



Araştırma Makalesi / Research Article

İstanbul'da Zayıf Jeolojik Ortamlarda Metro Tüneli Kazılarının Neden Olduğu Oturma Teknesindeki Değişimler

Changes in Settlement Troughs Induced by Subway Tunnel Excavations in Weak Geological Environments in Istanbul

Candaş TOPAL^{1,*} , Yılmaz MAHMUTOĞLU¹ 

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü-İstanbul

Geliş (Received): 10 Nisan (April) 2022, Düzeltme (Revised): 15 Mayıs (May) 2022, Kabul (Accepted): 24 Mayıs (May) 2022

ÖZ

Kentlerde artan nüfusun beraberinde getirdiği toplu taşıma problemleri pek çok modern şehirde, toplu taşıma sistemlerinin yeraltına taşınmasıyla çözülmeye çalışılmaktadır. Bu kapsamda yeni metro hatlarını oluşturabilmek için pek çok lokasyonda, geometri ve erişimle ilgili proje kriterleri sınırlamaları gereği sığ ve zayıf jeolojik ortamlarda, birbirine yakın çoklu yeraltı kazıları gerçekleştirilmektedir. Bu kazılar neticesinde, etkileşim alanı içerisinde kalan bölgedeki yapılarda ciddi hasarlara sebep olacak oturmalar gerçekleşmektedir. Çalışma kapsamında İstanbul'un Avrupa yakasında kazısı gerçekleştirilmiş olan Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı üzerinde bulunan 4, Ataköy-İkitelli Metro Hattı üzerinde ise 2 farklı lokasyonda kazı sürecini takip amacıyla ölçülen yüzey deformasyonu izleme verileri değerlendirilmiştir. Toplam 12 kesit üzerinde tünel kazılarının yüzeyde oluşturduğu oturma şekilleri incelenmiştir. İzleme verilerinden elde edilen çıktılardan analizinden, benzer jeolojik ortamda, aynı geometriye ve tünelcilik yöntemine sahip ardıl açılan tünellerden, önde ilerletilen tünelin geçtiği jeolojik ortamı örselediği, aynı kesitten geçen ikinci tünelin bu durum neticesinde yüzeyde artan ve asenkron gelişen bir oturma şekli oluşturduğu anlaşılmıştır. Bu sonuç, eksenleri yakın ve sığ derinliklerde açılan ikiz metro tünellerinde oturma teknesinin büyüklüğünü etkileyen malzeme parametresinin (*K*), tünel kazıları sonrası tekne oturma şeklinin kanatlarında farklı değerler aldığı ve bu durumun da yüzey oturma teknesinin şeklini değiştirdiği anlamına gelmektedir. Kayaç litolojisine bağlı olan "*K*" malzeme parametresindeki bu değişimin önceden kestiriminin, özellikle sığ derinliklerde ve zayıf jeolojik ortamlarda açılan çoklu tünellerin tasarım aşamalarında ileride doğabilecek riskleri azaltmak adına önemli olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İkiz Tünel, İstanbul Metrosu, Jeoteknik İzleme, Oturma Teknesi

ABSTRACT

Due to increasing urban populations, many modern cities attempt to solve problems associated with the increasing demand for public transportation by constructing these systems underground. To create new metro lines, multiple underground excavations must be carried out in several locations; these are often close to each other in shallow and weak geological environments due to geometric limitations as well as access-related restrictions. Settlement troughs can occur as a result of these excavations, potentially causing serious damage to the structures within the settling area. This study evaluated the data collected by monitoring the extent of surface deformation during the excavation process in four different locations on the Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Line as well as two different locations on the Ataköy-İkitelli Metro Line; all of these sites were located on the European side of Istanbul. The geometry of the surface settlement troughs that formed due to these tunnel excavations was examined; a total of 12 sections were investigated in this study. An analysis of the monitoring data reveals that, in similar

geological environments, successively excavated tunnels with the same geometry and tunnelling methods can disturb the geological environment through which the tunnels are constructed; in particular, if the second tunnel passes through the same section, this results in the formation of an increasing and asynchronous surface settlement trough. This result indicates that the material parameter (K), which affects the size of the settlement trough formed in scenarios with twin subway tunnels with close axes and that are excavated at shallow depths, has different values at the wings of the settlement trough that forms after the tunnels have been excavated, and that this change in K influences the shape of the surface settlement trough. This study suggests that predicting any changes in K , which is dependent on the characteristics of the surrounding rock, is important in order to mitigate any potential risks, especially at the design stage of any project that requires the excavation of multiple tunnels at shallow depths and in weak geological environments.

Keywords: *Twin Tunnel, Istanbul Metro, Geotechnical Monitoring, Settlement Trough*

NOTASYON

β	: Sınır Açısı
ϕ, ϕ'	: Efektif İçsel Sürtünme Açısı
γ_n	: Doğal Birim Hacim Ağırlık
σ_s	: Yapı veya Trafik Yükünden Kaynaklanan İlave Yük Miktarı
a, d	: Tünel Eksenleri Arasındaki Mesafe
BMP	: Bina Oturma Ölçüm Noktası (Building Measurement Settlement Point)
D	: Tünel Kazı Çapı
E	: Elastisite Modülü
EPB-TBM	: Pasa Basıncılı Tünel Delme Makinası (Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine)
H	: Örtü Kalınlığı
i	: Gauss Eğrisi Dönüm Noktası
i_1	: Birinci Tünel Kazısı Sonrası Oluşan Gauss Eğrisi Dönüm Noktası
$i_{2(btd)}$: İkinci Tünel Kazısı Sonrası Oluşan Gauss Eğrisi Dönüm Noktası- (Birinci Tünel Tarafı)
$i_{2(btu)}$: İkinci Tünel Kazısı Sonrası Oluşan Gauss Eğrisi Dönüm Noktası (İkinci Tünel Tarafı)
$i_{3(btd)}$: İki Tünel Kazısı Sonrası Oluşan Toplam Oturmaya Göre Gauss Eğrisi Dönüm Noktası (Birinci Tünel Tarafı)
$i_{3(btu)}$: İki Tünel Kazısı Sonrası Oluşan Toplam Oturmaya Göre Gauss Eğrisi Dönüm Noktası (İkinci Tünel Tarafı)
K	: Oturma Teknesi Genişlik Parametresi (Yer Malzemesi Parametresi)
K_1	: Birinci Tünel Kazısı Sonrası Elde Edilen Oturma Teknesi Genişlik Parametresi
$K_{2(btd)}$: İkinci Tünel Kazısı Sonrası Elde Edilen Oturma Teknesi Genişlik Parametresi- Birinci Tünel Tarafı
$K_{2(btu)}$: İkinci Tünel Kazısı Sonrası Elde Edilen Oturma Teknesi Genişlik Parametresi- Birinci Tünel Tarafından Uzaklaşan
$K_{3(btd)}$: İki Tünel Toplam Kazısı Sonrası Elde Edilen Oturma Teknesi Genişlik Parametresi- (Birinci Tünel Tarafı)
$K_{3(btu)}$: İki Tünel Toplam Kazısı Sonrası Elde Edilen Oturma Teknesi Genişlik Parametresi (İkinci Tünel Tarafı)
KH	: Kesit Hattı
S	: Tünel Merkez Hattından Belirli Bir Yatay Mesafede Oluşan Yüzey Oturması
S_{max}	: Maksimum Yüzey Oturması
SMP	: Yüzey Oturma Ölçüm Noktası (Surface Settlement Measurement Point)
TBM	: Tunnel Boring Machine (Tünel Açma Makinası)
x	: Tünel Merkez Hattından Yatay Mesafe
YASS	: Yeraltısuyu Seviyesi
Z_0	: Eşdeğer Tünel Ekseni Derinliği

