlayacak olan deformasyon ölçümleri maalesef çoğu zaman sekteye uğramıştır. Daha etkili ölçüm metotları geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- Bieniawski, Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.
- Onargan, T. 2020. Polyak Eynez A.Ş. – Kınık / Elmadere Yeraltı Kömür Madeni Hazırlık Galerilerinin Açılması Çalışmaları Hakkında Bilimsel ve Teknik Görüş Raporu, Döner Sermaye Danışmanlık Hizmeti Protokolü, İzmir.
- Onargan, T. 2022. Yeraltı Kömür Madencilğinde Tabaka Kontrolü Yöntemi Modeli, Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Isparta
- Onargan, T., Deliormanlı, A.H., Gönen, A. ve Özdoğan M.V. 2020. Polyak Eynez Yeraltı Kömür Madeni Yeraltı Açıklıklarında Kullanılan Destek (Tahkimat) Sistemlerinin Duraylılığının Araştırılması Ve Uygun Destek Sisteminin Geliştirilmesi Projesi. D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, Döner Sermaye Projesi, Proje No: MDN.PRJ.20.A04, İzmir.
- Ünver, B., 2018. Kömür Madencilğinde Tabaka Hareketleri Kaynaklı Sorunlar. KAYAMEK'2018- 12. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu / ROCKMEC'2018-12th. Çağrılı Bildiri, Bildiriler Kitabı, Sayfa 403-421, Trabzon.

Metro-Tünel Sektöründe Çalışanların Mesleki Olarak Belgelendirilmesi ve Meslek Standartları

Professional Certification and Occupational Standards of Employees in the Metro-Tunnel Sector

S. Akyıldız

Soner Temel Mühendislik A.Ş.

ÖZET: Mevzuat gereği, çalışanların mesleki olarak belgelendirilmeleri zorunluluğu kapsamında Tünelcilik Derneği öncülüğünde sektör bileşenlerinin de destekleriyle Tünel Meslek Standartları hazırlama Komisyonu oluşturularak 2017 yılı itibariyle çalışmalar başlatılır. süreç içinde sektöre yönelik olarak hazırlanan 4 adet Ulusal Meslek Standardı (UMS) 25 Ağustos 2019 tarihinde Resmi Gazetede yayınlanarak yürürlüğe girer. Hazırlanan bu UMS'lerin ardından komisyon bireylerin nasıl bir ölçme ve değerlendirme sürecine tabi tutulacağına, başarı ve belgelendirme şartlarına ilişkin unsurları içeren Ulusal Yeterlilikler (UY) hazırlama sürecini başlatır ve 27.10.2021 tarihinde MYK internet sitesi ve Web Portalı'nda yayınlanarak yürürlüğe girerek sektörel belgelendirmenin altyapısı tamamlanır.

ABSTRACT: Bildiri As per the legislation, the Tunneling Occupational Standards Preparation Commission is established under the leadership of the Tunneling Association, with the support of the industry components, and studies are started as of 2017. 4 National Occupational Standards (UMS) prepared for the sector in the process come into effect by being published in the Official Gazette on August 25, 2019. After these prepared IAS's, the commission starts the preparation process of National Qualifications (NQ), which includes elements related to how individuals will be subjected to a measurement and evaluation process, success and certification conditions, and it was published on the VQA website and Web Portal on 27.10. infrastructure is completed.

1 GİRİŞ

Özellikle 2000'li yılların başında yoğun çalışma temposuna giren tersanelerde yaşanan ve kamuoyunun da dikkatini çeken ölümlü iş kazalarının önlenmesine yönelik Çalışma Bakanlığınca yapılan araştırma ve denetimleri sonucunda kazaların önemli bir sebebinin pek çok faktörün yanı sıra, eleman açığını kapatmak için, yapacağı işle ilgili hiçbir bilgisi ve deneyimi olmayan insanların adete kahvehanelerden toplanarak istihdam edilmesiydi. Bunun üzerine Bakanlık 26 Mayıs 2008 tarih ve 26887 sayılı 5763 İş Kanunu ve Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılması Hakkında Kanun la 4857 sayılı İş Kanununun 85. Maddesini "Onaltı yaşını doldurmamış genç işçiler ve çocuklar ile "ile çalıştığı işle ilgili mesleki eğitim almamış işçiler ağır ve tehlikeli işlerde çalıştırılmaz." şeklinde değişikliğe gitmişti. Bu tarih itibariyle "belgeli çalışan" istihdamı zorunluluğu iş hayatına fiili olarak girmiş oldu. Bunun üzerine 2017 yılında Tünelcilik Derneği koordinasyonunda sektör bileşenleri bir araya gelerek bir Meslek Standardı

ve Yeterliliği Hazırlama Komisyonu oluşturarak çalışmalara başladı ve geçen süreç içinde sektöre yönelik dört adet standart ve yeterlilik hazırlayarak yürürlüğe girmesini sağladı. 2022 yılı itibariyle Maden Mühendisleri Odası Mesleki Yeterlilik Birimi maden sektörünün yanısıra metro-tünel sektörü için hazırlanan bu dört standart için de belgelendirme yetkisi alma çalışmalarını başlattı.

2 SÜRECİN GELİŞİMİ

İş dünyasındaki global gelişmeler ve AB müktesebat Uyum Süreci'nin de etkisiyle 7 Ekim 2006 tarihli, 26312 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe giren "5544 sayılı Meslekî Yeterlilik Kurumu Kanunu" ile; tabiplik, diş hekimliği, hemşirelik, ebelik, eczacılık, veterinerlik, mühendislik ve mimarlık meslekleri ile en az lisans düzeyinde öğrenimi gerektiren ve mesleğe giriş şartları kanunla düzenlenmiş olan meslekler kanun kapsamı dışına bırakılarak "ulusal ve uluslararası meslek standartlarını temel alarak, teknik ve meslekî alanlarda ulusal yeterliliklerin esaslarını belirlemek; denetim, ölçme ve değerlendirme, belgelendirme ve sertifikalandırmaya ilişkin faaliyetleri yürütmek için gerekli ulusal yeterlilik sistemini kurmak ve işletmek üzere Meslekî Yeterlilik Kurumu'nun kurulması ile Türkiye Yeterlilikler Çerçevesi'yle ilgili hususların düzenlenmesini sağlamak" amacıyla tüm sektörlerde, uluslararası geçerliliği olan meslek standardı ve yeterlilikler hazırlama ve belgelendirme süreci başlatılmış, peyderpey yayınlanan tebliğlerle kapsamı giderek genişletilen bir uygulamaya geçilmiştir.

2.1 Ulusal Mesleki Yeterlilik Sistemi (UMYS) Nedir?

Ulusal Mesleki Yeterlilik Sistemi; ulusal meslek standartlarının oluşturulduğu, mesleki ve teknik eğitim ve öğretim programlarının bu standartlara göre hazırlandığı, işgücünün mesleki yeterliliğinin akredite olmuş ve MYK tarafından yetkilendirilmiş kuruluşlarca ölçme ve değerlendirme merkezlerinde yapılan teorik ve uygulamalı sınavlar sonucunda belgelendirildiği, alınan belgelerin ulusal ve uluslararası düzeyde kıyaslanabilirliğinin sağlandığı, hayat boyu öğrenmenin desteklendiği, formel (örgün) eğitim almadan mesleği öğrenen kişilere bilgi ve becerilerini belgelendirme imkanının verildiği, kalite güvencesinin sağlandığı, adil, şeffaf ve güvenilir bir sistemdir.

2.2 Mesleki Yeterlilik Kurumu'nun (MYK) Sistemdeki Rolü Nedir?

Bu sistemde koordinasyon MYK tarafından sağlanmakta, MYK sistemde izleme, değerlendirme, görevlendirme ve yetkilendirme görevlerini üstlenmektedir. Kurumun faaliyet alanı eğitim ve istihdam kesimini birlikte ilgilendirdiğinden bütün karar süreçlerinde de ilgili sosyal tarafların katkılarının esas alındığı bir yaklaşım benimsenmiştir.

Ulusal Mesleki Yeterlilik Sistemi'nin bileşenleri olan ulusal meslek standartları ve ulusal yeterlilikler; sektörlere ve mesleklere ilişkin yetkinliği ve temsil gücü olan ve MYK tarafından yetkilendirilmiş kamu kurum/kuruluşları, işçi, işveren, meslek örgütleri ve sivil toplum örgütleri tarafından iş dünyasının ihtiyaçları ve geleceğe dönük eğilimleri ile eğitim dünyası ve diğer sosyal tarafların katkılarının esas alınması suretiyle hazırlanmaktadır. Ulusal meslek standartlarının hazırlanması, sınav ve belgelendirme sürecinde ölçme ve değerlendirmeyi sağlayacak ulusal yeterliliklerin hazırlanmasında temel girdi oluşturmaktadır. Sınav ve belgelendirme süreci de MYK'nın gözetimi ve denetimi altında gerçekleştirilmektedir. Belgelendirilmek istenilen yeterliliklerde TÜRKAK ya da Avrupa Akreditasyon Birliği ile çok taraflı tanıma anlaşması imzalamış akreditasyon kurumlarından TS EN ISO/IEC 17024 (Uygunluk Değerlendirmesi - Personel Belgelendirmesi Yapan Kuruluşlar İçin Genel Şartlar) standardına uygun oluşturulmuş sistem dâhilinde akredite edilmiş belgelendirme kuruluşları

MYK tarafından yetkilendirilerek bu kuruluşların yaptığı sınavlarda başarılı olanlara MYK belgelerinin verilmesi sağlanmaktadır.

2.3 Ulusal Meslek Standardı Nedir?

Ulusal Meslek Standardı (UMS) bir mesleğin başarı ile icra edilebilmesi için Mesleki Yeterlilik Kurumu tarafından kabul edilen gerekli bilgi, beceri, tavır ve tutumların neler olduğunu gösteren asgari normdur.

2.4 Ulusal Yeterlilik Nedir?

Ulusal ya da uluslararası meslek standartları temel alınarak hazırlanan;

- Öğrenme, ölçme, değerlendirme amacıyla kullanılan,
- Bireyin mesleğini başarı ile icra etmesi için sahip olmaları gereken bilgi, beceri ve yetkinlikler ile bu bilgi, beceri ve yetkinlikleri kanıtlamaları için nasıl bir ölçme ve değerlendirme sürecinden geçmeleri gerektiğini açıklayan,
- MYK tarafından onaylanarak yürürlüğe giren teknik dokümanlardır.

2.5 Ulusal Meslek Standartları ve Ulusal Yeterlilikler Arasındaki Temel Fark Nedir?

Ulusal meslek standartları (UMS); bir mesleğin başarı ile icra edilebilmesi için gerekli bilgi, beceri, tavır ve tutumların neler olduğunu tanımlamakta bir diğer ifade ile mesleklerin profilini ortaya koymaktadır. Ulusal yeterlilikler ise, meslek standartlarını temel alarak geliştirilmekte ve ilgili ulusal yeterlilikte MYK Mesleki Yeterlilik Belgesi sahibi olmak isteyen bireylerin nasıl bir ölçme ve değerlendirme sürecine tabi tutulacağına, başarı ve belgelendirme şartlarına ilişkin unsurları içermektedir.

Ulusal yeterlilikler ile uyumlu ölçme, değerlendirme ve belgelendirme faaliyetleri MYK tarafından yetkilendirilmiş belgelendirme kuruluşlarınca gerçekleştirilmektedir. Yapılan sınavlar sonucu başarılı olan bireylere MYK Mesleki Yeterlilik Belgesi verilmektedir.

3 ÇOK TEHLİKELİ İŞLER İÇİN BELGE ZORUNLULUĞU

26 Aralık 2012 tarihli ve 28509 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanarak yürürlüğe giren “İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği” ne göre; “Yapı İşleri” kapsamında olan metro-tünel faaliyetleri, “çok tehlikeli” işler sınıfına girip, istihdam edilen bütün çalışanların yaptıkları işle ilgili meslek belgesi olması zorunluluğu getirilmiştir. 4 Nisan 2015 tarihli ve 6645 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile Bazı Kanun ve Kanun Hükmünde Kararnamelerde Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun kapsamında, ülkemizde tehlikeli ve çok tehlikeli mesleklerde çalışanların MYK Mesleki Yeterlilik Belgesi’ne sahip olması zorunlu hale getirilmiş, ülkemizde verilecek tüm mesleki ve teknik eğitimin MYK tarafından yayımlanan Ulusal Meslek Standartlarına (UMS) göre verilmesi yasal zorunluluk haline getirilmiştir.

