

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ZAYIF JEOLojİK ORTAMLARDA (İSTANBUL METROSU) SIĞ VE ÇOKLU
YERALTı AÇIKLIKLARININ NEDEN OLDUĞU YÜZEY
DEFORMASYONLARININ KESTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Candaş TOPAL

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeoloji Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ZAYIF JEOLojİK ORTAMLARDA (İSTANBUL METROSU) SIĞ VE ÇOKLU
YERALTI AÇIKLIKLARININ NEDEN OLDUĞU YÜZEY
DEFORMASYONLARININ KESTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Candaş TOPAL
(505152304)**

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeoloji Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU

AĞUSTOS 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505152304 numaralı Doktora Öğrencisi Candaş TOPAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ZAYIF JEOLJİK ORTAMLARDA (İSTANBUL METROSU) SIĞ VE ÇOKLU YERALTI AÇIKLIKLARININ NEDEN OLDUĞU YÜZEY DEFORMASYONLARININ KESTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Reşat ULUSAY
Hacettepe Üniversitesi

Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Halil KUMSAR
Pamukkale Üniversitesi

Teslim Tarihi : 24 Haziran 2021
Savunma Tarihi : 06 Ağustos 2021



ÖNSÖZ

Zayıf jeolojik ortamlarda (İstanbul metrosu) sığ ve çoklu yeraltı açıklıklarının neden olduğu yüzey deformasyonlarının kestirilmesi başlıklı doktora tez çalışmam sürecinde ve öncesinde lisans eğitimimden başlayarak benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın tez danışmanım Doç. Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU'na

Çalışmam kapsamında çok kıymetli katkılarıyla tezime şekil veren tez izleme komitesi jüri üyelerim sayın Prof. Dr. Reşat ULUSAY'a, sayın Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL'e

Çalışmam kapsamında, gerekli verilerin temin edilmesinde yardımcı olan İstanbul Büyükşehir Belediyesine ve akademik anlamda gelişimimi sağlayan İstanbul Teknik Üniversitesine

Doktora çalışmam boyunca ve her daim yanımda olan, karşılaştığım her zorlukta benden desteğini ve fedakarlığını esirgemeyen sevgili ailem ve İnşaat Mühendisi ve Çevre Mühendisi Filiz ORALP'e

Sonsuz teşekkürlerimi iletmeyi bir borç bilirim.

Haziran 2021

Candaş TOPAL
(Jeoloji Yüksek Mühendisi ve İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	1
1.2 Çalışma Alanı	2
1.3 Önceki Çalışmalar	2
1.4 Kapsam ve Yöntem	3
2. YERALTI KAZILARINA BAĞLI GELİŞEN YÜZEY OTURMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	5
2.1 Enine Gelişen Oturmalar	9
2.1.1 Yüzey oturma eğrisi – Gauss hata fonksiyonu.....	9
2.1.2 Zemin kaybı	10
2.1.3 Oturma profillerinin değerlendirilmesinde kullanılan istatistiksel yaklaşım.....	10
2.1.4 Oturma eğrisi dönüm noktasının belirlenmesi	11
2.1.5 Maksimum oturma değerinin belirlenmesi	12
2.1.6 Oturma teknesinin genişliği	13
2.2 Oturma Teknesi Boy Kesiti.....	15
2.3 İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Gelişen Yüzey Deformasyonlarının Değerlendirilmesi	17
2.4 Metro Tüneli Kazılarının Etkisi	18
2.5 Oturmanın Kontrolü	20
2.6 Mekanize Tünelcilik Yöntemi.....	22
2.7 Tünel Kazı Makinesi Ayna Basıncının Belirlenmesi	24
3. KAZI ORTAMININ SAYISAL MODELİNİN OLUŞTURULMASI.....	27
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Yeraltı Açıklıklarının Modellenmesi	27
3.2 Çalışma Kapsamında Kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi Yazılımları	30
3.2.1 Rocscience RS2 Yazılımının Tanıtılması	30
3.2.2 Plaxis 3B Tünel Yazılımının Tanıtılması.....	31
3.2.3 Plaxis 2B Tünel Yazılımının Tanıtılması.....	31
3.3 Araştırma Kapsamında Kullanılan Yenilme Modelleri	31
3.3.1 Mohr – Coulomb Modeli	32
3.3.2 Pekleşen Zemin Modeli	32
3.4 Jeolojik Birimlerin Jeomekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	33

3.4.1 Doğal Birim Hacim Ağırlığının Kestirilmesi.....	33
3.4.2 Hidrolik İletkenlik Katsayılarının Kestirilmesi.....	34
3.4.3 Elastisite Modülü ve Poisson Oranlarının Seçilmesi	35
3.4.4 Kohezyonlu Zeminlerin Mekanik Parametrelerinin Kestirilmesi	36
3.4.4.1 Drenajsız Makaslama Dayanımının Kestirilmesi.....	36
3.4.4.2 Efektif Sürtünme Açısının Kestirilmesi	38
3.4.4.3 Elastisite Modülünün Kestirilmesi	38
3.4.5 Kohezyonsuz Zeminlerin Mekanik Parametrelerinin Kestirilmesi	39
3.4.5.1 İçsel Sürtünme Açısının Kestirilmesi.....	39
3.4.5.2 Elastisite Modülünün Kestirilmesi	39
4. İNCELENEN METRO HATLARININ MODELLENMESİ VE ANALİZİ..	41
4.1 İzleme Metodolojisi.....	44
4.2 İncelenen Hatların Jeolojisi	47
4.3 Stratigrafi.....	47
4.3.1 Senozoyik.....	47
4.3.1.1 Ceylan Formasyonu – (Orta-Üst Eosen)	48
4.3.1.2 Çukurçeşme Formasyonu (Miyosen)	49
4.3.1.3 Güngören Formasyonu (Miyosen)	49
4.3.2 Alüvyon (Kuvaterner)	50
4.3.3 Dolgu (Güncel).....	50
4.4 Yapısal Jeoloji	50
4.5 Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı.....	51
4.5.1 Km 0+900.00 – 1+000.00 Arası Bölge	51
4.5.1.1 Oturma Teknesi Profilleri.....	53
4.5.1.2 Sayısal Analiz.....	55
4.5.2 Km 1+850.00 – 1+900.00 Arası Bölge	58
4.5.2.1 Oturma Teknesi Profilleri.....	60
4.5.2.2 Sayısal Analiz.....	61
4.5.3 Km 4+360.00 – 4+470.00 Arası Bölge	64
4.5.3.1 Oturma Teknesi Profilleri.....	66
4.5.3.2 Sayısal Analiz.....	68
4.5.4 Km 9+740 – 9+800 Arası Bölge	72
4.5.4.1 Oturma Teknesi Profilleri.....	74
4.5.4.2 Sayısal Analiz.....	75
4.6 Ataköy-İkitelli Metro Hattı.....	79
4.6.1 Km 8+760.00 -8+860.00	79
4.6.1.3 Oturma Teknesi Profili.....	81
4.6.1.4 Sayısal Analiz.....	81
4.6.2 Km 9+660.00 – 9+ 780.00	85
4.6.2.1 Oturma Teknesi Profili.....	87
4.6.2.2 Sayısal Analiz.....	87
5. İKİZ TÜNEL KAZILARINA BAĞLI GELİŞEN YÜZEY	
DEFORMASYONLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	93
5.1 İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Gelişen Yeraltısu Seviyesi Değişimi	95
5.2 Tüneller Arası Ara Mesafe ve Eksen Derinlikleri Arasındaki İlişkinin	
İncelenmesi	98
5.2.1 İki Boyutlu (2B) Sayısal Model Analizi.....	99
5.2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Jeoteknik Özelliklerin Yüzey	
Deformasyonu Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi	113
5.2.2.1 Elastisite Modülünün Etkisi	113

5.3 İkiz Tünel Kazılarının Etkileşiminin Üç Boyutlu Analizi.....	120
5.4 İki Boyutlu ve Üç Boyutlu Sayısal Modellerin Karşılaştırılması.....	132
6. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	139
7. SONUÇLAR	145
KAYNAKLAR	147
EKLER.....	155
ÖZGEÇMİŞ.....	203



KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu Ve Taşımacılık İdareleri Birliği)
BMP	: Building Measurement Settlement Point (Binada Oturma Ölçüm Noktası)
EPB-TBM	: Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine (Pasa Basınçlı Tünel Delme Makinası)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
ITA	: International Tunnel Association (Uluslararası Tünelcilik Derneği)
İ.B.B	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
JSCE	: Japan Society of Civil Engineers (Japonya İnşaat Mühendisleri Derneği)
KAFZ	: Kuzey Anadolu Fay Zonu
KH	: Kesit Hattı
NATM	: New Austrian Tunneling Method (Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi)
RQD	: Rock Quality Designation (Kaya Kalite Göstergesi)
SMP	: Surface Settlement Measurement Point (Yüzey Oturma Ölçüm Noktası)
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
TBM	: Tunnel Boring Machine (Tünel Açma Makinası)
USCS	: Unified Soil Classification System (Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi)
YASS	: Yeraltısuyu Seviyesi
YATM	: Yeni Avusturya Tünel Yöntemi



SEMBOLLER

ϕ, ϕ'	: Efektif İçsel Sürtünme Açısı
ϕ	: Zeminin Drenajsız İçsel Sürtünme Açısı
γ, γ_b	: Birim Hacim Ağırlığı
$\gamma_{sat}, \gamma_{doygun}$	: Doygun Birim Hacim Ağırlık
$\gamma_{dry}, \gamma_{kuru}, \gamma_{unsat}$	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
γ_n	: Doğal Birim Hacim Ağırlık
β	: Sınır Açısı
ψ	: Dilatasyon Açısı
δ	: Kemerleşmiş Prizmanın Duvar Sürtünme Açısı
τ	: Makaslama Dayanımı
$\nu, \nu_{ur}^{(nu)}$	: Poisson Oranı
$\nu_{çelik}$	: Çeliğin Poisson Oranı
ν_{beton}	: Betonun Poisson Oranı
σ'_3	: Çevre Basıncı
σ_h	: Tünel Üzengi Hattındaki Yatay Toprak Basıncı
σ_s	: Yapı Veya Trafik Yükünden Kaynaklanan İlave Yük Miktarı
σ_{sur}	: Yüzey Örtü Basıncı (kPa)
σ_T	: TBM Ayna Basıncı
σ_v	: Tünel Tavanındaki Düşey Örtü Basıncı
E_{oed}^{ref}	: Drenajlı Odömetre Deneyinden Elde Edilen Tanjant Rijitliği
E_{ur}^{ref}	: Elastik Yükleme/Boşaltma Rijitliği
E_{50}^{ref}	: Standart Drenajlı Üç Eksenli Deney İle Elde Edilen Sekant Rijitliği
K_E	: Elemanın Rijitlik Matrisi
K_G	: Global Rijitlik Matrisi
K_0, K_n^{nc}	: Sükunetteki Toprak Basıncı
K_0^{nc}	: Normal Konsolidasyon Katsayısı
ΔR_E	: Düğüm Noktalarındaki Kuvvetin Artımsal Vektörü
Δd_E	: Düğüm Noktalarındaki Yer Değiştirmenin Artımsal Vektörü
Δd_G	: Tüm Düğüm Noktalarındaki Yerdeğiştirmenin Artımsal Vektörü
ΔR_G	: Tüm Düğüm Noktalarındaki Kuvvetin Artımsal Vektörü
a, d	: Tünel Eksenleri Arasındaki Mesafe
b_s	: Kemerlenmiş Zemin Prizmasının Yarı Genişliği (m)
C	: TBM Kalkanı (Shield) Konikliği
C_{ref}	: TBM Kalkanı (Shield) Koniklik Azaltım Referans Değeri
c	: Kohezyon
c'	: Efektif Kohezyon
c_u	: Drenajsız Makaslama Dayanımı
$d_{segment}$	: Segment (Beton Kaplama) Eşdeğer Kalınlık
D	: Tünel Kazı Çapı
$d_{segment}$	: Segment Kalınlığı
D_{TBM}	: TBM Kazı Çapı

E, E_a, E_s, E_y	: Elastisite Modülü
E_{beton}	: Betonun Elastisite Modülü
E_{çelik}	: Çeliğin Elastisite Modülü
G_s	: Özgül Ağırlık
H	: Örtü Kalınlığı
h	: Tünel Tavanı ile Yeryüzü Arasında Kalan Mesafe
h₀	: Kemerlenme Yüksekliği
i	: Gauss Eğrisi Dönüm Noktası
i₁	: 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)
K₁	: Birinci Tünel Kazısı Sonrası Elde Edilen Oturma Teknesi Genişlik Parametresi
K_{2(btd)}	: İkinci Tünel Kazısı Sonrası Elde Edilen Oturma Teknesi Genişlik Parametresi- Birinci Tünele Doğru
K_{2(btu)}	: İkinci Tünel Kazısı Sonrası Elde Edilen Oturma Teknesi Genişlik Parametresi-Birinci Tünelden 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)
k_s	: Hidrolik İletkenlik
K_z	: Zemin Kaybı
m	: Rijitliğe Bağlı Olarak Üst Olarak Seçilen Gerilme Değeri
N	: Stabilite Oranı
P_{ek}	: Yapay yayılı yük (sürşarj) miktarı
PI	: Plastisite İndeksi
p_{ref} :	: Referans Gerilme
R	: Tünel Yarıçapı
S	: Tünel Merkez Hattından Belirli Bir Yatay Mesafede Oluşan Yüzey Oturması
S_{max}	: Maksimum Yüzey Oturması
S_{max-brt}	: Birinci Tünelin Oluşturduğu Maksimum Yüzey Oturması
u	: Tünel Çeperindeki Zeminin Elastik Sınırlar İçerisinde Yapacağı Radyal Kapanma
U_r	: Tünel Radyal Kapanımı
UU	: Konsolidasyonsuz-Drenajsız
V_k	: Zemin Kaybı
V_t	: Tünel Çeperindeki Zeminin Elastik Sınırlar İçerisinde Yapacağı Radyal Kapanım Nedeniyle Oluşacak Zemin Kaybı
w	: Birim Ağırlık
W_n	: Su İçeriği
x	: Tünel Merkez Hattından Yatay Mesafe

Z_0 : Tünel Ekseninin Derinliği





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Otogar-Kirazlı hattında gerçekleştirilen jeoteknik araştırmalar.....	2
Çizelge 2.1 : K değerinin farklı zemin türlerine göre değişimini gösteren çizelge. ..	14
Çizelge 2.2 : K ve B katsayılarının zemin türüne bağlı değişimi.....	15
Çizelge 2.3 : Tünel içi ve dışı deformasyon izleme sistemleri.	20
Çizelge 3.1 : Zemin türleri ve doğal birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki.	33
Çizelge 3.2 : Zemin hidrolik iletkenlik katsayıları.	34
Çizelge 3.3 : Zeminlerin tipik elastisite modülü ve Poisson oranları.	36
Çizelge 3.4: Killerin drenajsız makaslama dayanımı ile deformasyon modülü arasındaki ilişki.	38
Çizelge 3.5: Kohezyonsuz zeminlerin SPT ve elastisite modülü ilişkisi.....	39
Çizelge 4.1: Sayısal model sınır parametreleri.	56
Çizelge 4.2 : A_2 - A_2' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler. .	57
Çizelge 4.3: Sayısal model sınır parametreleri.	62
Çizelge 4.4 : B_2 - B_2' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler. .	63
Çizelge 4.5 : Sayısal model sınır parametreleri.	70
Çizelge 4.6 : C_3 - C_3' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler. .	71
Çizelge 4.7: Sayısal model sınır parametreleri.	77
Çizelge 4.8 : D_1 - D_1' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler. .	78
Çizelge 4.9 : Sayısal model sınır parametreleri.	83
Çizelge 4.10 : E_1 - E_1' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler. .	84
Çizelge 4.11 : Sayısal model sınır parametreleri.	89
Çizelge 4.12 : F_1 - F_1' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler. .	90
Çizelge 5.1 : Kavramsal model yer malzemesi parametrelerinin literatürden seçilen zayıf zemin parametreleri ile karşılaştırılması.	94
Çizelge 5.2 : Modele işlenen yer malzemesi ve beton kaplama mekanik değerleri. .	96
Çizelge 5.3 : Plaxis 2B model çalışmasında esas alınan yer malzemesi parametreleri.	99
Çizelge 5.4 : Plaxis 2B (iki boyut) model çalışmasına uygulanan tünel kaplamasına ait mekanik parametreler.	100
Çizelge 5.5 : Tünel arası farklı geometriler için analiz girdileri.	102
Çizelge 5.6 : Plaxis 2B analiz sonuçları.....	110
Çizelge 5.7 : Elastisite modülü değişimine bağlı elde edilen yüzey oturma miktarları ve değişim oranları.....	115
Çizelge 5.8 : Herzog (1985)'e göre hesaplanmış elastisite modülü değişimine bağlı yüzey oturma miktarları ve değişim oranları.	117
Çizelge 5.9 : Plaxis 3B model jeoteknik parametreler.....	123
Çizelge 5.10 : Plaxis 3B modelde kullanılan beton kaplama (liner) ve TBM mekanik parametreleri.	124
Çizelge 5.11 : Üç boyutlu analizler neticesinde ön yüzde oluşan 1. Tüp ve 2. Tüpün oluşturduğu maksimum deformasyon miktarları.....	132

Çizelge 5.12 : Üç boyutlu analizler neticesinde arka yüzde oluşan 1. Tüp ve 2. Tüpün oluşturduğu maksimum deformasyon miktarları.	132
Çizelge 5.13 : İki boyutlu (2B) ve Üç Boyutlu (3B) sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.	138
Çizelge 6.1 : Gerçek saha verilerinden elde edilen yüzey oturma eğrisi (i) dönüm noktası ve yer malzemesi (K) parametrelerinin karşılaştırması	140
Çizelge 6.2: İzleme verileri ve FEM analizinden elde edilen oturma eğrilerinin dönüm noktası (i) ve yer malzemesi parametresinin (K) değişimleri.	144
Çizelge A.1 : SK-1 ve SK-2 Sondajlarına Ait SPT Değerleri.	158
Çizelge A.2 : SK-1 Ve SK-2 Sondajlarından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları.	159
Çizelge A.3 : SK-1 ve SK-2 Sondajlarından Alınan Örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları.	161
Çizelge C.1 : YK-05 ve S-6 sondajlarına ait SPT değerleri.	166
Çizelge E.1 : YS-7A Sondajına Ait SPT Değerleri.	172
Çizelge E.2 : YS-7A Sondajından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları.....	173
Çizelge E.3 : YS-7A sondajından alınan örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları.	174
Çizelge G.1 : Sondajlarda yapılan SPT deneylerinin derinlikleri, litoloji ve SPTN değerleri	178
Çizelge G.2 : Sondajlardan alınan SPT numuneleri (örselenmiş örnekler) üzerinde yapılan zemin sınıflama deneylerinin sonuçları.....	179
Çizelge G.3 : Örselenmemiş örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerine ait sonuçlar	180
Çizelge İ.1 : PRT-SK-23 Sondajına Ait SPT Değerleri	184
Çizelge İ.2 : PRT-SK-23 Sondajına Ait Hidrolik İletkenlik Değerleri	186
Çizelge İ.3 : PRT-SK-23 Sondajına Ait Presiyometre Değerleri.	187
Çizelge İ.4 : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları	188
Çizelge İ.5 : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları	191
Çizelge İ.6 : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin Üzerinde Yapılan Doğrudan Makaslama ve Üç Eksenli Sıkışma Sonuçları.....	194
Çizelge J.1 : PRT-SK-19 Sondajına Ait SPT Değerleri.	198
Çizelge J.2 : PRT-SK-19 Sondajına Ait Hidrolik İletkenlik Değerleri.	199
Çizelge J.3 : PRT-SK-19 Sondajından Alınan Örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları.	200
Çizelge J.4 : PRT-SK-19 Sondajından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları.	201

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kazı profiline bağlı gelişen boyuna oturma teknesi.....	6
Şekil 2.2 : Kazı profiline bağlı gelişen enine oturma teknesi.....	7
Şekil 2.3 : Ayna arkasında oluşan yenilme bölgesi ve boyuna oturma teknesi.....	7
Şekil 2.4 : Ayna ilerisinde oluşan yenilme bölgesi ve boyuna oturma teknesi.	8
Şekil 2.5 : Yeraltı kazısına bağlı gelişen oturma çukurunun 3 boyutlu gösterimi.....	8
Şekil 2.6 : Yeraltı kazılarına bağlı gelişen enine oturma teknesine ait tanımlamalar..	9
Şekil 2.7 : Yüzey oturmasına bağlı gelişen zemin kaybının teorik profili.	10
Şekil 2.8 : TBM kazılarına bağlı gelişen boyuna oturmalar.....	16
Şekil 2.9 : Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı ikiz tünel kazılarına bağlı gelişen enine oturma teknesi-Km 4+425.	18
Şekil 2.10 : Binalarda yeraltı kazılarının neden olduğu idealize edilmiş tipik deformasyon şekilleri.....	19
Şekil 2.11 : Yüzeyden İzleme Sistemleri.....	21
Şekil 2.12 : Tünel İçi İzleme Sistemleri.	21
Şekil 2.13 : TBM tipleri.	22
Şekil 2.14 : EPB tip TBM makinesi ana bileşenleri.....	23
Şekil 2.15 : Sol görsel – Stoklanmış segment elemanları, Sağ görsel- Tünel içi montajı gerçekleştirilmiş segment elemanları.....	23
Şekil 2.16 : EPB tip makinelerin maruz kaldığı basınçlar.....	24
Şekil 3.1 : İki boyutlu (sol) ve üç boyutlu (sağ) düğüm noktalarının bağlantı şekilleri.....	29
Şekil 3.2 : Jeolojik model içerisine yerleştirilmiş olan bir tünel kesitinin iki boyutlu ve üç boyutlu örgü (mesh) görselleri.	30
Şekil 3.3 : Plastisite indisi ve f_1 arasındaki ilişkisi.....	37
Şekil 3.4 : Standart penetrasyon testi değeri ve drenajsız makaslama dayanımı arasındaki ilişkisi.....	37
Şekil 3.5 : Efektif içsel sürtünme açısı ile plastisite indeksi arasındaki ilişki.....	38
Şekil 3.6 : Spt N değeri ile efektif makaslama dayanımı açısı ilişkisi.....	39
Şekil 4.1 : Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir ve Ataköy-İkitelli Metro Hat güzergahları.....	42
Şekil 4.2: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro hattındaki ikiz tünel kazılarının yüzeye ulaşan etkileri.	43
Şekil 4.3 : Tünel kazılarına bağlı değişen Gauss eğrilerinin normalizasyon işlemine göre şematik gösterimi.	45
Şekil 4.4 : Sonlu elemanlar analizinde göz önünde tutulan genel geometrik model ve sınır koşullar.....	46
Şekil 4.5 : İnceleme bölgesinin ve çevresinin jeoloji haritası.	47
Şekil 4.6: Trakya havzasının Senozoyik kayastratigrafi birimlerinin genelleştirilmiş dikme kesiti.....	48

Şekil 4.7 : Km 0 + 900.00 - Km 1 + 000.00 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kullanılan kesit hatları.	52
Şekil 4.8 : A ₁ -A ₁ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	53
Şekil 4.9 : A ₂ -A ₂ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	54
Şekil 4.10 : A ₂ -A ₂ ' kesit hattı üzerinde bulunan üç yüzey oturma izleme noktasında ölçülen oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	55
Şekil 4.11 : A ₂ -A ₂ ' kesitinin <i>FEM</i> modeli.	56
Şekil 4.12 : A ₂ -A ₂ ' kesitinde <i>FEM</i> ile elde edilen yüzey oturma eğrileri ile izleme verilerinin karşılaştırılması.	58
Şekil 4.13 : Km 1+850.00 -1+900.00 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kullanılan kesit hatları.	59
Şekil 4.14 : B ₁ -B ₁ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	60
Şekil 4.15 : B ₂ -B ₂ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	61
Şekil 4.16 : B ₂ -B ₂ ' kesitinin <i>FEM</i> modeli.	62
Şekil 4.17 : B ₂ -B ₂ ' kesitinde <i>FEM</i> ile elde edilen yüzey oturma eğrisi.	64
Şekil 4.18 : Km 4+360-4+470 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kesit hatları.	65
Şekil 4.19 : C ₄ -C ₄ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	67
Şekil 4.20 : C ₃ -C ₃ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	67
Şekil 4.21 : C ₂ -C ₂ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	68
Şekil 4.22 : C ₁ -C ₁ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	68
Şekil 4.23 : C ₃ -C ₃ ' kesitinin <i>FEM</i> modeli.	70
Şekil 4.24 : C ₃ -C ₃ ' kesitinde <i>FEM</i> ile elde edilen yüzey oturma eğrileri ile izleme verilerinin karşılaştırılması.	72
Şekil 4.25 : Km 9+800.00 -9+740.00 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kullanılan kesit hatları.	73
Şekil 4.26 : D ₁ -D ₁ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	75
Şekil 4.27 : D ₂ -D ₂ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	75
Şekil 4.28 : Tünel eksen derinliği ve maksimum yüzey oturması arasındaki ilişki... 76	
Şekil 4.29 : D ₁ -D ₁ ' kesitinin <i>FEM</i> modeli.	77
Şekil 4.30 : D ₁ -D ₁ ' kesiti için <i>FEM</i> ile elde edilen yüzey oturma eğrileri ile izleme verilerinin karşılaştırılması.	79
Şekil 4.31 : Km 8+760.00 - Km 8+860.00 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kullanılan kesit hatları.	80
Şekil 4.32 : E ₁ -E ₁ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	81
Şekil 4.33 : E ₁ -E ₁ ' kesitinin <i>FEM</i> modeli.	83
Şekil 4.34 : E ₁ -E ₁ ' kesiti için <i>FEM</i> analizinden elde edilen yüzey oturma eğrileri ile izlemeden elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırılması.	85
Şekil 4.35 : Km 9+660.00 - Km 9+ 780.00 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kullanılan kesit hatları.	86
Şekil 4.36 : F ₁ -F ₁ ' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.	87
Şekil 4.37 : F ₁ -F ₁ ' kesitinin <i>FEM</i> modeli.	89
Şekil 4.38 : F ₁ -F ₁ ' kesitinde <i>FEM</i> ile elde edilen yüzey oturma eğrileri ile izleme verilerinin karşılaştırılması.	91
Şekil 5.1 : Yeraltısuyu düşüm çalışması model geometrisi ve sınır koşulları.	95
Şekil 5.2 : Tüp kazısı, destekleme ve drenaj adımları.	96
Şekil 5.3 : 180 gün sonra yeraltısu seviyesi değişimi.	97
Şekil 5.4 : Kazı ve zaman bağımlı değişen yeraltı suyu seviyesi.	98
Şekil 5.5 : Plaxis 2B genelleştirilmiş model.	100

Şekil 5.6 : Kavramsal modelleme için geometrik parametre değişimlerinin şematize gösterimi.....	101
Şekil 5.7 : Farklı örtü kalınlıklarında aynı kazı geometrisinde açılan tek tüpün oluşturduğu yüzey oturma şekilleri.	104
Şekil 5.8 : Analiz grup 1 yüzey deformasyon profilleri-Tüneller Örtü Kalınlığı 1D.	105
Şekil 5.9 : Analiz grup 2 yüzey deformasyon profilleri-Tüneller Örtü Kalınlığı 2D.	106
Şekil 5.10 : Analiz grup 3 yüzey deformasyon profilleri-Tüneller Örtü Kalınlığı 3D.	107
Şekil 5.11 : Analiz grup 4 yüzey deformasyon profilleri-Tüneller Örtü Kalınlığı 4D.	108
Şekil 5.12 : Analiz grup 5 yüzey deformasyon profilleri-Tüneller Örtü Kalınlığı 5D.	109
Şekil 5.13 : Elastisite modülünün deformasyon üzerindeki etkisinin araştırılması için oluşturulan iki boyutlu modelin geometrik sınırları.....	114
Şekil 5.14 : Elastisite modülü değişimi ile oluşan yüzey deformasyonu – 1. Tüp..	116
Şekil 5.15 : Elastisite modülü değişimi ile oluşan yüzey deformasyonu – 2. Tüp..	116
Şekil 5.16 : Elastisite modülü azalım yüzdesi ile oluşan yüzey oturmalarının ilişkisi.	117
Şekil 5.17 : Herzog (1985)' e göre hesaplanmış yüzey oturma eğrileri.	118
Şekil 5.18 : Herzog (1985)'e göre yapılan analizlerin ve Plaxis 2B sonuçlarının karşılaştırılması.	119
Şekil 5.19 : Üç boyutlu Plaxis modelinin geometrik sınırları.	121
Şekil 5.20 : Üç boyutlu Plaxis modelinin ağ sıklığı ve sınır koşulları.	122
Şekil 5.21 : TBM Koniklik Etkisi	123
Şekil 5.22 : Plaxis 3B Olarak Oluşturulan Modelde İlksel Gerilmelerin Dağılımı.	125
Şekil 5.23 : 6 metrelik 1. Tüp kazısının ilerleme eksen ve 2. Tüp kazı hattı üzerinde oluşturduğu yüzey oturması.	126
Şekil 5.24 : Model bloğunda,1.Tüpün 6 m, 12 m, 18 m, 24 m ve 30 m 'lik kazısı ve desteklemesi yapıldıktan sonra bloğun ön inceleme yüzeyde oluşan enine yüzey oturma profilleri.....	127
Şekil 5.25 : Model bloğunda,1.Tüpün 6 m, 12 m, 18 m, 24 m ve 30 m 'lik kazısı ve desteklemesi yapıldıktan sonra bloğun arka inceleme yüzeyde oluşan enine yüzey oturma profilleri.	128
Şekil 5.26 : 1. tüp 30 metrelik kazı/destek üç boyutlu deformasyon görseli.....	128
Şekil 5.27 : Model bloğunda, 2.tüpün 6 m, 12 m, 18 m, 24 m ve 30 m 'lik kazısı ve desteklemesi yapıldıktan sonra bloğun ön inceleme yüzeyde oluşan enine yüzey oturma profilleri.....	129
Şekil 5.28 : Model bloğunda 2.tüp 6 m, 12 m, 18 m, 24 m ve 30 m 'lik kazısı ve desteklemesi yapıldıktan sonra bloğun arka yüzeyde oluşan enine yüzey oturma profilleri.	130
Şekil 5.29 : Her iki tünelin 30 metrelik kısmının tamamlanmasından sonra oluşan yüzey oturmalarının dağılımı.	130
Şekil 5.30 : 1. ve 2. Tüp kazıları sonrası (30 m ilerleme) inceleme modelinin ön yüzünde oluşan oturma teknesi profilleri.	131
Şekil 5.31 : 1. ve 2. Tüp kazıları sonrası (30 m ilerleme) inceleme modelinin arka yüzünde oluşan oturma teknesi profilleri.	131
Şekil 5.32 : İki boyutlu model geometrisi ve sınır koşulları.....	133

Şekil 5.33 : İki boyutlu analiz - 1.tüp kazısı neticesinde elde edilen düşey yer değiştirme değerleri.	135
Şekil 5.34 : İki boyutlu analiz - 2.tüp kazısı neticesinde elde edilen düşey yer değiştirme değerleri.	135
Şekil 5.35 : İki ve üç boyutlu analizlerin karşılaştırılması – 1.tüpler-ön yüz.	136
Şekil 5.36 : İki ve üç boyutlu analizlerin karşılaştırılması – 2.tüpler-ön yüz.	136
Şekil 5.37 : İki ve üç boyutlu analizlerin karşılaştırılması – 1.tüpler-arka yüz.	137
Şekil 5.38 : İki ve üç boyutlu analizlerin karşılaştırılması – 2.tüpler-arka yüz.	137
Şekil 6.1 : K ve Z_0/D değerlerinin tünel kazılarının farklı kademeleri için karşılaştırılması.	142
Şekil 6.2 : Hesaplanan ve ölçülen K değerlerinin karşılaştırılması.	143
Şekil A.1 : Hatta yakın açılan sondajlara ait loglar.	157
Şekil B.1 : A_1-A_1' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	163
Şekil B.2 : A_2-A_2' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	163
Şekil C.1 : Hatta yakın açılan sondajlara ait loglar.	165
Şekil D.1 : B_1-B_1' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	169
Şekil D.2 : B_2-B_2' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	169
Şekil E.1 : YS 7A sondajına ait log.	171
Şekil F.1 : C_1-C_1' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	175
Şekil F.2 : C_2-C_2' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	175
Şekil F.3 : C_3-C_3' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	176
Şekil F.4 : C_4-C_4' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	176
Şekil G.1 : Hatta yakın açılan sondajlara ait loglar.	177
Şekil H.1 : D_1-D_1' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	181
Şekil H.2 : D_2-D_2' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.	181
Şekil İ.1 : Hatta yakın açılan sondaja ait log.	183
Şekil J.1 : Hatta yakın açılan sondajlara ait log.	197

ZAYIF JEOLJİK ORTAMLARDA (İSTANBUL METROSU) SIĞ VE ÇOKLU YERALTI AÇIKLIKLARININ NEDEN OLDUĞU YÜZEY DEFORMASYONLARININ KESTİRİLMESİ

ÖZET

Artan kent nüfuslarının, kentlerdeki ulaşım problemleri üzerinde büyük etkisi olduğu açıktır. Bu durumu çözebilmek için pek çok gelişmiş kentte toplu ulaşım çözümleri yeraltına taşınmaktadır. Bu sayede daha fazla kişi uzak mesafelere hızlı ve ekonomik olarak kent trafiğini zorlamadan taşınırken ulaşım konforu da beraberinde arttırılmaktadır. Ancak, metro hatlarının inşaatı sırasında birbirine yakın çoklu kazıların yapılması kaçınılmaz hale gelmektedir.

Özellikle sığ derinliklerde zayıf ortam koşullarında açılan kentiçi yeraltı kazıları, kent altyapısında ve yüzeydeki yapılarda hasarla sonuçlanan sorunlara neden olabilmektedir. Bu sorunlar, proje maliyeti ve çevre sağlığı ve güvenliği açılarından ciddi yükleri 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 belirlenen noktalarda yapılan periyodik ölçümlerle denetlenmektedir.

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

Tünellerin açımı sırasında çoğu zaman teorik açıdan benzer ikiz tünel kazılardan biri önden diğeri arkadan yürütülmektedir. Proje karakteristikleri nedeniyle kazılar arası yatay mesafe olabildiğince sınırlı tutulmaktadır. Dolayısıyla bu tür çoklu kazılar birbiri ile gecikmeli de olsa etkileşmektedir. Yapılan çalışmalar, önde yürütülen kazının zayıf ortamlarda 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 olacaktır. Bu durum tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey oturma formları üzerinde de etkiye sahiptir. Genel şekliyle birinci tünelin kazısı sonrası yüzeyde oluşan form Gauss eğrisi ile yakın benzerlik göstermektedir. İkinci tünelin kazısından sonra bu form, eğrinin birinci tünele yakın olan tarafı ile ikinci tünele yakın olan tarafı üzerinde farklılaşarak asimetrik bir görünüme kavuşmaktadır. Bu sonuç, tünellerin yüzeyde oluşturdukları etki alanlarının birinci ve ikinci tüneller için farklı bölgeleri etkilediğini göstermektedir.

Tez çalışmasında, İstanbul ilinin Avrupa yakasında açılmış ve açılmakta olan Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir ve Ataköy-İkitelli Metro Hatları üzerindeki 6 farklı lokasyon incelenmiştir. Bu lokasyonların araştırma için seçilmelerindeki temel neden, bölgelerde zayıf zemin şartlarının geçerli olması ve sıkı tünel kazılarının neden olacağı yüzey deformasyonlarının kentsel alanda hasar riski oluşturmalarıdır. İnceleme çalışmasında, *EPB* makinaları (Earth Pressure Balanced Machine) kullanılarak, aynı hat üzerinde birbirine yakın ve sıralı olarak açılan ikiz tünel kazılarının yüzeyde neden olduğu deformasyonların zaman ve kazı aşamasıyla ilişkisi değerlendirilmiştir.

Çalışmada bu hatlarda, yapılar açısından hasar riski yüksek, sıkı yeraltı kazılarının yüzeyde neden olduğu oturmaların güvenilir düzeyde kestirimi için uygun yöntemin belirlenmesi ve yüzey oturma teknesi formunun ikincil tünel kazılarından sonra nasıl değiştiğinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, izleme verileri (projelerden elde edilen yüzey deformasyon verileri) ile iki ve üç boyutlu (2D, 3D) sayısal analiz yönteminden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm analizler birlikte değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, birbirine yakın, sıkı ve zayıf jeolojik ortamlarda aynı kotta açılan çoklu kazıların etkilediği alanların kısmen de olsa çakıştığı sonucuna varılmıştır. Birinci tünellerin ortamda yarattığı örselenmeden dolayı, ikinci tünellerin yüzeyde oluşturduğu deformasyon etki alanının büyüdüğü ve bu etki alanının oturma teknesi formunda değişikliğe neden olduğu anlaşılmıştır. Erişilen bu durum yeraltı kazılarının yüzeyde neden olabileceği yerdeğiştirmeleri izleme amacıyla oluşturulacak izleme projesi için teknik ve önemli bir temeldir.

Ortaya çıkan bu negatif etkinin azaltılabilmesi için, özellikle kentiçi zayıf zemin koşullarının hakim olduğu bölgelerde gerçekleştirilen çoklu yeraltı kazılarında, proje güzergahının jeolojik/jeoteknik parametrelerinin dizayn aşamasından önce detaylıca incelenmesi ve belirlenmesi, tünelcilik yönteminin bu parametreler nazarında seçilmesi ve şekillendirilmesi, yeraltı kazılarına bağlı yüzeyde gelişebilecek olan etkileşim bölgesinin izlenmesi adına oluşturulacak olan sistemlerin detaylıca tasarlanması ve yeraltı kazılarının teknik parametreler dahilinde dikkatlice takip edilip kayıt altına alınması gerekmektedir.

PREDICTION OF THE SURFACE DEFORMATIONS INDUCED BY SHALLOW AND MULTIPLE UNDERGROUND EXCAVATIONS (ISTANBUL SUBWAY) IN WEAK GEOLOGICAL ENVIRONMENTS

SUMMARY

It is obvious that increasing city populations have had a significant impact on transportation problems in big cities. To solve this problem, public transportation infrastructure is being moved underground in many developed cities, and multi-line metro tunnel solutions are being reviewed. In this way, the comfort of transportation is increased and more people can travel long distances quickly and economically without forcing an increase in city traffic.

Urban underground excavations, especially in weak geological conditions at shallow depths, can cause problems that result in damage to the city's infrastructure and surface structures. These problems are a serious burden to the city in terms of the budget and the health of living creatures existing within it. The structures located on the surface are subject to different movements depending on how the surface settlement trough deforms; these include extension and hogging over the convex parts of the settlement trough, or compression and sagging over the concave parts. In general, a structure located near a tunnel under construction can expect to be subjected to the following movements: uniform settlement (or heave), differential settlement (or heave) between supports, overall or differential rotation, overall horizontal displacement, and differential horizontal displacement in compression or extension. To minimize these risks, earth pressure balanced tunnel boring machines (*EPB-TBM*) have been employed in recent years using modern technology ; the face and wall loads are balanced and the effects of the excavations that are reflected on the surface are controlled by periodic measurements with the help of built-in monitoring points. With the use of such mechanized excavation equipment, it is possible to excavate and support long project lines more economically and quickly in urban areas. By using modern technology and geotechnical monitoring surveys, surface deformations that may occur as a result of the excavation can be kept within more controllable limits. In contrast to these advantages, the high initial investment costs due to the use of modern technology and the cost of maintenance repair works encountered during the operation phase are listed as disadvantages.

The relationship between excavation-dependent vertical deformations and single tunnel excavations has been widely discussed in the literature under different geological conditions, and empirical and analytical solutions have been proposed. However, in practice, there are some cases where these known approaches may not be valid, such as double-tube tunnels, parallel tunnels (especially subway tunnels), and tunnels that are constructed at close distances for urban transportation.

During the opening of twin tunnel excavations, theoretically, one of the excavations is usually advanced forward and the other behind. Due to the characteristics of the project, the horizontal distance between excavations is kept as limited as possible.

Therefore, multiple excavations can interact with each other, albeit in a delayed manner. Studies show that the excavations carried out at the front can cause disturbances in weak geological conditions. Therefore, even if the second tunnel was opened in the same strata as the first tunnel, the environment could theoretically have been damaged by the forward excavation, and there could therefore be negative influences on the geomechanical parameters of the geological setting. The tunnel coming from behind would stay within the impact area of the forward tunnel and would therefore pass through a weaker environment. This situation also affects the development of surface settlement forms due to tunnel excavations. In terms of the general structure, the form of the settlement trough formed on the surface after the excavation of the first tunnel closely resembles a Gaussian curve. After the excavation of the second tunnel, the symmetrical form of settlement trough will transform on the side of the curve close to both the first and second tunnels, resulting in an asymmetrical shape. This result suggests that the areas that are impacted as a result of twin tunnel excavations are different for the first and second tunnels.

In this thesis, six different locations on the Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir and Ataköy-İkitelli Metro Lines that have either been completed or are still under construction in the European side of the city of Istanbul were examined. The main reason for choosing these parts of the subway line for this Ph.D. thesis is that the weak ground conditions that dominate the region and the surface deformations caused by shallow tunnel excavations pose a risk of damage to the urban area.

In the study, the relationship between the deformations on the surface induced by the twin tunnel excavations, which were opened close to each other and sequentially on the same line using *EPB* machines, was evaluated. It is aimed at determining an appropriate method for the reliable prediction of settlements induced by shallow underground excavations on these lines that pose a high risk of damage to urban structures. In this context, the monitoring data (surface measurement data) and the results obtained from numerical analyses were compared and evaluated together.

The surface monitoring data consist of values obtained as a result of setting a series of measurement points on the project route and recording them at certain intervals. Within the scope of the thesis, the surface and building settlement bolts obtained from the examined projects were used in the deformation analysis. In addition to the surface monitoring survey, data were obtained from supplementary instruments such as extensometers, inclinometers, piezometers, load cells, and strain gauges, which are used in general tunneling applications.

Numerical method analysis (finite element method) was carried out using software actively used by researchers in the design and analysis of underground structures modeled for a heterogeneous geological environment. The software can be grouped into two categories: two-dimensional or three-dimensional models. In two-dimensional studies, a planar model is created based on the horizontal and vertical axes. In three-dimensional model studies, it is easier to understand how the points determined on the x, y, z axes behave as a whole as a result of the excavation and support activities applied during the study of the model. These model studies require more expertise to operate. Both methods are based on the principle of calculating a created model by dividing it into smaller parts. When solving problems using models based on the finite element method (*FEM*), equilibrium conditions, conformity conditions, material structure behavior, and other boundary conditions must be taken into consideration.

In this thesis, a series of modeling studies using numerical methods were carried out and analyzed in theoretical terms. In these studies, the settlement trough profiles formed on the surface of twin tunnels opened with the same diameter in different positions from each other and different positions to the surface. The effects of the change in the elastic modulus of the geological environment on the surface settlements were examined with the help of two-dimensional analysis, and the effect of twin tunnel excavation steps on each other was examined by three-dimensional analysis. In addition, the time-dependent change of the twin tunnel excavations above the groundwater level was examined in two dimensions.

From a practical point of view, the most important outputs of this study were the following: in surface settlement troughs formed by the excavation of twin tunnels that are in different positions to the surface and each other, it is understood that the cumulative deformation reflected on the surface decreases as the distance between the tunnels increases. In addition, by changing the modulus of elasticity, it was observed that the settlement values of the surface increased when the elasticity modulus values of the geological strata decreased. Three-dimensional excavation modeling studies show that the disturbances induced by starting the excavation of the first tunnel can disrupt the geological strata of the second tunnel, even if the excavation of the second tunnel has not yet started.

Analyses using the data obtained from the monitoring survey carried out during the thesis were evaluated by processing the section lines that were considered appropriate for the locations along the subway line. By using a two-dimensional model in conjunction with the section lines, the surface settlement trough forms were determined, and the inflection points (i) of the Gaussian curves and the surface trough width parameter (K) were estimated from the data analysis. Subsequently, tunnel excavations were carried out sequentially using *FEM* analysis in accordance with the site conditions. The surface settlement curves were obtained and the same parameters were determined from the surface settlement forms and compared to the values obtained from the real field values.

As a result of the evaluations, it was determined that when Z_0/D (Depth to tunnel axis level/Tunnel diameter) < 3.9 , the effect that the twin tunnel excavations had on each other was more noticeable at shallow depths, and the value of K obtained for the first tunnel increased as the depth increased.

The settlement profiles derived from the monitoring data were compared to the results from a two-dimensional *FEM* analysis. Although there were small differences between the trough width parameters of the *FEM* analysis and the monitoring data from shallow ($Z_0/D < 3.9$) twin tunneling in weak subsurface conditions, changes in the asymmetrical shape of the settlement profiles were similar after the second tunnel had been excavated in both cases.

It was also found that when the Z_0/D value was 4.8, the reflection of the actual deformation due to tunnel excavation at the surface was less than that suggested by the results obtained using the *FEM*. It is recommended that this phenomenon is examined using additional datasets and that it be taken into consideration by researchers and designers during the project design phase.

Collective evaluation of all the data showed that the *FEM* solution might be one of the most powerful tools for predicting the surface settlement form induced by multiple excavations at shallow depth. From our results, it was evident from the asymmetrical form of the settlement curve after the excavation of the second tunnel that the trough

width parameter that corresponded to the right side (toward the first tunnel) of the second tunnel is higher than on the other side of the tunnel.

At shallow depths, the areas affected by tunneling that are associated with multiple excavations at the same level and in weak geological strata can overlap partially in time. The expansion of the surface area that is affected by the second tunnel is considered to be an adverse reaction to the disturbance caused by the first tunnel. The form of the Gaussian curve that developed as a result of the tunnel excavations differed between the first and second tunnels, and this situation should be taken into account when predicting the extent of the area that is affected by tunneling. Considering that the excavations of subway tunnels in Istanbul, as well as in countries where similar conditions prevail, are likely to continue intensively in the future, it is highly beneficial that issues concerning potential surface settlements are evaluated during the planning stage. It is equally essential to consider the adverse effects of multiple underground excavations during the prediction of damage-risk zones and to establish a monitoring network.



1. GİRİŞ

1.1 Amaç

Yeraltı kazıları sonucu jeolojik ortamda oluşan örselenmeler, yüzeye kadar erişebilen deformasyonları (oturmaları) oluşturabilmektedir. İstenmeyen bu deformasyonlar özellikle sığ derinliklerde gerçekleştirilen kazılarda dramatik etkilere neden olabilmektedir.

Daha çok zayıf zemin koşullarında oluşan oturmaların, hattın geçtiği bölgedeki alt ve üst yapılarda hasarlara yol açabilecek düzeylere eriştiği, proje süresi ve maliyetleri açısından önemli kayıp ve riskler oluşturduğu bilinmektedir. Uygulama aşamasında karşılaşılan bu durum, projelendirme ve tasarım aşamalarında yapılan kestirimlerde eksiklikler olduğunun göstergesidir.

Kazı bağımlı oluşan düşey deformasyonların, tekil kazılar ile olan ilişkisi değişik jeolojik ortamlar için literatürde geniş olarak ele alınmıştır ve konuyla ilgili ampirik ve analitik çözümler önerilmiştir. Ancak uygulamada kent içi ulaşımına yönelik çift hatlı, birbirine paralel (özellikle metro tünelleri) ve yakın mesafelerde açılmakta olan yeraltı açıklıkları için, bilinen yaklaşımların geçerli olmayabileceği sıkça yaşanan vakalardan anlaşılabilmektedir.

Tünellerin açımı sırasında çoğu zaman teorik açıdan benzer ikiz tünel kazılarında, kazılardan biri önden diğeri arkadan yürütülmektedir. Proje karakteristikleri nedeni ile kazılar arası yatay mesafe olabildiğince sınırlı tutulmaktadır.

Dolayısıyla bu tür çoklu kazılar birbiri ile gecikmeli de olsa etkileşmektedir. Yapılan çalışmalar, önde yürütülen kazının (birinci tünel kazısı) zayıf jeolojik ortamlarda önemli ölçüde örselenmelere neden olduğunu göstermektedir (Mahmutoğlu, 2011). Arkadan gelen tünelin (ikinci tünel kazısı) önde yürütülmüş tüpün etki alanı içerisinde kalması, dolayısıyla da daha zayıf bir ortamdan geçmesi söz konusudur. Tez çalışmasında bu konunun irdelenmesi ve örselenmenin neden olduğu yüzeyde oluşabilecek ikincil yer değiştirmelerin kestirimini yapmak için İstanbul'da zayıf jeolojik ortamlarda yürütülen benzer çalışmalardan elde edilen yüzey izleme verileri ve geçilen ortamların jeomekanik, hidrojeolojik ve jeoteknik özellikleri ile birlikte ilişkilendirilmesi, iki ve üç boyutlu sayısal model analizlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırması hedeflenmiştir.

1.2 Çalışma Alanı

Tez çalışması dahilinde, İstanbul ili içerisinde zayıf zemin şartlarının geçerli olduğu ve inşası gerçekleştirilmiş olan Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı üzerinde bulunan 4 farklı lokasyon ile inşaatı devam etmekte olan Ataköy-İkitelli Metro Hattı üzerinde bulunan 2 farklı lokasyon olmak üzere toplamda 12 kesit üzerinden incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu hatların seçilmesindeki amaç, metro hatlarının İstanbul ilinin Avrupa yakasında, nüfus yoğunluğu fazla olan semtlere ulaşımı sağlayan ve zayıf zemin koşullarının bulunduğu bölgelerden geçmesi ve bu bölgelerdeki kazıların üst ve altyapıları etkiler düzeye erişmesidir. Ayrıca sık, sürekli ve kaliteli izleme verilerinin elde edildiği hatlardan elde edilecek verilerden hareketle, sonraki metro kazıları için kritik olabilecek durumların ortaya çıkarılması hedeflenmiştir.

1.3 Önceki Çalışmalar

Teze konu olan sahalardan Otogar-Kirazlı hattı çeşitli araştırmacılar tarafından, farklı açılardan incelenmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1.1 : Otogar-Kirazlı hattında gerçekleştirilen jeoteknik araştırmalar.

Referans	Araştırma Konusu
Güven, 2008	Hattın mühendislik jeolojisi ve kazılara bağlı gelişen deformasyonlar.
Yavaş, 2008	TBM kazıları sırasında karşılaşılan jeoteknik zorluklar.
Karaman, 2010	Hattın mühendislik jeolojisi.
Ercelebi, 2011	Hattın Km 0+850 m – Km 0+900 m arasına denk gelen bölgenin, jeoteknik parametreleri kullanılarak gerçek oturma değerleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen geri analiz çalışması arasındaki korelasyon.
Mahmutoğlu, 2011	Hattın Km 0+842-Km 1+175 m, Km 1+839-Km 2+042 m ve Km 4+218-Km 4+503 m arasına denk gelen bölgelerde oluşan yüzey oturma teknesi şekilleri üzerinden Gauss eğrilerinin dönüm noktası (i) ve malzeme parametresi (K) değişimlerinin incelenmesi.
Demir, 2018	Hattın Km 9+777 m bölgesinde oluşan maksimum yüzey oturmasının sonlu elemanlar yöntemi kestirilmesi.

1.4 Kapsam ve Yöntem

Tez çalışması kapsamında yapılan inceleme, değerlendirme ve analizler yedi bölüm altında toplanmıştır. Çalışma amacı ve alanının tanıtıldığı giriş bölümünün (Bölüm 1) dışındaki diğer bölümler aşağıda kısaca açıklanmış, her bir bölümde izlenen yöntem ayrı ayrı tanıtılmıştır.

Bölüm 2’de; tünel kazılarına bağlı olarak yüzey deformasyonlarının gelişimi, yüzey tasman eğrisinin dönüm noktası (i), oturma teknesi genişlik parametresi (K)’nin tanımı, enine ve boyuna gelişen yüzey oturma profillerinin formu ve gelişme mekanizmaları, oturma kontrolü yöntemleri ve mekanize tünelcilik yöntemleri literatüre dayalı olarak özetlenmiştir.

Bölüm 3 altında, kazı ortamının sayısal modelinin oluşturulması adımlarında izlenen yöntemler ayrıntılı olarak verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm adımları ve tez dahilinde kullanılan yazılımların tanıtılması, yer malzemesinin jeoteknik parametrelerinin seçilmesi ile ilgili adımları başlığı altında tartışılmıştır.

Bölüm 4’te; tez kapsamında incelenen metro hatlarının tanıtılması ve tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyon profillerinin izleme verileri ve sayısal yöntemler ile geri analizleri değerlendirilmiştir. Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı üzerinde bulunan 4 farklı lokasyon, Ataköy-İkitelli Metro Hattı üzerinde bulunan 2 farklı lokasyon, toplamda 12 kesit üzerinde yapılan incelemeler gerçekleştirilmiş ve bu bölümde değerlendirilmiştir.

Bölüm 5 altında, ikiz tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonları kavramsal modeller aracılığıyla incelenmiştir. Bu kapsamda zayıf zemin şartlarını yansıtacak şekilde yer malzeme parametreleri literatürden seçilen bir seri kavramsal model oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Bu modeller üzerinden, ikiz tünel kazılarının yeraltısu seviyesi üzerindeki etkisi, birbirlerine ve yüzeye göre farklı konumlarda bulunan aynı çaplarda açılan ikiz tünellerin yüzeyde oluşturduğu oturma teknesi profilleri, jeolojik ortamın dayanımında örselenmeden dolayı oluşacak değişimin yüzey oturmaları üzerindeki etkisi, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile sıralı açılan tünellerin kazı adımlarının, yüzey oturma tekne şekli ve tünel kazı güzergahları üzerindeki etkisi ve iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bölüm 6’da ise; İzleme verileri ve sonlu elemanlar yöntemi ile çoklu kazılara bağlı gelişen oturma eğrisi formundaki değişim ayrıntılı şekilde ortaya konmuş ve açıklanmıştır. Eğri formlarındaki asimetric yapı, eğri dönüm noktası (i) ve oturma teknesi genişlik parametresi (K)’nin gerçek saha şartlarında tez kapsamında incelenen

hatlarda tünel eksenlerinin derinliğine ve ikiz metro tüneli kazılarının aşamalarına bağlı olarak nasıl değiştiği bölüm kapsamında detaylandırılmıştır.

Bölüm 7’de; tez ıktıları bütünleşik olarak değerlendirilerek, sonuçlar ve öneriler ayrıntılı sunulmuş ve ayrıca elde edilen sonuçların bilimsel ve pratik açıdan önemi tartışılmış ve önerilerde bulunulmuştur.



2. YERALTI KAZILARINA BAĞLI GELİŞEN YÜZEY OTURMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yeraltı kazılarına bağlı gelişen zemin hareketleri; jeolojik, hidrojeolojik koşullar, kazı boşluğunun geometrisi, kazı boşluğunun derinliği, kazı yöntemi ve imalat sürecini içeren bir dizi faktöre bağlıdır (Atkinson ve Potts, 1977). Zemin hareketleri ile bu parametreler arasındaki ilişki basit ya da doğrusal değildir (Attewell ve diğ, 1986).

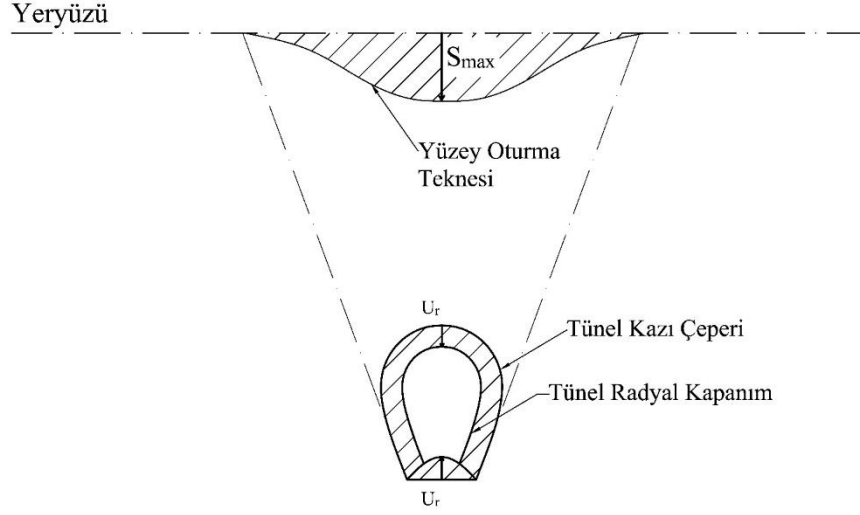
Gerçekte, yer hareketleri, (1) jeolojik, hidrojeolojik ve jeoteknik (yer malzemesi) koşullar, (2) tünel geometrisi ve derinliği, (3) kazı yöntemleri, (4) işçilik ve yönetim kalitesi gibi bir dizi faktörlerle ilgilidir. Bununla birlikte, sık bir tünelin derin bir tünele göre, üstyapılar üzerindeki etkisi daha fazladır.

Yeraltı kazıları, jeolojik ortamda geçerli ilksel gerilme durumunu ve hidrojeolojik koşulları etkilemektedir. Doğal gerilme durumundaki bu değişimle, genellikle tünel aynasında oluşturulan boşluğa doğru hızlı bir hareket gelişmekte ve tünel duvarında konverjans (kapanma) oluşmaktadır (Şekil 2.1, Şekil 2.2). Yumuşak, kohezyonlu zeminlerde, tünel kazılarına bağlı olarak değişime uğrayan boşluk suyu basıncı nedeniyle ek olarak uzun dönemli konsolidasyon oturmaları da gözlemlenebilmektedir (Leca ve New, 2007).

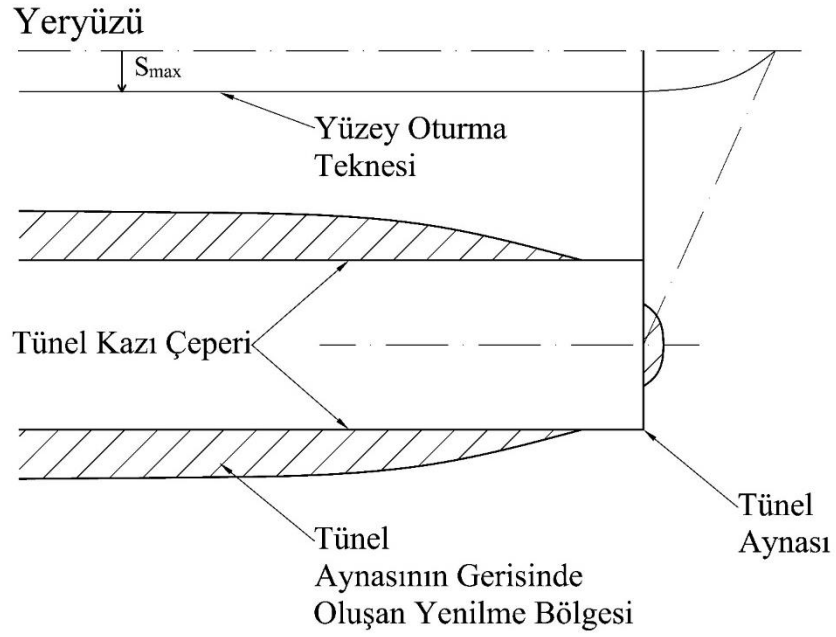
Açıklığın çevresindeki yer değiştirmenin büyüklüğü ve yönelimi aşağıdaki koşullara bağlıdır;

- Jeoteknik şartlar,
- Mevcut jeostatik gerilmeler,
- Yüzey yükleri,
- Hidrojeolojik koşullar (drenaj koşulları),
- Zaman (işlem sırası ve süresi)
- Tünel kazı-destekleme sistemi için uygulanan yöntemler.

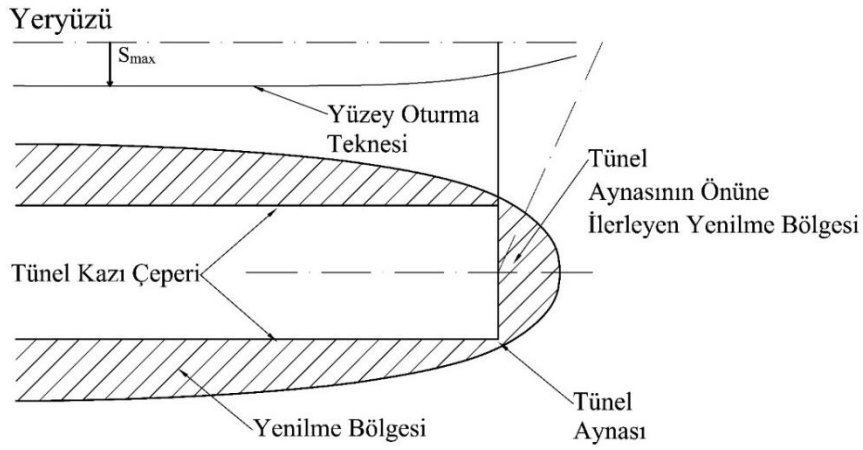
Zemin kütlelerinin dayanımı aşıldığında, kazı boşluğu etrafında zamanla artan ve hızlanan önemli yer değiştirme problemleri ortaya çıkmaktadır. Bu durum, zemin kütlesi içerisinde makaslanma düzlemlerinin oluşmasına sebebiyet verirken, gerekli



Şekil 2.2 : Kazı profiline bağlı gelişen enine oturma teknesi (Leca ve New, 2007’den değiştirilmiştir).