GİRİŞ

Megakentlerde artan kent nüfusunun, ulaşım problemleri üzerinde büyük ve olumsuz etkisinin olduğu açıktır. Bu problemi çözebilmek için pek çok gelişmiş şehirde toplu ulaşım sistemleri yeraltına taşınmaktadır. Bu sayede daha fazla kişi uzak mesafelere hızlı ve ekonomik olarak şehir trafiğini zorlamadan taşınırken, ulaşım konforu da beraberinde arttırılmaktadır. Bu sebeple, metro hatlarının inşaatı sırasında birbirine yakın çoklu kazıların yapılması kaçınılmaz hale gelmektedir.

Özellikle sığ derinliklerdeki zayıf ortam koşullarında açılan yeraltı kazıları, kent altyapısında ve yüzeydeki yapılarda hasarlara neden olabilmektedir. Bu sorunlar, proje maliyeti ile çevre sağlığı ve güvenliği açılarından ciddi yükleri ve riskleri de beraberinde getirmektedir.

Bu riskleri en aza indirmek amacıyla, son yıllarda modern teknolojik imkanlar kullanılarak, kazı aynasında ve kazı çeperindeki örtü yükünü dengeleyen makinalı (EPB-TBM) kazılar yapılmakta, kazıların yüzeye yansıyabilecek etkileri önceden projelendirilen noktalarda yapılan periyodik ölçümlerle denetlenmektedir.

Kazı bağımlı oluşan düşey deformasyonların, tekil kazılar ile olan ilişkisi değişik jeolojik ortamlar için literatürde kapsamlı olarak ele alınmıştır ve konuyla ilgili ampirik ve analitik çözümler önerilmiştir. Ancak uygulamada kent içi ulaşımına yönelik çift hatlı, birbirine paralel ve yakın mesafelerde açılmakta olan tüneller için, literatürde sunulan tekil ve çoğul kazılar için geliştirilen yaklaşımların geçerli olmayabileceği sıkça yaşanan vakalardan anlaşılmaktadır.

Tünellerin açımı sırasında çoğu zaman teorik açıdan benzer ikiz tünel kazılarından biri önden diğeri arkadan yürütülmektedir. Proje karakteristikleri nedeniyle tünel kazıları arasındaki yatay mesafe olabildiğince sınırlı

tutulmaktadır. Dolayısıyla bu tür çoklu kazılar birbiri ile gecikmeli de olsa etkileşmektedir. Yapılan çalışmalar, önde yürütülen kazının jeolojik ortamda örselenmeye neden olduğunu, dolayısıyla arkadan gelen tünelin açıldığı ortam aynı olsa bile, teorik olarak önden ilerletilen kazı nedeniyle örselendiği, bu nedenle de ortamın jeomekanik parametrelerinde negatif yönde bir değişimin olduğunu göstermektedir. Arkadan gelen tünelin önde yürütülen tünelin etki alanı içerisinde kalması durumunda daha zayıf bir ortamdan geçmesi söz konusu olmaktadır. Bu durum tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey oturma şekilleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Genel şekliyle birinci tünelin kazısı sonrası yüzeyde oluşan oturma teknesi en kesiti Gauss Eğrisi ile tanımlanmaktadır. İkinci tünelin kazısından sonra bu teknenin şekli, eğrinin birinci tünele yakın olan tarafı ile ikinci tünele yakın olan tarafı üzerinde farklılaşarak asimetric bir hal almaktadır. Bu sonuç, tünellerin yüzeyde oluşturdukları etki alanlarının birinci ve ikinci tüneller için farklı bölgeleri etkilediğini göstermektedir.

Art arda, aynı kotta açılan, yatayda birbirine yakın tünel kazıları sırasında, önde ilerletilen kazının jeolojik ortamda geçerli sınır koşullarında kötüleşmeye neden olduğu, dolayısıyla arkadan gelen ikinci tünelin önde ilerletilen tünelin örselenmiş olduğu ortamlarla etkileştiği belirlenmiştir (Mahmutoğlu, 2011; Wang vd., 2018). Bu nedenle, birinci tüpün oluşturduğu maksimum yüzey oturmasının, aynı çap ve kazı geometrisine sahip ikinci tüpün geçişi sonrasında arttığı ve oturma teknesinin ikinci tünelin üzerine doğru asimetric olarak kaydığı görülmüştür. Araştırma bulguları maksimum oturmanın ikinci tünelin üzerinde geliştiğini, oturma teknesinin ise kayda değer oranda büyüdüğünü ortaya koymuştur. Martos (1958), maden kazılarına bağlı gelişen yüzey

deformasyonlarının oturma şeklinin Gauss Eğrisi (normal dağılım) ile tanımlanabileceğini önermiştir. Schmidt ve Peck (1969)'da aynı şeklin tek tüpten oluşan tünel kazıları üzerinde oluşabileceğini belirtmiştir. O'Reilly ve New (1982) Gauss modelini geliştirerek tek tüplü tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey oturma profilinin Şekil 1'de gösterilen biçimde gelişeceğini belirtmiş, oturma (S) miktarının kestirimi için Eşitlik 1'de verilen bağıntıyı önermiştir. Eşitlikte, S_{max} maksimum yüzey oturmasına, x yataydaki mesafeye, i oturma eğrisi dönüm noktasına karşılık gelmektedir.

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

Burada: $i - K \cdot Z_0$ oturma eğrisinin dönüm noktası, K ise zemin türüne ve özelliklerine bağlı oturma teknesi genişlik parametresi olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle projelendirmede yeraltı kazılarının yüzeyde etkileyeceği alanın genişliğinin önceden kestirilmesi açısından K parametresinin doğru seçilmesi önem

