Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

EPB TBM TÜNELLERİNDE YÜZEY OTURMALARININ PARAMETRE KALİBRASYONU İLE SAYISAL ANALİZİ

NUMERICAL ANALYSIS OF SURFACE SETTLEMENTS IN EPB TBM TUNNELS THROUGH PARAMETER CALIBRATION

Ayşenur YALÇIN[1], Pelin ÖZENER[2]

ÖZET

Yeraltı ulaşım sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, zayıf zemin koşullarında gerçekleştirilen tünel kazılarında oluşabilecek yüzey oturmalarının doğru şekilde tahmin edilmesi büyük önem kazanmıştır. EPB (Earth Pressure Balance) tünel açma makinelerinde uygulanan ayna destek basıncı hem kazı güvenliğinin sağlanması hem de çevrede meydana gelebilecek deformasyonların kontrol altına alınması açısından temel tasarım parametrelerinden biridir. Bu çalışmada, EPB TBM ile gerçekleştirilen tünel kazılarında ayna destek basıncının yüzey oturmalarına etkisi analitik yaklaşımlar, sonlu elemanlar yöntemi ve saha ölçümleri birlikte değerlendirilerek araştırılmıştır. İlk aşamada RocSupport yazılımı kullanılarak farklı çalışma basınçları için kazı gevşeme oranları hesaplanmış ve elde edilen değerler PLAXIS 2D modeline aktarılmıştır. Saha uygulamasında kullanılan 1.7 bar ayna destek basıncı esas alınarak gerçekleştirilen analizlerde hesaplanan maksimum deformasyon ile ölçülen yüzey oturmaları arasında önemli farklılıklar belirlenmiştir. Bu uyumsuzluğun nedenlerini ortaya koymak amacıyla PLAXIS 2D ortamında hassaslık analizleri gerçekleştirilmiş ve zemin parametrelerinin deformasyon davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kalibre edilen model, Python–PLAXIS Remote Scripting API kullanılarak otomatik olarak değerlendirilmiş; deplasman verilerinden Gauss oturma eğrileri oluşturulmuş ve Boscardin hasar değerlendirmeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yalnızca ayna destek basıncına ek olarak zeminin rijitlik ve dayanım özelliklerinin de yüzey oturmalarının büyüklüğü üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Ayrıca saha verileri ile desteklenen parametre kalibrasyonunun, sayısal modellerin güvenilirliğini önemli ölçüde artırdığı ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *EPB TBM, yüzey oturması, PLAXIS 2D, parametre kalibrasyonu, hassaslık analizi*

ABSTRACT

The increasing use of underground transportation systems has highlighted the importance of accurately predicting ground settlements induced by tunnel excavations in weak soil conditions. In Earth Pressure Balance (EPB) Tunnel Boring Machine (TBM) operations, the face support pressure is a key design parameter that ensures excavation stability and minimizes ground deformations that may affect nearby structures. This study investigates the effect of face support pressure on surface settlements during EPB TBM tunneling by combining analytical methods, numerical modeling, and field measurements. In the first stage, excavation relaxation ratios corresponding to different face support pressures were determined using the RocSupport software. The calculated relaxation ratios were then incorporated into a PLAXIS 2D finite element model. Numerical analyses performed under the field operating pressure of 1.7 bar revealed a significant difference between the calculated maximum settlement and the settlement measured in the field.

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, YTÜ, aysenuryyalcin@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Prof., YTÜ, tohumcu@yildiz.edu.tr

To investigate the source of this discrepancy, a sensitivity analysis was carried out in PLAXIS 2D to evaluate the influence of soil parameters on ground deformation. The results indicated that the soil stiffness modulus (E50ref) and cohesion are the most influential parameters controlling surface settlements. Parameter variation analyses were subsequently performed, and a calibrated parameter set that best represented the field measurements was identified. The calibrated model was further evaluated using the Python–PLAXIS Remote Scripting API, which enabled the automatic processing of displacement data, the generation of Gaussian settlement curves, and Boscardin damage assessments. The results demonstrate that, in addition to face support pressure, soil stiffness and strength properties play a significant role in controlling surface settlements. Furthermore, the study shows that calibrating numerical models with field measurements substantially improves the reliability of settlement predictions.