4 METRO-TÜNEL SEKTÖRÜNDE DURUM

Bir mesleğin başarı ile icra edilebilmesi için MYK tarafından kabul edilen gerekli bilgi, beceri, tavır ve tutumların neler olduğunu gösteren asgari norm olan Ulusal Meslek Standardı (UMS) “Çok tehlikeli” risk grubunda bulunan Tünelcilik Sektörü çalışanlarına yönelik ‘Mesleki Yeterlilik Belgesi’ zorunluluğu için öncelikle standart ve yeterliliklerin oluşturulmasını gerektiriyordu.

Bu amaçla Tünelcilik Derneği, 2017 yılı Mart ayında konuyu Yönetim Kurulu’nda

değerlendirmiş ve sektör ile ilgili bazı meslek ve iş tanımlamalarının yapılması için bir Çalışma Grubu oluşturmak ve MYK'ya başvuru yapmak için karar almıştır. İlk olarak 19 Temmuz 2017 tarihinde MYK tarafından "Çalışma Grubu"na yönelik izlenecek yolla ilgili bir bilgilendirme toplantısı yapılmıştır.

Daha sonra MYK tarafından atanan Tolga Çulha moderatörlüğünde, İTÜ Maden Fakültesi Öğretim Görevlisi ve Tünelciler Derneği Başkan Yardımcısı Prof. Dr. Hanifi Çopur, uzun yıllar sektörde üst düzey pozisyonlarda görev yapmış Jeoloji Mühendisi Turgay Özat, Jeoloji Mühendisi Cehdi Yıldırım, İnşaat Mühendisi Engin Ünver, Maden Mühendisi ve A Sınıfı İş Güvenliği Uzmanın Selim Akyıldız, Maden Mühendisi Erdi Yılmaz'dan oluşan Çalışma Grubu tarafından hazırlanan;

- Tünel İşçisi Seviye 3
- Tünel İşçisi Seviye 4
- Tünel Delgi Makinesi Operatörü Seviye 3
- Püskürtme Beton Makinesi (Shotcrete) Operatörü Seviye 3

4 adet Meslek Standardı 25 Ağustos 2019 tarihinde Resmi Gazetede yayınlanarak yürürlüğe girer. Sürecin tamamlanması için her standardın bir de Ulusal Yeterliliği'nin (UY) benzer şekilde hazırlanıp, yayınlanması gerekmektedir. Bu amaçla daha önce yayınlanmış dört adet meslek standardı için oluşturulan MYK'dan Tolga Çulha moderatörlüğü'ndeki gruba Tünel İşçisi/Formen Hüsnü Ay, Rakim Karataş, Tünel Delgi Makinası Operatörü Adnan Acar, Püskürtme Beton Makinesi Operatörü Süleyman Karakabak'ın da katılımı sağlanarak yayınlanan standartların Ulusal Yeterliliklerinin hazırlanması çalışmaları başlatılır.

Çalışma Grubu; 27 Kasım 2019 ile 17 Ocak 2020 tarihleri arasında dört adet çalıştay yaparak Yeterliliklerin ön taslaklarını oluşturur. Sektör bileşenlerinden görüş alma süreci ve pilot uygulama sonuçları ve görüşler doğrultusunda revize edilen taslak yeterlilikler tüm ekleri ve varsa seviye karşılaştırma tabloları ile birlikte MYK ilgili sektör komitesinin görüşüne sunulur. Ardından MYK Sektör Komitesi'nin önerileri doğrultusunda son hali verilerek Meslek Standartları Dairesi tarafından MYK Yönetim Kurulu onayına sunulur. MYK Yönetim Kurulu tarafından onaylanan taslaklar, ulusal yeterlilik niteliği kazanır ve yeterliliğe özgü referans kodu ile birlikte 27.10.2021 tarihinde MYK internet sitesinde ve MYK Web Portalı'nda yayınlanarak yürürlüğe girerek sektörel belgelendirmenin altyapısı tamamlanır.

Hazırlanan dört adet Standart ve Yeterlilik sektörel belgelendirmede yeterli olup, henüz bir zorunluluk olmamakla birlikte Maden Mühendisleri Odası tarafından yetkilendirilme süreci başlatılmıştır ve bu amaçla Haziran 2022 tarihinde bir deneme sınavı yapılmış olup süreç halen devam etmektedir.

5 SEKTÖRDE BELGE ZORUNLULUĞU GETİRİLEN MESLEKLER

Sektörde halen İnşaat, Maden, Metal, Elektrik Elektronik, Enerji, Makine, Otomotiv, Ulaştırma, Lojistik ve Haberleşme iş kollarından

- Alçı Sıva Uygulayıcısı (12UY0055-3, S3)
- Betonarme Demircisi (11UY0012-3, S3)
- Betoncu (12UY0049-3, S3)
- Çelik Kaynakçısı (11UY0010-3, S3)
- Duvarcı (12UY0048-3, S3)
- Elektrik Pano Montajcısı (12UY0075-3-4, S3-S4)
- Elektrik Sayacı Sökme/Takma Elemanı (17UY0279-4, S4)
- Elektrik Tesisatçısı (15UY0241-3-4, S3-S4)
- Endüstriyel Boru Montajcısı (11UY0013-3, S3)
- İnşaat İşçisi (16UY0253-2, S2)
- İskele Kurulum Elemanı (12UY0056-3, S3)
- İşletme Elektrik Bakımcısı (13UY0121-5, S5)

- Köprülü Vinç Operatörü (15UY0205-3, S3)
- Makine Bakımcı (10UY0002-3-4, S3-S4)
- Mekanize Kazı Operatörü (18UY0364-4, S4)
- Otomotiv Elektrikçisi (11UY0019-4, S4)
- Otomotiv Mekanikçisi (11UY0021-4, S4)
- Panel Kalıpcı (12UY0050-3, S3)
- Seramik Karo Kaplamacısı (12UY0051-3, S3)
- Sıvacı (11UY0024-3, S3)
- Su Yalıtımcısı (12UY0058-3, S3)
- Tornacı (15UY0227-3, S3)

Oluşan toplam 22 meslek, Mesleki Yeterlilik Belgesi zorunluluğu kapsamındadır.

Öte yandan MYK tarafından yayınlanan zorunlu meslekler kapsamında olmayıp, sektörde istihdam edilen Tünel İşçisi, Püskürtme Beton Makinesi Operatörü, Tünel Delgi Makinesi Operatörü, İş Makinesi Operatörü, İş Makinesi Yağcısı, Transmikser Operatörü, Beton Pompa Operatörü, Şenör, Topograf Yardımcısı, Tesisatçı, Depo Sorumlusu, Çay-Servis Elemanı, Temizlikçi, Puantör vb. mavi yakalı çalışanların MEB onaylı eğitim ve kurslara katılarak belgelendirilmelerinin sağlanması gerekiyor. Bu kapsamda alınmış olan alanıyla ilgili Meslek Lisesi Diplomaları, Halk Eğitim Merkezlerinden alınmış Ustalık Belgeleri ile diğer resmî ve özel kurum ve kuruluşlar, belediyeler, meslek kuruluşları, dernekler, vakıflar ve gönüllü kuruluşlarca Millî Eğitim Bakanlığına bağlı hayat boyu öğrenme kurumlarının iş birliğinde ve özel öğretim kurumları mevzuatı dışında açılacak kurslarda ve ayrıca MEB tarafından yetkilendirilmiş özel özel öğretim kurumları tarafından organize edilen eğitim ve kurslarda alınan tüm belgeler MYK Belgesi zorunluluğu getirilene kadar geçerliliğini korumaktadır.

6 SONUÇ

Şüphesiz ki, sektörde var olan tüm alanlarda yeterli bilgi ve beceri sahibi kişilerin istihdam edilmesi, gerek üretimin kalitesi ve gerekse iş güvenliği ve çevreye daha bilinçli yaklaşan çalışan profili anlamına da gelmektedir. Bu durum elbette üretimde verimlilik ve kalite anlamına geldiği gibi daha az iş kazası ve çevre sorunları yaşanmasını da beraberinde getirecek. Bu da rekabet etmede de karşılığını bulacak, daha kaliteli ve güvenli üretimin ekonomik kazançlarının yanısıra, moral değerlerde yükselme ve kurum ve yöneticilerin sıkıntılı hukuki süreçler ve idari yaptırımlarla karşılaşmalarını önleyecektir.

KAYNAKLAR

MYK Web Sitesi

4857 sayılı İş Kanunu, 10/06/2003 tarih, 25134 sayılı R.G.

5763 İş Kanunu ve Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılması Hakkında Kanun, 26/05/2008 tarih, 26887 sayılı R.G.

5544 sayılı Meslekî Yeterlilik Kurumu Kanunu, 7/10/2006 tarih, 26312 sayılı R.G

TS EN ISO/IEC 17024

6645 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile Bazı Kanun ve Kanun Hükmünde Kararnamelerde Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun, 23/04/2015 tarih ve 29335 sayılı R.G.

İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği, 26/12/2012 tarih ve 28509 sayılı R.G.

25 Ağustos 2019 tarih, Resmi Gazetede

Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metro Projesi Sultanbeyli İstasyonu NATM Tünellerinde Havalandırma Uygulamaları, Yaşanan Problemler ve Çözüm Önerileri

Ventilation Applications, Problems and Solution Suggestions in Sultanbeyli Station NATM Tunnels at Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Subway Project

A. Terziöz

Doğuş İnşaat ve Ticaret A.Ş., İstanbul

ÖZET: Bu çalışmada, Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Metro Projesi Sultanbeyli İstasyonu NATM Şantiyesi ve ana hat kuyruk tünelleri boyunca tünel içerisinde dolaşan temiz havanın yeterli seviyede olup olmadığı ve uygulanmakta olan havalandırma yöntemi incelenmiştir. Bu kapsamda Sultanbeyli İstasyonu NATM tünelleri kazı-destekleme imalatları yapılmakta olan Hat-1 İleri A, Hat-1 Geri A, P1 (Peron) tünelleri ve peron tünelleri arasında bulunan P2 tünelleri bölgelerindeki havalandırma değerleri üzerinde çalışılmıştır. Çalışma sırasında taşınabilir gaz dedektörleri kullanılmış olup ayrıca dizel motorların egzoz gazlarının oluşturabileceği kirlenmeyi belirleyebilmek için karbonmonoksit gazı ölçülmüştür. Ölçümler belirlenen ana hat kuyruk tünelleri boyunca iş makinesi ve insan çalıştırılan bölgelerde yapılmıştır. Her vardiya çalışılan iş makinesi ve personel sayıları da göz önünde bulundurularak çalışmalar yürütülmüştür. Çalışma sonunda belirli hesaplamalar ışığında kanaat ve önerilere yer verilmiştir.

ABSTRACT: At this work, it has been checked that was the clean air at sufficient level and the ventilation way going along Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Subway Project Sultanbeyli Station NATM building site and main line tail tunnels. In this context we have been working on ventilation values in Sultanbeyli Station NATM tunnels in the P2 tunnels and located between the line-1 forward A, line-1 reverse A, P1 (Platform) tunnels which has been support productions. During works portable gas detectors are being used moreover carbon monoxide gas was measured in order to determine the pollution that may be caused by the exhaust gases of diesel engines. The measurements were made along the designated main line tail tunnels in areas wear heavy machinery and people are employed. The Works were carried out taking into account the number of work machines and personnel worked in each shift. At the end of the study, opinions and suggestions are given based on certain calculations.