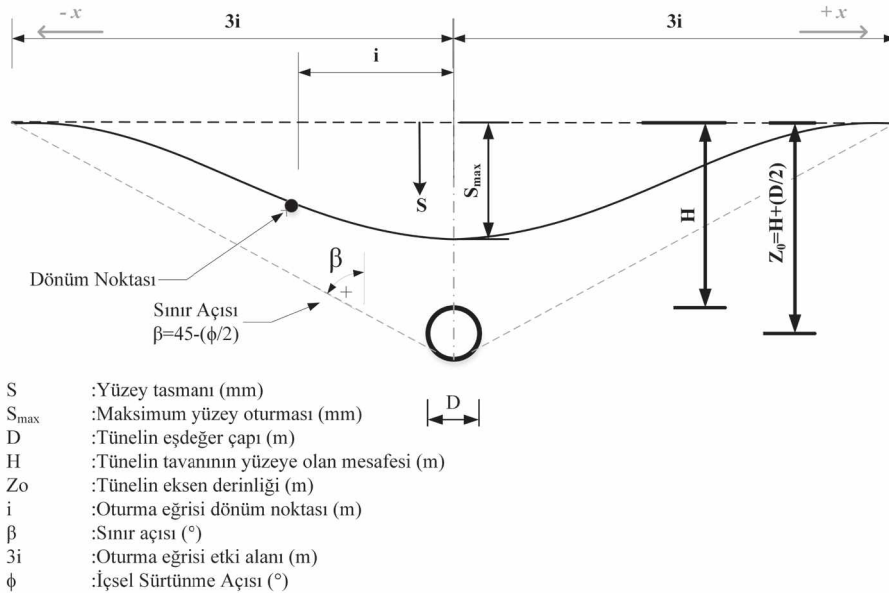
kazanmaktadır. Çizelge 1'de önceki çalışmalarda farklı zemin türleri için önerilmiş olan K değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 1. Farklı zemin türleri için önerilen K parametresi değerleri.

Table 1. K values proposed by previous researchers for different ground types.

Zemin Türü	K	Kaynak
Katı Killer	0.4	O'Reilly ve New, 1982
Kumlu Katı Killer	0.38-0.51 (0.82- 0.86)*	Mahmutoğlu, 2011
Yumuşak Siltli Killer	0.7	Glossop, 1978
Kil ve Granüler Karışık Zeminler	0.2-0.3	Rankin, 1988
Bütün Zeminler Ortalama	0.5	O'Reilly ve New, 1982, Glossop, 1978

* İkinci tüptün geçişinden sonra elde edilen değer



Şekil 1. Yeraltı kazılarına bağlı gelişen enine oturma teknesine ait tanımlamalar.

Figure 1. Definitions of the settlement trough induced by underground excavations.

Peck (1969)'in önerisine göre eğer iki tünel birbirine komşu olarak kazılırsa, ilk tünelin inşası sırasında meydana gelen gerilme boşalmasından dolayı, ikinci tünelin inşası aşamasında, ikinci tünelin kazısı sonucu yaratılan boşluğa doğru zemin hareketi daha büyük bir oranda gerçekleşmesi beklenir.

İkiz tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonlarının kestirimi çoğunlukla, iki ayrı tünelin (birinci ve ikinci tünel) yüzeyde oluşturduğu deformasyonların üst üste getirilerek hesaplanması üzerine kurgulanmıştır. Eşitlik 2 ve 3'te O'Reilly ve New (1982) ve Arioğlu (1992)'un ikiz tünel kazıları sonucu oluşan yüzey oturmalarının tahmini için geliştirdikleri yaklaşımlar sırasıyla belirtilmiştir. Bunlara ek olarak Herzog (1985); Fang vd. (1994); Addenbrooke ve Potts (2001); Hunt (2005); Chakeri ve Ünver (2013); Ağbay ve Topal (2020) tarafından da ikiz tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonlarının kestirimi çalışılmıştır.

$$S = S_{max} \left[\exp\left(\frac{-x_A^2}{2i^2}\right) + \exp\left(\frac{-(x_A - d)^2}{2i^2}\right) \right] \quad (2)$$

$$S_{max} = 4.71(\gamma_n Z_0 + \sigma_s) \left(\frac{D^2}{(3i + a)E} \right) \quad (3)$$

Çalışma kapsamında İstanbul'un Avrupa yakasında kazısı gerçekleştirilmiş olan Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı üzerinde bulunan dört, Ataköy-İkitelli Metro Hattı üzerinde ise iki farklı lokasyonda kazı sürecini takip amacıyla ölçülen yüzey deformasyonu izleme verileri değerlendirilmiştir.

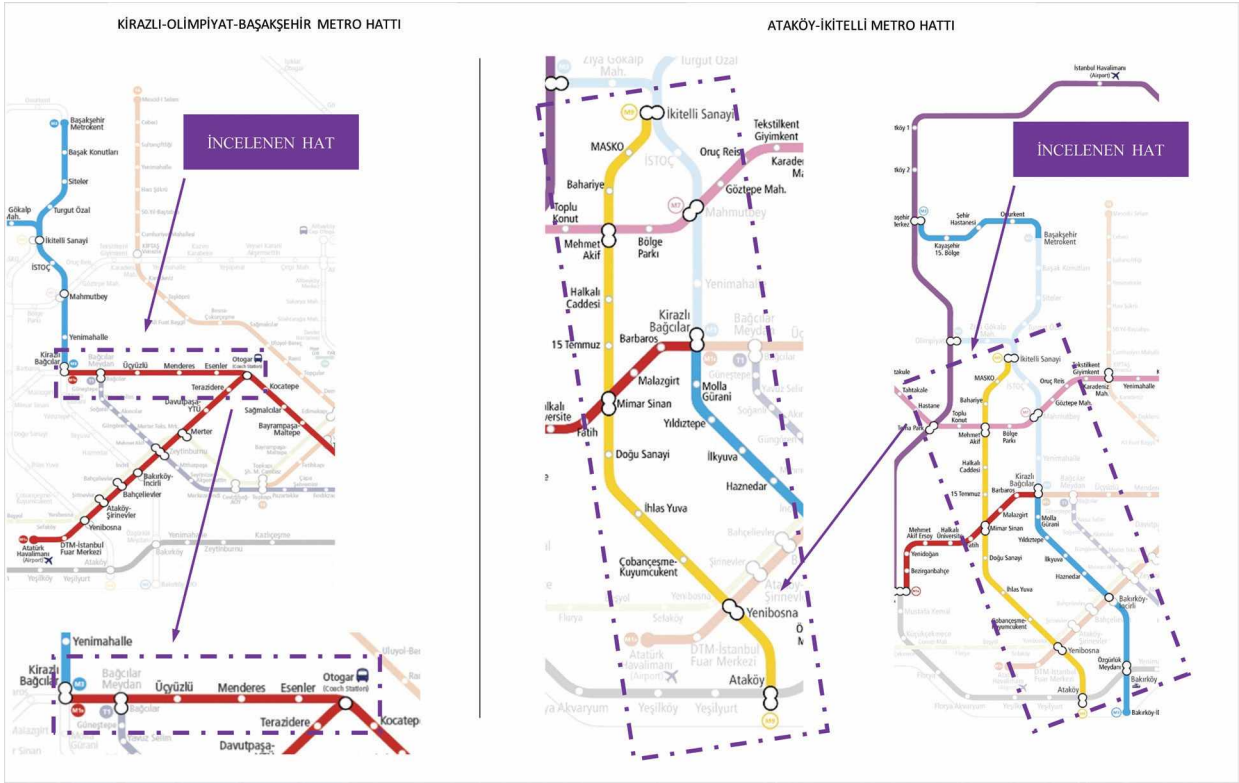
İNCELEMAYA KONU METRO HATLARI

Metro Hatlarının Konumu ve Değerlendirilen İzleme Kesitleri

Çalışma kapsamında, İstanbul ili içerisinde inşası gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilmekte olan Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı (km 0+900.00-1+000.00, km 1+850.00-1+900.00, km 4+360.00-4+470.00 ve km 9+800.00-9+740.00) ve Ataköy-İkitelli Metro Hattı (km 8+760.00-8+860.00, km 9+740.00-9+800.00)'na ait yüzey deformasyonu izleme verileri değerlendirilmiştir (Şekil 2).