Keywords: *EPB TBM, surface settlement, PLAXIS 2D, parameter calibration, sensitivity analysis*

1. GİRİŞ

Yer altı ulaşım sistemlerinin yaygınlaşması ve kentleşmenin yoğunlaşması, özellikle yoğun yapılaşmanın bulunduğu bölgelerde tünel projelerinin önemini artırmıştır. Tünel kazılarının yüzeye yakın derinliklerde ve zayıf zemin koşullarında gerçekleştirilmesi durumunda, kazı sırasında zeminde meydana gelen gerilme ve deformasyon değişimleri yüzey oturmalarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, tünel kazısı sonucunda oluşabilecek yüzey oturmalarının güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi, tünel tasarımının temel unsurlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

EPB TBM uygulamalarında ayna destek basıncı, kazı aynasının stabilitesinin korunmasının yanı sıra tünel kazısı sonucunda oluşabilecek zemin kayıpları ve yüzey oturmalarının kontrolünde önemli bir parametredir. Bununla birlikte, yüzey oturmalarının yalnızca ayna destek basıncı ile açıklanması mümkün olmayıp, zemin rijitliği, dayanım parametreleri, kazı geometrisi, örtü kalınlığı ve kazı kaynaklı gevşeme gibi birçok faktörün birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, EPB TBM ile gerçekleştirilen tünel kazısı sonucunda meydana gelen yüzey oturmalarının sayısal olarak değerlendirilmesi ve sayısal modelin saha ölçümleri kullanılarak kalibre edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda öncelikle farklı ayna destek basınçları için RocSupport yazılımı kullanılarak kazı gevşeme oranları belirlenmiş ve elde edilen değerler PLAXIS 2D sonlu elemanlar modelinde kullanılmıştır. Saha uygulamasında kullanılan 1.7 bar ayna destek basıncı esas alınarak gerçekleştirilen başlangıç analizinde elde edilen yüzey oturmaları saha ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

Başlangıç sayısal modeli ile saha ölçümleri arasında belirlenen farklılığın nedenlerini ortaya koymak amacıyla zemin parametrelerine yönelik hassaslık analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yüzey oturmaları üzerinde etkili olan temel parametreler belirlenmiş ve bu parametrelerin farklı değerleri kullanılarak sayısal model yeniden değerlendirilmiştir. Saha ölçümlerini en iyi temsil eden parametre seti belirlenerek model kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE ANALİZ KESİTİ

Çalışmada sayısal analizler, tünel güzergâhında yer alan Km 12+160 kesiti için gerçekleştirilmiştir. Kesitin seçiminde, makas tüneline yakın konumu ve saha ölçümlerinde tasarım aşamasında öngörülen değerlerden daha yüksek yüzey deformasyonlarının gözlenmesi etkili olmuştur. Analiz kesitinin büyük ölçüde kil birimleri içerisinde yer aldığı ve tünel ekseni üzerindeki örtü kalınlığının 16.78 m olduğu belirlenmiştir. Tünel çapı 6.30 m olup, analizlerde kullanılan temel zemin ve geometri parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Km 12+160 kesitine ait analiz verileri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Km	12+160	**-**
Sahada Ölçülen Deformasyon	8.5	**cm**
EPB Çalışma Basıncı	1.7	**bar**
Tünel Çapı	6.3	**m**
Örtü Kalınlığı	16.78	**m**
Zemin Birim Hacim Ağırlığı	18.3	**kN/m3**
Kohezyon	5	**kPa**
İçsel Sürtünme Açısı	29	**°**
Elastisite Modülü	12000	**kN/m2**
Poisson Oranı	0.2	**-**

3. KAZI GEVŞEME ORANININ BELİRLENMESİ

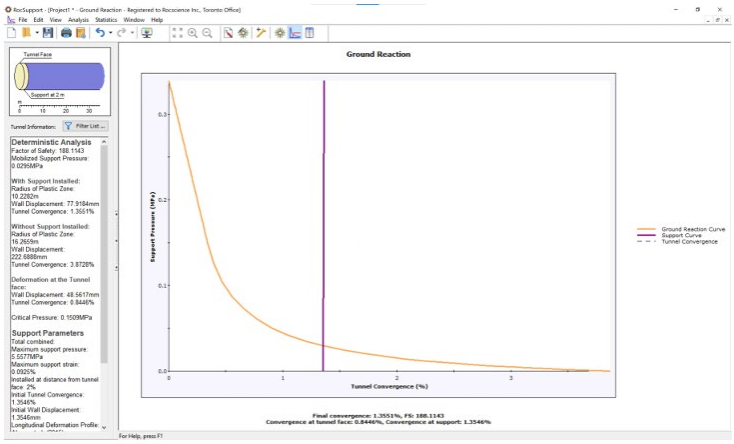
Bu çalışmada kazı gevşeme oranının belirlenmesinde, EPB çalışma basıncını doğrudan dikkate alabilen Convergence-Confinement Method (CCM) (Carranza-Torres ve Fairhurst, 2000). tabanlı Almog vd. (2015) yaklaşımı kullanılmıştır. Hesaplamalar RocSupport yazılımı ile gerçekleştirilmiş (Rocscience Inc., 2021) ve elde edilen değer PLAXIS 2D modeline aktarılmıştır.

