

## M3 METRO HATTI KIRAZLI İSTASYONU CİVARINDA ZAYIF ZEMİN KOŞULLARINDA ÖZEL BİR ÇÖZÜM YÖNTEMİ: TBM'LERİN KAFESE ALINMASI

### A SPECIAL SOLUTION METHOD FOR WEAK SOIL CONDITIONS AROUND KIRAZLI STATION OF M3 METRO LINE: CAGING THE TBM'S

Yalçın EYİĞÜN<sup>1</sup>

#### ÖZET

8,4 km uzunluğundaki İstanbul Bakırköy- Bahçelievler- Kirazlı Metro Hattı Projesinde (M3) ana hat tünel kesimleri 6,57 m kazı çapına sahip 2 adet TBM ile açılmaktadır. Proje Bakırköy- Bağcılar-Kirazlı güzergâhını takip eder. Kirazlı hattının son 620 metresinde örtü tabakası kalınlığının 7 metreye kadar düşmesi, jeolojik ortamın yumuşak zemin karakterinde ve yer yer su barındıran kum merccekleri içermesi, kayıt dışı su kuyularının ve TBM'lerin riskli binaların altından geçerek shafta varacak olması önlemlerin artırılmasını gerektirmiştir. Varış noktasında birbirine teğet TBM kazıları sebebiyle zemin kaybı yaşanmaması ve TBM basıncı ile yüzeydeki riskli yapılarda yapısal hasara yol açmamak için çelik kafesler çözümü geliştirilmiştir. Bu "kafesler" shaft içinden uygulanan, yaklaşık 35 metre uzunluğunda, TBM'lerin içinden geçerek kazısını tamamlayacağı, çelik borulardan oluşan dikdörtgenel zarflardır. Bunun için shafttan, riskli binaların temellerini planda 5 metre derinlikten geçecek şekilde yatay ve düşey doğrultuda işinsal olarak 4 inç çaplı çelik borular uygulanmıştır. Böylece TBM'leri ilerlemelerinin son kısmında adeta kafese hapsederek izole eden özel bir çözüm üretilmiştir. Birinci TBM shafta yaklaştığında üç tarafı çelik borulardan ibaret bir zemin prizmasına girmiştir. İkinci TBM yine kendisi için hazırlanmış komşu kafese girmiş ve deformasyon gelişmemiştir. Bu uygulama sonucunda TBM kazıları, ölçülen maksimum yüzey ve tünel deformasyonu 1 santimetreyi geçmeden, emniyetle tamamlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** TBM, Metro Kazısı, Çelik Kafes Yapısı

#### ABSTRACT

In the 8.4 km Bakırköy- Bahçelievler- Kirazlı Metro Line Project (M3) in Istanbul, the main line tunnel sections following the Bakırköy-Bağcılar-Kirazlı route are excavated with 2 TBMs with a diameter of 6.57 m. In the last 620 meters of the Kirazlı line, the cover layer thickness decreases to 7 meters with a weak soil character and contains sand lenses with water in places, and unregistered water wells. TBMs pass under risky buildings and reach the shaft. A steel cage solution has been developed to prevent ground loss due to tangent TBM excavations and structural damage to risky structures on the surface. These "cages" are rectangular envelopes consisting of steel pipes applied inside the shaft, approximately 35 meters long. 4-inch diameter steel pipes were applied radially from the shaft in horizontal and vertical directions, passing the foundations of risky buildings at a depth of 5 meters. This special solution isolated TBMs by caging them in the last part of their progress. The first TBM entered a ground prism consisting of steel pipes on three sides. The second machine entered the neighboring cage. As a result, TBM excavations were completed safely, without the measured maximum surface and tunnel deformation exceeding 1 centimeter.