1 GİRİŞ

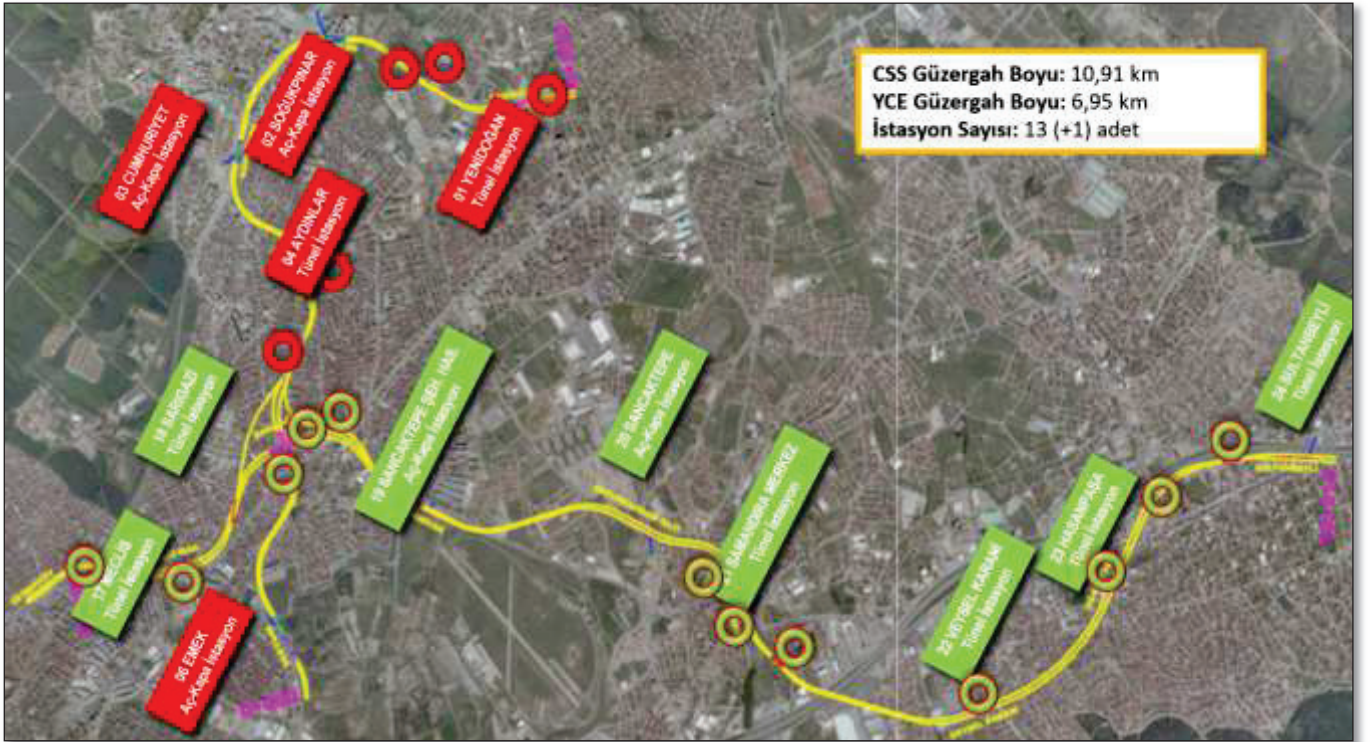
Yeraltı kazılarında havalandırma, güvenli ve sağlıklı çalışma koşullarını oluşturabilmek için açıklıklara yeterli miktar ve özelliklerde havanın gönderilmesi olarak tanımlanmaktadır. Yeraltına gönderilen havanın amacı, oksijen gereksiniminin karşılanması, yayılan zehirli, patlayıcı ve boğucu gazlar ile tozların izin verilen yasal sınırların altına düşürülmesi ve yüksek sıcaklık ile nem sorunlarının önüne geçilmesi olarak özetlenebilmektedir. Söz konusu amaçlara ulaşmak adına planlı bir şekilde nitelik (gaz, toz, sıcaklık ve nem) ve nicelik (hava miktarı ve

dağılımı) kontrollerinin sağlanması ve gerekli aksiyonların hızlı bir şekilde alınması büyük önem taşımaktadır.

Çekmeköy Sancaktepe Sultanbeyli Metro Projesi 03.03.2017 tarihinde İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından Doğu İnşaat ve Ticaret A.Ş. firmasına ihale edilmiş olup, 34 ay inşaat dönemi +24 ay garanti süresi olmak üzere; ilaveten süre uzatımları da göz önünde bulundurulduğunda 2023 yılı içerisinde açılması planlanmaktadır.

Projede uzun hat ve kısa hat olmak üzere iki ana hat ve toplamda 14 adet istasyon bulunmaktadır. Uzun hat: 17.Meclis, 18.Sarıgazi, 19.Sancaktepe Şehir Hastanesi, 20.Sancaktepe, 21.Samandıra Merkez, 22.Veynel Karani, 23.Hasanpaşa, 24.Sultanbeyli kısa hat: 1.Yenidoğan, 2.Soğukpınar, 3.Cumhuriyet, 4.Aydınlar, 5. Sarıgazi, 6.Emek şeklinde isimlendirilmektedir.

Proje kapsamında NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) ve TBM (Tunnel Boring Machine) kullanılarak kazı ve tahkimat çalışmaları yürütülmektedir. (Proje Tanıtım ve Seç Raporu, 2022). Projenin güzergahı ve genel görünümü Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Proje güzergahı

1.1 NATM Kazısı

NATM ile yapılacak olan tünel imalatlarında, öncelikle yaklaşım tüneli veya shaft zemin koşullarına göre gerekli tahkimat sistemiyle açılacak, daha sonra ulaşım tüneline yapılacak hat tünellerine ulaşılabilecektir. Hat tünelleri iş programına uygun olarak belirlenecek ayna sayısına ulaşıp imalatlar tamamlanacaktır. Yapılan iş sırasında öncelik iş güvenliği şartlarına uyarak iş programına uygun hareket ederken, ayna stabilitesinin sağlanması, tüneli ve çevreleyen zemindeki deformasyonların minimuma indirilmesi amaçlanmaktadır.

Yüklenici onayıyla zemin koşullarına göre farklı şekillerde tahkimat sistemleri ve kazı aşamalarıyla kazılar gerçekleştirilmektedir. Belirlenen tahkimat sistemine göre projeye uygun olarak kazı öncesi gerekli tahkimatlar varsa önce uygun makine ve ekipmanlarla bu hazırlıklar yapılmaktadır.

Kazılar projeye uygun olarak aşamalı ya da tek seferde yapılmakta olup, zemin ile püskürtme beton arasında kalabilecek boşlukların, proje düzenine uygun olarak delinecek deliklerin uygun enjeksiyon makinesi ile doldurulmasıyla önüne geçilecektir.

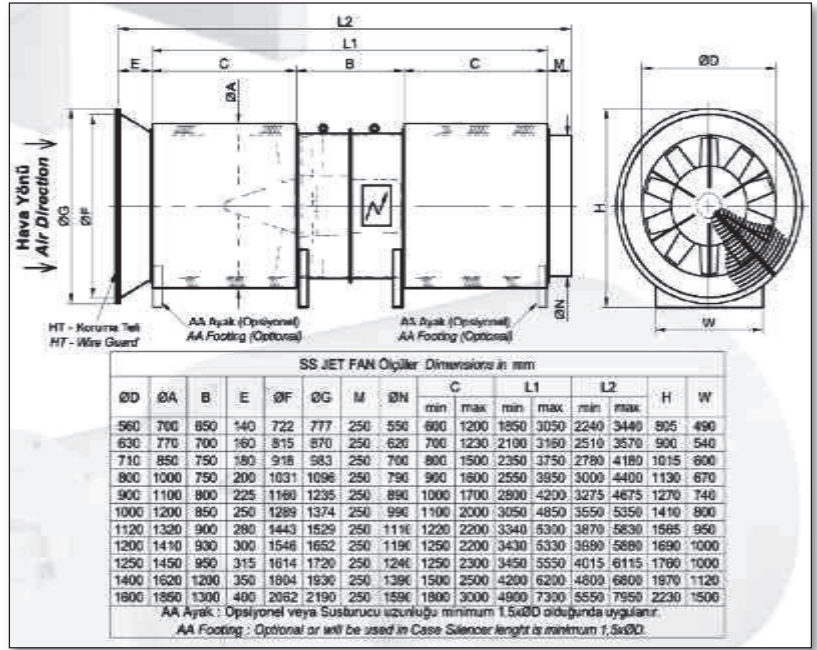
Aynadan çıkan pasa yükleyici ya da kamyon yardımıyla aynadan alınacak, eğer şafttan üretim oluyorsa şaft altından portal vinç veya mobil vinç ile pasa stok sahasına alınacaktır. Buradan da kamyonlar vasıtasıyla döküm sahalarına iletilecektir.

Tünel içi deformasyonlar ve yüzeydeki oturmalar düzenli olarak takip edilecektir.

Tünel içerisinde ayna kesitine ve mesafeye uygun havalandırma sistemi yapılacaktır. Havalandırma sistemi tünel içerisindeki makina egzoz gazı ve çalışmadan kaynaklanacak tozları alacak, çalışan personelin hava ihtiyacını karşılayacaktır (Sağlık ve Güvenlik Planı, 2020).

2 NATM TÜNELLERİNDE MEVCUT HAVALANDIRMA SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

Metro tünellerinde kazı ve tahkimat çalışmalarının yanı sıra havalandırma olmazsa olmaz bir gerekliliktir. Çalışmaya konu olan Sultanbeyli metro istasyon kazılarında havalandırma, jet fan ve vantüplerin kullanıldığı üfleyici sistem ile sağlanmaktadır. Üfleyici sistemde kullanılan fanın yaratmış olduğu basınç farkı ve vantüpler vasıtasıyla temiz hava, tünel aynasına gönderilmekte ve burada kirlenen hava tünel içerisinden çalışma bölgesini terk etmektedir. Çalışma yürütülen tünel kazısında kullanılan fan Emak SS jet fan olup, ISO 5801:2017 standardına ve yatay montaja uygundur. Katalog verilerine göre 90 kW güce sahip olan Emak SS jet fanın kapasitesi 100 m³/sn hava miktarı ve 3000 Pa toplam basınçtır. Kullanılan şaft üzerindeki yerleşimi ve teknik çizimi Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Emak SS jet fan şaft üzerinde konumu ve teknik çizimi

Sultanbeyli istasyonunda yürütülen kazı çalışmalarında uygulanan havalandırma sisteminin incelenmesi amacıyla 7 farklı noktada ölçümler gerçekleştirilmiştir. Personelin sağlığı ve çalışma bölgesinin güvenliğini sağlamak üzere, gönderilmesi gereken hava miktarı farklı gereksinimler hesaba katılarak belirlenmiş ve sonrasında ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2.1 Tünelde Gerçekleştirilen Havalandırma Ölçümleri

Kazı çalışmalarının devam ettiği tünelde mevcut havalandırma sistemini niteliksel ve niceliksel olarak inceleyebilmek adına, farklı noktalardan ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde üzerinde kanatlı anemometre de bulunduran bir çoklu ölçüm cihazı kullanılarak hava hızları;

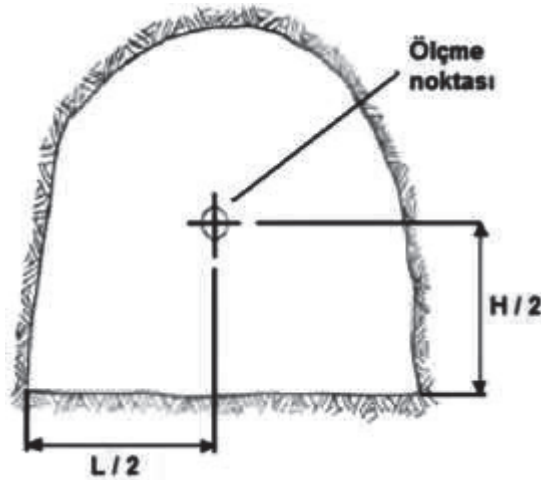
taşınabilir dedektör yardımıyla da sıcaklık, oksijen (O₂) ve karbonmonoksit (CO) konsantrasyonları ölçülmüştür. Ölçümlerde kullanılan cihazlar Şekil 3’te verilmiştir. Kesit alanı ve kesitten geçen ortalama hava hızının çarpılması ile elde edilen hava miktarına ulaşabilmek için ise ölçüm alınan noktalardaki tünel kesitleri AutoCAD programına aktarılmış olan tünel kazı ve anolama planlarından elde edilmiştir.