EPB çalışma basıncının kazı gevşeme oranı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 0–5 bar aralığında parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma basıncındaki artışla birlikte TBM etkin çevreleme basıncının arttığı ve kazı gevşeme oranının azaldığı belirlenmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. EPB çalışma basıncına bağlı olarak hesaplanan kazı gevşeme oranları

Analiz No	**EPB Çalışma Basıncı (bar)**	**TBM Confinement Pressure (MPa)**
1	0	0
2	0.5	0.001
3	1	0.051
4	1.5	0.101
5	2	0.151
6	2.5	0.201
7	3	0.251
8	3.5	0.301
9	4	0.351
10	4.5	0.401
11	5	0.451

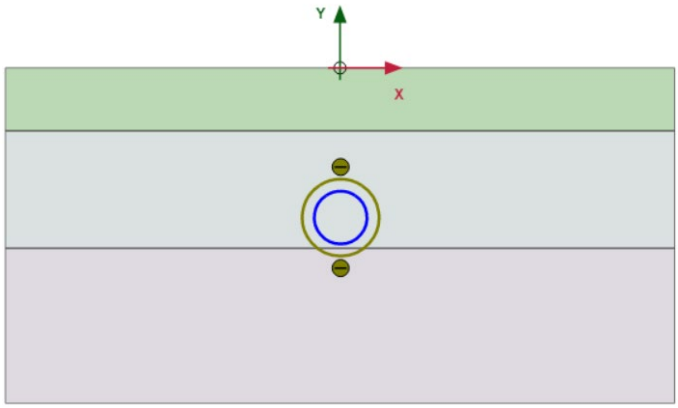
Saha uygulamasında kullanılan 1.7 bar çalışma basıncı için RocSupport analizinde kazı gevşeme oranı ise %23 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, PLAXIS 2D analizlerinde gerilme azaltma katsayısı olarak kullanılmıştır.



Şekil 1. 1.7 bar EPB çalışma basıncı için RocSupport analiz sonucu

4. SAYISAL MODELLEME

Km 12+160 kesitinde EPB TBM kazısı sonucunda oluşan deformasyonların belirlenmesi amacıyla PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak iki boyutlu sayısal model oluşturulmuştur (Brinkgreve vd., 2017). Model geometrisi, tünel çapı, örtü kalınlığı ve saha araştırmalarından elde edilen zemin profili esas alınarak tanımlanmıştır. Oluşturulan sayısal modelin genel görünümü Şekil 2'te verilmiştir.



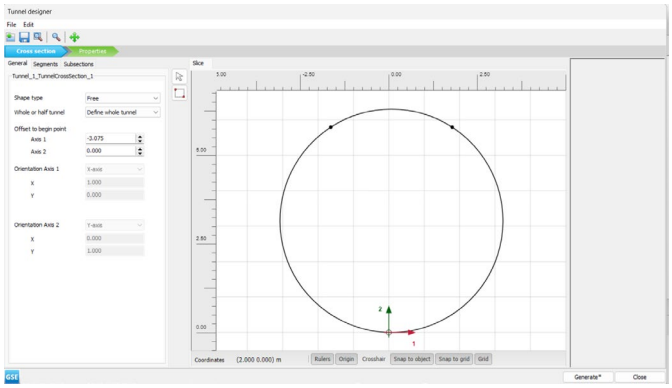
Şekil 2. PLAXIS 2D genel model görünümü

Sayısal modelde zemin profili yüzeyden itibaren 7 m yapay dolgu, 15 m killi silt ve 20 m alüvyonel kil tabakası olarak tanımlanmıştır. Zemin davranışının modellenmesinde Hardening Soil (HS) modeli kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri, saha ve geoteknik araştırmalardan elde edilen veriler esas alınarak modele tanımlanmıştır. PLAXIS 2D sayısal modelinde tanımlanan yapay dolgu, killi silt ve alüvyonel kil tabakalarına ait malzeme parametreleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. PLAXIS 2D sayısal modelinde kullanılan zemin malzeme parametreleri

Parametre	Sembol	Yapay Dolgu	Killi Silt	Alüvyonel Kil	Birim
Drenaj tipi	–	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	–
γunsat	γunsat	18.00	18.30	18.50	kN/m³
γsat	γsat	18.00	19.30	18.50	kN/m³
Rijitlik modülü	E′ref / E50ref	10000	12000	25000	kN/m²
Eoedref	Eoedref	–	12000	25000	kN/m²
Eurref	Eurref	–	36000	75000	kN/m²
Poisson oranı	ν / νur	0.30	0.20	0.20	–
m	m	–	0.50	0.50	–
pref	pref	–	100	100	kN/m²
Kohezyon	c′ref	5.00	5.00	10.00	kN/m²
İçsel sürtünme açısı	φ′	28.00	29.00	24.00	°
Dilatasyon açısı	ψ	0.00	0.00	0.00	°

Tünel kaplaması PLAXIS 2D ortamında plate elemanları ile modellenmiştir. Segment halkasının iç çapı 5.70 m, dış çapı 6.30 m ve kalınlığı 0.30 m olup beton sınıfı C45/55 olarak tanımlanmıştır. Tünel geometrisi Şekil 3'te gösterilmektedir.