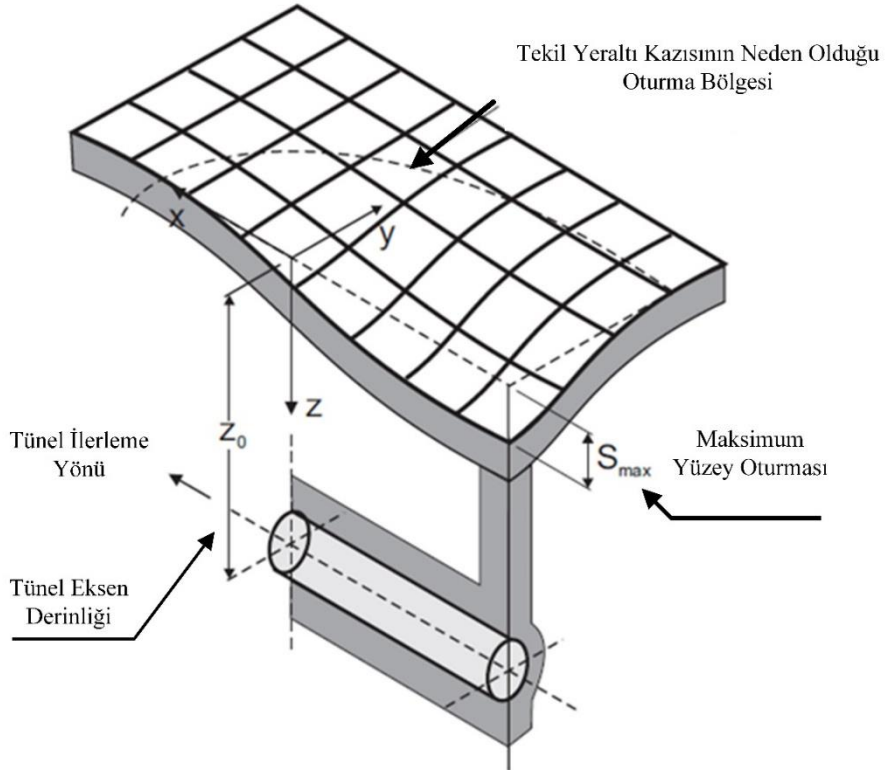


Şekil 2.3 : Ayna arkasında oluşan yenilme bölgesi ve boyuna oturma teknesi (Leca ve New, 2007’den değiştirilmiştir).



Şekil 2.4 : Ayna ilerisinde oluşan yenilme bölgesi ve boyuna oturma teknesi (Leca ve New, 2007'den değiştirilmiştir).

Kazıya bağlı gelişen zemin tepkisi, genellikle yeryüzünde, yatay ve düşey yönde zamanla artan deformasyonlar şeklinde ortaya çıkmakta, kazıdan etkilenen bölgede oturma teknesi olarak bilinen çukurlaşmaya neden olmaktadır (Şekil 2.5) (Attewell ve diğ, 1986).

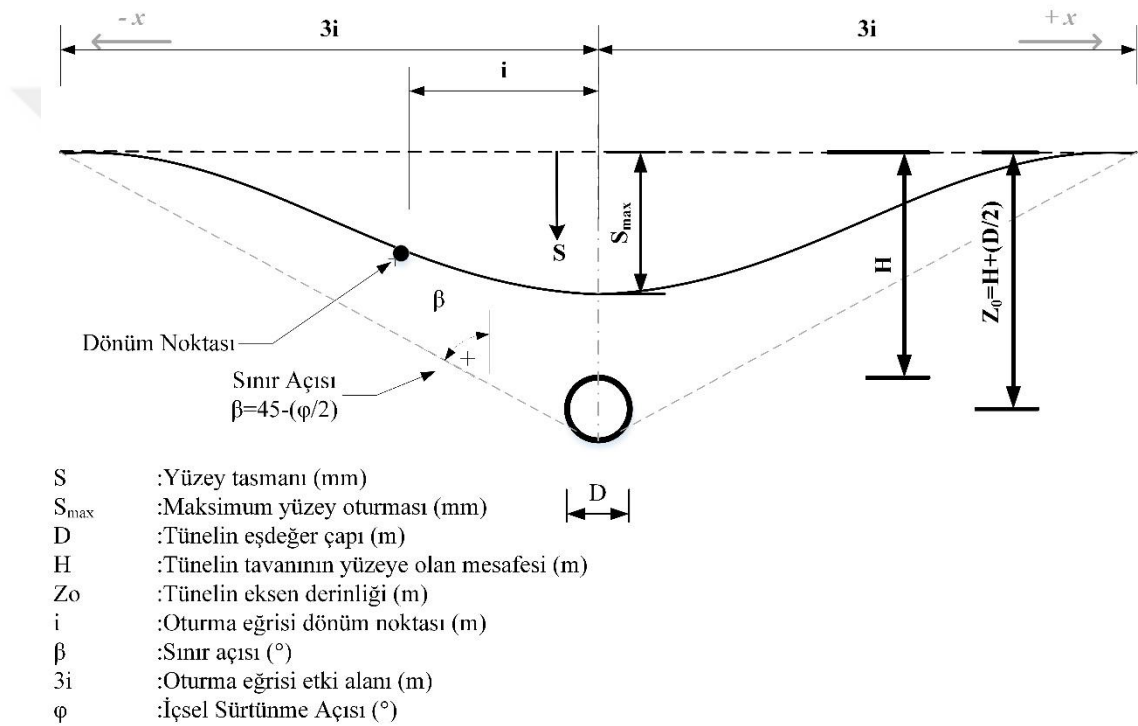


Şekil 2.5 : Yeraltı kazısına bağlı gelişen oturma çukurunun 3 boyutlu gösterimi (Attewell ve diğ, 1986).

2.1 Enine Gelişen Oturmalar

2.1.1 Yüzey oturma eğrisi – Gauss hata fonksiyonu

Martos (1958), maden kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonlarının oturma şeklinin Gauss veya normal dağılım eğrisi ile tanımlanabileceğini önermiştir. Schmidt (1969) ise, aynı şeklin tünel kazı açıklığının üzerinde oluşabileceğini belirtmiştir. O'Reilly ve New (1982)'de Gauss modelini geliştirerek tek tüplü tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey oturma profilinin Şekil 2.6 'da gösterilen şekilde gelişeceğini belirtmiş ve oturma (S) miktarının kestirimi için eşitlik 2.1'de verilen bağıntıyı önermiştir.



Şekil 2.6 : Yeraltı kazılarına bağlı gelişen enine oturma teknesine ait tanımlamalar.

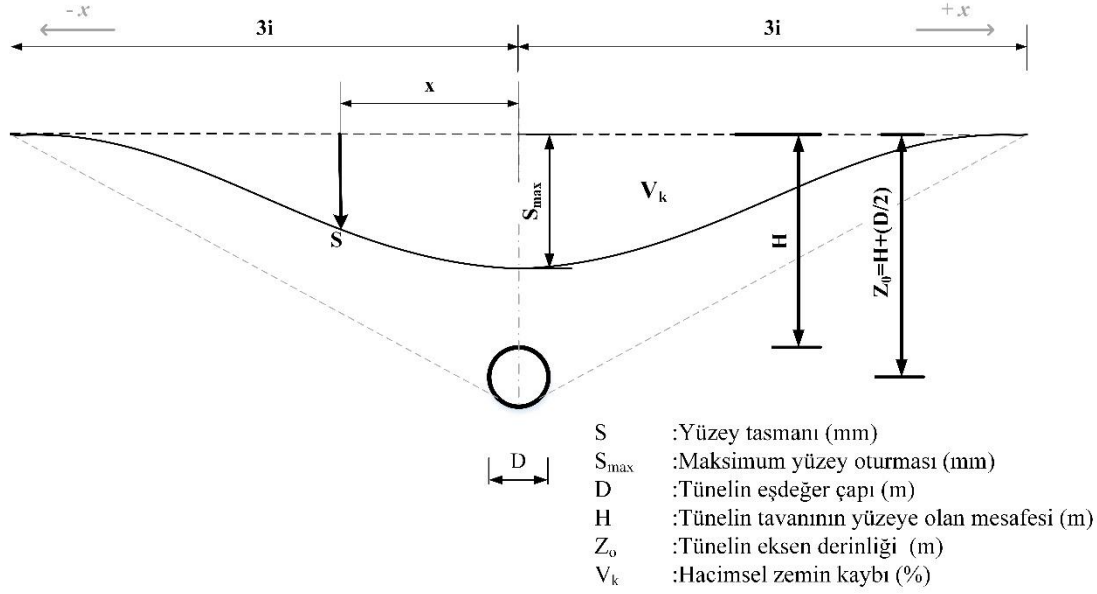
$$S = S_{max} \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)} \quad (2.1)$$

Burada;

- S : Yüzey tasmanı (mm)
 S_{max} : Maksimum yüzey oturması (mm)
 x : Yatay mesafe (m)
 i : Oturma eğrisinin dönüm noktası (m)

2.1.2 Zemin kaybı

Oturma büyüklüğüne bağlı gelişen zemin kaybının teorik profili Şekil 2.7’de gösterilmiş olup zemin kaybının (V_k) belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan eşitlik 2.2’de belirtilmiştir (O’Reilly ve New, 1982).



Şekil 2.7 : Yüzey oturmasına bağlı gelişen zemin kaybının teorik profili.

$$V_k = \int_{-3i}^{+3i} S dx = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{max} \cong 2,5 \cdot i \cdot S \quad (2.2)$$

2.1.3 Oturma profillerinin değerlendirilmesinde kullanılan istatistiksel yaklaşım

Tünel kazılarına bağlı gelişen oturma profillerinin değerlendirilmesinde aşağıda verilen 2.3 numaralı doğrusal değişim eşitliğinin kullanılması önerilmektedir (Arioğlu ve diğ, 2002).

Yüzey oturma eğrisi-gauss hata fonksiyonu

$$S = S_{max} \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)} \quad (2.1)$$

Dönüşümler

$$\ln(S) = Y \quad x^2 = X$$

$$\left(-\frac{1}{2i^2}\right) = A \quad \ln(S_{max}) = B$$

Doğrusal değişim

$$Y = AX + B \quad (2.3)$$

2.1.4 Oturma eğrisi dönüm noktasının belirlenmesi

Tünel kazılarına bağlı olarak gelişen oturma eğrilerindeki dönüm noktasının (i) belirlenmesinde farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlardan ikisi sırasıyla 2.4 ve 2.5 numaralı eşitliklerde belirtilmiştir (Arıoğlu ve diğ, 2002). Çizelge 2.2’de farklı araştırmacıların çeşitli zemin türlerine göre önerdiği eşitlikler belirtilmiştir.

Eşitlik 2.4’ün üretilmesinde, sırasıyla aşağıdaki yollar izlenmektedir.

Oturmadan kaynaklanan zemin kaybı:

$$V_k = \sqrt{2\pi} i S_{max} \cong 2.506 i S_{max} \quad (2.2)$$

Tünel çeperindeki zeminin elastik sınırlar içerisinde yapacağı radyal kapanma “u” dolayısıyla oluşacak zemin kaybı:

$$V_t = \pi u D$$

$$u = \frac{D}{2} \left(\frac{1 + \nu}{E_y} \right) (P_{ek} + \gamma \cdot Z_0)$$

$V_t = V_k$ kabulü ile

$$i = 0.628 \frac{D^2}{S_{max}} \left(\frac{P_{ek} + \gamma Z_0}{E_y} \right) (1 + \nu) \quad (2.4)$$

Burada;

D : Tünelin eşdeğer kazı çapı (m)

Z_0 : Tünel ekseninin derinliği (m)

γ : Zemin/kaya kütlesi birim hacim ağırlığı (kN/m³)

ν : Poisson oranı (birimsiz)

E_y : Yerinde elastisite modülü (kPa)

S_{max} : Maksimum yüzey oturması (mm)

P_{ek} : Yapay yayılı yük (sürşarj) miktarı (kPa)

Çökme teknesi etki alanı prensibine göre dönüm noktası değeri;

$$3i = \left[\frac{D}{2} \cos \beta + (Z_0 - \frac{D}{2} + \frac{D}{2} (1 + \sin \beta)) \right] \operatorname{tg} \beta \quad (2.5)$$

Burada;

i : Oturma eğrilerindeki dönüm noktası (m)

D : Tünelin eşdeğer kazı çapı (m)

Z_0 : Tünel ekseninin derinliği (m)

β : Sınır Açısı $= 45^\circ - \phi/2$ ($^\circ$)

2.1.5 Maksimum oturma değerinin belirlenmesi

Tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonlarının belirlenmesinde farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlardan sırasıyla eşitlik 2.6 (Herzog, 1985) ve eşitlik 2.7 (Schmidt, 1969) tek tünel kazısına bağlı gelişen maksimum yüzey oturma değerinin belirlenebilmesi için önerilen yaklaşımlardır.

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. Sırasıyla eşitlik 2.8 ve eşitlik 2.9'da O'Reilly ve New (1982) ve Arıoğlu (1992)'un ikiz tünel kazıları sonucu oluşan yüzey oturmalarının tahmini için geliştirdikleri yaklaşımlar belirtilmiştir.

Arıoğlu (1992) tarafından gerçekleştirilen saha çalışmalarında, ayna basıncı uygulanan TBM kazılarında, N (stabilite oranı) (Eşitlik 2.10) ile K_z (hacim kaybı) arasında tutarlı bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir (Eşitlik 2.11).

$$S_{max} = 0.785(\gamma_n Z_0 + \sigma_s) \left(\frac{D^2}{iE} \right) \quad (2.6)$$

$$S_{max} = 0.0125 K_z \left(\frac{R^2}{i} \right) \quad (2.7)$$

$$S = S_{max} \left[\exp \left(\frac{-x_A^2}{2i^2} \right) + \exp \left(\frac{-(x_A - d)^2}{2i^2} \right) \right] \quad (2.8)$$

$$S_{max} = 4.71(\gamma_n Z_0 + \sigma_s) \left(\frac{D^2}{(3i + a)E} \right) \quad (2.9)$$

$$N = \frac{\gamma_n Z_0 + \sigma_s - \sigma_T}{C_u} \quad (2.10)$$

$$K_z = 0.87e^{0.26N} = 0.87e^{0.26 \left(\frac{\gamma_n Z_0 + \sigma_s - \sigma_T}{C_u} \right)} \quad (2.11)$$

Burada;

D : Tünelin eşdeğer çapı (m)

R : Tünel yarıçapı (m)

i : Oturma eğrisi dönüm noktasının tünel eksenine uzaklığı (m)

Z_0 : Tünel eksen derinliği (m)

γ_n : Zemin/kaya kütlesi birim hacim ağırlığı (kN/m³)

E : Elastisite modülü (kPa)

S_{max} : Maksimum yüzey oturma değeri (mm)

σ_s : Yapı veya trafik yükünden kaynaklanan ilave yük miktarı (kPa)

σ_T : TBM ayna basıncı (kPa)

N : Stabilite oranı (birimsiz)

K_z : Zemin kaybı (%)

c_u : Drenajsız kohezyon (kPa)

a, d : Tünel eksenleri arasındaki mesafe (m)

2.1.6 Oturma teknesinin genişliği

Tünel kazısına bağlı gelişen yüzey oturma eğrisinin dönüm noktası $i = KZ_0$ bağıntısı ile tanımlanmaktadır (O'Reilly ve New, 1982). Burada belirtilen K katsayısı zemin türüne bağlı değişimi, Z_0 ise tünel ekseninin derinliğini göstermektedir. Özellikle tünel kazı projelendirmelerinde (i) dönüm noktasının önceden kestirimi açısından, K ile belirtilen zemin türünün değişimini ifade eden katsayının belirlenmesi önem kazanmaktadır.

Çizelge 2.1’de önceki bazı çalışmalarda farklı zemin türleri için önerilmiş olan K değerleri verilmiştir. Mahmutoğlu (2011), ikiz tünel kazılarının jeolojik ortamda oluşturduğu örselenme sonucunda K değerinin, geriden gelen ikinci tünel kazılarına bağlı olarak arttığını, bunun da kazı etki alanının artmasına neden olduğunu belirtmiştir.

Çizelge 2.1 : K değerinin farklı zemin türlerine göre değişimini gösteren çizelge.

Zemin Türü	K	Referans
Katı Killer	0.4	O’Reilly ve New, 1982
Kumlu Katı Killer	0.5-0.6	Oteo ve diğ, 1999
Kumlu Katı Killer	0.38-0.51 (0.82-0.86) ¹	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

¹ İkinci tüpün geçişinden sonra elde edilen değer.

Bazı çalışmalarda ise aynı ilişki $i=KZ_0+B$ bağıntısı ile tanımlanmıştır. Bu eşitlikteki zemin türüne bağlı değişen K ve B değerleri oturma eğrisinin dönüm noktasının kestiriminde kullanılır. Çizelge 2.2’de farklı araştırmacılar tarafından belirlenmiş olan farklı zemin türlerine göre K ve B değerleri verilmiştir.

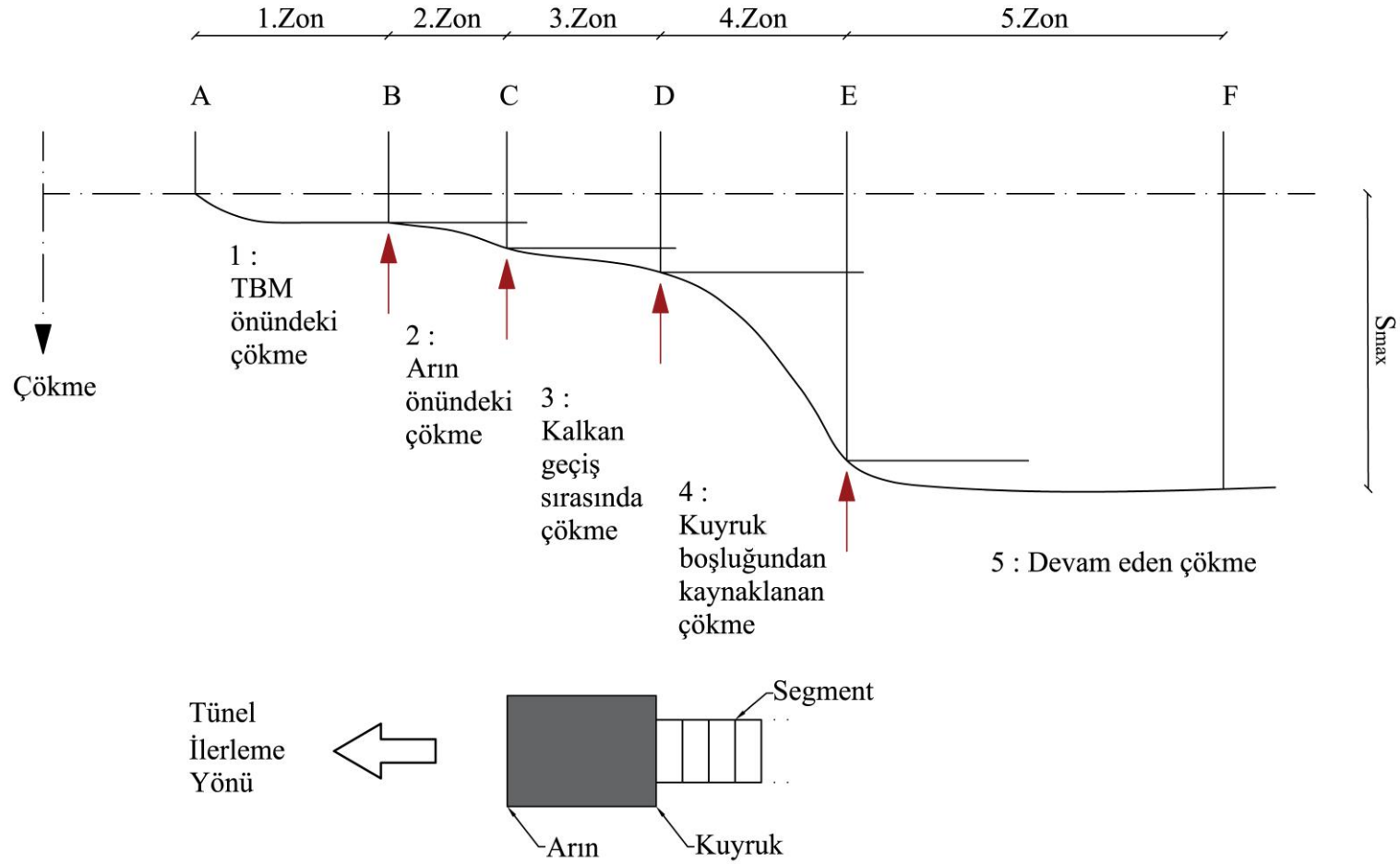
Çizelge 2.2 : K ve B katsayılarının zemin türüne bağlı değişimi.

Zemin Türü	İfade	Açıklama	Referans
Kohezyonlu (Killi) Zeminler	$i=0.43Z_0+1.1(\text{m})$	Kalkanlı Tünel	O'Reilly ve New, 1982, Hamza ve diğ, 1999
Granüler Zeminler	$i=0.28Z_0-0.1(\text{m})$	-	O'Reilly ve New, 1982, Hamza ve diğ, 1999
Killi Zeminler	$i=0.40Z_0+0.60 (\text{m})$	Genelde Kalkanlı Tünel Açma Yöntemi, Genelde Killi Zeminler	Yapı Merkezi, 1992
Karışık Zemin	$i=0.386Z_0+2.84 (\text{m})$	YATM (Yeni Avusturya Tünel Yöntemi)	Yapı Merkezi, 1992
Kumlu Katı Killer	$i=0.51Z_0+0.1 (\text{m})$ (1.Tüp Geçişinden Sonra) $i=0.86Z_0+0.2 (\text{m})$ (2.Tüp Geçişinden Sonra)	Kalkanlı Tünel	Mahmutoğlu, 2011

i = Zemin çökme eğrisinin dönüm noktası apsisi, Z_0 = Tünel eksen derinliği

2.2 Oturma Teknesi Boy Kesiti

Kalkanlı Tünel Kazma Makinesi (TBM) kazısına bağlı gelişen boyuna oturmalara ait şematik kesit Şekil 2.8'de gösterilmiştir (Sugiyama ve diğ, 1999). Bu oturma şekli NATM yöntemi ile açılan tüneller için de geçerliliğini korumaktadır.



Şekil 2.8 : TBM kazılarına bağlı gelişen boyuna oturmalar (Sugiyama ve diğ, 1999).

Şekil 2.8’de gösterilen oturmalar aşağıda sıralanan 5 farklı zon için ayrı ayrı açıklanmıştır.

1. Zon: Tünel açma makinesinin önündeki zeminin çökmesi. Örneğin, suya doymuş kum içinde açılan tünelde bu çökme yeraltısuyunun alçalmasıyla ilişkilidir.
2. Zon: Arın önündeki zeminin çökmesidir. Bu çökme genellikle makinenin cephesine uygulanan arın basıncının yeterli olmaması ile yakından ilişkilidir. Örneğin; bentonit bulamacının kullanıldığı tünellerde arın basıncı, sürekli şekilde değişmeden uygulanabildiğinden dolayı 2. adımda gözlemlenebilecek çökme çok küçüktür.
3. Zon: Tünel makinesinin arını geçerken zeminde oluşan çökmedir. Bu bölgedeki çökme genellikle makinenin fazla kazı yapması ve kalkanın ilerleme yönünden sapmasıyla oluşur.
4. Zon: Kuyruk kısmında çökme kalkan ile segment arasındaki boşluktan kaynaklanan bu çökme, zamanında ve uygun şekilde çimento şerbeti enjeksiyonu ile minimize edilebilir.
5. Zon: Bu çökme genellikle zeminin uzun süreli konsolidasyon oturması – örneğin; yumuşak killerde boşluk suyu basıncının zamanla azalması ile ilişkilidir.

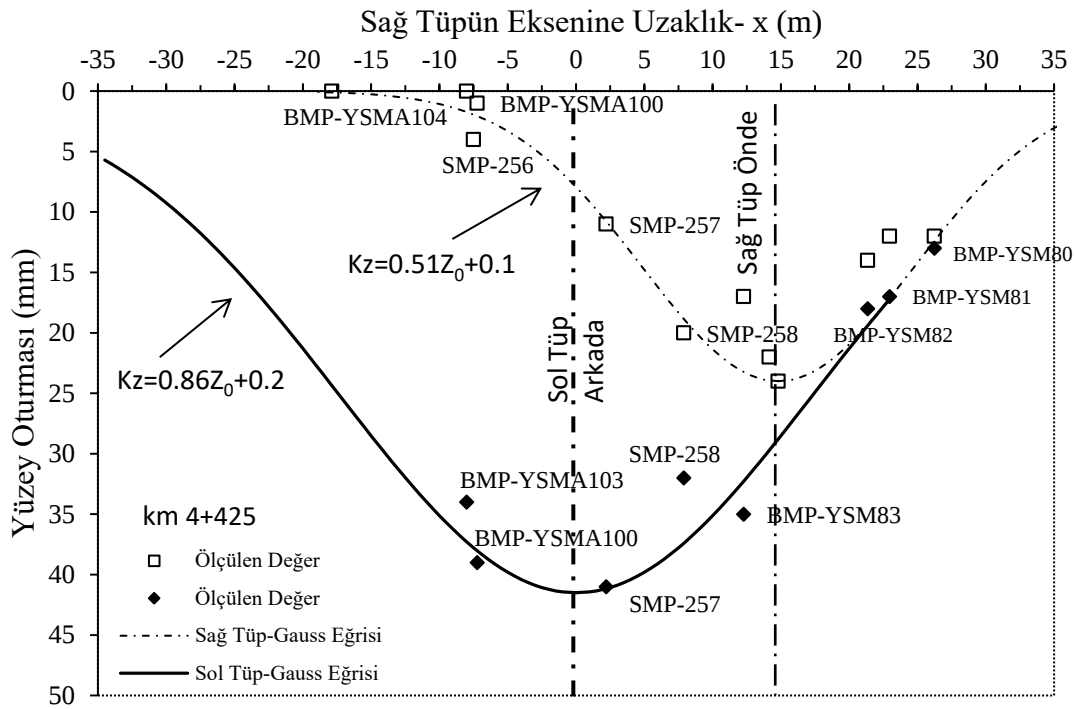
2.3 İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Gelişen Yüzey Deformasyonlarının Değerlendirilmesi

Çağdaş kentleşmenin getirdiği zorunlu altyapı geliştirme çalışmaları, ikiz metro tüneli kazılarını neredeyse zaruri kılmıştır. Bu nedenle pek çok araştırmacı, farklı jeolojik ortamlarda açılan farklı çaplardaki ikiz tünellerin, içerisinde bulunduğu ortamda ve yüzeyde yarattığı deformasyonları son yıllarda sıklıkla konu edinmiştir. Bu çalışmalardan ikisinden elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

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 büyük bir şekilde gerçekleşir.

Mahmutoğlu (2011) Otogar-Kirazlı Metro Hattı ikiz tünel kazıları sırasında gelişen yüzey deformasyonlarını birbirinden farklı zemin koşullarının geçerli olduğu farklı kesitlerde irdelenmiştir (Şekil 2.9). Bu çalışma sonucunda, en yüksek yüzey deformasyonunun, ilk tünelin geçişi sonrasında örselenen jeolojik ortamda arkadan

gelen ikinci tünelin geçişi sırasında meydana geldiği ve maksimum düşey deformasyonların ikinci tünel üzerinde olduğu belirtilmiştir. Bu sonuç, Peck (1969)'in savı ile paralellik gösterir. Farklı araştırmacıların gerçekleştirdiği çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Fang ve diğ, 1994; Nyren, 1998; Hunt, 2005; Divall, 2013; Divall ve Goodey, 2015; Fagnoli ve diğ, 2015; Fang ve diğ, 2016; Divall ve diğ, 2017; Wan ve diğ, 2017; Wang ve diğ, 2019; Zhang ve diğ, 2019).



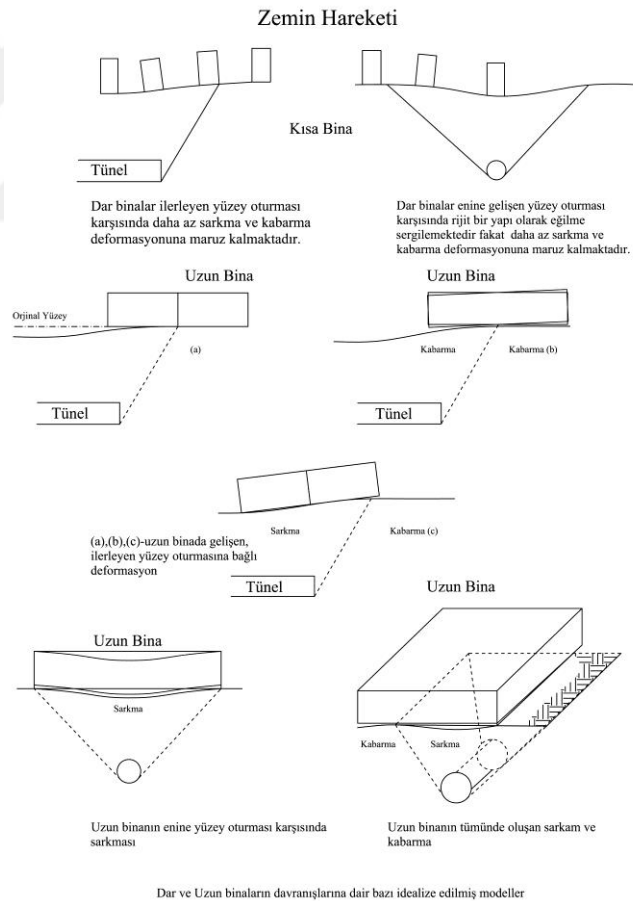
Şekil 2.9 : Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı ikiz tünel kazılarına bağlı gelişen enine oturma teknesi-Km 4+425 (Mahmutoğlu, 2011).

2.4 Metro Tüneli Kazılarının Etkisi

Hangi yöntem ile açıldığına bakılmaksızın, tünel kazıları tünel açıklığı çevresinde bir yer değiştirme oluşturur. Bu yer değiştirmelerin zamanla yüzeye kadar ulaşma ihtimali yüksektir. Ortaya çıkan yer değiştirmelerin büyüklüğü, yayılımı, yayılım yönü ve hızı farklı olabilmekte ve etkileşim bölgesi içerisinde kalan yapılara (binalar, yapılar, yol geçitleri, yeraltı şebekeleri, metrolar, vb.) hasar verebilmektedir (Leca ve New, 2007). Bu hasarlar özellikle sığ ve zayıf zemin koşullarında açılan tünellerde daha fazla kendisini göstermekte, proje tamamlanma sürelerinde ciddi uzamalara ve yüksek maliyet artışlarına sebebiyet vermektedir (Mair ve diğ, 1996; Burland, 2001; Mahmutoglu, 2011).

Yapının zemin oturma teknesine göre konumu, maruz kaldığı hareketleri önemli ölçüde etkiler (yerleşim oluşunun dışbükey bölümlerinde uzama ve kabarma, iç bükey kısımlarında sıkıştırma ve sarkma). Bu durum, Şekil 2.10'da şematik olarak gösterilmiştir; şekil üzerinde bazı idealize edilmiş tepki kalıpları, dar veya uzun yapı konfigürasyonları ve yapıların oturma teknesine göre konumları dikkate alınarak belirtilmiştir. Özetle, yapım aşamasındaki bir tünelin yakınında bulunan bir yapının aşağıdaki hareketlere maruz kalabileceği beklenebilir (Leca ve New, 2007).

- Üniform oturma (veya kabarma).
- Destekler arasındaki diferansiyel oturma (veya kabarma).
- Genel veya diferansiyel dönme.
- Genel yatay yer değiştirme.
- Sıkışma veya uzama durumlarında diferansiyel yatay yer değiştirme.



Şekil 2.10 : Binalarda yeraltı kazılarının neden olduğu idealize edilmiş tipik deformasyon şekilleri (Attewell ve diğ, 1986).

2.5 Oturmanın Kontrolü

Tünel kazılarının jeolojik ortamda bir örseleme oluşturması beklenen bir durumdur. Bu örselenmelerin yüzeyde ve tünel çevresindeki jeolojik ortamda oluşturduğu fiziksel değişikliklerin izlenmesi ve yorumlanması kazı emniyeti açısından önemlidir.

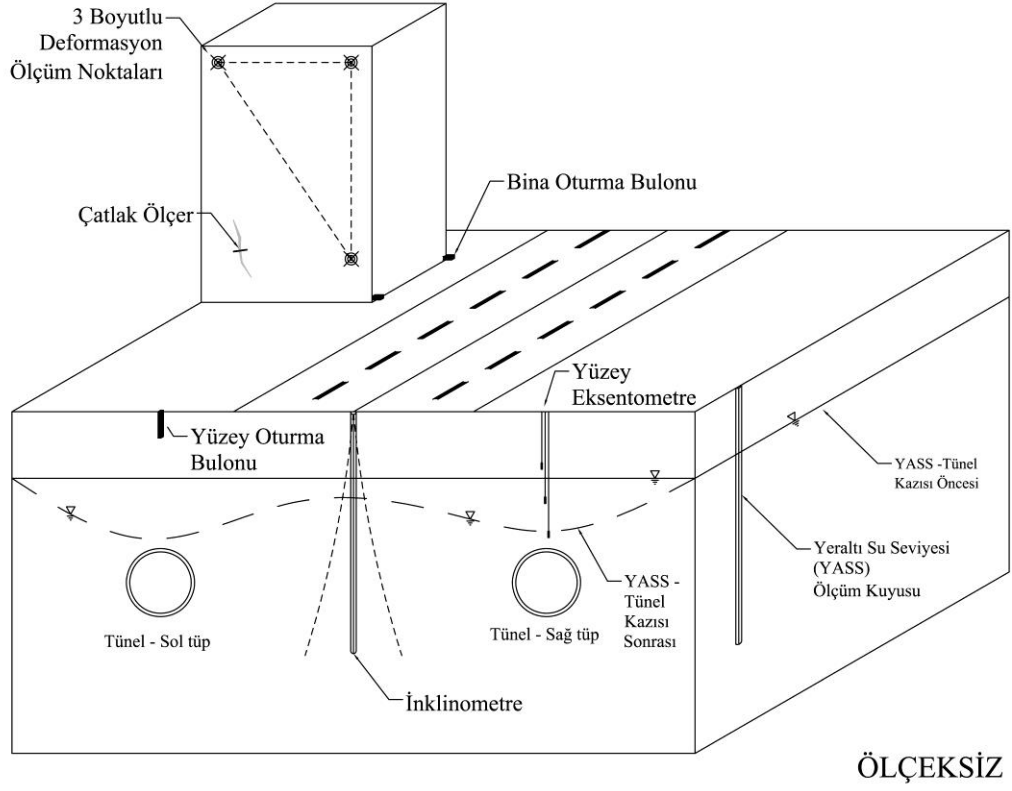
Proje uygulamaları sırasında elde edilen saha deneyimlerine göre, kazı aktivitesi neticesinde oluşabilecek deformasyonların kestirilebilmesi ve izlenmesi için projelerde, dizayn aşamasında hangi tip izleme sistemlerinin, kaçar adet kullanılacağı, yerleştirileceği noktalar ve hangi sıklıkla takip edileceğinin önceden planlanması önem arz etmektedir.

Bunlara ek olarak, proje kapsamında kritik görülen lokasyonlarda karşılaşılabilecek olan kazı bağımlı sorunları çözmek için detaylıca hazırlanmış risk analizleri ve bu analizlere uygun acil eylem planları da oluşturulmalıdır.

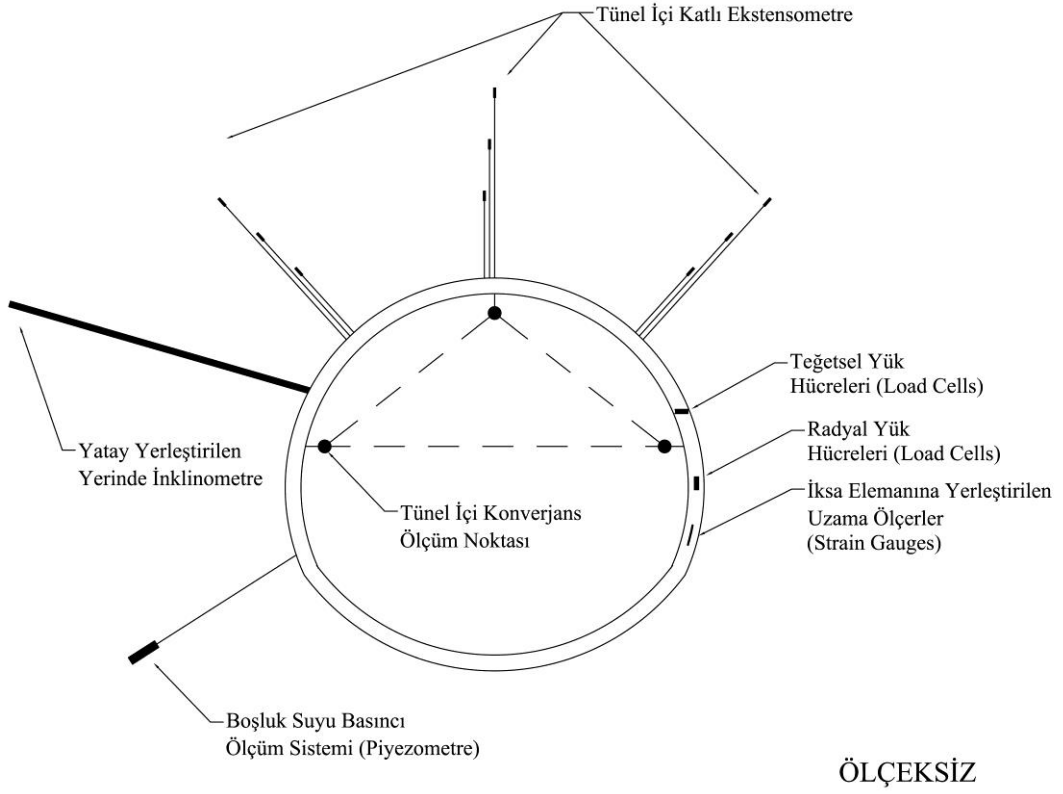
Tünel kazılarına bağlı gelişen deformasyonların izlenmesine ilişkin kullanılan güncel uygulamalara ait bazı örnekler Çizelge 2.3'te sunulmuş, Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de de şematize edilerek belirtilmiştir.

Çizelge 2.3 : Tünel içi ve dışı deformasyon izleme sistemleri.

Yüzey İzleme Sistemleri	Tünel İçi İzleme Sistemleri
Bina oturma bulonları	Konverjans ölçüm noktaları
Yüzey ekstensometreleri	Tünel içi katlı ekstensometreler
Yüzey oturma bulonları	Tünel içi yerinde inklinometreler
İnklinometre	Yük Hücreleri (load cells)
Çatlak ölçerler	Uzama ölçerler (strain gauges)
3 boyutlu deformasyon ölçüm noktaları	Tünel içi piyezometreler
Yüzey piyezometre (Yeraltı su seviyesi izleme) kuyuları	



Şekil 2.11 : Yüzeyden İzleme Sistemleri.

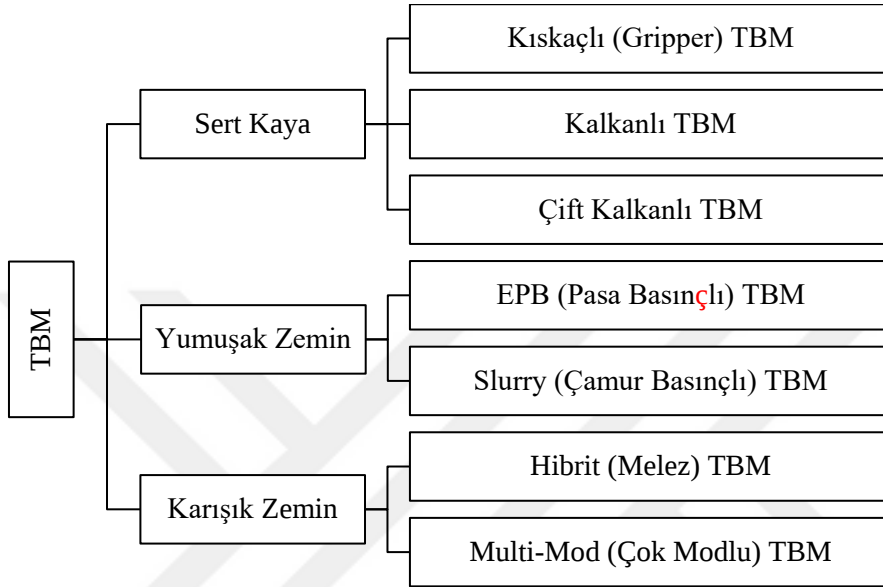


Şekil 2.12 : Tünel İçi İzleme Sistemleri.

2.6 Mekanize Tünelcilik Yöntemi

Tünel kazılarında kullanılan *TBM* (Tunnel Boring Machine) makineleri proje hattının jeolojik gereksinimlerine göre farklı tiplerde olabilmektedir (Şekil 2.13).

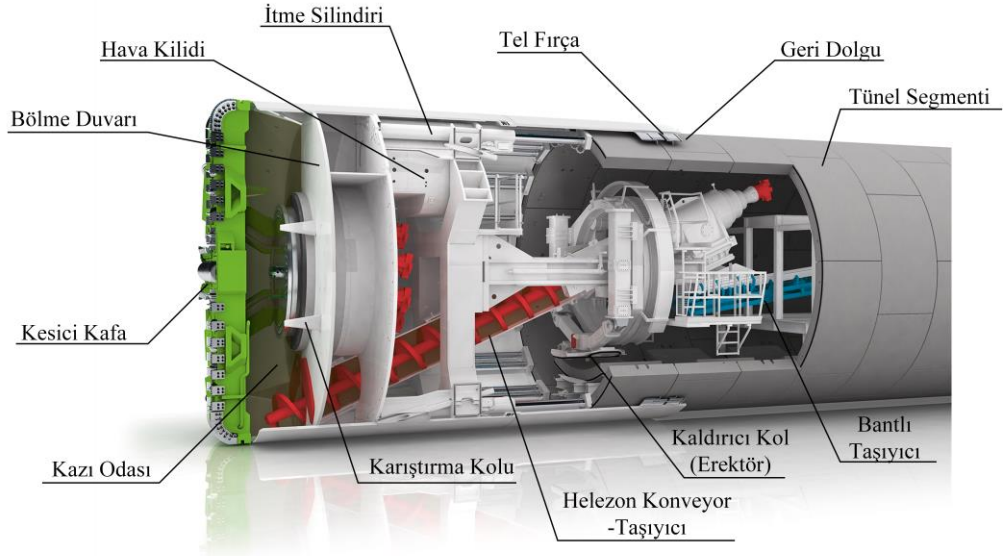
Bu tez çalışması kapsamında, mekanize tünel açma yöntemlerinden birisi olan *EPB-TBM* ile gerçekleştirilen sığ tünel kazılarının yüzeye etkileri incelenmiştir.



Şekil 2.13 : TBM tipleri (Zheng ve diğ., 2016).

Bu tür mekanize kazı ekipmanlarının kullanılmasıyla uzun proje hatlarının daha ekonomik ve hızlı bir şekilde kazılıp desteklenmesi mümkün olabilmektedir. Bu duruma ilave olarak kullanılan teknoloji sayesinde, kazıya bağlı olarak gelişebilecek yüzey deformasyonlarının daha kontrol edilebilir sınırlar içinde tutulabilmesi sağlanmaktadır.

Bu pozitif yararlarının yanında, kullanılan yüksek teknoloji nedeniyle ilk yatırım maliyetlerinin yüksekliği ve işletme aşamasında karşılaşılan bakım onarım çalışmalarının masraflı olması da dezavantajlı durumlar olarak sıralanmaktadır. Şekil 2.14'te *EPB* tipte bir tünel açma makinesinin ana bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 2.14 : EPB tip TBM makinesi ana bileşenleri (URL-1).

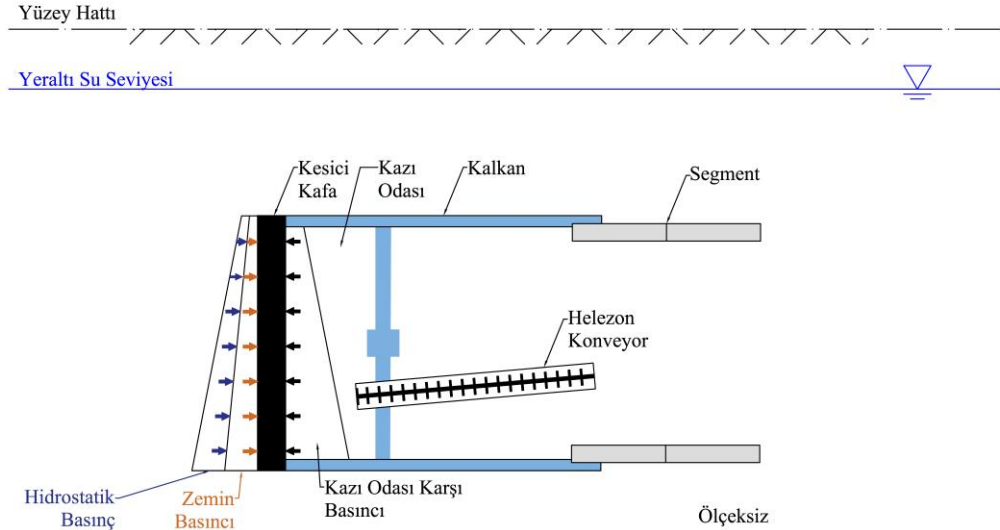
Bu tünelticilik yönteminde, tünel kazı ve destekleme işlemleri genel olarak aşağıda belirtilen sırayla gerçekleştirilmektedir;

1. Tünel açıklığının mekanize olarak kazılması.
2. Gerekli durumlarda tünel desteğinin gerçekleştirilmesi (prekast beton – segment uygulanması (Şekil 2.15) veya ekipmana uygun olarak geri bulonlama ve püskürtme beton uygulanması.
3. Segment uygulaması gerçekleştirilmesi durumunda, segment elemanları ve zemin arasında oluşan boşluğun geri enjeksiyon uygulaması ile kapatılması.
4. Kazı ürünü malzemenin mekanize olarak tünelden uzaklaştırılması.



Şekil 2.15 : Sol görsel – Stoklanmış segment elemanları, Sağ görsel- Tünel içi montajı gerçekleştirilmiş segment elemanları (URL-2).

İstanbul Metrolarında kullanılan *TBM* makineleri genellikle pasa basınçlı olarak adlandırılan *EPB* tip makinelerdir. *EPB* tip tünel açma makineleri, kazı sırasında aynada oluşan basıncı (litostatik, hidrostatik ve sürşarj etkileri gibi) kazı odası içerisindeki pasanın kontrollü bir şekilde tahliye edilmesi ve ek karşı basınç oluşturulması ile dengeleyerek çalışan sistemlerdir. Sistemin şematize basitleştirilmiş çalışma prensibi Şekil 2.16’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.16 : EPB tip makinelerin maruz kaldığı basınçlar (URL-1’den değiştirilmiştir).

2.7 Tünel Kazı Makinesi Ayna Basıncının Belirlenmesi

Tünel mühendisliğinde zayıf zemin olarak nitelendirilen çok zayıf, bozunmuş ve taşlaşmamış ortamlarda açılan tünellerde, kazı boşluğu çevresinde tavan, ayna göçmesi veya yüzey oturmaları ile sonuçlanabilecek stabilite problemleri oluşabilmektedir. Bu stabilite ve emniyet problemlerini minimize etmek için son 50 – 60 yıldır kalkanlı ve ayna basınçlı zayıf zemin tünel delme makineleri (*TBM*) geliştirilmektedir (Maidl ve diğ, 1996).

TBM kazıları sırasında özellikle zayıf zemin – sığ derinlik profiline sahip bölgelerden geçerken ayna basıncının dikkatli bir şekilde hesaplanarak zamanında uygulanması gerekmektedir.

TBM ayna basıncı hesaplamalarında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Leca ve Dormieux (1990), Jancsecz ve Steiner (1994), Anagnostou ve Kovari (1996), ITA (2000) tarafından önerilen hesaplamalar bilinen yöntemler arasındadır.

Uluslararası Tünelcilik Derneği (*ITA*), şayet tünel derinliği (örtü kalınlığı) tünel çapının 2 katından büyük ise ayna basıncının hesaplanmasında, kemerlenme yüksekliği olan ve eşitlik 2.12’de belirtilen h_0 ’ın değerlendirmeye alınarak yatay ve düşey zemin basınçlarının belirlenebileceğini önermektedir (ITA, 2000). Eşitlik 2.13’te kemerlenmiş zemin prizmasının yarı genişliğinin bulunmasına ilişkin yaklaşım belirtilmiştir (Bilgin ve diğ, 2013).

$$h_0 = \frac{\left\{ b_s \left(\gamma_b - \frac{c_u}{b_s} \right) \left[\frac{1 - e^{-K_0 \tan(\delta) \left(\frac{h}{b_s} \right)}}{K_0 \tan(\delta)} \right] + \sigma_{sur} e^{-K_0 \tan(\delta) \left(\frac{h}{b_s} \right)} \right\}}{\gamma_b} \quad (2.12)$$

$$b_s = \frac{D_{TBM}}{2} \cot \left(\frac{\pi}{8} - \frac{\phi}{4} \right) \quad (2.13)$$

Burada;

b_s : Kemerlenmiş zemin prizmasının yarı genişliği (m)

γ_b : Zeminin birim hacim ağırlığı (kN/m³)

c_u : Zeminin drenajsız kohezyonu (kPa)

K_0 : Sükunetteki toprak basıncı (ITA 2000; değerin 1.0 alınmasını önermektedir)

σ_{sur} : Yüzey örtü basıncı (kPa)

δ : Kemerleşmiş prizmanın duvar sürtünme açısı (°) (ITA 2000; değerin içsel sürtünme açısına (ϕ) eşit alınmasını önermektedir)

h : Tünel tavanı ile yüzey arasında kalan mesafe (m)

D_{TBM} : *TBM* kazı çapı (m)

ϕ : Zeminin drenajsız içsel sürtünme açısı (°)

Tünel tavanındaki düşey toprak basıncı (σ_v) ve yatay toprak basıncı (σ_h) eşitlik 2.14 ve 2.15 yardımıyla belirlenebilir (ITA, 2000).

$$\sigma_v = \max (\gamma_b h_0, \gamma_b \cdot 2D_{TBM}) \quad (2.14)$$

$$\sigma_h = K_0[\sigma_v + \gamma_b(D_{TBM}/2)] \quad (2.15)$$

Şayet tünel yeraltı su seviyesinin altında ise hesaplamalar gerçekleştirilirken, zeminin birim hacim ağırlığı olarak su altındaki birim hacim ağırlığı kullanılır ve tünel üzerinde oluşan hidrostatik basınç hesaplamalarda dikkate alınır (JSCE, 2007).



3. KAZI ORTAMININ SAYISAL MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Çalışma kapsamında incelenen lokasyonlarda karşılaşılan jeolojik kesitlerin sayısallaştırılmasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

1. İzleme verilerinin işlenmesi; incelenen sahalarda tesis edilmiş olan yüzey-bina oturma izleme sistemlerinden elde edilen veriler, saha için uygun görülen kesit hatları üzerinde işlenerek değerlendirilmiştir. Bu kesit hatları üzerinden, yüzey oturma teknesi şekilleri belirlenmiş, şekiller üzerinden gauss eğrilerinin dönüm noktaları (i) ve malzeme parametrelerinin (K) kestirimi yapılmıştır.
2. Birinci adımda seçilen aynı kesit hatlarının sonlu elemanlar yöntemi (*FEM*) ile incelenmesi. Bu kapsamda incelenecek olan kesit hattının jeolojik modeli ve yer malzemesi parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen parametreler *FEM* yazılımına işlenmiş ve ilgili modeller oluşturulmuştur. Saha şartlarına uygun olarak tünel kazıları sıralı olarak gerçekleştirilmiş ve yüzey oturma eğrileri elde edilmiştir. Yüzey oturma şekilleri üzerinden, gauss eğrisi dönüm noktaları (i) ve malzeme parametreleri (K) belirlenmiş, gerçek saha değerlerinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Bu bölüm altında, sonlu elemanlar yönteminin yeraltı açıklıklarının modellenmesinde nasıl kullanıldığı ve model parametrelerinin nasıl belirlendiği önceki çalışmalar göz önünde tutularak açıklanmıştır.

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Yeraltı Açıklıklarının Modellenmesi

İlerleyen teknoloji sayesinde, mühendislik hesaplamalarının hızlı olarak gerçekleştirilmesi bilgisayar yazılımları ile kolay bir hale gelmiştir.

Özellikle heterojen bir jeolojik ortam için modellenen yeraltı yapılarının projelendirilmesi ve analizinde, araştırmacılar sonlu elemanlar yöntemlerini aktif olarak kullanmaktadır.

Bu yazılımlar, temel olarak iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) modellerin oluşturulması şeklinde gruplandırılabilir. İki boyutlu çalışmalarda, yatay ve düşey eksen esas alınarak düzlemsel model oluşturulmaktadır.

Üç boyutlu model çalışmalarında, temel olarak x,y,z eksenlerinde belirlenen noktaların, model çalışması sırasında uygulanan kazı ve destek faaliyetleri neticesinde bütünsel olarak nasıl davrandıkları daha kolay anlaşılabilmektedir. Ancak, modelleme çalışmaları program kullanıcıları açısından daha fazla uzmanlık istemektedir.

Her iki yöntemde de asıl olan oluşturulan modelin daha küçük parçalara ayrılarak hesaplanması ilkesine dayanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile çözülecek olan problemlerin modelleri üzerinde; denge şartları, uygunluk şartları, malzeme bünye davranışları ve diğer sınır şartlarının gösterilmesi gerekmektedir.

Sonlu elemanlarla analiz gerçekleştirilirken genellikle aşağıda belirtilen adımların izlenmesi önerilmektedir (Potts ve Zdravkovic, 1999).

- Elemanların ayrılması; incelenecek olan problem geometrisinin daha küçük parçalara ayrılması.
- Öncelikli değişkenin belirlenmesi; bu jeoteknik problemlerde genellikle yer değiştirme veya deformasyon olarak seçilmektedir.
- Kullanılacak olan eşitlikler; eleman denklemlerini türetmek için uygun varyasyon prensiplerinin kullanılması (örneğin; minimum potansiyel enerji) gerekmektedir (Eşitlik 3.1).

$$[K_E]\{\Delta d_E\} = \{\Delta R_E\} \quad (3.1)$$

Burada $[K_E]$ elemanın rijitlik matrisi, $\{\Delta d_E\}$ düğüm noktalarındaki yer değiştirmenin artımsal vektörü, $\{\Delta R_E\}$ düğüm noktalarındaki kuvvetin artımsal vektörü olarak ifade edilmektedir.

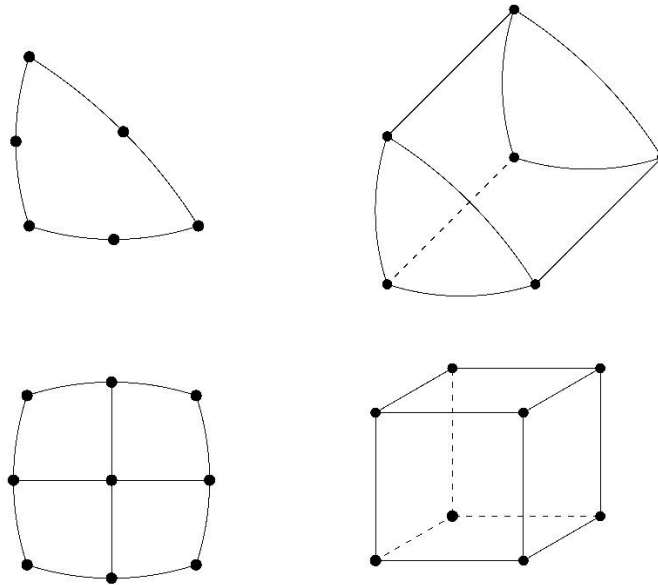
- Global Denklemler; elemanlar için kullanılan denklemlerin birleştirilerek global denklemlerin elde edilmesi (Eşitlik 3.2).

$$[K_G]\{\Delta d_G\} = \{\Delta R_G\} \quad (3.2)$$

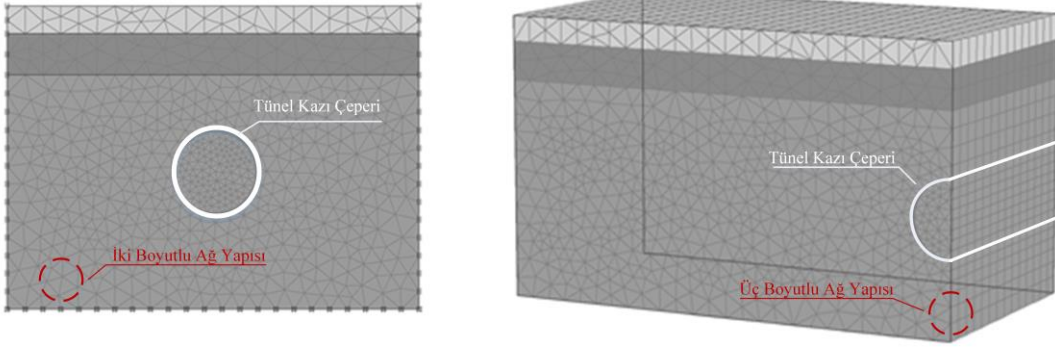
Burada $[K_G]$ global rijitlik matrisi, $\{\Delta d_G\}$ tüm düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmenin artımsal vektörü, $\{\Delta R_G\}$ tüm düğüm noktalarındaki kuvvetin artımsal vektörü olarak ifade edilmektedir.

- Sınır koşulları; sınır koşulların formüle edilmesi ve global denklemlerin modifiye edilmesi.
- Global denklemlerin çözülmesi; global denklemlerin birlikte çözülmesi ile düğüm noktalarındaki yer değıştirmeler hesaplanır. Bu düğüm noktası yer değıştirmelerinin hesabından sonra ikincil değerler hesaplanabilir (örneğin; gerilme).

Şekil 3.1’de iki boyutlu ve üç boyutlu olarak sonlu elemanlar modelinde kullanılan düğüm noktalarının nasıl bağlandığı, Şekil 3.2’de jeolojik model içersine yerleştirilmiş olan bir tünel kesitinin iki boyutlu ve üç boyutlu olarak ağlarına (mesh) ayrılmış şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : İki boyutlu (sol) ve üç boyutlu (sağ) düğüm noktalarının bağlanış şekilleri.



Şekil 3.2 : Jeolojik model içerisine yerleştirilmiş olan bir tünel kesitinin iki boyutlu ve üç boyutlu örgü (mesh) görselleri.

3.2 Çalışma Kapsamında Kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi Yazılımları

Çalışma kapsamında Rocscience RS2, Plaxis 3B Tunnel ve Plaxis 2B yazılımları sonlu elemanlar yöntemi çözümlerinde kullanılmıştır. Bu yazılımlar endüstriyel ve akademik çalışmalarda yoğun bir şekilde kullanılan, uzman kullanıcı ve modelin doğru kurgulanması şartları altında geçerlilikleri kanıtlanmış bilgisayar programlarıdır.

3.2.1 Rocscience RS2 Yazılımının Tanıtılması

Rocscience RS2 yazılımı, madencilik ve inşaat uygulamaları için geliştirilmiş iki boyutlu sonlu elemanlar yazılımıdır. Uygulamalar hem zemin hem de kaya koşulları için gerçekleştirilebilmektedir. RS2 tünel ve destek dizaynı, yeraltı kazı, yüzey kazı, şev stabilitesi, dolgu, dinamik analiz, temel, konsolidasyon, yeraltı suyu sızıntısı vb. analizler için geliştirilmiş bir genel amaçlı sonlu elemanlar analiz yazılımıdır.

Yazılım yardımıyla aşağıda sıralanan yenilme ölçütlerine (kriterlerine) göre çözümler yapılabilmektedir (URL-3).

1. Mohr-Coulomb
2. Hoek-Brown
3. Drucker-Prager
4. Genelleştirilmiş Hoek-Brown
5. Cam- Clay
6. Modifiye Cam-Clay
7. Ayrık Fonksiyon
8. Mohr Coulomb with Cap
9. Softening Hardening Model

3.2.2 Plaxis 3B Tünel Yazılımının Tanıtılması

PLAXIS 3B programı özel amaçlar için geliştirilmiş bir bilgisayar yazılımıdır. Program yardımıyla üç boyutlu (3B) farklı tiplerde tüneller zemin ve kaya ortamında modellenebilmekte ve deformasyon ve stabilite analizleri gerçekleştirilebilmektedir (Plaxis, 2001).

Programın aşağıda arayüzleri üzerinden seçim yapılarak aşağıdaki davranış modelleri için analizler yapılabilmektedir.

- a) Lineer Elastik Modeli.
- b) Mohr – Coulomb Modeli.
- c) Eklemlili Kaya Modeli.
- d) Pekleşen Zemin Modeli (Hardening soil model)
- e) Yumuşak Zemin Krip Modeli.

3.2.3 Plaxis 2B Tünel Yazılımının Tanıtılması

Plaxis 2B farklı yer malzemesi uygulamalarına ilişkin deformasyon ve stabilite analizlerini gerçekleştirmek için tasarlanmış iki boyutlu (2B) sonlu elemanlar yöntemi yazılımıdır.

Yazılım, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tasarımcılar tarafından kolay kullanılacak şekilde bir ara yüz oluşturulmuştur. Yazılımda 4 temel alt program olup, bunlar Girdi-Hesaplama-Çıktı ve Eğriler modülleridir. Bu modüller aracılığıyla modelleme çalışması aşamalı olarak yazılıma yüklenmekte ve sonuçlar elde edilmektedir (Plaxis, 2018).