Şekil 3. Extech çoklu ölçüm ve Honeywell gaz konsantrasyon ölçüm cihazı

Anemometre ile hava hızı ölçümü gerçekleştirilirken tek nokta, bölümlere ayırma veya dolaştırma yöntemi kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemlerin birbirlerine göre farklı avantajları ve dezavantajları olmasına karşılık, sonuç güvenilirliği ve uygulama kolaylığı birlikte göz önüne alındığında, çoğunlukla dolaştırma yöntemi tercih edilmektedir. Ancak, bu çalışmada ölçüm için sınırlı vakit ve imkân bulunduğu için en hızlı sonuç veren yöntem olan “Tek Nokta” yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, tünel kesitinin merkezinde hava hızının maksimum olduğu kabul edilir ve bu merkezden ölçüm alınır (Şekil 4). Anemometre üzerinden okunan bu değer maksimum hava hızı olmakla birlikte, ortalama hava hızı Eşitlik 1 yardımıyla bulunmaktadır.

$$V_{\text{ort}} = V_{\text{mak}} \cdot \varphi \quad (1)$$



Şekil 4. Hava hızı tek nokta ölçüm yöntemi

Tünelde toplamda 7 ayrı noktada ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda CO konsantrasyonunun tünel genelinde sıfır olduğu, O₂ konsantrasyonunun ise hiçbir noktada

%20,9'un altına düşmediği gözlemlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Ölçüm sonuçları

Lokasyon	Kesit (m ²)	Ort. Hava Hızı (m/sn)	Hava Miktarı (m ³ /sn)	Sıcaklık (°C)	O ₂ (%)	CO (ppm)
P2 orta nokta	48	0,8	38,4	16,4	20,9	0
Hat1 geri 4. ano	38,2	0	0	16	20,9	0
Hat1 geri 12. ano	38	0	0	16,8	20,9	0
Hat1 geri 23. ano	38,4	0	0	19	20,9	0
Hat1 geri 30. ano	39	1,5	58,5	23,8	20,9	2
Hat1 geri 33. ano	38,6	1,5	57,9	21,5	20,9	0
Şaft altı P2 girişi	38,2	2,6	99,32	12,8	20,9	0

3 GEREKLİ HAVA MİKTARININ BELİRLENMESİ

Tünele gönderilen temiz hava miktarının, tünelin ihtiyacını karşılayıp karşılamadığı mutlaka kontrol edilmelidir. Yeraltı madenciliği ve tünelcilik çalışmalarında gerekli hava miktarını farklı gereksinimler dikkate alınarak belirlenmektedir (McPherson, 1993). Bunlar;

- ✓ Çalışanların sayısı,
- ✓ Yayılan gaz miktarı,
- ✓ Oluşan toz miktarı,
- ✓ Kullanılan patlayıcı madde miktarı,
- ✓ Dizel motorlu araçlardan yayılan gaz miktarı,
- ✓ Hava hızı limitleri olarak sınıflandırılmaktadır.

Metro kazı çalışmalarında tünele gönderilmesi gereken hava miktarını etkileyen önemli unsurların başında dizel motorlu araçlardan yayılan gaz miktarı ve çalışanların sayısı gelmektedir. Çalışmalar esnasında formasyondan herhangi bir gaz geliri ile karşılaşmadığından ve kazı çalışmaları mekanize olarak gerçekleştirildiğinden yayılan gaz miktarı ve kullanılan patlayıcı madde miktarı hesaplamalara dahil edilmemiştir.

3.1 Çalışanların Sayısı

Havalandırma hesaplarında bir personel için gerekli hava miktarının 0,1 m³/sn olduğu kabul edilmekte ve yeraltı projelerinde bir personel için açıklığa gönderilmesi gereken temiz hava miktarı Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmaktadır (Ayvazoğlu, 1986).

$$Q = 0,1 \times n \quad (2)$$

Burada;

Q : Gerekli temiz hava miktarı (m³/sn),

n : Çalışan personel sayısı'dır.

Tünelde bir vardiyada yaklaşık 35 kişinin çalıştığı bilinmektedir. Buradan, çalışan personel sayısına göre gerekli hava miktarı 3,5 m³/sn olarak bulunmakta ve tünele gönderilen temiz hava miktarının bu ihtiyacı fazlasıyla karşıladığı görülmektedir.

3.2 Dizel Motorlardan Yayılan Gaz Miktarı

Kullanılan ekipmanlarda bulunan dizel motorlarda meydana gelen yanma sonucunda ortaya çıkan kirleticilerin en önemlileri dizel partikül madde (DPM), azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC) ve karbonmonoksit (CO). Gerekli hava miktarını dizel motorlardan yayılan gaz miktarına göre hesaplamaya yönelik çok sayıda yaklaşım bulunsa da bunlardan en kullanışlı ve basit olanı dizel motorlu araçların beher kW güç değeri için birim zamanda sağlanması gereken hava miktarıdır. Bu değer 100 kW makine gücü için 6 – 8 m³/sn'dir (McPherson, 1993, DMT, 1991, Ökten ve Fişne, 2015) ve Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$Q = q \cdot \frac{G}{100} \quad (3)$$

Burada,

Q : Gerekli temiz hava miktarı (m³/sn),

q : 100 kW güç için gerekli hava miktarı (6 – 8 m³/sn),

G : Çalışan dizel motorlu araçların toplam gücüdür (kW).

Tünelde çalışmakta olan dizel araçlar firma tarafından belirlenmiş olan harf kodları ile temsil edilmektedir.

Çalışmanın yürütüldüğü şantiyede 'A' kod ile belirtilen makineler kazıcı yükleyici sınıfında yer alan ekskavatörleri temsil ederler. 'B' kod ile belirtilen makineler Loader yani yükleyici makine sınıfını ve 'D' kod ile belirtilen makineler ise delgi makinelerini göstermektedir.

Çalışmanın yapıldığı tünelde bulunan dizel ekipmanların güçleri, model yılı, marka ve ağırlıkları Çizelge 2' de verilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan dizel motorlu ekipmanlar ve özellikleri

Ekipman	Marka	Model Yılı	Ağırlık (kg)	Güç (kW)
A 48 Ekskavatör	Hidromek	2017	24 150	128,4
A 52 Ekskavatör	Hidromek	2017	23 700	128,4
A 65 Ekskavatör	Caterpillar	2020	20 500	107
B 68 Yükleyici	Volvo	2006	19 020	149,7
B 33 Yükleyici	Case	2008	20 000	148
D 12 Delgi Makinesi	NCB	2006	15 000	124,7
D 29 Delgi Makinesi	NCB	2014	15 000	147

Buna göre dizel motorlarından çıkan gazları temizlemek için gerekli olan hava miktarı çalışma saatleri ve motor güçleri göz önünde bulundurulduğunda 22,1 m³/s olarak hesap edilmiştir.

Detaylı çalışma aşağıda yer alan Çizelge 3'te gösterilmektedir.

Çizelge 3. Dizel motorlardan yayılan gaz miktarına göre gerekli hava miktarı

Ekipman	Güç (kW)	Gerekli Hava Miktarı (m ³ /sn)
A 48 Ekskavatör	128,4	10,2
B 68 Yükleyici	149,7	11,9
TOPLAM	276,4	22,1

4 HAVALANDIRMA İLE İLGİLİ YAŞANAN SORUNLAR

Sultanbeyli NATM tünellerinde havalandırma ile ilgili yaşanan en önemli sorun tünele temiz hava sağlayan vantüplerin yırtık ve hasarlı olmalarıdır. Tünelde vantüplerin nasıl takılması gerektiği, çalışma yerine ne kadar uzaklıkta vantüp bağlantısının kesilmesi gerektiği konusunda gerek vardiya mühendisleri ve kısım sorumluları, gerekse bilgili kişilerin eğitimleri doğrultusunda işçiler bilinçlendirilmektedir. Vantüp montaj ve demontajı konusunda sıkıntı yaşanmamasına karşın vantüplerin hasarlanmasının önüne kolay geçilememektedir. Vantüplerin yırtıklarının onarılması konusunda birçok problemle karşılaşmıştır. En önemli ve büyük sorunlardan birisi yırtılan vantüplerin kaynak yapılması yerine yaşanacak iş kaybı göz önüne alınarak zamandan tasarruf sağlamak maksadı ile yırtık vantüplerin tel ile bağlanması ya da ip vasıtasıyla dikilmesidir; oysaki bu davranış yanlış ve hasarlı olan vantüplerin dikiş yapılan yerlerinden daha fazla yırtılmasına ve daha fazla hava kaçağına sebep olmaktadır. Vantüplerin yırtılması konusunda bir diğer husus ise dar kesitli tünellerde iş makinesi geçişleri sırasında meydana gelen yırtılma ve hasarlardır. Yanlış bir uygulama olan telle bağlı vantüp örnekleri Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Hasarlı vantüp örnekleri

5 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışma sonucu tünelin havalandırılmasında 1 adet 90kW güce sahip, 1500 PA basınç değerinde ve 30m³/s çalışma debisine sahip Emak marka SS Jet Fan kullanıldığı görülmüştür. Fanın maksimum debisi ayrıca katalogta yer alan teknik özelliklerden yararlanılarak 100 m³/s olarak saptanmıştır.

Tünelde yapılan gaz ölçümleri sonucunda CO değeri bir nokta hariç tüm noktalarda 0 ppm ölçülmüş ve O₂ konsantrasyonu da %20,9 altına hiç düşmemiştir.

Tünel havalandırması ile ilgili tek ve en büyük sorun vantüplerde yer alan yırtıklar ve yırtıkların iple dikilmesi yahut telle bağlanmasıdır.

Tünelde sağlıklı bir çalışma ortamı için gerekli temiz hava ihtiyacı hesaplanmasında birinci yöntem olarak çalışan işçi sayısı göz önünde bulundurularak dakikada 3,2 m³/sn temiz hava miktarına ulaşılmıştır. İkinci yöntem olarak ise tünelde aynı anda bir vardiyada çalışan iş makinelerinin güçleri hesaba katılarak dizel gazlarının temizlenmesi için gerekli temiz hava ihtiyacı 22,1 m³/s olarak hesap edilmiştir. Tünel havalandırması için kurulu ve çalışmakta olan fanın çalışma debisi ve gücü göz önüne alındığında tünelin hava ihtiyacının yeterince karşılaştığı sonucuna varılmaktadır.

6 TEŞEKKÜR

Makaleyi yazmadan önce, bu çalışmaya başladığım günden itibaren ve nihayetinde yayınlama sürecine kadar; bana destek olan ve moral veren eşim Meral İNKO TERZİÖZ Hanıma teşekkürlerimi borç bilirim.

KAYNAKLAR

- Ayvazoğlu, E., 1986. *Madenlerde Havalandırma ve Emniyet*. İTÜ Maden Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- DMT, 1991. *Grundriss der Bergtechnik*, Verlag Glüchauf GmbH, Essen.
- Doğuş İnşaat ve Ticaret A.Ş. 2020. Sağlık ve Güvenlik Planı, Sayfa 33, Rev.
- McPherson, M. J., 1993. *Subsurface ventilation and environmental engineering*, Chapman & Hall, Inc., London.
- Ökten, G., Fişne, A., 2015. Yeraltı Kazı Çalışmalarında Havalandırma Esasları-II, *TMD Sektörden Haberler Bülteni*, No. 59, s. 66 – 70.
- Proje Tanıtım ve SEÇ Raporu, 2022. Çekmeköy-Sancaktepe-Sultanbeyli Metrosu ile Sarıgazi(Hastane)-Taşdelen-Yenidoğan Metrosu İnşaat ve Elektromekanik Sistemler, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri.

Sayısal Modelleme Kullanılarak Dairesel Olmayan Tünel Kesitleri için Uzunlamasına Deformasyon Profilinin (LDP) Oluşturulması

Establishment of Longitudinal Deformation Profile (LDP) for Non-Circular Tunnel Sections by Using Numerical Modelling

A. Sakcalı

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum

ÖZET: Tünel kazısıyla arazi gerilmelerindeki değişim sonrasında deformasyonlar meydana gelmektedir. Tünellerde meydana gelen deformasyonların istenen düzeyde tutulması için ise tahkimat sistemleri kullanılmaktadır. Tünellerde tahkimat tasarımında analitik yöntemlerden sıklıkla yararlanılmaktadır. Analitik yöntemlerle yapılan analizlerde tünel aynasına dik yöndeki deformasyonlar uzunlamasına deformasyon profili (LDP) ile belirlenmektedir. Dairesel olmayan tüneller için ise kesit uzunluklarının en küçük ve en büyük değerinin ortalaması yarıçap kabul edilip LDP oluşturulmaktadır. Oysa ki dairese olmayan tünel kesitlerinde boyut etkisi ortaya çıkar ve deformasyon dağılımlarında farklılıklar gözlenir. Bu çalışmada 150 m derinlikte bir zayıf kaya kütleinde kazılan farklı tünel kesitleri ele alınmış ve sonlu farklar yöntemine dayalı olarak modellenmiştir. Tünel tavan, yan duvar ve tabanında kazı aynasına dik yöndeki uzunlamasına deformasyon profilleri modellerden elde edilmiştir. Dairesel kesitli tünel hidrostatik koşullar için tekrar modellenmiş ve literatürdeki LDP eşitlikleri ile karşılaştırılarak modeller doğrulanmıştır. Bu çalışmada dairese olmayan tünellerde LDP'nin sayısal modelleme ile ayrı olarak yapılmasının daha uygun olacağı sonucu elde edilmiştir.