Bu lokasyonlar, İstanbul ilinin Avrupa yakasında, nüfus yoğunluğu fazla olan semtlere ulaşımı sağlayan hatlara karşılık gelmektedir. Bu bölgelerin araştırma için seçilmelerindeki temel neden, bölgelerde zayıf zemin şartlarının geçerli olması ve sığ tünel kazılarının neden olacağı yüzey deformasyonlarının kentsel alanda hasar riski oluşturmasıdır.

Kazılar sırasında oluşan olumsuz etkileşim, özellikle zayıf zemin koşulları ve sığ tünelcilik faaliyetlerinin gerçekleştirildiği Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro hattında karşılaşılmıştır. Şekil 3'te bu hattın farklı lokasyonlarında karşılaşılan yüzey deformasyonlarının neden olduğu hasarlardan bazıları örnek olarak gösterilmiştir. Bu metro hattında özellikle kazıların sığ olduğu dört lokasyonda (km 0+900.00 - 1+000.00, km 1+850.00 - 1+900.00, km 4+360.00 - 4+470.00 ve km 9+800.00 - 9+740.00) izin verilebilir oturma miktarları (< 25 mm) aşılmıştır. Yer yer 100 mm'yi aşan oturmalarla karşılaşılmış, oluşan hasarlar proje maliyetinde kayda değer oranda artışa neden olmuştur.



Şekil 2. Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir ve Ataköy-İkitelli Metro Hat güzergahları.

Figure 2. Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir and Ataköy-İkitelli Metro Line routes.

Jeolojik-Jeoteknik Özellikler ve Tünel Açım Yöntemi

İncelenen hatların plandaki konumları, ölçüm kesitleri ve bu bölgede açılan sondajların logları Şekil 4 ve Şekil 5'te belirtilmiştir.

İstanbul'un batı kesiminin büyük bir bölümü, kumtaşı, siltaşı ve şeyl ardalanmasından oluşan ve konglomera katmanları içeren Alt Karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu ile kaplıdır. Formasyon içerisinde farklı kalınlıklarda andezit dayklar yaygındır. Avrupa yakasının güney kesimindeki, metro hatlarının geçtiği güzergahın temelini, marn, kil ve bazı zayıf çamurtaşları ile kalın tabakalı kalkerlerden oluşan Kırklareli Formasyonu oluşturmaktadır. Kırklareli Formasyonu, uyumsuz olarak, dayanımı düşük

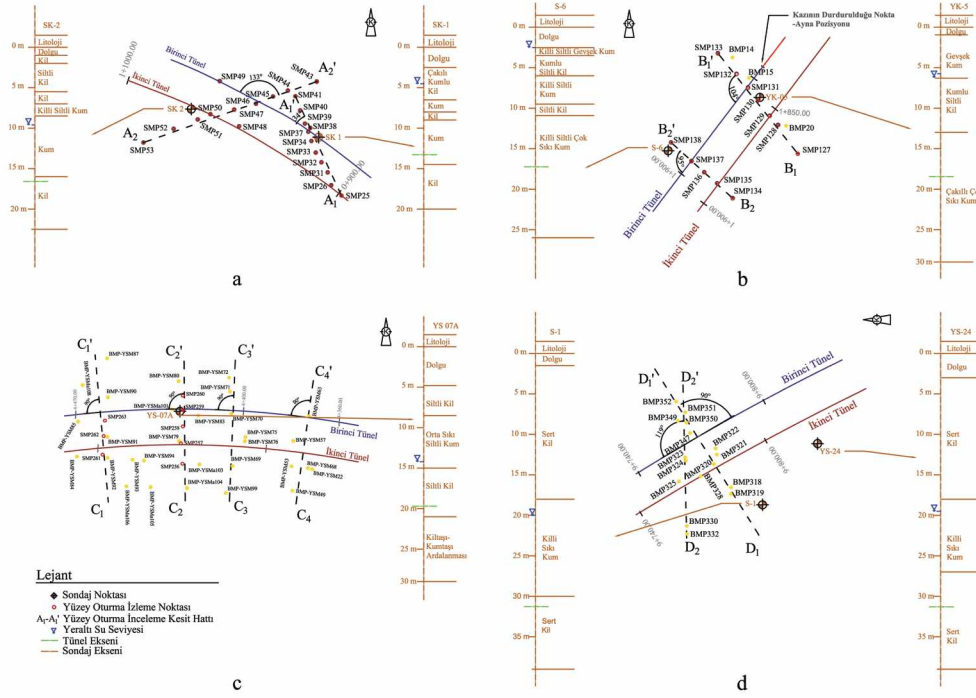
kayalardan oluşan yeterince pekişmemiş Miyosen yaşlı Çukurçeşme, Güngören ve Bakırköy üyelerinden oluşan Çekmece Grubu yer alır (Aric, 1955). İncelenen hatlarda tünel kazıları genellikle Miyosen yaşlı birimler içerisinde açılmıştır.

Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro hattının incelenen kesitlerinde, tünel kazıları çapı 6.5 m olan Herrenknecht ve Lovat marka EPB tip TBM makineleri ile gerçekleştirilmiştir. Ataköy-İkitelli Metro hattının incelenen kesitlerinde, tünel kazıları Tünel kazı çapı 6.57 m olan Herrenknecht marka EPB tip TBM makineleri ile gerçekleştirilmiştir. İncelenen bölgelerin jeoteknik özellikleri Çizelge 2'de belirtilmiştir.



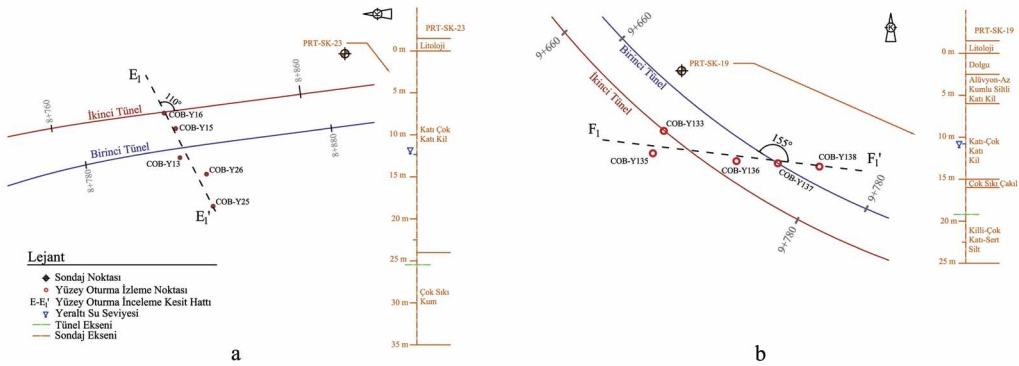
Şekil 3. Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro hattındaki ikiz tünel kazılarının yüzeye ulaşan etkileri.