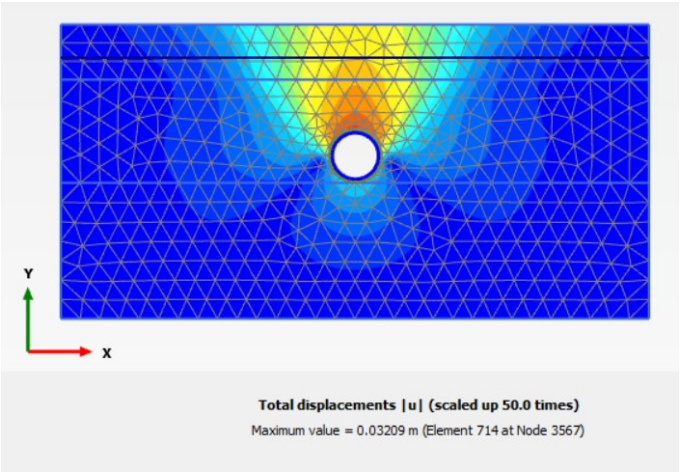


Şekil 3. Tünel geometrisi

Kazı aşamasında, RocSupport analizinden elde edilen %23 kazı gevşeme oranı M_{stage} değeri olarak sayısal modele uygulanmıştır. Analizler kademeli inşa yaklaşımıyla gerçekleştirilmiş; başlangıç gerilmeleri K_0 prosedürü ile oluşturulmuş, ardından tünel kazısı gerçekleştirilerek kazı gevşeme oranı uygulanmış ve son aşamada segment kaplaması aktif hale getirilmiştir. Böylece EPB TBM kazısından kaynaklanan gerilme boşalmasının iki boyutlu sayısal modelde temsil edilmesi amaçlanmıştır.

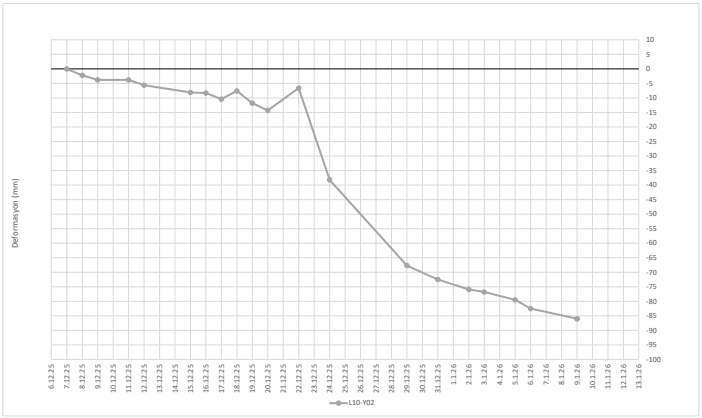
4.1. Sayısal Analiz Sonuçlarının Saha Ölçümleri ile Karşılaştırılması

Oluşturulan PLAXIS 2D modeli kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonucunda maksimum deplasman yaklaşık 3.2 cm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen toplam deplasman dağılımı Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. PLAXIS 2D analizinden elde edilen toplam deplasman

Sayısal model sonuçlarının değerlendirilmesi amacıyla aynı kesitte gerçekleştirilen saha ölçümleri incelenmiştir. Jeodezik ölçümler sonucunda maksimum deformasyonun yaklaşık 8.5 cm olduğu belirlenmiştir. Saha ölçümlerinden elde edilen oturma dağılımı Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Saha ölçümlerinden elde edilen yüzey oturma grafiği

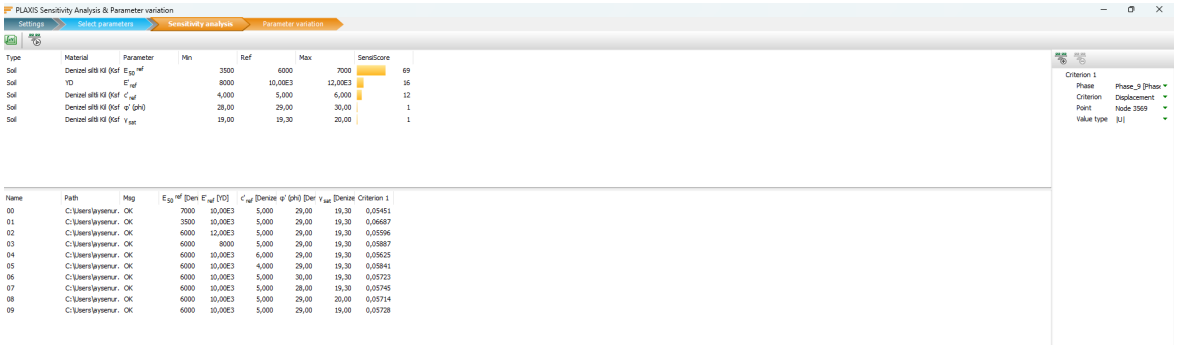
Sayısal analiz sonucunda elde edilen 3.2 cm'lik maksimum deplasman ile sahada ölçülen 8.5 cm'lik değer arasında belirgin bir fark bulunduğu görülmüştür. Bu durum, başlangıç modelinde kullanılan zemin parametrelerinin saha davranışını yeterli düzeyde temsil edemediğini göstermiş ve model parametrelerinin yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmıştır.