ABSTRACT: The deformations occur after the change in far-field stresses with tunnel excavation. In order to keep the deformations occurring in tunnels at the desired level, the support systems are used. The analytical methods are frequently used for support design in tunnels. The deformations perpendicular to the tunnel face are determined by longitudinal deformation profile (LDP) in analyzes with analytical methods. For non-circular tunnels, the average of the smallest and largest value of the section lengths is accepted as the radius and LDP is formed. However, the size effect occurs in non-circular tunnel sections and the differences in deformation distributions are observed. In this study, the different tunnel sections excavated in a weak rock mass 150 m in depth of cover were considered and modeled based on the finite difference method. The longitudinal deformation profiles perpendicular to the excavation face were obtained from the models at tunnel roof, side wall and base. The circular tunnel is remodeled for hydrostatic conditions and the models were validated by comparing with the LDP equations in the literature. It was concluded that it would be more appropriate to establish LDP separately with numerical modelling for non-circular tunnels in this study.

1 GİRİŞ

Son yıllarda yeraltı yapılarına olan ihtiyaçların artması ile tünelcilik faaliyetlerine olan talepte artmıştır. Ulaşım, alt yapı, yeraltı madenciliği, atık suların depolanması, yeraltı suyunun drenajı vb. birçok amaçla tüneller açılmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda tünel kazıları farklı kesit ve boyutlarda gerçekleştirilebilmektedir.

Tünel kazısı gerçekleştirilirken yeraltındaki doğal ortamdan kaynaklı birincil gerilmeler tünel kazısı ile yerini ikincil gerilmelere bırakmakta ve bunun sonucunda da deformasyonlar meydana gelmektedir. Tünel çevresinde meydana gelen deformasyonun iyi belirlenmesi tahkimat tasarımının da doğru yapılmasını sağlayacaktır.

Analitik yöntemlerle tahkimat tasarımı yapılırken yer tepki eğrisi (Ground Reaction Curve, GRC) ve tahkimat karakteristik eğrisi (Support Characteristic Curve, SCC) kullanılmaktadır. Tünel aynası arkasına doğru oluşacak deformasyon dağılımları ise uzunlamasına deformasyon profilleri (Longitudinal Deformation Profile, LDP) ile tanımlanabilmektedir.

Literatürde uzunlamasına deformasyon profillerinin belirlenmesine yönelik birçok eşitlik vardır. Bu eşitliklerde farklı parametrik etkilerin göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilse de genel olarak tünel aynasına dik yöndeki uzaklık deformasyon dağılımını etkileyen ana parametredir. LDP'nin belirlenmesine yönelik önerilmiş eşitlikler Tablo 1'de verilmiştir.

LDP eşitlikleri hidrostatik arazi koşulları dikkate alınarak dairesel kesitli tüneller için geliştirilmiş olup dairesel olmayan tünellerde en küçük ve en büyük kesit uzunluğunun ortalaması yarıçap kabul edilip belirlenebilir (Carranza-Torres ve Fairhurst, 2000). Dairesel olmayan tünellerde köşelerde gerilmeler daha fazla olmaktadır. Bu nedenle dairesel olmayan tünellerdeki deformasyon dağılımlarının farklı bir çalışma ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Literatürde LDP'lerin sayısal modelleme kullanılarak belirlendiği çalışmalar vardır (Meguid vd., 2003; Hoek, 2004; Soroush vd., 2006; Bi ve Zhou, 2015; Sakcali ve Yavuz, 2019b, Sakcali, 2021).

Bu çalışma kapsamında 150 m derinlikte bir zayıf kaya kütlelerinde açılacak farklı kesitlerdeki tüneller modellenmiştir. Modellerden alınan veriler kullanılarak her kesit için tavan, yan duvar ve tabanda LDP'ler oluşturulmuştur. Hidrostatik koşullarda açılan dairesel kesitli tünel modelinden oluşturulan LDP literatürdeki eşitlikler ile karşılaştırarak doğrulanmıştır.

2 SAYISAL MODELLEME

Tünellerin modellenmesinde sonlu farklar yöntemine göre çözüm yapan FLAC3D kullanılmıştır (Itasca, 2011). Modellemelerde geometrinin iyi tanımlanmasının yanı sıra yenilme kriteri, malzeme özellikleri ve model koşullarının iyi belirlenmesi gerekmektedir.

2.1 Tünel Kesitleri

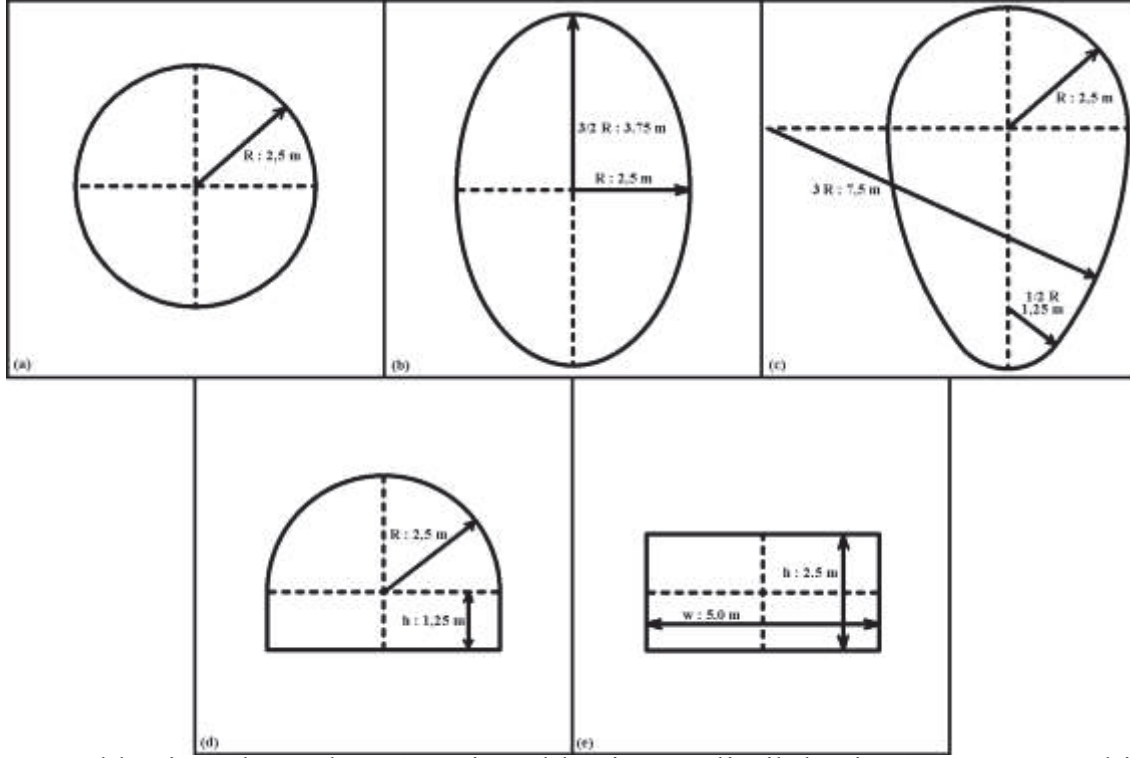
Tünel kazıları farklı amaçlar için farklı kesitlerde gerçekleştirilmektedir. Tünel kesitleri belirlenirken madencilik ve inşaat için gerçekleştirilen yeraltı kazılarında en çok tercih edilen tünel kesitlerine bakılmıştır. Son yıllarda artan TBM (tünel açma makinesi) tünelciliği nedeniyle dairesel (circular) kesitli tünellerle sıklıkla karşılaşmaktadır. Daha çok yüzeye yakın yerlerde aç-kapa yöntemiyle gerçekleştirilen dikdörtgen (rectangular) kesitli tüneller ise bir diğer tünel kesiti olarak ele alınmıştır. Su iletim ve kanalizasyon tünelleri ise genellikle eliptik (elliptical) veya yumurta şekilli (egg-shaped) kesitli olarak açılmaktadır. Bu tünel kesitlerinde temel amaç tünel kesitinin azaltılarak su iletim hızını artırmaktır. Bunun yanı sıra madencilikte galeri açımalarında sıklıkla karşılaşılan at nalı (horse shoe) kesitli tüneller bu çalışmada ele alınan diğer bir kesit şeklidir.

Çizelge 1. LDP'nin belirlenmesine yönelik önerilmiş eşitlikler

Kaynaklar	Eşitlikler	Koşullar
Corbette vd. (1991)	$\frac{u_r}{u_r^M} = 0,29 + 0,71[1 - e^{(-1,5(L/R)^{0,7})}]$	$L/R \geq 0$ Ayna arkasında (1)
Panet (1995)	$\frac{u_r}{u_r^M} = 0,25 + 0,75 \left[1 - \left(\frac{0,75}{0,75+L/R}\right)^2\right]$	$L/R \geq 0$ Ayna arkasında (2)
Carranza-Torres ve Fairhurst (2000)	$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + e^{\left(\frac{-L/R}{1,1}\right)}\right]^{-1,7}$	(3)
Unlu ve Gercek (2003)	$\frac{u_r}{u_r^M} = u_{r0} + A_a[1 - e^{(-B_a(L /R))}]$	$L/R \leq 0$ Ayna önünde (4)
	$\frac{u_r}{u_r^M} = u_{r0} + A_b \left\{1 - \left[\frac{B_b}{B_b + (L /R)}\right]^2\right\}$	$L/R \geq 0$ Ayna arkasında (5)
	$u_{r0}=0,22\nu+0,19; A_a=-0,22\nu-0,19; B_a=0,73\nu+0,81;$ $A_b=-0,22\nu+0,81; B_b=0,39\nu+0,65$ ile belirlenmektedir.	
Vlachopoulos ve Diederichs (2009)	$\frac{u_{r0}}{u_r^M} = \frac{1}{3} e^{-0,15R^*}$	$L/R=0$ Aynada (6)
	$\frac{u_r}{u_r^M} = \frac{u_{r0}}{u_r^M} e^{L/R}$	$L/R \leq 0$ Ayna önünde (7)
	$\frac{u_r}{u_r^M} = 1 - \left(1 - \frac{u_{r0}}{u_r^M}\right) e^{-((3L/R)/2R^*)}$	$L/R \geq 0$ Ayna arkasında (8)
	$R^*=R_p/R$ ile belirlenmektedir.	
Basarir vd. (2010)	$\frac{u_r}{R} = aRMR^b c^{L/D}$	$L/R \leq 0$ Ayna önünde (9)
	$\frac{u_r}{R} = aRMR^b L/D^c$	$L/R \geq 0$ Ayna arkasında (10)
	a, b ve c katsayıları derinliğe göre değişmektedir.	
Sakcali ve Yavuz (2019a)	$\frac{u_r - u_{r0}}{u_r^M - u_{r0}} = \frac{1,0628(L/R)}{0,571 + (L/R)}$	(11)
	$\frac{u_r^M}{R} = a(GSI. m_i)^b \left(\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_0}\right)^c$	(12)
	$\frac{u_{r0}}{R} = a(GSI. m_i)^b \left(\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_0}\right)^c$	(13)
	a, b ve c katsayıları derinliğe göre değişmektedir.	

u_r radyal deformasyon, u_{r0} aynadaki deformasyon, u_r^M tünel çevresindeki en büyük deformasyon, L tünel aynasına dik olan mesafe, R tünel yarıçapı, D tünel çapı, ν Poisson oranı, R_p plastik zon yarıçapı, RMR kaya kalite sınıflama belirtisi (Rock mass rating), GSI jeolojik dayanım indeksi (Geological Strength Index), m_i kaya malzemesi için Hoek-Brown sabiti, σ_{ci} kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ve σ_0 arazi gerilmesidir.

