

Şemsiye Kemer Uygulamasındaki Sayısal Modelleme Yaklaşımlarının Karşılaştırılması

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

H.E. Ergincan

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

T.Y. Özüdoğru

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

I.Z. Yildirim

Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

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

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

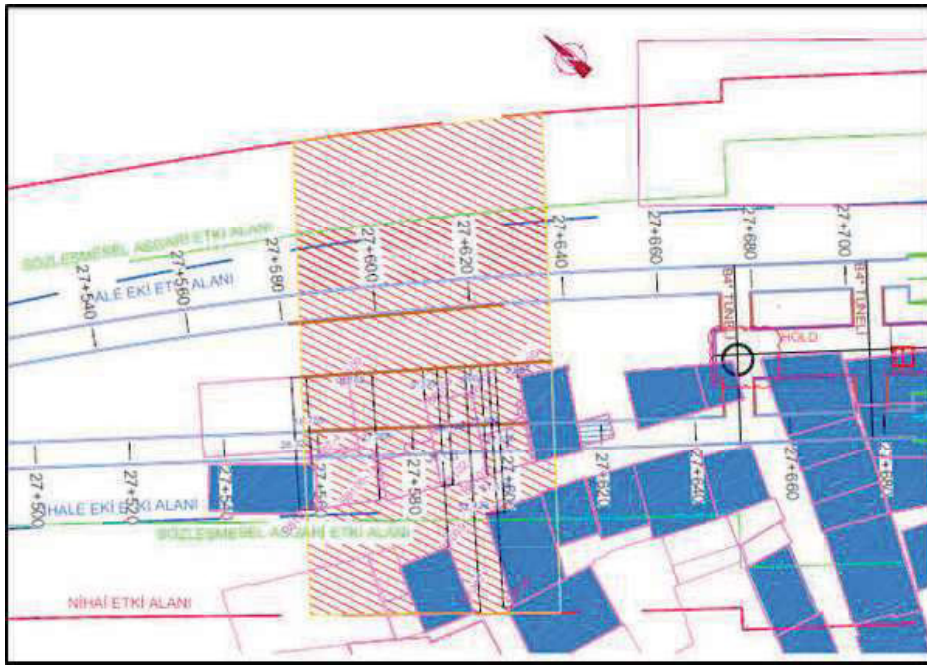
1 GİRİŞ

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

1.1 Amaç ve Kapsam

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

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



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

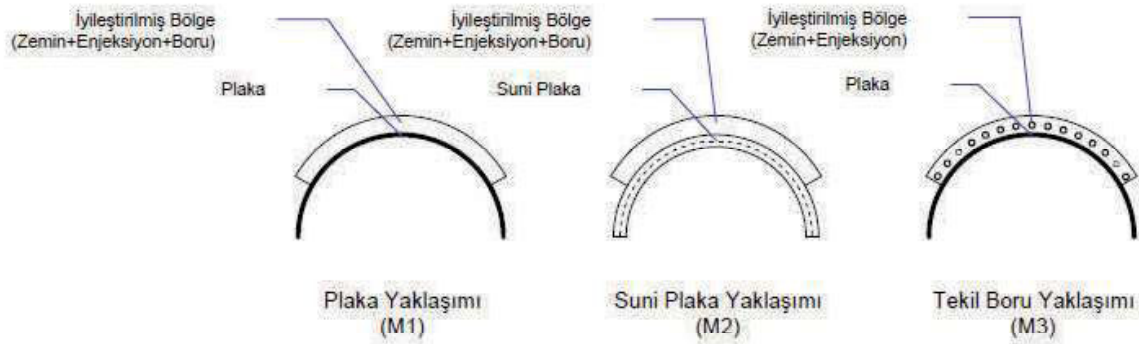
2 YÖNTEM

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

2.1 Şemsiye Kemer Modelleme Yaklaşımları

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

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



Şekil 2. Şemsiye kemerin sayısal modellemesinde incelenen yaklaşımlar

2.2 Zemin Özellikleri

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

Çizelge 1. İdealize zemin tabakaları ve kullanılan parametreler

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

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

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

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

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

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

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

2.3 Kabuller

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

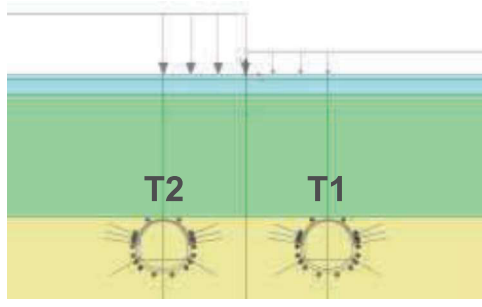
- Modelin sınırları deplasmanların sönümlenmesi dikkate alınarak yeterince geniş seçilmiştir.
- Su seviyesinin tünel alt kotuna kadar düşürülmesi genel kabulü uygulanmıştır.
- Şemsiye kemer uygulamasıyla ne kadar kalınlıkta zeminin iyileştirildiği; zeminin türüne, enjeksiyonun basıncına, hatta çimentonun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