Plaxis 3B yazılımında kullanılan malzeme yenilme modelleri Plaxis 2B yazılımı için de geçerlidir.

3.3 Araştırma Kapsamında Kullanılan Yenilme Modelleri

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar yöntemi (FEM) çözümlerinde Mohr-Coulomb ve Pekleşen Zemin yenilme modelleri kullanılmıştır.

3.3.1 Mohr – Coulomb Modeli

Bu modelleme yöntemi, zemin davranışlarının anlaşılmasında ilk kullanılan oldukça yaygın bir yöntemdir. Model eşitlik 3.3'te belirtilen 4 parametre ile ifade edilmektedir, bunlar; makaslama dayanımı (τ), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve normal gerilme (σ) şeklinde tanımlanmaktadır.

$$\tau = c - \sigma \tan \phi \quad (3.3)$$

3.3.2 Pekleşen Zemin Modeli

Pekleşen zemin modeli Duncan ve Chang (1970)'in geliştirdiği hiperbolik modelin yerine geçmiş olan plastisite teorisine dayalı olarak geliştirilmiş bir zemin modelleme yöntemidir (Schanz ve diğ, 1999). Çalışma kapsamında, sadece Plaxis yazılımları ile gerçekleştirilen çözümlerin bir bölümünde bu model kullanılmıştır. Pekleşen Zemin modelinde eşitlik 3.4, 3.5 ve 3.6'de kullanılmaktadır.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{ccos\phi - \sigma'_3 \sin\phi}{ccos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad (3.4)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{ccos\phi - \sigma'_3 \sin\phi}{ccos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad (3.5)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{ccos\phi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \sin\phi}{ccos\phi + p^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad (3.6)$$

Burada;

E_{50}^{ref}	:Standart drenajlı üç eksenli deney ile elde edilen sekant rijitliği (kPa)
E_{oed}^{ref}	:Drenajlı odömetre deneyinden elde edilen tanjant rijitliği (kPa)
E_{ur}^{ref}	:Elastik yükleme/Boşaltma rijitliği (kPa)
c	:Efektif kohezyon (kPa)
ϕ	:Efektif içsel sürtünme açısı ($^{\circ}$)
m	:Rijitliğe bağlı olarak üst olarak seçilen gerilme değeri Logaritmik sıkışmayı simule etmek için, yumuşak killerde m değeri 1.0 alınmalıdır Janbu (1963). Kum ve siltlerde $0.5 < m < 1.0$ arasında alınması önerilmiştir Von Soos (1990)

- p^{ref} :Referans gerilme (Plaxis yazılımında bu değer standart olarak 100 kPa alınır)
- σ'_3 :Üç eksenli deneyde uygulanan çevre basıncı (kPa)
- K_0^{nc} :Normal konsolidasyon değeri (Plaxis yazılımında standart olarak 1-sinφ şeklinde hesaplanır.

3.4 Jeolojik Birimlerin Jeomekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında değerlendirilen jeolojik birimlere ait parametreler ilgili projelerin jeolojik etüt çalışmaları sürecinde, projeci firmalar tarafından elde edilmiştir. Jeolojik etüt raporlarında sunulmayan parametreler, bu çalışma kapsamında literatürde önerilen yaklaşımlar kullanılarak dolaylı yoldan elde edilmiştir.

3.4.1 Doğal Birim Hacim Ağırlığının Kestirilmesi

Çizelge 3.1’de belirtilen tablo yardımı ile farklı zemin türlerinin ıslak ve kuru durumdaki birim hacim ağırlıkları hakkında değerlendirmelerde bulunulabilir (Carter ve Bentley,1991).

Çizelge 3.1 : Zemin türleri ve doğal birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki (değerler yuvarlatılarak sunulmuştur) (Carter ve Bentley,1991).

Zemin	$\gamma_{doymuş} (kN/m^3)$			$\gamma_{kuru} (kN/m^3)$		
	Alt Limit	Üst Limit	Ortalama	Alt Limit	Üst Limit	Ortalama
Kum ve Çakıl						
Çok Gevşek	16.7	17.7	17.2	12.8	13.8	13.3
Gevşek	17.7	18.7	18.2	13.8	14.8	14.3
Orta Sıkılık	18.7	20.6	19.7	14.8	17.7	16.2
Sıkı	19.7	21.6	20.6	16.7	19.7	18.2
Çok Sıkı	21.6	22.6	22.1	19.7	21.6	20.6
Kötü Boylanmış Kum	16.7	18.7	17.7	12.8	14.8	13.8
İyi Boylanmış Kum	17.7	22.6	20.1	13.8	21.6	17.7
İyi Boylanmış Kum/Çakıl Karışımı	18.7	22.6	20.6	14.8	21.6	18.2

Çizelge 3.1 (devam): Zemin türleri ve doğal birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişki (değerler yuvarlatılarak sunulmuştur) (Carter ve Bentley,1991).

Zemin	$\gamma_{\text{doğru}} (kN/m^3)$			$\gamma_{\text{kuru}} (kN/m^3)$		
	Alt Limit	Üst Limit	Ortalama	Alt Limit	Üst Limit	Ortalama
Kil						
Konsolide Olmamış Çamur	15.7	16.7	16.2	8.9	10.8	9.9
Yumuşak, Açık Yapıda	16.7	18.7	17.7	10.8	13.8	12.3
Tipik, Normal Konsolide	17.7	21.6	19.7	12.8	18.7	15.7
Blok Kil (Boulder)	19.7	23.6	21.6	16.7	21.6	19.2
Kırmızı Tropik Toprak	16.7	20.6	18.7	12.8	17.7	15.2

3.4.2 Hidrolik İletkenlik Katsayılarının Kestirilmesi

Çizelge 3.2’de farklı zemin türlerine ait ortalama hidrolik iletkenlik katsayıları belirtilmiştir. Bu değerler literatürde yer alan sınıflandırmalara göre belirlenmiştir.

Çizelge 3.2 : Zemin hidrolik iletkenlik katsayıları.

Tanımlama	USC (Unified Soil Classification)	İletkenlik Katsayıları (k_s) (m/s)		Spesifik Değer (m/s)	Referanslar
		Min	Max		
İyi Derecelenmiş Çakıl, Çakıl-Kum Karışımı, İnce Malzeme Çok Az Veya Hiç Yok	GW	5×10^{-4}	5×10^{-2}		Swiss Standard (1999)
Kötü Derecelenmiş Çakıl, Çakıl-Kum Karışımı, İnce Malzeme Çok Az Veya Hiç Yok	GP	5×10^{-4}	5×10^{-2}		Swiss Standard (1999)
Siltli Çakıl, Çakıl-Kum-Silt Karışımı	GM	5×10^{-8}	5×10^{-6}		Swiss Standard (1999)
Alüvyal Kum Ve Çakıl	GM	4×10^{-4}	4×10^{-3}		Carter ve Bentley (1991) Leonards (1962)
Killi Çakıl, Çakıl-Kum-Silt Karışımı	GC	5×10^{-9}	5×10^{-6}		Swiss Standard (1999)
İyi Derecelenmiş Kum, Çakıllı Kum, İnce Malzeme Çok Az Veya Hiç Yok	SW	1×10^{-8}	1×10^{-6}		Swiss Standard (1999)
Çok İyi Boylanmış Çok İnce Kum	SW			8.40×10^{-5}	West (1995)

Çizelge 3.2 (devam) : Zemin hidrolik iletkenlik katsayıları.

Tanımlama	USCS Sınıflandırması	İletkenlik Katsayıları (k_s) (m/s)		Spesifik Değer (m/s)	Referanslar
		Min	Max		
Çok İyi Boylanmış Orta Kum	SW			2.23×10^{-3}	West (1995)
Çok İyi Boylanmış Kaba Kum	SW			3.69×10^{-1}	West (1995)
Kötü Derecelenmiş Kum, Çakıllı Kum, İnce Malzeme Çok Az Veya Hiç Yok	SP	2.55×10^{-5}	5.35×10^{-4}		Swiss Standard (1999) Carter ve Bentley (1991) Leonards (1962)
Temiz Kum	SP-SW	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-2}		West (1995)
Düzenli Kum Ve Çakıl	SP-GP	4.00×10^{-3}	4.00×10^{-1}		Carter ve Bentley (1991) Leonards (1962)
İnce Malzemesiz İyi Derecelenmiş Kum Ve Çakıl	GW-SW	4.00×10^{-5}	4.00×10^{-3}		Carter ve Bentley (1991) Leonards (1962)
Siltli Kum	SM	1.00×10^{-8}	5.00×10^{-6}		Swiss Standard (1999)
Killi Kum	SC	5.50×10^{-9}	5.50×10^{-6}		Swiss Standard (1999) West (1995)
İnorganik Silt, Siltli Veya Killi İnce Kum, Plastisitesi Düşük	ML	5.00×10^{-9}	1.00×10^{-6}		Swiss Standard (1999)
Plastisitesi Düşük İnorganik Kil, Siltli Kil, Kumlu Kil	CL	5.00×10^{-10}	5.00×10^{-8}		Swiss Standard (1999)
Organik Silt Ve Plastisitesi Düşük Organik Siltli Kil	OL	5.00×10^{-9}	1.00×10^{-7}		Swiss Standard (1999)
Yüksek Plastisiteli İnorganik Silt	MH	1.00×10^{-10}	5.00×10^{-8}		Swiss Standard (1999)
Yüksek Plastisiteli İnorganik Kil	CH	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-7}		Swiss Standard (1999)
Sıkıştırılmış Silt	ML-MH	7.00×10^{-10}	7.00×10^{-8}		Carter ve Bentley (1991) Leonards (1962)
Sıkıştırılmış Kil	CL-CH	-	1.00×10^{-9}		Carter ve Bentley (1991) Leonards (1962)
Yüksek Plastisiteli Organik Kil	OH	5.00×10^{-10}	1.00×10^{-7}		Swiss Standard (1999)

3.4.3 Elastisite Modülü ve Poisson Oranlarının Seçilmesi

Çizelge 3.3'te farklı zemin türlerine ait ortalama elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri belirtilmiştir (AASHTO, 2002). Literatürde önerilen bu değerler, saha çalışmalarından elde edilen değerler ile karşılaştırılmalıdır.

Çizelge 3.3 : Zeminlerin tipik elastisite modülü ve Poisson oranları (AASHTO, 2002).

Zemin Tipi	Elastisite Modülü E_s (kPa)	Poisson Oranı ν
Kil		
Yumuşak	2394 - 14364	
Orta sertlikten sert	14364 - 47880	0.40 - 0.50 (drenajsız)
Çok Sert	47880 - 95760	
Lös	14364 - 57456	0.10 - 0.30
Silt	1915 - 19152	0.30 - 0.35
İnce Kum		
Gevşek	7660 - 11491	
Orta Sıkı	11491 - 19152	0.25
Sıkı	19152 - 28728	
Kum		
Gevşek	9576 - 28728	
Orta Sıkı	28728 - 47880	0.20 - 0.35
Sıkı	47880 - 76608	
Çakıl		
Gevşek	28728 - 76608	0.20 - 0.35
Orta Sıkı	76608 - 95760	
Sıkı	95760 - 191520	0.30 - 0.40

3.4.4 Kohezyonlu Zeminlerin Mekanik Parametrelerinin Kestirilmesi

Kohezyonlu zeminlerin makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesinde aşağıdaki yaklaşımlar kullanılmaktadır.

3.4.4.1 Drenajsız Makaslama Dayanımının Kestirilmesi

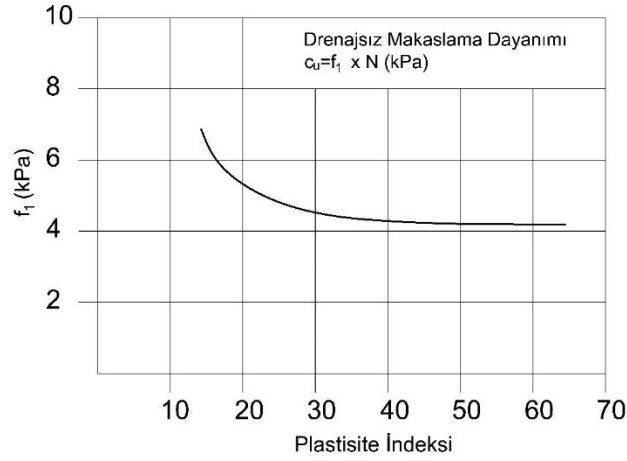
Kohezyonlu zeminlerin drenajsız makaslama dayanımlarının belirlenmesinde Standart Penetrasyon Testi (SPT) kullanılabilmektedir.

Drenajsız makaslama dayanımı (c_u), araştırma kuyusunun açımıyla eş zamanlı yapılan *SPT* deneyi verilerine dayalı olarak belirlenebilmektedir (Eşitlik 3.7, Şekil 3.4).

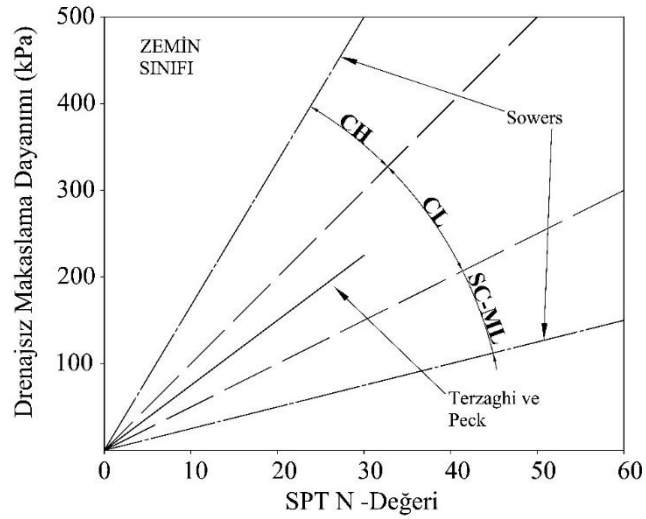
$$c_u = f_1 N \text{ (kPa)} \text{ (Katı – Sert Killer)} \quad (3.7)$$

f_1 : Zeminin Plastisite indisine bağlı katsayı, Şekil 3.3'ten elde edilir

N : Zemin *SPT* değeri (darbe/30cm)



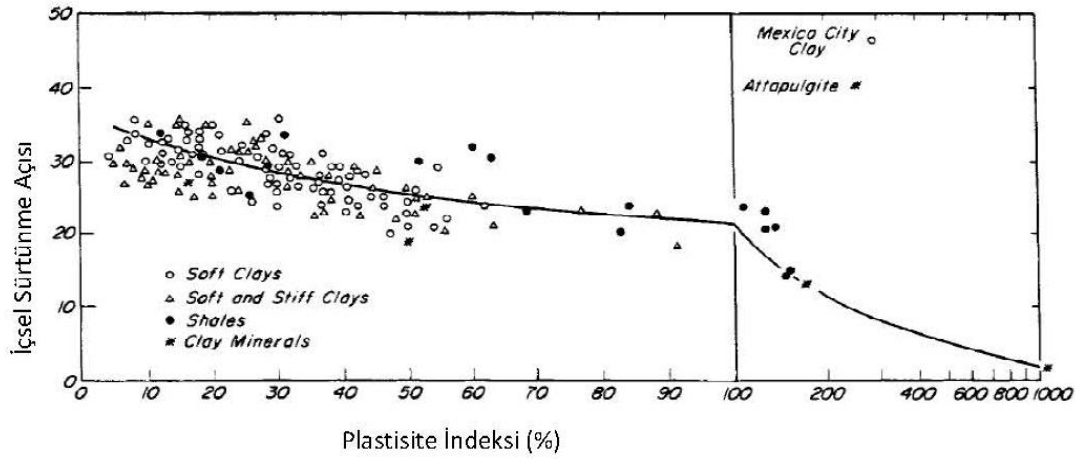
Şekil 3.3 : Plastisite indisi ve f_1 arasındaki ilişkisi (Stroud, 1974).



Şekil 3.4 : Standart penetrasyon testi değeri ve drenajsız makaslama dayanımı arasındaki ilişkisi (Terzaghi ve Peck, 1967; Sowers, 1979).

3.4.4.2 Efektif Sürtünme Açısının Kestirilmesi

Bazı killer üzerinde yapılan araştırmalardan elde edilen verilere göre hazırlanmış olan efektif içsel sürtünme açısı ve plastisite indeksi arasındaki grafiksel ilişki Şekil 3.5'te belirtilmiştir (Terzaghi ve diğ., 1996).



Şekil 3.5 : Efektif içsel sürtünme açısı ile plastisite indeksi arasındaki ilişki (Terzaghi ve diğ.,1996).

3.4.4.3 Elastisite Modülünün Kestirilmesi

Elastisite modülü Çizelge 3.4'te belirtilen parametreler yardımı ile bulunduğundan sonra indirgenme faktörü olan 0.8 ile çarpılır (Bowles, 1997).

Çizelge 3.4: Killerin drenajsız makaslama dayanımı ile deformasyon modülü arasındaki ilişki.

Zemin	Plastisite İndisi Karşılaştırma	Deformasyon Modülü
Kil ve Silt	$I_p^1 > 30$ veya organik	$E_s^2 = (100 - 500) c_u^3$
Siltli veya Kumlu Kil	$I_p^1 < 30$ veya katı	$E_s^2 = (500 - 1500) c_u^3$

¹ I_p : Plastisite İndisi (%)

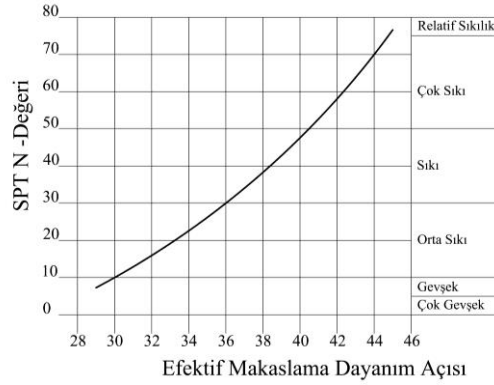
² E_s : Drenajsız Elastisite Modülü

³ c_u : Drenajsız Makaslama Dayanımı

3.4.5 Kohezyonsuz Zeminlerin Mekanik Parametrelerinin Kestirilmesi

3.4.5.1 İçsel Sürtünme Açısının Kestirilmesi

Şekil 3.6’da belirtilen efektif makaslama dayanım açısı ve *SPT* değeri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik kullanılmaktadır (Peck ve diğ., 1974).



Şekil 3.6 : Spt *N* değeri ile efektif makaslama dayanımı açısı ilişkisi (Peck ve diğ.,1974).

3.4.5.2 Elastisite Modülünün Kestirilmesi

Kohezyonsuz zeminlerin *SPT* ve elastisite modülü ilişkisi Çizelge 3.5’te belirtilmiştir (Bowles, 1997).

Çizelge 3.5: Kohezyonsuz zeminlerin *SPT* ve elastisite modülü ilişkisi (Bowles, 1997).

Zemin Tipi	Önerilen Eşitlik (kPa)
Kum (Normal Konsolide)	$E_s=500(N+15)$
Kum (Aşırı Konsolide)	$E_s=40000+1050N$
Çakıllı Kum	$E_s=1200(N+6)$
	$E_s=600(N+6), N \leq 15$
	$E_s=600(N+6)+2000, N > 15$
Killi Kum	$E_s=320(N+15)$
Siltli, Kumlu Silt	$E_s=300(N+6)$

N, *SPT* direncini belirtmektedir .



4. İNCELENEN METRO HATLARININ MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Tez kapsamında, İstanbul ili içerisinde inşası gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilmekte olan aşağıda aralıkları belirtilen metro hatları incelenmiştir. Metro tünellerinin geçtiği alanlar Şekil 4.1’de belirtilmiştir.

- Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı

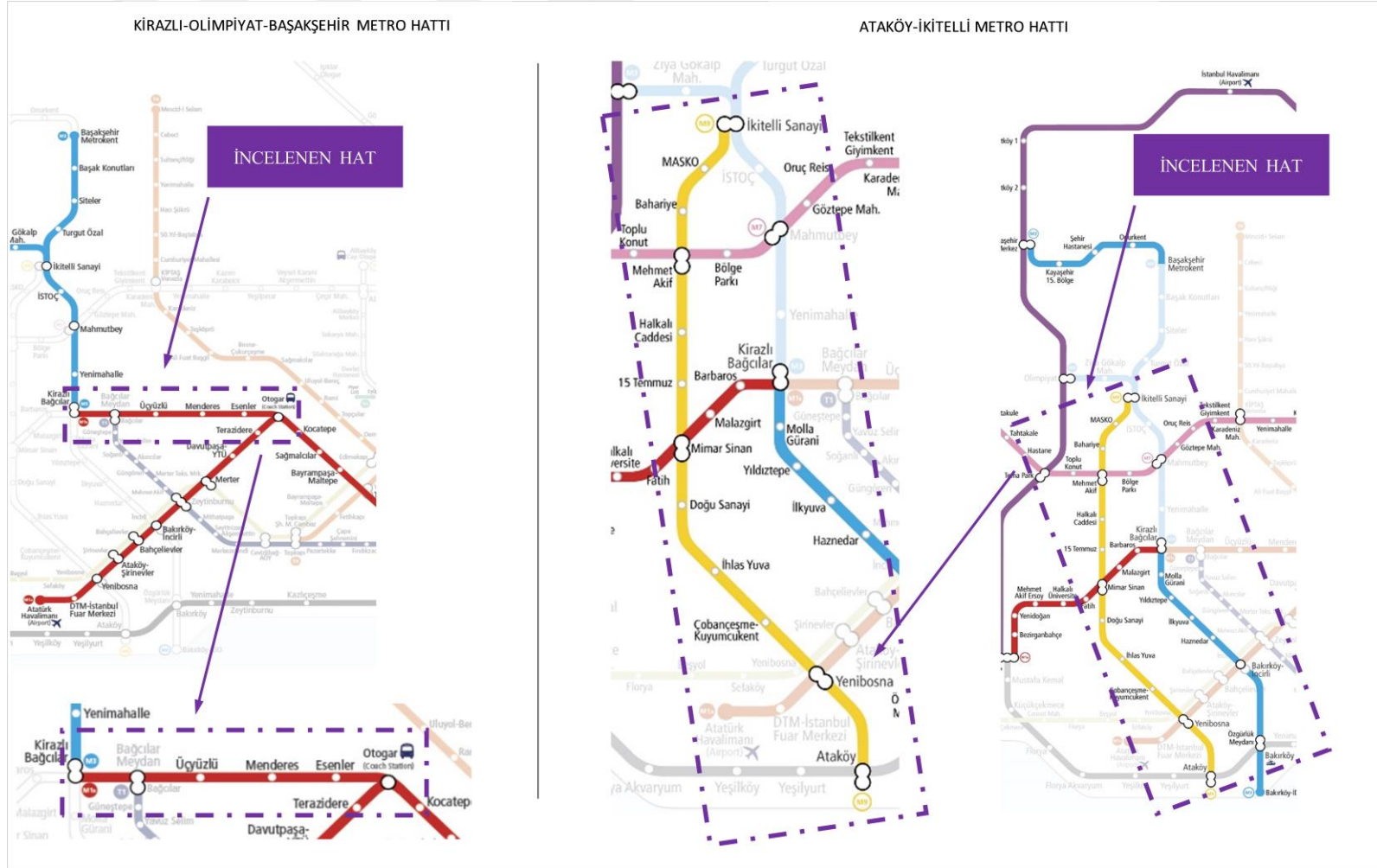
1. Km 0+900.00-1+000.00
2. Km 1+850.00-1+900.00
3. Km 4+360.00-4+470.00
4. Km 9+800.00-9+740.00

- Ataköy-İkitelli Metro Hattı

1. Km 8+760.00-8+860.00
2. Km 9+740.00-9+800.00

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 oluşturmastır.

Kazılar sırasında oluşan olumsuz etkileşim özellikle zayıf zemin koşulları ve sığ tünelcilik faaliyetlerinin gerçekleştirildiği Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro hattında yoğun şekilde gözlemlenmiştir. Şekil 4.2’de bu hattın farklı lokasyonlarında karşılaşılan yüzey deformasyonlarının neden olduğu hasarlardan bazıları örnek olarak gösterilmiştir. Bu hatta 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 karşılaşmış, hasarların neden olduğu ekonomik kayıplar proje maliyetini kayda değer oranda arttırmıştır.



Şekil 4.1 : Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir ve Ataköy-İkitelli Metro Hat güzergahları (URL-4; URL-5).



Şekil 4.2: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro hattındaki ikiz tünel kazılarının yüzeye ulaşan etkileri.

İncelenen her iki metro hattının sık ve yoğun yerleşim alanlarından geçtiği bölgeler, barındırdıkları deformasyon risklerinden dolayı izleme planları dahiline alınmıştır. Olası oturmaları izlemek ve kontrol altında tutmak amacıyla zemin yüzeyine ve binaların üzerlerine uygulama aşaması öncesinde ölçüm noktaları tesis edilmiştir.

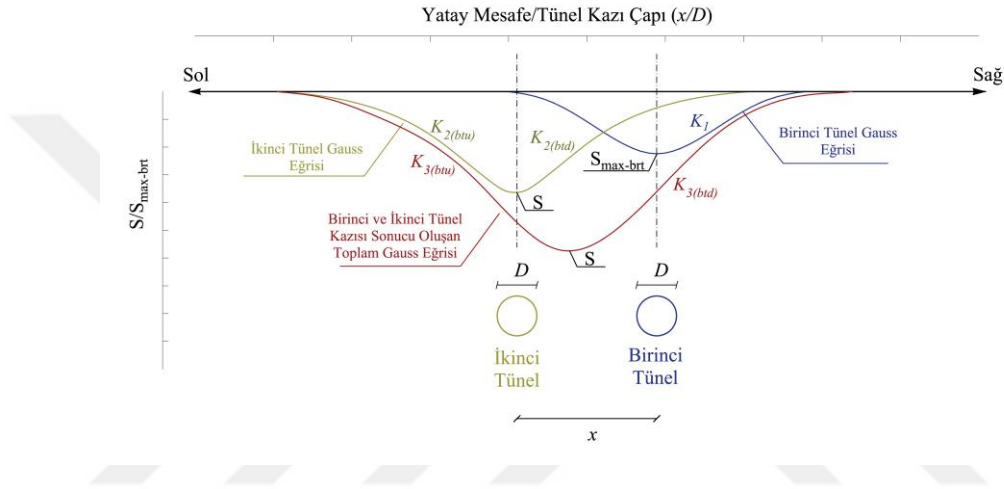
4.1 İzleme Metodolojisi

Çalışma kapsamında değerlendirilen sahalar, temel olarak iki yöntem esas alınarak analiz edilmiştir. İncelenen kesimler için elde edilen izleme verileri ile sonlu elemanlar analizinden (*FEM*) elde edilen oturma profilleri karşılaştırılmıştır.

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.
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 tünelin i_1 ve K_1 parametreleri 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 eğrisi bulunmuştur. Elde edilen oturma teknesi şeklinin sağ ve sol kanatlarında asimetrik bir yapı olduğu görülmüştür. Bu asimetrik şekle ait i_2 ve 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 parametreleri, oluşan eğrilerin sağ ve sol kanatları ayrı ayrı teorik Gauss eğrileri ile karşılaştırılarak belirlenmiştir.

6. Ölçümlerden elde edilen oturma değerleri (S), analiz edilen kesitlerdeki birinci tünellerin oluşturduğu maksimum oturma değerine ($S_{max-brt}$) göre normalize edilmiştir ($S/S_{max-brt}$). Normalizasyon işlemi, tünel eksenleri arasındaki yatay mesafeler'in (x) tünel kazı çaplarına (D) göre normalize edilmesi (x/D) ile tamamlanmış ve grafikler üzerinde elde edilen değerler belirtilmiştir. Şekil 4.3'te normalizasyon işlemi sonucu elde edilen grafiklerin şematize bir örneği belirtilmiştir. Normalizasyon işlemi ile gösterim sadece gerçek saha verilerinin analizinde kullanılmıştır (Bölüm 4).



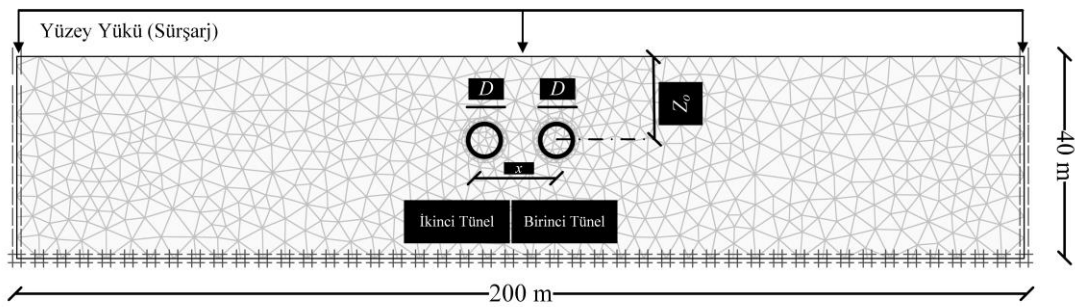
Şekil 4.3 : Tünel kazılarına bağlı değişen Gauss eğrilerinin normalizasyon işlemine göre şematik gösterimi.

İki boyutlu *FEM* çözümleri, Plaxis yazılımıyla (Plaxis, 2018) aşağıda belirtilen adımlar izlenerek oluşturulmuştur;

1. Sondaj ve izleme noktaları dikkate alınarak sonlu elemanlar yöntemi analizi için kritik kesit hatları belirlenmiştir.
2. *FEM* analizi için belirlenen kesit hatlarının jeolojik özellikleri ve hidrojeolojik parametreleri belirlenmiş ve incelenen kesitlerin tezin sayısal analiz bölümlerinde tablolar şeklinde gösterilmiştir. Parametreler, inşaat uygulama döneminde projeci firmalar tarafından gerçekleştirilen jeolojik etüt raporlarından elde edilmiştir. Eksik olan veriler literatürel yaklaşımlara dayalı olarak belirlenmiştir.
3. Kazı geometrileri sonlu elemanlar yazılımına aktarılmıştır.
4. Sınır değerler ve mesnetler belirlenmiştir. Şekil 4.4 üzerinde modellerde kullanılan sınır koşulları şematize edilerek belirtilmiştir. Model genişliği tünel etki alanının

model sınırları ile çakışmaması adına tünel yarıçapının 4 katından daha büyük olacak şekilde seçilmiştir (Brinkgreve, 2005).

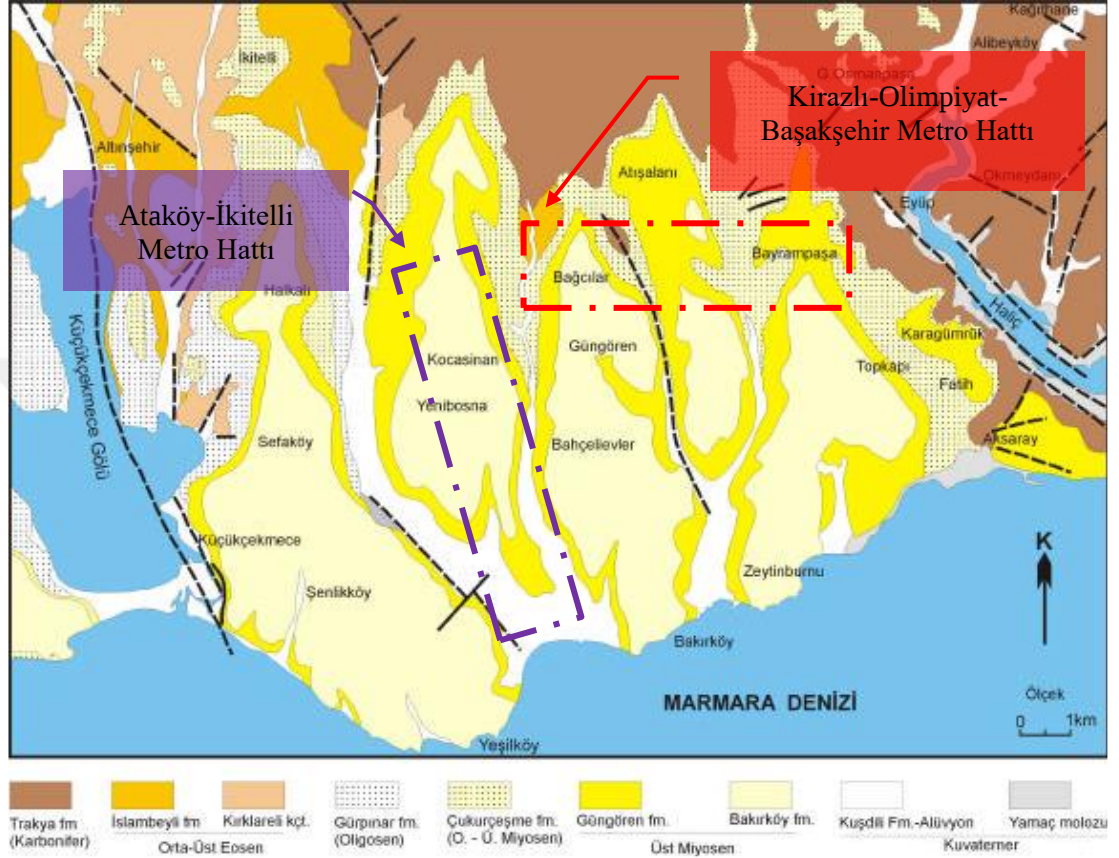
5. Saha için tanımlanan sürşarj yükü modele işlenmiştir.
6. Birinci tünelin kazısına geçilmeden önce yer değiştirmeler sıfırlanmıştır.
7. Birinci tünel kazısı ve tünel kaplaması, model için belirlenen büzülme artışı (Contraction Increment) değeri ile modelde tanıtılmıştır. Bu uygulamayla tünel kazısına bağlı olarak tünel çeperinde gelişen hacim kaybı modele tanımlanabilmektedir.
8. Tünel içerisine biriken yeraltısuyunun drenajının modellenebilmesi için, tünelin içerisi susuzlaştırılmıştır (cluster dry).
9. Tünel betonarme kaplamasında Çizelge 5.2’de belirtilen değerler kullanılmıştır
10. Birinci tünel için izlenen kazı-destek adımları (madde 7 ve 8) ikinci tünel kazısı için de uygulanmıştır.
11. Model analiz çıktısı üzerinden yüzey oturma eğrileri oluşturulmuştur.
12. Elde edilen sonuçlar üzerinden, birinci ve ikinci tüp geçişleri sonrası oluşan enine oturma teknesinin dönüm noktası (i) ve malzeme parametresi (K) elde edilmiştir. Gerçek saha değerlerinin analizinde kullanılan Gauss eğrisi çakıştırma yöntemi sonlu elemanların analizinde de kullanılmıştır
13. Pekleşen zemin yenilme kriterinin söz konusu olmadığı modellerde Mohr-Coulomb yenilme kriteri kullanılmıştır.



Şekil 4.4 : Sonlu elemanlar analizinde göz önünde tutulan genel geometrik model ve sınır koşullar.

4.2 İncelenen Hatların Jeolojisi

İncelenen hatlar İstanbul ili sınırları içerisindeki Tersiyer yaşlı birimlerden geçmektedir. Şekil 4.5'te incelenen hatların İstanbul ve çevresine ait jeoloji haritası üzerindeki konumları gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : İnceleme bölgesinin ve çevresinin jeoloji haritası (Tüysüz, 2003 -Sayar, 1989' dan yararlanılarak hazırlanmıştır).

4.3 Stratigrafi

İstanbul zonu içerisindeki istifler yaşlıdan gence doğru Paleozoyik, Mesozoyik, Senozoyik ve Kuvaterner olarak sıralanmaktadır. Bu istiflerden, Senozoyik ve Kuvaterner istifleri incelenen sahalarda gözlenmektedir.

4.3.1 Senozoyik

İstanbul ve çevresindeki bölgelere ait Senozoyik birimler, altta yer alan Üst Kretase ve daha yaşlı birimleri uyumsuz olarak örtmektedir (Tüysüz, 2003). Özgül (2011) tarafından hazırlanan Senozoyik istife ait stratigrafik kesit Şekil 4.6'de verilmiştir.

SİSTEM	SERİ	KAT	FORMASYON	YÜYE	YAKLAŞIK KALINLIK(m)	KAYATÜRÜ	DİĞER ÖZELLİKLER
SENOZOYİK	Orta-Üst Oligosen	Üst Miyosen - Pliosen(?)	Çekmece	Bakırköy	~200		Kireçtaşı-marn- kilitaşı ardışığı; ince-orta-yer yer kalın katmanlı, boşluklu-gözenekli, onkoidal, killi kireçtaşı, marn, kireçli kilitaşı, kilitaşı arakatkılı mikritik kireçtaşı egemen; bol <i>Mactra</i> vd. makrofosilli. Kumlu, milli kil; kum-kil ardalımalı düzeye başlar, istifin alt kesimlerinde mil-kum, üst kesimlerde ise kil-kireç oranı yüksek; Bakırköy ve Çukurçesme üyeleriyle geçişli.. Kum-mil-çakıl; bol mika pullu, orta boylanmış, orta-kaba kum, mil ve daha az oranda çakıl kapsar. Çakıl, kum; kuvars, kuvarsit, çakmaktaşı, volkanit, serpantinit, radyolarit, gabro kökenli yuvarlanmış, zayıf boylanmış, tutturulmamış çakıl-kum, omurgalı kemiği ve silisleşmiş ağaç parçaları kapsar.
				İstanbul	~40		
				Çukurçesme	~30		
				Güngören	~40		
				Ağaçlı	80-100		Kömür-kil arakatkılı kum, çakıl; yeşilimsi,koyu külrengi, çapraz katmanlı kum-çakıl-kil ve kömür (liniyit) ardışıklı düzeyleri kapsar.
				Sinekli	~30		
				Çantaköy	~25		Kumtaşı; kaba taneli,çakıltaşı mercekli;Çantaköy Üyesi ile yanal ve düşey geçişli. Tüf-tüffit; Gürpınar Üyesi'nin şeyilleri içinde 20-25m kalınlıkta ara düzey oluşturur.
				Gürpınar	~100		Kilitaşı-militaşı-çamurtaşı; yeşilimsi külrengi, uçuk pembe, alacalı renkli, ince-orta katmanlı, laminalı; kumtaşı, seyrek kömür arakatkılı.
				Silivri	~40		Kumtaşı, çakıltaşı, militaşı; kızılımsı kahverengi, kaba taneli, sıkışmış kaba kum boyu gereç egemen.
				Silivri	~40		Şeyil-militaşı (Karton Şeyil, Balıklı Şeyil); kara-koyu külrengi, dağınık; ince levhamsı yarılmalı; varvı yapı gelişmiş; balık fosilli.
SENOZOYİK	Orta-Üst Oligosen	Üst Eosen - Oligosen	Ceylan	Balkıyoy	~40		Çakıl, kumlu kireçtaşı; beyaz-kremrengi, oolitle, onkolitle, biyoklastik kireçtaşı ve çakıllı kireçtaşı egemen; bol <i>Conger</i> sp., Gastropod, alg kapsar.
				Yassıören	50		Çakıltaşı, kaba kumtaşı; bloklu, moloz akıntılı, boylanmış, yarı köşeli volkanit ve kireçtaşı gereçli.
				Yassıören	100		Biyoklastik kireçtaşı; killi kireçtaşı,kilitaşı marn arakatkılı, bentonik foraminiferli.
				Kızılcaali	~1000		Marn-killi kireçtaşı-kireçli kilitaşı ardışığı; orta- düzgün katmanlı, değişen oranda kumtaşı ve biyoklastik kireçtaşı-kalkarenit arakatkılı; bentonik foraminiferli, algli.
				Kızılcaali	10		Tüf; Beyaz, açık yeşil, asidik bileşimli; seyrek kuvars, mika, ayrılmış feldispat ve camsılaşmış hamur kapsar.
				Kızılcaali	~1000		Marn-killi kireçtaşı-kireçli kilitaşı ardışığı; orta- düzgün katmanlı, değişen oranda kumtaşı ve biyoklastik kireçtaşı-kalkarenit arakatkılı; bentonik foraminiferli, algli.
				Kızılcaali	~150		Resif kireçtaşı; resif çekirdeği, resif önu, resif gerisi ortamlarını betimleyen kireçtaşlarından oluşur.
				Kızılcaali	Max ~100		Çakıltaşı, kumtaşı, kilitaşı, marn; gevşek kireçli ve killi çimentolu kumtaşı, kumlu-çakıllı kireçtaşı, çakıltaşı; seyrek kömür arakatkılı kilitaşı ve kireçtaşı arakatkılı.
				Kızılcaali	~1000		
				Kızılcaali	~1000		

Şekil 4.6: Trakya havzasının Senozoyik kayastratigrafi birimlerinin genelleştirilmiş dikme kesiti (Özgül, 2011).

4.3.1.1 Ceylan Formasyonu – (Orta-Üst Eosen)

Birim inceleme alanları içerisinde, Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı (Km 4+360.00 - 4+470.00) bölgesinde gerçekleştirilen sondajlarda kesilmiştir.

Ceylan Formasyonu başlıca marn killi kireçtaşı-kireçli kilaşı aralanmasından oluşur. Kumtaşı ve kireçtaşı arakatlıdır, alt düzeylerinde tuf ara tabakaları kapsar. Formasyonun egemen kayatürünü oluşturan marn ve kilaşları taze iken mavimsi-külrengi, ayrıştığında sarımsı boz-kremrengi, orta ve düzgün katmanlı, midye kabuğu şekilli kırılma yüzeylidir. Bentonik foraminiferli mikrit ve biyomikrit türü kireçtaşı, killi kireçtaşı, seyrek olarak biyoklastik kireçtaşı-kalkarenit aradüzeylerini de içermektedir (Özgöl, 2011).

4.3.1.2 Çukurçeşme Formasyonu (Miyosen)

Birim, inceleme bölgelerinde açılan sondajların tümünde kesilmiştir.

Üst Miyosen yaşlı Çukurçeşme Formasyonu, Gürpınar Formasyonunu uyumsuz olarak örtmektedir. Birim tabanda örgülü akarsu ortamında depolanmıştır (Arıç, 1955; Sayar, 1976). Çukurçeşme Formasyonu sarımsı, kahve ve pas renkli, gevşek kil çimentolu veya çimentosuz kil, silt ve çakıl ara katkılı, tutturulmamış ya da gevşek tutturulmuş, bol mikalı kum ve kumtaşlarından oluşmaktadır. İstifin üst kesimlerinde silt ve killi kum hâkimken, alt kesimlerinde ise çakıllı kum egemendir. Formasyon içerisinde kumlarla diğer tutturulmamış çökeller arasında yanal ve düşey geçişlerle sıkça karşılaşılır (Tüysüz, 2003).

4.3.1.3 Güngören Formasyonu (Miyosen)

Güngören Formasyonu, inceleme bölgelerinde açılan araştırma sondajların tümünde kesilmiştir. Güngören Formasyonu Çukurçeşme Formasyonu'nun üzerinde tedrici geçişle yer almaktadır. Formasyon gri-yeşilimsi gri renkli ve paralel laminalı killi (İstanbul kili veya Süleymaniye kili) başlar. Bakırköy Formasyonu ile sınırında 10–15 m lik geçiş zonu izlenmektedir. Göl fasiyesinde gelişmiş olan formasyon içinde yer yer çok iyi boylanmış gri renkli ince kum mercekleri ile yeşil renkli marn ve kireçtaşı ara tabakalı killi bulunur. Zonun alt kesiminde istif içinde önce lamina düzeyinde ve seyrek, sonra giderek artan sayı ve kalınlıkta kireçtaşı ara tabakaları görülür ve böylece tedricen üstteki Bakırköy Formasyonuna geçilir. Birim yaklaşık 120 m kalınlığındadır (Tüysüz, 2003).

4.3.2 Alüvyon (Kuvaterner)

Birim inceleme alanı içerisinde, Ataköy-İkitelli Metro Hattında (Km 9+740 - 9+800) açılan araştırma sondajlarında kesilmiştir.

Güzergahın Ayamama deresi ve kolları (Kaynarca Deresi, Yenibosna Deresi) ile Tavukçu Deresi'ni kestiği kesimlerde yer alan alüvyal çökeller, genel olarak çakıl-kum-kil karışımından kurulu olup, denize yakın kesimlerde kil baskındır. Sondaj verileri, alüvyon ile dolgunun birçok yerde yaygın şekilde aktarılmış ve iç içe geçmiş olduğunu göstermiştir. Ataköy istasyon sahası dışında, alüvyon kalınlığı genel olarak kalınlık 3m ile 10 m arasında değişim gösterir. (İ.B.B, 2017, s. 14).

4.3.3 Dolgu (Güncel)

Birim, inceleme bölgelerinde gerçekleştirilen sondajların tümünde kesilmiştir. İçerik olarak heterojen yapıda kentsel atık malzemesinin istiflenmesi neticesinde oluşmuştur.

4.4 Yapısal Jeoloji

Paleozoyik yaşlı temel kaya ve üzerinde konumlanan Eosen yaşlı birimler içerisinde farklı boyutlarda normal bileşenli küçük ve orta ölçekli faylar mevcuttur (Yiğitbaş ve diğ, 1999; Elmas ve Yiğitbaş, 2001). Orta Miyosen sonunda bölgede penetlenleşme ve erozyon egemendir (Okay ve Tansel, 1992).

Araştırma kapsamındaki metro hatları Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)'nin etki alanı içerisinde bulunmaktadır (Perinçek, 1991; Sakıncı ve diğ, 1999). KAFZ'ın Marmara bölgesinde Orta-Geç Pliyosen'den itibaren etkili olduğu düşünülmektedir (Tüysüz ve diğ, 1998, Yaltırak ve diğ, 1998, Okay ve diğ, 1999).

Geç Miyosen-Pliyosen öncesinde bölgede hakim olan yaklaşık K-G doğrultulu daralma rejimi, bu dönemde bölgede gelişmeye başlayan ve KAFZ ile sonuçlanan makaslama deformasyonuna evrilmiştir. (Emre ve diğ, 1998).

İnceleme sahasında yüzeylenen sedimenter istifi oluşturan tabakalar, genellikle güney ve güneybatı yönde yatay ya da 5-10°'yi geçmeyen düşük eğimlidir. Lokal olarak faylanmanın neden olduğu 30-40°'yi bulan eğimli tabakalar ile de karşılaşılabilir. Genellikle normal bileşenli olan bu faylar çoğunlukla D-B veya KD-GB doğrultuludur (İ.B.B, 2017, s. 18).

4.5 Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı

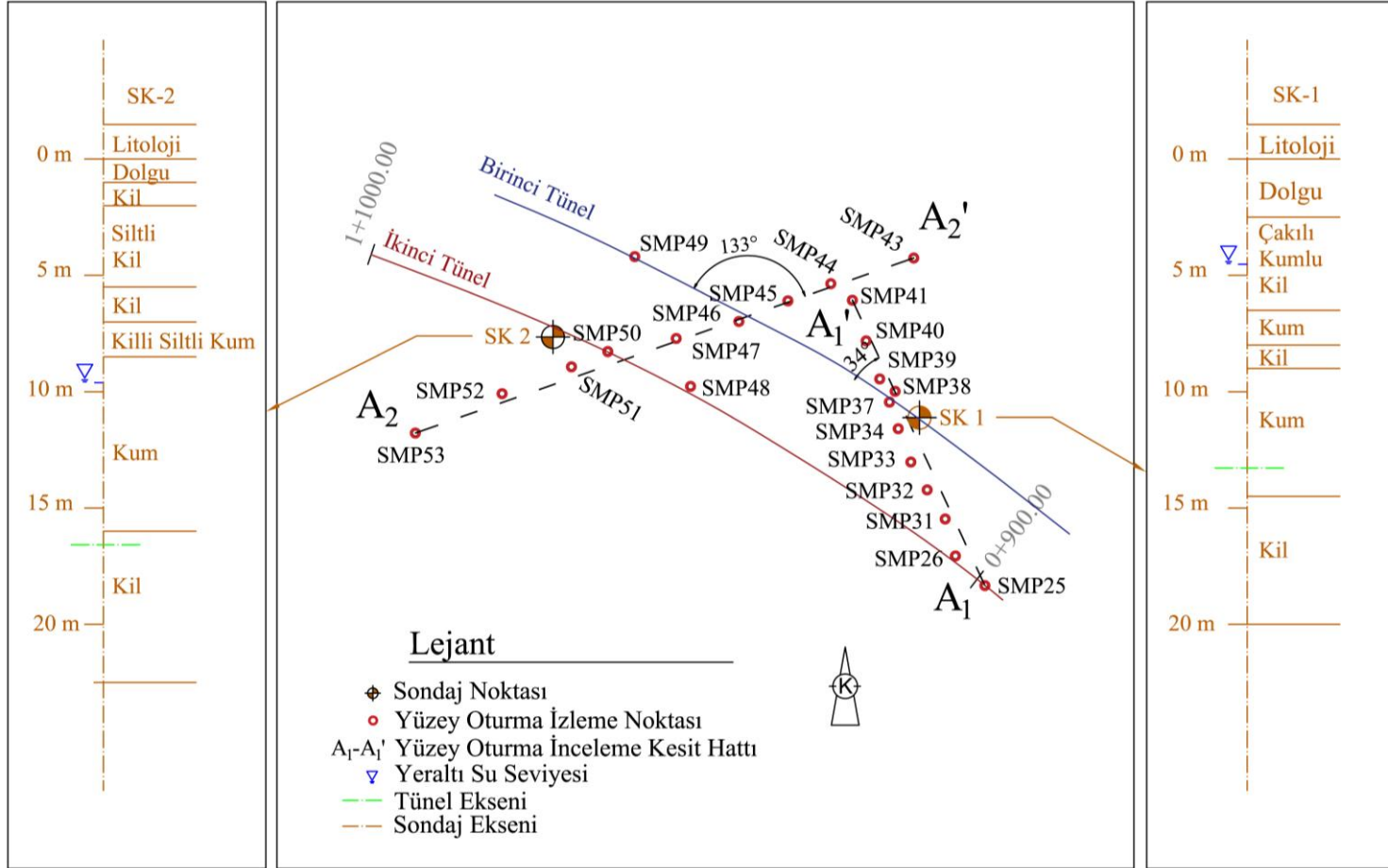
Kirazlı İstasyonu ile Başakşehir/Metrokent istasyonları arasında hizmet veren hattın yapımına, 2006 yılında başlanmıştır. İkitelli Sanayi İstasyonu'ndan, Olimpiyat İstasyonu yönünde mekik işletmeye aktarma yapılmaktadır. Yaklaşık uzunluğu 16 km olan hat üzerinde 11 istasyon bulunmaktadır. Ayrıca, Olimpiyat yerleşkesinde depo sahası ve atölye binası bulunmaktadır. Hat tünelleri gidiş-geliş olmak üzere çift yönlüdür. Kirazlı - Başakşehir/Metrokent arası *TBM* ile İkitelli Sanayi - Olimpiyat arası ise NATM yöntemi ile açılmıştır (URL-4). Tünel kazılarında birinci tüpler için 6.50 m kazı çapına sahip Herrenknecht marka, ikinci tüpler için 6.56 m kazı çapına sahip Lovat marka makineler kullanılmıştır (Güven, 2008).

4.5.1 Km 0+900.00 – 1+000.00 Arası Bölge

Hattın bu kesiminin plan görüntüsü Şekil 4.7'de belirtilmiştir. Lokasyonda tünel eksenleri arası ortalama mesafe 14.3 m ve ortalama tünel eksen derinliği 14.9 m olarak ölçülmüştür. Yeraltısuyunun yüzeyden derinliği, araştırma sondajlarından elde edilen veriler dahilinde SK-1'de 4.5 m, SK-2 ise 9.5 m şeklinde tespit edilmiştir. Analiz edilen kesitlerin (Km 0+900.00 ve Km 0+960.00) ve izleme noktalarının konumları ve tünel eksenleri plan üzerinde gösterilmiştir. Şekil üzerinde bu bölgede yapılan sondajların konumları da ayrıca verilmiştir. Ek A 'da bölgede gerçekleştirilen sondaj çalışmalarının logları ve jeolojik birimlere ait deney sonuçları belirtilmiştir.

Bu bölgede, tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonları iki kesit üzerinde incelenmiştir.

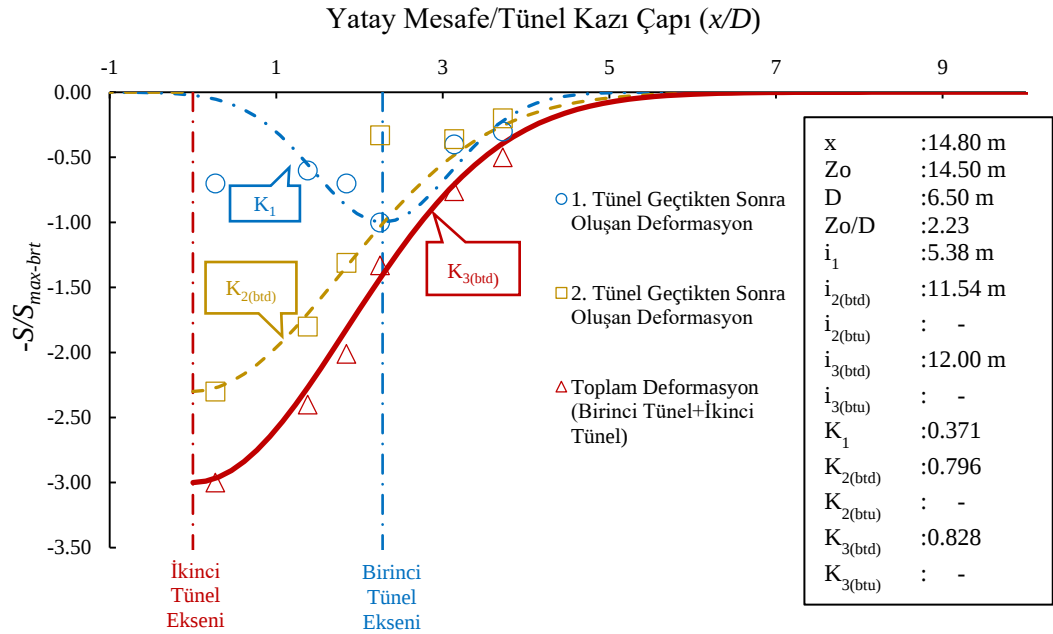
Yüzey oturma bulonları uygun alanlar seçilerek tesis edilmiş olduğundan incelenen kesitler ile tünel güzergâhları arasında açılmalık farklılıklar oluşmuştur. A₁-A₁' ve A₂-A₂' kesitleri aynı yönde açılarla tünel hattını sırasıyla 34 ve 133 derecelik açılarla kesmektedir. Bölgede gerçekleştirilen kazılarda, kazı emniyeti açısından birinci tünel, ikinci tünelin yaklaşık 80 m önünde ilerletilmiştir. Değerlendirilen en kesitlerden önce birinci tünel, yaklaşık 40 gün sonra ise ikinci tünel geçirilmiştir. Tüneller üzerindeki örtüyü Çukurçeşme ve Güngören Formasyonlarına ait sıkı kum ve sert kil birimleri ile yapay dolgu oluşturmaktadır.



Şekil 4.7 : Km 0 + 900.00 - Km 1 + 000.00 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kullanılan kesit hatları.

4.5.1.1 Oturma Teknesi Profilleri

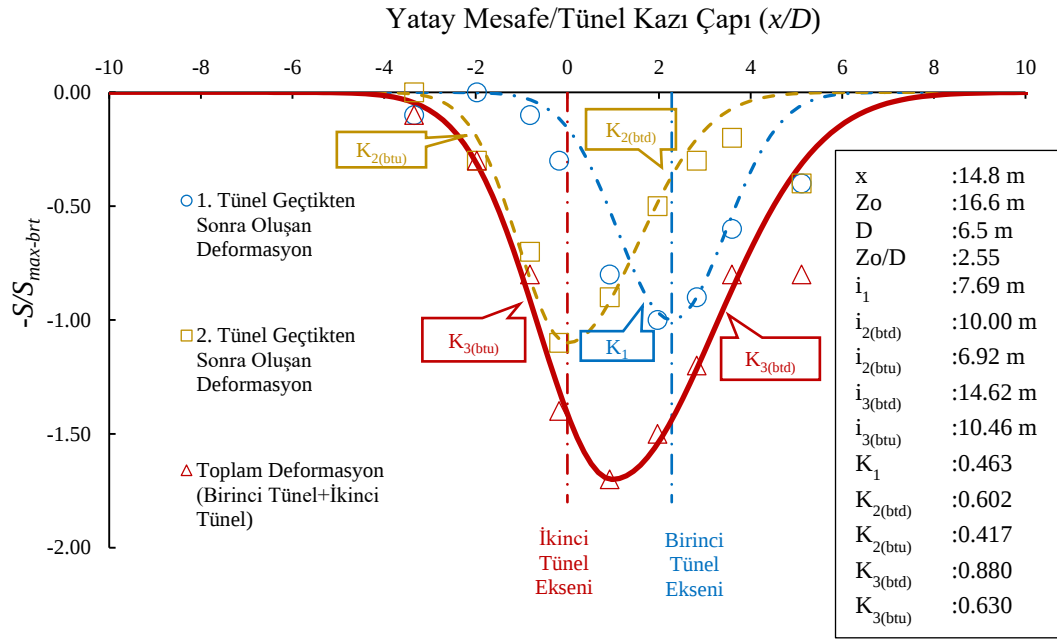
Şekil 4.8 incelendiğinde ilk tünelin geçişi sırasında oluşan deformasyonların, ikinci tünel kazısıyla arttığı, maksimum oturmanın meydana geldiği noktanın ikinci tünel eksenine doğru kaydığı anlaşılmaktadır. A₁-A₁' kesiti boyunca yerleştirilen yüzey izleme bulonu okumalarına göre, ilk tünelin geçişi sonrasında oluşan oturma teknesi dönüm noktası (i_1) 5.38 m iken, bu değer ikinci tünelin geçişi sonrasında yaklaşık iki katına ($i_{3(btd)}=12.00$ m) ulaşmıştır. Benzer şekilde, birinci ve ikinci tünellerin geçişlerinden sonra K parametresi değerleri sırasıyla 0.371 (K_1) ve 0.828 ($K_{3(btd)}$) olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.8 : A₁-A₁' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.

Şekil 4.9'da gösterilen A₂-A₂' kesiti boyunca da benzer bir durumun oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu kesit için elde edilen en uygun Gauss eğrisinin dönüm noktasının, önde ilerletilen birinci tünel için (i_1) 7.69 m'ye, arkadan gelen tünelin sol tarafı için ($i_{3(btu)}$) 10.46 m, sağ tarafı için ($i_{3(btd)}$) ise 14.62 m düzeylerine ulaştığı gözlenmiştir. Bu durum ikinci tünel üzerindeki oturmanın, tünel eksenine göre asimetric geliştiğine işaret etmektedir. Birinci tünelin kazısı sonrasında oluşan oturma teknesinin simetrik olduğu, oturma profili şeklini denetleyen malzeme parametresinin (K_1) ise 0.463 olduğu belirlenmiştir. Aynı kesitten ikinci tünelin geçişi sonrası, K değerinin bu tüp ekseninin sağ tarafı için ($K_{3(btd)}$) 0.880, sol taraf için ($K_{3(btu)}$) ise 0.630 değerlerine

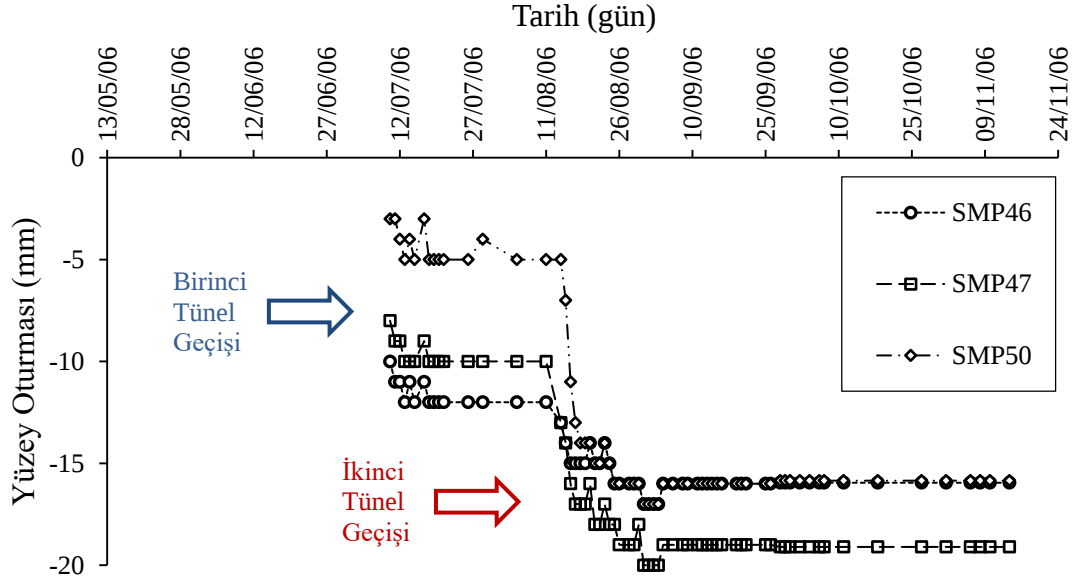
artarak ulaştığı görülmektedir. Bu durum oturma profilinin asimetrik geliştiğini göstermektedir. İkinci tünel için elde edilen K değerlerinin birinci tünele doğru ve uzaklaşan taraflar için farklı olması ve önde ilerletilen birinci tünel tarafında daha büyük bir değere ulaşması, birinci tünel kazılarının jeolojik ortamda neden olduğu örselenme ile ilişkili olabileceği şeklinde değerlendirilmiştir.