5. HASSASLIK ANALİZİ VE PARAMETRE KALİBRASYONU

Başlangıç sayısal modeli ile saha ölçümleri arasındaki farklılığın değerlendirilmesi amacıyla PLAXIS 2D ortamında hassaslık analizi yapılmıştır. Analizlerde başlangıç parametre seti referans alınmış ve seçilen zemin parametreleri belirli aralıklarda değiştirilirken diğer model özellikleri sabit tutulmuştur. Hassaslık analizinde toplam deformasyon kriter olarak seçilmiş; zeminin rijitlik özellikleri (E50ref, Eoedref), kohezyon

(cref), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve doygun birim hacim ağırlık (γsat) parametreleri değerlendirilmiştir.

Hassaslık analizi sonucunda en yüksek hassaslık skoru E50ref parametresi için 69 olarak hesaplanmıştır. Eoedref ve kohezyon parametrelerinin hassaslık skorları sırasıyla 16 ve 12 olurken, içsel sürtünme açısı ile doygun birim hacim ağırlık için bu değer 1 olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, yüzey deformasyonlarının özellikle zemin rijitliğini temsil eden E50ref parametresindeki değişimlere duyarlı olduğunu göstermiştir. Parametrelerin hassaslık dereceleri Şekil 6'da verilmiştir.



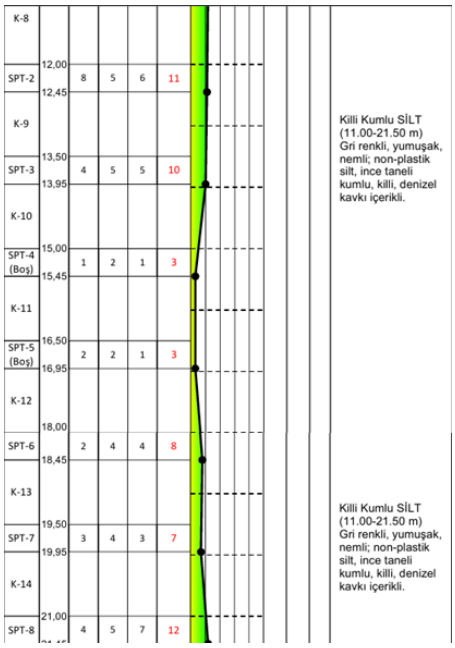
Şekil 6. Zemin parametrelerine ait hassaslık skorları

Sayısal analizlerde kullanılacak parametrelerde, hassaslık analizi sonuçları, kritik kesite ait karot örneği ve tünelin jeolojik konumu birlikte değerlendirilerek E50ref ve kohezyon (c) parametre seçimi yapılmıştır. Parametre varyasyonları, tünelin büyük ölçüde içerisinde yer aldığı killi silt tabakası için gerçekleştirilmiştir. Seçilen iki parametrenin farklı değerleri belirlenerek dört analiz kombinasyonu oluşturulmuş, diğer model parametreleri sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur.

Km 12+160 kesitine ait sondaj verileri incelendiğinde, yaklaşık 11.00–21.50 m derinlikleri arasında tanımlanan killi silt biriminde SPT-N değerlerinin 3–12 arasında değiştiği görülmektedir. Özellikle 15.00–17.00 m derinlikleri arasında N=3 gibi düşük değerlerin elde edilmesi ve sondaj logunda söz konusu birimin "yumuşak" olarak tanımlanması, zeminin yer yer düşük dirençli ve yüksek deformasyon potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Karot örneğinde gözlenen zayıf zemin yapısı da bu değerlendirmeyi desteklemektedir. Bu saha bulguları, hassaslık analizinde killi silt tabakası için daha düşük rijitlik değerlerinin değerlendirilmesine ve E50ref parametresinin kalibrasyon kapsamında incelenmesine gerekçe oluşturmuştur.



Şekil 7. Km 12+160 kesitine ait karot örneği



Şekil 8. Km 12+160 kesitine ait sondaj logu ve SPT-N değerleri

Tablo 4. Parametre varyasyonu analiz sonuçları

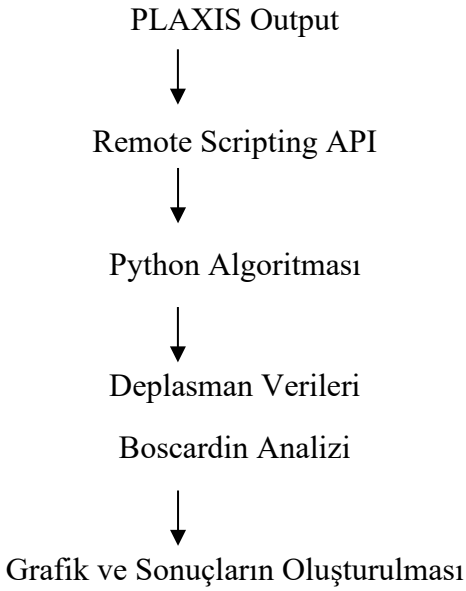
Analizler	**E_{50}**	**c**	**Deformasyon (cm)**
Durum 1	3500	4	8.9
Durum 2	3500	6	8.6
Durum 3	7000	4	5.0
Durum 4	7000	6	4.8