LDP dairesel kesitli tünellerde hidrostatik koşullara göre oluşturulan tünel aynasına göre dikey yöndeki deformasyon profilleridir. Dolayısıyla diğer kesitlerin etkilerinin incelenmesi ve analitik yöntemle karşılaştırılması amacıyla yarıçapı 2,5 m olan dairesel kesitli tünel boyutlandırma referans alınmıştır. Çalışmaya konu olan tünel kesitleri ve boyutları Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Tünel kesit ve boyutları **a)** Dairesel kesit, **b)** Eliptik kesit, **c)** Yumurta şekilli kesit, **d)** At nalı şekilli kesit, **e)** Dikdörtgen kesit

2.2 Kaya Kütlesi Özellikleri

Deformasyon dağılımlarının belirlenmesi için zayıf kaya kütlesi ele alınmış ve bu zayıf kaya kütlesinde farklı kesitlerdeki tünel kazılarının modellenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Hoek (2007) tarafından çalışılan 150 m derinlikte zayıf kaya kütlesinde açılan bir tünel koşulları tercih edilmiştir. Tercih edilen tünel koşullarında, kaya kütlesinin GSI değeri 25, kaya malzemesinin basınç dayanımı (σ_{ci}) 10 MPa ve m_i değeri ise 10'dur.

Modellemeler Hoek-Brown yenilme kriterine göre yapılmıştır. Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme kriteri Eşitlik 14'te verilmiştir. Hoek-Brown parametrelerinin (m_b , s , a) belirlenirken aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (14)$$

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI-100}{28-14DF} \right) \quad (15)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9-3DF} \right) \quad (16)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (17)$$

Eşitliklerde; σ_1 ve σ_3 sırasıyla yenilme anındaki en büyük ve en küçük asal gerilmeyi verirken m_b , s ve a kaya kütlesi için Hoek-Brown sabitlerini, σ_{ci} ve m_i ise sırasıyla kaya malzemesinin basınç dayanımını ve Hoek-Brown sabitini vermektedir. DF örselenme faktörü olup zayıf kaya kütlelerinde kontrollü patlatma ve mekanik veya elle kazı gerçekleştirildiği kabul edilerek 0 alınmıştır (Hoek, 2007).

Kaya kütlelerinin deformasyon modülü (E_m) belirlenirken Hoek ve Brown (1997) tarafından $\sigma_{ci} < 100$ MPa için önerilen Eşitlik 18 kullanılırken, kayma (G_m) ve hacimsel esneme modülü (K_m) sırasıyla Eşitlik 19 ve 20 ile tahmin edilmiştir. Deformasyon parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan Poisson oranı (ν_m) ise Vásárhelyi ve Kovács (2017) tarafından önerilen Eşitlik 21 ile 0,38 olarak bulunmuştur.

$$E_m = 10^{((GSI-10)/40)} \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \quad (18)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} \quad (19)$$

$$K_m = \frac{(1+\nu_m)G_m}{(3/2)(1-2\nu_m)} \quad (20)$$

$$\nu_m = -0,002GSI - 0,003m_i + 0,457 \quad (21)$$

Sayısal modellemede kullanılacak kaya kütlesi özellikleri Eşitlik 15-21 ile belirlenmiştir. Plastik deformasyonda hacimsel değişikliğinin olmadığı ($\psi=0$) kabul edilmiştir. Sayısal modellemede veri olarak kullanılan özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Sayısal modellemede kullanılan zayıf kaya kütlelerinin özellikleri

σ_{ci}	Hoek-Brown kaya kütlesi parametreleri			G_m	K_m
	m_b	s	a		
10 MPa	0.687	0.000240	0.531	0.272 GPa	1.016 GPa

2.3 Model Koşulları ve Modelleme

Model sınırları dairesel tünelin yarıçap uzunluğuna göre sınır ve köşe etkisi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Tünel kazı yönüne dik olan x ve z-yönündeki model sınırları tünel yarıçapının 10 katı alınıp 25 m olarak belirlenmiştir. Tünel kazı yönü olan y-yönündeki model sınırı tünel yarıçapının 20 katı (50 m) alınmıştır. Bu yönde gerçekleşen tünel kazı mesafesi ise y-yönündeki model sınırının yarısı olarak (25 m) belirlenmiştir.

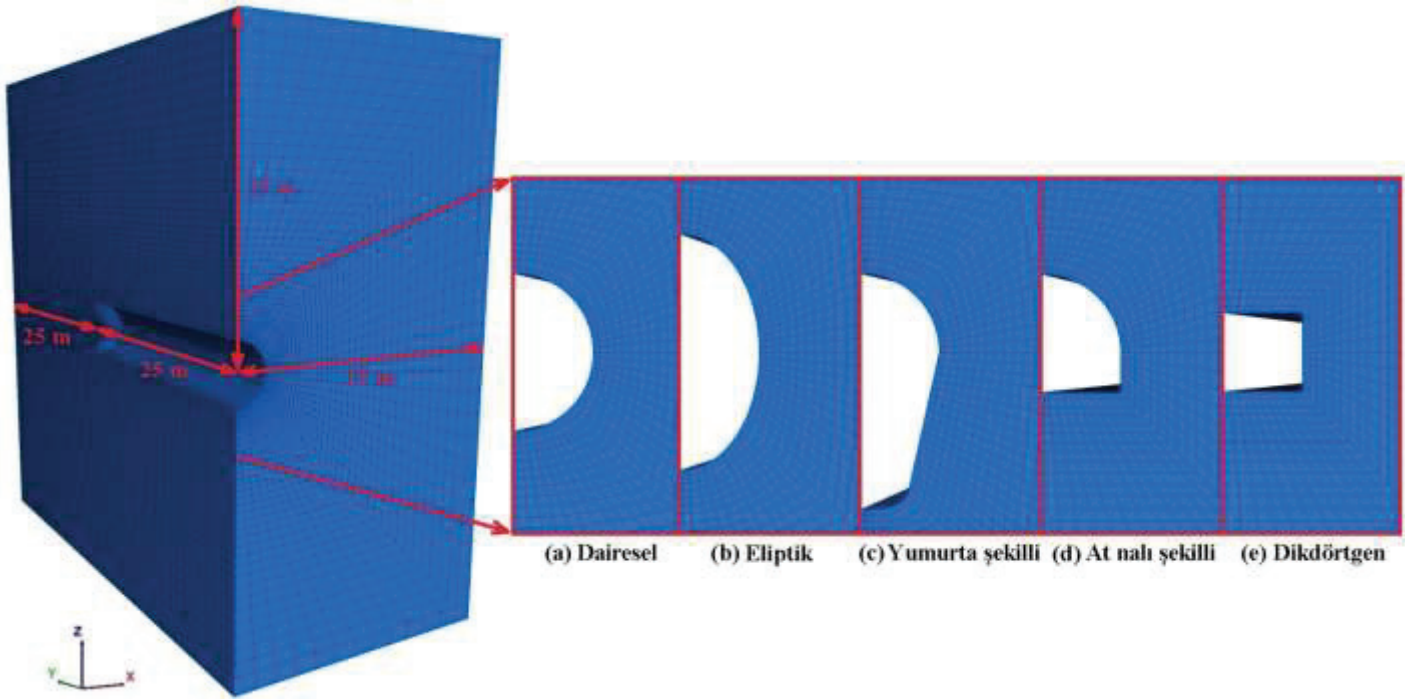
Modellerde tünel tavanından tabanına doğru (z-yönünde) bir eksenle ayrıldığında simetrik özellikler gözleneceği için tünel yarısı için modeller oluşturulmuştur. Model iç sınırları yüzeye dik yönde harekete izin vermeyecek şekilde sınırlandırılmış, model dış sınırlarına ise sınırlara dik yönde dikey (σ_v) ve yatay gerilme (σ_h) uygulanmıştır. Dış sınırlara uygulanan dikey gerilme derinlik ve birim hacim ağırlığa bağlı olarak Eşitlik 22 ile belirlenirken, yatay gerilme Sheorey vd. (2001) tarafından önerilen Eşitlik 23 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_v = H \cdot \gamma \quad (22)$$

$$\sigma_h = \frac{\nu_m}{1-\nu_m} \sigma_v + \frac{\beta \cdot E_m \cdot G}{1-\nu_m} (H + 1000) \quad (23)$$

Eşitliklerde; H tünel derinliği (m), γ birim hacim ağırlık (kN/m^3), ν_m Poisson oranı, β doğrusal ısı genleşme katsayısı ($1/^\circ\text{C}$), E_m kaya kütesinin deformasyon modülü ve G jeotermal gradyan ($^\circ\text{C/m}$) değişimidir. Hesaplamalarda β ve G değeri sırasıyla $8\text{E-}6/^\circ\text{C}$, 0.024°C/m alınmıştır. 150 m tünel derinliği için dikey gerilme 3,45 MPa, yatay gerilme 2,35 MPa olarak belirlenmiş ve model dış sınırlarına uygulanmıştır. Model dış sınırlarına uygulanan gerilmeler aynı yönler için başlangıç gerilmesi (in situ stress) olarak da uygulanmıştır.

Tünel modellerinde kazı sınırlarından model sınırlarına doğru model ağ aralıkları 1,05 kat artacak şekilde ayarlanmış ve model sınırlarında kübik ağ eklenmiştir. Model ağ sayısı tünel geometrisine göre değişkenlik göstermekte olup dairesel, eliptik, yumurta, at nalı ve dikdörtgen kesit için sırasıyla 235400, 235400, 264250, 201400 ve 167400'dür. Model boyut ve sınır koşulları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Model boyut ve sınır koşulları

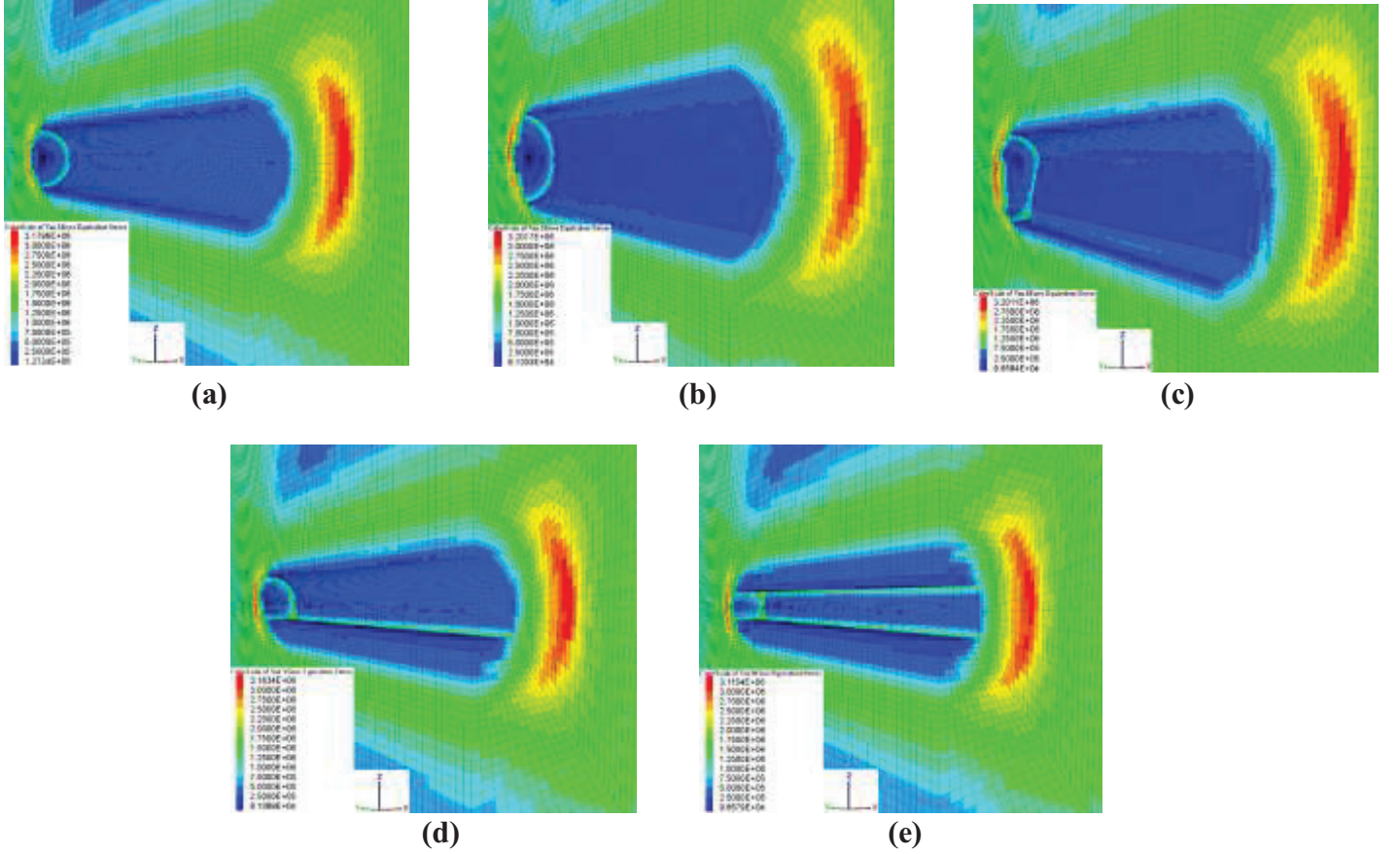
Uzunlamasına deformasyon profilleri tünel tavan, yan duvar ve taban bölgesi için modelden alınan veriler kullanılarak oluşturulacağından bu bölgelerden alınan deformasyon verileri kaydedilmiştir. Tünel aynasının 10 m önünden ($L/R \leq 0$) başlayarak, 2,5 m aralıklarla tünel aynasının 20 m gerisine ($L/R \geq 0$) kadar x , y ve z -yönlerinde deformasyon verileri (sırasıyla u_x , u_y , u_z) alınmıştır. Bu değerler kullanılarak radyal deformasyonlar (u_r) hesaplanmıştır.