Şekil 4.9 : A2-A2' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.

Şekil 4.10'da hat üzerinde seçilen 3 tekil noktanın, tünel kazıları sonucu zamana bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmiştir. Tüneller üzerine yerleştirilen noktaların beklendiği şekilde kazı sıralamasına uygun olarak, deformasyon değerlerinin zamana bağlı biçimde arttığı, nihayetinde ise iki tünelin ortasında konumlandırılan SMP 47 noktasında en büyük oturma değerinin olduğu tespit edilmiştir. Birbirlerine yakın konumda bulunan A1-A1' ve A2-A2' kesitlerine denk gelen yüzey oturma eğrileri arasındaki farklılık, uygulanan normalizasyon işleminden kaynaklanmaktadır. Km 0+900.00'e karşılık gelen bölgeler (kesit A1-A1') Mahmutoglu (2011) tarafından da değerlendirilmiştir. Mahmutoglu (2011) ve bu çalışma kapsamında ilgili kesit üzerinde tespit edilen (K) malzeme parametreleri ve (i) dönüm noktalarının uyumlu olduğu görülmüştür.

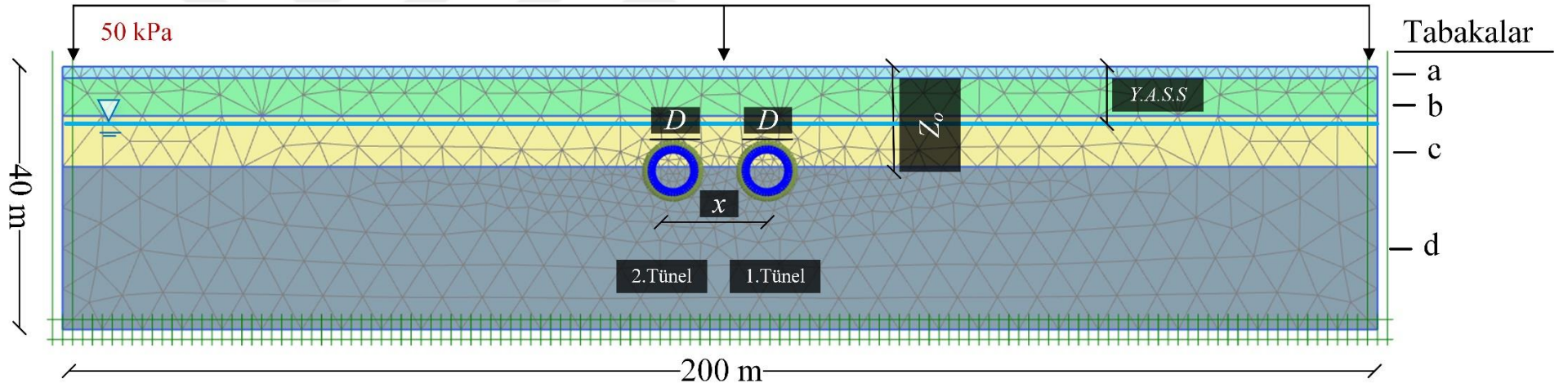
EK B'de A1-A1' ve A2-A2' kesit hatlarına karşılık gelen yüzey oturma noktalarının zamana bağlı değişimleri belirtilmiştir.



Şekil 4.10 : A₂-A₂' kesit hattı üzerinde bulunan üç yüzey oturma izleme noktasında ölçülen oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.

4.5.1.2 Sayısal Analiz

Sonlu elemanlar analizi için A₂-A₂' kesiti, sondajlardan elde edilen yer malzemesi parametreleri (Şekil 4.11, Çizelge 4.1, Çizelge 4.2) dikkate alınarak sayısallaştırılmıştır. Analizin ilk adımında, birinci tünelin kazısı ve destekleme işlemleri tanımlanmıştır. Bu aşamalar, 40 gün sonrasında ikinci tünel için de (arkadan gelen tünel) uygulanmıştır. Analizden elde edilen oturma teknesi şekli, izleme verilerinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.12). Analiz sonucunda, ilk tünelin kazısı ve desteklenmesi sonrasında oturma eğrisinin dönüm noktasının (i_1) 8.08 m'ye ulaştığı hesaplanmıştır. İkinci tünelin kazı ve desteklenmesinden sonra bu değer, eğrinin sol ($i_{3(btu)}$) ve sağ ($i_{3(btd)}$) kanatları için sırasıyla 11.54 m ve 13.85 m 'ye ulaştığı gözlenmiştir. Birinci tünelin geçişine karşılık gelen oturma teknesi için (K_1) malzeme parametresi 0.487 olarak hesaplanmıştır. Aynı en kesitten ikinci tünel geçişine karşılık gelen oturma teknesinin sol ($K_{3(btu)}$) ve sağ ($K_{3(btd)}$) kanatlarında ise bu değer sırasıyla 0.695 ve 0.834 olarak belirlenmiştir. A₂-A₂' kesiti üzerinde gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinden ve izleme verilerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, jeoteknik izleme çalışmaları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu ve sayısal çözümün bu kesitte oluşan oturmaların kestirimi açısından yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.11 : A₂-A₂' kesitinin *FEM* modeli.

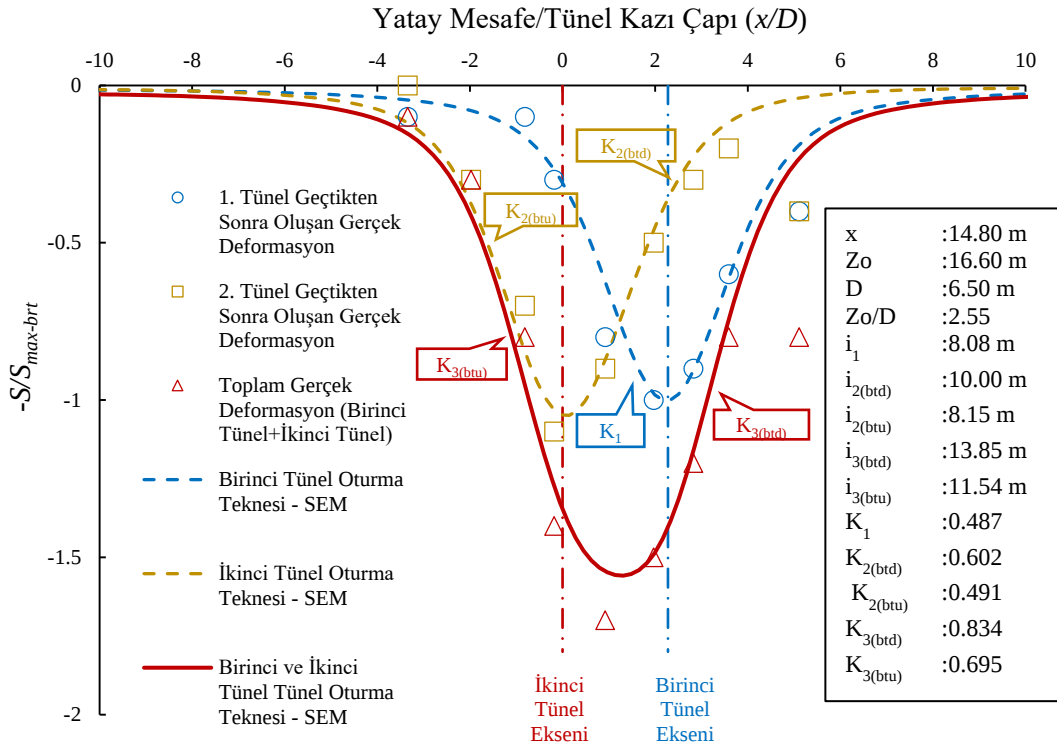
Çizelge 4.1: Sayısal model sınır parametreleri.

<i>KH</i>	<i>x</i> (<i>m</i>)	<i>D</i> (<i>m</i>)	<i>Z₀</i> (<i>m</i>)	Y.A.S.S (<i>m</i>)	Tüneller	Elemanlar	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı	Gerilme Noktası	Yüzey Yükü	Büzülme Artışı (Contraction Increment)	Boşluk Suyu Basıncı	Tünel Kazıları Arasındaki Bekleme Süresi
A ₂ -A ₂ '	14.3	6.5	16.6	9.5	Birinci Tünel	15-Düğüm Noktalı	1288	10621	15456	50 kPa	1.5 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	1 gün
					İkinci Tünel						1.5 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	40 gün

Çizelge 4.2 : A₂-A₂' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler.

Model Katmanı	Tabaka	Tabaka Kalınlığı (m)	SPT (N_{30})	Plastisite Indisi PI (%)	Drenajsız Makaslama Dayanımı c_u (kPa)	Etketif Kohezyon c' (kPa)	Birim Hacim Ağırlığı		Etketif İçsel Sürtünme Açısı ϕ' ($^{\circ}$)	Elastisite Modülü E^a (kPa)	Poisson Oranı ν	Hidrolik İletkenlik k_s (m/s)
							$\gamma_{doğal}$ (kN/m ³)	γ_{kuru} (kN/m ³)				
Dolgu	a	1.75 ¹	10.0 ¹	-	-	1 ³	17.16 ²	13.14 ²	25 ²	12500 ²	0.35 ²	1x10 ⁻⁷ ²
Killi Siltli Kum	b	5.75 ¹	22.5 ¹	34 ¹	95 ²	9.5 ⁶	19.8 ¹	15.69 ¹	28 ²	38000 ⁴	0.35 ²	1x10 ⁻⁷ ²
Kum	c	7.75 ¹	55 ¹	27 ¹	-	5 ³	20.5 ¹	16.18 ¹	41 ²	35000 ⁵	0.30 ²	1x10 ⁻⁵ ²
Kil	d	Taban ¹	43 ¹	32 ¹	182 ²	18.2 ⁶	21.5 ¹	19.12 ¹	30 ²	72800 ⁴	0.35 ²	1x10 ⁻⁷ ²

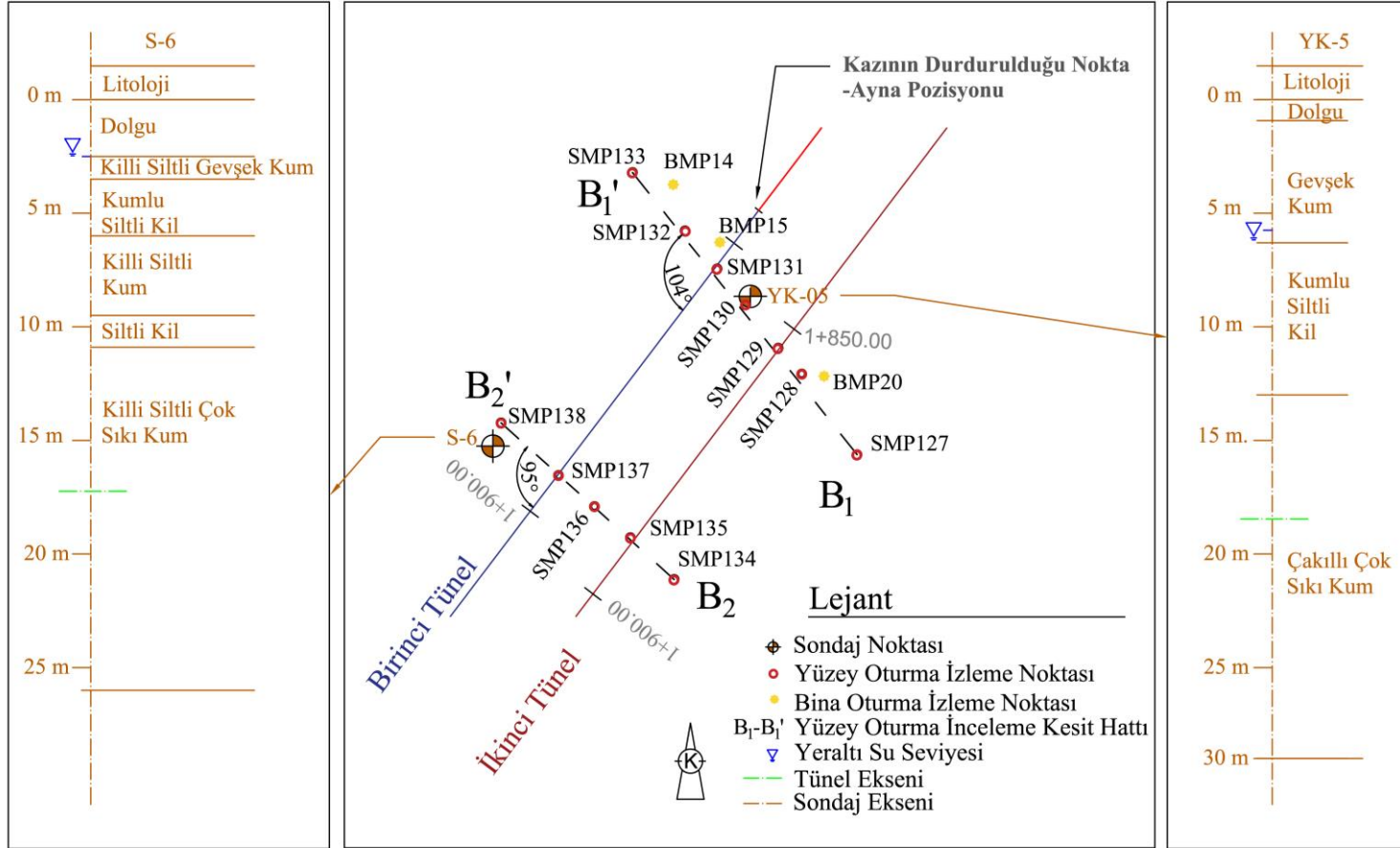
¹ Saha verilerinden elde edilmiştir
² Bölüm 3.4'de belirtilen yaklaşımlar ile hesaplanmıştır
³ Sonlu elemanlar yazılımının gerçekleştirdiği işlemlerde hesap kolaylığı sağlanması açısından kohezyon değeri atanmıştır
⁴ $E' = c_u 500(0.8)$
⁵ $E_s = 500(N+15)$
⁶ $c' = 0,1.c_u$ (Sorensen & Okkels, 2013)
Yeraltı Su Derinliği: 9.5 m



Şekil 4.12 : A2-A2' kesitinde *FEM* ile elde edilen yüzey oturma eğrileri ile izleme verilerinin karşılaştırılması.

4.5.2 Km 1+850.00 – 1+900.00 Arası Bölge

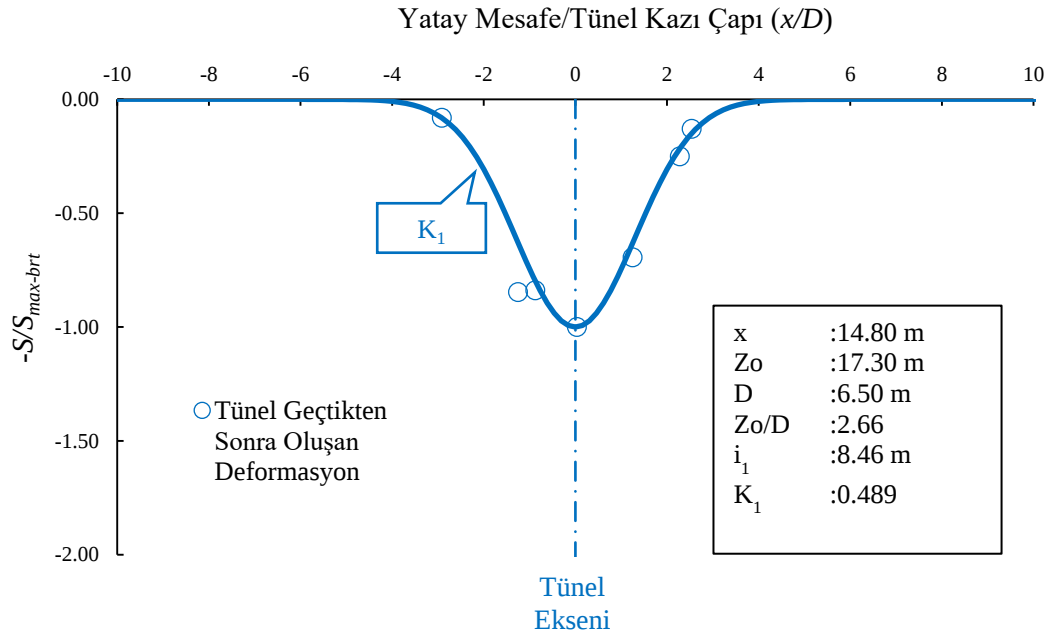
Hattın bu kesiminin plan görüntüsü Şekil 4.13'te belirtilmiştir. Lokasyonda, tünel eksenleri arası ortalama mesafe 14.8 m ve ortalama tünel eksen derinliği 17.8 m olarak ölçülmüştür. Tüneller üzerindeki örtüyü Çukurçeşme ve Güngören Formasyonlarına ait sıkı kum ve sert kil birimleri ile yapay dolgu oluşturmaktadır Yeraltısuyunun yüzeyden derinliği Km 1+850.00'de 5.8 m, Km 1+900.00'de ise yaklaşık 2.5 m'dir. Anahat tünellerin sıkı derinliklerden geçtiği bu kesimde, ($Z_o/D \approx 2.8$) 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 ve *FEM* analizinin sonucu tek tünel kazısı için değerlendirilmiştir. Ek C 'de bölgede gerçekleştirilen sondaj çalışmalarının logları ve yer malzemesi deney sonuçları verilmiştir. Araştırma bölgesinde, B₁-B₁' ve B₂-B₂' kesitleri ikinci tünel kazısı sonrası için değerlendirilmiştir (Şekil 4.13). Bu kesit hatlarının doğrultuları tünel eksenine ile sırasıyla 104 ve 95 derecelik açılar oluşturmaktadır.



Şekil 4.13 : Km 1+850.00 -1+900.00 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kullanılan kesit hatları.

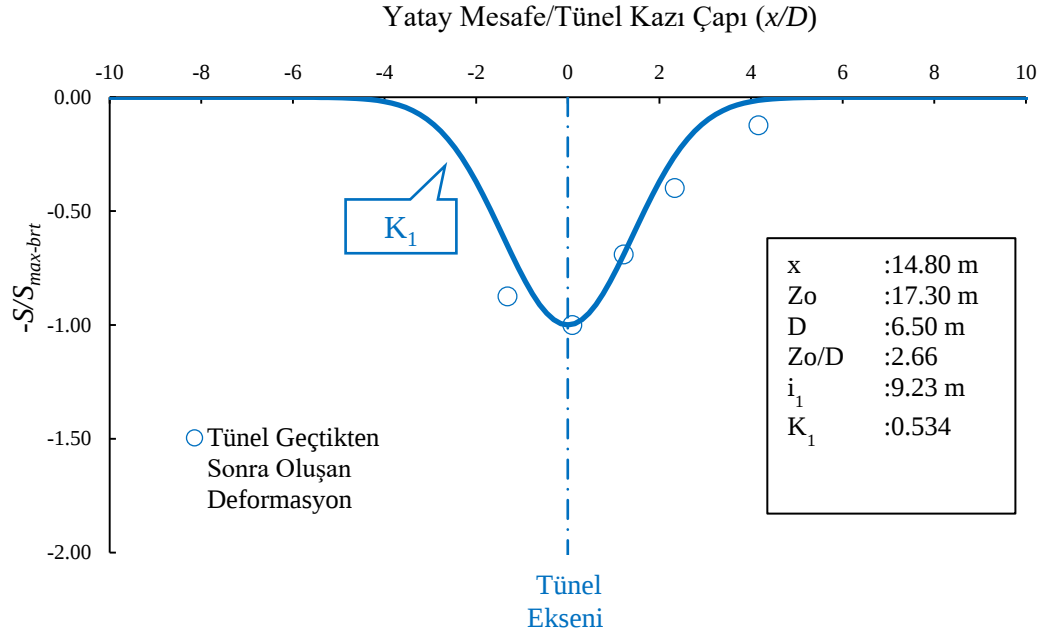
4.5.2.1 Oturma Teknesi Profilleri

B₁-B₁' kesit hattı boyunca yerleştirilen izleme bulonu okumalarından elde edilen enine oturma teknesi profili üzerinden, ikinci tünelin geçişi sonrasında oluşan oturma eğrisinin dönüm noktası (i_1) 8.46 m, malzeme parametresi (K_1) ise 0.489 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 : B₁-B₁' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.

B₁-B₁' kesitine yaklaşık 35 m mesafedeki en kesit (B₂-B₂') için izleme verilerinden elde edilen oturma teknesi ise Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Bu kesit için elde edilen dönüm noktası (i_1) 9.23 m, (K_1) parametresi ise 0.534 olarak hesaplanmıştır. Her iki kesit (B₁-B₁' ve B₂-B₂') birlikte değerlendirildiğinde, oturma profili şeklinin simetrik ve benzer olduğu anlaşılmaktadır. EK D'de B₁-B₁' ve B₂-B₂' kesit hatlarına karşılık gelen yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimleri belirtilmiştir.

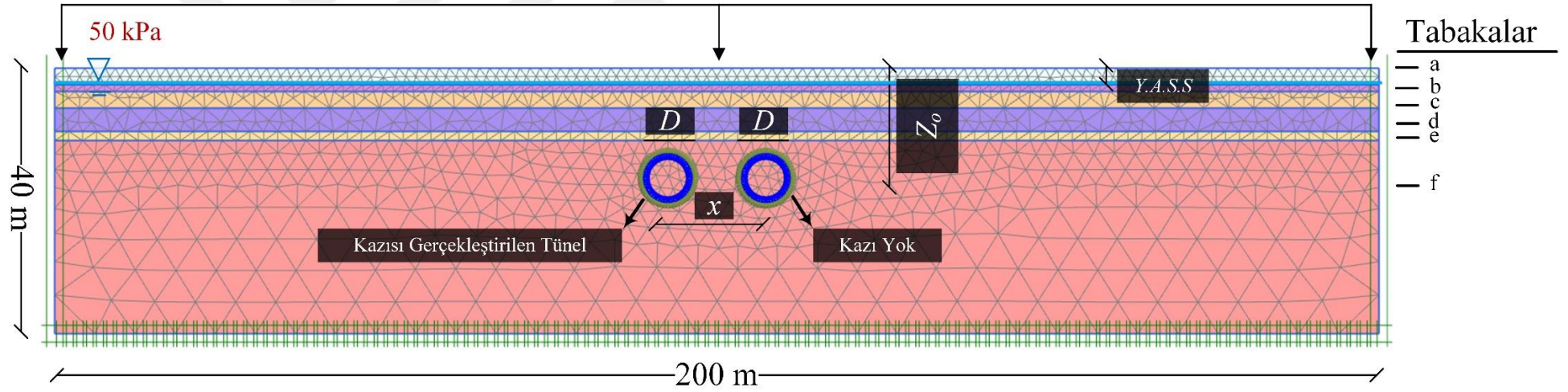


Şekil 4.15 : B₂-B₂' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.

Km 1+850.00'ye karşılık gelen bölgeler (kesit B₁-B₁') Mahmutoglu (2011) tarafından da değerlendirilmiştir ve bu çalışma kapsamında aynı kesit için elde edilen (*K*) malzeme parametreleri ve (*i*) dönüm noktalarının anılan çalışmada elde edilen değerlere yakın olduğu görülmüştür.

4.5.2.2 Sayısal Analiz

Sonlu elemanlar analizi için B₂-B₂' kesiti hattı belirlenmiştir. Kesit hattına ait geometrik sınırlar ve yer malzemesi parametreleri sırasıyla Şekil 4.16, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 üzerinde belirtilmiştir. Modelleme çalışmasında gerçek durumu yansıtacak şekilde sadece ikinci tünel kazısı gerçekleştirilmiştir (tek tünel kazısı olarak değerlendirilmiştir). Şekil 4.17 üzerinde *FEM*'den elde edilen *i* ve *K* değerleri belirlenmiştir. Tünel kazısının ardından oluşan yüzey oturma şekli Gasuss eğrisi ile karşılaştırılıp yorumlandığında, tünel geçişi sonrasında oluşan yüzey oturma eğrisi dönüm noktası (*i*₁) 8.92 m, *K*₁ parametresi ise 0.516 olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen değerler ile saha izleme verileri karşılaştırıldığında, *FEM* analizinden elde edilen sonuçların tek tünel için gerçekleştirilen kazının neden olacağı oturma profilini kestirmek için kabul edilebilir güvenirlikte olduğu anlaşılmaktadır.



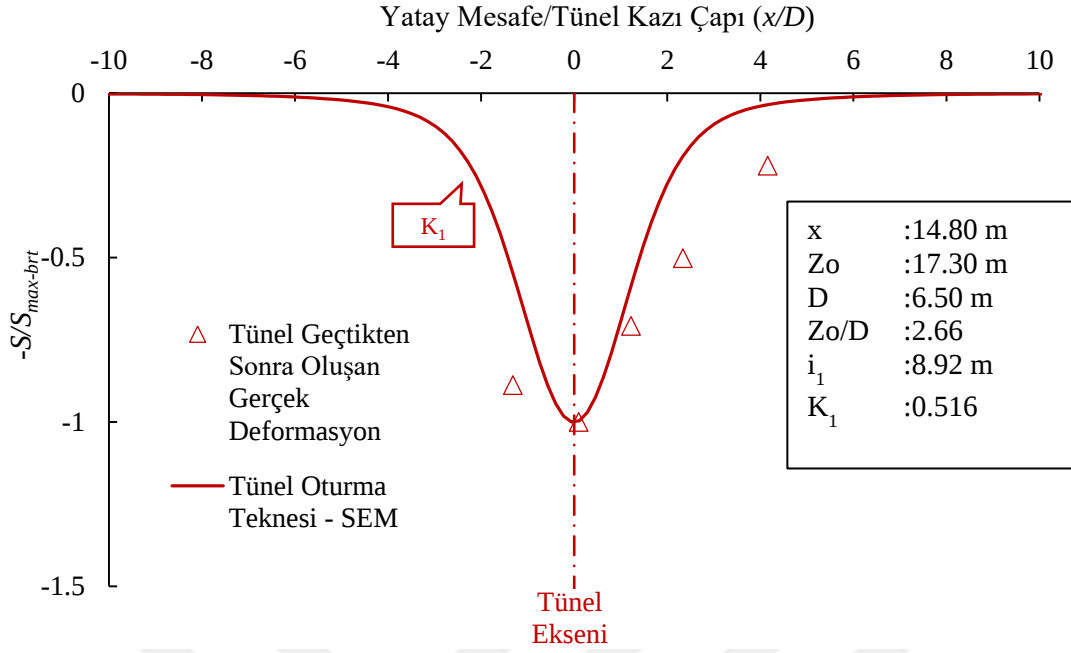
Çizelge 4.3: Sayısal model sınır parametreleri.

<i>KH</i>	<i>x</i> (m)	<i>D</i> (m)	<i>Z₀</i> (m)	Y.A.S.S (m)	Tüneller	Elemanlar	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı	Gerilme Noktası	Yüzey Yükü	Büzülme Artışı (Contraction Increment)	Boşluk Suyu Basıncı	Tünel Kazıları Arasındaki Bekleme Süresi
B ₂ -B ₂ '	14.8	6.5	17.3	2.5	Tek Tünel	15- Düğüm Noktalı	1234	10193	14808	50 kPa	0.7 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	1 gün

Çizelge 4.4 : B₂-B₂' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler.

Model Katmanı	Tabaka	Tabaka Kalınlığı (m)	SPT (N_{30})	Plastisite Indisi PI (%)	Drenajsız Makaslama Dayanımı c_u (kPa)	Efektif Kohezyon c' (kPa)	Birim Hacim Ağırlığı		Efektif İçsel Sürtünme Açısı ϕ' (°)	Elastisite Modülü E^a (kPa)	Poisson Oranı ν	Hidrolik İletkenlik k_s (m/s)
							$\gamma_{doğal}$	γ_{kuru}				
							(kN/m ³)	(kN/m ³)				
Dolgu	a	2.5 ¹	19 ¹	-	-	1 ³	17.16 ²	13.14 ²	25 ²	12500 ²	0.35 ²	1x10 ^{-7 2}
Az Killi Siltli Gevşek Kum	b	1 ¹	8 ¹	-	-	5 ³	18.14 ²	14.22 ²	28 ²	11500 ⁵	0.30 ²	1x10 ^{-5 2}
Az Kumlu Siltli Katı Kil	c	2.5 ¹	33 ¹	-	180 ²	18 ⁶	19.8 ²	15,69 ²	28 ²	72000 ⁴	0.35 ²	1x10 ^{-7 2}
Killi Siltli Çok Sıkı Kum	d	3.5 ¹	50 ¹	-	-	5 ³	20.59 ²	18.14 ²	40 ²	32500 ⁵	0.30 ²	1x10 ^{-5 2}
Siltli Sert Kil	e	1.4 ¹	50 ¹	-	200 ²	20 ⁶	19.8 ²	15,69 ²	28 ²	80000 ⁴	0.35 ²	1x10 ^{-7 2}
Az Killi Siltli Çok Sıkı Kum	f	Taban ¹	70 ¹	-	-	5 ³	20.59 ²	18.14 ²	42 ²	91200 ⁵	0.30 ²	1x10 ^{-5 2}

¹ Saha verilerinden elde edilmiştir
² Bölüm 3.4'de belirtilen yaklaşımlar ile hesaplanmıştır
³ Sonlu elemanlar yazılımının gerçekleştirdiği işlemlerde hesap kolaylığı sağlanması açısından kohezyon değeri atanmıştır
⁴ $E' = c_u 500(0.8)$
⁵ $E_s = 500(N+15)$
⁶ $c' = 0,1.c_u$ (Sorensen & Okkels, 2013)
Yeraltı Su Derinliği: 2.5 m



Şekil 4.17 : B₂-B₂' kesitinde FEM ile elde edilen yüzey oturma eğrisi.

4.5.3 Km 4+360.00 – 4+470.00 Arası Bölge

Hattın bu kesiminin plan görüntüsü Şekil 4.18’de belirtilmiştir. İncelenen bölgede tünel eksenleri arası mesafe 14.8 m ve ortalama tünel eksen derinliği 20.0 m olarak ölçülmüştür. Tünel kazıları başlamadan önce gerçekleştirilen sondajlarda, yeraltısuyunun yüzeyden derinliği 14.2 m olarak ölçülmüştür. Analiz edilen kesitlerin (Km 4+360.00 - Km 4+470.00) ve izleme noktalarının konumları ile tünel eksenleri plan üzerinde gösterilmiştir. Şekil üzerinde bu bölgede yapılan sondajın lokasyonu da ayrıca verilmiştir. Ek E ‘de bölgede gerçekleştirilen sondaj çalışmalarının logları ve deney sonuçları verilmiştir.

Aşırı oturmalar ile karşılaşılan bu bölgedeki tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey oturma teknesi formları dört kesit üzerinden değerlendirilmiştir. Hattın bu kesiminden (Km 4+300.00 - Km 4+500.00) eski ve küçük bir akarsu yatağı geçmektedir. Tünel üzerindeki örtü kalınlığının tünel çapına oranı (Z_0/D) yaklaşık 3 olup, tüneller üzerindeki örtüyü sıkı kum ve killi kum ile ince bir yapay dolgu oluşturmaktadır.

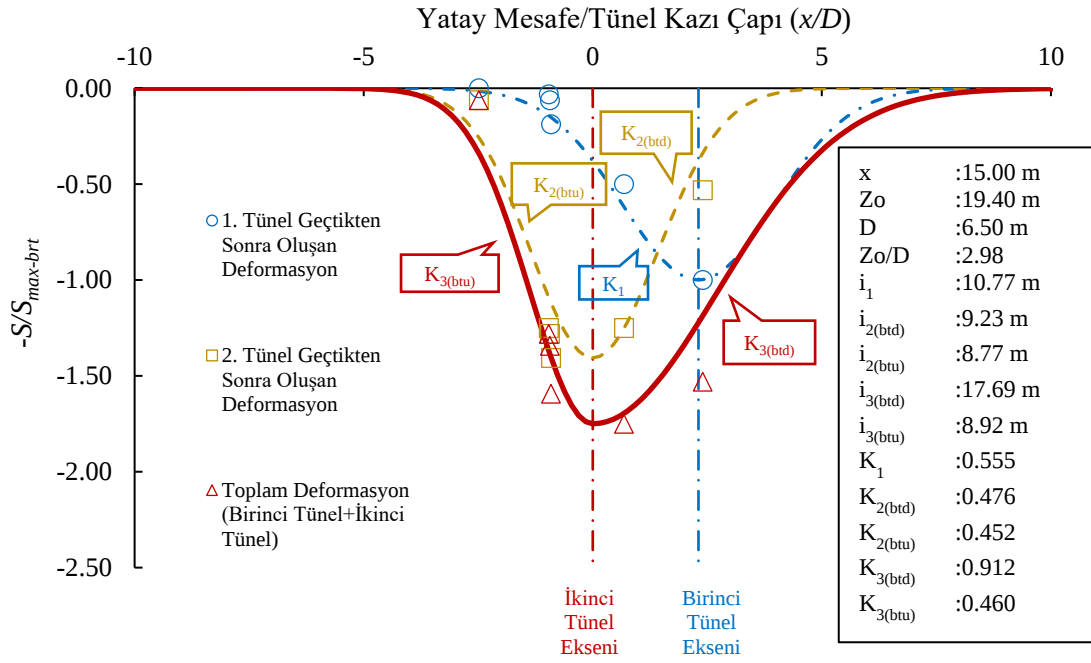
Bölgede gerçekleştirilen tünelcilik faaliyetleri neticesinde, projede öngörülen maksimum oturma değerinin (İşveren teknik şartnamelerine göre kabul edilebilir limit değer <25 mm) çok üzerinde yüzey oturmaları ile karşılaşmıştır. Oturma bağımlı hasarları sınırlandırmak için inceleme bölgesinde derinliği 15-25 m arasında değişen 248 adet zemin iyileştirme amaçlı enjeksiyon 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).

Bölgede gerçekleştirilen kazılarda, birinci tünel ikinci tünelin yaklaşık 80 m önünde ilerletilmiştir. İncelenen kesitlerden, önce birinci tünel yaklaşık 15 gün sonra ise ikinci tünel geçişini tamamlamıştır.

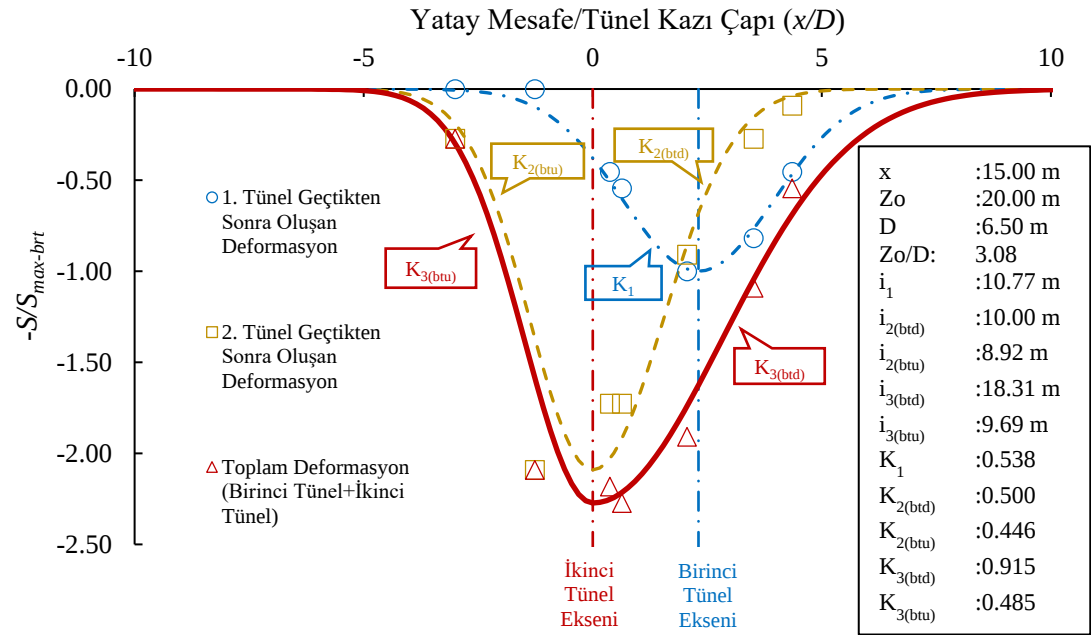
4.5.3.1 Oturma Teknesi Profilleri

Şekil 4.19'da C_4-C_4' kesit hattı üzerinde oluşan oturma teknesi profili belirtilmiştir. Profil incelendiğinde, birinci tünelin geçişi sonrası oluşan oturma eğrisinin dönüm noktasının (i_1) 10.77 m'ye ulaştığı gözlenmiştir. Aynı kesit hattından, ikinci tünelin geçişi sonrası oluşan eğride, eğrinin sol kanadında dönüm noktası değerinin ($i_{3(btu)}$) 8.92 m'ye önde ilerletilen birinci tünel tarafında ($i_{3(btd)}$) ise 17.69 m düzeyine ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu kesitte, önde ilerletilen birinci tünel kazısı için K_1 parametresi 0.555 olarak belirlenmiştir. Ancak, oturma teknesi şeklinin ikinci tünel geçişi sırasında değiştiği görülmüştür. Oturma eğrisinin sağ kanadı ($K_{3(btd)}$) için bu değer 0.912, sol kanadı ($K_{3(btu)}$) için ise 0.460 olarak hesaplanmıştır. Oturma eğrisinin önde ilerletilen tüp tarafında yatık olması, her iki tünelin etkileşim alanının kesişmesi ve zemindeki örselenme ile açıklanabilmektedir. C_3-C_3' , C_2-C_2' ve C_1-C_1' kesitleri için yapılan benzer değerlendirmelerin sonuçları sırasıyla Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de verilmiştir. EK F'de C_1-C_1' , C_2-C_2' , C_3-C_3' ve C_4-C_4' kesit hatlarına karşılık gelen yüzey oturma noktalarının zamana bağlı değişimleri belirtilmiştir.

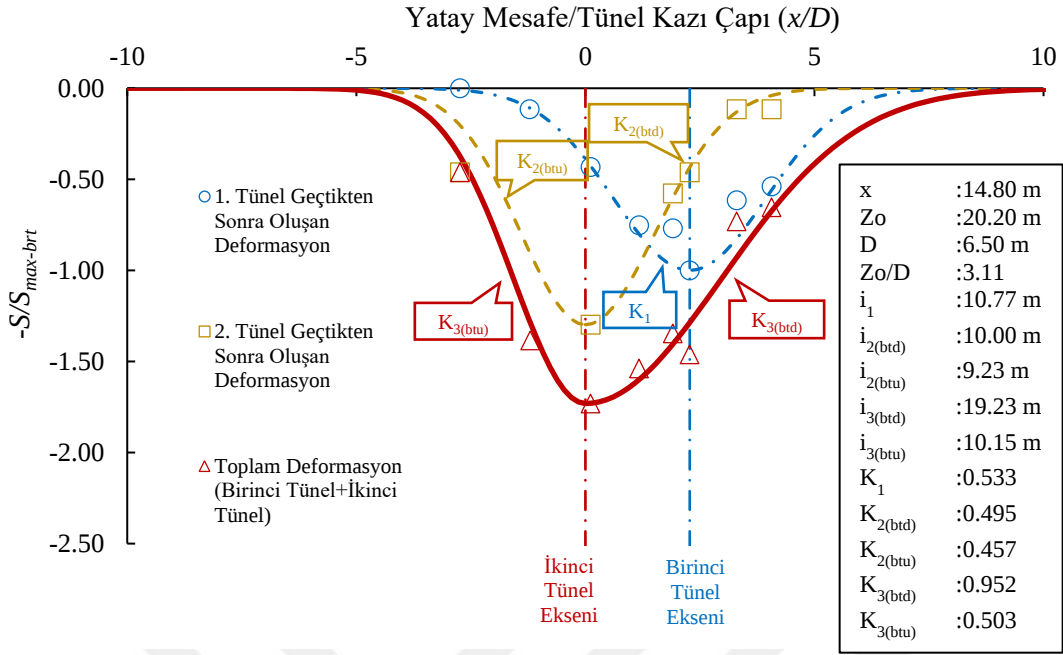
C_1-C_1' ve C_2-C_2' kesit hatlarına yakın bölgeler benzer jeolojik ve tünelcilik parametrelerinin kullanılarak Mahmutoglu (2011) tarafından da değerlendirilmiştir. İki çalışmanın çıktılarının uyumlu olduğu sadece C_1-C_1' kesit hattında ikinci tünellerin kazısı neticesinde oluşan tasman eğrisinin K parametresi ($K_{3(btd)}$), arasında küçük bir farklılık elde edilmiştir. Bu fark, tez çalışması kapsamında incelenen kesitte, emniyetli tarafta kalınmak adına eğrinin daha geniş alınmasından kaynaklanmaktadır.



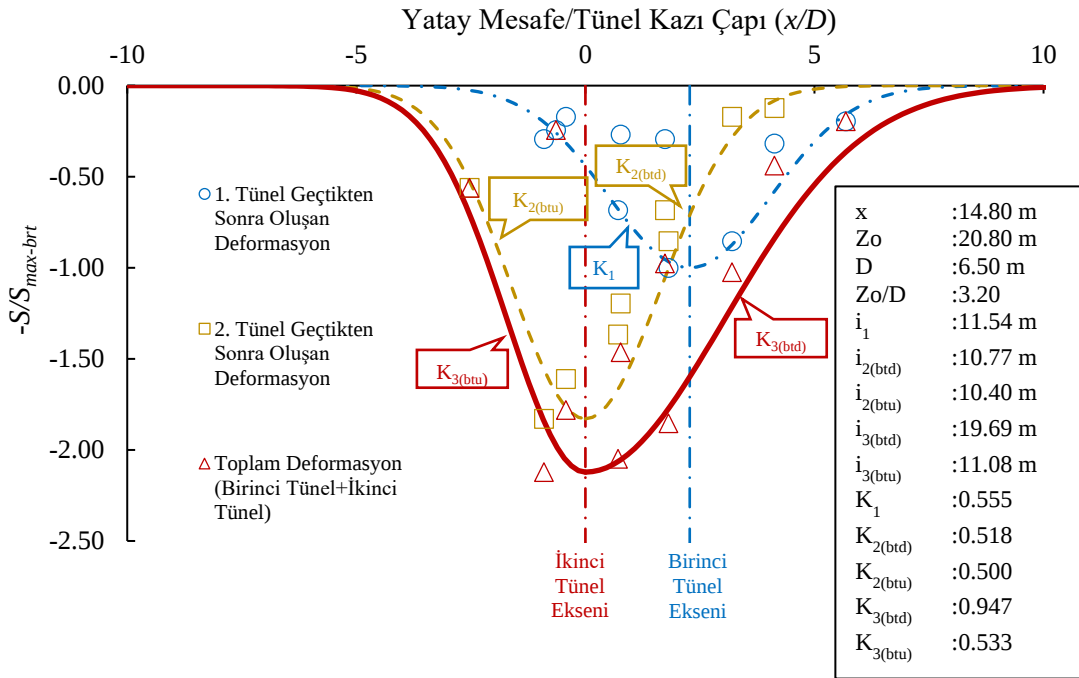
Şekil 4.19 : C4-C4' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.



Şekil 4.20 : C3-C3' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.



Şekil 4.21 : C₂-C₂' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.



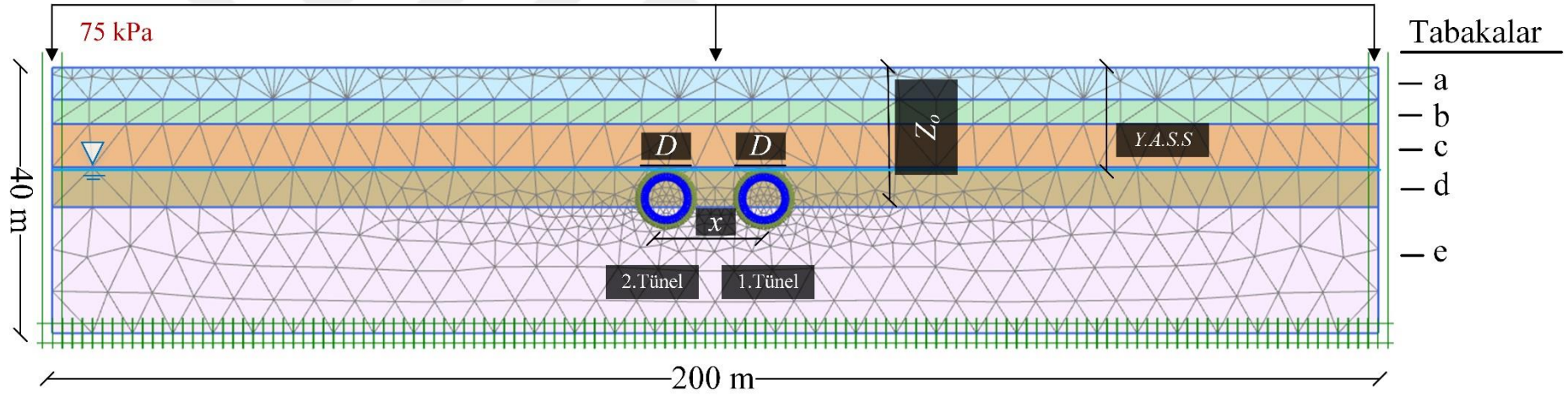
Şekil 4.22 : C₁-C₁' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.

4.5.3.2 Sayısal Analiz

Bu lokasyon için C₃-C₃' kesiti, sayısallaştırılmış ve sonlu elemanlar analizinde kullanılmıştır. Analiz edilen modelin geometrik sınırları ve yer malzemesi parametreleri sırasıyla Şekil 4.23, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 üzerinde verilmiştir.

Öncelikle birinci tünel kazı, tahkimat işlemleri gerçekleştirilmiş, 15 gün beklemeden sonra aynı işlem ikinci tünel için gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen yüzey oturma profili izleme verileri ile kıyaslanmak amacıyla Şekil 4.24'te gösterilmiştir. *FEM* analizi sonucunda, önden ilerletilen birinci tünel için oturma eğrisi dönüm noktasının (i_1) 10.62 m'ye ulaştığı görülmüştür. Arkada gelen ikinci tünel kazısının aynı en kesitten geçişi sırasında, oturma teknesinin farklılaştığı, oturma eğrisi dönüm noktasının (i), eğrinin sol ($i_{3(btu)}$) ve sağ ($i_{3(btd)}$) kanatlarında sırasıyla 9.23 m ve 16.92 m değerlerine ulaştığı görülmüştür. K parametresinin de benzer şekilde artarak değiştiği, birinci tünel (K_1) için 0.531, ikinci tünelin sağ ($K_{3(btd)}$) ve sol ($K_{3(btu)}$) tarafları için sırasıyla 0.846 ve 0.462 düzeylerine ulaştığı belirlenmiştir.

Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar ile izleme verileri karşılaştırıldığında, *FEM* analizinin bu lokasyondaki oturmaların kestirimi için uygun olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.23 : C₃-C₃' kesitinin FEM modeli.

Çizelge 4.5 : Sayısal model sınır parametreleri.

KH	x (m)	D (m)	Z_0 (m)	Y.A.S.S (m)	Tüneller	Elemanlar	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı	Gerilme Noktası	Yüzey Yükü	Büzülme Artışı (Contraction Increment)	Boşluk Suyu Basıncı	Tünel Kazıları Arasındaki Bekleme Süresi
C ₃ -C ₃ '	14.8	6.5	19.7	14.2	Birinci Tünel	15- Düğüm Noktalı	1130	9357	13560	75 kPa	1.0 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	1 gün
					İkinci Tünel						1.5 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	15 gün

Çizelge 4.6 : C₃-C₃' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler.

Model Katmanı	Tabaka	Tabaka Kalınlığı (m)	SPT (N_{30})	Plastisite Indisi PI (%)	Drenajsız Makaslama Dayanımı c_u (kPa)	Etketif Kohezyon c' (kPa)	Birim Hacim Ağırlığı		Etketif İçsel Sürtünme Açısı ϕ' (°)	Elastisite Modülü E^a (kPa)	Poisson Oranı ν	Hidrolik İletkenlik k_s (m/s)
							$\gamma_{doğal}$ (kN/m ³)	γ_{kuru} (kN/m ³)				
Dolgu	a	4.8 ¹	15 ¹	33 ¹	63 ²	6.3 ⁶	17.16 ²	13.14 ²	25 ²	12500 ²	0.35 ²	1x10 ⁻⁷ ²
Siltli Katı Kil	b	3.7 ¹	13 ¹	24 ¹	58 ²	5.8 ⁶	19.8 ²	15,69 ¹	30 ²	23200 ⁴	0.35 ²	1x10 ⁻⁷ ²
Orta Sıkı Siltli Kum	c	6.5 ¹	34 ¹	15 ¹	-	5 ³	20.5 ²	16.18 ¹	38 ²	24500 ⁵	0.30 ²	1x10 ⁻² ²
Siltli Katı Kil	d	6 ¹	36 ¹	27 ¹	153 ²	15.3 ⁶	21.5 ²	19.12 ²	28 ²	61200 ⁴	0.35 ²	1x10 ⁻⁷ ²
Kiltaşı Kumtaşı Ardalanması	e	Taban ¹	-	-	80 ²	8 ⁶	23.54 ¹	21.57 ²	27 ²	130000 ²	0.35 ²	1x10 ⁻⁷ ²

¹ Saha verilerinden elde edilmiştir

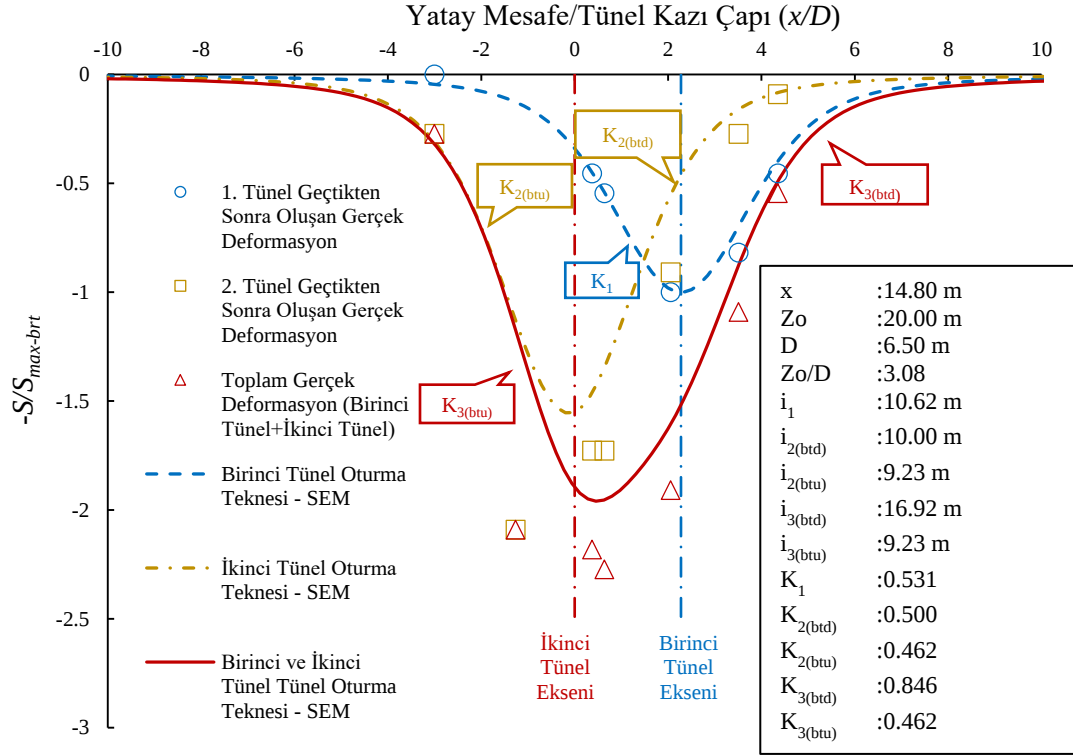
² Bölüm 3.4'de belirtilen yaklaşımlar ile hesaplanmıştır

³ Sonlu elemanlar yazılımının gerçekleştirdiği işlemlerde hesap kolaylığı sağlanması açısından kohezyon değeri atanmıştır

⁴ $E' = c_u 500(0.8)$

⁵ $E_s = 500(N+15)$

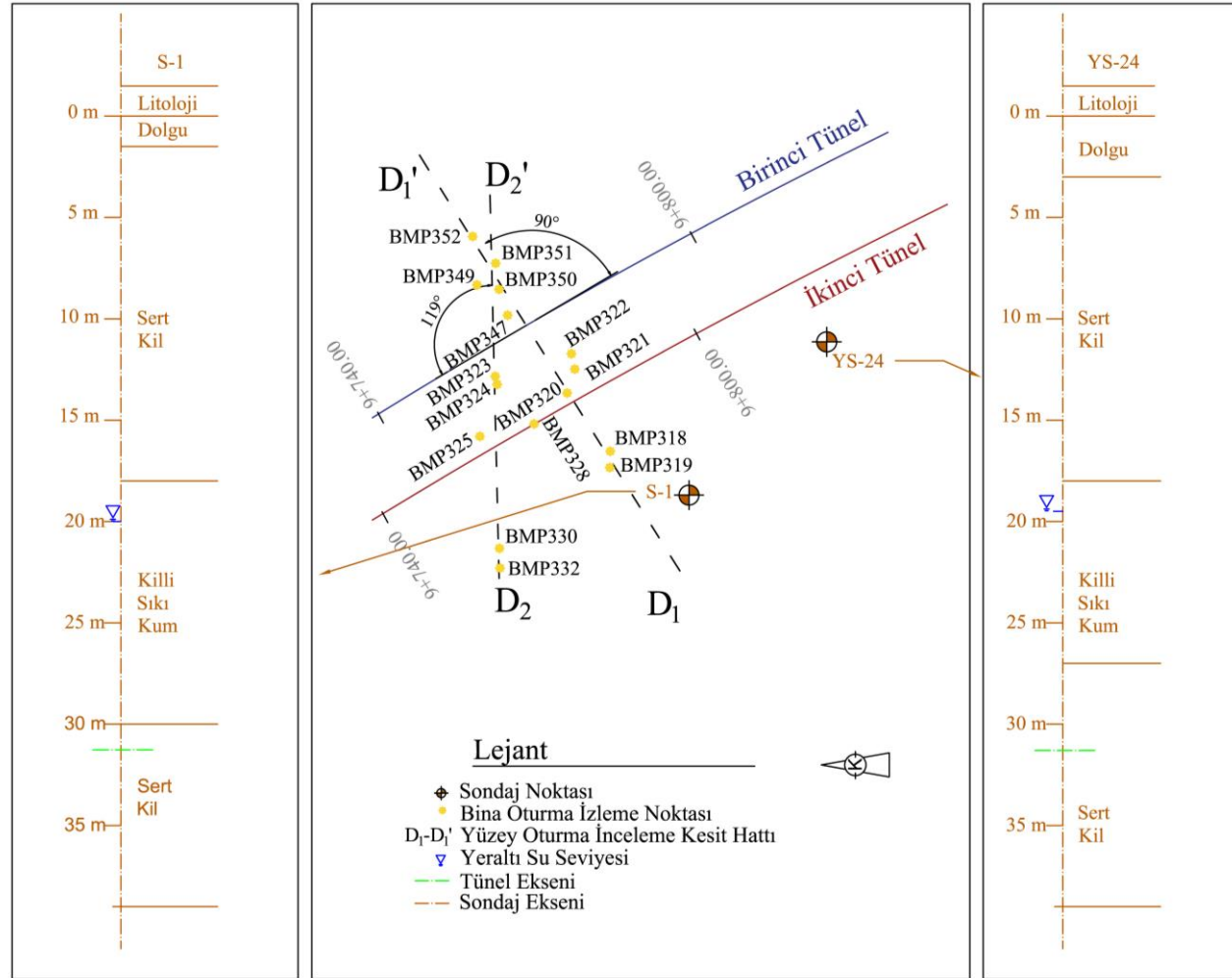
⁶ $c' = 0,1.c_u$ (Sorensen & Okkels, 2013)
Yeraltı Su Derinliği: 14.2 m



Şekil 4.24 : C₃-C₃' kesitinde *FEM* ile elde edilen yüzey oturma eğrileri ile izleme verilerinin karşılaştırılması.

4.5.4 Km 9+740 – 9+800 Arası Bölge

Hattın bu kesiminin plan görüntüsü Şekil 4.25'te belirtilmiştir. Lokasyonda tünel eksenleri arasındaki mesafe 15.0 m, ortalama tünel eksen derinliği 31.3 m olarak ölçülmüştür. Tüneller üzerindeki örtüyü Çukurçeşme ve Güngören Formasyonlarına ait sıkı kum ve sert kil birimleri ile yapay dolgu oluşturmaktadır. Hattın yakınındaki iki ayrı noktada açılan S-1 ve YS-24 sondajlarında yeraltısuyunun yüzeyden derinliği 20 m olarak ölçülmüştür. Ek G 'de bölgede gerçekleştirilen sondaj çalışmalarının logları ve yer malzemesi deney sonuçları verilmiştir. D₁-D₁' ve D₂-D₂' kesitleri aynı yönde açılarla tünel hattını sırasıyla 90 ve 119 derecelik açılarla kesmektedir.



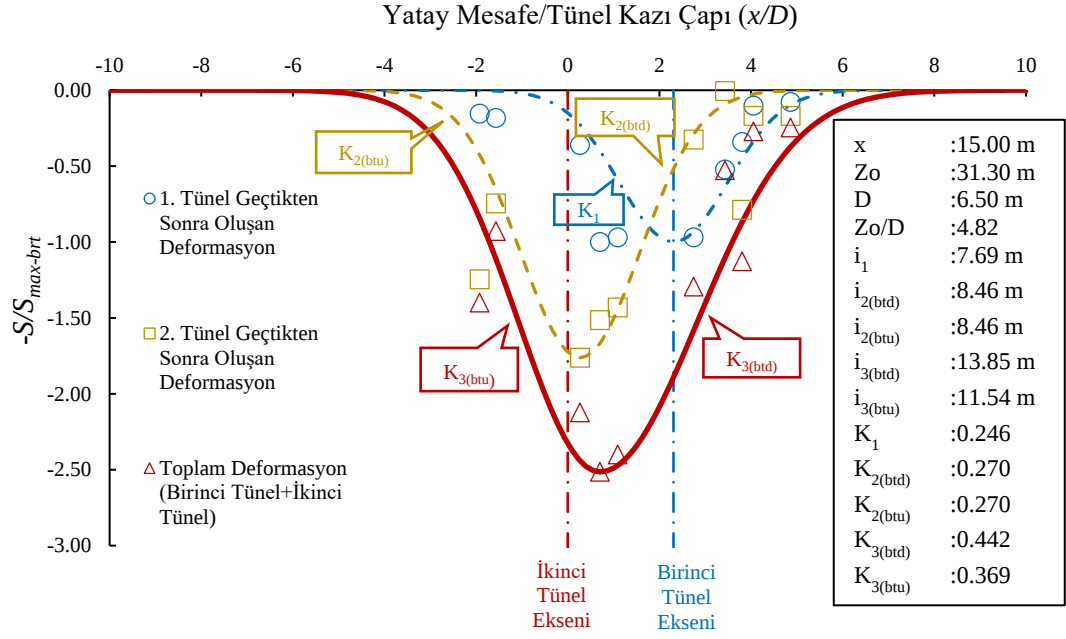
Şekil 4.25 : Km 9+800.00 -9+740.00 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kullanılan kesit hatları.

4.5.4.1 Oturma Teknesi Profilleri

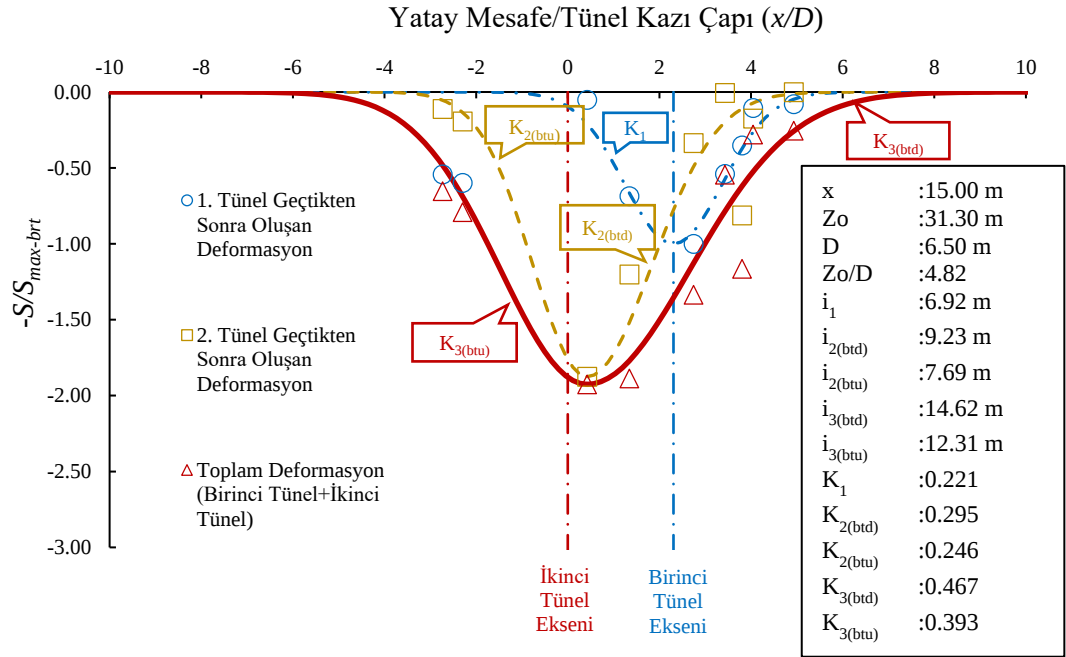
Bu bölgede tünel kazıları sonrası oluşan oturmalar Demir (2018) tarafından da değerlendirilmiştir. Demir (2018), izleme verilerinden elde edilen sonuçlar dâhilinde birinci tünelin geçişi sonrası oluşan tasman eğrisinin (K_1) parametresini 0.29 olarak bulmuştur, ikinci tünelin geçişinden sonra bu değerin (K_3) 0.50 düzeylerine ulaştığını tespit etmiştir. Gauss eğrisinin sağ ve sol kanatları bu çalışma kapsamında ayrı ayrı incelenmemiştir. Aynı kesit araştırmacı tarafından oluşan maksimum yüzey oturma değerlerini karşılaştırmak için sayısal model analizi ile de incelenmiştir. Gerçek saha değerleri ile gerçekleştirilen analizler ile sayısal çözüm sonuçlarının maksimum yüzey oturma değerlerinin kestirimi açısından uyumlu olduğu belirtilmiştir (Demir, 2018).

