

EĞİMLİ TOPOĞRAFYALARDA AÇILAN TÜNELLERDE ÜÇÜNCÜ BOYUT ETKİSİ

Sinan Çakır¹, Havvanur Kılıç²

ÖZET

Gelişen şehirlerde alt yapı faaliyetleri çok önemlidir. Metro hatları ve şehir içi tünelleri metropol şehirlerde ulaşımın ve altyapının planlanması açısından vazgeçilmez inşaat faaliyetleridir. Tünelde gerçekleşmesi öngörülen deformasyon ve gerilmelerin 2D sonlu elemanlar yazılımlarıyla tahmin edilmesi oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bazı topoğrafya ve zemin koşullarında üçüncü boyutun da yapı davranışına etkileri önemli olmaktadır.

Bu çalışmada, eğimli bir topoğrafyada yan yana açılan iki metro tünelinin gerilme-şekil değiştirme davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda yüzey ve çevre yapılar da meydana gelen oturmalar geoteknik enstrümanlarla takip edilerek kayıt altına alınmıştır. Sahada gerçekleşen deformasyonlar, 2D ve 3D sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, eğimli bir topoğrafyada açılan tünellerde üçüncü boyutun etkisi araştırılmış ve yapıyı devam eden bu ikiz metro tünelleri için doğrulama analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: NATM tünel, Plaxis, Yeraltı Yapılar

ABSTRACT

Infrastructure activities play a crucial role in developing cities. Urban and suburban infrastructure investments are increasing proportionally with the population. Metro lines and urban tunnels have become indispensable construction activities for transportation and infrastructure planning in metropolis cities. Predicting deformations and stresses anticipated within tunnels using 2D finite element software is commonly employed. However, in certain topographical and soil conditions, the effects of the third dimension on structural behavior are paramount.

This study investigates the stress-strain behavior of two adjacent metro tunnels excavated in a sloping topography. In this context, settlements occurring on the surface and in surrounding structures have been continuously monitored and recorded using geotechnical instruments. The deformations observed in the field have been compared with the results of 2D and 3D numerical analyses. To this end, the impact of the third dimension on tunnels excavated in sloping topographies has been examined, and validation analyses have been conducted for these twin metro tunnels under construction.

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, sinan.cakir@std.yildiz.edu.tr

² Yıldız Teknik Üniversitesi, kilic@yildiz.edu.tr



Keywords: NATM tunnel, Plaxis, Underground structures.

1. GİRİŞ

İstanbul, dünyanın nüfusu en yoğun olan şehirlerindedir. Bunun gibi hızla gelişen ve büyüyen şehirlerde şehir planlanması oldukça zordur. Alt yapı faaliyetleri de şehirlerdeki refah düzeyinin artması, daha yaşanılabilir bir şehir olması için oldukça önemlidir. Metrolar yoğun nüfuslu büyük şehirlerde insanların rahat bir şekilde istedikleri yere gidebilmesi için ekonomik bir ulaşım aracıdır. Gelişen şehirlerde ulaşımın kolaylığı ve devamı açısından metro hatları olması gerekli hale gelmiştir (İh Feng & Wu vd., 2019). Metrolar yüzeyden gidebildiği gibi tüneller ile yerin altından da gidebilmektedir. Tünellerin tasarımını zemin cinsi, yerel suyu durumu, tünel kesiti, yüzeydeki yapılaşma vb. durumları etkilemektedir. Tüneller sığ ve derin olarak da iki farklı kategoride değerlendirilir (Towhata, 2008)

Günümüzde tünellerin tasarımında, etki alanına bağlı olarak matema ksel yöntemlerle yüzeyde gerçekleşecek olan oturma ve gerilme durumları tahmin edilebilmektedir. Bunun yanında 2D ve 3D sonlu eleman yazılımların yardımıyla da tasarım girdileri belirlenerek sayısal olarak deformasyon ve gerilme sonuçları elde edilebilmektedir.