<sup>1</sup>Dr. Öğretim Üyesi, İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, yeyigun@ticaret.edu.tr

**Keywords:** TBM, Metro Excavation, Steel Cage Structure

## 1. GİRİŞ

8,4 km uzunluğundaki İstanbul Bakırköy- Bahçelievler- Kirazlı Metro Hattı Projesi'nde (M3) ana hat tünel kesimleri 6,57 m kazı çapına sahip 2 adet TBM ile açılmaktadır. Proje Bakırköy ucundan başlayıp Bağcılar-Kirazlı'ya varması için planlanmıştır (Şekil 1a). Kirazlı istasyonu daha önce inşa edilen Kirazlı-Başakşehir metro hattının başlangıç istasyonudur. TBM'lerin bu noktada mevcut istasyonun hemen gerisinde birbirine teğet açılan ikiz shafta vararak görevlerini tamamlaması öngörülmüştür. Makinaların Kirazlı ucuna yaklaştıkları son 620 metrede (Km:0+020 ile 0+620 arası) örtü tabakası kalınlığının azalması (15 metreden 7 metreye kadar), zeminin yumuşak zemin karakterinde (Güngören kili ve Çukurçeşme kumu) olması, içeriğinde yer yer su bulunduran kum mercikleri ve en önemlisi bölgede oturan insanların ya da ilgili idarelerin bilmediği kayıt dışı su kuyuları gibi problemler ile karşılaşmıştır. Tünelde bu son kesime gelmeden hemen geride 2 noktada bilinmeyen kuyuların yumuşattığı zeminin yüzeye birleştiği kesimde zemin boşalması yaşanması bu son 620 metrede hassasiyetin artırılmasını ve özel tedbirlerin alınmasını gerektirmiştir. Riskin en fazla olabileceği kesim ise, TBM'lerin varış shaftına en çok yaklaştığı son 50 metre olarak görülmüştür. Örtü tabakasının shaftın hemen gerisindeki son metrelerde 7 metreye kadar düşmesi ve tünel aksının tam üzerinde çok katlı 6 adet eski binanın olması, en riskli kesimin shaft çevresi olduğunu da göstermiştir. Diğer bir problem, TBM ile tünel açmada kaçınılmaz olarak karşılaşılan varış shaftı sorunudur. Makinalar shaft boşluğuna varırken hemen gerisinde kalkan boyu kadar uzunlukta segmentler robotik sistemle dizilememekte ve bu da en zayıf noktadaki riski daha da arttırmaktadır. Her ne kadar EPB-TBM makinaları verilen zemin koşullarına göre tasarlanmış olsa da bilinmeyen kuyular ve örtü kalınlığının 7 metreye kadar indiği lokasyonda üstte 4-5 katlı eski yapıların varlığı, bu noktada "hesapla sağlanan güvenliğin" dışında ek tedbir almayı zorunlu kılmıştır. Ek tedbir alınmadan ilerlenmesi durumunda yaşanabilecek bir zemin boşalması büyük can ve mal kayıplarına yol açabilecektir. Nitekim bu bölgeye giren TBM'lerden ilki, 600 metre geride öngörülmeyen bir zemin boşluğu ile meydana gelen basınç anomalisi sebebiyle yüzeye kadar ulaşan bir zemin boşalması vakası yaşamıştır (Şekil 1b). Son kesimde yapılan çalışma ile kayıtlı olmayan ve rapor edilmeyen kuyulardan bulunabilenler için tedbirler alınmış ancak yoğun yapıların altında kalmış olabilecek kuyular ve zemin boşluklarının varlığı en kritik kesit olan varış shaftı için özel önlem alınmasının zorunlu olduğunu göstermiştir (Şekil 2).



Şekil 1. (a) Bakırköy- Bahçelievler- Kirazlı Metro Hattı (M3) haritası. (b) Kirazlı istasyonu 600 m güneyinde yüzeye kadar ulaşan bir zemin boşalması

TBM ile problemleri sığ zeminlerde tünel açma ve destek sistemleri ile ilgili pek çok çalışma bulunmaktadır. Arioğlu vd. (2002) İzmir Metrosu Ümmühan Ana Tüneli'nde zemin basıncı dengeleme tünel metodu (EPBM) uygulamasını sunmaktadırlar. Kovari ve Ramoni (2006) zayıf zeminlerde TBM modern tünelciliğin uygulama özel alanını kentsel çevresel unsurları, yer altı suyunun belirleyici rolü olan tipik zemin koşulları ve ön destek teknolojisi temel özellikleri faktörlerini göz önünde bulundurarak birleştirici bir şekilde ele almaktadırlar. Ocak (2007) Kadıköy-Kartal Metrosu kazılarında zor zemin şartlarında shaft inşası uygulamalarını değerlendirmiştir.