3 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

3.1 Modellemelerin Değerlendirilmesi

Tünellerin analizinde kullanılan analitik yaklaşımlarda dairesel tünel kesitlerinde hidrostatik koşullarda açılan tüneller ele alınmaktadır. Dairesel olmayan tünel kesitlerinde ise LDP'ler tünel kesitinin en büyük ve en küçük boyutunun ortalaması yarıçap kabul edilip oluşturulabilmektedir (Carranza-Torres ve Fairhurst, 2000). Oysa ki hidrostatik koşullarda açılan dairesel kesitli tünellerde dahi tünel kesitinin tavan, yan duvar ve tabanında farklı deformasyonlar gözlenmektedir (Hoek ve Brown, 2005).

İlk olarak, farklı tünel kesitlerinin tünel çevresindeki kaya kütesinde meydana gelen gerilme değişimlerine etkisini incelemek için modellerdeki gerilme dağılımlarına bakılmıştır. Farklı tünel kesitlerinde meydana gelen gerilme dağılımları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Farklı kesitlerdeki tünellerde tünel çevresindeki kaya kütlelerinde meydana gelen gerilme dağılımları; a) Dairesel kesit, b) Eliptik kesit, c) Yumurta şekilli kesit, d) At nalı şekilli kesit, e) Dikdörtgen kesit

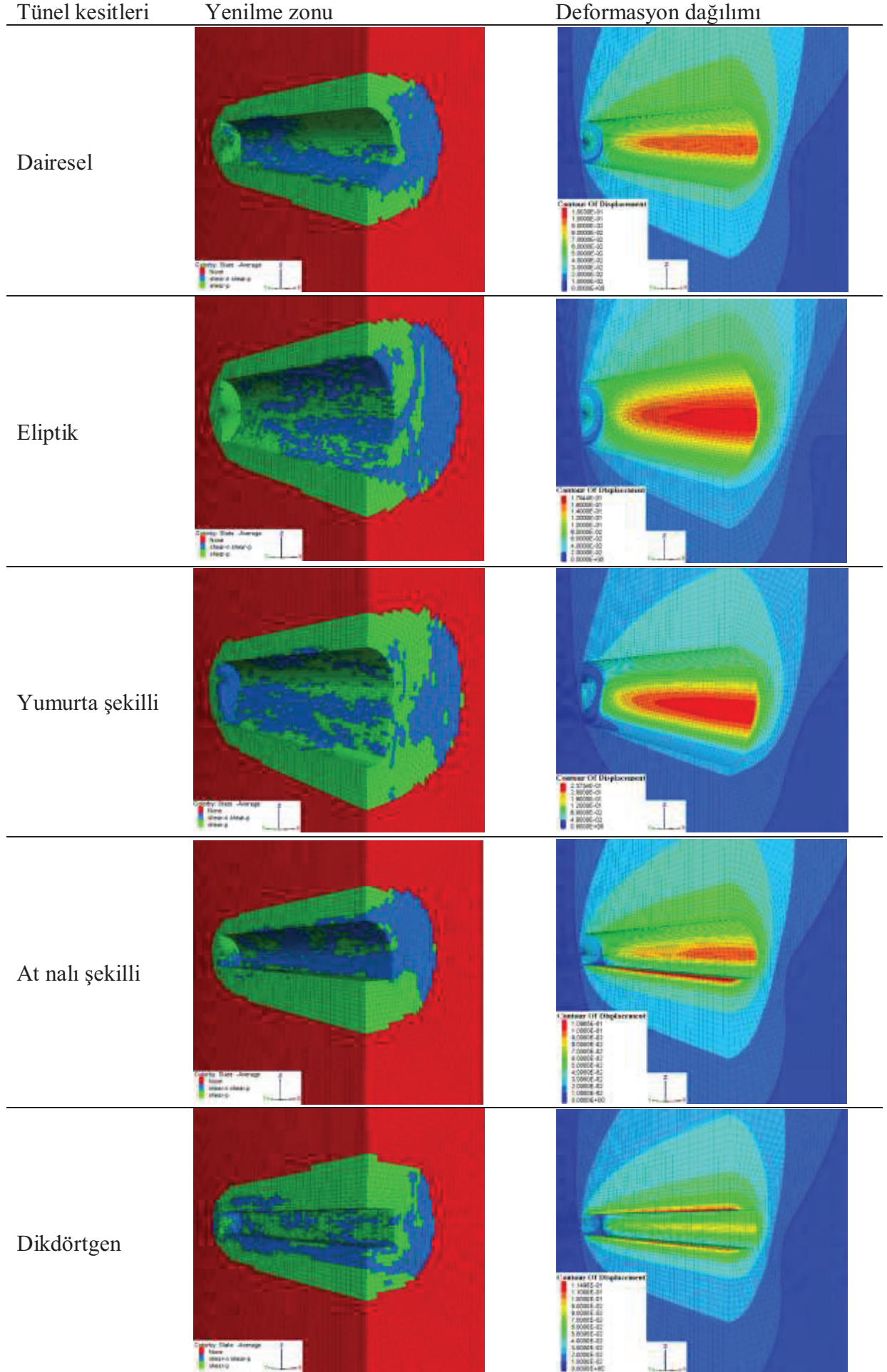
Dikdörtgen ve at nalı kesitli tünellerin köşe noktalarında gerilme yoğunlaşması meydana gelmektedir. Ayrıca, tüm tünel kesitlerinde gerilme dağılımı tünel duvarından dış bölgeye gittikçe artmaktadır.

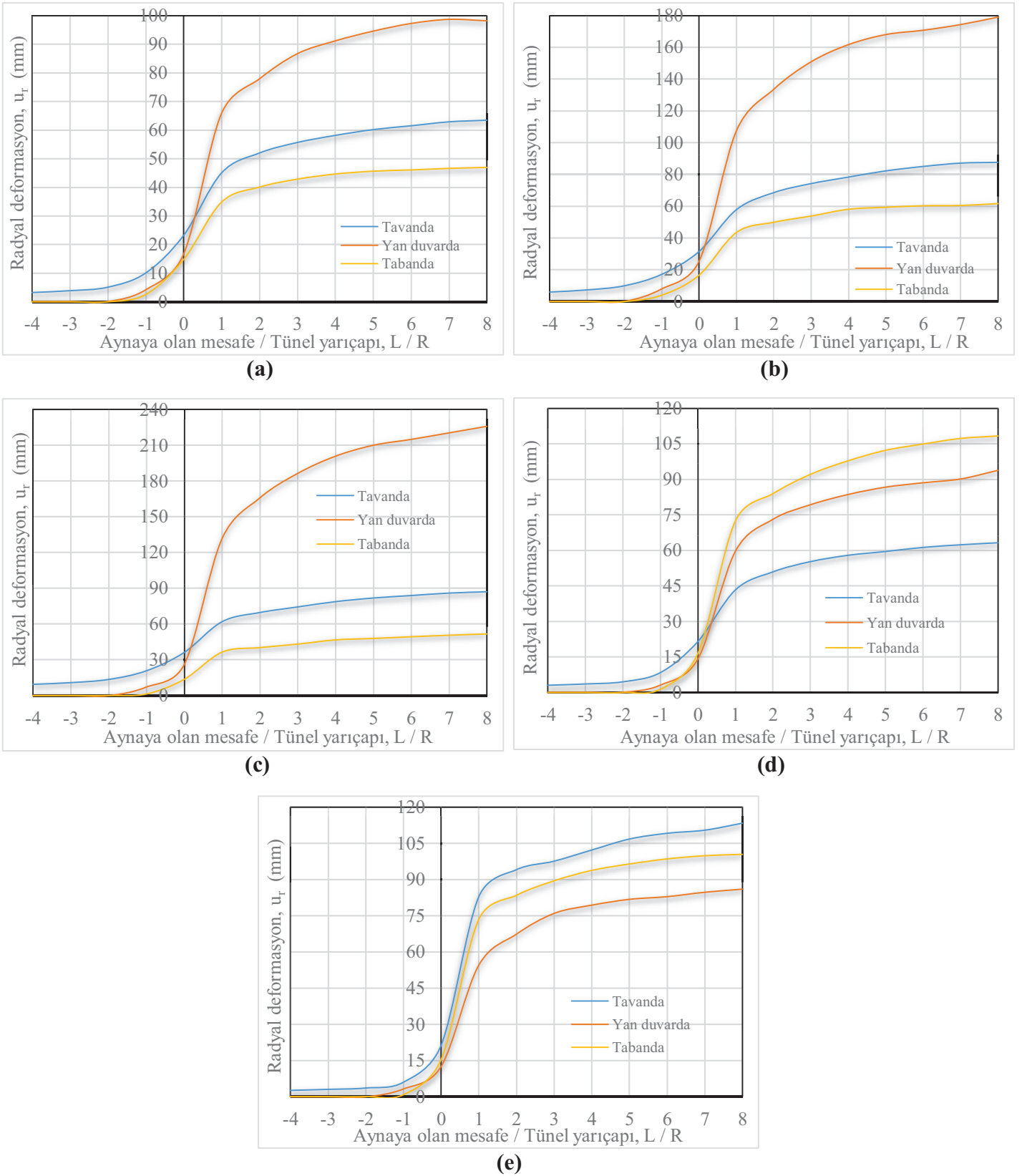
Tünel çevresindeki kaya kütlelerinde yenilme zonu meydana gelecektir. Bu yenilme zonunda plastik deformasyonlar oluşurken diğer bölgelerde elastik deformasyonlar gözlenecektir. Tahkimat tasarımı gerçekleştirilirken yenilme zonunu azaltarak mümkün en yüksek kaya kütlelerinin örselenmeden kendini tutması amaçlanmaktadır. Farklı tünel kesitlerinde meydana gelen yenilme zonları ve deformasyon dağılımları Tablo 3'te verilmiştir.

Farklı tünel kesitlerindeki deformasyon dağılımlarına bakıldığında en yüksek deformasyon yumurta şekilli tünel kesitinde meydana gelirken, en düşük deformasyon dairesel kesitli tünellerde olduğu görülmektedir. Benzer olarak yenilme zonunda da tünel kesitine göre farklılıklar görülmektedir.