Analiz sonuçlarına göre E_{50ref} değerinin azalmasıyla yüzey deformasyonlarının belirgin şekilde arttığı görülmüştür. E_{50ref} = 3500 kPa ve c = 6 kPa değerlerinin kullanıldığı Durum 2'de maksimum deformasyon 8.6 cm olarak hesaplanmış ve sahada ölçülen 8.5 cm değerine en yakın sonuç elde edilmiştir. Bu nedenle söz konusu değerler kalibre edilmiş parametre seti olarak seçilmiştir.

6. PYTHON TABANLI DEĞERLENDİRME VE HASAR ANALİZİ

6.1. PLAXIS 2D ve Python Entegrasyonu

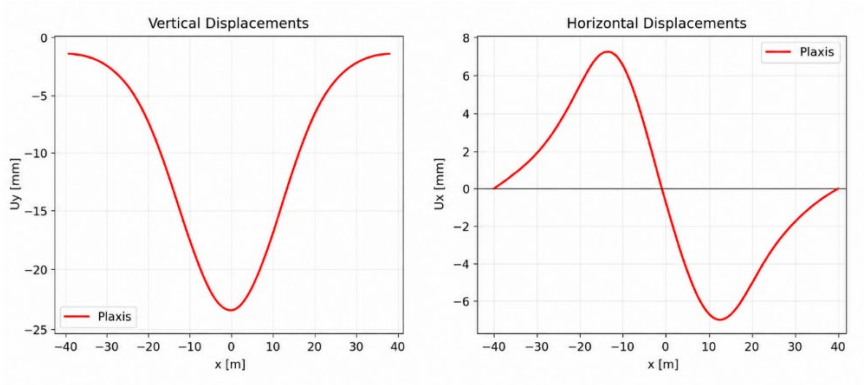
Kalibre edilmiş zemin parametreleri ile PLAXIS 2D analizleri tekrarlanmış ve elde edilen sonuçların otomatik olarak değerlendirilmesi amacıyla Python programlama dili ile PLAXIS Remote Scripting API birlikte kullanılmıştır. Geliştirilen algoritma ile PLAXIS Output ortamındaki yüzey noktalarına ait yatay (U_x) ve düşey (U_y) deplasmanlar doğrudan Python ortamına aktarılmış ve sonuçların sistematik olarak işlenmesi sağlanmıştır. Algoritmanın çalışma akışı Şekil 9'da verilmiştir.



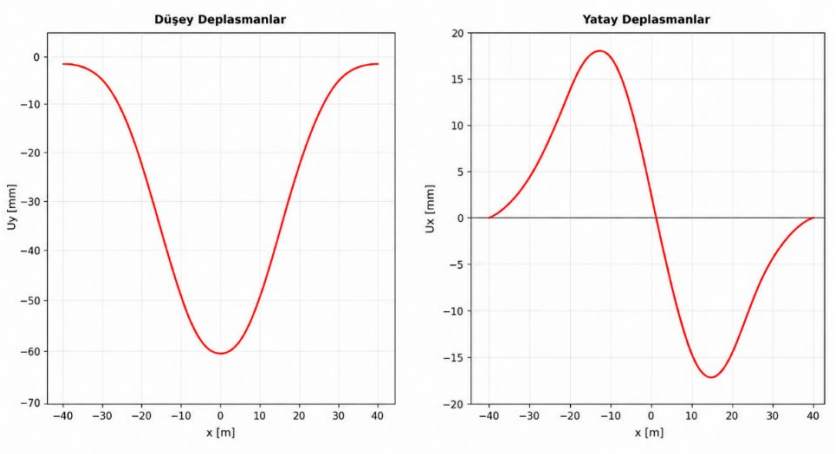
Şekil 9. Python tabanlı otomatik analiz algoritmasının çalışma akışı

6.2. Yüzey Deplasmanlarının Değerlendirilmesi

Python ortamına aktarılan deplasman verileri kullanılarak yüzey boyunca oluşan deformasyon dağılımları değerlendirilmiştir. Başlangıç ve kalibre edilmiş parametre setleri için elde edilen düşey ve yatay deplasman eğrileri Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Her iki modelde de düşey deplasmanların tünel ekseni üzerinde maksimum değere ulaştığı ve eksenden uzaklaştıkça azaldığı görülmüştür. Kalibre edilmiş modelde ise oturma çanağının daha belirgin hale geldiği ve deformasyonların daha geniş bir alana yayıldığı belirlenmiştir. Bu bölümde değerlendirilen deplasman eğrileri zemin yüzeyi boyunca elde edilen yatay ve düşey deplasman dağılımlarını göstermektedir. Önceki bölümlerde verilen 3.2 cm ve 8.6 cm değerleri ise tünel taç bölgesinde belirlenen maksimum deformasyonları ifade etmektedir. Bu nedenle yüzeyde elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri ile tünel taç bölgesinde hesaplanan maksimum deformasyon değerleri farklılık göstermektedir.