2. ÇALIŞMA HAKKINDA GENEL BİLGİ

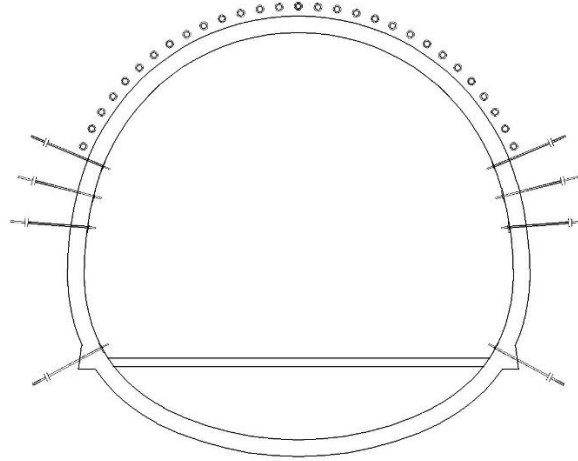
Bu çalışma kapsamında Kabataş-Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Hattı (M7)h in devamı niteliğinde olan Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Hattının 22541 ile 23000 KMLeri arasındaki A şipi hat tünelleri incelenmiştir. Tüneller yan yana açılan ikiz tüneller olup NATM yöntemiyle açılmaktadır. Güzergah üzerinde KMLer arasında %65 boyuna eğim bulunmaktadır. Topoğrafya ortalama eğimi ise %50 civarındadır. Tünelin geçtiği güzergahta yüksek ve az katlı binalar bulunmaktadır. Üst kalınlığı 21,70 m ile 38,20 m arasında değişmektedir. Tüneller boyuna eğim yönüne açılmakta olup Mahmutbey stasyonu yönüne doğru ilerlemektedir. Şekil 1de inceleme yapılan bölgenin güzergahı gösterilmiştir.



Şekil 1. İnceleme Yapılan Bölgenin Güzergahı



Bu bölgede açılan tünellerde destek elemanı olarak tavanda destek basıncını artırması, kemerlenme sağlaması açısından 29 adet 9 m boyunda umbrella arch uygulaması yapılmıştır. Yanlarda 2/3 karelajda olacak şekilde 6 m zemin çivisi teşkil edilmiş, kazı adımı ise 80 cm olarak ilerlemiştir. İksalar 1Ø26+2Ø20 H=174 mm lik kafes kirişlerden oluşmaktadır. Kazı aynasında ise deformasyonları azalmak açısından 1 m/1 m karelajla 4.5 m bindirmeli olarak zemin çivisi uygulaması yapılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. NATM tünel kesiti

Bu bölgede açılan tünellerde destek elemanı olarak tavanda destek basıncını artırması, kemerlenme sağlaması açısından 29 adet 9 m boyunda umbrella arch uygulaması yapılmıştır. Yanlarda 2/3 karelajda olacak şekilde 6 m zemin çivisi teşkil edilmiş, kazı adımı ise 80 cm olarak ilerlemiştir. İksalar 1Ø26+2Ø20 H=174 mm lik kafes kirişlerden oluşmaktadır. Kazı aynasında ise deformasyonları azalmak açısından 1 m/1 m karelajla 4.5 m bindirmeli olarak zemin çivisi uygulaması yapılmaktadır.

Tünel açma çalışmaları sırasında ilk olarak birincil destek elemanı olan umbrella uygulaması yapılmaktadır. Bu borular içi ve çevresi enjeksiyon ile doldurularak zemine sabitlenmektedir. Bu aşamadan sonra ilk aşama kazısı kazıcı yardımıyla yapılmaktadır. Kazının desteksiz bekletilmemesi açısından vakit kaybetmeden hasır çelik donatı, kafes iksa yerine yerleştirilip püskürtme beton uygulanmaktadır. Projesindeki yerlere uygun bulonlar yapıldıktan sonra diğer kazı aşamaları için de aynı adımlar izlenmektedir.

3. YÖNTEM

Sahada yüzey oturma bulonları, tünel içi konverjans ve bina reflektörlerinden belirli periyotlarda okumalar yapılmıştır. Sayısal analizler PLAXIS 2D ve 3D sonlu elemanlar yazılımlarıyla yapılmıştır. Zemin bünye modeli olarak Hardening Soil dikkate alınmıştır. Sayısal analizlerde binaların temelleri plate eleman olarak ve her bir kat için 15 kN/m² gerilme etki ettirilmiştir. Analizlerde, inşaat aşamaları sahadaki imalatlara uyumlu olarak



tanımlanmış ve tünel üzerinde zemin yüzünde ve binalarda meydana gelen yer değişimleri ile saha ölçümleri karşılaştırılmıştır.

3.1. Zemin Profili

Çalışma alanında yapılan sondajlarda arazi deneyi olarak SPT, presiyometre, basınçlı su testi yapılmıştır. Sahadan alınan örselenmemiş numuneler laboratuvar ortamına taşınarak kesme kutusu, tek eksenli, üç eksenli deneylere tabi tutulmuştur. Ayrıca zeminin fiziksel özelliklerini belirlemek açısından dane çapı dağılımı için elek analizi, Atterberg limitlerin belirlenmesi için Likit limit, Plastisite limit ve Rötrelim deneyleri yapılmıştır. Saha deneyleri ile laboratuvar deneyleri kullanılarak zemin tabakalarının mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Başbakanlık MBE Metro Projesi Raporu (2021)dan özetlenen zemin profili ve parametreler referans alınarak 2D ve 3D sayısal analizler yapılmış ve elde edilen deformasyonlar saha verileriyle karşılaştırılmıştır. Sahada elde edilen veriler neticesinde bir dizi geri analiz yapılmış ve zemin parametreleri bu doğrultuda revize edilmiştir. Sayısal analizlerde dikkate alınan zemin parametreleri Tablo 1. de verilmiştir.