Figure 3. Typical hazards caused by twin tunnel excavations along the Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro line.



Şekil 4. Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı incelenen kesitler ve sondaj logları ((a) km 0+900.00-1+000.00, (b) km 1+850.00-1+900.00, (c) km 4+360.00-4+470.00 ve (d) km 9+800.00-9+740.00).

Figure 4. Borehole logs and cross-sections of Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Line ((a) km 0+900.00-1+000.00, (b) km 1+850.00-1+900.00, (c) km 4+360.00-4+470.00 and (d) km 9+800.00-9+740.00).



Şekil 5. Ataköy-İkitelli Metro Hattı incelenen kesitler ve sondaj logları ((a) km 8+760.00-8+860.00, (b) km 9+740.00-9+800.00).

Figure 5. Borehole logs and cross-sections of Ataköy-İkitelli Metro Line ((a) km 8+760.00-8+860.00, (b) km 9+740.00-9+800.00).

Çizelge 2. Tünel eksenleri arası mesafe (x), aks derinlikleri (Z_0), yeraltı su seviyeleri (Y_{ASS}) ve incelenen kesitlerin detay tanımlamaları.
Table 2. Distance between tunnel axes (x), axis depths (Z_0), groundwater levels (Y_{ASS}) and detailed descriptions of the monitoring arrays.

Lokasyon	Hat		Litoloji	Açıklama
	Başlangıçta Olan Uzaklık	Kesit Hattı		
Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı	km 0+900 - km 1+000	A_1A_1'	Killi Siltli Kum	Bölgede gerçekleştirilen kazılarda, kazı emniyeti açısından birinci tünel, ikinci tünelin yaklaşık 80 m önünde iletilemiştir. Değerlendirilen en kesitlerden önce birinci tünel, yaklaşık 40 gün sonra ise ikinci tünel geçirilmiştir. Bu bölge, Erçelebi vd. (2011) tarafından da sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir.
		A_2A_2'		
	km 1+850 - km 1+900	B_1B_1'	Kum-Kumlu Siltli Sert Kil	Anahat tünelin sağ derinliklerden geçtiği bu kesimde, ($Z_0/D \approx 2.8$) aşırı oturmalarla karşılaşmıştır. Bu bölgede birinci tünel üzerindeki oluşan göçük nedeniyle tünel kazısı durdurulmuş ve ikinci tünel kazısına devam edilmiştir. Bu sebepten dolayı, izleme verileri analizinin sonucu tek tünel kazısı için değerlendirilmiştir.
		B_2B_2'		
Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı	km 4+360 - km 4+470	C_1C_1'		Hattın bu kesiminden (km 4+300.00 - km 4+500.00) eski ve küçük bir akarsu yatağı geçmektedir. Bölgede gerçekleştirilen tünelcilik faaliyetleri neticesinde, projede öngörülen maksimum oturma değerinin (İşveren teknik şartnamelerine göre kabul edilebilir limit değer <25 mm) çok üzerinde yüzey oturmaları ile karşılaşmıştır. Oturma bağımlı hasarları sınırlandırmak için inceleme bölgesinde derinliği 15-25 m arasında değişen 248 adet zemin iyileştirme amaçlı enjeksiyonu sondajı açılmıştır. Bu sondajlarda su/çimento oranı 1 olan çimento enjeksiyonu 2 barlık basınç altında uygulanmış olup, iki aya yakın zaman alan uygulamada toplam 135.2 ton çimento kullanılmıştır (Güven, 2008).
		C_2C_2'		
		C_3C_3'	Kil-Sıki Siltli Kum	
	C_4C_4'			
Ataköy İkitelli Metro Hattı	km 9+740 - km 9+800	D_1D_1'	Sıki Killi Siltli Kum	Bölgede gerçekleştirilen tünelcilik faaliyetlerinde birinci tünelin kazısında kullanılan makine ikinci tünelin aynasının yaklaşık 70 m önünde iletilemiştir. Tünelin aynı kesit hattından geçişleri arasında yaklaşık 12 günlük bir fark bulunmaktadır. Bu alanda tünel kazısı sonrası gelişen yüzey oturmaları Demir (2018) tarafından da değerlendirilmiş ve D1-D1' kesiti için, birinci ve ikinci tünel için K parametreleri sırasıyla 0.29 ve 0.50 olarak belirlenmiştir.
		D_2D_2'		
	km 8+760 - km 8+860	E_1-E_1'	Katı-Çok Katı Kil	Yüzey oturma bulonları uygun alanlar seçilerek tesis edilmiş olduğundan incelenen kesit ile tünel güzergâhları arasında açılacak farklılıklar oluşmuştur. E1-E1' kesiti tünel hattını 110 derecelik açıyla kesmektedir. İnceleme bölgesinden önce birinci tünel, yaklaşık 46 gün sonra ise ikinci tünel geçmiştir.
		F_1-F_1'	Katı-Çok Katı Kil, Az Kumlu Siltli Kil	Yüzey oturma bulonları uygun alanlar seçilerek tesis edilmiş olduğundan incelenen kesitler ile tünel güzergâhları arasında açılacak farklılıklar oluşmuştur. F1-F1' kesiti tünel hattını 155 derecelik açıyla kesmektedir. İnceleme bölgesinden önce birinci tünel, yaklaşık 20 gün sonra ise ikinci tünel geçmiştir.

Topal, Mahmutoğlu

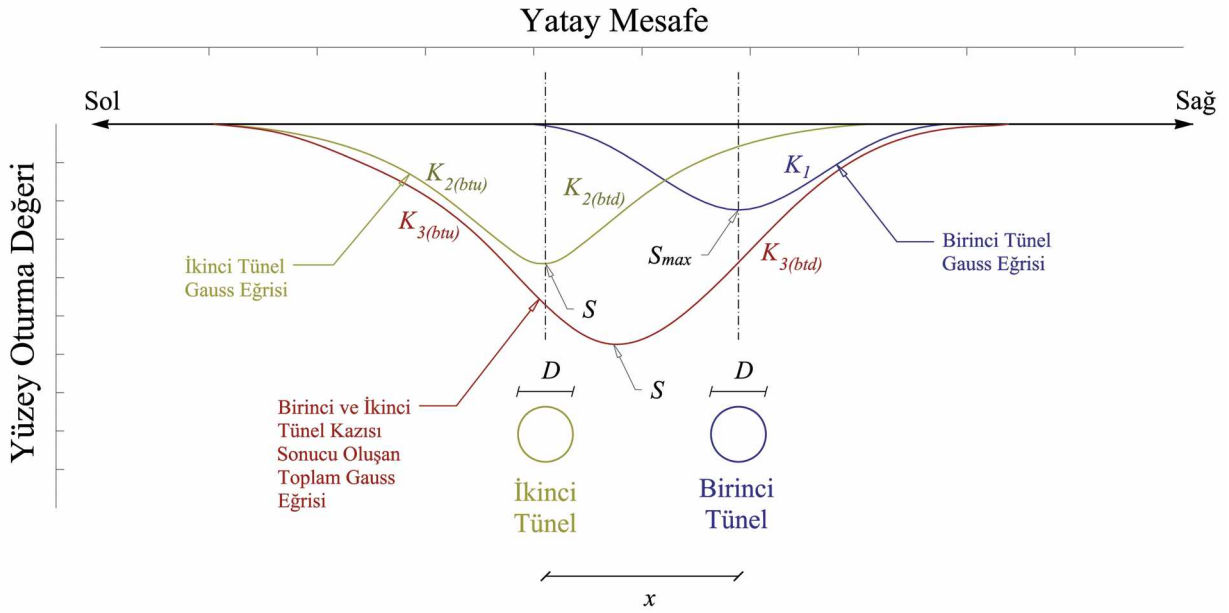
Çizelge 3. Gerçek saha verilerinden elde edilen yüzey oturma eğrisi (i) dönüm noktası ve yer malzemesi (K) parametrelerinin karşılaştırması.