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen analiz sonucunda, birinci tünel ve ikinci tünel kazıları sonunda oluşan maksimum yüzey oturmalarının sahada ölçülen değerler ile örtüştüğü anlaşılmıştır. Bölgede gerçekleştirilen tünelcilik faaliyetlerinde birinci tünelin kazısında kullanılan makine ikinci tünelin aynasının yaklaşık 70 m önünde ilerletilmiştir. Tünellerin aynı kesit hattından geçişleri arasında yaklaşık 12 günlük bir fark bulunmaktadır.

D₁-D₁' kesiti üzerindeki izleme noktalarında ölçülen oturmalarından hareketle belirlenen oturma teknesinin dönüm noktası (i_1) birinci tünelin geçişi sonrası 7.69 m 'ye ulaşmış, arkadan gelen ikinci tüple beraber artmıştır (Şekil 4.26). Gauss Eğri'sinin dönüm noktası, ikinci tünel eksenine göre sol kanatta ($i_{3(btu)}$) 11.54 m, sağ kanadında ($i_{3(btd)}$) ise 13.85 m düzeylerine ulaşmıştır. Kesitte, önde ilerletilen birinci tünel kazısı için K_1 parametresi 0.246 olarak belirlenmiştir. Ancak, oturma teknesi şeklinin ikinci tünel geçişi sırasında değiştiği görülmüştür. Oturma eğrisinin sağ kanadı ($K_{3(btd)}$) için bu değer 0.442, sol kanadı ($K_{3(btu)}$) için ise 0.369 olarak hesaplanmıştır. Benzer sonuçlar D₂-D₂' kesiti için de elde edilmiştir (Şekil 4.27). EK H'de D₁-D₁' ve D₂-D₂' kesit hatlarına karşılık gelen yüzey oturma noktalarının zamana bağlı değişimleri şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.26 : D₁-D₁' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.

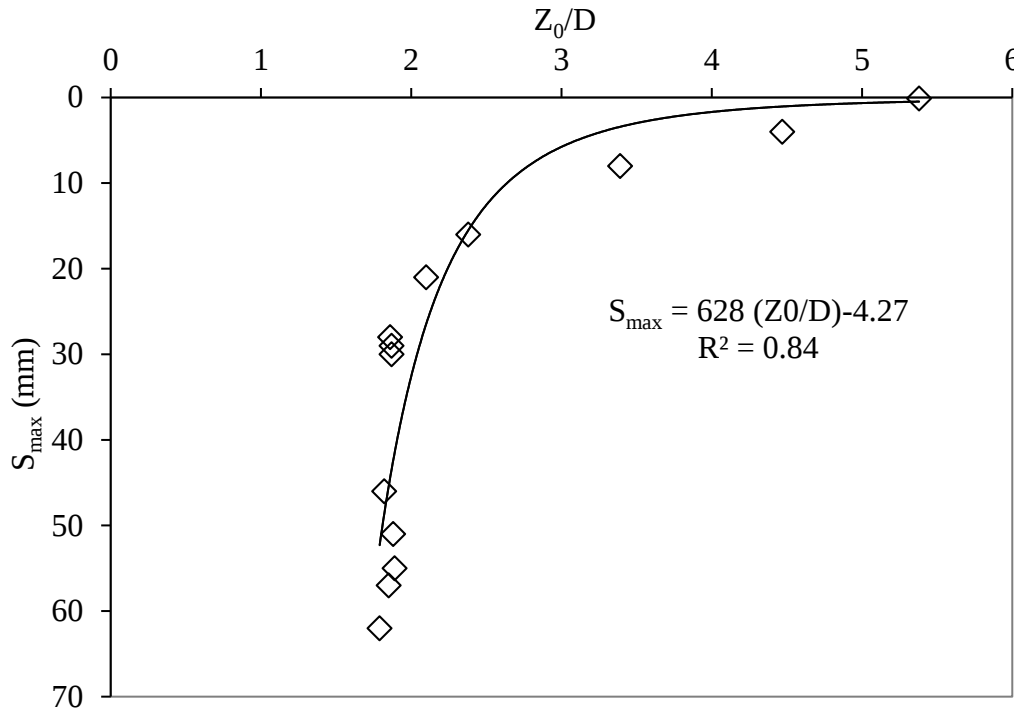


Şekil 4.27 : D₂-D₂' kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.

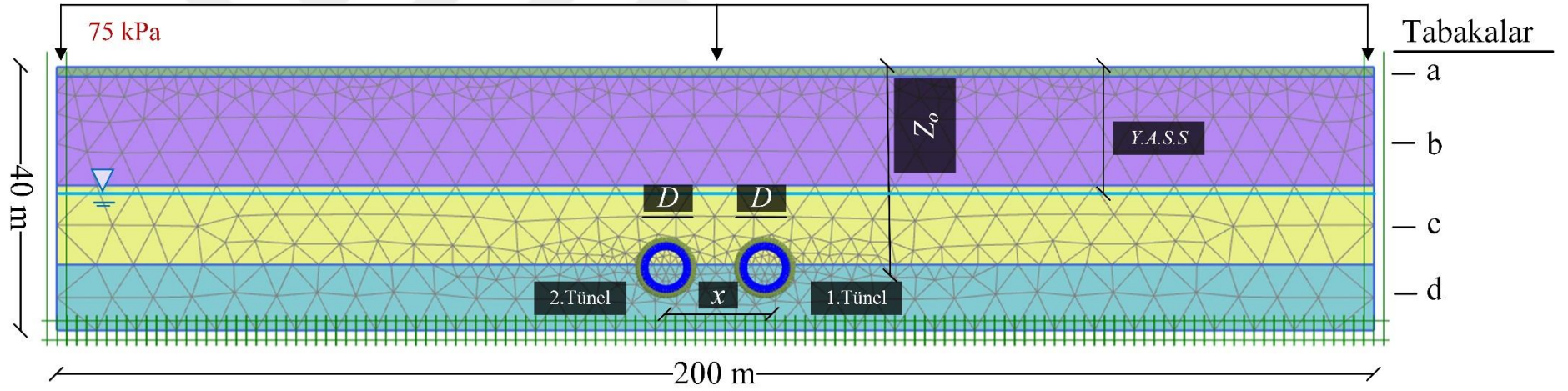
4.5.4.2 Sayısal Analiz

Sonlu elemanlar analizi için D₁-D₁' kesiti, sondajlardan elde edilen yer malzemesi parametreleri (Şekil 4.29, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8) dikkate alınarak sayısallaştırılmıştır. Şekil 4.30'da, bu kesitin *FEM* analizinden elde edilen oturma teknesi en kesiti izleme verileriyle karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda, ilk tünelin

kazısı ve desteklenmesi sonrasında oturma eğrisinin dönüm noktasının (i_1) 16.15 m'ye ulaştığı hesaplanmıştır. İkinci tünelin kazı ve desteklenmesinden sonra bu değer, eğrinin sol ($i_{3(btu)}$) ve sağ ($i_{3(btd)}$) kanatları için sırasıyla 18.46 m ve 19.23 m düzeylerine ulaştığı gözlenmiştir. Birinci tüpün geçişine karşılık gelen oturma teknesi için (K_1) malzeme parametresi 0.516 olarak hesaplanmıştır. Aynı en kesitten ikinci tünelin geçişine karşılık gelen oturma teknesinin sol ($K_{3(btu)}$) ve sağ ($K_{3(btd)}$) kanatlarında ise bu değerlerin sırasıyla 0.590 ve 0.614 düzeylerine ulaştığı belirlenmiştir. D₁-D₁' kesiti hattında gerçekleştirilen sayısal analiz ve izleme verilerinden elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar oluştuğu, izleme verileri ile gerçekleştirilen analizlerde tünel kazıları sonucu oluşan deformasyonların yüzeye daha az yansıdığı görülmektedir. Bu durum Şekil 4.28'den anlaşıldığı üzere, artan tünel eksen derinliğine bağlı olarak yüzeye yansıyan deformasyonların kemerlenme olgusundan dolayı azalmasıyla açıklanmaktadır (Mahmutoğlu, 2011). Demir (2018) tarafından gerçekleştirilen sayısal çözümlemede sadece oluşan maksimum yüzey oturma değerleri incelenmiş olup, yüzey oturma eğrilerinin şeklindeki değişimler değerlendirmeye alınmamıştır. Bundan dolayı, bu tez çalışması ve Demir (2018)'in elde ettiği sonuçlar arasında sayısal çözümler için bir karşılaştırma yapılamamıştır.



Şekil 4.28 : Tünel eksen derinliği ve maksimum yüzey oturması arasındaki ilişki (Mahmutoğlu, 2011'den değiştirilmiştir).



Şekil 4.29 : D₁-D₁' kesitinin FEM modeli.

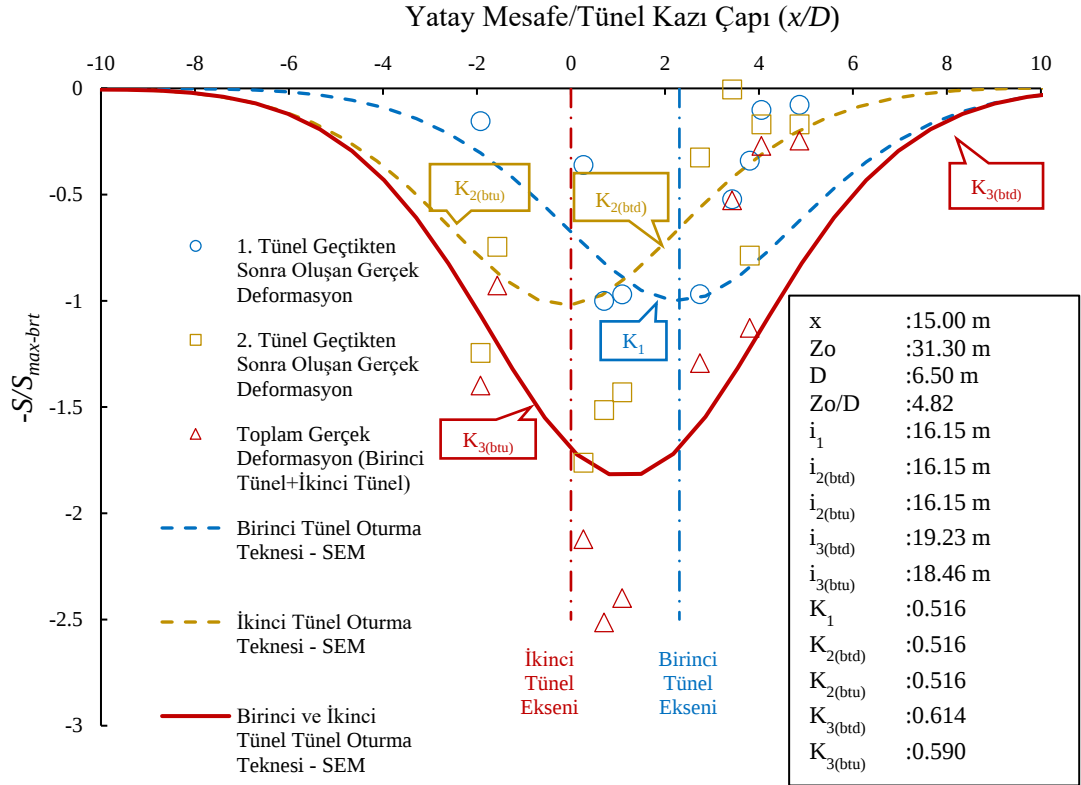
Çizelge 4.7: Sayısal model sınır parametreleri.

KH	x (m)	D (m)	Z_0 (m)	Y.A.S.S (m)	Tüneller	Elemanlar	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı	Gerilme Noktası	Yüzey Yükü	Büzülme Artışı (Contraction Increment)	Boşluk Suyu Basıncı	Tünel Kazıları Arasındaki Bekleme Süresi
D ₁ -D ₁ '	15.0	6.5	31.2	19.0	Birinci Tünel	15- Düğüm Noktalı	1154	9553	13848	75 kPa	1.5 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	1 gün
					İkinci Tünel						1.5 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	12 gün

Çizelge 4.8 : D₁-D₁' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler.

Model Katmanı	Tabaka	Tabaka Kalınlığı (m)	SPT (N_{30})	Plastisite Indisi PI (%)	Drenajsız Makaslama Dayanımı c_u (kPa)	Etketif Kohezyon c' (kPa)	Birim Hacim Ağırlığı		Etketif İçsel Sürtünme Açısı ϕ' ($^{\circ}$)	Elastisite Modülü E^a (kPa)	Poisson Oranı ν	Hidrolik İletkenlik k_s (m/s)
							$\gamma_{doğal}$ (kN/m ³)	γ_{kuru} (kN/m ³)				
Dolgu	a	1.5 ¹	-	-	-	1 ³	17.16 ²	13.14 ²	25 ²	12500 ²	0.35 ²	1x10 ⁻⁷ ²
Sert Kil	b	16.5 ¹	33 ¹	23 ¹	140 ²	14 ⁶	19.50 ¹	16.50 ²	28 ²	56000 ⁴	0.35 ²	1x10 ⁻⁵ ²
Killi Sıkı Kum	c	12 ¹	56 ¹	11 ¹	-	5 ³	19.31 ¹	16.18 ²	38 ²	22720 ⁵	0.30 ²	1x10 ⁻³ ²
Sert Kil	d	Taban ¹	50 ¹	27 ¹	212 ²	21.2 ⁶	19.67 ¹	16.67 ²	26 ²	84800 ⁴	0.35 ²	1x10 ⁻⁷ ²

¹ Saha verilerinden elde edilmiştir
² Bölüm 3.4'de belirtilen yaklaşımlar ile hesaplanmıştır
³ Sonlu elemanlar yazılımının gerçekleştirdiği işlemlerde hesap kolaylığı sağlanması açısından kohezyon değeri atanmıştır
⁴ $E' = c_u 500(0.8)$
⁵ $E_s = 320(N+15)$
⁶ $c' = 0.1 \cdot c_u$ (Sorensen & Okkels, 2013)
Yeraltı Su Derinliği: 20 m



Şekil 4.30 : D₁-D₁' kesiti için FEM ile elde edilen yüzey oturma eğrileri ile izleme verilerinin karşılaştırılması.

4.6 Ataköy-İkitelli Metro Hattı

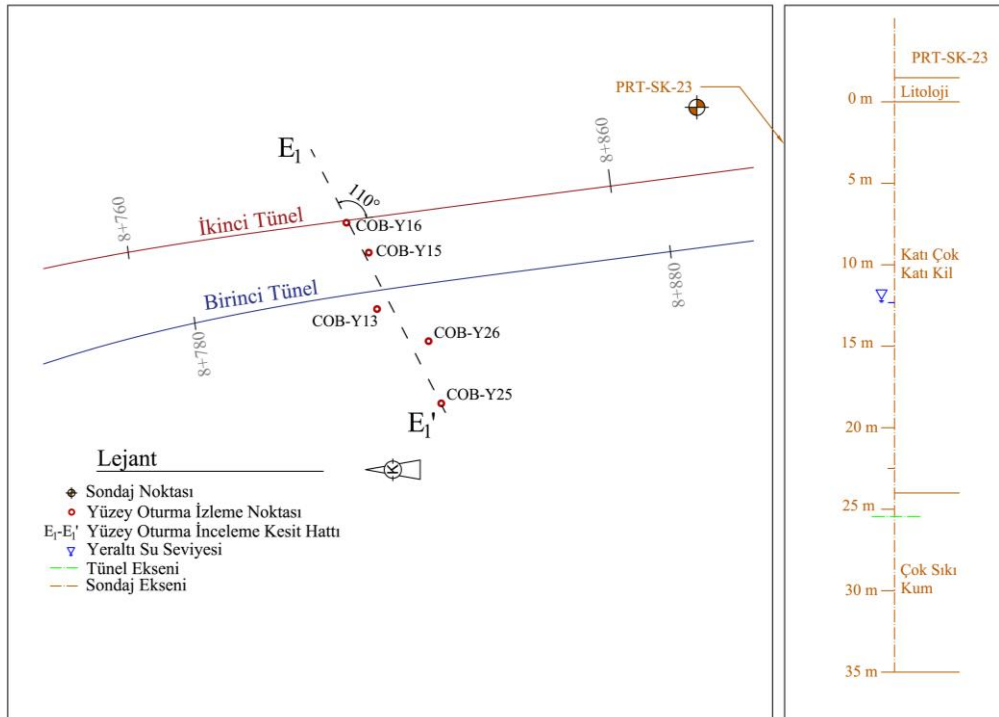
Ataköy-İkitelli Metrosu, yaklaşık 13 km uzunluğunda, 12 adet yolcu istasyonundan oluşan ve en yoğun saatlerde maksimum yolcu taşıma kapasitesi tek yönde 45,000'e ulaşabilecek şekilde planlanmış bir raylı sistem projesidir. Bunun yanında Ataköy'den İkitelli'ye toplam yolculuk süresi 19.5 dakika olarak öngörülmüştür. Ataköy-İkitelli Metro Hattı; Ataköy, Yenibosna, Çobançeşme- Kuyumcukent, İhlas Yuva, Doğu Sanayi, Mimar Sinan, 15 Temmuz, Halkalı Caddesi, Mehmet Akif, Bahariye, Masko, İkitelli Sanayi'den oluşmaktadır. Metro hattı; Avrupa Yakasının yerleşim olarak yoğun nüfusa sahip Bakırköy, Bahçelievler, Bağcılar, Küçükçekmece ve Başakşehir olmak üzere 5 ilçeyi birbirine bağlamaktadır. Metro hattı tünelleri, NATM (9,196 m) ve TBM (16,054 m) yöntemleri kullanılarak açılmaktadır (İBB, 2018). Tüneller kazı çapı 6.57 m olan Herrenknecht marka TBM'ler ile kazılmıştır.

4.6.1 Km 8+760.00 -8+860.00

Hattın bu kesiminin plan görüntüsü Şekil 4.31'de verilmiştir. Bölgede tünel eksenleri arası mesafe 15.0 m ve ortalama tünel eksen derinliği 25.4 m olarak ölçülmüştür.

Yeraltısuyunun yüzeyden derinliği PRT-SK-23 sondajından elde edilen veriye göre 12.3 m civarındadır. Analiz edilen kesitin ve izleme noktalarının konumları ve tünel eksenleri plan üzerinde gösterilmiştir. Şekil üzerinde bu bölgede yapılan sondajın lokasyonu da ayrıca verilmiştir. Ek İ 'de bölgede gerçekleştirilen sondaj çalışmasının logu ve sondajla ilgili deney sonuçları verilmiştir.

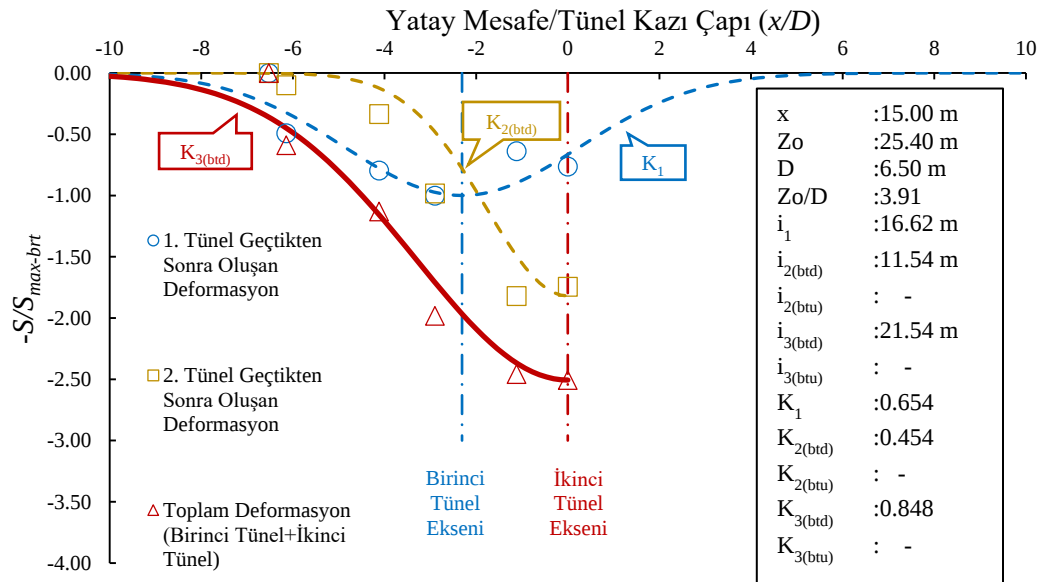
Lokasyonda, tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonları E₁-E₁' kesiti üzerinde incelenmiştir. Yüzey oturma bulonları uygun alanlar seçilerek tesis edilmiş olduğundan incelenen kesit ile tünel güzergâhları arasında açısal farklılıklar oluşmuştur. E₁-E₁' kesiti tünel hattını 110 derecelik açıyla kesmektedir. İnceleme bölgesinden önce birinci tünel, yaklaşık 46 gün sonra ise ikinci tünel geçmiştir. Tüneller üzerindeki örtüyü Güngören Formasyonlarına ait sert kil birimleri ile yapay dolgu oluşturmaktadır.



Şekil 4.31 : Km 8+760.00 - Km 8+860.00 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kullanılan kesit hatları.

4.6.1.3 Oturma Teknesi Profili

Şekil 4.32’de birinci tünelin geçişi sırasında oluşan deformasyonların, ikinci tünel kazısıyla arttığı, maksimum oturmanın meydana geldiği noktanın ikinci tünel eksenine doğru kaydığı anlaşılmaktadır. E₁-E₁’ kesiti boyunca yerleştirilen yüzey izleme bulonu okumalarına göre, ilk tünelin geçişi sonrasında oluşan oturma teknesi dönüm noktası (i_1) 16.62 m iken, bu değer ikinci tünel geçişi sonrasında ($i_{3(btd)}$) 21.54 m ulaşmıştır. Benzer şekilde, birinci ve ikinci tüneller için belirlenen K_1 ve $K_{3(btd)}$ parametre değerleri sırasıyla 0.654 ve 0.848 olarak hesaplanmıştır. İkinci tünel için gerçekleştirilen hesaplamalarda, bölgede tesis edilen oturma bulonlarının kısıtlı olmasından dolayı, yüzey oturma eğrisinin sadece sol kanadı (1.tüpün etkisi alanında olan bölge) için hesaplamalar yapılmıştır.



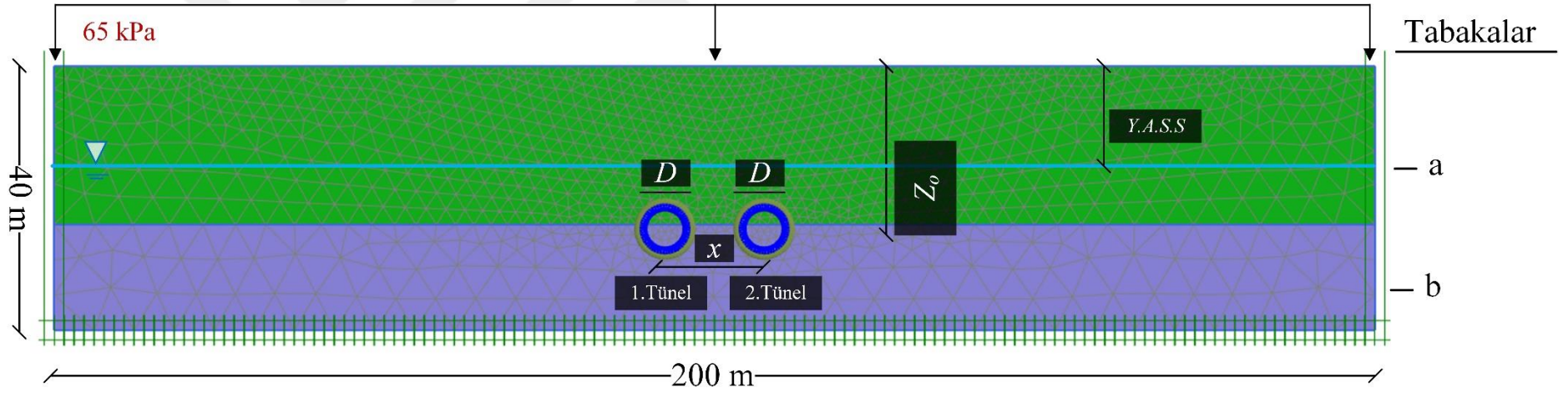
Şekil 4.32 : E₁-E₁’ kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.

4.6.1.4 Sayısal Analiz

Sonlu elemanlar analizi için E₁-E₁’ kesiti sondajlardan elde edilen yer malzemesi parametreleri (Şekil 4.33, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10) dikkate alınarak sayısallaştırılmıştır. Analizin ilk adımında, birinci tüpün kazısı ve destekleme işlemleri tanımlanmıştır. Bu aşamada, 46 gün sonrası için aynı işlem ikinci tüp (arkadan gelen tünel) için de güncellenmiştir. Analizden elde edilen oturma teknesi şekli, izleme verilerinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.34).

Analiz sonucunda, ilk tüpün kazısı ve desteklenmesi sonrasında oturma eğrisinin dönüm noktasının (i_1) 13.08 m'ye ulaştığı hesaplanmıştır. İkinci tüpün kazı ve desteklenmesinden sonra bu değerin, eğrinin birinci t p tarafında ($i_{3(btd)}$) ve ikinci t p tarafında ($i_{3(btu)}$) sırasıyla 16.90 m ve 13.50 m değerlerine ulaştığı gözlenmiştir Birinci tünelin geçişine karşılık gelen oturma teknesi için K_1 parametresi 0.515 olarak hesaplanmıştır. Aynı en kesitten ikinci tünelin geçişine karşılık gelen oturma teknesinin, sağ ($K_{3(btu)}$) ve sol ($K_{3(btd)}$) kanatlarında ise bu değerler sırasıyla 0.531 ve 0.665 düzeylerinde belirlenmiştir.

Sayısal analiz ile izleme verilerinden elde edilen sonuçların kabul edilebilir ölçüde uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Aradaki farkın, izleme verilerinin analizinde kullanılan ölçüm noktalarının tünel güzergahına yerleştirilmesinde açısal farklılıklar oluşmuş olmasından ve değerlendirmeye alınabilen yüzey oturma noktası sayısındaki yetersizlikten kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.33 : E₁-E₁' kesitinin FEM modeli.

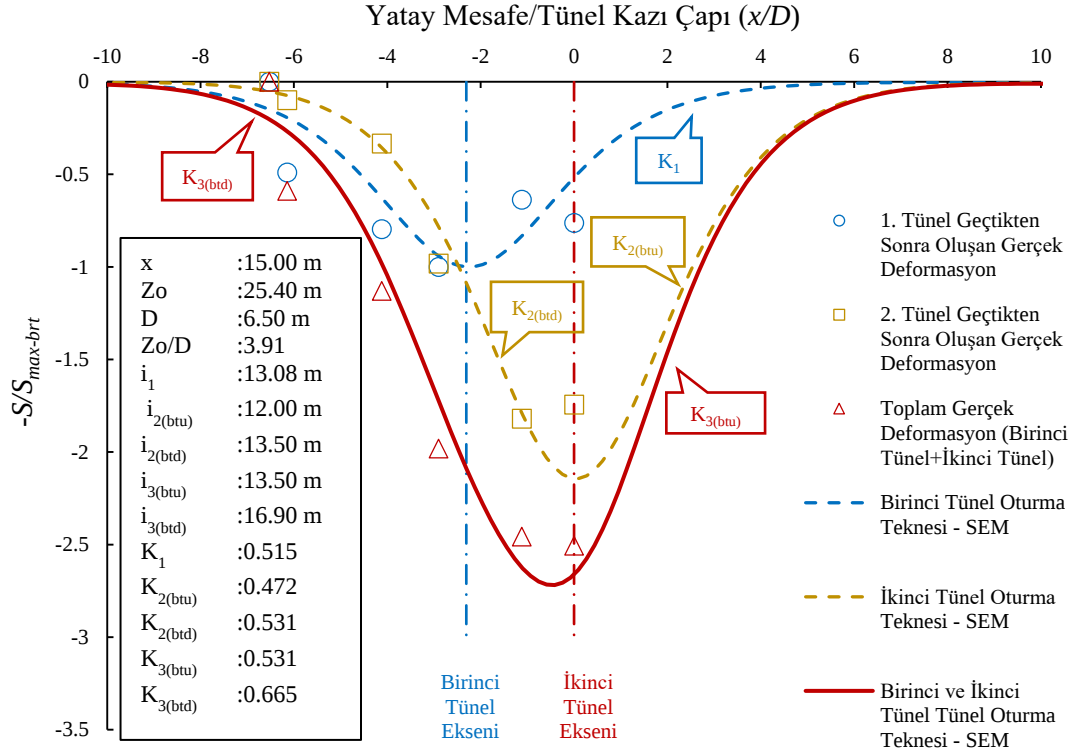
Çizelge 4.9 : Sayısal model sınır parametreleri.

KH	x (m)	D (m)	Z_0 (m)	Y.A.S.S (m)	Tüneller	Elemanlar	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı	Gerilme Noktası	Yüzey Yükü	Büzülme Artışı (Contraction Increment)	Boşluk Suyu Basıncı	Tünel Kazıları Arasındaki Bekleme Süresi
E ₁ -E ₁ '	15.0	6.5	25.4	12.30	Birinci Tünel	15- Düğüm Noktalı	1268	10457	15216	65 kPa	0.5 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	1 gün
					İkinci Tünel						1.0 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	45 gün

Çizelge 4.10 : E₁-E₁' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler.

Model Katmanı	Tabaka	Tabaka Kalınlığı (m)	SPT (N_{30})	Plastisite Indisi PI (%)	Drenajsız Makaslama Dayanımı c_u (kPa)	Efektif Kohezyon c' (kPa)	Birim Hacim Ağırlığı		Efektif İçsel Sürtünme Açısı ϕ' (°)	Elastisite Modülü E^a (kPa)	Poisson Oranı ν	Hidrolik İletkenlik k_s (m/s)
							$\gamma_{doğal}$ (kN/m ³)	γ_{kuru} (kN/m ³)				
Katı-Çok Katı Kil	a	24 ¹	26 ¹	46 ¹	110 ²	11 ⁶	18.0 ¹	15.5 ²	28 ²	44000 ⁴	0.30 ²	5.4x10 ⁻⁶ ¹
Çok Sıkı Kum	b	Taban ¹	>50 ¹	18 ¹	-	5 ³	18.5 ¹	16.0 ²	37 ²	92500 ⁵	0.30 ²	1.0x10 ⁻⁵ ²

¹ Saha verilerinden elde edilmiştir
² Bölüm 3.4'de belirtilen yaklaşımlar ile hesaplanmıştır
³ Sonlu elemanlar yazılımının gerçekleştirdiği işlemlerde hesap kolaylığı sağlanması açısından kohezyon değeri atanmıştır
⁴ $E' = c_u 500(0.8)$
⁵ $E_s = 40000 + 1050N$
⁶ $c' = 0.1 \cdot c_u$ (Sorensen & Okkels, 2013)
Yeraltı Su Derinliği: 12.3 m

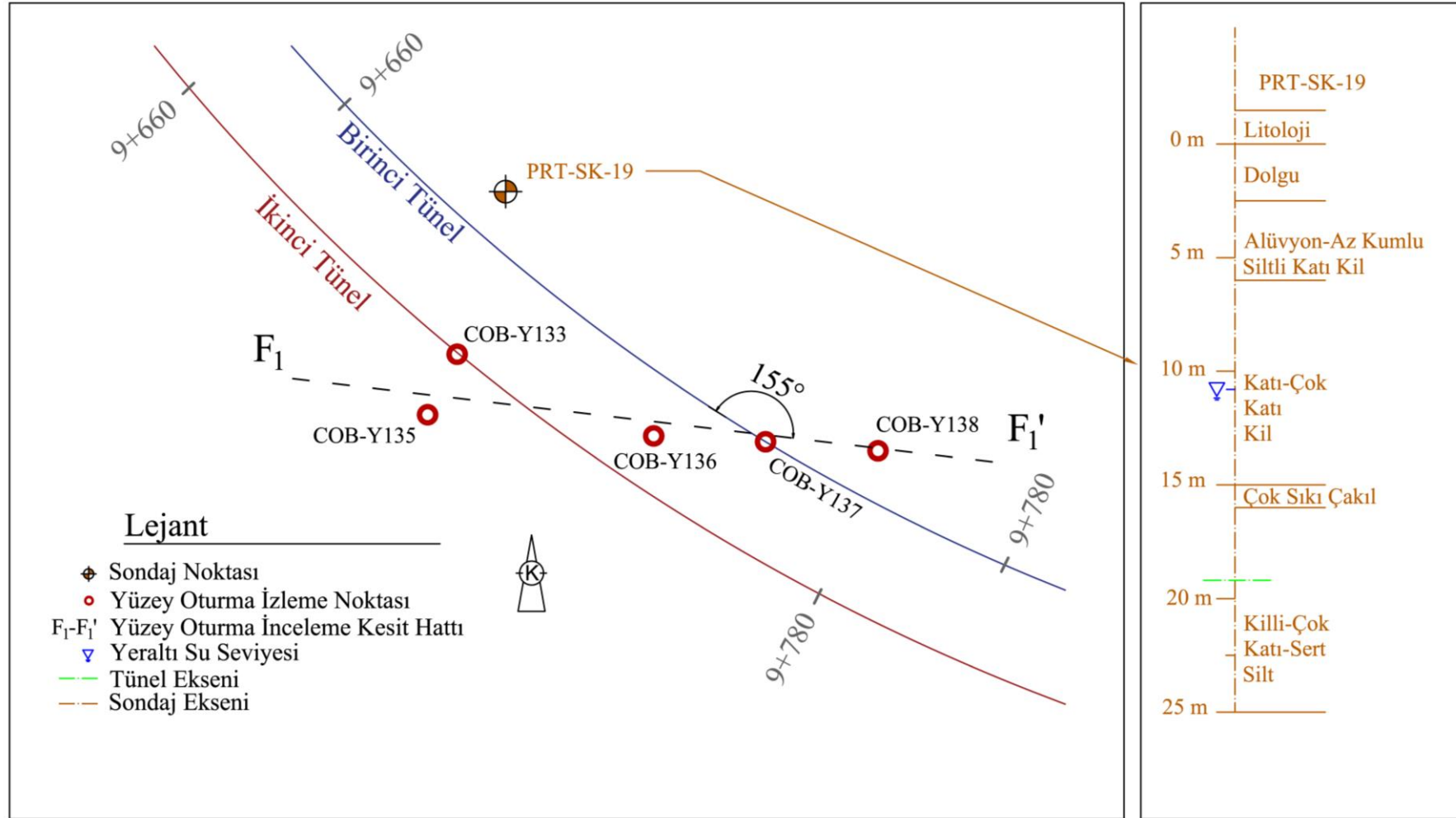


Şekil 4.34 : E₁-E₁' kesiti için *FEM* analizinden elde edilen yüzey oturma eğrileri ile izlemenden elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırılması.

4.6.2 Km 9+660.00 – 9+ 780.00

Hattın bu kesiminin plan görüntüsü Şekil 4.35'te verilmiştir. Bölgede tünel eksenleri arası mesafe 15.60 m ve ortalama tünel eksen derinliği 19.2 m olarak ölçülmüştür. Yeraltısuyunun yüzeyden derinliği PRT-SK-19 sondajından 10.80 m olarak tespit edilmiştir. Analiz edilen kesitin ve izleme noktalarının konumları ve tünel eksenleri plan üzerinde gösterilmiştir. Ek J 'de bölgede gerçekleştirilen sondaj çalışmasının logu ve deney sonuçları verilmiştir.

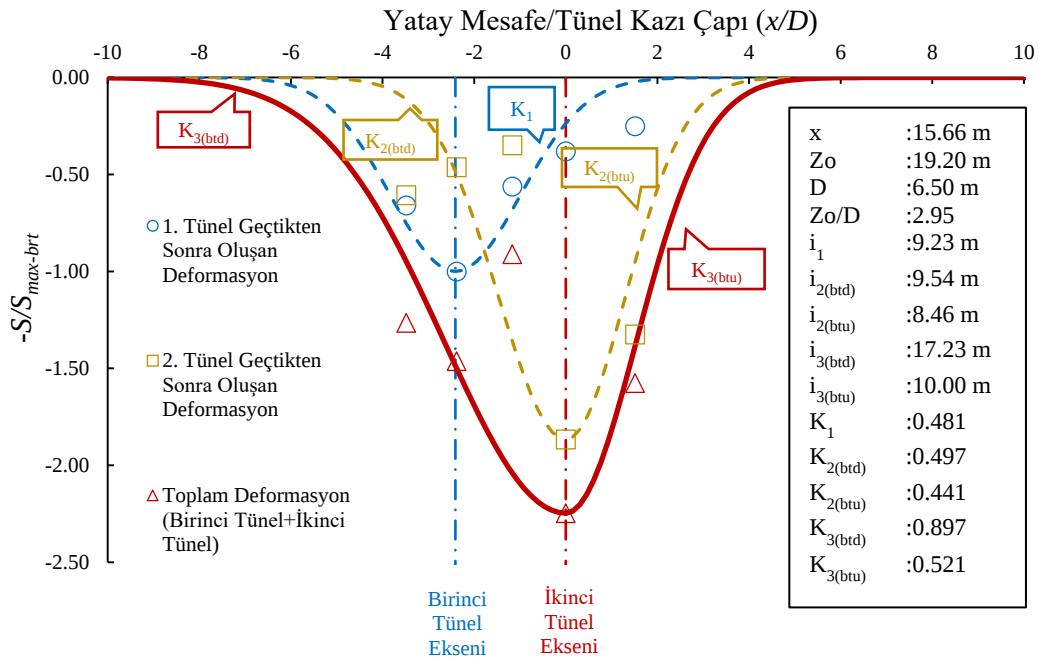
Lokasyonda, tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonları F₁-F₁' kesiti üzerinde incelenmiştir. Yüzey oturma bulonları uygun alanlar seçilerek tesis edilmiş olduğundan incelenen kesitler ile tünel güzergâhları arasında açısallık farklılıklar oluşmuştur. F₁-F₁' kesiti tünel hattını 155 derecelik açıyla kesmektedir. İnceleme bölgesinden önce birinci tünel, yaklaşık 20 gün sonra ise ikinci tünel geçmiştir. Tüneller üzerindeki örtüyü Güngören Formasyonuna ve Alüvyona ait katı killi birimler ile yapay dolgu oluşturmaktadır.



Şekil 4.35 : Km 9+660.00 - Km 9+ 780.00 arasında izleme verilerinin ve sonlu eleman analizinin karşılaştırılması için kullanılan kesit hatları.

4.6.2.1 Oturma Teknesi Profili

Şekil 4.36’ da F₁-F₁’ kesit hattı üzerinde oluşan oturma teknesi profili belirtilmiştir. Profil incelendiğinde, birinci tünelin geçişi sonrası oluşan oturma eğrisinin dönüm noktasının (i_1) 9.23 m’ye ulaştığı gözlenmiştir. Aynı kesit hattından, ikinci tünelin geçişi sonrası oluşan eğride ise eğrinin sağ kanadında ($i_{3(btu)}$) dönüm noktası değerinin 10.0 m’ye önde ilerletilen birinci tünel tarafında ($i_{3(btd)}$) ise 17.23 m düzeylerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu kesitte, önde ilerletilen birinci tünel kazısı için K_1 parametresi 0.481 olarak belirlenmiştir. Ancak, oturma teknesi şeklinin ikinci tünel geçişi sırasında değiştiği görülmüştür. Oturma eğrisinin sol kanadı ($K_{3(btd)}$) için bu değer 0.897, sağ kanadı ($K_{3(btu)}$) için ise 0.521 olarak hesaplanmıştır. Eğrinin önde ilerletilen tünel tarafında yatık olması, her iki tünelin etkileşim alanının kesişmesi ve zemindeki örselenme ile açıklanabilir.



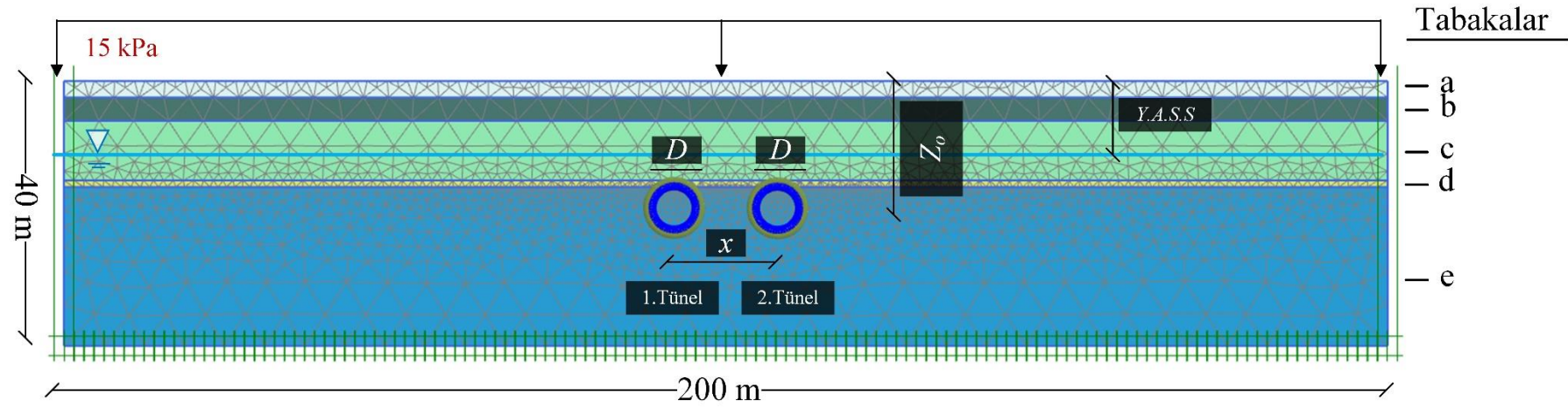
Şekil 4.36 : F₁-F₁’ kesitinde oluşan yüzey oturma teknesi.

4.6.2.2 Sayısal Analiz

Sonlu elemanlar analizi için F₁-F₁’ kesiti sondajlardan elde edilen yer malzemesi parametreleri (Şekil 4.37, Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12) dikkate alınarak sayısallaştırılmıştır. Analizin ilk adımında, birinci tünel kazısı ve destekleme işlemleri tanımlanmıştır. Bu aşamada, 20 gün sonrası için aynı işlem ikinci tünel (arkadan gelen tünel) için de güncellenmiştir. Analizden elde edilen oturma teknesi şekli, izleme

verilerinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.38). Analiz sonucunda, ilk tünelin kazısı ve desteklenmesi sonrasında oturma eğrisinin dönüm noktasının (i_1) 9.69 m'ye ulaştığı hesaplanmıştır. İkinci tünelin kazı ve desteklenmesinden sonra bu değerin, eğrinin sol ($i_{3(btd)}$) ve sağ ($i_{3(btu)}$) kanatları için sırasıyla 15.38 m ve 8.46 m düzeylerine ulaştığı gözlenmiştir Birinci tünelin geçişine karşılık gelen oturma teknesi için K_1 parametresi 0.505 olarak hesaplanmıştır. Aynı en kesitten ikinci tünelin geçişine karşılık gelen oturma teknesinin, sağ ($K_{3(btu)}$) ve sol ($K_{3(btd)}$) kanatlarında ise bu değerler sırasıyla 0.441 ve 0.801 belirlenmiştir.

Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar ile izleme verileri karşılaştırıldığında, *FEM* analizinin bu lokasyondaki oturmaların kestirimi için de kullanılabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.37 : F₁-F₁' kesitinin FEM modeli.

Çizelge 4.11 : Sayısal model sınır parametreleri.

KH	x (m)	D (m)	Z_0 (m)	Y.A.S.S (m)	Tüneller	Elemanlar	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı	Gerilme Noktası	Yüzey Yükü	Büzülme Artışı (Contraction Increment)	Boşluk Suyu Basıncı	Tünel Kazıları Arasındaki Bekleme Süresi
F ₁ -F ₁ '	15.7	6.5	19.2	10.8	Birinci Tünel	15- Düğüm Noktalı	1238	10221	14856	15 kPa	0.6 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	1 gün
					İkinci Tünel						1.1 %	Tünel İçi Kuru (Cluster dry)	20 gün

Çizelge 4.12 : F₁-F₁' kesitinin sayısal analizinde kullanılan jeomekanik özellikler.

Model Katmanı	Tabaka	Tabaka Kalınlığı (m)	SPT (N_{30})	Plastisite Indisi PI (%)	Drenajsız Makaslama Dayanımı c_u (kPa)	Efektif Kohezyon c' (kPa)	Birim Hacim Ağırlığı		Efektif İçsel Sürtünme Açısı ϕ' (°)	Elastisite Modülü E^a (kPa)	Poisson Oranı ν	Hidrolik İletkenlik k_s (m/s)
							$\gamma_{doğal}$ (kN/m ³)	γ_{kuru} (kN/m ³)				
Dolgu	a	2.5 ¹	12 ¹	-	-	1 ²	19.1 ¹	16.1 ²	25 ²	15000 ²	0.35 ²	1x10 ^{-7 2}
Alüvyon-Katı Kil	b	3.5 ¹	13 ¹	44 ¹	55 ²	5 ⁶	18.3 ¹	15.7 ²	28 ²	22000 ⁴	0.30 ²	1x10 ^{-7 2}
Katı Çok Katı Kil	c	9.0 ¹	21 ¹	33 ¹	94 ²	9.4 ⁶	16.5 ¹	13.7 ²	30 ²	37600 ⁴	0.30 ²	1x10 ^{-7 2}
Çok Sıkı Çakıl	d	1.0 ¹	>50 ¹	-	-	5 ²	18.2 ¹	18.1 ²	38 ²	67200 ⁵	0.35 ²	1x10 ^{-6 2}
Killi- Çok Katı – Sert Silt	e	Taban ¹	35 ¹	45 ¹	190 ²	19 ⁶	18.5 ¹	16.0 ²	27 ²	76000 ⁴	0.30 ²	1x10 ^{-7 2}

¹ Saha verilerinden elde edilmiştir

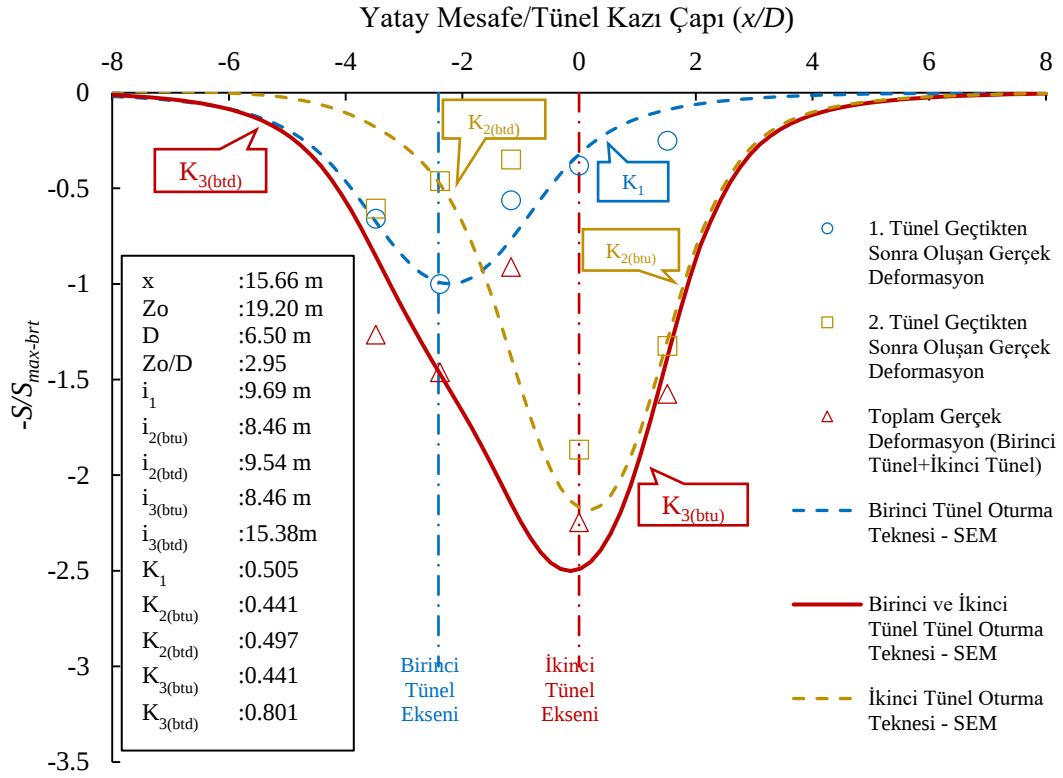
² Bölüm 3.4'de belirtilen yaklaşımlar ile hesaplanmıştır

³ Sonlu elemanlar yazılımının gerçekleştirdiği işlemlerde hesap kolaylığı sağlanması açısından kohezyon değeri atanmıştır

⁴ $E' = c_u 500(0.8)$

⁵ $E_s = 1200(N+6)$

⁶ $c' = 0.1 \cdot c_u$ (Sorensen & Okkels, 2013)
Yeraltı Su Derinliği: 10.8 m



Şekil 4.38 : F_1 - F_1' kesitinde *FEM* ile elde edilen yüzey oturma eğrileri ile izleme verilerinin karşılaştırılması.



5. İKİZ TÜNEL KAZILARINA BAĞLI GELİŞEN YÜZEY DEFORMASYONLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde; birbirlerine ve yüzeye göre farklı konumda açılan ikiz tünellerin yüzey oturumları üzerindeki etkileri sayısal yöntemler kullanılarak teorik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, zayıf zemin koşullarında açılan ikiz tünel kazılarını yansıtabilecek şekilde bir seri kavramsal model oluşturulmuştur. Modellerde kullanılan yer malzemesi parametreleri tez dahilinde incelenen sahalarda karşılaşılan jeolojik ortamlarla uyumlu olacak şekilde literatürden seçilmiştir.

Çizelge 5.1’de seçilen kavramsal model parametrelerinin, literatürden seçilen farklı araştırmacılar tarafından zayıf zemin olarak nitelendirilen yer malzemesi parametreleri ile karşılaştırılmaları belirtilmiştir.

Aşağıda belirtilen aşamalara göre analizler gerçekleştirilmiştir;

1. İkiz tünel kazılarının zamana bağımlı olarak yeraltısuyu seviyesi üzerindeki etkisi Rocscience RS2 yazılımı aracılığıyla kavramsal olarak irdelenmiştir.
2. Birbirlerine ve yüzeye göre farklı konumlarda bulunan aynı çaplarda açılan ikiz tünellerin yüzeyde oluşturduğu oturma teknesi profili Plaxis 2B (iki boyutlu) yazılımı aracılığıyla kavramsal olarak incelenmiştir.
3. Jeolojik ortamın elastisite modülündeki değişimin yüzey oturumları üzerindeki etkisi iki boyutlu analiz ile kavramsal olarak incelenmiş bu sonuçlar ampirik yaklaşımlar ile karşılaştırılmıştır.
4. Plaxis 3B Tunnel (üç boyutlu) yazılımı aracılığıyla sıralı açılan tünellerin kazı adımlarının, yüzey oturma tekne şekli ve tünel kazı güzergahları üzerindeki etkisi kavramsal olarak incelenmiştir.
5. İki boyutlu ve üç boyutlu analizler, bir örnek model üzerinden karşılaştırılmış ve analiz sonuçlarındaki farklılıklar açıklanmıştır.

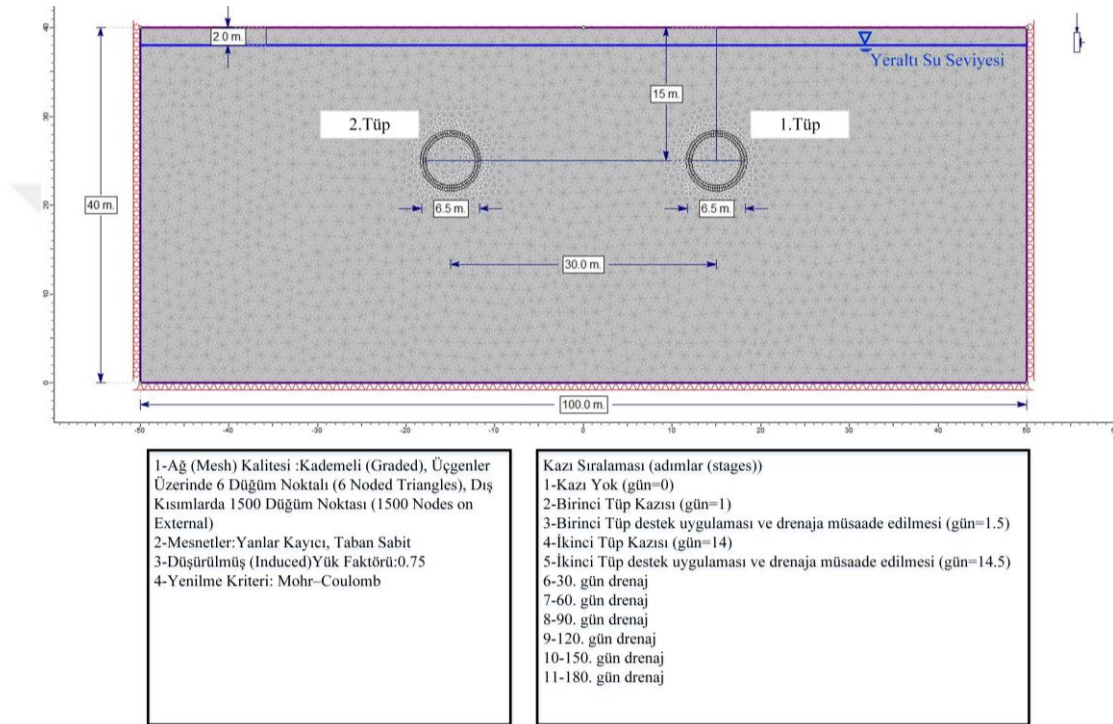
Çizelge 5.1 : Kavramsal model yer malzemesi parametrelerinin literatürden seçilen zayıf zemin parametreleri ile karşılaştırılması.

Yer malzemesi Parametreleri	Kavramsal Modelde Kullanılan Değerler		Literatürden Seçilen Referans Değerler						
	Bölüm 5 altında kullanılan değerler	Mahmutoğlu, 2011 (Km 0+850 – 1+000 (Esenler))	Mahmutoğlu, 2011 (Km 1+850 – 2+100 (Çinçin))	Mahmutoğlu, 2011 (Km 4+250 – 4+460 (Tavukçudere))	Moeinossadat ve Ahangari, 2019	Işık ve diğ, 2004	Elwood ve Martin, 2015	Wang ve diğ, 2019	Burland ve diğ, 2001
Zemin birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	18.7	17.0-20.5	17.5-22.5	19.2-22.1	19.0	17.5-19.2	20.5	17.2-19.3	18.0-20.5
Elastisite Modülü (kPa)	50000	-	-	-	15000- 100000	-	120000	-	-
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (kPa)	-	105-484	120-294	128-157	-	55.9-440.3	236	2640-7680	
Poisson oranı	0.300	-	-	-	-	-	0.330-0.490	-	
Kohezyon (kPa)	85	50-200	60-140	43-78	20-40	117.7-269.7	37.5	10-27	0-12
Sürtünme açısı (°)	20	5-21	2-11	2	27-38	1-5	50	3-17	24-28
LL (%)	50	42-68	31-56	47-77	-	33-70	35	32-36.8	54-85
PL(%)	17	13-30	7-25	24-33	-	22-36	15	18.4-20.9	20-30
PI(%)	33	29-38	24-31	23-44	-	12-40	19	13.6-15.9*	25-50
Zemin Sınıfı (USCS'e göre)	CL-CH	-	-	-	ML,CL,GML,GCL, GWM,GML	CH-CL-MH-SC			
Litoloji	Kil	Sıkı Kum ve Sert Kil	İnce daneli sıkı kum- sert kil	Çok sıkı kum-sert kil	Silt-Kil-Çakıl	Kil- Silt-Killi Kum	Buzul tili	Siltli kil	Kil

*PI=LL-PL

5.1 İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Gelişen Yeraltısuyu Seviyesi Değişimi

İkiz tünel kazılarına bağlı gelişen yeraltı su seviyesi düşüm şeklini tespit edebilmek amacıyla Şekil 5.1’de belirtilen model Rocscience RS2 yazılımıyla zamana bağlı olarak modellenmiştir. Modelde, güncel tünelcilik faaliyetlerinde hayata geçirilen sızdırmazlık çalışmalarının (tünel içi geçirimsizlik uygulamaları, geri enjeksiyon ile sızdırmazlığın sağlanması vb.) uygulanmadığı ve tüpler içerisine yeraltısuyunun uzun bir süre drene olduğu varsayılmıştır.



Şekil 5.1 : Yeraltısuyu düşün çalışması model geometrisi ve sınır koşulları.

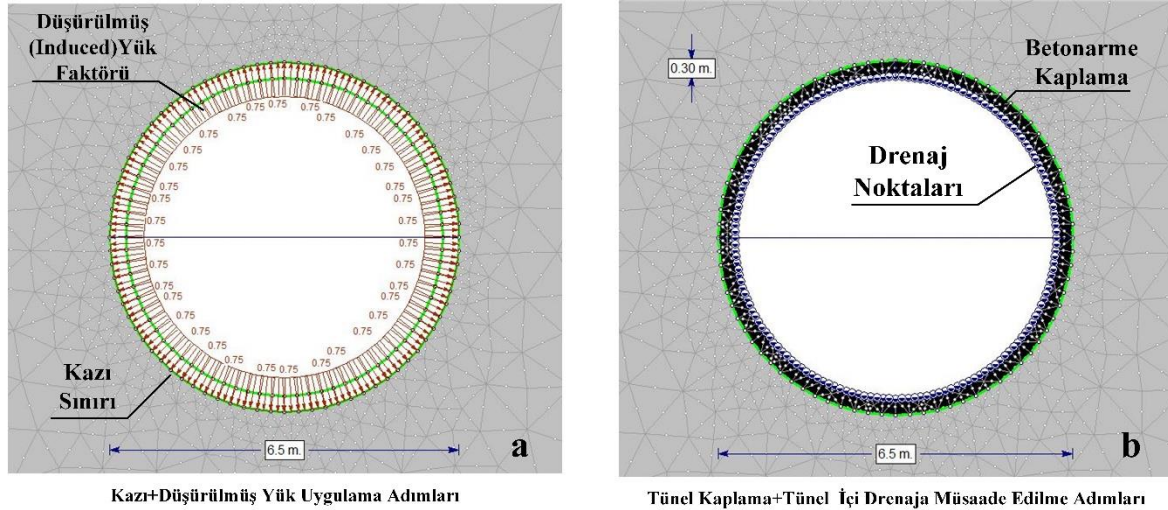
Modelleme çalışması aşağıda belirtilen sırayla gerçekleştirilmiştir;

1. Model geometrisi ve sınır koşulları belirlenmiştir.
2. Çizelge 5.2’de belirtilen yer malzemesi ve beton kaplama mekanik değerleri modele aktarılmıştır. Yer malzemesi jeomekanik parametreleri, kavramsal modeli simule edebilmek adına zayıf zemin şartlarını yansıtacak şekilde literatürden seçilmiştir. Beton kaplama mekanik parametreleri İstanbul metrolarında kullanılan tipik betonarme segment profilini yansıtacak şekilde seçilmiştir.
3. Tünel beton kaplamasının hidrolik iletkenlik katsayısı $k_s=1 \times 10^{-9}$ (m/s) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.2 : Modele işlenen yer malzemesi ve beton kaplama mekanik değerleri.