Tablo 1. Zemin Parametreleri

Zemin	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	E' (MPa)
Ka Kil	19	90	27	30.0

Umbrella tünel üst bölgesine destek sağlayarak tünel kemerlenme basıncını artırmaktadır. Burada zemine ilave destek yapıldığı için Elastisite modülünde ve kohezyonunda önemli ölçüde artış olmaktadır. Umbrella bölgesi için parametreler eşdeğer alan yöntemi ile iyileştirilmiş kompozit parametreler hesaplanmış ve sayısal analizlerde dikkate alınmıştır (Tablo. 2).

Tablo 2. Eşdeğer zemin parametreleri

	Alan (m ²)	γ (kN/m ³)	E (MPa)
Yerleşilecek zemin	2.63	19.00	30
Umbrella	0.29	78.50	200000
Yerleştirilmiş Kompozit Zemin	2.63	25.70	22549

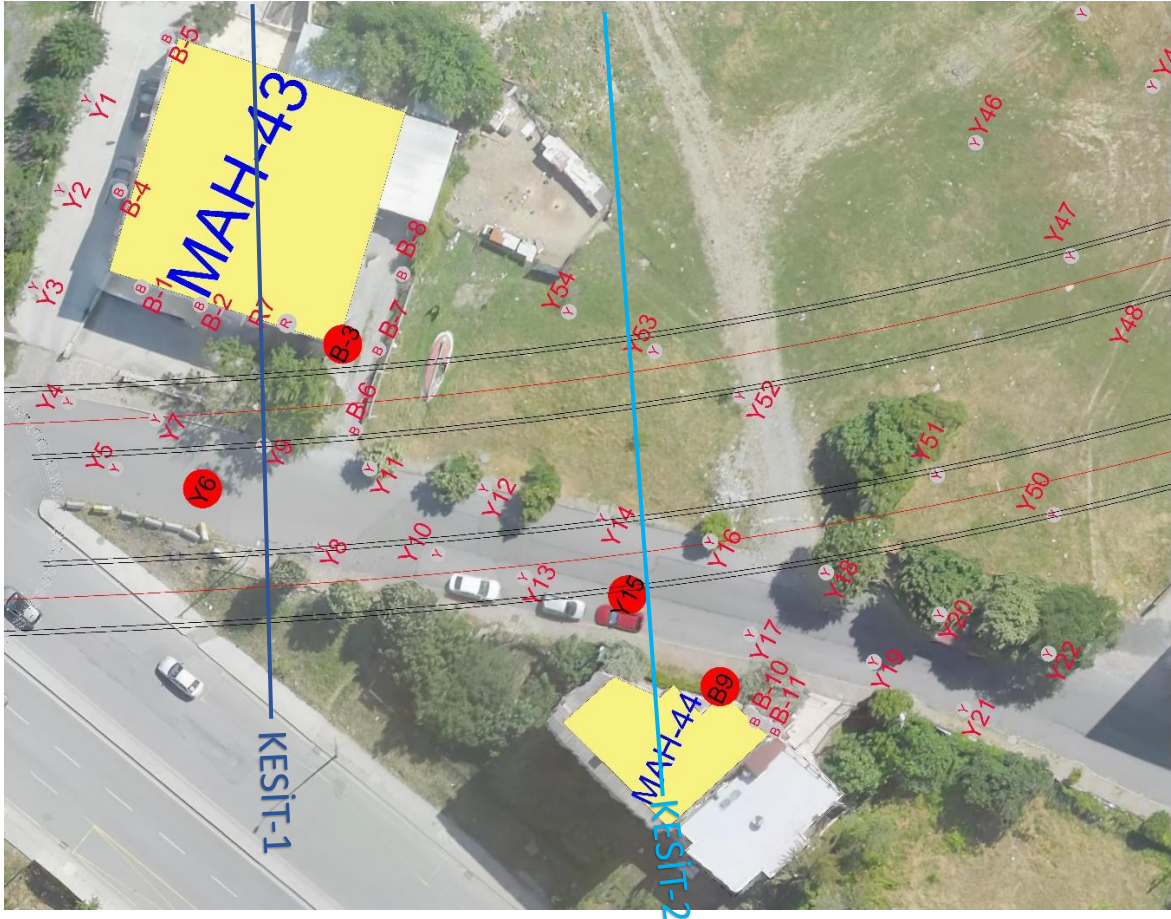
3.2. Arazi Ölçümleri

Çalışma kapsamında ekil 3de gösterilen tünel etki alanında bulunan MAH-43 ve MAH-44 nolu binalarda sırasıyla B-3 ve B-9 bina oturma blonlarından ölçülen oturmalar ile tünel üzerinden yüzey oturmasının takibi için yerleştirilen Y-6 ve Y-15 yüzey oturma blonları ölçümleri değerlendirilmiştir. Yapılan incelemelerde tünel aşamalarına bağlı olarak bina oturma blonlarında hareketler görülmektedir. Oturma blonlarındaki ilk hareket birinci tünel kazısının üst yarı kazısından kaynaklanmaktadır. Ardından alt yarı kazısı ve ikinci tünel



kazısının etkisi ile birlikte oturmalar artmaya devam etmiş ve tünel kazısının tamamlanmasıyla oturma değerleri sabit bir şekilde kalmıştır.