Aygar ve Gökçeoğlu (2020) zayıf zeminlerde açılan büyük çaplı Trabzon Çukurçayır-2 Tüneli destek sistemi tasarımını irdelemişlerdir.

Bu çalışmada, örtü kalınlığı az ve geoteknik açıdan sorunlu zemin ortamlarında açılan Metro tünellerinde yüzeydeki yapıların güvenliğini arttırmak için geliştirilen özel bir yöntem anlatılmıştır. TBM'lerin zemin içinde çelik kafese alınması yöntemi olarak adlandırılan bu yöntemin, Metro tünellerinin açıldığı Kirazlı istasyonu civarında yüzeydeki yapı güvenliğini sağlamak amacıyla yapılan uygulama yöntem ve aşamaları tanımlanmıştır. Bu uygulama yöntemiyle, zemin ve bina deformasyonları kontrol altına alınmış, TBM'lerin bu kesimde sorunsuz bir şekilde kazılarını tamamlanması sağlanmıştır.



Şekil 2. Metro Hattı (M3) Molla Gürani-Kirazlı istasyonları arası 3B görüntüsü ve Kirazlı şaftı ve civarında yer alan binaların görünümü

## 2. MATERYAL VE METOD

Metro tüneli güzergâhı boyunca TBM'lerin kazacağı kaya/zemin ortamının jeolojik, fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi kazı ve üst yapı güvenliği açısından gerekmektedir. Metro projesi uygulama bölgesinde genel jeoloji, Tersiyer zamana ait sedimanlar ile örtülü, yer yer andezit ve diyabaz sokulumlarının bulunduğu Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı ana kayalardan oluşmaktadır. Mevcut jeolojik araştırma çalışmaları esas alınarak hazırlanmış geoteknik ana hat raporları ve jeolojik boy kesitlere göre, proje kapsamında değerlendirilen tünellerin ise zemin ortamında (Güngören kili ve Çukurçeşme kumu) kazılması beklenmektedir. İncelenen ilk hat kesiminde, Kirazlı İstasyonu'ndan itibaren ilk 600 metrede (Km:0+020-0+600) üstte alüvyona ait birimlerin altında ise Çukurçeşme kumu ve Güngören kili birimlerin kazılması beklenmektedir. TBM kazısı gerçekleşeceği zeminlerin geoteknik parametreleri Tablo 1'de verilmektedir. Kazılan tünelin hem sığ tünel olması hem de zayıf/çok zayıf niteliklere sahip, kumlu, killi birimlerde açılacak olması nedeniyle, olası bir zemin kaybı yaşanması durumunda, deplasmanların yüzeye yansımaları kaçınılmazdır.

Tablo 1. TBM ile kazılan zeminlerin geoteknik parametreleri (Prota Mühendislik, 2020)

Jeolojik Birim	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	Em (MPa)	$\nu$ (-)
Çukurçeşme kumu	18	5	35	40	0.30
Güngören kili	18	150	0	40	0.50