Şekil 10. Başlangıç parametre seti ile elde edilen düşey ve yatay deplasman eğrileri



Şekil 11. Kalibre edilmiş parametre seti ile elde edilen düşey ve yatay deplasman eğrileri

6.3. Boscardin Hasar Değerlendirmesi

Yüzey deformasyonlarının çevre yapılar üzerindeki olası etkilerinin değerlendirilmesinde Boscardin ve Cording (1989) hasar sınıflandırması kullanılmıştır. Bu amaçla, PLAXIS 2D modelinden Python ortamına aktarılan zemin yüzeyine ait düşey (Uy) ve yatay (Ux) deplasman değerleri kullanılarak açısal distorsiyon (β) ve yatay birim şekil değiştirme (ε) değerleri hesaplanarak hasar sınırları ile karşılaştırılmıştır.

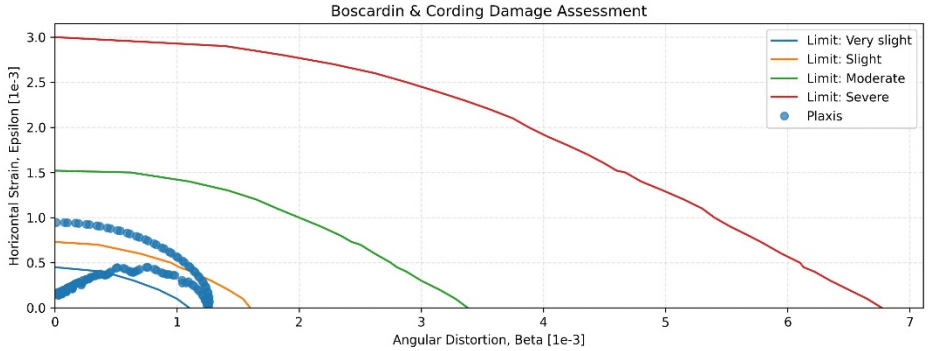
Başlangıç modelinde maksimum açısal distorsiyon 1.263×10^{-3} ve maksimum yatay birim şekil değiştirme 0.948×10^{-3} olarak hesaplanmış ve en yüksek hasar sınıfı "Orta" olarak belirlenmiştir. Kalibre edilmiş modelde ise bu değerler sırasıyla 3.209×10^{-3} ve $1,899\times10^{-3}$'e yükselmiş ve maksimum hasar sınıfı "Ağır" olarak belirlenmiştir. Sonuçların karşılaştırılması Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Boscardin hasar değerlendirme sonuçlarının karşılaştırılması

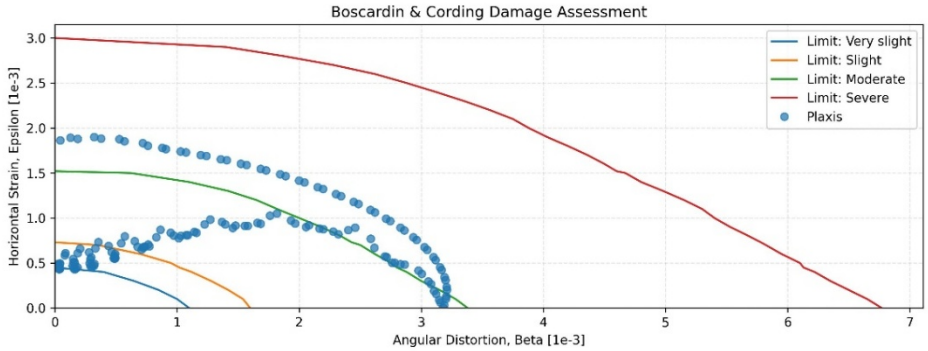
Parametre	Başlangıç Parametre Seti	Kalibre Parametre Seti
Maksimum düşey deplasman, |Uy| (mm)	22.55	60.92
Maksimum yatay deplasman, |Ux| (mm)	7.21	16.68
Maksimum açısal distorsiyon, βmax (×10⁻³)	1.263	3.209
Maksimum yatay birim şekil değiştirme, ε_{max} (×10⁻³)	0.948	1.899
Maksimum hasar sınıfı	Orta	Ağır

Kalibrasyon sonucunda deformasyonların artmasıyla birlikte açısal distorsiyon ve yatay birim şekil değiştirme değerlerinin de arttığı görülmüştür. Bu sonuç, zemin parametrelerinin kalibrasyonunun yalnızca hesaplanan deformasyon büyüklüğünü değil, çevre yapıların hasar potansiyeline ilişkin değerlendirmeleri de doğrudan etkilediğini göstermektedir. Başlangıç parametre setine ait Boscardin hasar değerlendirmesi Şekil 1**2**'de, kalibre edilmiş parametre setine ait değerlendirme ise Şekil 1**3**'de verilmiştir. Başlangıç modelinde analiz noktalarının büyük bölümünün "Çok hafif" ve "Hafif" hasar bölgelerinde yer aldığı, sınırlı sayıda noktanın "Orta" hasar bölgesine ulaştığı görülmüştür.