MAH-43 ve MAH-44 nolu binalarda ikinci tünel kazısının etkisi etki alanında uzak olduğu için tam olarak görülememektedir. Devam eden ikiz tünel kazılarının yüzey deformasyonuna etkisini incelemek açısından iki tünelin de etki alanı içinde kalan oturma bulonları değerlendirilmiştir. Burada açılan iki tünelin de kazı aşamalarından kaynaklanan etkileri görülebilmektedir.



Şekil 3. Enstrüman Yerleşimi ve Analiz Kesitleri Planı

MAH-43 nolu binanın çevresinde 8 adet oturma bulonu bulunmaktadır. Bütün tünel aşamaları tamamlanıp kazı etkisi tamamlandıktan sonra bu bulonlarda oturma değerleri minimum 19.5 mm, maksimum ise 45.2 mm olarak ölçülmüştür.

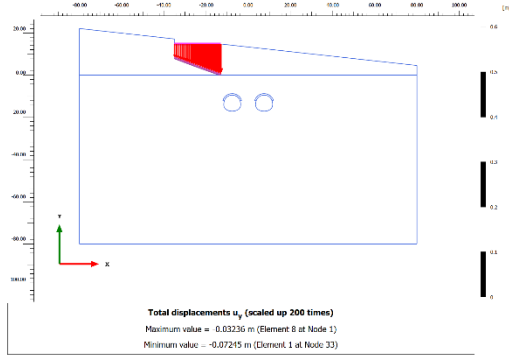
MAH-44 nolu binada ise yerleştirilmiş olan 3 adet oturma bulonu mevcuttur. Bu bulonlar birbiri ile aynı doğrultuda olup tünel eksenine yaklaşık olarak paralel konumdadır. Bu sebeple oturma değerleri minimum 17.6 mm, maksimum olarak da 27.2 mm ölçülmüştür.

3.3. 2D Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

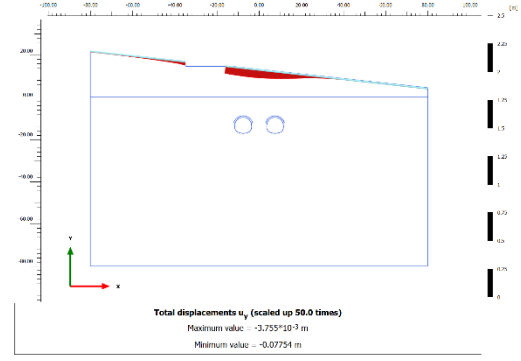
Kesit-1 için yapılan 2D sayısal analiz modeli sonuçlarına göre MAH-43 nolu binada düşey deplasman değeri minimum 32.36 mm, maksimum deplasman değeri ise 72.45 mm olarak



bulunmuştur (ekil 4). Aynı analizden elde edilen maksimum yüzey oturma değeri ise 77.54 mm olarak elde edilmiş r (ekil 5).