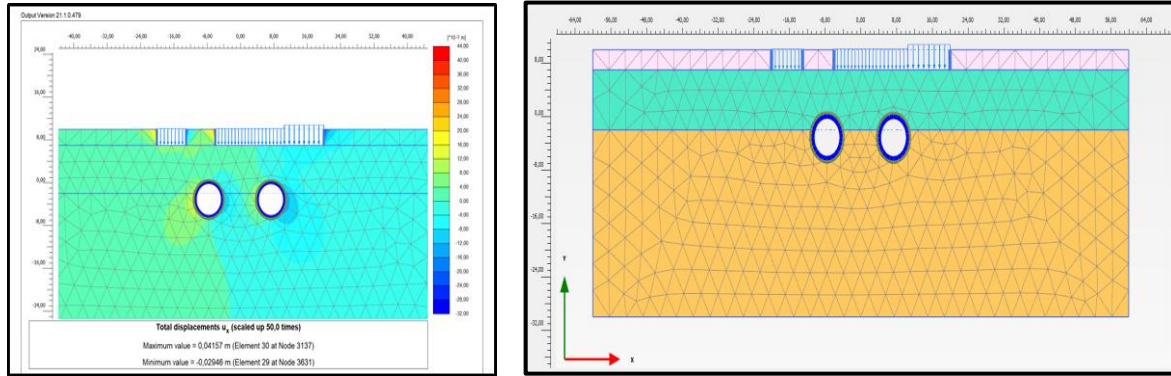
Bu çalışma kapsamında izlenen yöntem öncelikle PLAXIS 2D yazılımı vasıtasıyla ilgili hesap kesitinde tünel kazılarının neden olduğu zemin hareketlerinin nümerik analizleri Tablo 1'deki zemin geoteknik parametreleri kullanılarak 2D sonlu elemanlar modeli ile yapılmıştır (Prota Mühendislik, 2021). Sonrasında zeminde %2 hacim kaybının gerçekleşmesi durumu için oluşturulan 2D sonlu elemanlar modelinde, yapılarda meydana gelen düşey oturmalar için hesaplanan değer 42 mm'ye (Şekil 3) ulaşması nedeniyle bu kesim için ek bir destek sistemi geliştirilmiştir. TBM'lerin geçeceği kötü zemin koşulları, iki noktada yaşanan göçük olayları ve yüzeyde binalarda yaşanan oturmaların belirlenmesi sonrası ortaya çıkan olumsuz koşulları giderebilmek için

hızlı ve güvenli bir ek destek sistemi tasarımı geliştirilerek uygulanmıştır. Uygulanan ek destek sisteminin ekonomik ve mühendislik açısından uygulanabilir olması temel yaklaşımı ile hareket edilmiştir. Kirazlı kesimi metro shaftı yaklaşım tüneline mümkün olduğunca deformasyona izin vermeyecek şekilde ek destek sistemi yapılması hedeflenmiştir. Bu çalışma kapsamında farklı hassasiyet indeksleri dikkate alınarak yapılan analiz sonucunda, zeminde tünel kazısı kaynaklı % 2 hacim kaybı gerçekleşmesi durumunda yapılarda ön görülen maksimum hasar sınıfının 4-5 (fonksiyonel, ağır-çok ağır hasar) olduğu görülmüştür. Binaların yapısal hasar durumlarındaki farklılıkların dikkate alınması sonucunda ise yapı stabilitesini etkileyebilecek problemlerin oluşması muhtemel görülmektedir. Tüm bu veriler TBM tünel kazılarının ek tedbir alınmadan yapılamayacağını göstermiştir.

## 2.1. Sayısal Analiz

Hacim kaybı ve oturma kontrolüne yönelik Projenin Teknik Şartnamesinde (AYGM, 2015) verilen esaslara göre; örtü kalınlığının tünel çapının iki katından daha az olduğu kesimlerde hacim kaybı %1'den az iken örtü kalınlığının tünel çapının iki katından daha büyük olduğu kesimlerde hacim kaybı %1,5'tan büyük olmayacaktır. Bundan dolayı öncelikle hacim kaybının %1,5 olarak gerçekleşmesi hali için analiz yapılmış, verili koşullar altında oluşan kritik sonuçlara bakılarak ve 600 metre geride yaşanan istenmeyen durum da dikkate alınarak hacim kaybı %2 alınarak hesap tekrarlanmış, hesap modelleri ve analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