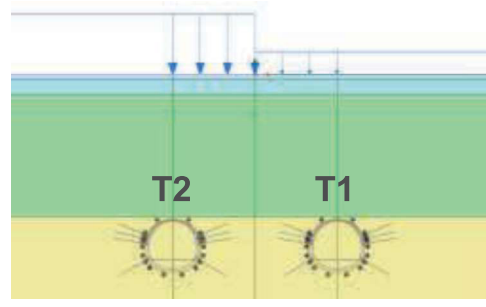
Şekil 3. Çalışma bölgesinin (a) plan (havadan) ve (b) sokak görüntüsü

2.4 Aşamalar

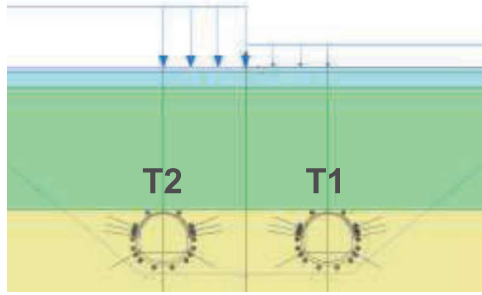
Bu çalışmada kullanılan PLAXIS 2D, NATM'de uygulanan aşamalı kazıyı modellemek için elverişlidir. Yukarıda açıklanan kabuller doğrultusunda analizlerde 17 aşama tanımlanmıştır. Aşamaların ekran görüntüleri Şekil 4'te görülmektedir. Başlangıç aşamasında gerilme dağılımı zeminin kendi yükü hesaba katılarak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



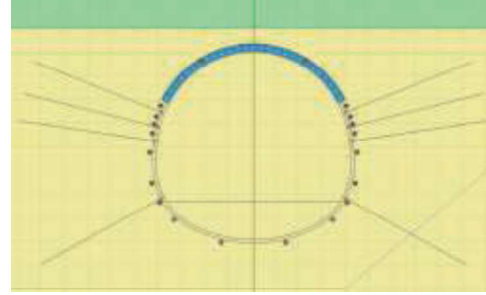
0. Başlangıç durumu



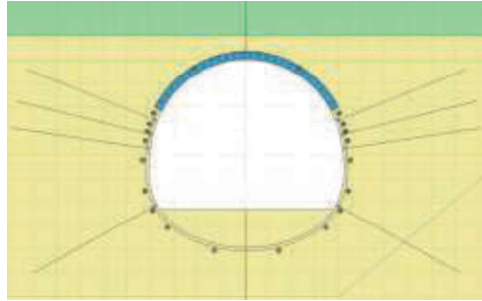
1. Yüzey yüklemesi



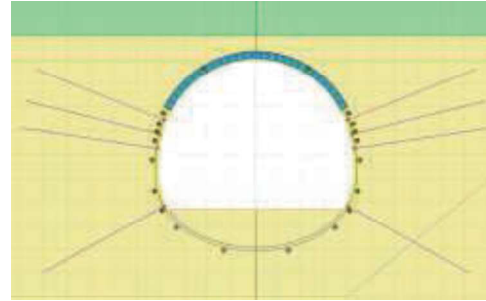
2. Su seviyesinin düşürülmesi



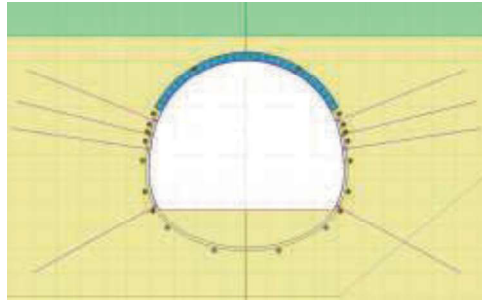
3. Boru kemerle iyileştirilmiş bölgenin aktive edilmesi