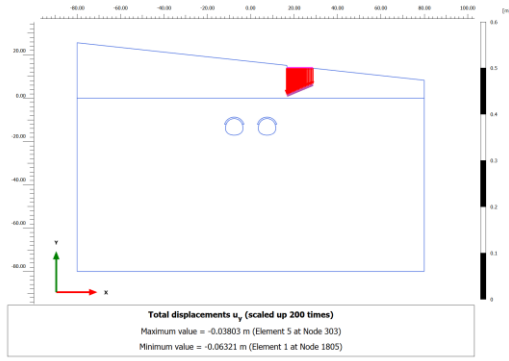


ekil 4. MAH-43 Düşey Deplasman Gra ğı

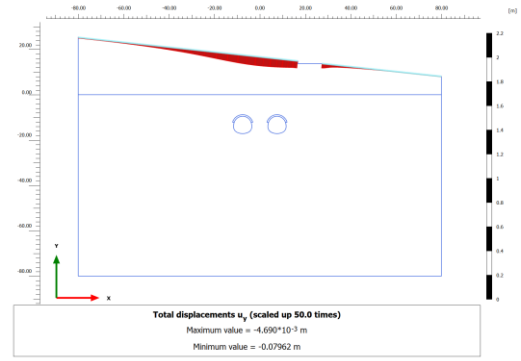


ekil 5. Kesit-1 Yüzey Oturma Gra ğı

Kesit-2 için yapılan 2D sayısal analiz sonuçlarına göre MAH-44 nolu binada minimum ve maksimum deplasman değerleri sırasıyla 38.03 mm, 63.21 mm olarak bulunmuştur (ekil 6). Yüzeyde gerçekleşen oturma değeri ise 79.62 mmdir (ekil 7).



ekil 6. MAH-44 Düşey Deplasman Gra ğı



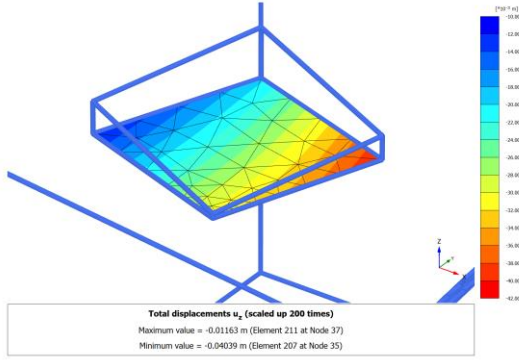
ekil 7. Kesit-2 Yüzey Oturma Gra ğı

3.4. 3D Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

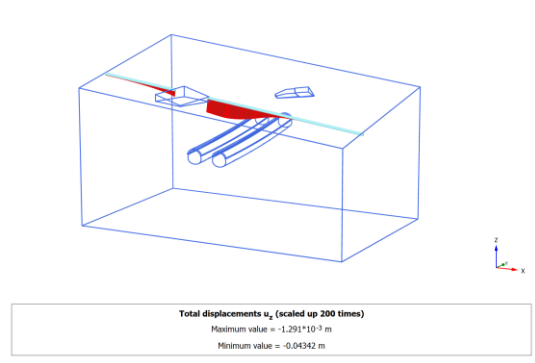
Kesit-1 için yapılan 3D sayısal analiz modeli sonuçlarına göre MAH-43 nolu binada düşey deplasman değeri maksimum deplasman değeri 40.39 mm olarak bulunmuştur (ekil 8). Aynı analizden elde edilen maksimum yüzey oturma değeri ise 43.42 mm olarak elde edilmiş r (ekil 9).

Kesit-2 için yapılan 3D sayısal analiz sonuçlarına göre MAH-44 nolu binada maksimum deplasman değerleri 32,46 mm olarak bulunmuştur (ekil 10). Yüzeyde gerçekleşen oturma değeri ise 47,84 mm mertebesindedir (ekil 11).

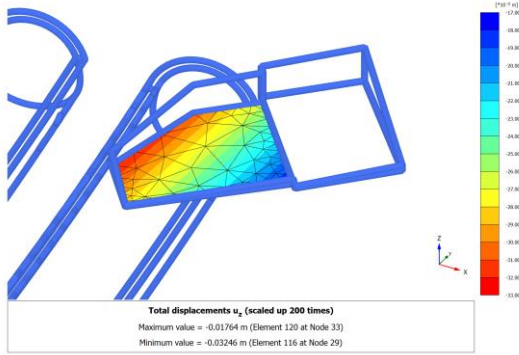




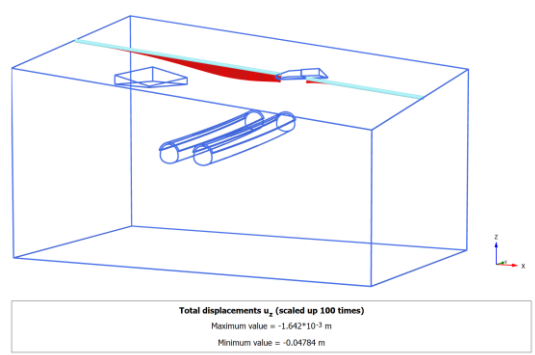
Şekil 8. MAH-43 Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 9. Kesit-1 Yüzey Oturma Grafiği