Yüzey yüklemeleri, etki alanında kalan yapılar soldan sağa doğru sırasıyla KIR-14, KIR-13, KIR-12 ve KIR-11 nolu binaları tarifleyecek şekilde (kat yükseklikleri dikkate alınarak) sırasıyla 50 kPa, 50 kPa, 50 kPa ve 60 kPa olarak modele eklenmiştir (Şekil 3). Hesap modelinde kullanılan geoteknik parametreler ise Tablo 1'de verilmiştir. Hazırlanan sayısal (nümerik) modelde hesaplamalar aşağıdaki adımlar tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre; öncelikle idealize zemin profilinde yer alan tabakalar için tanımlanmış geoteknik tasarım parametreleri esas alınarak başlangıç gerilmeleri (in-situ gerilmeler,  $P_0$ ) tanımlanarak, yapı/bina, temel tabanı seviyesinde kat başına 10 kPa'lık değere sahip bir sürşarj yükü olarak modellenmiştir. Sonrasında ilk tünelin kazısı, kazı sınırı içerisinde kalan zemin elemanların inaktif hale getirilmesi ve aynı aşamada ön görülen hacim kayıplarının tarifi ve ring montajının benzeştirilmesi için, ilk tünelin kaplama elemanları aktif hale getirilmiştir. İkinci tünelin kazısı da birinci tünel kazısında uygulanan aynı prosedür tekrar izlenerek tamamlanmıştır. 30 cm kalınlığında, C40/50 beton sınıfı ile ön üretimli olarak imal edilecek tünel segmentlerden oluşan kaplamanın elastisite modülünün (E) 35 GPa olduğu kabul edilmiştir. Zeminin jeolojik özelliklerine bakıldığında, 1-2 çap seviyelerdeki örtü kalınlığının ve çift tüp tünellerin birbirine olan etkisi de düşünüldüğünde, TBM kazısından kaynaklı meydana gelmesi muhtemel 1,00%, 1,50% ve 2,00% hacim kayıpları durumu alternatifleri değerlendirilmiştir.



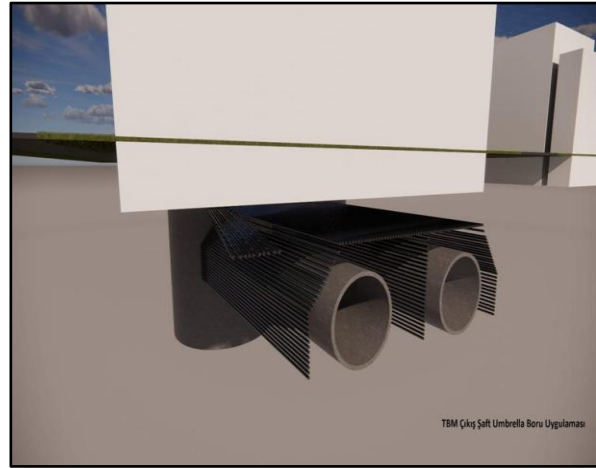
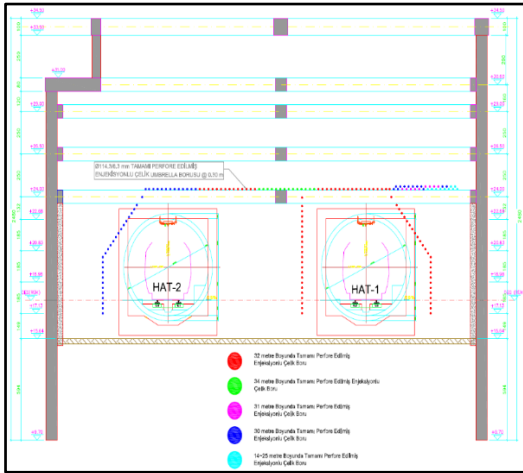
Şekil 3. Seçilen kritik kesitte %2 hacim kaybının gerçekleşmesi durumunda yüzey yapıları için hesaplanan çift tüp tünel kazısı sonrası düşey oturma değerleri ve tasarlanan 2D sonlu elemanlar hesap modeli (Prota Mühendislik, 2021)