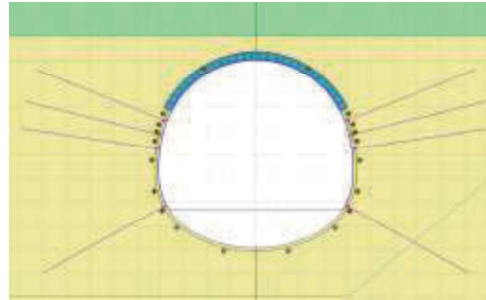
4. Üst yarı kazısı desteksiz safha



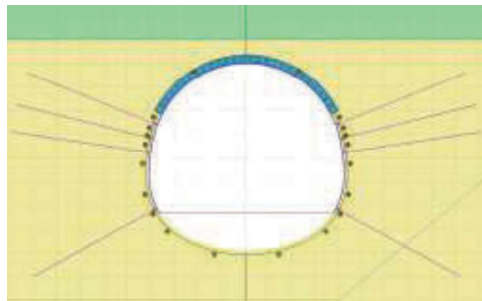
5. Üst yarı kazısı kısmi destekli safha



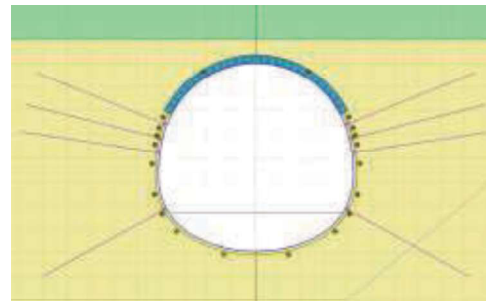
6. Üst yarı kazısı tam destekli safha



7. Alt yarı kazısı desteksiz safha



8. Alt yarı kazısı kısmi destekli safha



9. Alt yarı kazısı tam destekli safha

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

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

3 ANALİZ SONUÇLARI

3.1 Tünel İçi Kapanma ve Yüzey Oturması

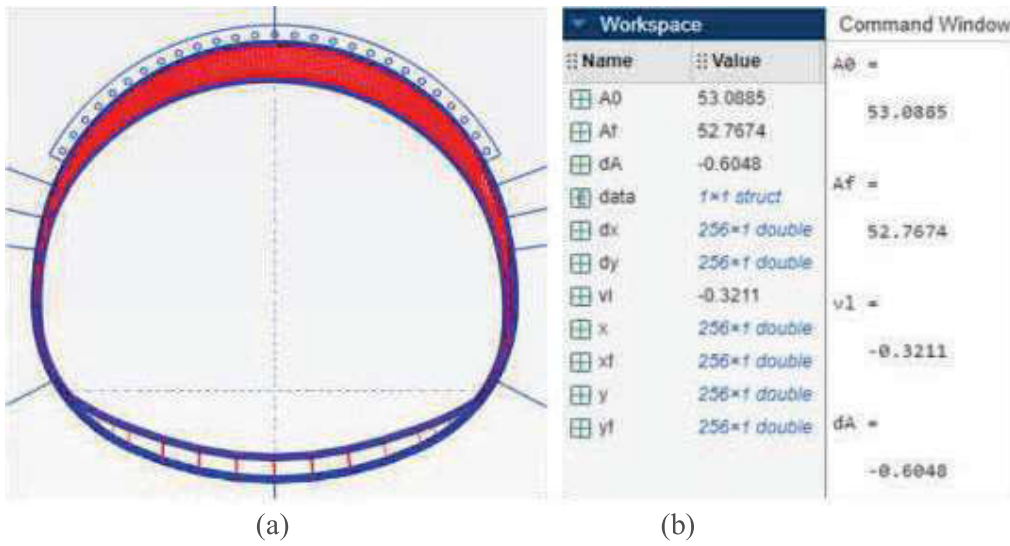
Tünel içi kapanma miktarı tünelde göçük ihtimalinden, makina sıkışmasına, kazı destek elemanlarında oluşan yapısal sorundan, yüzey oturmasına kadar tünel imalatının her aşamasında etkili olduğu için mekanize kazılarda ve açık ayna kazılarında büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden bu projedeki teknik şartname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