Şekil 10. MAH-44 Düşey Deplasman Grafiği



Şekil 2. Kesit-2 Yüzey Oturma Grafiği

3.5. Kazıdan Kaynaklanan Düşey Yer Değiştirmenin Ampirik Yöntemlerle Hesaplanması

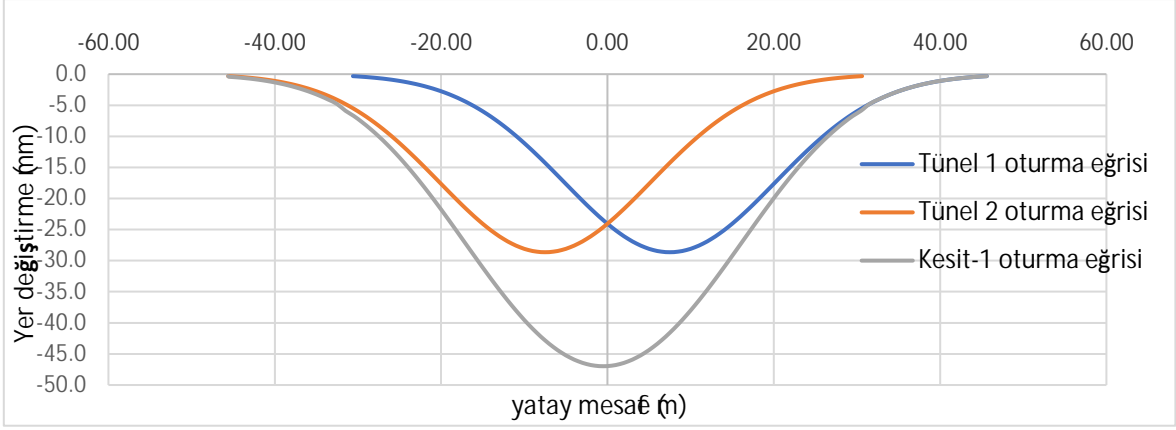
Tünel inşaatları sonucunda oluşan oturma eğrilerinin, tünel eksenine dik yöndeki mesafede üstel bir fonksiyon (Gauss fonksiyonu) ile yayıldığı varsayılmaktadır. Bu matematiksel formül, Peck tarafından Chicago metrosunda gerçekleştirilen gözlemler doğrultusunda geliştirilmiştir. Elde edilen bu eğriler, literatürde genellikle "oturma çanağı" veya "tasman eğrisi" gibi isimlerle tanımlanmaktadır. Tünelin doğrudan üzerinde meydana gelen maksimum oturma, aşağıda verilen eşitlik (1)'den hesaplanmaktadır.

$$S_v(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{V_L D^2}{4i_x} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}} \quad (1)$$

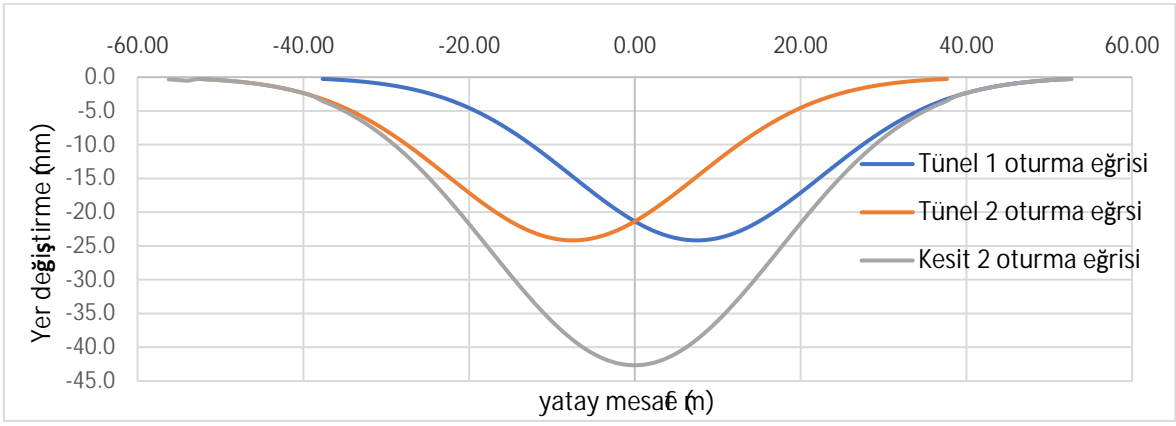
Bu eşitlikte; S_v herhangi bir x noktasındaki düşey yer değiştirmeyi, V_L hacimsel kaybı, D eşdeğer tünel çapını, i_x dönme noktasını, x tünel aksından yatay mesafeyi göstermektedir.