Modellerin tavan, yan duvar ve tabanından alınan verilerle LDP oluşturulmuştur. İncelenen kesitlerde tavan, yan duvar ve tabanlarda meydana gelen uzunlamasına deformasyon profilleri Şekil 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. Farklı tünel kesitlerinde meydana gelen yenilme zonları ve deformasyon dağılımları





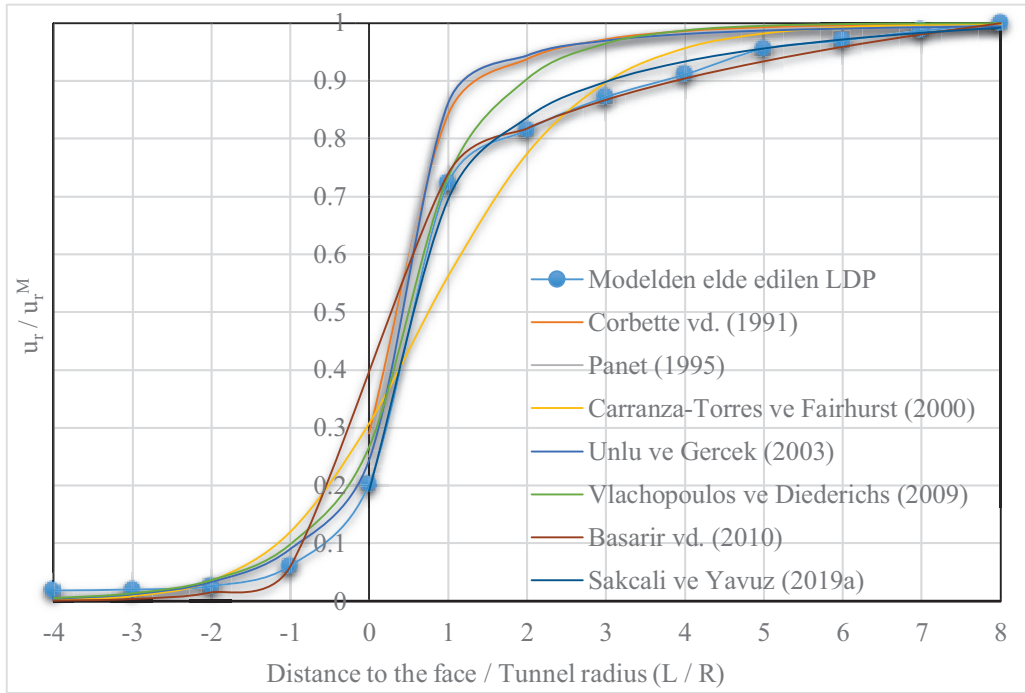
Şekil 4. Tünel tavan, yan duvar ve tabanında meydana gelen LDP; a) Dairesel kesit, b) Eliptik kesit, c) Yumurta şekilli kesit, d) At nalı şekilli kesit, e) Dikdörtgen kesit

Dairesel, eliptik ve yumurta kesitli tünellerde en büyük deformasyon profili yan duvarda meydana gelirken at nalı kesitli tünelde tabanda, dikdörtgen kesitli tünelde ise tavanda olduğu görülmüştür. Dairesel, eliptik ve yumurta kesitli tünellerde tavan, yan duvar ve tabanda oluşan deformasyon dağılımları büyük farklılık gösterirken at nalı ve dikdörtgen kesitli tüneller için bu değişimin diğerlerine nazaran daha az olduğu görülmektedir.

3.2 Modellerin Doğrulanması

Model sonuçları literatürde önerilen LDP eşitlikleri ile karşılaştırılacağı için ele alınan dairesel tünel kesiti hidrostatik koşullarda ayrıca modellenmiştir. Dairesel kesitli tünel modellenirken diğer tüm koşullar aynı olmak şartıyla yatay gerilme dikey gerilmeye eşit (3,45 MPa) alınmıştır.

Tünel modelinin yan duvarında meydana gelen deformasyon dağılımları literatürdeki öneriler ile karşılaştırmada kullanılmıştır. Deformasyonlar o profildeki maksimum radyal deformasyona (u_r^M) göre normalize edilerek LDP oluşturulmuştur. Hidrostatik koşuldaki modelden elde edilen LDP ile literatürdeki eşitlikler kullanılarak elde edilen LDP'lerin karşılaştırılması Şekil 5'te verilmiştir. Hidrostatik koşulda gerçekleştirilen modelden elde edilen LDP, literatürdeki eşitlik önerilerine yakın olduğu için modellemelerin doğru olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Modelden elde edilen LDP'nin literatürdeki eşitlikler ile karşılaştırılması

4 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada bir zayıf kaya kütleğinde açılan dairesel, eliptik, yumurta, at nalı ve dikdörtgen kesitli tüneller modellenmiş ve bu modellerden alınan verilerle uzunlamasına yöndeki deformasyon profilindeki dağılım irdelenmiştir. Modelden elde edilen LDP literatürde önerilen eşitlikler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tünel kesitinin farklı yerlerinde LDP'nin belirlenmesinde sayısal modelleme yardımcı bir araç olarak kullanılabilir.
- Farklı tünel kesitlerinde LDP'lerde farklılık görülmektedir.
- Dairesel, eliptik ve yumurta kesitli tünellerde en büyük LDP yan duvarda gözlenirken at nalı kesitli tünelde tabanda, dikdörtgen kesitli tünelde ise tavanda meydana gelmektedir.
- Dairesel, eliptik ve yumurta kesitli tünellerde kesitlerdeki LDP dağılımı at nalı ve dikdörtgen kesitli tünelde göre daha fazladır.
- Farklı tünel kesitlerinde analitik yöntemle tahkimat tasarımı gerçekleştirirken LDP tünel koşuluna göre ayrı bir model gerçekleştirilerek belirlenebilir.

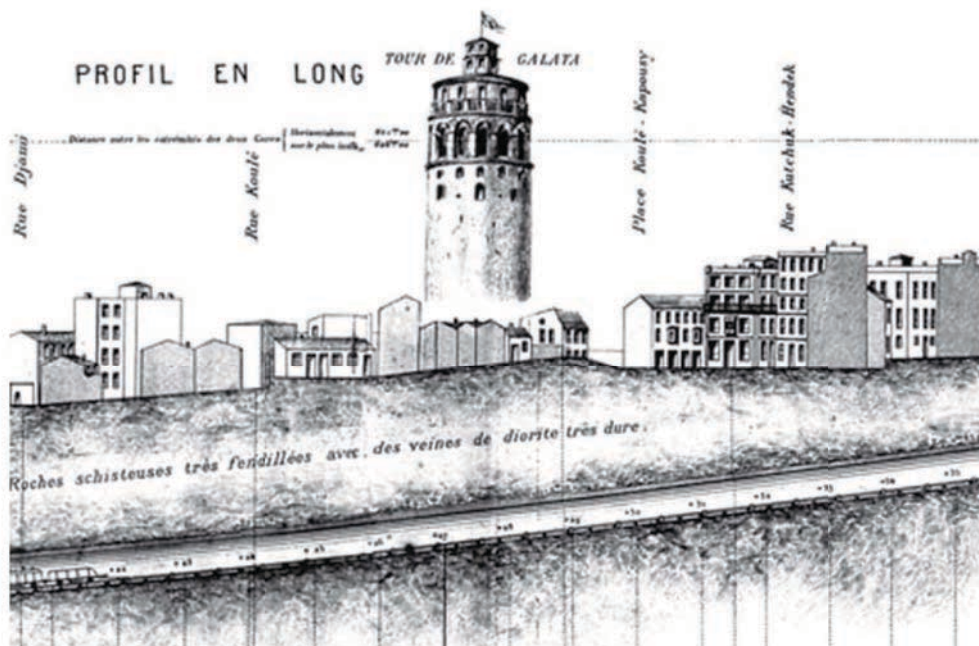
KAYNAKLAR

- Basarir, H, Genis, M, Ozarslan, A, 2010. The analysis of radial displacements occurring near the face of a circular opening in weak rock mass. *Int J Rock Mech Min Sci*, 47(5), s. 771-783. [10.1016/j.ijrmms.2010.03.010](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.03.010).
- Bi, J, Zhou, XP, 2015. Numerical simulation of zonal disintegration of the surrounding rock masses around a deep circular tunnel under dynamic unloading. *Int J Comp Meth*, 12(3), 1550020, s. 1-23. [10.1142/S0219876215500206](https://doi.org/10.1142/S0219876215500206).
- Carranza-Torres, C, Fairhurst, C, 2000. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Tunn Undergr Sp Technol*, 15, s. 187-213. [10.1016/S0886-7798\(00\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00046-8).
- Corbetta, F, Bernaud, D, Nguyen-Minh, D, 1991. Contribution a la methode convergerce-confinement par le principe de la similitude. *Rev Fr Geotech*, 54, s. 5-11. [10.1051/geotech/1991054005](https://doi.org/10.1051/geotech/1991054005).
- Hoek, E, 2004. Numerical modelling for shallow tunnels in weak rock - unpublished notes.
- Hoek, E, 2007. Practical rock engineering. Erişim adresi: <https://www.rocscience.com/>.
- Hoek, E, Brown, ET, 1997. Practical estimates or rock mass strength. *Int J Rock Mech Min Sci*, 34(8), s. 1165-1186. [10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X).
- Hoek, E, Brown, ET, 2005. Underground excavations in rock. *Inst Mining Metal, Taylor & Francis*.
- Itasca, 2011. Version 5.0 user manuals. Itasca Consulting Group, Inc. Mill Place, Minnesota.
- Meguid, MA, Rowe, RK, Lo, KY, 2003. Three-dimensional analysis of unlined tunnels in rock subjected to high horizontal stresses. *Can Geotech J*, 40, s. 1208-1224. [10.1139/t03-057](https://doi.org/10.1139/t03-057).
- Panet, M, 1995. Calcul des tunnels par la methode convergence-confinement. *Press de l'ecole Natinale des Ponts et Chaussees*.
- Sakcali, A, 2021. Zayıf kaya kütlelerinde açılan modifiye at nalı kesitli tünellerdeki deformasyon dağılımının sayısal modelleme ile belirlenmesi. *AKU J Sci Eng*, 21, 045802, s. 934-944. [10.35414/akufemubid.935746](https://doi.org/10.35414/akufemubid.935746).
- Sakcali, A, Yavuz, H, 2019a. Estimation of radial deformations around circular tunnels in weak rock masses through numerical modelling. *Int J Rock Mech Min Sci*, 123, 104092, s. 1-14. [10.1016/j.ijrmms.2019.104092](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104092)
- Sakcali, A, Yavuz, H, 2019b. Zayıf kaya kütlelerinde açılan dairesel kesitli bir tünelde radyal deformasyonların sayısal modelleme ile analizi. *Süleyman Demirel Uni J Nat Appl Sci*, 23(1), s. 66-73. [10.19113/sdufenbed.443405](https://doi.org/10.19113/sdufenbed.443405).
- Sheorey, PR, Murali, MG, Sinha, A, 2001. Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress. *Int J Rock Mech Min Sci*, 38(8), s. 1211-1216. [10.1016/S1365-1609\(01\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00069-7).
- Soroush, A, Foroozan, R, Asadollahi, P, 2006. Simulation of 3D effect of excavation face advancement using a neural network trained by numerical models. *E J Geotech Eng*, 11, s. 1-6. [10.1016/j.tust.2005.12.190](https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.190).
- Unlu, T, Gercek, H, 2003. Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel. *Tunn Undergr Sp Technol*, 18(5), s. 547-553. [10.1016/S0886-7798\(03\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00086-5).
- Vásárhelyi, B, Kovács, D, 2017. Empirical methods of calculating the mechanical parameters of the rock mass. *Period Polytech Civil Eng*, 61(1), s. 39-50. [10.3311/PPci.10095](https://doi.org/10.3311/PPci.10095).
- Vlachopoulos, N, Diederichs, MS, 2009. Improved displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. *Rock Mech Rock Eng*, 42(2), s. 131-146. [10.1007/s00603-009-0176-4](https://doi.org/10.1007/s00603-009-0176-4).



The historical Tunnel, which is accepted as the second underground metro in the world after the 1863 London Underground, was designed by the French engineer Eugene-Henri Gavand. The tunnel, which was built to provide transportation between Galata-Karaköy and Beyoğlu, two important centers of Istanbul, was commissioned on January 18, 1875.

The UYAK Symposium logo is formed by combining the Galata Tower, the "Tunnel" and the TBM.



Galata Tower & Tunnel Sectional (Gavand 1875)



TMMOB
Maden Mühendisleri Odası
ISBN: 978-605-01-1568-0