Table 3. Values of the inflection point (i) and dimensionless trough width parameter (K) obtained for the monitoring arrays

Lokasyon	Hat	Başlangıcına Olan Uzaklık	Örtü Tabakası	KH	YASS (m)	x (m)	Z ₀ (m)	Z ₀ /D	Sadece Birinci Tünel			Sadece İkinci Tünel			İki Tünel Toplam																																	
									i ₁ (m)	K ₁	i _{2(bud)} (m)	K _{2(bud)}	i _{2(bud)} (m)	K _{2(bud)}	i _{3(bud)} (m)	K _{3(bud)}	i _{3(bud)} (m)	K _{3(bud)}																														
Km 0+900-1+000	Kıllı Siltli Kum	A ₁ -A ₁ '	-4.5	14.3	14.5	2.23	5.38	0.371	11.54	-1	0.796	-1	12.00	-1	0.828	-1																																
																	Kıllı Siltli Kum	A ₂ '-A ₂ '	-9.5	14.3	16.6	2.55	7.69	0.463	10.00	6.92	0.602	0.417	14.62	10.46	0.880	0.630																
																																	Kum-Kumlu Siltli Sert Kil	B ₁ -B ₁ '	-5.8	14.8	17.3	2.66	8.46	0.489	-2	-2	-2	-2	-2	-2		
																																															Kum-Kumlu Siltli Sert Kil	B ₂ -B ₂ '
Km 1+850-1+900	Kil-Sıkı Siltli Kum	C ₁ -C ₁ '	-14.2	14.8	20.8	3.20	11.54	0.555	10.77	10.40	0.518	0.500	19.69	11.08	0.947	0.533																																
																	Kil-Sıkı Siltli Kum	C ₂ -C ₂ '	-14.2	14.8	20.2	3.11	10.77	0.533	10.00	9.23	0.495	0.457	19.23	10.15	0.952	0.503																
																																	Kil-Sıkı Siltli Kum	C ₃ -C ₃ '	-14.2	14.8	20.0	3.08	10.77	0.538	10.00	8.92	0.500	0.446	18.31	9.69	0.915	0.485
Km 4+360-4+470	Sıkı Kil-Kıllı Sıkı Kum	D ₁ -D ₁ '	-20.0	15.0	31.3	4.82	7.69	0.246	8.46	8.46	0.270	0.270	13.85	11.54	0.442	0.369																																
																	Sıkı Kil-Kıllı Sıkı Kum	D ₂ -D ₂ '	-20.0	15.0	31.3	4.82	6.92	0.221	9.23	7.69	0.295	0.246	14.62	12.31	0.467	0.393																
																																	Kıllı Siltli Kum	E ₁ -E ₁ '	-12.3	15.0	25.4	3.91	16.62	0.654	11.54	-1	0.454	-1	21.54	-1	0.848	-1
Ataköy İkitelli Metro Hattı	Kil, Az Kumlu Siltli Kil	Kıllı Siltli Kum	-10.8	15.7	19.2	2.95	9.23	0.481	9.54	8.46	0.497	0.441	17.23	10.00	0.897	0.521																																
																	Kıllı Siltli Kum	Kıllı Siltli Kum	-10.8	15.7	19.2	2.95	9.23	0.481	9.54	8.46	0.497	0.441	17.23	10.00	0.897	0.521																
																																	Kıllı Siltli Kum	Kıllı Siltli Kum	-10.8	15.7	19.2	2.95	9.23	0.481	9.54	8.46	0.497	0.441	17.23	10.00	0.897	0.521

¹ Bu kesimde yüzey oturma noktalarının yerleşimine uygun lokasyonlar bulunmaması nedeniyle Gauss eğrisi elde edilememiştir² Bu lokasyonda sadece tek tünel ilerletilmiştiri = KZ₀

Tünel Kazı Çapı (D) = 6.5 m



Şekil 6. Tünel kazılarına bağlı değişen Gauss eğrilerinin şematik gösterimi.

Figure 6. Schematic representation of varying Gaussian curves induced by tunnel excavations.

İZLEME VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İzleme verileri aşağıda belirtilen adımlar izlenerek değerlendirilmiştir.

1. Projede izin verilebilir oturmaların aşıldığı veya kritik değerlere ulaştığı bölgeler seçilmiş, izleme noktalarının konumları (SMP, BMP vb.) mevcut planlar üzerinde gösterilmiştir.
2. Bu planlar göz önünde tutularak analiz edilecek kritik en kesitler belirlenmiştir.
3. Kritik en kesitler üzerindeki oturmalar, birinci ve ikinci tünellere karşılık gelen kazılar dikkate alınarak zamana bağlı olarak ilişkilendirilmiştir.
4. Oluşturulan en kesitler üzerinde, birinci ve ikinci tünelin geçişi sırasında oluşan oturma teknesi (Gauss eğrisi), izleme verilerinden hareketle belirlenmiş ve değerlendirilmiştir (Şekil 6).
5. Birinci ve ikinci tünellerin geçişleri sonrası oluşan enine oturma eğrisi dönüm noktaları, $i=KZ_0$ (O'Reilly ve New, 1982) eşitliğinden hareketle aşağıda belirtilen adımlar izlenerek belirlenmiştir.
 - a. Birinci tünel kazısı sonrası oluşan yüzey oturma eğrisi, Eşitlik 2.1'den elde edilen Gauss eğrisi ile karşılaştırılarak ilk tünel için oturma eğrisi dönme noktası (i_1) ve oturma teknesi genişlik parametresi (K_1) değerleri belirlenmiştir.
 - b. Sadece ikinci tünelin kazısı sonucu oluşan oturma eğrisinin analizi için, iki tünelin kazısı neticesinde oluşan toplam oturma eğrilerinden birinci tünelin oluşturduğu oturma miktarları çıkarılarak ikinci tünelin tek başına oluşturduğu oturma eğrisi bulunmuştur. Elde edilen oturma teknesi şeklinin sağ ve sol kanatlarında asimetric bir yapı olduğu görülmüştür. Bu aşamada ikinci tünelin neden olduğu oturma

eğrisi dönme noktası (i_2) ve tekne genişlik parametresi (K_2) değerlerinin bulunması için, Eşitlik 2.1 ile elde edilen Gauss eğrisi, sağ ve sol kanatlar için ayrı ayrı oluşturularak ikinci tünelin oluşturduğu oturma profili ile karşılaştırılmıştır.