Her tünel için bu eğriler ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bu tünellerin ikisinin kazısı sonucunda meydana gelecek düşey yer değiştirme ise iki grafiğin süperpoze edilmesiyle bulunmaktadır. Şekil 12 ve Şekil 13'te elde edilen grafikler sunulmuştur.





ekil 12. Kesit-1 tünel oturma eğrisi



ekil 13. Kesit-2 tünel oturma eğrisi

3.6. Tünelde 3. Boyut Etkisinin Değerlendirilmesi

Tünel kazısı, zemin üzerinde önemli gerilme değişimlerine ve deformasyonlara yol açan karmaşık bir süreçtir. Bu gerilme değişimlerini ve zemin deformasyonlarını etkili bir şekilde modellemek için kullanılan yöntem, tünel mühendisliğinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu yöntem, tünel kazısının önündeki zemin alanında meydana gelen gerilme değişimlerini iki boyutlu analizler çerçevesinde ele alır ve zemin deformasyonlarını belirlemek için bir katsayı olan ν değerini kullanır. Bu katsayı, genellikle 0 ile 1 arasında değişir ve tünelin kazılması ile püskürtme beton uygulaması sırasında izin verilen zemin deformasyonlarının miktarını etkiler. İteratörde ν katsayısının değeri ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Möller (2006) tarafından yapılan çalışmalar, ν katsayısının yaklaşık 0.5 olarak kabul edilebileceğini ve bu değer tünel destek basıncının bu katsayı oranında azalmasıyla zemin deformasyonlarına izin verilir. Bu bağlamda, ν yöntemi zemin deformasyonlarının yönüne ve tünel inşaatının güvenliği açısından kritik bir araç olarak ön plana çıkmaktadır. Ancak, ν yönteminin uygulama doğruluğu, zemin koşulları, tünel yapıları, topoğrafya gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir ve bu durum, yöntem üzerindeki literatür çalışmalarını etkilemektedir.

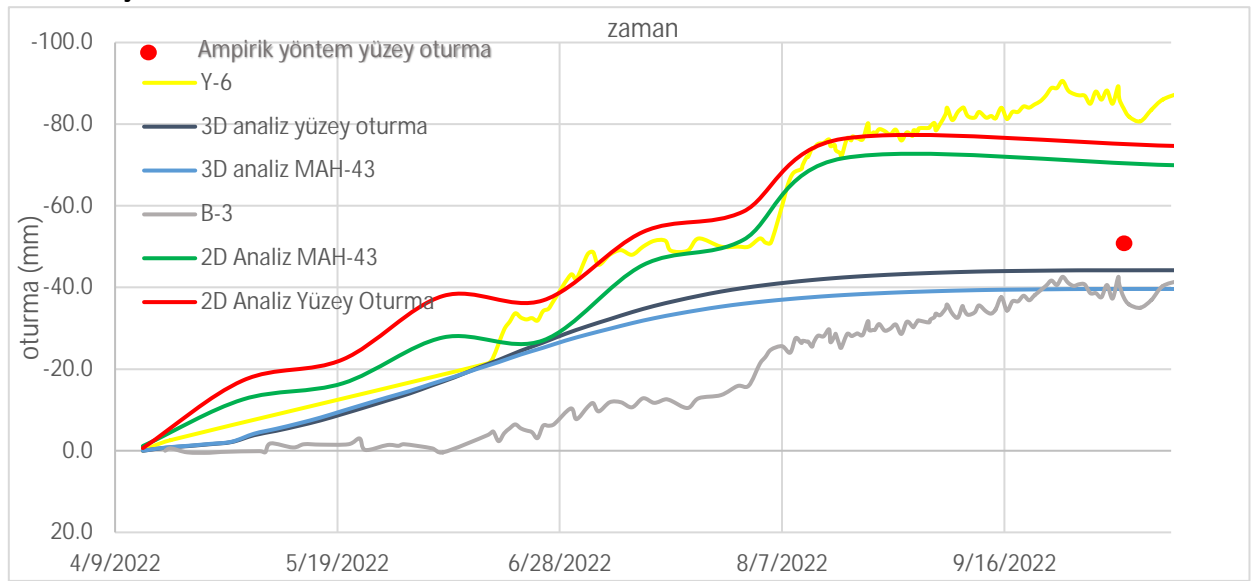
Çalışma kapsamında saha koşullarının yansıması açısından ν katsayısı değeri 0.4 olarak alınmıştır. Bu değer Plaxis programındaki decon element (1-) değerinde kullanılmaktadır.