Birim	Efektif Kohezyon c (kPa)	Birim Hacim Ağırlık γ_n (kN/m ³)	Efektif Makaslama Dayanımı ϕ (°)	Elastisite Modülü E (kPa)	Poisson Oranı ν	Hidrolik İletkenlik k_s (m/s)
Kil	11	20	30	44000	0.300	1×10^{-7}
Beton Kaplama	10.5	25	35	3.5×10^7	0.150	1×10^{-9}

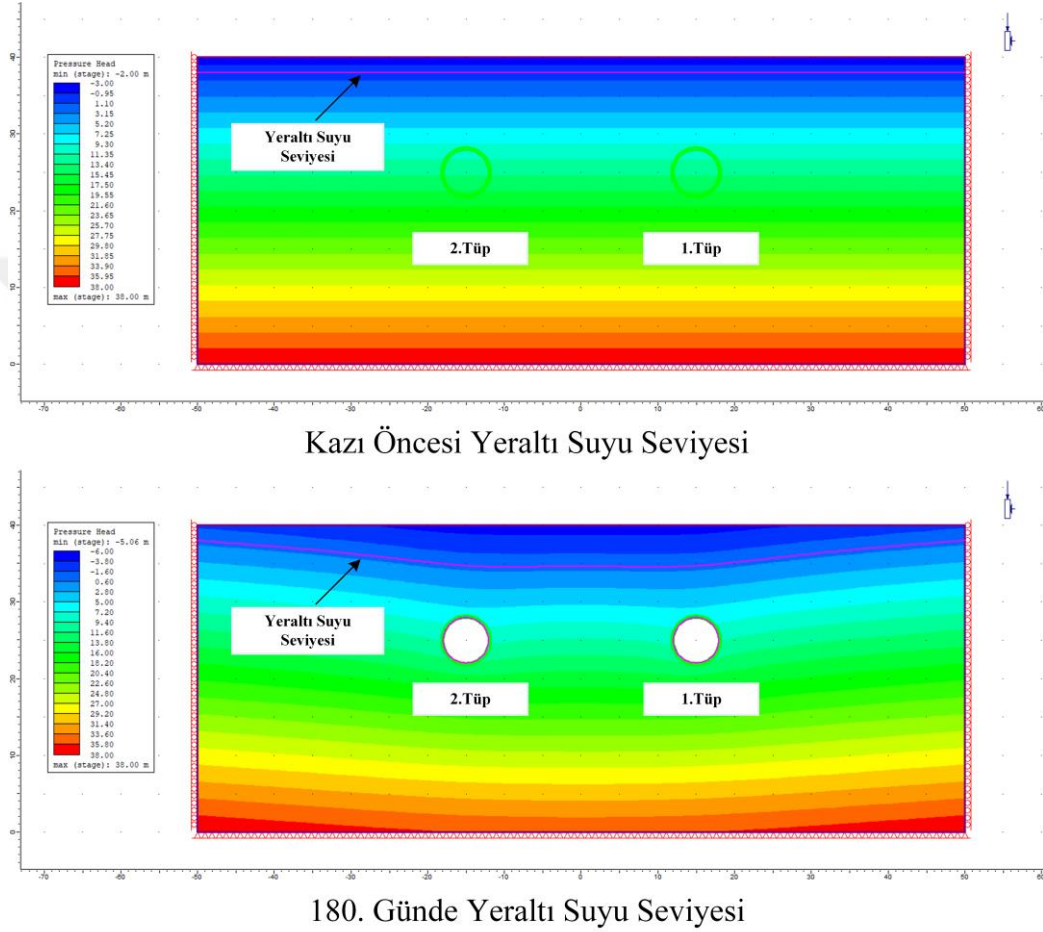
4. Kazı gerçekleştirilecek noktada maksimum hidrostatik basıncı elde etmek adına, yeraltısuyu seviyesi topoğrafik kottan 2 m aşağıda olacak şekilde modele işlenmiştir.
5. Birinci tütün kazısı gerçekleştirilmiştir. Tüp kazısından sonra tünel kazı çeperinde oluşan gerilim boşalmasının modellenmesi için, jeolojik ortamdan kazı çeperine doğru oluşan gerilimin 0.75 katı, azaltılmış yük faktörü (induced load) şeklinde ters yönde uygulanmıştır (Şekil 5.2(a)).
6. Gerçek saha uygulamasının modellenenebilmesi için birinci tüp kazı işlemi ve beton kaplama montajı arasında 0.5 günlük boşluk oluşturulmuştur. Beton kaplama iç yüzeyi drenaja uygun şekle getirilmiş ve yeraltısuyunun tünele drene olmasına müsaade edilmiştir (Şekil 5.2(b)).



Şekil 5.2 : Tüp kazısı, destekleme ve drenaj adımları.

7. Birinci tütün kazısından 12.5 gün sonra aynı işlemler ikinci tüp için de uygulanmıştır.
8. 30. gün sonunda yeraltısuyu seviyesindeki düşüm hesaplanmıştır.

9. 60. gün sonunda yeraltısuyu seviyesindeki düşüm hesaplanmıştır.
10. 90. gün sonunda yeraltısuyu seviyesindeki düşüm hesaplanmıştır.
11. 120. gün sonunda yeraltısuyu seviyesindeki düşüm hesaplanmıştır.
12. 150. gün sonunda yeraltısuyu seviyesindeki düşüm hesaplanmıştır.
13. 180. gün sonunda yeraltısuyu seviyesindeki düşüm hesaplanmıştır (Şekil 5.3).



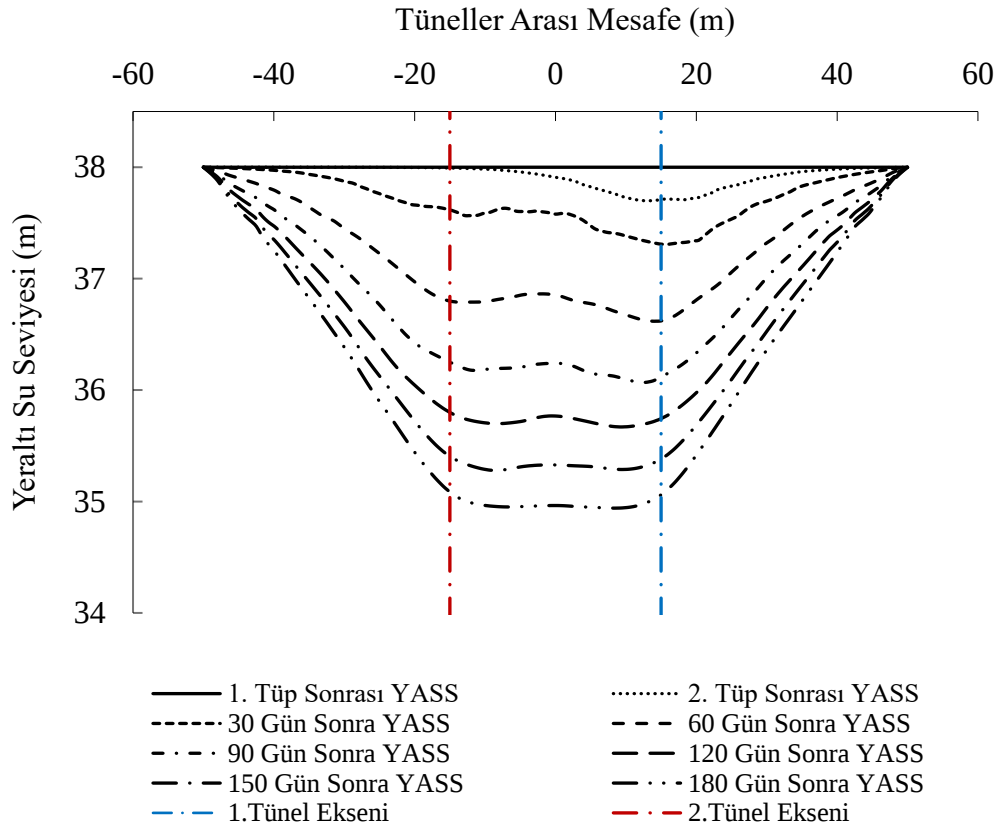
Şekil 5.3: 180 gün sonra yeraltısuyu seviyesi değişimi.

Şekil 5.4 üzerinde tüp kazılarına bağlı gelişen zaman bağımlı yeraltı suyu değişimi gösterilmiştir.

Modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- 1.tüp kazısından sonra, yeraltısuyu tüp içerisine drenaja başlamakta ve yeraltı suyu seviyesinde düşüm oluşmaktadır. Kazı boşluğuna doğru drene olan yeraltı suyu 1. Tüp üzerinde Gauss eğri şekline benzer bir şekil ile alçalmaktadır.

- 2.tüp kazısından hemen sonra, yeraltısuyu alçalım şekli bir süre daha 1. Tüp üzerindeki konsantrasyonunu korumaktadır.
- İki tüpün de drenaja devam ettiği ilerleyen zaman dilimlerinde, yeraltısuyu düşüm miktarının tüpler üzerinde eşit seviyeye geldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.4 : Kazı ve zaman bağımlı değişen yeraltı suyu seviyesi.

5.2 Tünel Arası Ara Mesafe ve Eksen Derinlikleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Özellikle çoklu yeraltı kazılarında oluşturulan boşlukların birbirlerine göre ara mesafesi, iki tünel arasındaki etkileşimi önemli ölçüde kontrol etmektedir. Bu etkileşim, yüzeye yansıyan deformasyon değerleri üzerinde de belirleyici olmaktadır. Tünel arası mesafe ve tünel eksen derinlikleri arttığı zaman, yüzey oturmalarının azaldığı, tam tersi durumda ise arttığı literatür ve saha izleme çalışmalarından elde edilen verilerle doğrulanmaktadır (Fang ve diğ, 1994; Nyren, 1998; Hunt, 2005; Divall, 2013; Divall ve Goodey, 2015; Fagnoli ve diğ, 2015; Fang ve diğ, 2016; Divall ve diğ, 2017; Wan ve diğ, 2017; Wang ve diğ, 2019; Zhang ve diğ, 2019).

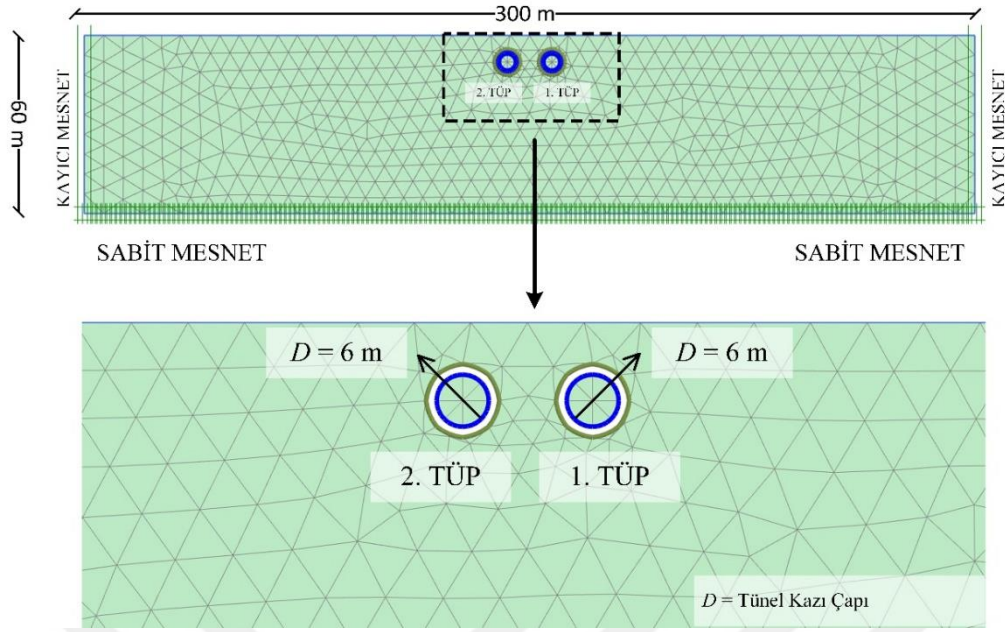
5.2.1 İki Boyutlu (2B) Sayısal Model Analizi

Plaxis 2B (iki boyutlu) sonlu elemanlar yazılımı aracılığıyla Çizelge 5.3'te belirtilen yer malzemesi parametreleri Şekil 5.5'te belirtilen genelleştirilmiş modele uygulanmıştır.

Parametreler zayıf zemin koşullarının hakim olduğu killi bir jeolojik ortamı yansıtacak şekilde kavramsal modeli oluşturmak için literatürden seçilmiştir. Bu model çalışmasında yeraltısuyunun etkisi irdelenmemektedir, bu sebepten dolayı modele Y.A.S.S eklenmemiştir.

Çizelge 5.3 : Plaxis 2B model çalışmasında esas alınan yer malzemesi parametreleri.

Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin
Zemin birim hacim ağırlığı $\gamma_{unsat} / \gamma_{sat}$	13.5 / 18.7 kN/m ³
Referans gerilme şekil değiştirme sekant modülü E_{50}^{ref}	5x10 ⁴ kPa
Referans gerilme şekil değiştirme ödometre elastisite modülü E_{oed}^{ref}	5x10 ⁴ kPa
Referans gerilme şekil değiştirme boşaltma tekrar yükleme E_{ur}^{ref}	1.626 x10 ⁴ kPa
Poisson oranı $\nu_{ur}^{(nu)}$	0.300
Referans gerilme p^{ref}	100 kPa
Sükunetteki toprak basıncı K_n^{nc}	0.658
m (power)	0.5
Kohezyon c_{ref}	85 kPa
Sürtünme açısı ϕ	20
Dilatasyon açısı ψ	0



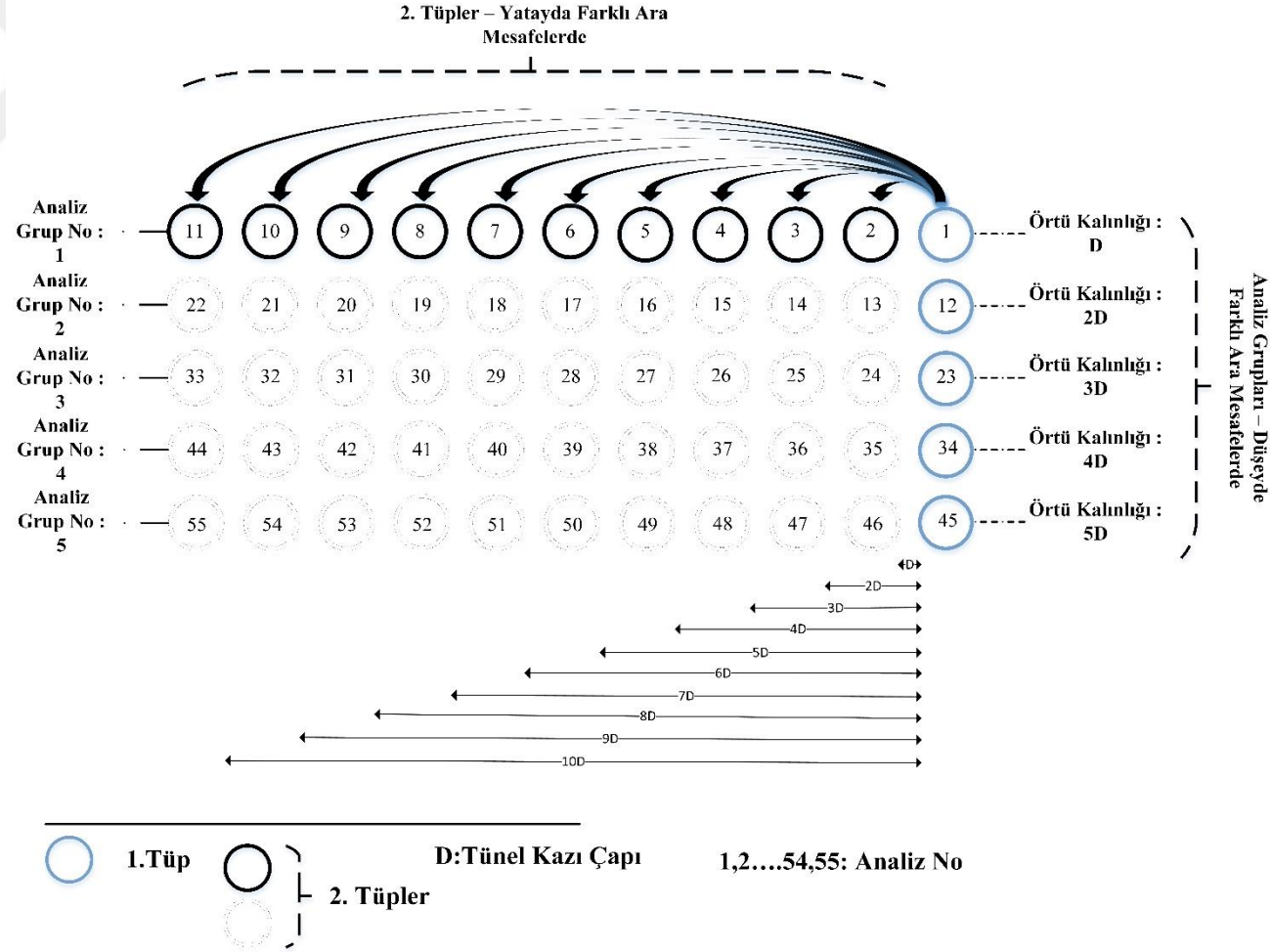
Şekil 5.5 : Plaxis 2B genelleştirilmiş model.

Çizelge 5.4'te model çalışmasına uygulanan tünel kaplamasına ait mekanik parametreler belirtilmiştir. Kaplama parametrelerinde İstanbul metrolarında kullanılan tipik betorname segment elemanlarını yansıtacak değerler seçilmiştir.

Çizelge 5.4 : Plaxis 2B (iki boyut) model çalışmasına uygulanan tünel kaplamasına ait mekanik parametreler.

Parametre	İsim	Değer
Davranış şekli	<i>Elastik</i>	-
Elastisite Modülü	E_{beton}	35 GPa
Eşdeğer kalınlık	$d_{segment}$	0.35 m
Birim Ağırlık	w	25 kN/m ³
Poisson oranı	ν_{beton}	0.150

Modelleme çalışması sırasında ikiz tünellerin farklı örtü kalınlıklarında ve birbirlerine göre farklı konumlardaki pozisyonları incelenmiştir. Şekil 5.6'da model çalışmasında izlenen yol şematik olarak belirtilmiştir. Tüm analiz gruplarında tünel kazı çapları (D) 6 m olarak seçilmiştir. Birinci tüp (sağ tünel) konum olarak analiz grubu içerisinde sabit tutularak, ikinci tüpler (sol tüneller) sırasıyla birinci tüp ile arasında D , $2D$, $3D$, $4D$, $5D$, $6D$, $7D$, $8D$, $9D$ ve $10D$ mesafe olacak şekilde uzaklaştırılarak kazı işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.6 : Kavramsal modelleme için geometrik parametre değişimlerinin şematize gösterimi.

Çizelge 5.5'te Analiz gruplarında kullanılan örtü kalınlığı, tüneller arası mesafe ve eksen derinliği/tünel çapı (Z_0/D) kombinasyonları belirtilmiştir.

Çizelge 5.5 : Tüneller arası farklı geometriler için analiz girdileri.

Analiz Grup No	Analiz No	Tünel Çapı (D) (m)	Tünel Çeperleri Arası Mesafe (m)		Örtü Kalınlığı (H) (m)		Eksen Derinliği (Z_0) (m)	Z_0/D
1	1	6	Sadece 1.Tüp (Sağ)		6	1 D	9	1.5
	2	6	6	1 D	6	1 D	9	1.5
	3	6	12	2 D	6	1 D	9	1.5
	4	6	18	3 D	6	1 D	9	1.5
	5	6	24	4 D	6	1 D	9	1.5
	6	6	30	5 D	6	1 D	9	1.5
	7	6	36	6 D	6	1 D	9	1.5
	8	6	42	7 D	6	1 D	9	1.5
	9	6	48	8 D	6	1 D	9	1.5
	10	6	54	9 D	6	1 D	9	1.5
	11	6	60	10 D	6	1 D	9	1.5
2	12	6	Sadece 1.Tüp (Sağ)		12	2 D	15	2.5
	13	6	6	1 D	12	2 D	15	2.5
	14	6	12	2 D	12	2 D	15	2.5
	15	6	18	3 D	12	2 D	15	2.5
	16	6	24	4 D	12	2 D	15	2.5
	17	6	30	5 D	12	2 D	15	2.5
	18	6	36	6 D	12	2 D	15	2.5
	19	6	42	7 D	12	2 D	15	2.5
	20	6	48	8 D	12	2 D	15	2.5
	21	6	54	9 D	12	2 D	15	2.5
	22	6	60	10 D	12	2 D	15	2.5
3	23	6	Sadece 1.Tüp (Sağ)		18	3 D	21	3.5
	24	6	6	1 D	18	3 D	21	3.5
	25	6	12	2 D	18	3 D	21	3.5
	26	6	18	3 D	18	3 D	21	3.5
	27	6	24	4 D	18	3 D	21	3.5
	28	6	30	5 D	18	3 D	21	3.5
	29	6	36	6 D	18	3 D	21	3.5
	30	6	42	7 D	18	3 D	21	3.5
	31	6	48	8 D	18	3 D	21	3.5
	32	6	54	9 D	18	3 D	21	3.5
	33	6	60	10 D	18	3 D	21	3.5

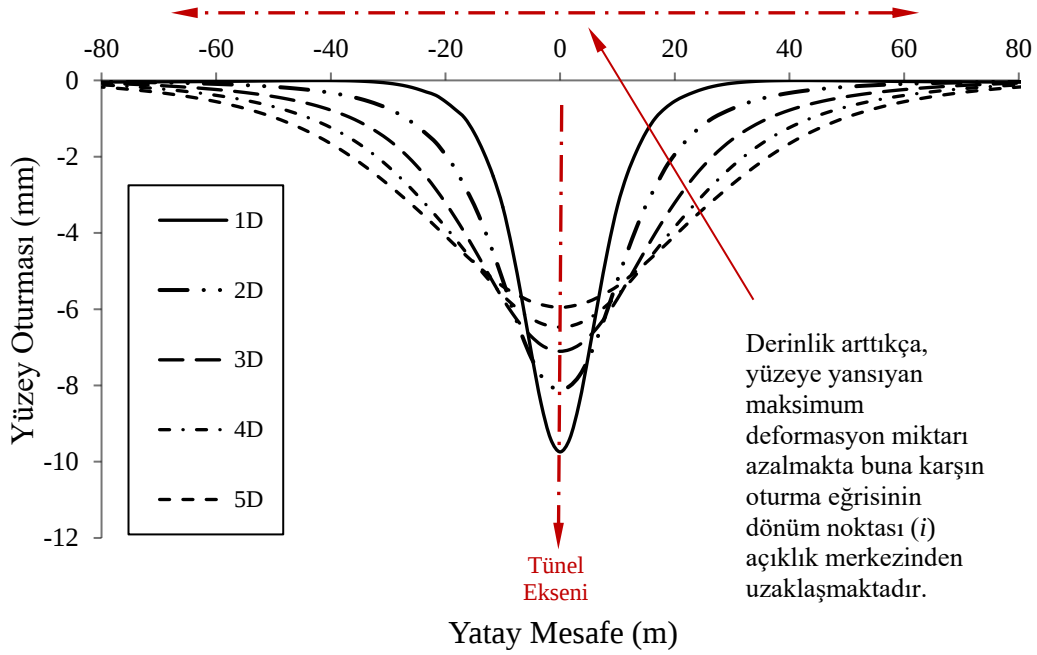
Çizelge 5.5 (devam) : Tüneller arası farklı geometriler için analiz girdileri

Analiz Grup No	Analiz No	Tünel Çapı (D) (m)	Tünel Çeperleri Arası Mesafe (m)		Örtü Kalınlığı (H) (m)		Eksen Derinliği (Zo) (m)	Zo/D
4	34	6	Sadece 1.Tüp (Sağ)		24	4 D	27	4.5
	35	6	6	1 D	24	4 D	27	4.5
	36	6	12	2 D	24	4 D	27	4.5
	37	6	18	3 D	24	4 D	27	4.5
	38	6	24	4 D	24	4 D	27	4.5
	39	6	30	5 D	24	4 D	27	4.5
	40	6	36	6 D	24	4 D	27	4.5
	41	6	42	7 D	24	4 D	27	4.5
	42	6	48	8 D	24	4 D	27	4.5
	43	6	54	9 D	24	4 D	27	4.5
	44	6	60	10 D	24	4 D	27	4.5
5	45	6	Sadece 1.Tüp (Sağ)		30	5 D	33	5.5
	46	6	6	1 D	30	5 D	33	5.5
	47	6	12	2 D	30	5 D	33	5.5
	48	6	18	3 D	30	5 D	33	5.5
	49	6	24	4 D	30	5 D	33	5.5
	50	6	30	5 D	30	5 D	33	5.5
	51	6	36	6 D	30	5 D	33	5.5
	52	6	42	7 D	30	5 D	33	5.5
	53	6	48	8 D	30	5 D	33	5.5
	54	6	54	9 D	30	5 D	33	5.5
	55	6	60	10 D	30	5 D	33	5.5

Şekil 5.7’de sadece birinci tüpün, sırasıyla D , $2D$, $3D$, $4D$ ve $5D$ örtü kalınlıklarında gerçekleştirilen tekil kazısı sonucu oluşan enine oturma profilleri, düşey düzlemde çakıştırılarak karşılaştırılmıştır. Enine oturma teknesi eğrilerinden anlaşılan durum şu şekilde özetlenebilir, tünel derinliği arttıkça yüzeye yansıyan deformasyon miktarında düşüş görülmekte buna karşılık enine oturma eğrisinin dönme noktası açıklık merkezinden uzaklaşmaktadır.

Sırasıyla Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, ve Şekil 5.12’de analiz grup 1-2-3-4-5’te hesaplanan yüzey deformasyon profilleri görülmektedir. Belirtilen grafikler incelendiğinde, çoklu tünel kazılarında, tüneller arası mesafede ve tünel üstü örtü kalınlığındaki artışın yüzeyde oluşan kümülatif deformasyonu azalttığı görülmektedir. Tünel kazıları arasındaki mesafenin artışı, tünellerin birbirleri üzerindeki etkisini düşürmektedir. Gerçekleştirilen analizlerde, özellikle sık derinliklerde $3D$ ara mesafenin ilerisinde, tüneller arası etkileşiminin büyük oranda düştüğü görülmüştür. Bu mesafenin ilerisinde her iki tünelin etkileşim bölgesinde girişimin azaldığı, bu

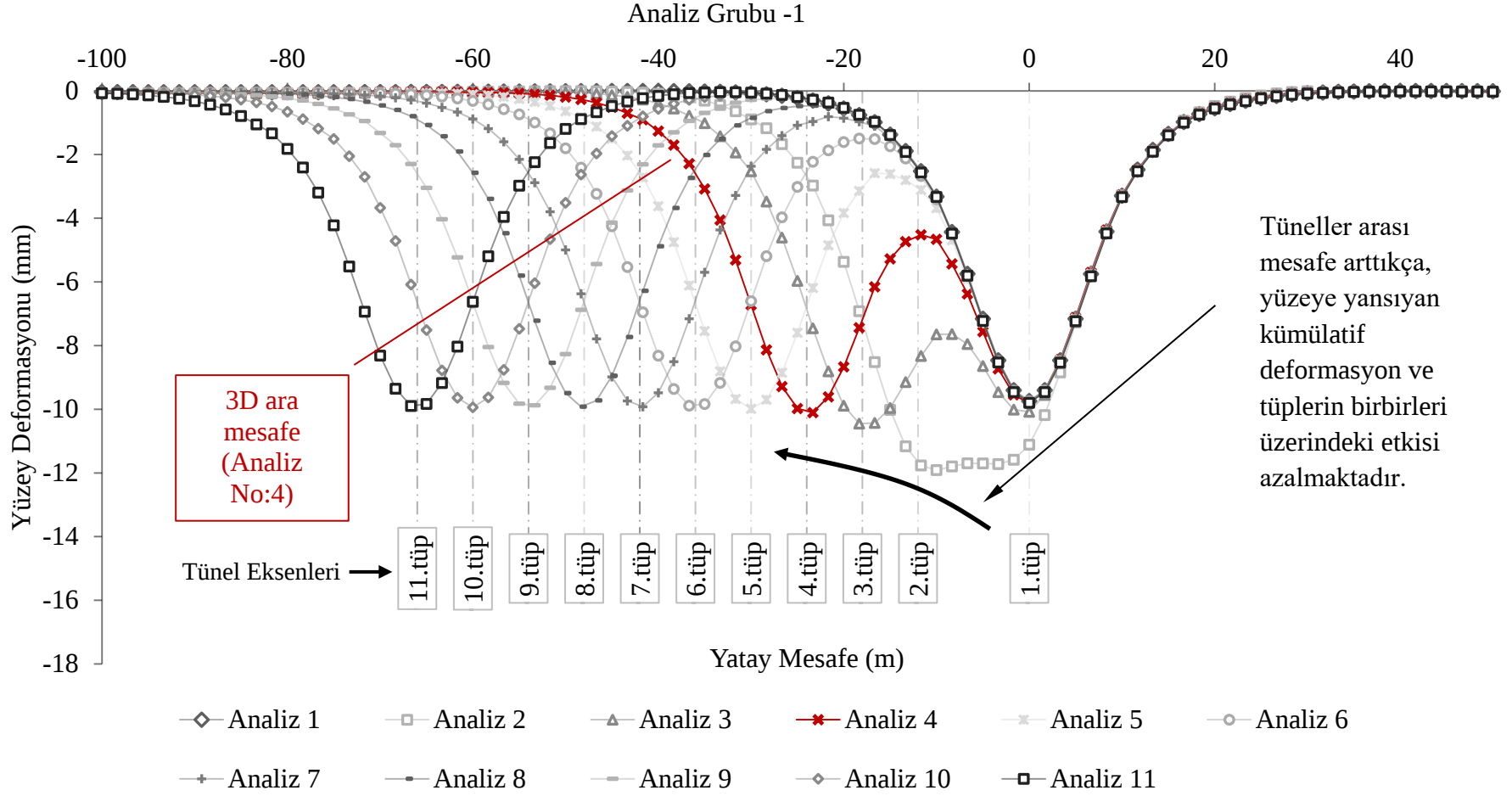
nedenle de tünellerin yüzeyde oluşturdıkları toplam deformasyon miktarlarının belirgin oranda düştüğü anlaşılmaktadır.



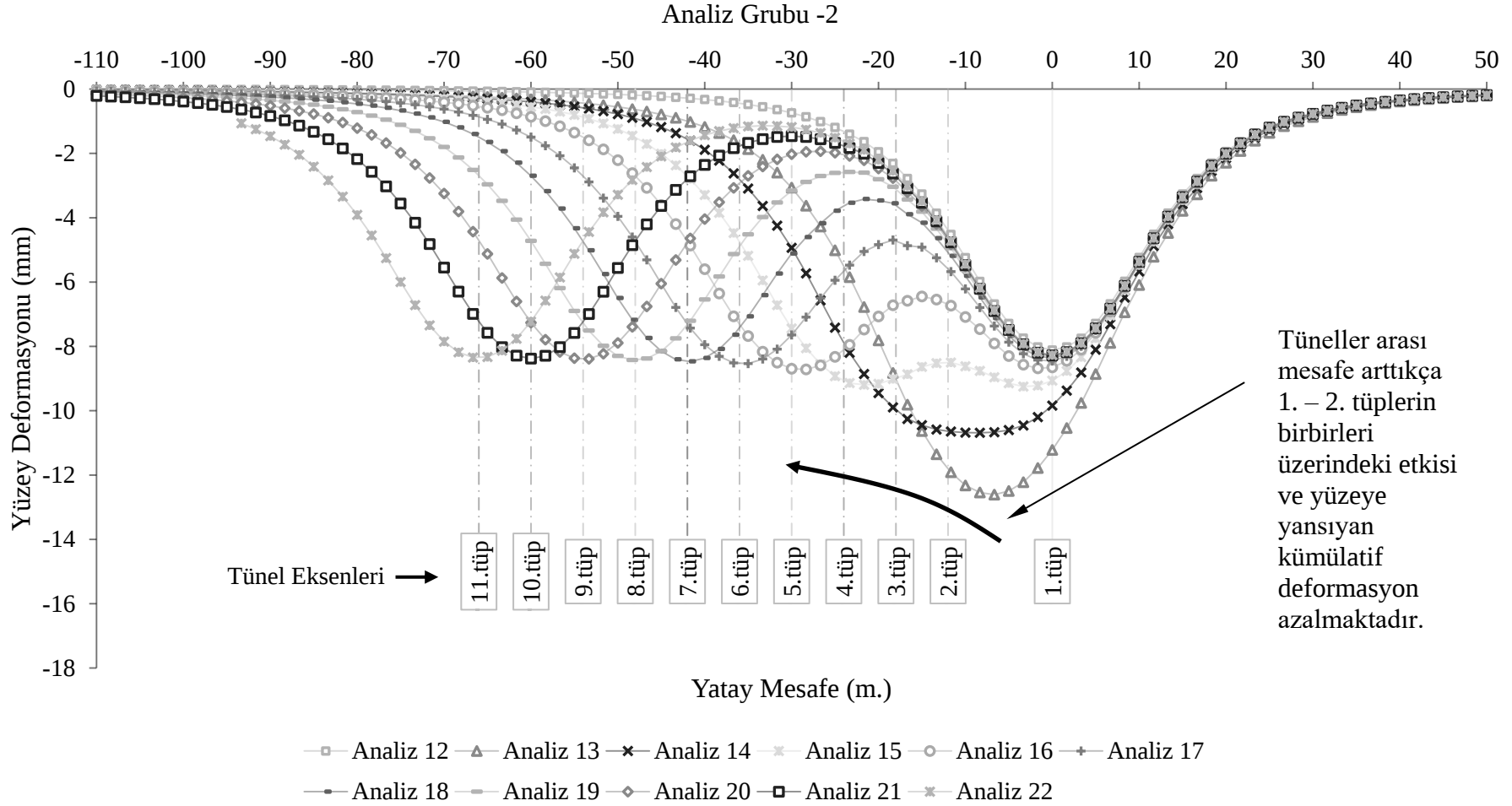
Şekil 5.7 : Farklı örtü kalınlıklarında aynı kazı geometrisinde açılan tek tüpün oluşturduğu yüzey oturma şekilleri.

Sırasıyla Çizelge 5.6'da gerçekleştirilen analizlerin sayısal sonuçları tablo şeklinde belirtilmiştir. Çizelge incelendiğinde, tünel çeperleri arasındaki 3D ara mesafenin kritik bir öneme sahip olduğu görülmektedir. Bu ara mesafenin ilerisinde açılan tünel boşlukları, birbirleri ve yüzeye yansıyan kümülatif deformasyon üzerinde azalan bir etkiye sahiptir.

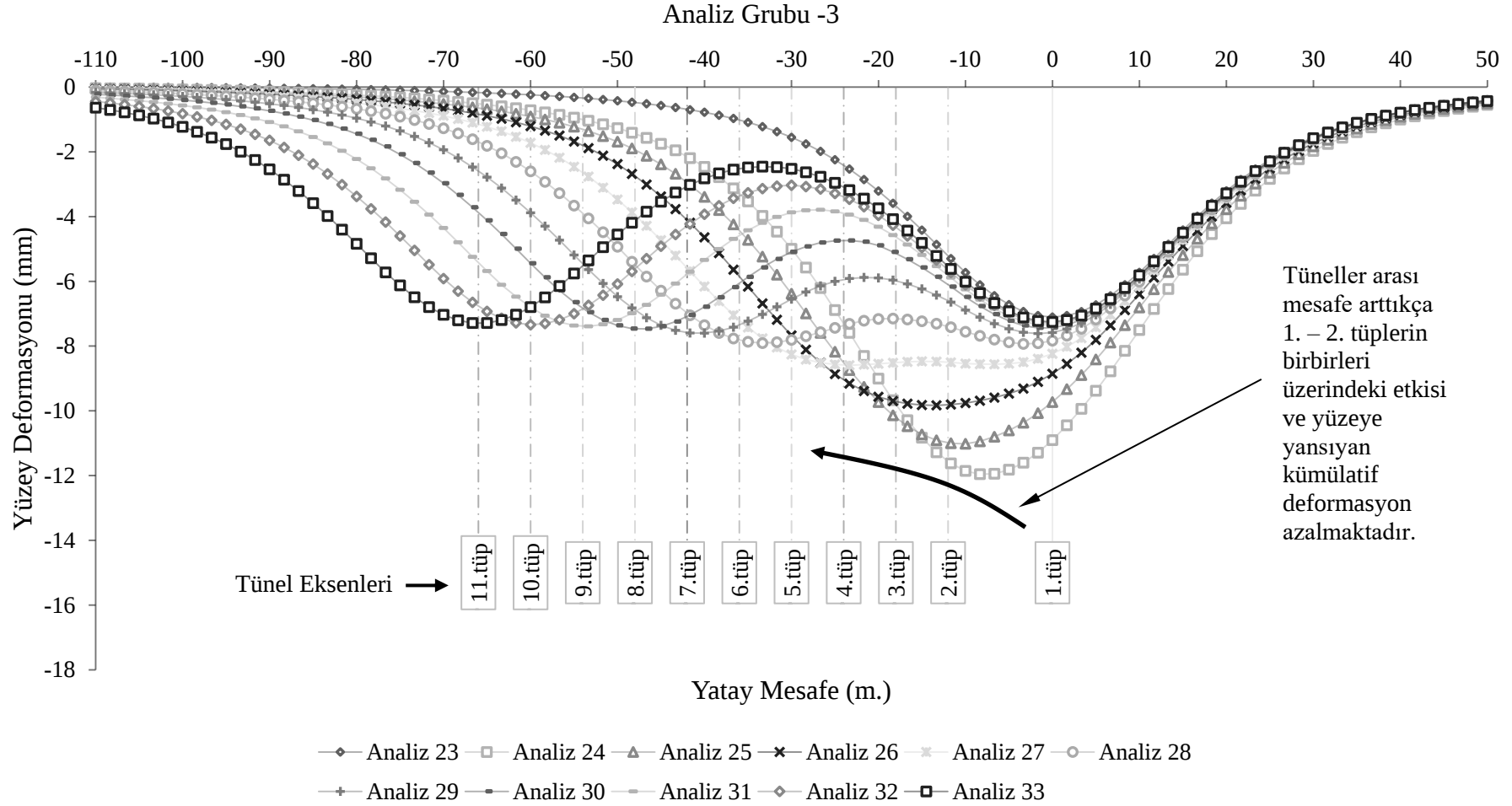
Birinci tüpün kazısı ile beraber jeolojik ortamda oluşan örselenmeden dolayı, ikinci tüp açıldıktan sonra, yüzeyde aynı geometrik ve kazı parametrelerine sahip tek tüpün açımı sebebi ile oluşan deformasyondan daha büyük bir yüzey deformasyonu oluşmaktadır.



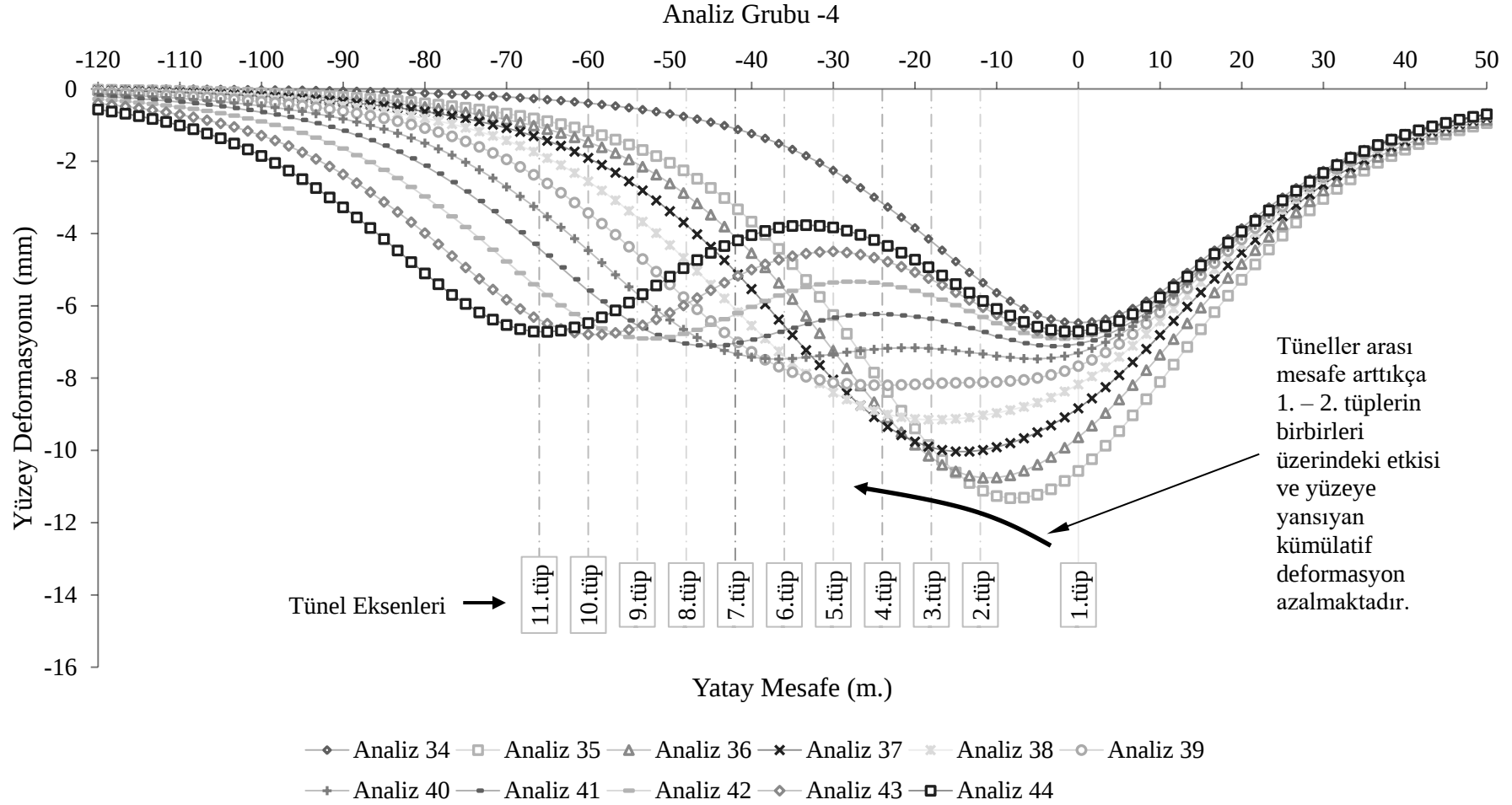
Şekil 5.8 : Analiz grup 1 yüzey deformasyon profilleri-Tüneller Örtü Kalınlığı 1D.



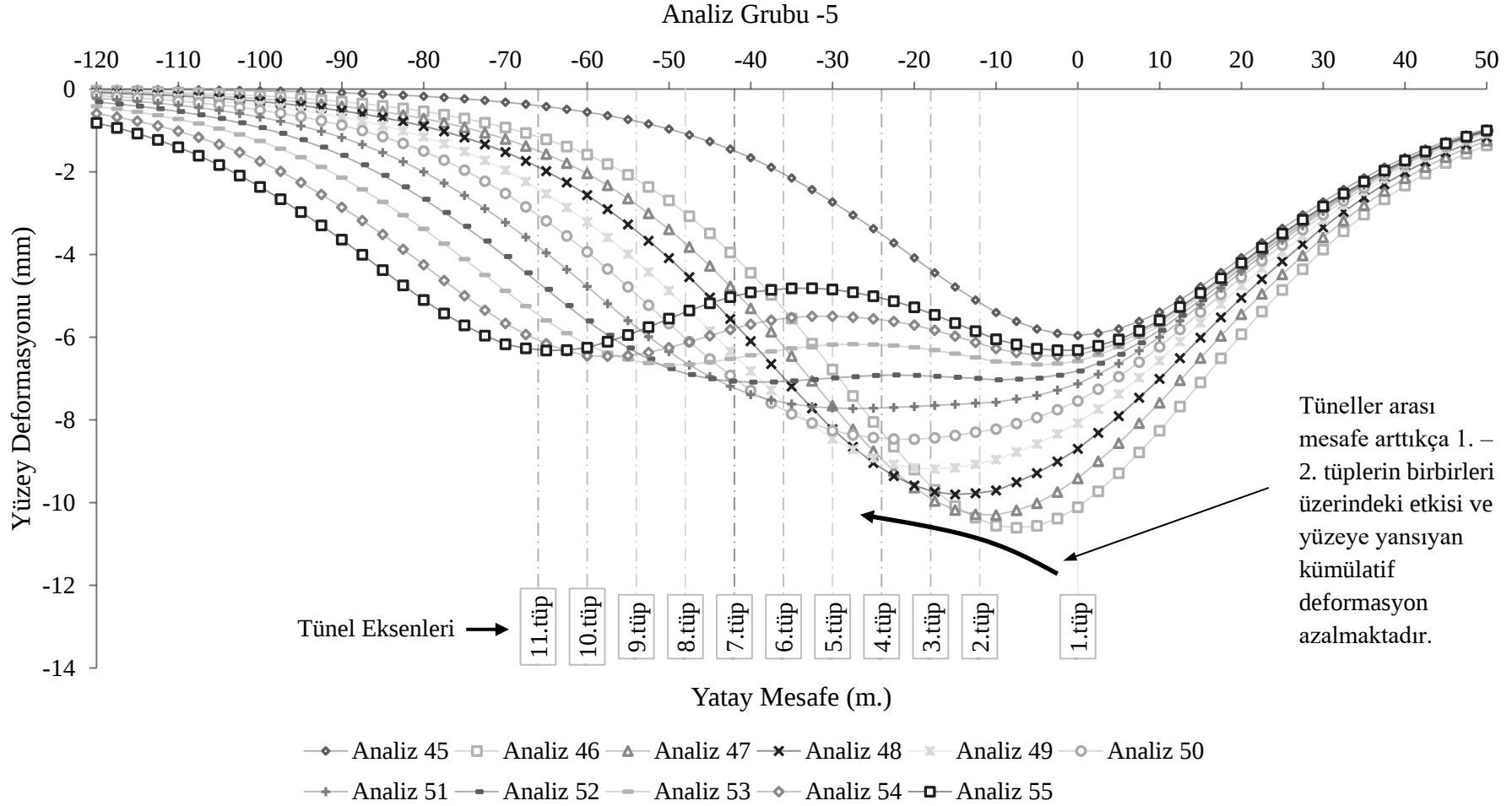
Şekil 5.9 : Analiz grup 2 yüzey deformasyon profilleri-Tüneler Örtü Kalınlığı 2D.



Şekil 5.10 : Analiz grup 3 yüzey deformasyon profilleri-Tüneller Örtü Kalınlığı 3D.



Şekil 5.11 : Analiz grup 4 yüzey deformasyon profilleri-Tüneller Örtü Kalınlığı 4D.



Şekil 5.12 : Analiz grup 5 yüzey deformasyon profilleri-Tüneller Örtü Kalınlığı 5D.

Çizelge 5.6 : Plaxis 2B analiz sonuçları.

Analiz Grup No	Analiz No	1.Tüp S_{maks} (mm)	2.Tüp S_{maks} (mm)	$\Delta^1 S_{max}$ (mm)	$\Delta^2 S_{max}$ (%)	Tünel Çeperleri Arası Mesafe (m)		Örtü Kalınlığı (H) (m)		Eksen Derinliği (Z_o) (m)	Z_o/D
1	1	-9.7	-	-	-	Sadece 1.Tüp (Sağ)		6	1 D	9	1.5
	2		-11.9	-2.2	23%	6	1 D	6	1 D	9	1.5
	3		-10.5	-0.8	8%	12	2 D	6	1 D	9	1.5
	4		-10.1	-0.4	4%	18	3 D	6	1 D	9	1.5
	5		-10.0	-0.3	3%	24	4 D	6	1 D	9	1.5
	6		-9.9	-0.2	2%	30	5 D	6	1 D	9	1.5
	7		-9.9	-0.2	2%	36	6 D	6	1 D	9	1.5
	8		-9.9	-0.2	2%	42	7 D	6	1 D	9	1.5
	9		-9.9	-0.2	2%	48	8 D	6	1 D	9	1.5
	10		-9.9	-0.2	2%	54	9 D	6	1 D	9	1.5
	11		-9.9	-0.2	2%	60	10 D	6	1 D	9	1.5
2	12	-8.1	-	-	-	Sadece 1.Tüp (Sağ)		12	2 D	15	2.5
	13		-12.6	-4.5	56%	6	1 D	12	2 D	15	2.5
	14		-10.7	-2.6	32%	12	2 D	12	2 D	15	2.5
	15		-9.2	-1.1	14%	18	3 D	12	2 D	15	2.5
	16		-8.7	-0.6	7%	24	4 D	12	2 D	15	2.5
	17		-8.5	-0.4	5%	30	5 D	12	2 D	15	2.5
	18		-8.5	-0.4	5%	36	6 D	12	2 D	15	2.5
	19		-8.4	-0.3	4%	42	7 D	12	2 D	15	2.5
	20		-8.4	-0.3	4%	48	8 D	12	2 D	15	2.5
	21		-8.4	-0.3	4%	54	9 D	12	2 D	15	2.5
	22		-8.3	-0.2	2%	60	10 D	12	2 D	15	2.5

¹ ΔS_{max} (mm) : 1.Tüp ve 2. Tüp maksimum yüzey oturmaları arasındaki fark

² ΔS_{max} (%) : 1.Tüp ve 2. Tüp maksimum yüzey oturmaları arasındaki yüzde fark

Çizelge 5.6 (devam) : Plaxis 2B analiz sonuçları.

Analiz Grup No	Analiz No	1.Tüp S_{maks} (mm)	2.Tüp S_{maks} (mm)	$\Delta^1 S_{maks}$ (mm)	$\Delta^2 S_{maks}$ (%)	Tünel Çeperleri Arası Mesafe (m)		Örtü Kalınlığı (H) (m)		Eksen Derinliği (Z_o) (m)	Z_o/D
3	23	-7.1	-	-	-	Sadece 1.Tüp (Sağ)		18	3 D	21	3.5
	24		-12.0	-4.9	69%	6	1 D	18	3 D	21	3.5
	25		-11.0	-3.9	55%	12	2 D	18	3 D	21	3.5
	26		-9.8	-2.7	38%	18	3 D	18	3 D	21	3.5
	27		-8.6	-1.5	21%	24	4 D	18	3 D	21	3.5
	28		-7.9	-0.8	11%	30	5 D	18	3 D	21	3.5
	29		-7.6	-0.5	7%	36	6 D	18	3 D	21	3.5
	30		-7.5	-0.4	6%	42	7 D	18	3 D	21	3.5
	31		-7.4	-0.3	4%	48	8 D	18	3 D	21	3.5
	32		-7.3	-0.2	3%	54	9 D	18	3 D	21	3.5
	33		-7.3	-0.2	3%	60	10 D	18	3 D	21	3.5
4	34	-6.5	-	-	-	Sadece 1.Tüp (Sağ)		24	4 D	27	4.5
	35		-11.3	-4.8	74%	6	1 D	24	4 D	27	4.5
	36		-10.8	-4.3	66%	12	2 D	24	4 D	27	4.5
	37		-10.0	-3.5	54%	18	3 D	24	4 D	27	4.5
	38		-9.2	-2.7	42%	24	4 D	24	4 D	27	4.5
	39		-8.2	-1.7	26%	30	5 D	24	4 D	27	4.5
	40		-7.5	-1.0	15%	36	6 D	24	4 D	27	4.5
	41		-7.1	-0.6	9%	42	7 D	24	4 D	27	4.5
	42		-6.9	-0.4	6%	48	8 D	24	4 D	27	4.5
	43		-6.8	-0.3	5%	54	9 D	24	4 D	27	4.5
	44		-6.7	-0.2	3%	60	10 D	24	4 D	27	4.5

¹ ΔS_{maks} (mm) : 1.Tüp ve 2. Tüp maksimum yüzey oturmaları arasındaki fark

² ΔS_{maks} (%) : 1.Tüp ve 2. Tüp maksimum yüzey oturmaları arasındaki yüzde fark

Çizelge 5.6 (devam) : Plaxis 2B analiz sonuçları.

Analiz Grup No	Analiz No	1.Tüp S_{maks} (mm)	2.Tüp S_{maks} (mm)	$\Delta^1 S_{max}$ (mm)	$\Delta^2 S_{max}$ (%)	Tünel Çeperleri Arası Mesafe (m)		Örtü Kalınlığı (H) (m)		Eksen Derinliği (Z_o) (m)	Z_o/D
5	45	-6	-	-	-	Sadece 1.Tüp (Sağ)		30	5 D	33	5.5
	46		-10.6	-4.6	77%	6	1 D	30	5 D	33	5.5
	47		-10.3	-4.3	72%	12	2 D	30	5 D	33	5.5
	48		-9.8	-3.8	63%	18	3 D	30	5 D	33	5.5
	49		-9.2	-3.2	53%	24	4 D	30	5 D	33	5.5
	50		-8.5	-2.5	42%	30	5 D	30	5 D	33	5.5
	51		-7.7	-1.7	28%	36	6 D	30	5 D	33	5.5
	52		-7.1	-1.1	18%	42	7 D	30	5 D	33	5.5
	53		-6.7	-0.7	12%	48	8 D	30	5 D	33	5.5
	54		-6.5	-0.5	8%	54	9 D	30	5 D	33	5.5
	55		-6.3	-0.3	5%	60	10 D	30	5 D	33	5.5

¹ ΔS_{max} (mm) : 1.Tüp ve 2. Tüp maksimum yüzey oturumları arasındaki fark

² ΔS_{max} (%) : 1.Tüp ve 2. Tüp maksimum yüzey oturumları arasındaki yüzde fark

Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilen modellerden çıkartılan sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- a) İkiz tünel kazı ara mesafeleri ve eksen derinliklerindeki değişim, gelişen yüzey deformasyonları için önemli bir etkiye sahiptir.
- b) Kazılan tünel boşlukları arasındaki mesafe arttıkça, yüzeye yansıyan toplam deformasyon azalmaktadır.
- c) Tüneller arası mesafenin artışıyla birlikte izlenen kümülatif yüzey deformasyonlarının azalması şu şekilde yorumlanmıştır; birinci tüpün kazısından sonra jeolojik ortamda oluşan örselenme ikinci tüpün geçişi sırasında daha da artmaktadır. Şayet ikinci tüp kazısı birinci tüp kazısının oluşturduğu örselenmiş bölgenin içerisindeki bir alanda kazılıyorsa, bu durum birikimli olarak jeolojik ortamdaki deformasyonun ve yüzey oturmalarının artmasına sebebiyet vermektedir. Tüneller arası mesafe arttıkça, ilk tüp kazısı neticesinde örselenen bölgeden uzaklaşıldığı için ikincil tüp kazısı sırasında daha az bir toplam örselenme ve akabinde daha düşük yüzey deformasyonları oluşmaktadır.
- d) Tünel derinlikleri arttıkça yüzeye yansıyan deformasyon miktarı azalmakta buna karşın, yüzeyde oluşan oturma eğrisinin dönüm noktası (*i*) artmaktadır.

5.2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Jeoteknik Özelliklerin Yüzey Deformasyonu Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

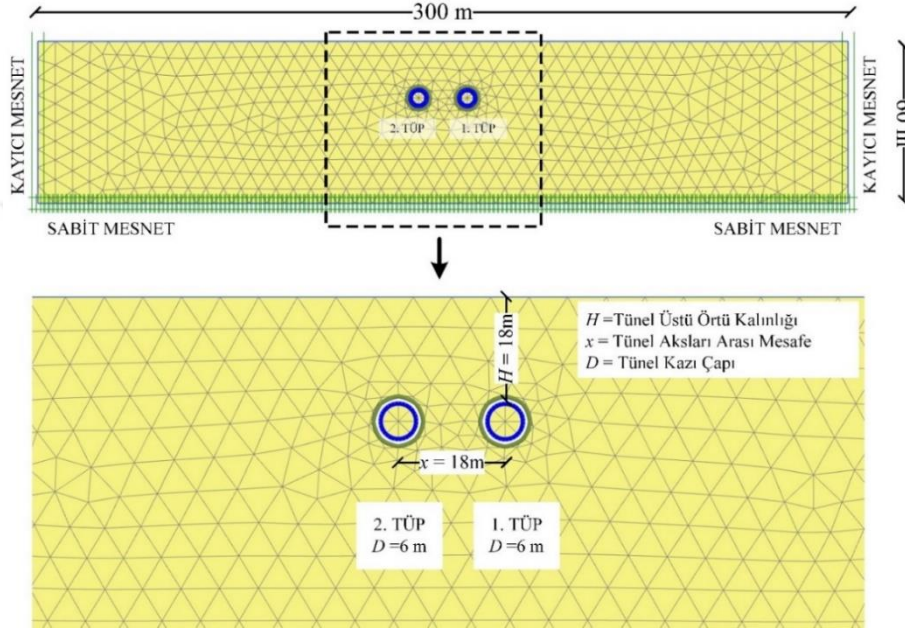
5.2.2.1 Elastisite Modülünün Etkisi

Elastisite modülünün tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey oturmaları üzerindeki etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Arıoğlu ve diğ., 2002; Herzog, 1985). Bu bölümde Plaxis 2B (iki boyutlu) sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak belirtilen durum irdelenmiştir.

Bu kapsamda, Şekil 5.13'te belirtilen model Plaxis 2B yazılımıyla önce birinci tüp kazısı sonra ikinci tüp kazısı gerçekleştirilecek şekilde modellenmiştir.

Çalışma sırasında 6 m kazı çapı, tünel eksenleri ara mesafesi ve tünel üstü örtü kalınlığı 18 m olan tek bir model kullanılmıştır. Analizler sadece $Z_0/D = 3.5$ durumu için gerçekleştirilmiştir. Bu seçimin yapılmasındaki amaç, modelin çoğunlukla şehir içi metro tünellerinde kullanılan eksenler arası mesafe, kazı çapı ve tünel üstü örtü

kalınlıkları açısından sık rastlanılan kombinasyonlara yakın olmasıdır. Model çalışmasında, kazı sırasında ayna basıncı ve tünel tahkimatı uygulanmamıştır. Seçilen bu yöntemin amacı, tünel kaplamasından ve ayna basıncından kaynaklanan tünel içerisinden zemine doğru oluşan itki kuvvetlerinin oluşturduğu gerilmeleri ortadan kaldırılarak, zeminin doğal yapısı içerisinde rahatlama hareketini yapmasının sağlanması ve bu durum sonucu oluşan yüzey oturmalarının mümkün olduğunca yalın bir şekilde incelenmesidir.

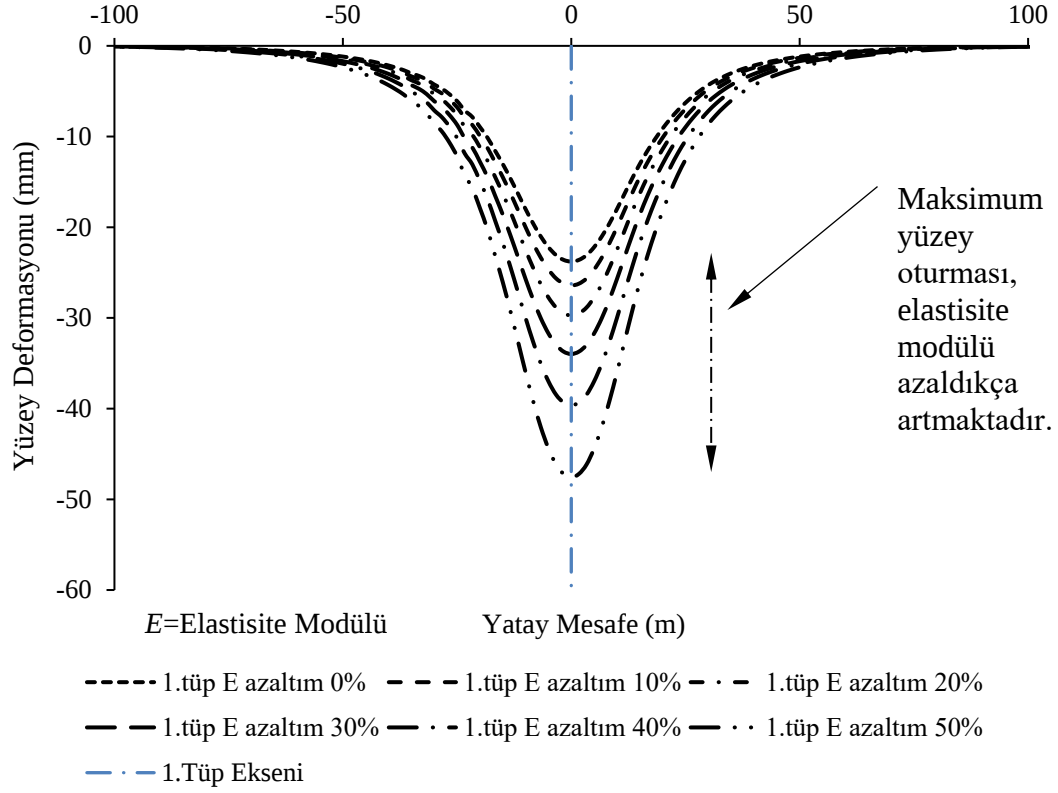


şekil 5.13 : Elastisite modülünün deformasyon üzerindeki etkisinin araştırılması için oluşturulan iki boyutlu modelin geometrik sınırları.