Kalibre edilmiş modelde ise deformasyonların artmasına bağlı olarak değerlendirme noktalarının daha yüksek hasar bölgelerine taşındığı belirlenmiştir.



Şekil 12. Başlangıç parametre setine ait Boscardin hasar değerlendirmesi



Şekil 13. Kalibre edilmiş parametre setine ait Boscardin hasar değerlendirmesi

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada EPB TBM ile gerçekleştirilen bir tünel kazısında yüzey deformasyonları; RocSupport, PLAXIS 2D, saha ölçümleri ve parametre kalibrasyonu birlikte değerlendirilerek incelenmiştir. RocSupport analizlerinde EPB çalışma basıncının artmasıyla kazı gevşeme oranının doğrusal olmayan biçimde azaldığı belirlenmiş ve sahada uygulanan 1.7 bar basınç için kazı gevşeme oranı %23 olarak hesaplanmış ve bu değer PLAXIS 2D modelinde kazı aşamasına aktarılmıştır.

Başlangıç zemin parametreleri ile gerçekleştirilen sayısal analizde maksimum deformasyon yaklaşık 3.2 cm olarak hesaplanırken, aynı kesitte saha ölçümlerinde yaklaşık 8.5 cm deformasyon belirlenmiştir. Bu farklılık, başlangıç modelindeki zemin parametrelerinin saha davranışını yeterli düzeyde temsil etmediğini göstermiştir. Bu nedenle, zemin parametrelerini sahaya uygun olarak seçebilmek için hassaslık analizleri yapılmıştır. Hassaslık analizleri sonucunda deformasyon davranışı üzerinde en etkili parametrenin E50ref olduğu, bunu Eoedref ve kohezyon parametrelerinin olduğu belirlenmiştir. Parametre varyasyonları sonucunda E50ref = 3500 kPa ve c = 6 kPa değerlerinden oluşan parametre seti ile yaklaşık 8.6 cm maksimum deformasyon elde edilmiş ve bu değer saha ölçümlerine en yakın sonucu vermiştir.

Kalibre edilmiş modelden elde edilen deplasmanların Python–PLAXIS Remote Scripting API kullanılarak değerlendirilmesi sonucunda oturma eğrileri oluşturulmuş ve Boscardin hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sonrasında açısal distorsiyon ve yatay birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı, maksimum hasar sınıfının "Orta" seviyeden "Ağır" seviyesine yükseldiği görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar, EPB TBM tünellerinde yüzey deformasyonlarının yalnızca ayna destek basıncı ile açıklanamayacağını; zemin rijitliği ve dayanım parametrelerinin de sonuçlar üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu nedenle sayısal modellerin saha ölçümleri ile doğrulanması ve gerekli durumlarda parametre kalibrasyonu yapılması, yüzey oturmalarının ve çevre yapıların olası hasar seviyelerinin daha güvenilir biçimde tahmin edilmesi açısından önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Almog, E., Mangione, M. ve Cachia, G. (2015). Ground relaxation in segmental lining design using the convergence-confinement method. Proceedings of the IOM3 Hong Kong Branch Underground Design and Construction Conference 2015, 335–345.

Boscardin, M. D. ve Cording, E. J. (1989). Building response to excavation-induced settlement. Journal of Geotechnical Engineering, 115(1), 1–21.

Brinkgreve, R. B. J., Engin, E. ve Swolfs, W. M. (Eds.). (2017). PLAXIS Manual. PLAXIS BV, Hollanda.

Carranza-Torres, C. ve Fairhurst, C. (2000). Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. Tunnelling and Underground Space Technology, 15(2), 187–213.

Rocscience Inc. (2021). RocSupport User Guide: Tutorial 9—Convergence-Confinement Method for TBM Segmental Lining Design (Almog et al., 2015).

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
λ	Kazı gevşeme oranı	E_{50ref}	Sekant rijitlik modülü
c	Kohezyon	E_{oedref}	Ödometre rijitlik modülü
φ	İçsel sürtünme açısı	γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlık
U_x	Yatay deplasman	U_y	Düşey deplasman
β	Açısal distorsiyon	ε	Yatay birim şekil değiştirme
P_0	Başlangıç arazi gerilmesi		