- c. İki tünelin toplam oturması sonucu oluşan nihai i_3 ve K_3 değerleri ise oluşan eğrilerin sağ ve sol kanatları ayrı ayrı teorik Gauss eğrileri ile karşılaştırılarak belirlenmiştir.

Belirlenen enine oturma teknesi dönüm noktası (i) ve zemin türünü temsil eden K parametrelerinin aldığı değerler Çizelge 3'te topluca verilmiştir.

Şekil 7 üzerinde D_1-D_1' ve D_2-D_2' kesitlerinden elde edilen sonuçlar kapsam dışı tutularak K ve Z_0/D değerlerinin tünel kazılarının farklı kademeleri için karşılaştırılmıştır. Oturma teknesi en kesitleri incelendiğinde, $K_{2(btd)}$ ve K_1 arasındaki oranın, kazı derinliği arttıkça azaldığı, Z_0/D 'nin 4'e yaklaştığı yerlerde bu oranın 0.69'a düştüğü, sığ derinliklerde ise bu oranın arttığı gözlenmektedir (Şekil 7a). Bu durum, sığ derinliklerde ikiz tünel kazılarının birbirleri üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu göstermektedir.

Şekil 7b, Çizelge 3 ile birlikte göz önünde tutulduğunda, sadece ikinci tünellerin neden olduğu oturma teknesi en kesitine ait $K_{2(btu)}$ ve $K_{2(btd)}$ değerlerinde asimetric bir farklılaşma olduğu görülmektedir. $K_{2(btd)}$ için elde edilen en büyük değer 0.8 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Z_0/D oranının 3.5'e yaklaştığı artan derinlik ile kademeli olarak $K_{2(btu)}$ 'ye yaklaşarak 0.45 düzeylerine düştüğü anlaşılmıştır.

Şekil 7c üzerinde, birinci ve ikinci tünellerin geçişi sonrası oluşan toplam oturma profillerinden elde edilen K_3 değerleri ile sadece

tek tünelin kazısına karşılık gelen K_1 değerleri Z_0/D oranı göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde ikinci tünel kazılarına bağlı olarak gelişen oturma eğrilerinin kanatlarında asimetriye bağlı farklılaşma olduğu anlaşılmaktadır (Topal ve Mahmutoğlu 2021; Topal, 2021).

SONUÇ VE ÖNERİLER

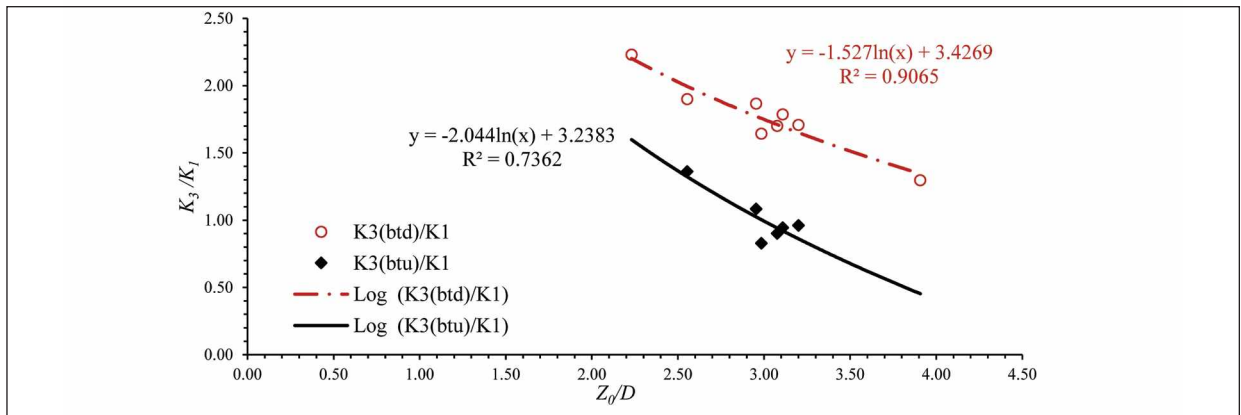
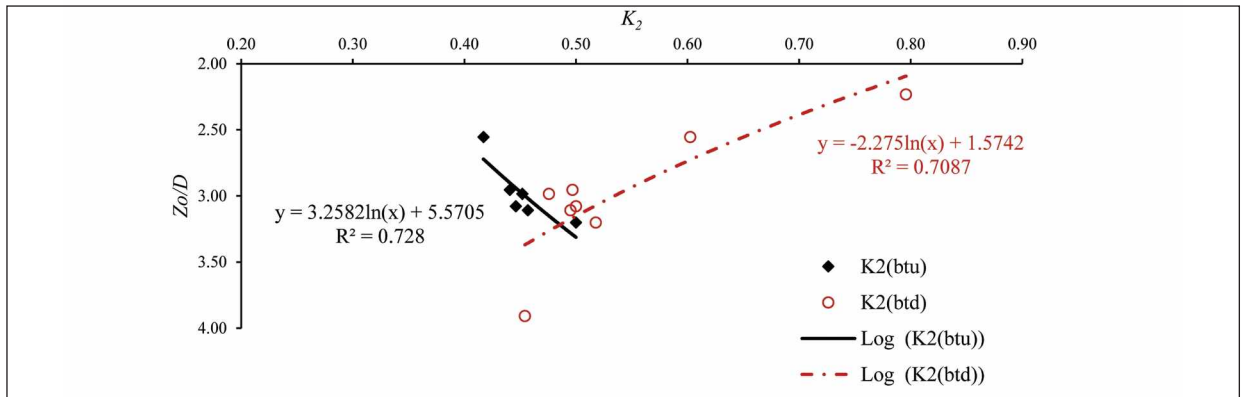
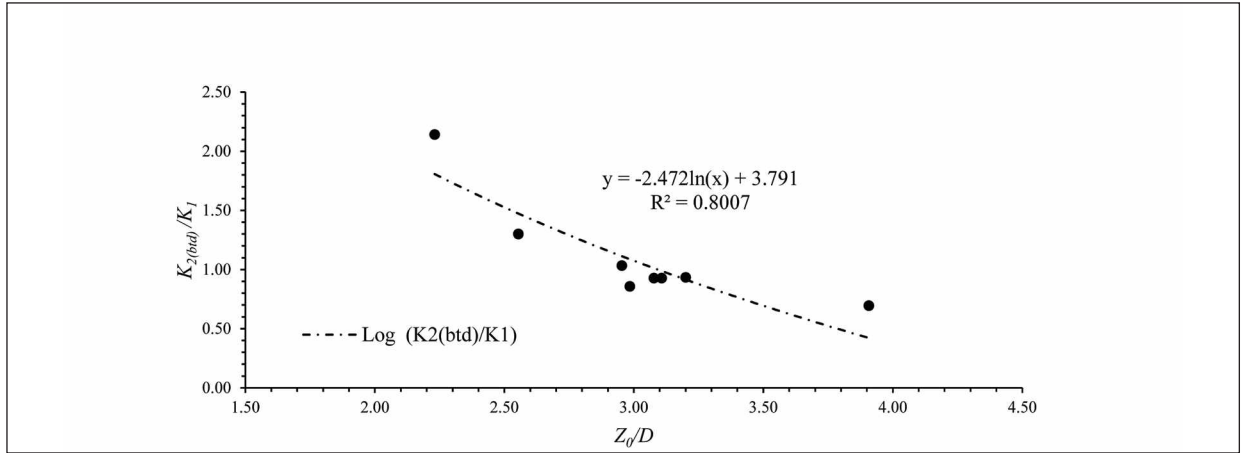
Ortaya konan sonuçlar, teorik olarak birbirine yakın, sığ ve zayıf ortamlarda aynı kotta açılan çoklu kazıların etkilediği alanların kısmen de olsa çakıştığını göstermektedir. İkinci tünelin yüzeyde etkilediği alanın büyümesi, önde ilerletilen tünelin neden olduğu örselenmeyle ilişkili olumsuz bir durum olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle, kent içi yeraltı kazılarının tasarımı, hasar riski taşıyan etkileme bölgelerinin tanımlanması ve izleme ağının oluşturulmasında bu sonucun göz önünde tutulmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.