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

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

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

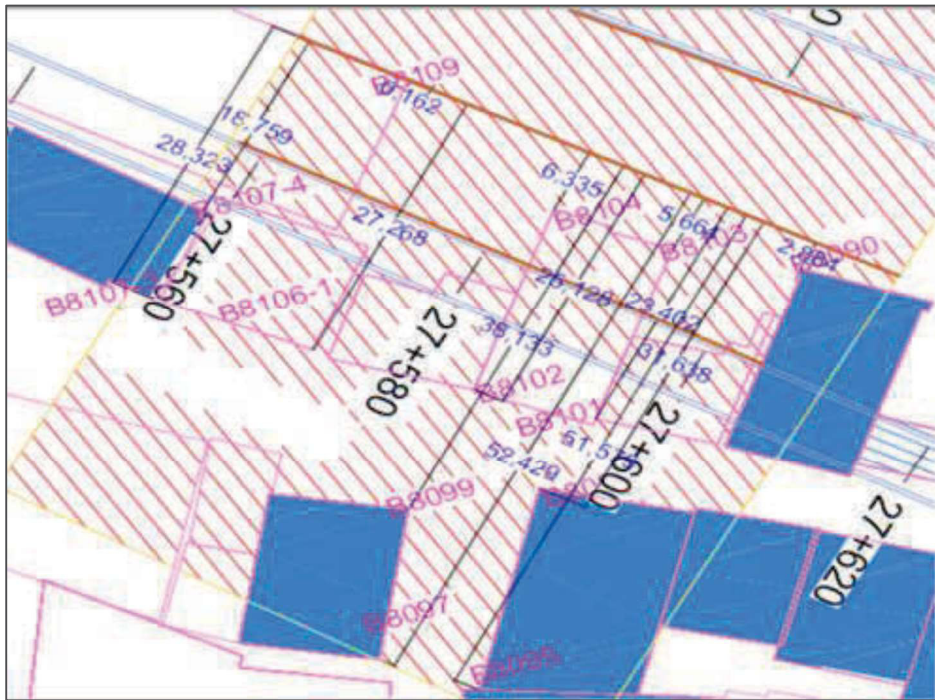
Şekil 5a'da en çok kapanmanın gerçekleştiği M3 modeli T2 tünelindeki deformasyonlar 25 kez büyütülerek gösterilmektedir. Şekil 5b'de tünel içi hacim kaybının MATLAB® kullanılarak hesabı görülmektedir.