## 3. EK DESTEK ÇÖZÜM YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

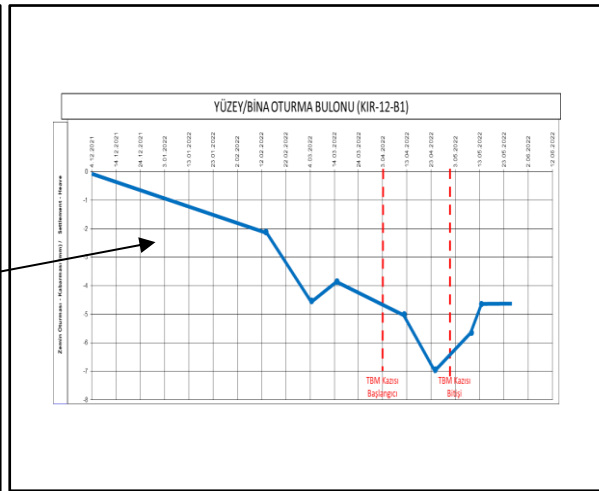
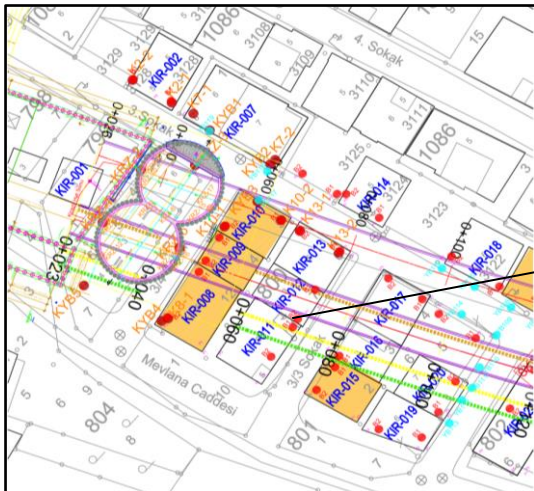
Zemin kaybı yaşanmaması ve yüzeydeki riskli yapılarda yapısal bir hasara yol açmamak için TBM tahliye shaftı içerisinde yaklaşık 30-35 metre geriye doğru, üstteki tüm binaların altında yatay ve düşey uygulanan işinsal



çelik borularla zemin altında adeta dikdörtgen kesitli kafesler oluşturularak, TBM kazıları sırasında meydana gelebilecek deplasmanların sınırlandırılması hedeflenmiştir. Uygulanacak olan enjeksiyonlu borular, söz konusu riskli binaların temellerini planda yaklaşık olarak 5 metre mesafede geçecek şekilde projelendirilmiştir. TBM makinesinin kırıcı kafası şaft kazıklarına dayandığında arkasındaki 9-10 metrelik bölümünde segment montajı yapılamayacağından aynada ve TBM üzerinde hacim kayıpları yaşanması muhtemeldir. Bunun önüne geçmek ve segmentsiz bölgede çelik boruların altını da desteklemek için şaft aynasından yaklaşık 15 metre uzunluğunda basınçlı enjeksiyon ile zemin stabilitesinin artırılması da hedeflenmiştir. Şekil 4, Hat-1 ve Hat-2 metro tünelleri için uygulanan destek sistemlerinin kesit üzerinde göstermektedir. TBM makinalarının uyguladığı basıncın zeminde kabarmaya yol açmaması ve ilk varan makinenin itki kuvvetinin sonraki için gevşemiş zemin ortamı oluşturmaması için varış noktasında birbirine bir çaptan daha fazla yaklaşan iki TBM arasına ve TBM'lerin tüm çevresine, onları adeta kafese hapseden çelik borular uygulanmıştır. Böylece birinci TBM şafta yaklaştığında üç tarafı çelik borulardan ibaret olan, sınırlanmış bir zemin prizmasına girmiştir (Şekil 4). Etrafına uyguladığı basınç kabarmaya veya zemin kaybına yol açmadan soğurulmuştur. Bu amaçla ek destek imalatı öncesinde, imalat aşamasında ve sonrasında tünelde ve yukarıdaki binalarda gerekli olan deformasyon ölçümleri yapılarak uygulanan çözümün etkili olup olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. Hat-1 ve Hat-2 metro tünelleri için uygulanan destek sistemlerinin kesit üzerinde ve çelik borulardan oluşan kafes sisteminin 3B görüntüsü gösterilmesi



Şekil 5. Kirazlı şaftı yakınında KIR-012 nolu binada ek destek çözümü uygulaması sonrası oturma-zaman grafiği