Konvansiyonel ve mekanize tünel açma yöntemlerinde, jeolojik ortamda meydana gelen deformasyonların minimize edilebilmesi amacıyla kazı boşluğu kontrollü bir şekilde oluşturulmalı ve desteklenmelidir.

Kazı ve destek çalışmaları sırasında aşağıda belirtilen hususların dikkatli bir şekilde yönetilmemesi durumunda kazı açıklığı çevresinde oluşan deformasyonların artarak yüzeye yansıtacağı ve bu durumda proje emniyeti, süresi, bütçesi üzerinde olumsuz etkilerin oluşacağı görülmüştür.

Deformasyon kontrolü açısından öne çıkarılması gerekli hususlar;

- 1) Proje güzergahının jeolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik sınır koşulları dizayn aşamasından önce ayrıntılı şekilde araştırılmalıdır.



Şekil 7. K ve Z_0/D değerlerinin tünel kazılarının farklı kademeleri için karşılaştırılması.

Figure 7. Correlation of K values vs Z_0/D , corresponding to various stages of the twin tunnel excavations.

- 2) Jeolojik açıdan riskli bölgeler belirlenmeli ve risk analiz çalışmaları gerçekleştirilmelidir.
- 3) Risk analizleri dahilinde dizayn çalışmalarına başlanmalıdır.
- 4) Proje güzergahında kritik görülen yapılara hangi tür deformasyon izleme cihazlarının kaçar adet yerleştirileceği belirlenmelidir.
- 5) Proje uygulama aşamasında, tünel içi jeolojik izleme çalışmaları sürekli ve uzmanlar kontrolünde gerçekleştirilmelidir.
- 6) Tünel içi ve yüzey deformasyon izleme ağı ve izleme programları saha şartlarına ve risk analizlerine uygun olarak proje süresince modifiye edilmeli ve sistem bütünlüğü korunmalıdır.

KAYNAKLAR

- Addenbrooke, T. I., Potts, D.M., 2001. Twin tunnel interaction: surface and subsurface effects. *International Journal of Geomechanics*, 1(2), 249–271.
- Ağbay, E., Topal, T., 2020. Evaluation of twin tunnel-induced surface ground deformation by empirical and numerical analyses (NATM part of Eurasia tunnel, Turkey). *Computers and Geotechnics*, 119, 103367.
- Ariç, C., 1955. Haliç-Küçükçekmece Gölü Bölgesinin Jeolojisi. (Doktora Tezi), İ.T.Ü Maden Fakültesi, İstanbul, 45 s.
- Arioglu, E., 1992. Surface movements due to tunnelling activities in urban areas and minimization of building damages. short course, Istanbul Technical University, Mining Engineering Department (in Turkish).
- Chakeri, H., Ünver, B., 2013. A new equation for estimating the maximum surface settlement above tunnels excavated in soft ground. *Environmental Earth Sciences*, 71, 3195–3210. DOI 10.1007/s12665-013-2707-2.
- Demir, S., 2018. İstanbul Metroso Kirazlı-İkitelli Arasında İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Yüzey Oturmalarının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Ercelebi, S. G., Copur, H., Ocak, I., 2011. Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM. *Environmental Earth Sciences*, 62(2). <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0530-6>.
- Fang, Y. S., Lin, J. S., Su, C. S., 1994. An estimation of ground settlement due to shield tunnelling by the Peck-Fujita method. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3), <https://doi.org/10.1139/t94-050>.
- Glossop, N.H., 1978. Soil Deformation Caused by Soft Ground Tunneling, PhD Thesis, University of Durham.
- Güven, G., 2008. İstanbul Metroso Otogar-Kirazlı-1 Arasının Mühendislik Jeolojisi ve Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Deformasyonların Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Herzog, M., 1985. Die Setzungsmulde über saicht liegenden Tunneln. *Bautechnik (Berlin)*, 62(11), 375–377.
- Hunt, D., 2005. Predicting the ground movements above twin tunnels constructed in London Clay (Doctoral dissertation, University of Birmingham).
- Mahmutoğlu, Y., 2011. Surface subsidence induced by twin subway tunneling in soft ground conditions in Istanbul. *Bulletin of Engineering Geological Environment*, 70, 115–131, DOI 10.1007/s10064-010-0289-8.
- Martos, F., 1958. Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors. In: *International Strata Control Congress, Leipzig. Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Section für Bergbau. Berlin*, 191–205.
- O'Reilly, M. P., New, B. M., 1982. Settlements above tunnels in the UK—Their magnitude and prediction. *Proc., Tunnelling'82, IMM, London*, 173–181.

- Peck, R. B., 1969. Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 7(3).
- Rankin, W. J., 1998. Ground Movements Resulting from Urban Tunneling: Prediction and Effects. Engineering Geology of Underground Movements, Eds (F G Ball ve Ark.) Geological Society Publication, No.5.
- Schmidt, B., 1969. Settlements and ground movements associated with tunnelling in soil. PhD Thesis.
- Topal, C., Mahmutoğlu, Y., 2021. Assessment of surface settlement induced by tunnel excavations for the Esenler-Başakşehir (Istanbul, Turkey) Subway Line. Environmental Earth Sciences, 80(5), 1–16, <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09509-6>.
- Topal, C., 2021. Prediction of the Surface Deformations Induced By Shallow and Multiple Underground Excavations (Istanbul Subway) In Weak Geological Environments. Phd Thesis (in Turkish), Istanbul Technical University, Graduate School, Istanbul, Turkey.
- Wang, Z., Yao, W., Cai, Y., Xu, B., Fu, Y., Wei, G., 2018. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large diameter shallow-buried twin-tunnel in soft ground. Tunnelling and Underground Space Technology.