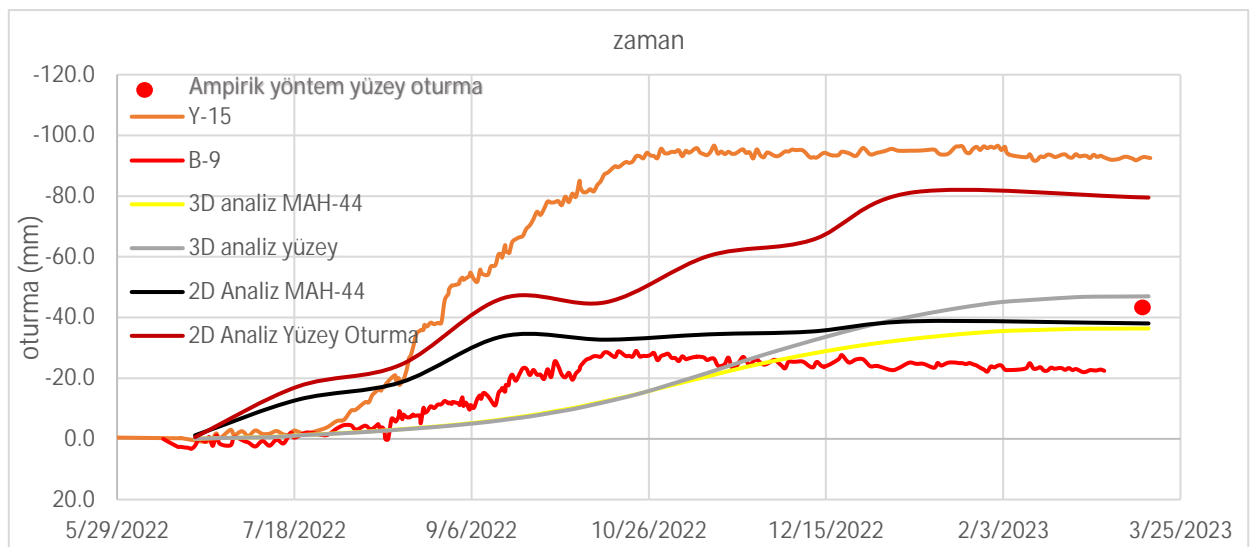
iki boyutlu analizler bu kabul doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu analizlerde ise tünel boyuna yönünde değişen gerilme deformasyon durumu program tarafından hesaplanmaktadır.

4.SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yapılan çalışma kapsamında sahadan alınan geoteknik enstrüman okumaları grafikler halinde özetlenmiştir. Eğimli bir topoğrafyada açılan ikiz tünellerde 2D ve 3D sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlarla saha verileri karşılaştırılarak incelenmiştir. Tünel kazısından dolayı eğimli bir arazide gerçekleşen yüzey oturmalarının değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda inceleme sahasında Kesit 1 ve Kesit 2 için 2D ve 3D sayısal analizler yapılmıştır. Saha ölçümleri ve analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 14 ve Şekil 15'te sunulmuştur.



Şekil 14. Kesit-1 Deplasman Değerleri



Şekil 15. Kesit-2 Deplasman Değerleri



Grafipler incelendiğinde sahada ölçülen bina oturma bulonlarının değeri 3D analiz değerleriyle aynı oranda gelişmiş görülmektedir. Ancak yüzeyde gerçekleşen oturma değerleri için aynı durum söz konusu olmamıştır. Yüzey oturma bulonlarında gerçekleşen deplasmanların ise 2D analiz sonuçlarıyla %60 -70 değerinde yakınsadığı anlaşılmıştır.

Tünel mühendisliğinde, üçüncü boyutun etkilerini değerlendirmek değişkenlerin artmasıyla birlikte giderek karmaşıklaşmaktadır. Yüzeyin eğimli veya düz olma durumunu iki boyutlu analizlerde etkili bir şekilde yansıtmak için arazi şartlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Eğimli yüzeyler, tünel destek sistemleri üzerinde farklı gerilme ve deformasyon problemleri oluştururken, düz yüzeyler daha homojen zemin koşulları sunar. Bu nedenle arazi topografyasının doğru bir şekilde modellenmesi tünel mühendisliğinde güvenlik ve performansın sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Eğimli topoğrafyalarda kırılgan zeminlerde gerilme deformasyon durumları 2D analize göre daha farklı olabileceği değerlendirilmiştir. Bu tür zemin problemleri ve topoğrafyalarda tünel açma sırasında mevcut yapıların oturma değerleri ve zemin göçme değerleri sürekli olarak takip edilip kontrol edilmelidir. Ayrıca 2D analizlere ilave olarak 3D analizlerin yapılabildiği bu sonuçlarında 2D analizlerle birlikte yorumlanması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Wang, Z., Chen, G., Zhang, Z. (2019). 'Tunnel face stability in cohesion-frictional soils considering the soil arching', *Computers and Geotechnics*, Hangzhou

Möller, S. C. (2006). 'Tunnel induced settlements and structural forces in linings', Berlin, Universität Stuttgart, Berlin

Çaydın, K. (2021). 'Zemin Mekaniği', Birsen Yayınevi, İstanbul

BBYI Sistemler MBE Metrosu Hesap Raporu ve Geoteknik Ölçümleri, 2023, İstanbul

Towhata, I. (2008) 'Geotechnical Earthquake Engineering', Springer, Berlin