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

3.2 Saha Verileri

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

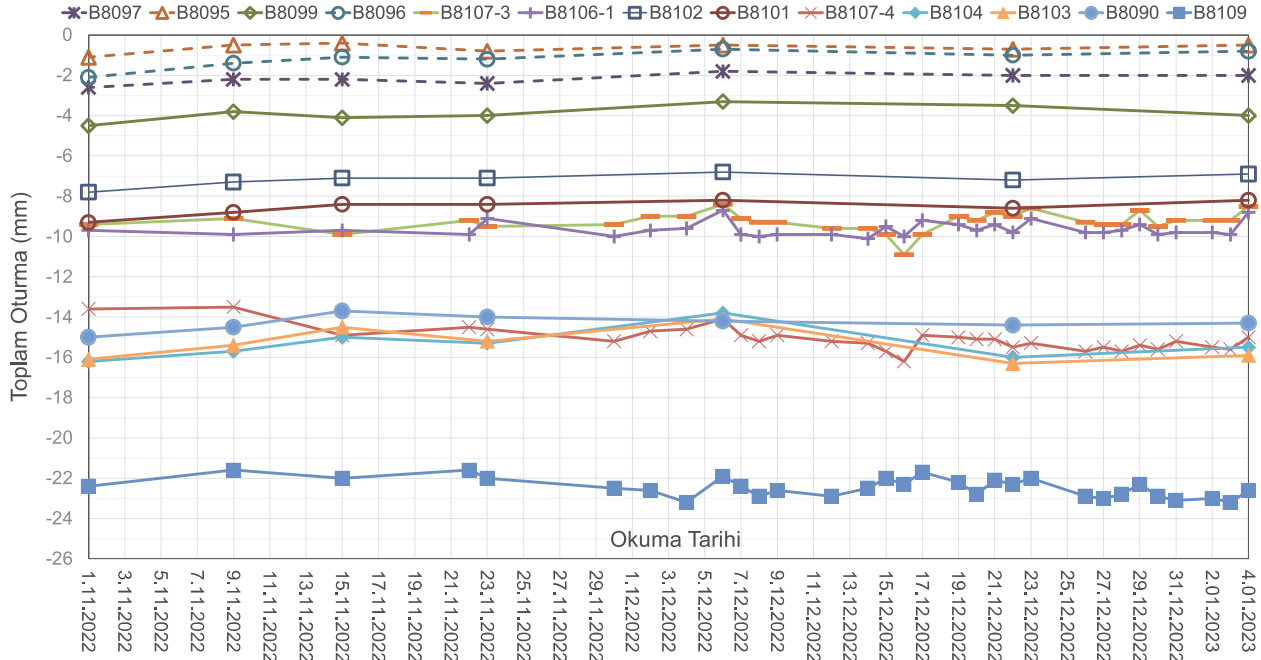


Şekil 6. Bulon yerleşim planı ve iki tünelin orta eksene uzaklıkları

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

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

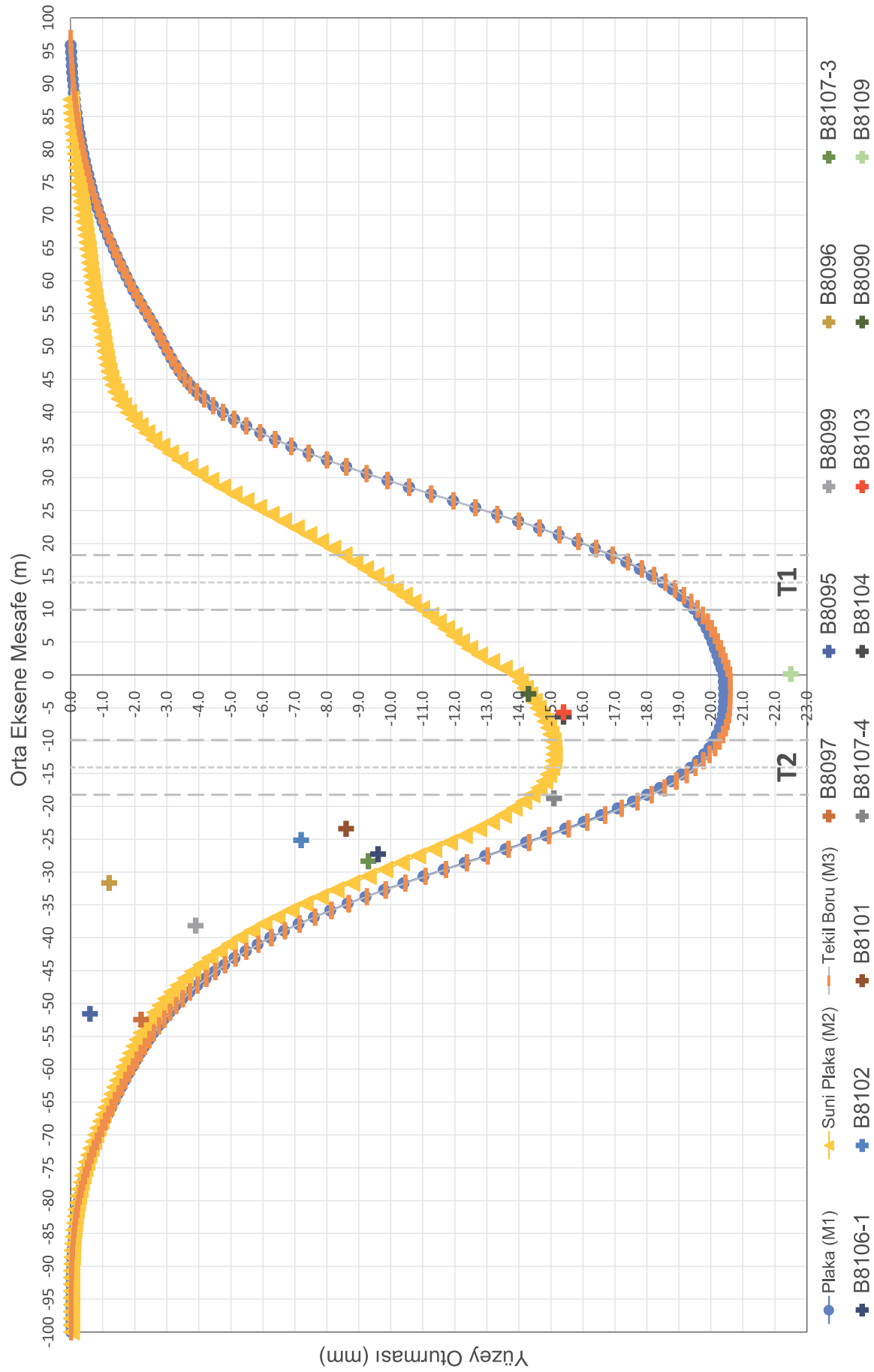
İncelenen alanda bulonların yer değiştirme - zaman grafiği Şekil 7’de verilmektedir. Grafik incelendiğinde iki aydan uzun süredir deplasmanlardaki değişimin 0-3 mm aralığında olduğu görülmektedir. Tünel imalatının incelenen bölgede tamamlandığı ve kazının büyük ölçüde bölgeden uzaklaştığı düşünülürse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



Şekil 7. İncelenen bölgedeki bulonlarda zamana bağlı toplam oturma

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

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



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

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

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

4 SONUÇ

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

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

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

TEŞEKKÜR

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

KAYNAKLAR

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