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışma düşük örtü kalınlığı, suya doymun zemin ve yüzeyde eski binaların olduğu koşullar altında Bakırköy-Kirazlı metro tünel hattının Kirazlı kesiminde TBM'lerin varış şaftına yaklaştığı son bölümde, kazının emniyetli şekilde tamamlanabilmesi için geliştirilmiş ve uygulanmış özel bir geoteknik çözüm yöntemini açıklamaktadır. Bu kesimde karşılaşılan bu problem için geliştirilen çözüm yöntemi, öncelikle tünel hattı üstündeki binalarda yaşayan insanların can güvenliğini sağlamış, metro projesinin de öngörülen zamanda tamamlanmasını ve maliyetlerin; riskli binalar için kamulaştırma gereği oluşturmadan, verili koşullar altında “ekonomik” düzeyde olmasını sağlamıştır. Bu durum her açıdan kamu yararına fayda sağlayan bir uygulama sonucunu doğurmaktadır. TBM'lerin çelik borularla kafese alınması bir tür zemin destek ve iyileştirme önemi niteliğindedir. Bu durum karşısında zeminde tespit edilemeyen ve öngörülmeyen anomalilere karşı kazı sırasında zeminin stabil kalmasını sağlamak suretiyle güvenli kazı sağlarken optimize edilmiş bir özel destek sistemi ortaya çıkmıştır. Zemin içinde oluşturulan çelik kafes prizma ile kazı sırasında zemin kaybının ve olası yüzey oturmalarının azaltılması, tünel deformasyonlarının en aza indirilmesi ve aynı zamanda yeraltı suyunun boşalması veya olası boşluklardan meydana gelebilecek ani oturmaların kontrol altına alınması sağlanmıştır. Oturmanın potansiyel olarak meydana gelebileceği zemin ortamında çelik borularla TBM'leri kafese alma, bu problemin üstesinden gelmek için uygulanmış özel ek bir geoteknik önlem olmuştur. Tünel açmanın örtü kalınlığının az olduğu bu kesimde yüzeyde neden olabileceği yapısal hasarların oluşmasının önüne de bu yaklaşım ile geçilmiştir. Diğer yandan metro tünel çalışmalarında enstrümantasyon ve izleme, yer hareketini tespit etmek ve destekleyici önlemleri uygulamak proje güvenliği için kritik öneme sahiptir. Bu tür projelerde aynı koşullarla karşılaşılmaması halinde bu özel metodun uygulanması; can ve mal emniyetinin korunması açısından ekonomik bir uygulama tekniği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak örtü tabakası kalınlığının yetersiz ve üzerinde binalar olan yumuşak zemin ortamında TBM ile açılan şehir içi tünellerinin varış şaftında alınan özel önlemler sayesinde; benzer durumlar için emsal olacak özel ve hızlı bir çözüm geliştirilmiştir.

#### TEŞEKKÜR

*Yazar, verilerin kullanımından dolayı Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü'ne şükranlarını sunar. Yazar ayrıca bazı eleştirel yorumlarla makalenin gelişimine katkıda bulunan Doç. Dr. Ahmet KARAKAŞ ve Doç. Dr. Özkan CORUK'a teşekkür eder.*

#### KAYNAKLAR

- Arioğlu, B., Yüksel, A., Arioğlu, E., (2002), “İzmir Metrosu Ümmühan Ana Tüneli'nde Zemin Basıncı Dengeleme Tünel Metodu (EPBM) Uygulaması”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir
- Aygar, E. B. ve Gökçeoğlu, C. (2020), “Zayıf Zeminlerde Açılan Büyük Çaplı Bir Tünelin Destek Sistemi Tasarımı (Çukurçayır-2 Tüneli, Trabzon)”, MT Bilimsel, (18), 97-118.
- Kovari, K., Ramoni, M., (2006), “Urban tunneling in soft ground using TBM's”, Int Conf. & Exhibition on Tunneling and Trenchless Technology, Subang Jave-Selangor Darul Ehsan.
- Ocak, İ., (2007), “Metro kazılarında zor zemin şartlarında şaft inşası; Kadıköy-Kartal metrosu örneği”, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 20(2), 71 - 79.
- Prota Mühendislik (2020), “Kirazlı - İncirli Arası Kesim İçin (Km:0+020-4+660) Oturma Analizi Ve Bina Hasar Değerlendirme Raporu”, 596 s.
- Prota Mühendislik (2021), “Kirazlı – Molla Gürani Kesimi İçin (Km:0+020 – 0+620) Risk Değerlendirme Raporu”, 54 s.
- AYGM (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü) (2015), Bakırköy – Bahçelievler – Kirazlı (Bakırköy İdo-Kirazlı) Metrosu İnşaat Ve Elektromekanik Sistemleri Temin, Montaj ve İşletmeye Alma İşleri Cilt:3 Teknik Şartname. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı