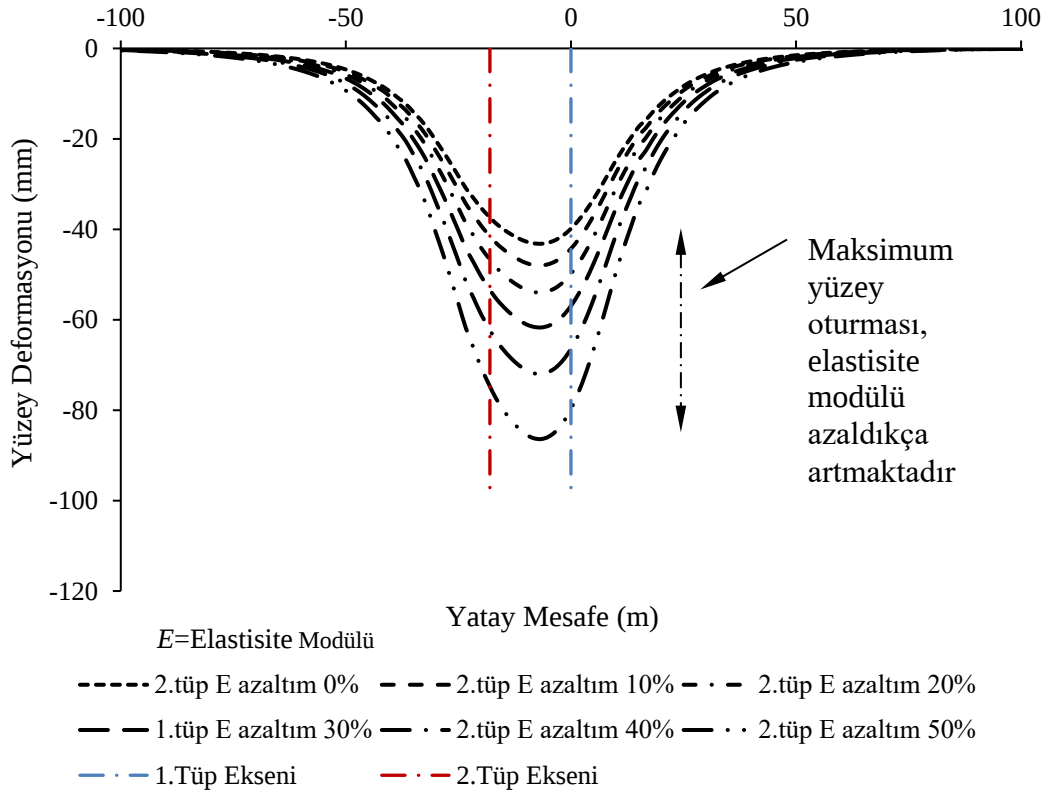
Modelde izelge 5.3'te belirtilen yer malzemesi değerleri temel alınmıştır. Analiz alışması sırasında diğer tüm parametreler sabit tutularak sadece elastisite modülü %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında azaltılarak analiz adımlarında kademeli olarak uygulanmıştır. Bu uygulamadaki amaç, azaltılan elastisite modülü değerlerinin tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey oturmaları üzerindeki etkisinin sayısal olarak tespit edilmesidir. Gerçek saha uygulamalarında, kazılan boşluğun çevresinde oluşan gerilme boşalması ve diğer dinamik etkiler sonucunda, kazılan ortamın elastisite modülü dışındaki diğer mekanik parametrelerinde de değişimler olmaktadır. Bu modelleme çalışması sırasında, basitleştirme için diğer parametreler sabit tutularak sadece elastisite modülü değiştirilmiştir. Model çalışmalarından elde edilen veriler sırasıyla izelge 5.7, şekil 5.14, şekil 5.15 ve şekil 5.16'da belirtilmiştir.

Çizelge 5.7 : Elastisite modülü değişimine bağlı elde edilen yüzey oturma miktarları ve değişim oranları.

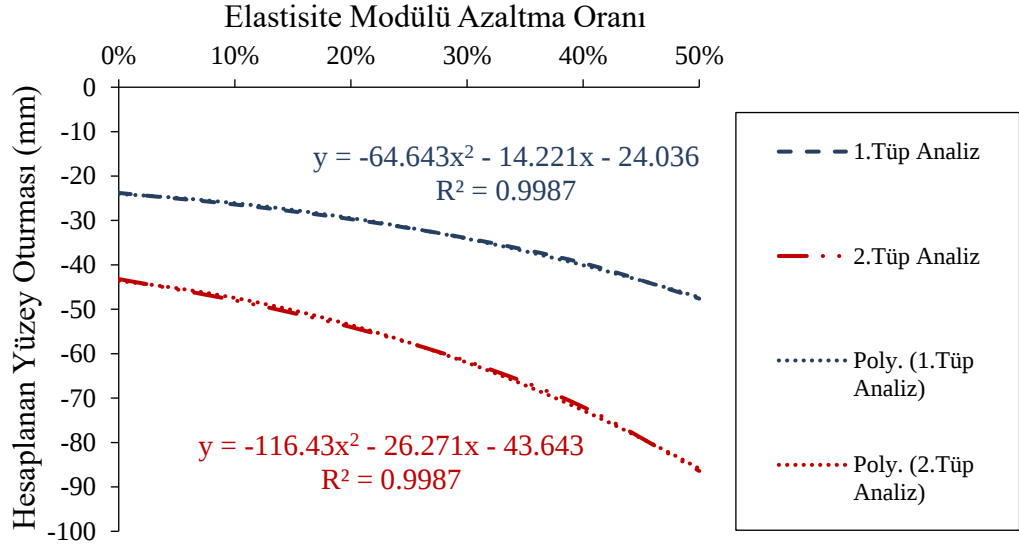
Analiz No	Elastisite Modülü Azaltma Yüzdeleri (%)	Analizde Kullanılan Elastisite Modülü kPa	1. Tüp Kazısı Sonrası Oluşan Maksimum Yüzey Deformasyonu (mm)	Açıklama	2. Tüp Kazısı Sonrası Oluşan Maksimum Yüzey Deformasyonu (mm)	Açıklama
1	0	5.0x10 ⁴	-23.8	Elastisite modülündeki azalım ile birlikte, 1. tüpün kazısından sonra yüzeyde oluşan oturma miktarının arttığı görülmüştür.	-43.2	Analizler incelendiğinde; birinci tüp kazısından sonra oluşan yüzey deformasyonundan daha büyük bir deformasyonun aynı geometri ve kazı şartlarına sahip ikinci tüplerin açımının ardından olduğu görülmektedir. Bu durum jeolojik ortamda oluşan örselenmeyle açıklanmaktadır.
2	10	4.5x10 ⁴	-26.4	Elastisite modülünün %50 azaltıldığı analiz (Analiz No:6) ile %0 azaltımın kullanıldığı analiz (Analiz No:1) arasında yaklaşık iki katlık bir yüzey oturma değeri farkı oluşmaktadır.	-48.0	Sadece 1.tüpün kazıldığı analiz no 6 'dan (elastisite modülü %50 azaltılmış durum için) elde edilen maksimum yüzey oturma değeri (-47,6 mm), 2.tüpün ilk kazısı (analiz no 1 (elastisite modülü %0 azaltılmış durumu için)) sonrası elde edilen maksimum yüzey deformasyonuna yakın bir değere ulaşmıştır (-43.2 mm).
3	20	4.0x10 ⁴	-29.7		-54.0	
4	30	3.5x10 ⁴	-34.0		-61.7	Bu durum, 1. tüpün açımından sonra jeolojik ortamda, henüz kazısı gerçekleşmemiş olan 2.tüp bölgesi içerisinde bir örselenme oluştuğuna ve elastisite modülünün yaklaşık %50 oranında azaldığına işaret etmektedir.
5	40	3.0x10 ⁴	-39.6		-72.0	Modelleme çalışması sınırlı koşullar altında gerçekleştirilmiştir, bu analizlerin farklı kombinasyonlar için de gerçekleştirilmesinde ve gerçek saha koşullarından elde edilen deney sonuçları ile karşılaştırılmasında fayda bulunmaktadır.
6	50	2,5x10 ⁴	-47.6		-86.4	



Şekil 5.14 : Elastisite modülü değişimi ile oluşan yüzey deformasyonu – 1. Tüp.



Şekil 5.15 : Elastisite modülü değişimi ile oluşan yüzey deformasyonu – 2. Tüp.



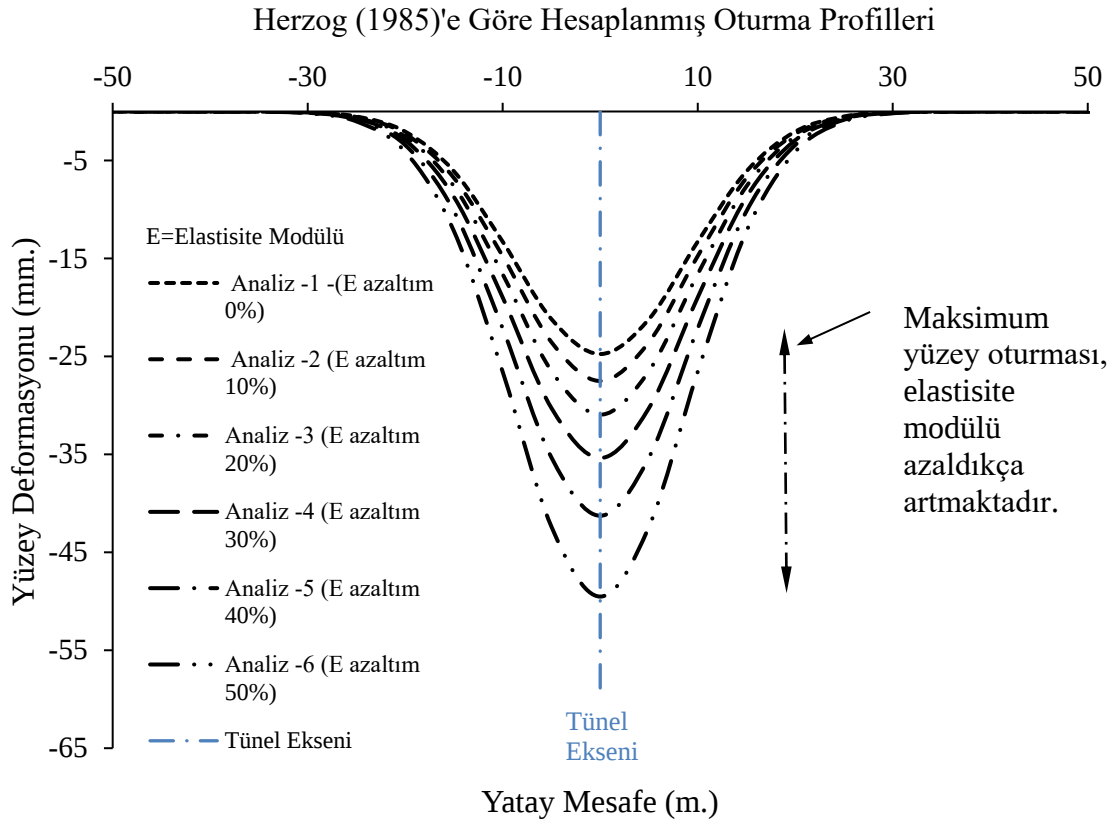
Şekil 5.16 : Elastisite modülü azalım yüzdesi ile oluşan yüzey oturmalarının ilişkisi.

Yukarıda belirtilen sonuçlar ışığında, elastisite modülünün düşüşü ile yüzeyde oluşan deformasyonun büyüklüğü arasında bire bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan oturma profilleri, ampirik yöntemlerden Herzog (1985) tarafından sunulan eşitlik 2.6 ile de irdelenmiş ve sonuçları sırasıyla Çizelge 5.8 ve Şekil 5.17’de belirtilmiştir. Eşitlik 2.6’nın hesaplanmasında kullanılan (i) dönüm noktası, Çizelge 2.2’de belirtilen ilk 4 bağıntı ile hesaplanan değerlerinin ortalaması alınarak bulunmuştur. Gauss eğrilerinin grafikleri eşitlik 2.1 ile oluşturulmuştur.

Çizelge 5.8 : Herzog (1985)’e göre hesaplanmış elastisite modülü değişimine bağlı yüzey oturma miktarları ve değişim oranları.

Analiz No.	Elastisite Modülü Azaltma Yüzdeleri (%)	Analizde Kullanılan Elastisite Modülü kPa	Herzog (1985)’e göre hesaplanan S_{max}	S_{max} değerlerindeki yüzde (%) değişim miktarı - Analiz No:1’e göre	Açıklama
1	0	5.0×10^4	24.8 mm	0	Azalan elastisite modülü değerleri ile birlikte yüzey oturma değerleri artmakta 1. analiz ile 6. analiz arasında yaklaşık olarak iki kat yüzey oturma değeri farkı oluşmaktadır.
2	10	4.5×10^4	27.5 mm	11	
3	20	4.0×10^4	31.0 mm	25	
4	30	3.5×10^4	35.4 mm	43	
5	40	3.0×10^4	41.3 mm	67	
6	50	2.5×10^4	49.5 mm	100	

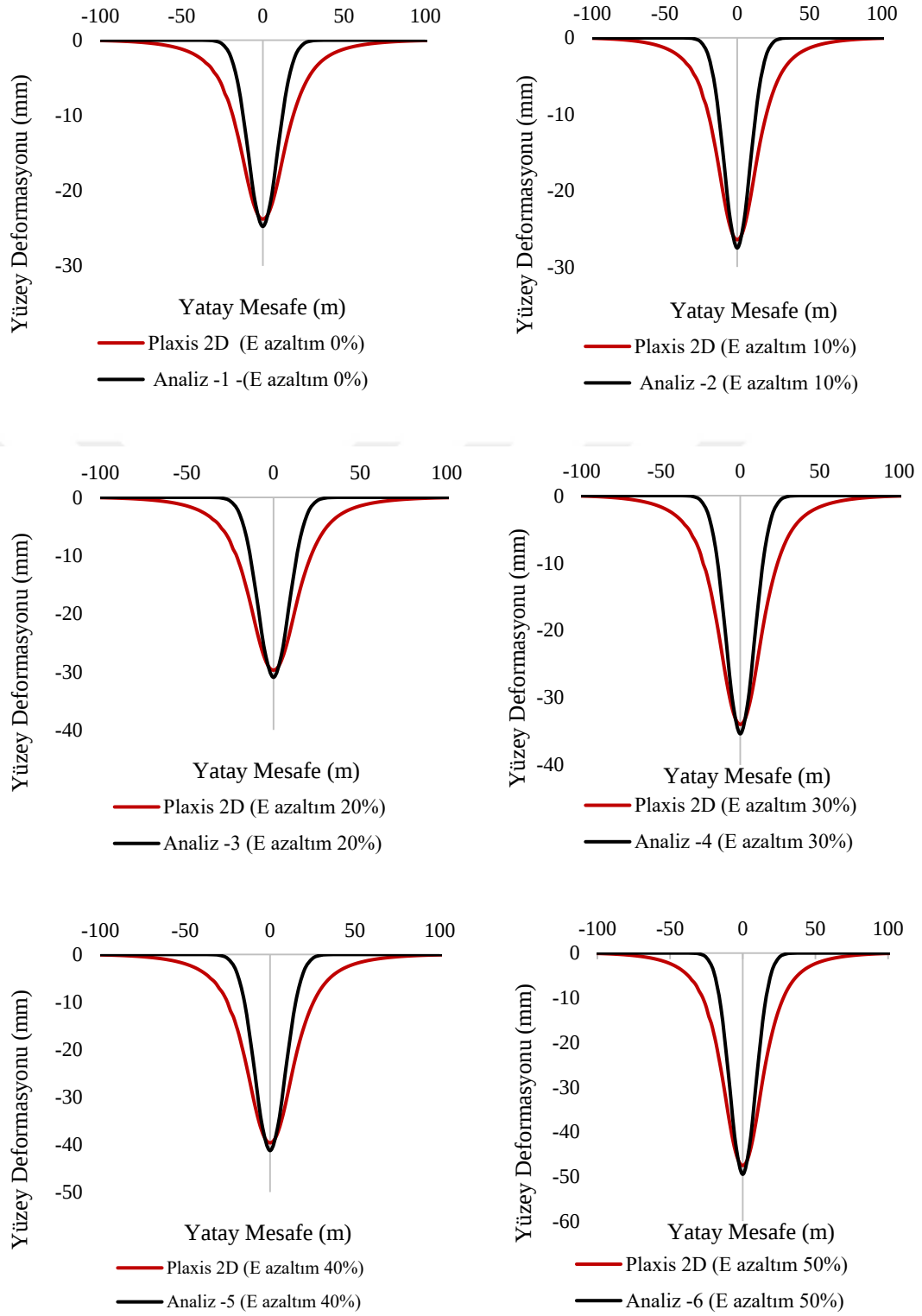


Şekil 5.17 : Herzog (1985)' e göre hesaplanmış yüzey oturma eğrileri.

Şekil 5.18'de tek tüp kazıları için, sonlu elemanlar yazılımı Plaxis 2B (iki boyutlu) ile elde edilen sonuçlar ile ampirik yöntem olarak seçilen Herzog (1985) ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tek tek belirtilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, oluşan maksimum oturma değerlerinin birbirlerine çok yakın oldukları, oturma eğrisinin dönüm noktasının (i) ise farklılık gösterdiği ve ampirik yöntemde daha kısa mesafede oturma eğrisinin dönüm noktasına eriştiği görülmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçların dönüm noktalarının daha geniş bir alanı kapsadığı, bu sebepten dolayı da daha emniyetli bir alan içerisinde kalındığı görülmüştür.

Bu durum göz önüne alındığında, gerçek saha uygulamaları sırasında, özellikle kritik bölgelerde tünel kazıları gerçekleştirildiğinde oluşabilecek yüzey deformasyonlarının kestirimi için sonlu elemanlar yönteminin kullanılması uygun görülmektedir. Belirtilen tespitler bu çalışmada kullanılan zeminler için geçerlidir.



Şekil 5.18 : Herzog (1985)'e göre yapılan analizlerin ve Plaxis 2B sonuçlarının karşılaştırılması.

5.3 İkiz Tünel Kazılarının Etkileşiminin Üç Boyutlu Analizi

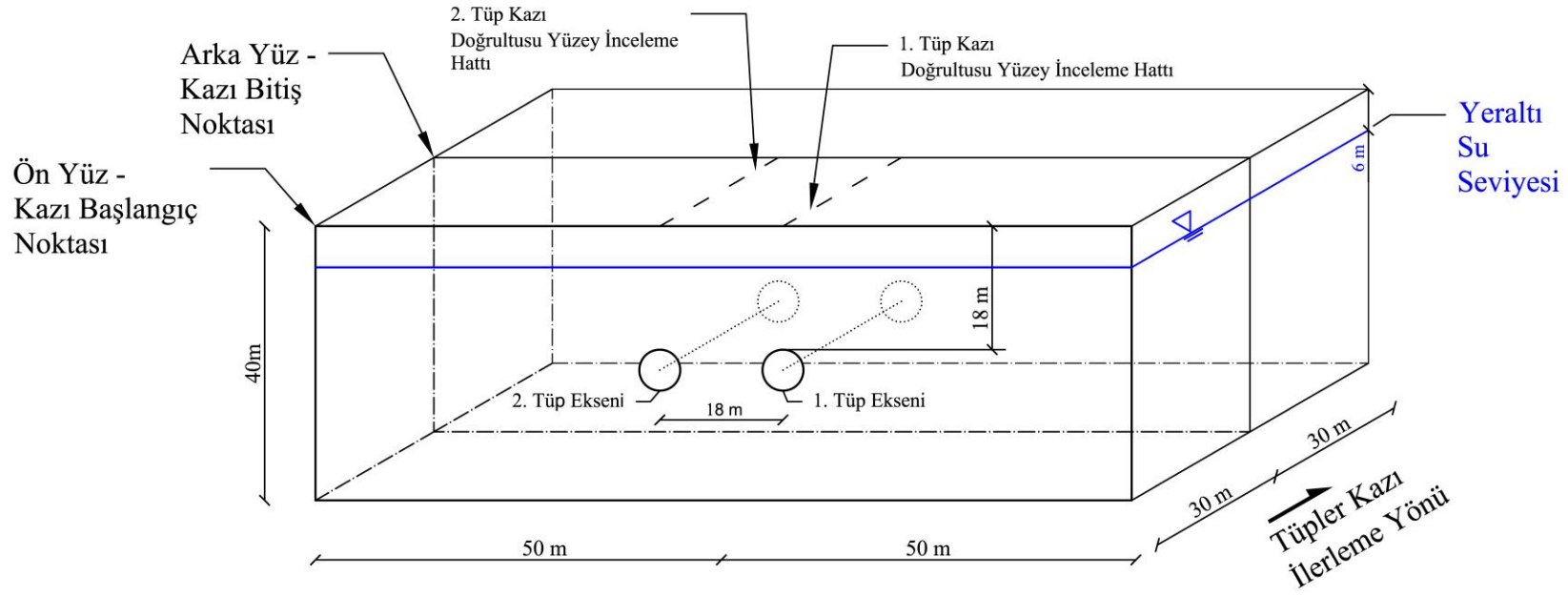
Bu bölümde; asenkron ikiz tünel kazıları, birbirleriyle etkileşimleri ve yüzeyde oluşturdukları deformasyonlar bakımından üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile kavramsal olarak irdelenmiştir. Bu kapsamda, modelde kullanılan yer malzemesi, *TBM* ve kaplama parametreleri İstanbul’da zayıf zemin şartlarında gerçekleştirilen metro kazılarını yansıtabilecek şekilde literatürden seçilmiştir.

Sonlu elemanlar yazılımı olarak Plaxis 3B Tunnel kullanılmıştır. Şekil 5.19’da yazılıma yüklenecek olan modelin genel hatları ve modelleme adımları şematize edilerek belirtilmiştir.

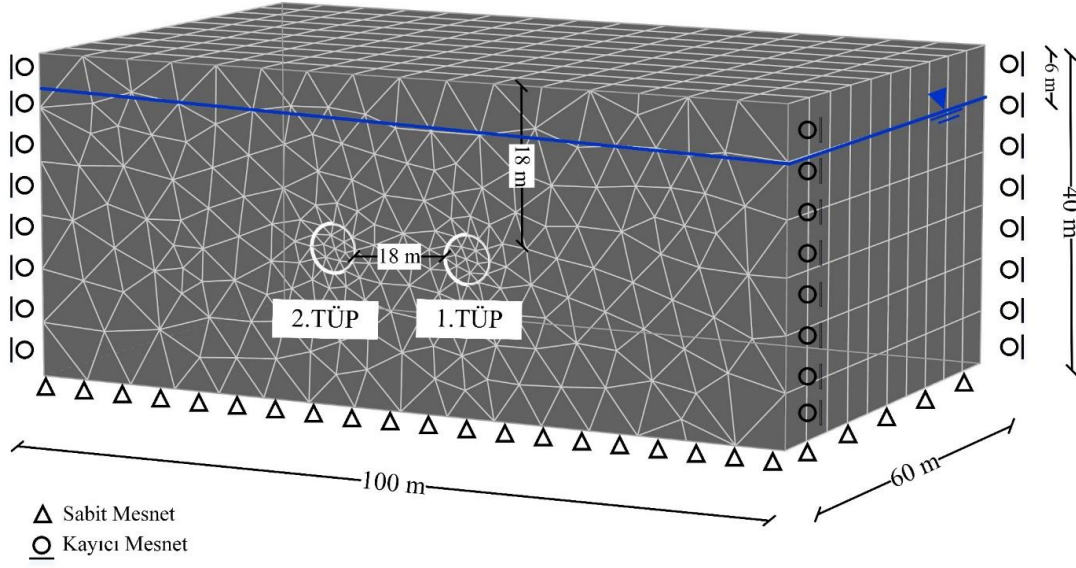
Bu analizin amacı, üç boyutlu kademeli olarak gerçekleştirilen birinci tüp kazısının, henüz kazılmamış olan ikinci tüp kazı hattı ve model yüzeyinde oluşturduğu oturma profilinin gelişimini incelemek ve buna bağlı olarak birinci tüp kazısının tamamlanmasından sonra ardından gerçekleştirilen ikinci tüp kazısının birinci tüpün yarattığı etkiyi hangi ölçüde değiştirdiğini açıklamaktır.

Şekil 5.20’de modelde oluşturulan sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir. Modelde 15 düğümlü kamalar, 4380 adet eleman, 13319 adet düğüm noktası, 26280 adet gerilme noktası kullanılmıştır. Tünel çevresinde ağ sıklığı arttırılmıştır. Kavramsal modelde *TBM*’in koniklik etkisi % 0.5 olarak seçilmiş ve modele yüklenmiştir. Koniklik etkisi *TBM*’in kazıcı kafası ile gövdesi arasında oluşan çapsal farkı ifade etmektedir. Şekil 5.21’de koniklik etkisi görsel olarak belirtilmiştir.

Tünellerin kazı çapı (D) 6 m, tünel tepe noktası ile yüzey arasındaki mesafe (örtü kalınlığı) 18 m tünellerin eksenleri arasındaki mesafe 18 m, yeraltısuyu derinliği yüzeyden 6 m olacak şekilde seçilmiş ve modele işlenmiştir.



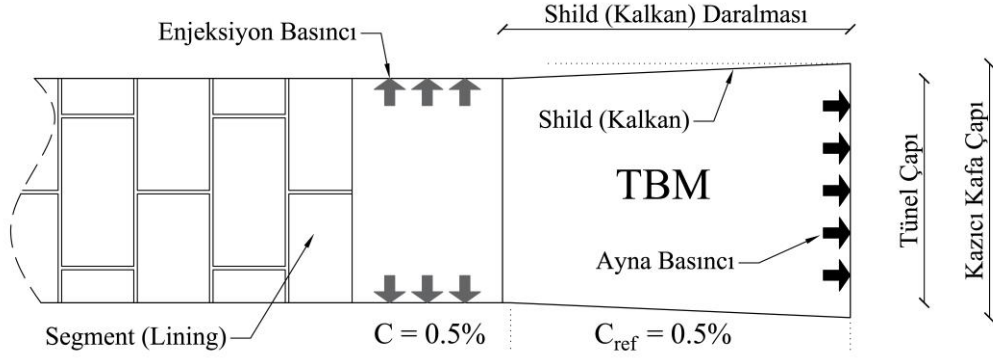
Şekil 5.19 : Üç boyutlu Plaxis modelinin geometrik sınırları.



Şekil 5.20 : Üç boyutlu Plaxis modelinin ağ sıklığı ve sınır koşulları.

Kavramsal modelde basitleştirme ve hesap kolaylığı açısından tek bir jeolojik katman kullanılmıştır. Zayıf zemin şartlarını yansıtacak şekilde literatürden seçilen jeolojik ortamın modele işlenen yer malzemesi parametreleri Çizelge 5.9’da verilmiştir. Model genişliği tünel etki alanının model sınırları ile çakışmaması amacıyla tünel yarıçapının 4 katından daha büyük olacak şekilde seçilmiştir (Brinkgreve, 2005).

Çizelge 5.10’da kavramsal modelin oluşturulması için kullanılan beton kaplama ve *TBM*’in mekanik parametreleri sunulmuştur. Modelin gerçekçiliğini arttırmak için parametreler İstanbul metro inşaatlarında kullanılan kullanılan *TBM* ve beton kaplama parametrelerine yakın seçilmiştir.



Şekil 5.21 : TBM Koniklik Etkisi (Plaxis, 2017'den değiştirilmiştir).

Çizelge 5.9 : Plaxis 3B model jeoteknik parametreler.

Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin (Hardening Soil)
Malzeme Tipi	Drenajlı
Zemin Birim Hacim Ağırlığı $\gamma_{unsat} / \gamma_{sat}$	13.59 / 18.7 kN/m ³
Referans gerilme şekil değiştirme sekant modülü E_{50}^{ref}	5 x10 ⁴ kPa
Referans gerilme şekil değiştirme ödometre elastisite modülü E_{oed}^{ref}	5x10 ⁴ kPa
Referans gerilme şekil değiştirme boşaltma tekrar yükleme E_{ur}^{ref}	1.842x10 ⁵ kPa
Poisson Oranı $\nu_{ur}^{(nu)}$	0.300
Referans gerilme p^{ref}	100 kPa
Sükunetteki toprak basıncı K_n^{nc}	0.658
Power (m)	0.5
Kohezyon c_{ref}	85 kPa
Sürtünme Açısı ϕ	20°
Dilatasyon Açısı ψ	0°

Çizelge 5.10 : Plaxis 3B modelde kullanılan beton kaplama (liner) ve TBM mekanik parametreleri.

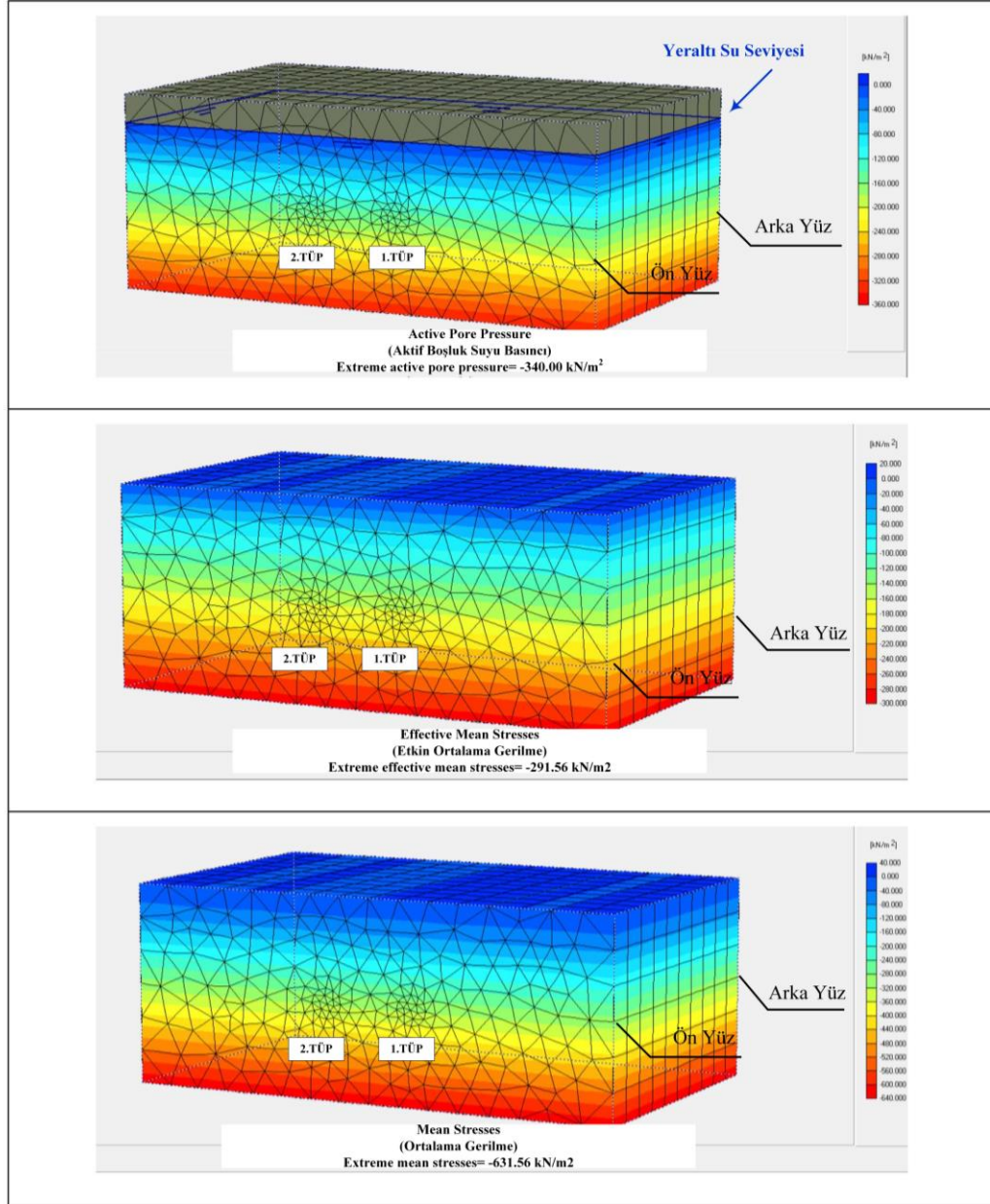
Parametre	TBM (Kalkan)		Beton Kaplama (Liner)	
	İsim	Değer	İsim	Değer
Davranış şekli	<i>Elastik</i>	-	<i>Elastik</i>	-
Elastisite Modülü	<i>E_{çelik}</i>	200 GPa	<i>E_{beton}</i>	35 GPa
Birim Ağırlık	<i>w_{çelik}</i>	78.5 kN/m ³	<i>d_{segment}</i>	0.35 m
Poisson oranı	<i>v_{çelik}</i>	0 ¹	<i>w_{beton}</i>	25 kN/m ³
			<i>v_{beton}</i>	0.150

¹TBM shieldinin ince yapısal bir eleman oluşu nedeniyle modelde sıfır olarak işlenmiştir.

Modelleme çalışması aşağıda belirtilen adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir.

Genel kabuller aşağıdaki gibidir:

- TBM kalkan uzunluğu 6 m olarak seçilmiştir.
- Şekil 5.22’de jeolojik ortamda oluşan ilksel gerilmeler belirtilmiştir. Gerilmeler Plaxis 3B Tunnel yazılımı aracılığıyla girdi parametreleri göz önüne alınarak otomatik olarak hesaplanmıştır.
- Ayna basıncı tünel çeperinin üst kotunda tabanına doğru 200 kPa’dan 260 kPa’a doğru artacak şekilde, enjeksiyon basıncı 200 kPa olacak şekilde seçilmiştir.
- Her kazı adımından sonra, tünel içerisi kuru şekle getirilmiş ve drenaja izin verilmiştir.
- TBM’in koniklik farklı % 0.5 olarak belirlenmiştir.



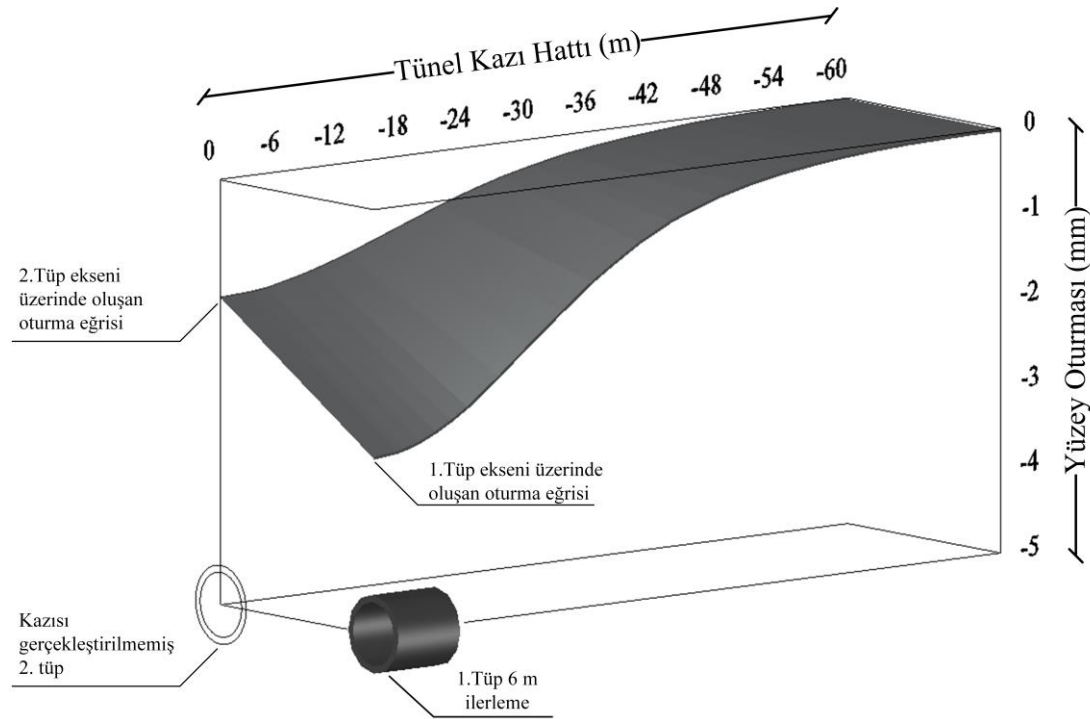
Şekil 5.22 : Plaxis 3B Olarak Oluşturulan Modelde İlksel Gerilmelerin Dağılımı.

Modelleme adımları;

- Tüneller 6m lik adımlar şeklinde kazılmış ve desteklenmiştir.
- Toplam kazı uzunluğu her bir tüp için 30 m dir. Bu kapsamda model uzunluğu, 30 m olan kazı hattının da ilerisinde oluşabilecek yüzey deformasyonlarını analiz edebilmek için 60 m olacak şekilde seçilmiştir.
- Önce 1. Tüp kazısı gerçekleştirilmiştir. 30 metrelik 1. Tüp kazısı tamamlandıktan 2 gün sonra 2. Tüp kazısına geçilmiştir.

Analizler, sırasıyla 1.tüpün ardından 2. Tüpün kazıları sonrası oluşan yüzey deformasyon profillerinin incelenmesi şeklinde ele alınmıştır.

Şekil 5.23'te birinci tüpün 6 metrelik kazı ve desteklenmesi neticesinde yüzeyde, birinci tüp kazı hattı ve ikinci tüp kazı hattı üzerinde oluşan oturma eğrisinin birleştirilmiş görseli verilmiştir. Görselden anlaşıldığı üzere, henüz kazısı gerçekleştirilmemiş ikinci tüp kazı hattı üzerinde ve birinci tüpün kazı aynasının ilerisinde deformasyonlar gelişmektedir, gelişen bu deformasyonların ilerleme yönünde 54. metreye kadar etkili olduğu anlaşılmaktadır.

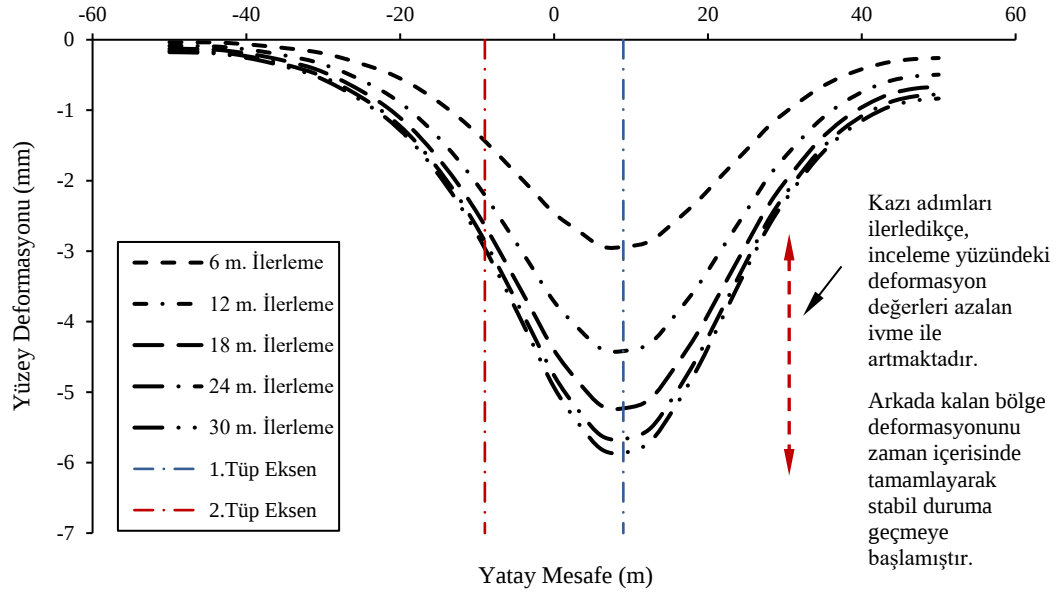


Şekil 5.23 : 6 metrelik 1. Tüp kazısının ilerleme eksenine ve 2. Tüp kazı hattı üzerinde oluşturduğu yüzey oturması.

Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te birinci tüpün 6. m, 12. m, 18. m, 24. m, ve 30. m kazı ve desteği gerçekleştirildikten sonra elde edilen sonuçlar Şekil 5.19'da belirtilen ön yüz kazı başlangıç noktası ve arka yüz kazı bitiş noktası inceleme yüzlerine karşılık gelen yüzey deformasyon profilleri çakıştırılarak belirtilmiştir.

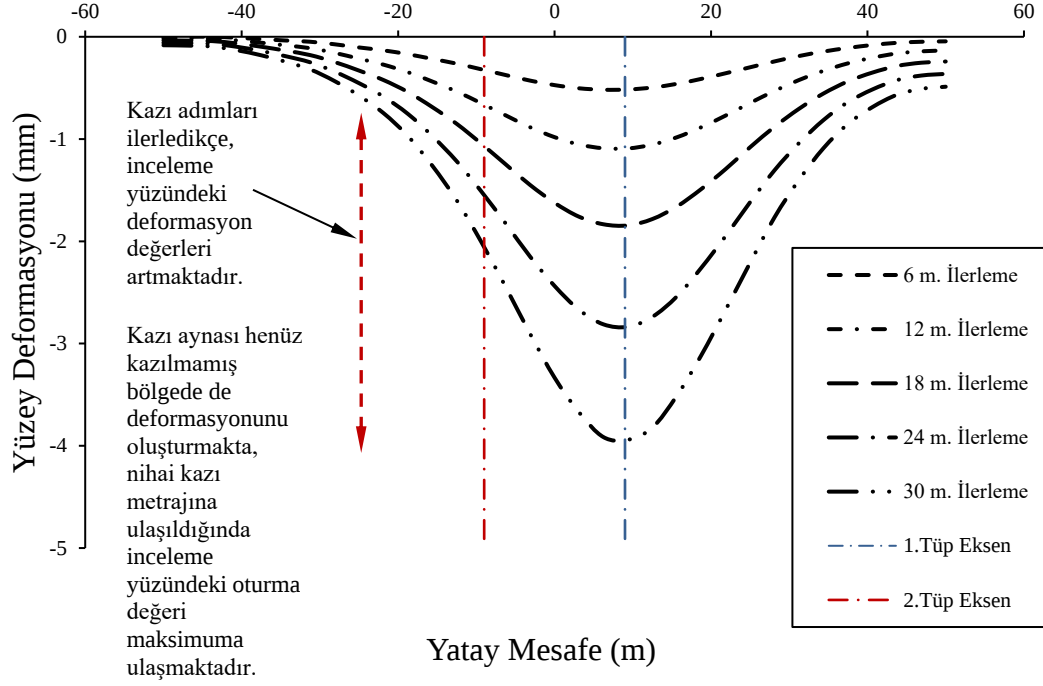
Şekil 5.26 'da birinci tüpün 30 metrelik kazısı neticesinde oluşan üç boyutlu deformasyon görseli verilmiştir. Şekil 5.24 incelendiğinde, birinci tüpün kazısı ilerletildikçe kazı başlangıcı olan sıfırıncı metrede (inceleme ön yüzü) enine oturma profilinin geliştiği gözlemlenmektedir.

Bu durum, desteklemesi gerçekleştirilen bölgede deformasyonların bir süre daha arttığına işaret etmektedir. Enine oturma profilleri incelendiğinde ilerleyen kazı adımlarına bağlı olarak gelişen deformasyon değerleri daha küçük bir ivme ile arttığı, arkada kalan bölgenin (desteklemesi tamamlanmış) deformasyonunu zaman içerisinde tamamlayarak stabil duruma geçmeye başladığı görülmüştür.

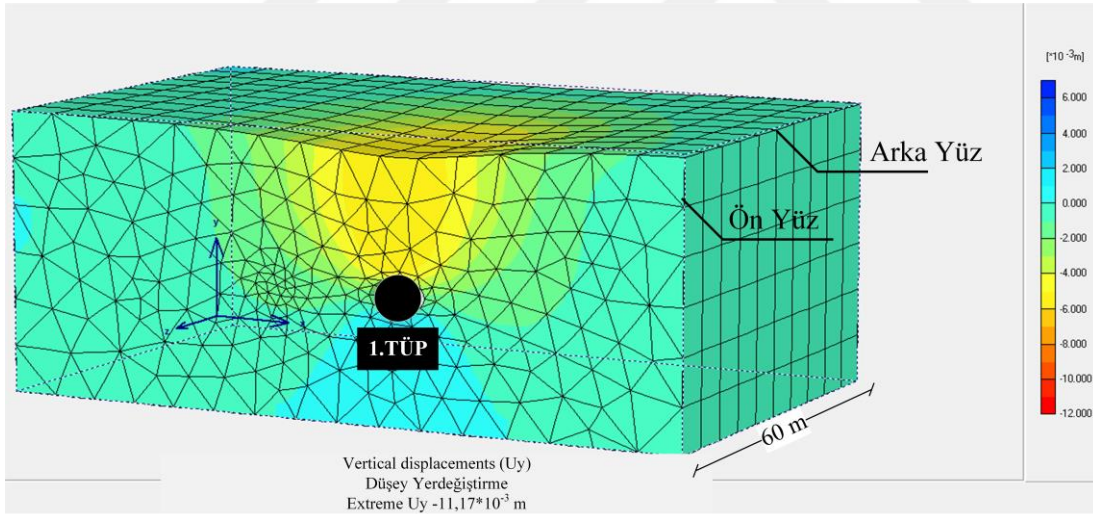


Şekil 5.24 : Model bloğunda, 1. Tüpün 6 m, 12 m, 18 m, 24 m ve 30 m'lik kazısı ve desteklemesi yapıldıktan sonra bloğun ön inceleme yüzeyde oluşan enine yüzey oturma profilleri.

Kazı aynasının ilerlediği otuzuncu metredeki arka inceleme yüzeyinde oluşan enine oturma profili (Şekil 5.25) incelendiğinde, henüz nihai kazı metrajına ulaşmamış tüpün inceleme hattında deformasyon oluşturduğu ve bu deformasyonun tünel aynası inceleme kesitine eriştiğinde maksimum seviyeye ulaştığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.25 : Model bloğunda, 1. Tüpün 6 m, 12 m, 18 m, 24 m ve 30 m'lik kazısı ve desteklemesi yapıldıktan sonra bloğun arka inceleme yüzeyde oluşan enine yüzey oturma profilleri.

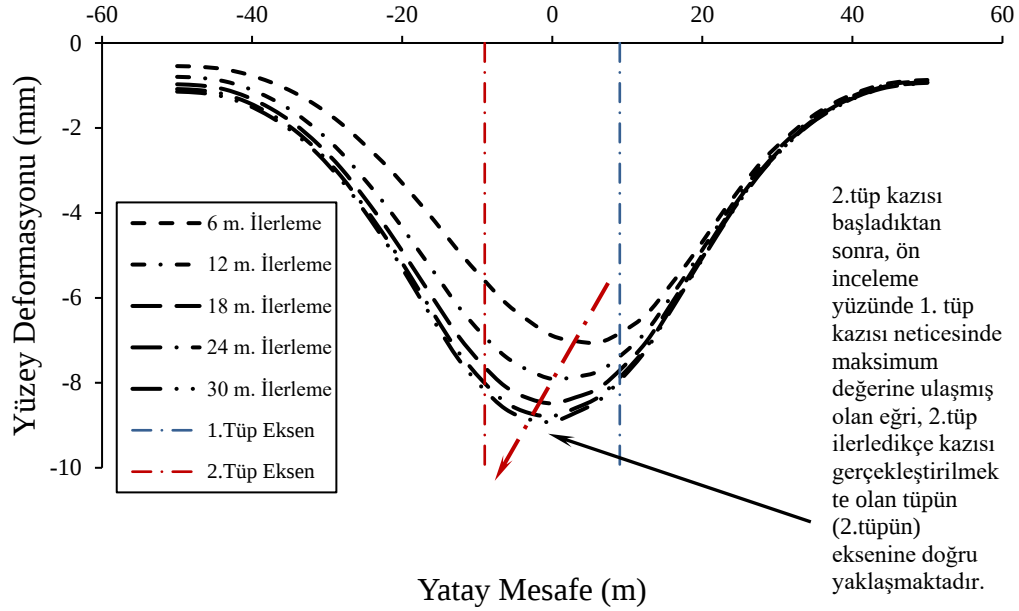


Şekil 5.26 : 1. tüp 30 metrelik kazı/destek üç boyutlu deformasyon görseli.

Şekil 5.27 ve Şekil 5.28' de 2. tüpün 6 m, 12 m, 18 m, 24 m ve 30 m kazı ve desteği gerçekleştirildikten sonra elde edilen ön inceleme ve arka inceleme yüzü yüzey deformasyon profilleri karşılaştırılarak belirtilmiştir. Şekil 5.29 'da 2. tüpün 30 metrelik kazısı neticesinde oluşan üç boyutlu deformasyon görseli belirtilmiştir.

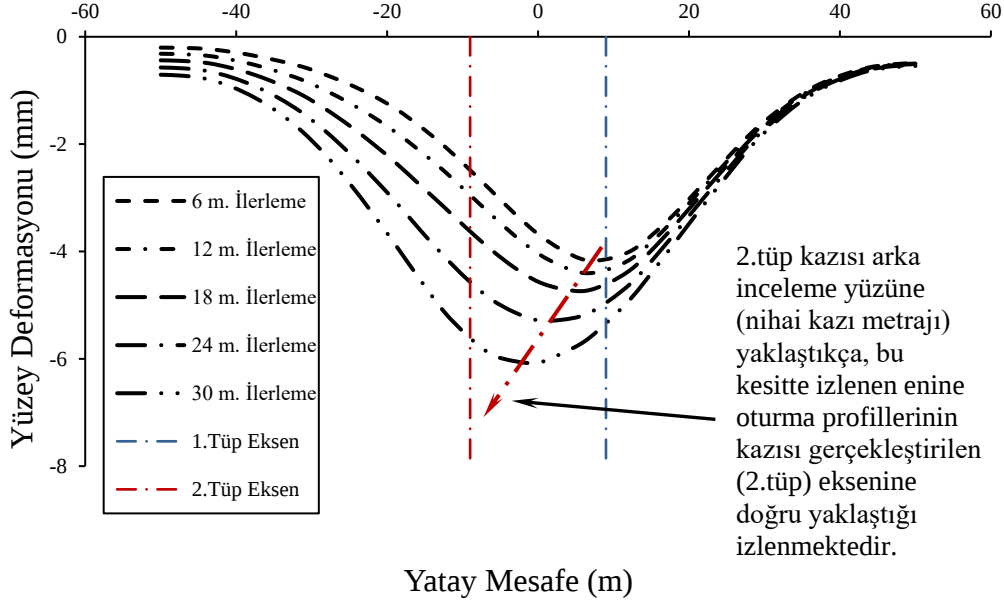
Şekil 5.27 incelendiğinde ikinci tüp kazısının başlaması ile birlikte kazı ve desteği tamamlanmış olan birinci tüpün üzerinde konsantre olmuş olan oturma eğrisinin, ikinci

tüp ilerlemesine paralel olarak bu tüpün eksenine yaklaştığı görülmektedir. Birinci tüp kazısı sonrası izlenen arkada kalan desteği tamamlanmış bölgenin kazı ilerledikçe azalan ivme ile deformasyonuna devam etmesi durumu bu kesitte de izlenmektedir.

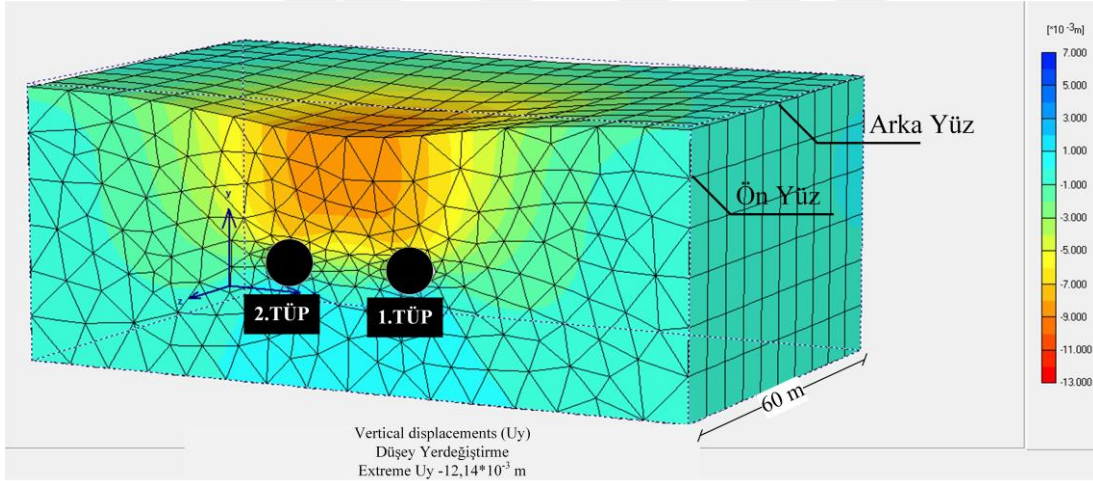


Şekil 5.27 : Model bloğunda, 2.tüpün 6 m, 12 m, 18 m, 24 m ve 30 m 'lik kazısı ve desteklemesi yapıldıktan sonra bloğun ön inceleme yüzeyde oluşan enine yüzey oturma profilleri.

Şekil 5.28'de belirtilen arka inceleme yüzünde oluşan enine oturma profili incelendiğinde, birinci tüp kazısında olduğu gibi ilerleyen tünel kazısı ile oturma değerlerinin arttığı görülmektedir. Oturma profilleri kazısı gerçekleştirilen tüp eksenine (ikinci tüp) doğru kaymaktadır. İkinci tüp kazısı sonucunda incelenen her iki kesitte de (ön ve arka inceleme yüzleri) beklendiği gibi maksimum yüzey deformasyon değerlerine ulaşılmıştır.



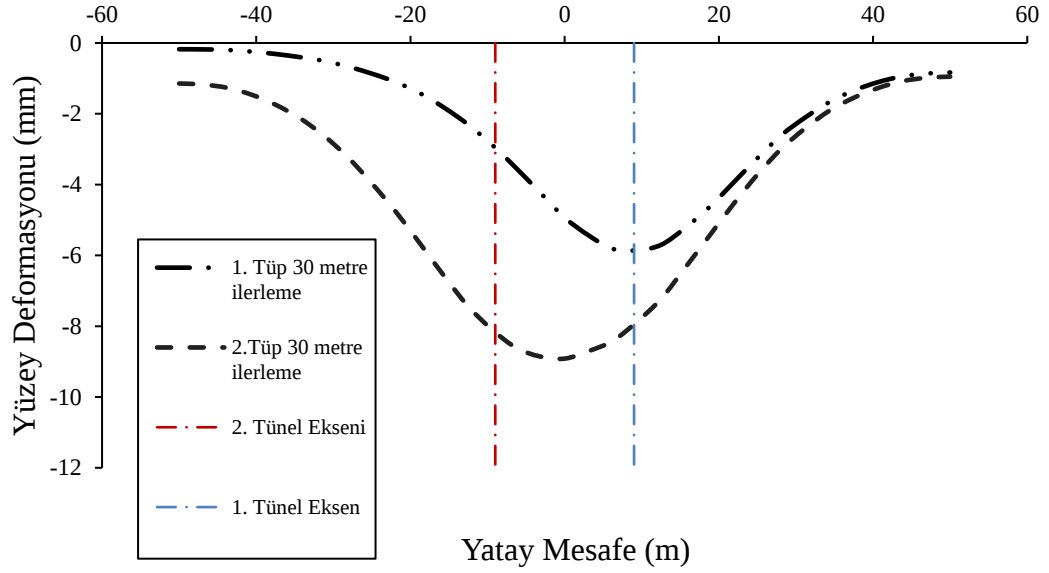
Şekil 5.28 : Model bloğunda 2.tüp 6 m, 12 m, 18 m, 24 m ve 30 m 'lik kazısı ve desteklemesi yapıldıktan sonra bloğun arka yüzeyde oluşan enine yüzey oturma profilleri.



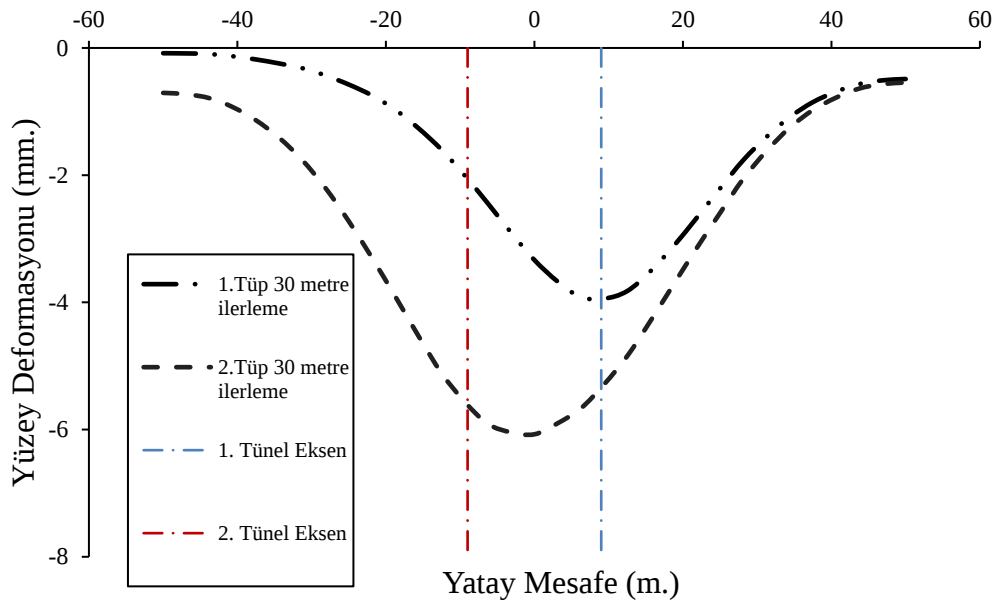
Şekil 5.29 : Her iki tünelin 30 metrelik kısmının tamamlanmasından sonra oluşan yüzey oturmalarının dağılımı.

Sırasıyla Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’de incelenen modelin ön yüzünde, birinci ve ikinci tüp kazılarından (30 metre ilerleme) sonra oluşan yüzey oturma şekilleri belirtilmiştir. Grafikler incelendiğinde, tünellerin çıkış noktası olan sıfırıncı metrede, kazılar bittikten sonra en büyük deformasyonların olduğu izlenmiştir. Bu durum, arkada kalan tahkimatı tamamlanmış bölgenin hem ilerlemekte olan kazılardan etkilendiği hem de tahkimat elemanlarının deformasyonunu bir süre daha sürdürmüş olmasıyla açıklanmaktadır.

Çizelge 5.11 ve 5.12’de üç boyutlu analizler neticesinde inceleme modelinin ön yüzünde ve arka yüzünde oluşan birinci tüpün ve ikinci tüpün oluşturduğu deformasyon miktarları karşılaştırılarak belirtilmiştir.



Şekil 5.30 : 1. ve 2. Tüp kazıları sonrası (30 m ilerleme) inceleme modelinin ön yüzünde oluşan oturma teknesi profilleri.



Şekil 5.31 : 1. ve 2. Tüp kazıları sonrası (30 m ilerleme) inceleme modelinin arka yüzünde oluşan oturma teknesi profilleri.

Çizelge 5.11 : Üç boyutlu analizler neticesinde ön yüzde oluşan 1. Tüp ve 2. Tüpün oluşturduğu maksimum deformasyon miktarları

Ön İnceleme Yüzü- 30 metre ilerlemeden sonra	
S_{max} – 1.Tüp kazısı sonrası oluşan	-5.9 mm
S_{max} – 2. Tüp kazısı sonrası oluşan	-8.9 mm
Ön Yüz – 1. ve 2. Tüp Deformasyon Farkı (mm)	-3
Ön Yüz – 1. ve 2. Tüp Deformasyon Farkı (%)	50.80

Çizelge 5.12 : Üç boyutlu analizler neticesinde arka yüzde oluşan 1. Tüp ve 2. Tüpün oluşturduğu maksimum deformasyon miktarları.

Arka İnceleme Yüzü- 30 metre ilerlemeden sonra	
S_{max} – 1.Tüp kazısı sonrası oluşan	-3.9 mm
S_{max} – 2.Tüp kazısı sonrası oluşan	-6.1 mm
Arka Yüz – 1. ve 2. Tüp Deformasyon Farkı (mm)	-2.2
Arka Yüz – 1. ve 2. Tüp Deformasyon Farkı (%)	56.41

5.4 İki Boyutlu ve Üç Boyutlu Sayısal Modellerin Karşılaştırılması

Tünel kazı aynasının ilerisinde, henüz kazısı gerçekleştirilmemiş bölgede deformasyonların oluşmaya başladığı bilinmektedir (Hoek, 1998). Bu deformasyonlar, kazı adımlarına paralel bir şekilde birikimli olarak artmakta ve tünel kazı aynasının henüz ulaşmadığı kazı hattı üzerinde yüzey oturmalarına sebebiyet vermektedir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) analizler arasındaki temel fark bu noktada ortaya çıkmaktadır. İki boyutlu analizler sırasında, ilerleyen tünel kazısına bağlı gelişen kümülatif deformasyonlar hesaba katılamazken, üç boyutlu analizlerde şayet model iyi kurgulanmışsa bu deformasyonlar da hesaplanabilmektedir.

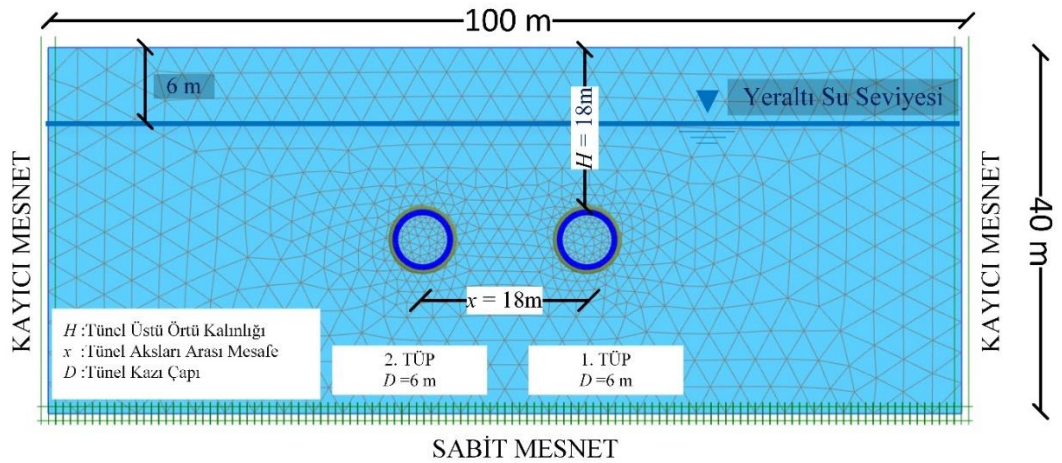
Bu başlık altında, iki boyutlu ve üç boyutlu analizler neticesinde hesaplanan deformasyon farklılıkları bir örnek model çalışması üzerinden incelenmektedir.

Bu kapsamda, tez çalışması dahilinde bölüm 5.3 altında incelenen üç boyutlu modelden elde edilen yüzey deformasyon profil verileri ile aynı ortamda (Çizelge 5.9), geometrik ve hidrolik girdi parametrelerine sahip iki boyutlu analizin sonuçları karşılaştırılmıştır.

İki ve üç boyutlu model sonuçları aşağıda sıralanan iki farklı durum için değerlendirilmiştir;

1. Üç boyutlu kazı modelinde belirtilen (Şekil 5.19), kazının başladığı ön inceleme yüzünün ilk 6 metrelik bölümü için gerçekleştirilen kazı/destek uygulaması sonucu oluşan yüzey deformasyonu ile iki boyutlu analiz sonucu oluşan yüzey deformasyon profilleri karşılaştırılmıştır.
2. Üç boyutlu kazı modelinde belirtilen (Şekil 5.19), kazının bittiği (30. metre) arka inceleme yüzü için gerçekleştirilen kazı/destek uygulaması sonucu oluşan yüzey deformasyonu ile iki boyutlu analiz sonucu oluşan yüzey deformasyon profilleri karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.32’de oluşturulan iki boyutlu modelin geometrik sınırları ve sınır koşulları belirtilmiştir. 100 m açıklığa 40 m derinliğe sahip modelde 1368 elemanlı, 11221 düğüm noktalı üçgen ağ yapısı kullanılmıştır. Yeraltı suyu seviyesi topoğrafik kottan 6 m aşağıda olacak şekilde seçilmiştir. Model çözümünde önce birinci tüp kazısı gerçekleştirilmiş ve tünel çeperinin üst kotunda tabanına doğru 200 kPa’dan 260 kPa’a doğru artacak şekilde iç basınç uygulanarak tünel açıklığının stabil kalması sağlanmıştır. Aynı işlemler ikinci tüp kazısı için de uygulanmış ve kazı destek işlemleri tamamlanmıştır. Analizler iki boyutlu modelleme için Plaxis 2B yazılımı, üç boyutlu analizler için Plaxis 3B Tunnel yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



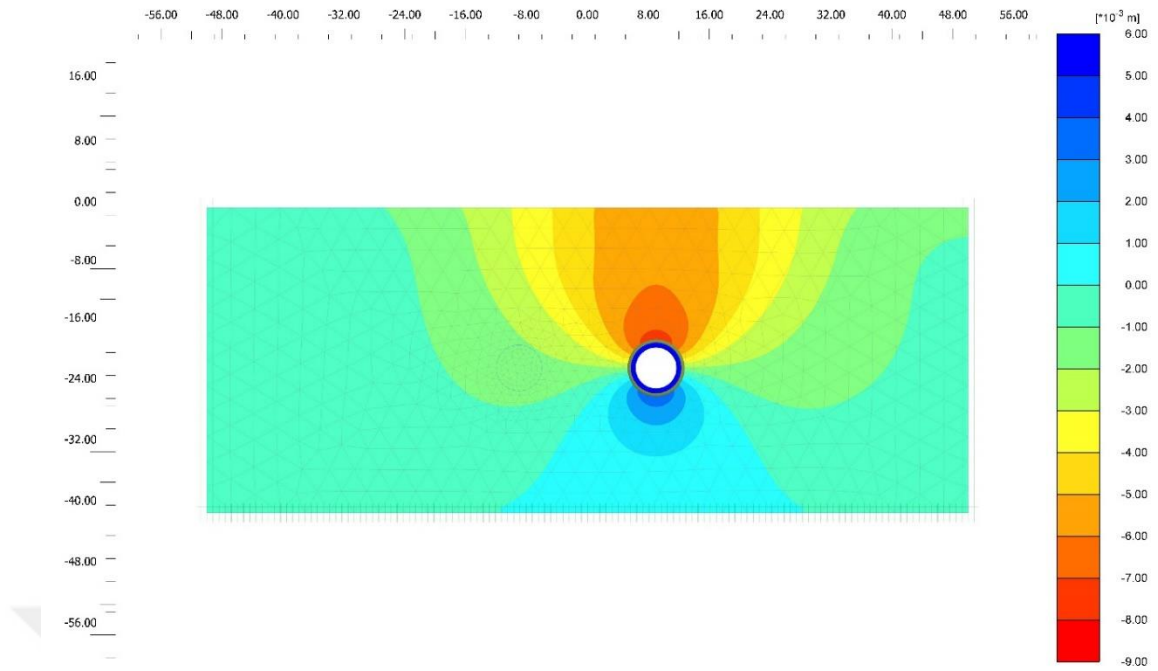
Şekil 5.32 : İki boyutlu model geometrisi ve sınır koşulları.

Şekil 5.33 ve 5.34’te iki boyutlu olarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar yöntemi çözümünün, birinci ve ikinci tünel kazılarına bağlı olarak jeolojik ortamda oluşturduğu düşey yer değiştirme değerleri sırasıyla belirtilmiştir.

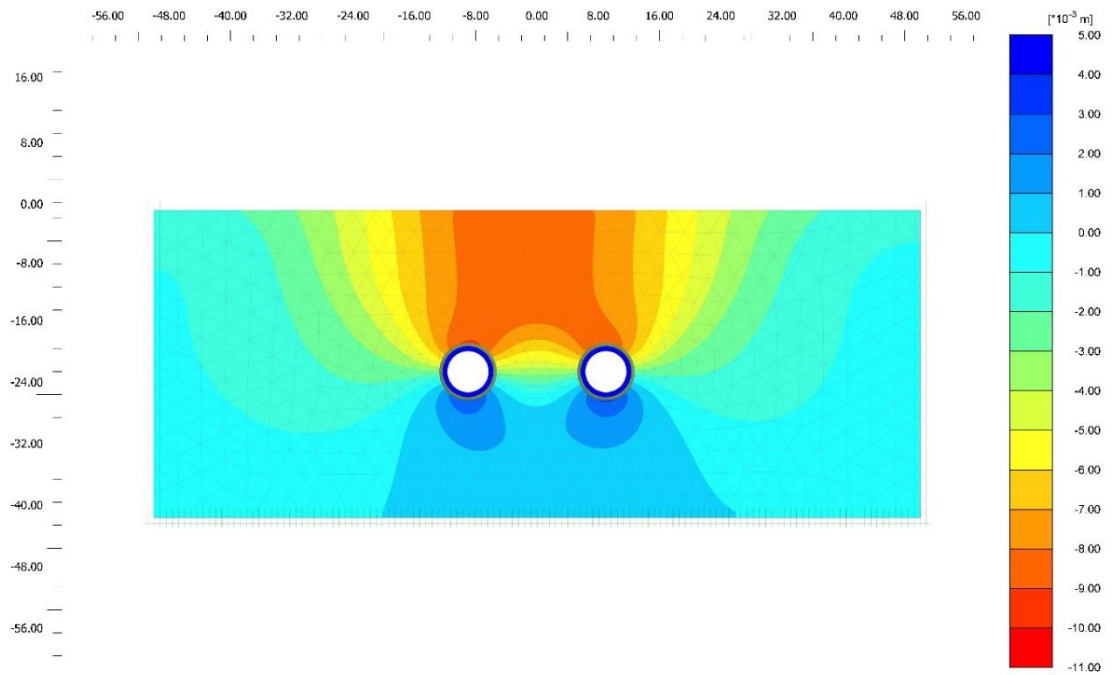
Sırasıyla üç boyutlu model çalışmasında referans olarak alınan ön ve arka yüze karşılık gelen iki boyutlu ve üç boyutlu analiz çıktıları Şekil 5.35, Şekil 5.36, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’de verilmiştir. Bu şekillerde gösterilen, iki ve üç boyutlu analiz sonuçları arasında belirgin bir farklılık olmamakla birlikte, üç boyutlu analizlerden elde edilen maksimum yüzey oturması değerlerinin iki boyutlu analizlere göre daha küçük olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.13 üzerinde elde edilen iki boyutlu ve üç boyutlu analiz sonuçlarının maksimum oturma değerleri karşılaştırmalı olarak belirtilmiştir. Sınırlı bir model üzerinde gerçekleştirilen karşılaştırmalar neticesinde, iki ve üç boyutlu analizler arasında ciddi bir farklılık oluşmadığı üç boyutlu analiz sonuçlarının iki boyutlulara nazaran daha düşük değerler sunduğu görülmüştür. Üç boyutlu analizler daha karmaşık modelleme adımları içermektedir (ayna ve enjeksiyon basıncının her adımda ayarlanması, segment ve koniklik etkisinin modele her ilerlemede işlenmesi vb.). Bu adımlar, model çıktısının doğruluk payını daha yüksek bir şekle getirmektedir. İki boyutlu ve üç boyutlu analizler arasında oluşan farklılıkların, hesaplama yöntemine göre (iki boyutlu, üç boyutlu) değişen gerilme (stress) dağılımı farklılıkları, jeolojik ortamda oluşan kemerlenmenin etkisi ve tünel kaplamasının tünel ilerlemesine bağlı olarak zamanla uğradığı deformasyonlardan kaynaklanmasıyla ilintilidir.

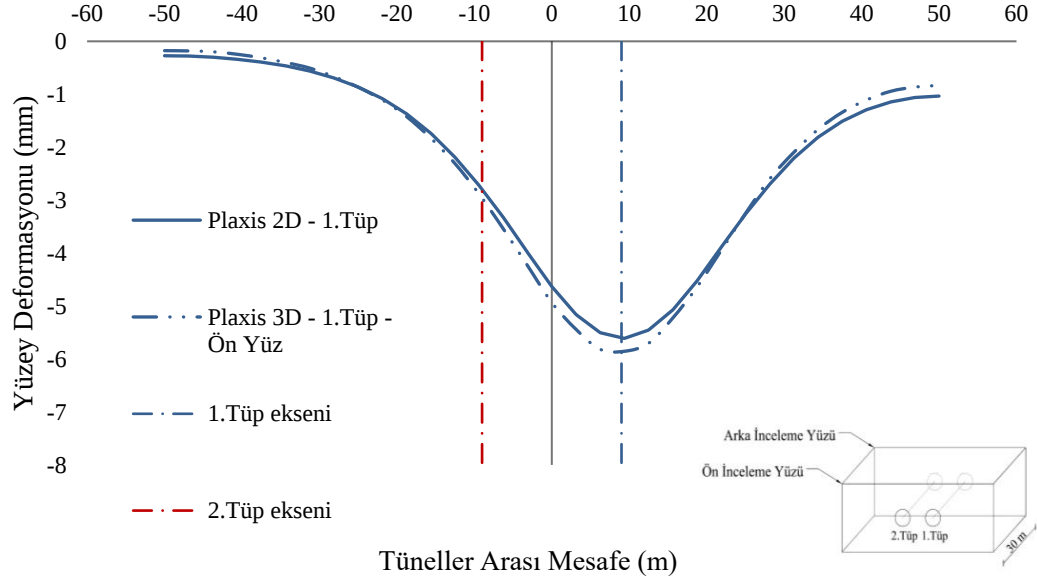
Gerçekleştirilen modelleme çalışmaları sonuçlarının birbirlerine yakın çıkması, modelleme adımlarının sürekli olması ve yapısal kusur içermeyen bir jeolojik ortamda kurgulanmalarıyla açıklanmaktadır. Bu durum, iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile sayısallaştırılan tünel kazılarının bahsedilen koşullar altında (süreklilik içeren jeolojik ortam ve modelleme adımları) birbirlerinin yerlerine kullanılabilecekleri sonucunu vermektedir. Üç boyutlu modellemenin daha çok tünel geometrilerinin değiştiği (genişleme, birleşme vb.), jeolojik ortamın ve jeoteknik parametrelerin değişime uğradığı geçiş bölgelerinde kullanılmasında fayda vardır.



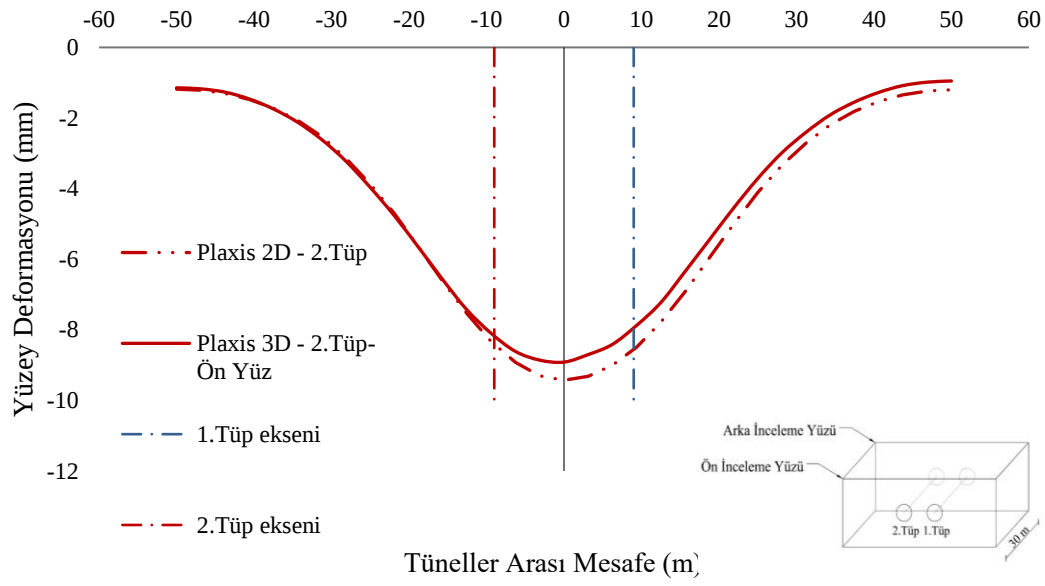
Şekil 5.33 : İki boyutlu analiz - 1.tüp kazısı neticesinde elde edilen düşey yer değıştirme değeri.



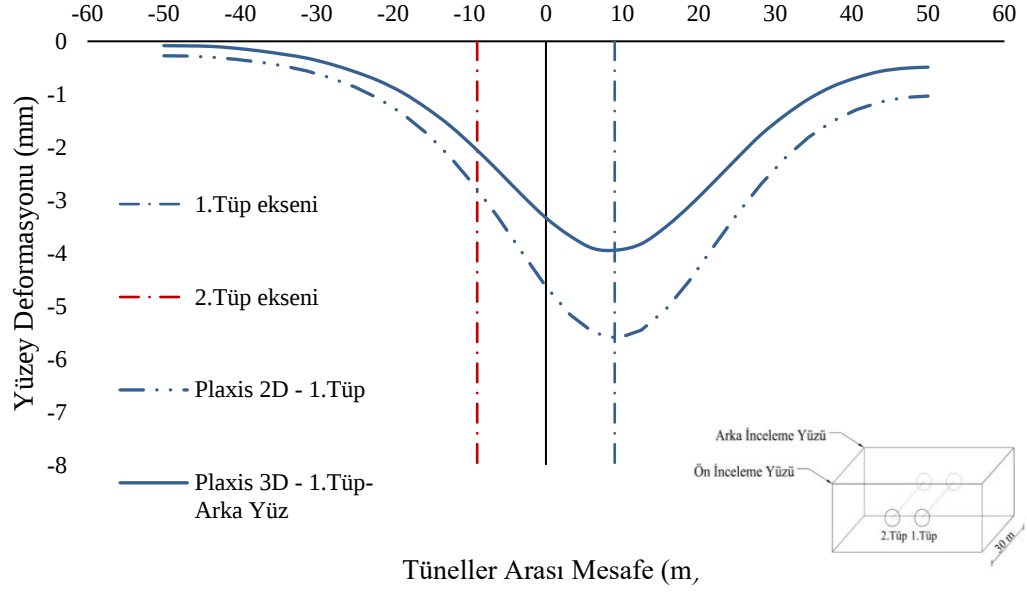
Şekil 5.34 : İki boyutlu analiz - 2.tüp kazısı neticesinde elde edilen düşey yer değıştirme değeri.



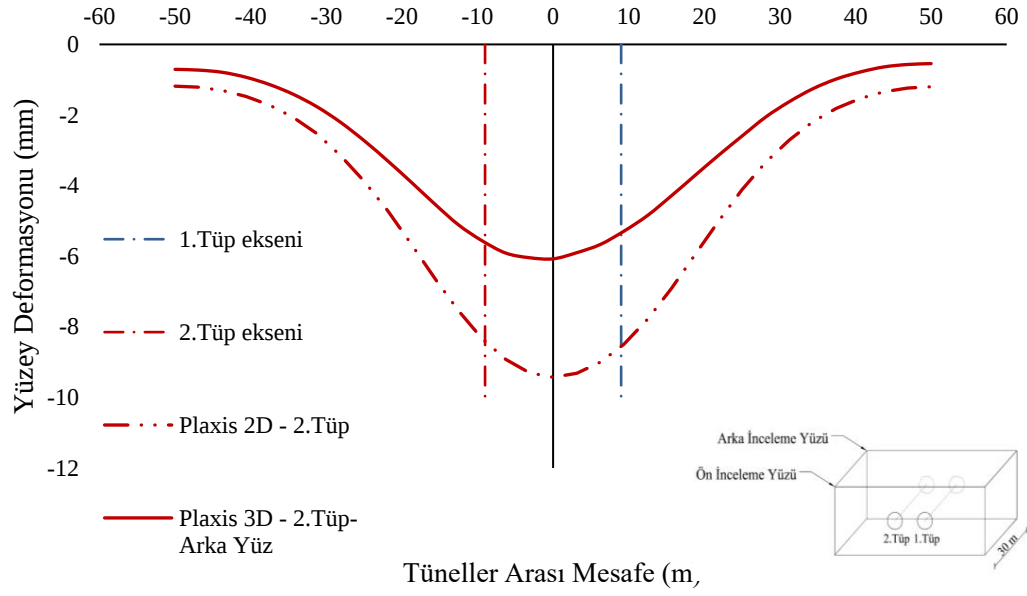
Şekil 5.35 : İki ve üç boyutlu analizlerin karşılaştırılması – 1.tüpler-ön yüz.



Şekil 5.36 : İki ve üç boyutlu analizlerin karşılaştırılması – 2.tüpler-ön yüz.



Şekil 5.37 : İki ve üç boyutlu analizlerin karşılaştırılması – 1.tüpler-arka yüz.



Şekil 5.38 : İki ve üç boyutlu analizlerin karşılaştırılması – 2.tüpler-arka yüz.

Çizelge 5.13 : İki boyutlu (2B) ve Üç Boyutlu (3B) sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Analizler		1.Tüp Kazısı S_{max}	2.Tüp Kazısı S_{max}
Plaxis 2B Analiz Sonucu		-5.61 mm	-9.44 mm
Plaxis 3B Analiz Sonucu	Ön Yüz	-5.85 mm	-8.92 mm
	Arka Yüz	-3.94 mm	-6.07 mm

6. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Ardıl açılan çoklu metro tünellerinde, ilk kazılan tünelin jeolojik ortamı örselemesinden dolayı aynı bölgeden geçen ikinci tünel kazısı sonucunda jeolojik ortamda oluşan deformasyon kümülatif olarak artmakta ve bu artış yüzey oturma eğri profilleri üzerinde asimetrik gelişen şekiller oluşturmaktadır. Tez çalışmasında bu durum teroik olarak ve güncel saha uygulamaları üzerinden sayısal ve ampirik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Bu kapsamda güncel uygulamalar için Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı üzerinde bulunan 4 farklı lokasyon, Ataköy-İkitelli Metro Hattı üzerinde bulunan 2 farklı lokasyon için toplam 12 kesit üzerinde inceleme gerçekleştirilmiştir.

Bu lokasyonların seçilme nedeni, biri diğerini arkadan takip eden ikiz metro tüneli kazılarının örtü kalınlıklarının az, yüzey oturmalarının izin verilebilir miktarları aşmış veya sınırında olan bölgeleri kapsamalarıdır. İnceleme bölgelerinde Miyosen yaşlı killi - siltli - kumlu Çukurçeşme ve Güngören Formasyonlarına ait jeolojik birimler hâkimdir.

Tez çalışması kapsamında, tünel kazıları süresince üst yapı ve altyapılarda hasara neden olabilecek yüzey deformasyonlarını kontrol altında tutmak amacıyla oluşturulan izleme ağından elde edilen veriler kullanılmıştır. İzleme verilerinden elde edilen oturma profilleri, 6 kesit için oluşturulan *FEM* analizlerinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemle belirlenen enine oturma teknesi dönüm noktası (*i*) ve zemin türünü temsil eden *K* parametrelerinin aldığı değerler Çizelge 6.1’de topluca verilmiştir.

Bölüm 4’te belirtilen, gerçek saha verilerinden elde edilen yüzey oturma grafikleri incelendiğinde, ilk tünel kazıları sonucu oluşan yüzey oturma profillerinin beklendiği gibi O'Reilly ve New (1982)’nin gerçekleştirdiği çalışmanın sonuçlarıyla uyumlu olarak geliştiği gözlenmektedir. Tez çalışmasının bir çıktısı olarak, bu uyumluluğun ikincil tünellerin açılması sonrası asimetrik bir şekil alarak değişime uğradığı belirlenmiştir.

Çizelge 6.1 : Gerçek saha verilerinden elde edilen yüzey oturma eğrisi (i) dönüm noktası ve yer malzemesi (K) parametrelerinin karşılaştırması.

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	$i_{2(btd)}$ (m)	$i_{2(btu)}$ (m)	$K_{2(btd)}$	$K_{2(btu)}$	$i_{3(btd)}$ (m)	$i_{3(btu)}$ (m)	$K_{3(btd)}$	$K_{3(btu)}$
Kirazlı- Olimpiyat- Başakşehir Metro Hattı	Km 0+900-1+000	Killi 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
		Killi 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
	Km 1+850-1+900	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	- ²	- ²
		Kum -Kumlu Siltli Sert Kil	B_2-B_2'	-2.5	14.8	17.3	2.66	9.23	0.534	- ²	- ²	- ²	- ²	- ²	- ²	- ²	- ²
	Km 4+360-4+470	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
		Kil-Sıkı Siltli Kum	C_4-C_4'	-14.2	14.8	19.4	2.98	10.77	0.555	9.23	8.77	0.476	0.452	17.69	8.92	0.912	0.460
	Km 9+800-9+740	Sıkı Kil-Killi 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-Killi 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
Ataköy İkitelli Metro Hattı	Km 8+760 – 8+860	Katı-Çok Katı Kil	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
	Km 9+740 – 9+800	Katı-Çok Katı Kil, Az Kumlu Siltli Kil	F_1-F_1'	-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 edilememiştir

² Bu lokasyonda sadece tek tünel ilerletilmiştir

$i = KZ_0$

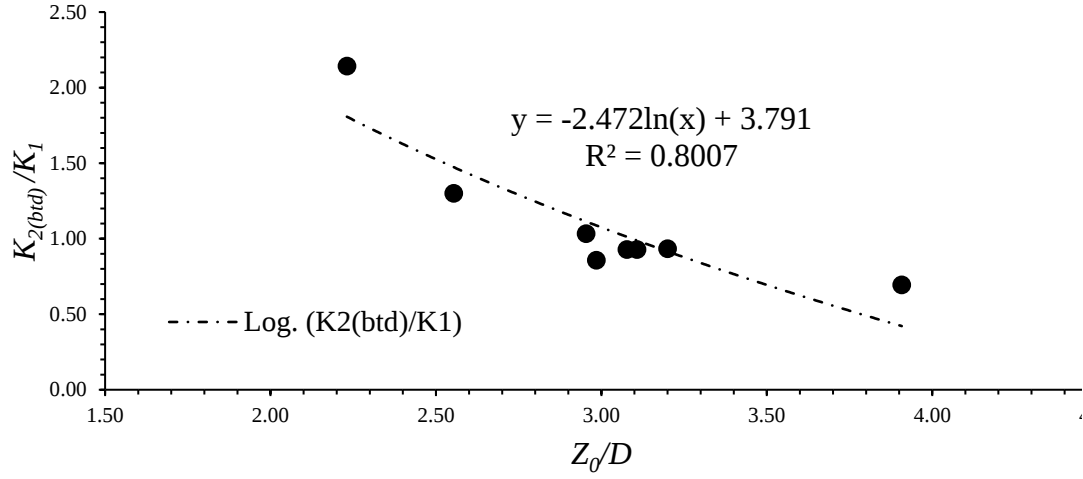
Tünel Kazı Çapı (D) = 6.5 m

Şekil 6.1 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. Şekil üzerindeki eğilimler incelendiğinde, $K_{2(btd)}$ ve K_1 arasındaki oranın, kazı derinliği arttıkça azaldığı Z_0/D 'nin 4'e yaklaştığı yerlerde oranın 0.69'a düştüğü, sığ derinliklerde ise bu oranın arttığı gözlenmiştir (Şekil 6.1(a)). Bu durum, sığ derinliklerde ikiz tünel kazılarının birbirleri üzerindeki etkisinin daha net olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

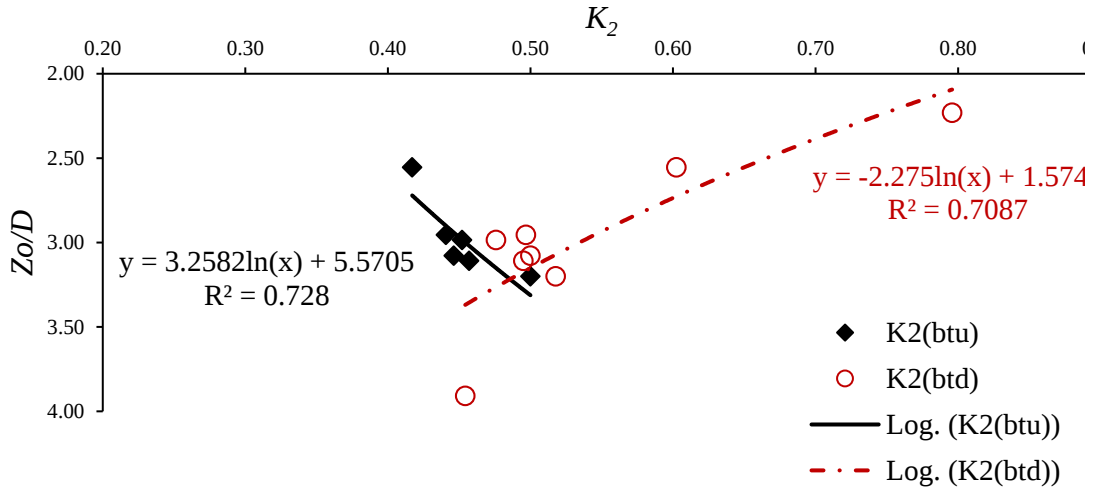
Şekil 6.1 (b), Çizelge 6.1 ile birlikte incelendiğinde, sadece ikinci tünellerin meydana getirdiği Gauss eğrisine ait $K_{2(btu)}$ ve $K_{2(btd)}$ değerlerinde asimetric bir farklılaşma olduğu görülmektedir.

$K_{2(btd)}$ için en büyük zemin parametresi (K) değeri 0.8 olarak hesaplanmıştır. Bu değerin, Z_0/D oranının 3.5'e yaklaştığı artan derinlik ile kademeli olarak $K_{2(btu)}$ 'ye yaklaşarak 0.45 düzeylerine indiği anlaşılmıştır.

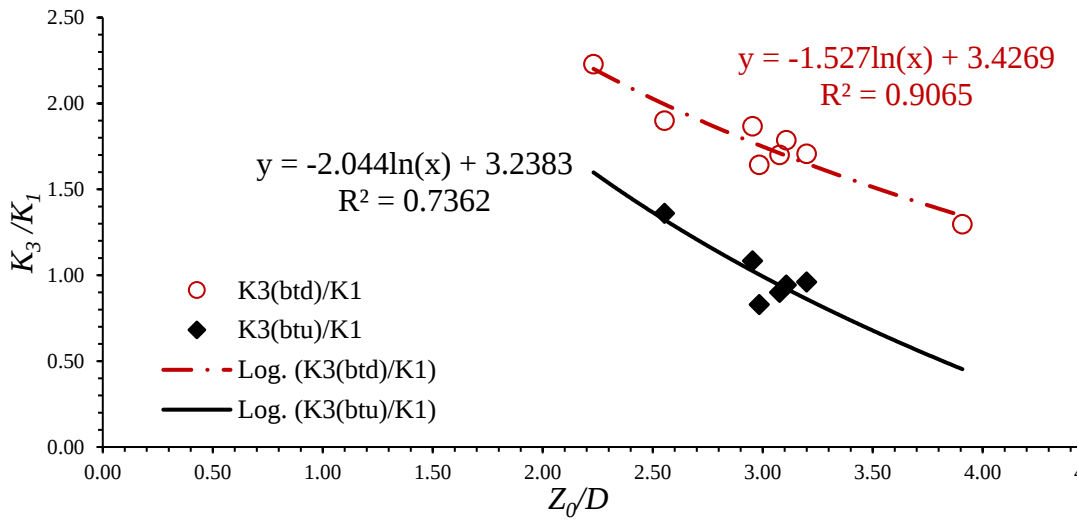
Şekil 6.1(c) üzerinde, birinci ve ikinci tünellerin geçişi sonrası oluşan toplam oturma profillerinden elde edilen K_3 değerleri ile sadece tek tünellerin geçişinden elde edilen K_1 değerleri Z_0/D oranı göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde ikinci tünel kazılarına bağlı olarak gelişen oturma eğrilerinin kanatlarında asimetriye bağlı farklılaşma olduğu anlaşılmaktadır.



a



b

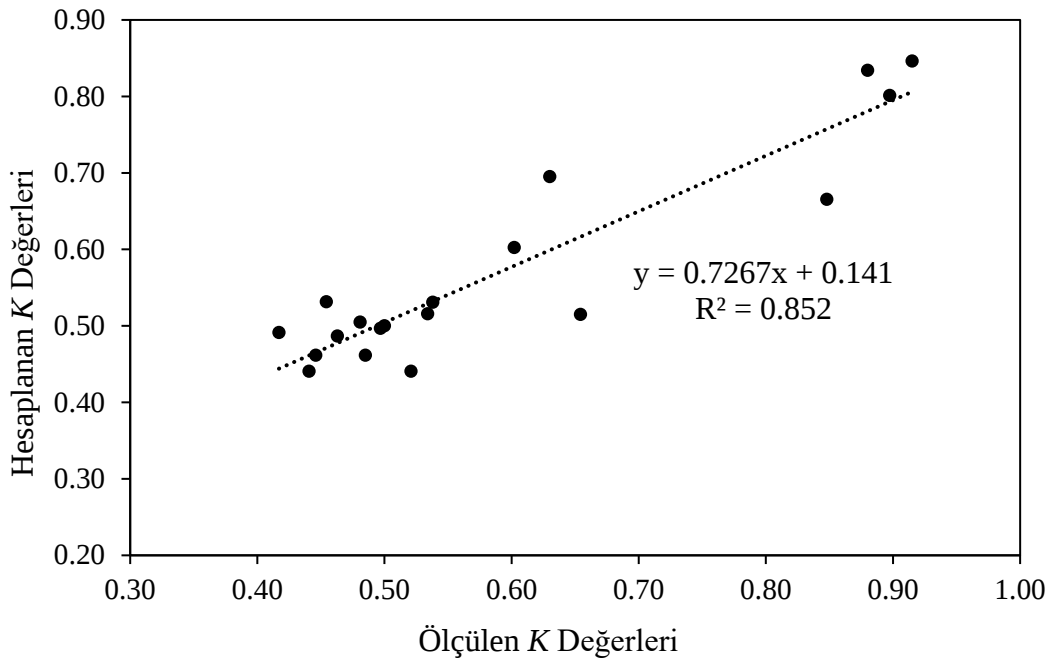


c

Şekil 6.1: K ve Z_0/D değerlerinin tünel kazılarının farklı kademeleri için karşılaştırılması.

Çizelge 6.2’de tez çalışması kapsamında sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar ile gerçek saha değerlerinden elde edilen çıktıların karşılaştırılması sunulmuştur. Çizelge incelendiğinde, D_1 - D_1' kesiti dışındaki, diğer kesitlerin K_1 , K_2 ve K_3 için gerçekleştirilen karşılaştırma değerlerinin birbirlerine çok yakın oldukları görülmektedir. D_1 - D_1' kesiti için *FEM* ile hesaplanan değerlerin gerçek saha verilerinden elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, $Z_0/D \approx 4.8$ değerine yaklaşılana gerçek kazı şartlarında, ortamdaki kemerlenmenin artan derinlikle örselenmeyi yüzeye daha az yansıtmasıyla açıklanmaktadır.

Şekil 6.2’de ölçülen değerlerden elde edilen çıktılar ile sonlu elemanlar yöntemi analizi ile elde edilen çıktılar arasındaki eşleşme belirtilmiştir. Grafiğin doğrusallığı incelendiğinde, bu iki analiz türü arasında kabul edilebilir bir uyum olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç, sonlu elemanlar yönteminin, tez kapsamında incelenen zayıf zemin koşullarında açılan ikiz tünellerin oluşturduğu yüzey oturmalarının kestirimi açısından $Z_0/D < 3.9$ güçlü bir araç olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 6.2 : Hesaplanan ve ölçülen K değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 6.2: İzleme verileri ve *FEM* analizinden elde edilen oturma eğrilerinin dönüm noktası (*i*) ve yer malzemesi parametresinin (*K*) değişimleri.

Kesit	Yöntem	<i>Zo/D</i>	Sadece Birinci Tünel		Sadece İkinci Tünel				İki Tünel Toplam			
			<i>i₁</i> (m)	<i>K₁</i>	<i>i_{1(btd)}</i> (m)	<i>i_{2(btu)}</i> (m)	<i>K_{2(btd)}</i>	<i>K_{2(btu)}</i>	<i>i_{3(btd)}</i> (m)	<i>i_{3(btu)}</i> (m)	<i>K_{3(btd)}</i>	<i>K_{3(btu)}</i>
A ₂ '-A ₂ '	Ölçülen	2.55	7.69	0.463	10.00	6.92	0.602	0.417	14.62	10.46	0.880	0.630
	<i>FEM</i>	2.55	8.08	0.487	10.00	8.15	0.602	0.491	13.85	11.54	0.834	0.695
B ₂ -B ₂ '	Ölçülen	2.66	9.23	0.534	Tek Tünel Kazısı							
	<i>FEM</i>	2.66	8.92	0.516	Tek Tünel Kazısı							
C ₃ -C ₃ '	Ölçülen	3.08	10.77	0.538	10.00	8.92	0.500	0.446	18.31	9.69	0.915	0.485
	<i>FEM</i>	3.08	10.62	0.531	10.00	9.23	0.500	0.462	16.92	9.23	0.846	0.462
D ₁ -D ₁ '	Ölçülen	4.82	7.69	0.246	8.46	8.46	0.270	0.270	13.85	11.54	0.442	0.369
	<i>FEM</i>	4.82	16.15	0.516	16.15	16.15	0.516	0.516	19.23	18.46	0.614	0.590
E ₁ -E ₁ '	Ölçülen	3.91	16.62	0.654	11.54	- ¹	0.454	- ¹	21.54	- ¹	0.848	- ¹
	<i>FEM</i>	3.91	13.08	0.515	13.50	12.00	0.531	0.472	16.90	13.5	0.665	0.531
F ₁ -F ₁ '	Ölçülen	2.95	9.23	0.481	9.54	8.46	0.497	0.441	17.23	10.00	0.897	0.521
	<i>FEM</i>	2.95	9.69	0.505	9.54	8.46	0.497	0.441	15.38	8.46	0.801	0.441

¹ Bu kesimde yüzey oturma noktalarının yerleşimine uygun lokasyonlar bulunmaması nedeniyle Gauss eğrisi elde edilememiştir.

7. SONUÇLAR

Ortaya konan sonuçlar, teorik olarak birbirine yakın, sık 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, kentiçi 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 hususlar dikkatli bir şekilde yönetilmezse kazı açıklığı çevresinde oluşan deformasyonlar artarak yüzeye yansıyacak ve bu durum proje emniyeti, süresi, bütçesi üzerinde olumsuz etkilere sebebiyet verecektir.

Deformasyon kontrolü için dikkat edilmesi gereken önemli hususlar aşağıda belirtildiği şekilde sıralanabilir;

- 1) Proje güzergahının jeolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik sınır koşulları dizayn aşamasından önce ayrıntılı şekilde araştırılmalıdır.
- 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) Dizayn aşamasında, proje gereksinimleri de göz önünde bulundurularak, tüneller arası kazı mesafesinin 3D'den büyük olacak şekilde seçilmesinde yüzeye yansıyacak deformasyonların minimize edilmesi adına fayda vardır.
- 6) Proje uygulama aşamasında, tünel içi jeolojik izleme çalışmaları sürekli ve uzmanlar kontrolünde gerçekleştirilmelidir.
- 7) Tünel içi yeraltısuyu kontrolü iyi yönetilmelidir. Pek çok durumda tünel boşluğuna drene olan su, üst tabakalardaki jeolojik ortamlarda konsolidasyon oturmalarına sebep olabilmektedir. Yeraltısuyu kontrollü karstik boşluklarla karşılaşılabilme durumları da göz önüne alınarak değerlendirilmelidir.
- 8) Tünel inşaat çalışmaları sırasında gerçekleştirilen aşırı ve kontrolsüz kazılar, yeraltında istenmeyen boşluklara ve bunların etkisi ile yüzeyde istenmeyen deformasyonlara sebebiyet verebilmektedir. Bundan dolayı, aşırı kazı, aşırı sökülme ve tünel hattından saparak ilerletilen tünel kazı aktivitelerinin önüne geçilmelidir.
- 9) 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

- AASHTO** (2002), Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition, American Association Of State Highway And Transportation Officials, Washington, DC.
- Anagnostou, G. & Kovari, K.,** (1996). Face stability conditions with Earth-PressureBalance shields. *Tunnelling & Underground Space Technology*, Vol. 11, No 2, AprilJune pp. 165-177
- Ariç, C.** (1955), *Haliç-Küçükçekmece Gölü Bölgesinin Jeolojisi*. (Doktora Tezi), İ.T.Ü Maden Fakültesi, İstanbul, 45 s.
- Arioglu, B., Yuksel, A., & Arioglu, E.** (2002). Determination of the inflection point of surface settlement curves at Mevhibe Inonu tunnel of Istanbul. *Sixth regional rock mechanics symposium*, 305–311.
- 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)*
- Atkinson, J. H., & Potts, D. M.** (1977). Subsidence above shallow tunnels in soft ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 103(Proc. Paper 11318 Proceeding).
- Attewell, P. B., Yeates, J., & Selby, A. R.** (1986). *Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures*. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(87\)90195-7](https://doi.org/10.1016/0886-7798(87)90195-7)
- Ayson Drill Research and Build. A.S.** (2005). Otogar-Bagcılar Station Geological-Geotechnical Report. July (in Turkish)
- Bakılar, G. S.** (2006). Bağcılar-İstoç İstasyonu Arası Jeolojik-Jeoteknik Araştırma Raporu. İstanbul: ELC Group.
- Bilgin, N., Copur, H., & Balci, C.** (2013). Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries. *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*. <https://doi.org/10.1201/b16083>
- Bowles J.E.** (1997). Foundation Analysis and Design , *Mc Grow Hill*, N.Y.
- Brinkgreve, R.** (2005). Computational Geotechnics for Experienced Users (Plaxis)
- Burland, J.** (2001). Assessment methods used in design. In Building response to tunnelling: case studies from construction of the Jubilee Line Extension, vol. 1, *projects and methods (eds J. Burland, J. Standing and F. Jardine)*, pp. 23–43. London, UK: Thomas Telford
- Burland, J. B., Standing, J. R., & Jardine, F. M.** (2001). Building response to tunneling—case studies from construction of the Jubilee Line Extension. London. Vol. 2, case studies.

- Carter, M., & Bentley, S. P.** (1991). Correlations of soil properties. *Correlations of soil properties*. Pentech Press Publishers: London.
- Demir, S.** (2018). İstanbul Metrosu Kirazlı-İkitelli Arasında İkiz Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Yüzey Oturmalarının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
- Divall, S.** (2013). Ground movements associated with twin-tunnel construction in clay. Ph.D. City University London. Retrieved from <http://openaccess.city.ac.uk/4785/>
- Divall, S., & Goodey, R. J.** (2015). Twin-tunnelling-induced ground movements in clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 168(3). <https://doi.org/10.1680/geng.14.00054>
- Divall, S., Goodey, R. J., & Stallebrass, S. E.** (2017). Twin-tunnelling-induced changes to clay stiffness. *Géotechnique*. <https://doi.org/10.1680/jgeot.sip17.p151>
- Duncan, J., & Chang, C.Y.** (1970). Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(5).
- Elmas, A., & Yiğitbaş, E.** (2001). Ophiolite emplacement by strike-slip tectonics between the Pontide Zone and the Sakarya Zone in northwestern Anatolia, Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 90(2), 257-269.
- Elwood, D. E., & Martin, C. D.** (2016). Ground response of closely spaced twin tunnels constructed in heavily overconsolidated soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 226-237.
- Emre, Ö., Erkal, T., Tchepalyga, A., Kazancı, N., Keçer, M., & Ünay, E.** (1998). Doğu Marmara Bölgesinin Neojen-Kuvaternerdeki Evrimi. *MTA Dergisi*, 120, 289-314.
- 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, Q., Tai, Q., Zhang, D., & Wong, L. N. Y.** (2016). Ground surface settlements due to construction of closely-spaced twin tunnels with different geometric arrangements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.10.031>
- 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>
- Fargnoli, V., Boldini, D., & Amorosi, A.** (2015). Twin tunnel excavation in coarse grained soils: Observations and numerical back-predictions under free field conditions and in presence of a surface structure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.06.003>
- Glossop, N.H.** (1978). Soil Deformation Caused by Soft Ground Tunnelling, PhD Thesis, University of Durham.

- Güven, G.** (2008). İstanbul Metrosu Otogar-Kirazlı 1 Arasının Mühendislik Jeolojisi Ve Tünel Kazılarına Bağlı Oluşan Deformasyonların Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
- Hamza, M., Ata, A., & Roussin, A.** (1999). Ground movements due to the construction of cut-and-cover structures and slurry shield tunnel of the Cairo Metro. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 14(3). [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(99\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(99)00044-9)
- Herzog, M.** (1985). Die Setzungsmulde über saicht liegenden Tunneln. *Bautechnik (Berlin, 1984)*, 62(11), 375–377.
- Hoek, E.** (1998). Tunnel support in weak rock. In Keynote address, Symposium of Sedimentary Rock Engineering, Taipei, Taiwan.
- Hunt, D.** (2005). Predicting the ground movements above twin tunnels constructed in London Clay (Doctoral dissertation, University of Birmingham).
- İ.B.B.** (2017). Ataköy–İkitelli Metro Hattı Güzergâhı Kesin Proje Jeolojik – Jeoteknik Etüt Raporu, İstanbul
- İ.B.B.** (2018). İstanbul Metropolitan Municipality Annual Report. İstanbul; 2018. <https://www.ibb.istanbul/Uploads/2019/4/IBB-FAALİYET-RAPORU-2018-new.pdf>. Accessed 10 March 2020
- Işık, N. S., Doyuran, V., & Ulusay, R.** (2004). Assessment of a coastal landslide subjected to building loads at Sinop, Black Sea region, Turkey, and stabilization measures. *Engineering geology*, 75(1), 69-88.
- ITA, International Tunneling Association,** (2000). Guidelines for the design of shield tunnel lining. Working Group No. 2, Tunnelling and Underground Space Technology, 15(3):303–331.
- Janbu, N.** (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. İçinde *Proceeding of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (C. 1, ss. 245–251).
- Jancsecz S., Steiner W.** (1994) Face support for a large Mix-Shield in heterogeneous ground conditions. In: Tunnelling '94. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2646-9_32
- JSCE, Japan Society of Civil Engineers,** (2007). Standard Specification for Tunnelling-2006:Shield Tunnels. ISBN: 978-4-8106-0568-6, 270 p.
- Karaman, A.** (2010), Kirazlı 1 – Başak 4 Metro Hattının Mühendislik Jeolojisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
- Leca, E., & Dormieux, L.** (1990). Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material. *Geotechnique*, 40(4). <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.4.581>
- Leca, E., & New, B.** (2007). Settlements induced by tunneling in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(2), 119–149.
- Leonards, G. A.** (1962). Foundation Engineering. McGraw-Hill, New York, 1136 pp.

- Mahmutoğlu, Y.** (2011). Surface subsidence induced by twin subway tunnelling in soft ground conditions in Istanbul. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 70(1), 115–131.
- Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L.,** (1996). Mechanized Shield Tunnelling. Ernst and Sohn, ISBN: 3-433-01292-X, 427 p.
- Mair, R. J., Taylor, R. N., & Burland, J. B.** (1996). Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*.
- 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, pp 191–205
- Moeinossadat, S. R., & Ahangari, K.** (2019). Estimating maximum surface settlement due to EPBM tunneling by Numerical-Intelligent approach—A case study: Tehran subway line 7. *Transportation Geotechnics*, 18, 92-102.
- Nyren, R.** (1998). Field measurements above twin tunnels in London Clay. PhD Thesis, Imperial College, London, UK
- O'Reilly, M. P., & New, B. M.** (1982). Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction. *Tunnelling '82. Papers presented at the 3rd international symposium*. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)91768-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)91768-0)
- Okay, A. I., TANSEL, İ.** (1992). New data on the upper age of the Intra-Pontide ocean from north of Şarköy (Thrace). *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 114(114), 23-26.
- Okay, A. I., Demirbağ, E., Kurt, H., Okay, N., & Kuşçu, İ.** (1999). An active, deep marine strike-slip basin along the North Anatolian fault in Turkey. *Tectonics*, 18(1), 129-147.
- Oteo, C., Amaiz, M., Trabada, J., & Melis, M.** (1999). The Madrid Model: A semi-empirical method for subsidence estimating. *Challenges for the 21st century*, Alten et. al.(eds), 163–169.
- Özgül, N.** (2011). İstanbul İl Alanının Jeolojisi: *İstanbul Büyükşehir Belediyesi. Planlama ve İmar Daire Başkanlığı Zemin ve Deprem İnceleme Müdürlüğü, İstanbul*, ix.
- Peck R. B., Hanson W. E. ve Thornburn T. H.** (1974). Foundation Engineering, John Wiley & Sons, New York.
- Peck, R. B.** (1969). Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 7(3).
- Perinçek, D.** (1991). Possible strand of the North Anatolian Fault in the Thrace Basin, Turkey—an interpretation. *AAPG bulletin*, 75(2), 241-257.
- Plaxis**, (2001). User Manual. Tunnel 3D version 1, (Edited by Brinkgrvee, R.J.B.) Delft University of Technology & Plaxis b.v., The Netherlands.
- Plaxis**, (2017). Plaxis 3D Tutorial Manual, Delft University of Technology & Plaxis b.v., The Netherlands.

- Plaxis**, (2018). User Manual. 2D version 8, (Edited by Brinkgrvee, R.J.B.) Delft University of Technology & Plaxis b.v., The Netherlands.
- Potts, D. M., & Zdravkovic, L.** (1999). Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory and Application. *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory and Application*.
- Rankin, W. J.** (1988). Ground movements resulting from urban tunnelling: Predictions and effects. *Geological Society Engineering Geology Special Publication*, 5. <https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.1988.005.01.06>
- Sakıncı, M., Yaltırak, C., & Oktay, F. Y.** (1999). Palaeogeographical evolution of the Thrace Neogene Basin and the Tethys–Paratethys relations at northwestern Turkey (Thrace). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 153(1-4), 17-40.
- Sayar, C.** (1976). Haliç ve Civarının Jeolojisi. B.Ü., İstanbul. Haliç sorunları ve Çözüm Yolları Ulusal Sempozyumu, 1976, İstanbul, s. 355-365
- Sayar, C.** (1989). İstanbul ve çevresi Neojen çökelleri ve Paratetis içindeki konumu, I.T.Ü. Maden Fakültesi 35. yıl Semp., 29-30 Haziran-1 Temmuz 1989, 250-266.
- Schanz, T., Vermeer, P. A., & Bonnier, P. G.** (1999). *The hardening soil model: Formulation and verification*. Balkema.
- Schmidt, B.** (1969). Settlements and ground movements associated with tunnelling in soil. *PhD Thesis*.
- Sorensen, K. K., & Okkels, N.** (2013). Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris* (Vol. 1, pp. 423-428).
- Sowers, G. F.** (1979). *Introductory soil mechanics and foundations: geotechnical engineering*. 4th ed. New York: Macmillan.
- Stroud, M. A.** (1974). The Standard Penetration Test in Insensitive Clays and Soft Rocks. 1st European Conference on Penetration Testing, Vol.1, pp. 372 – 373
- Sugiyama, T., Hagiwara, T., Nomoto, T., Nomoto, M., Ano, Y., Mair, R. J., Bolton, M. D., & Soga, K.** (1999). Observations of ground movements during tunnel construction by slurry shield method at the Docklands Light Railway Lewisham Extension-East London. *Soils and Foundations*, 39(3). https://doi.org/10.3208/sandf.39.3_99
- Swiss Standard, S. N.** (1999). 670 010b. *Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers*.
- Terzaghi, K., Peck, R.B.** (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, pp.729.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G.** (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.

- Tüysüz, O.** (2003). İstanbul için deprem senaryolarının hazırlanmasında coğrafi bilgi sistemlerinin kullanımı. İTÜ bilimsel araştırma projeleri birimi, İstanbul.
- Tüysüz, O., Barka, A., & Yiğitbaş, E.** (1998). Geology of the Saros graben and its implications for the evolution of the North Anatolian fault in the Ganos–Saros region, northwestern Turkey. *Tectonophysics*, 293(1-2), 105-126.
- Url-1**< <https://www.herrenknecht.com/en/home.html>>
- Url-2**<<http://www.crossrail.co.uk/news/articles/crossrail-casts-its-final-concrete-tunnel-segment> >
- Url-3**< <https://www.rocscience.com/>>
- Url-4**<<https://www.metro.istanbul/Hatlarimiz/HatDetay?hat=M3>>
- Url-5**<<https://www.metro.istanbul/YolcuHizmetleri/AgHaritalari>>
- Von Soos, P.** (1990). Properties of Soil and Rock (in German), Grundbau Taschenbuch Part 4. *Ernst & Sohn, Berlin*.
- Wan, M.S.P., Standing, J. R., Potts, D. M., & Burland, J. B.** (2017). Measured short-term subsurface ground displacements from EPBM tunnelling in London Clay. *Geotechnique*, 67(9), <https://doi.org/10.1680/jgeot.SIP17.P.148>
- Wang, Z., Yao, W., Cai, Y., Xu, B., Fu, Y., & Wei, G.** (2019). 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*, 83, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.021>
- West, T.R.** (1995) *Geology Applied to Engineering*. 1st Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, 560.
- Yaltırak, C., Alpar, B., & Yüce, H.** (1998). Tectonic elements controlling the evolution of the Gulf of Saros (northeastern Aegean Sea, Turkey). *Tectonophysics*, 300(1-4), 227-248.
- Yapı Merkezi,** (1992). İstanbul Metrosunda Yeryüzü Hareketlerinin Kestirimi, Yapı Merkezi AR-GE Bölümü, (Yayınlanmamış Rapor), İstanbul.
- Yavaş, F.** (2008), Tünel Açma Makinesi Kullanılarak Kazılan Otogar Kirazlı Tünelinde Karşılaşılan Jeoteknik Sorunlar, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
- Yiğitbaş, E., Elmas, A., & Yılmaz, Y.** (1999). Pre-Cenozoic tectono-stratigraphic components of the Western Pontides and their geological evolution. *Geological Journal*, 34(1-2), 55-74.
- Zhang, T., Taylor, R. N., Divall, S., Zheng, G., Sun, J., Stallebrass, S. E., & Goodey, R. J.** (2019). Explanation for twin tunnelling-induced surface settlements by changes in soil stiffness on account of stress history. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.12.015>

Zheng, Y. L., Zhang, Q. B., & Zhao, J. (2016). Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.023>





EKLER

EK A: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 0+900.00 – 1+000.00 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri

EK B: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 0+900.00 – 1+000.00 Arası Yüzey Oturma Değerleri

EK C: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 1+850.00 – 1+900.00 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri

EK D: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 1+850.00 – 1+900.00 Arası Yüzey Oturma Değerleri

EK E: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 4+360.00 – 4+470.00 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri

EK F: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 4+360.00 – 4+470.00 Arası Yüzey Oturma Değerleri

EK G: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 9+740 – 9+800 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri

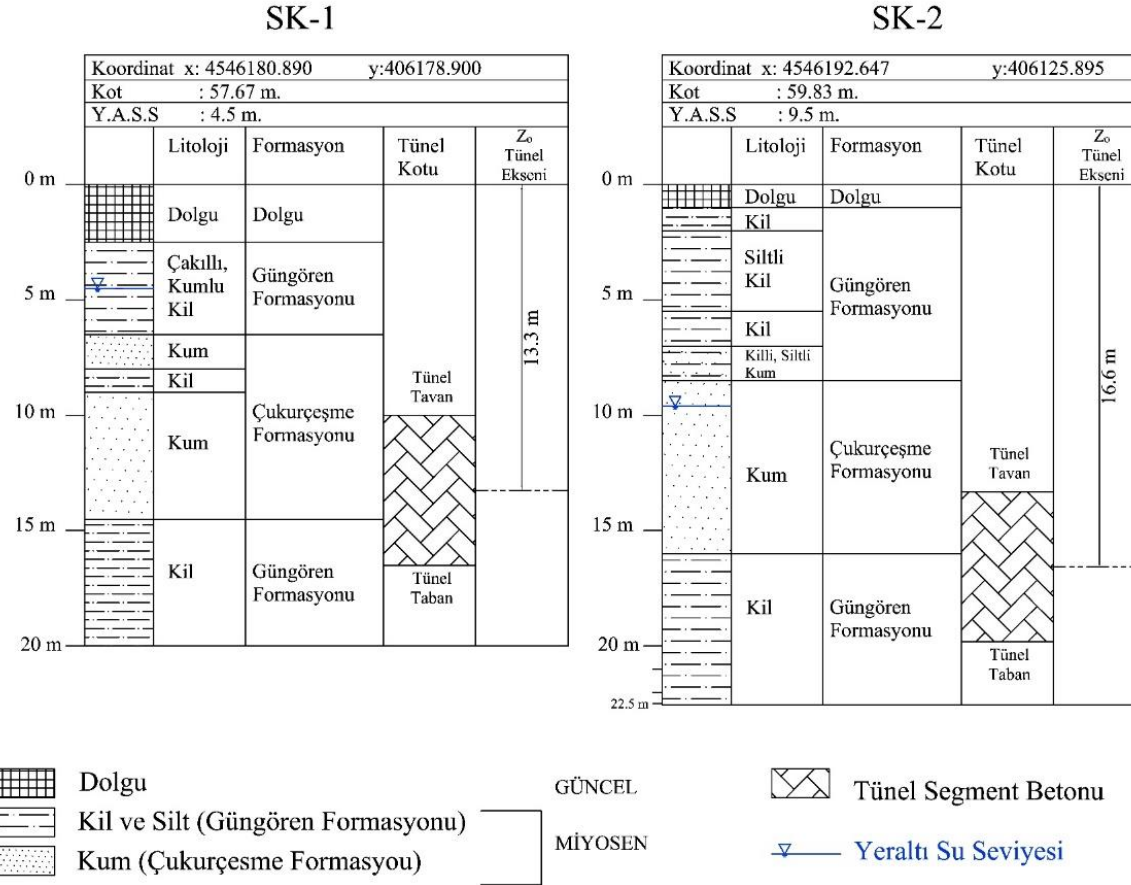
EK H: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 9+740 – 9+800 Arası Yüzey Oturma Değerleri

EK İ: Ataköy-İkitelli Metro Hattı Km 8+760.00 -8+860.00 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri

EK J: Ataköy-İkitelli Metro Hattı Km 9+660.00 – 9+ 780.00 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri



Ek A: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 0+900.00 – 1+000.00 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri



Şekil A.1: Hatta yakın açılan sondajlara ait loglar (Ayson,2005).

Çizelge A.1 : SK-1 ve SK-2 Sondajlarına Ait SPT Değerleri (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	N ₃₀ Darbe Sayısı	Sondaj No	Derinlik (m)	N ₃₀ Darbe Sayısı
SK 1	1,95	10	SK 2	1,95	7
SK 1	3,45	17	SK 2	3,45	17
SK 1	4,95	22	SK 2	4,95	26
SK 1	7,45	34	SK 2	6,45	26
SK 1	8,95	49	SK 2	7,95	54
SK 1	10,95	36	SK 2	9,45	63
SK 1	12,45	61	SK 2	10,95	73
SK 1	13,95	67	SK 2	12,45	65
SK 1	15,45	40	SK 2	13,95	54
SK 1	16,95	44	SK 2	15,45	50
SK 1	18,45	45	SK 2	16,95	40
SK 1	19,45	44	SK 2	18,45	38
			SK 2	20,45	41
			SK 2	22,45	49

Çizelge A.2 : SK-1 Ve SK-2 Sondajlarından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	Özgül Ağırlık G _s	Su İçeriği W _n (%)	Zemin Sınıfı
SK1	2,50-3,00	1,98	-	30,30	-
SK1	3,00-3,45	-	-	29,20	-
SK1	5,00-5,50	2,05	-	27,00	-
SK1	8,50-8,95	-	-	31,40	CL
SK1	10,00-10,50	-	2,63	27,60	-
SK1	10,50-10,95	-	-	32,80	CL
SK1	13,50-13,95	-	2,64	-	-
SK1	15,00-15,45	-	-	42,10	-
SK1	19,00-19,45	-	-	37,00	-

Çizelge A.2 (devam): SK-1 ve SK-2 Sondajlarından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	Özgül Ağırlık G _s	Su İçeriği W _n (%)	Zemin Sınıfı
SK2	2,50-3,00	1,89	-	30,20	-
SK2	3,00-3,45	-	-	-	-
SK2	4,50-4,95	-	-	-	-
SK2	5,00-5,50	1,82	-	31,20	-
SK2	7,50-7,95	-	2,65	28,80	ML
SK2	13,50-13,95	-	2,64	-	-
SK2	15,00-15,45	-	2,64	-	-

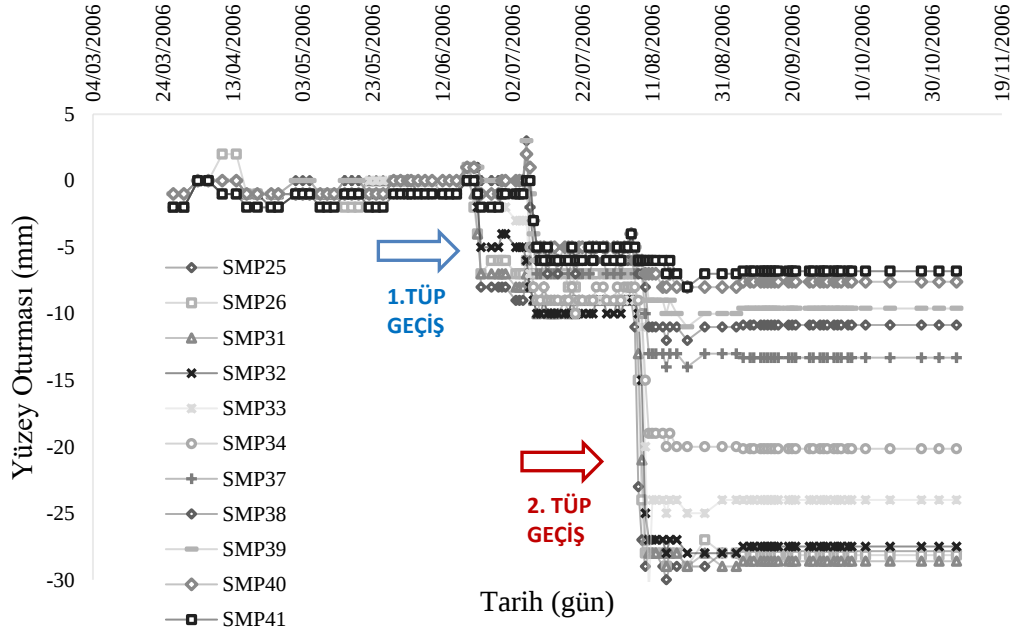
Çizelge A.3 : SK-1 ve SK-2 Sondajlarından Alınan Örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	Su İçeriği Wn (%)	Atterberg Limitleri			Elek Analizi		Zemin Sınıfı
			LL	PL	PI	+4	-200	
SK1	2,50–3,00	30,30	-	-	-	-	-	-
SK1	3,00–3,45	29,20	45	12	33	-	-	CL
SK1	4,50–4,95	-	64	18	46	-	-	CH
SK1	5,00–5,50	27,00	-	-	-	-	-	-
SK1	8,50–8,95	31,40	43	17	26	-	81	CL
SK1	10,00–10,50	27,60	-	-	-	-	52	-
SK1	10,50–10,95	32,80	41	12	29	-	63	CL
SK1	13,50–13,95	-	-	-	-	-	23	-
SK1	15,00–15,45	42,10	54	28	26	-	-	CL
SK1	19,00–19,45	37,00	66	27	39	-	-	CH

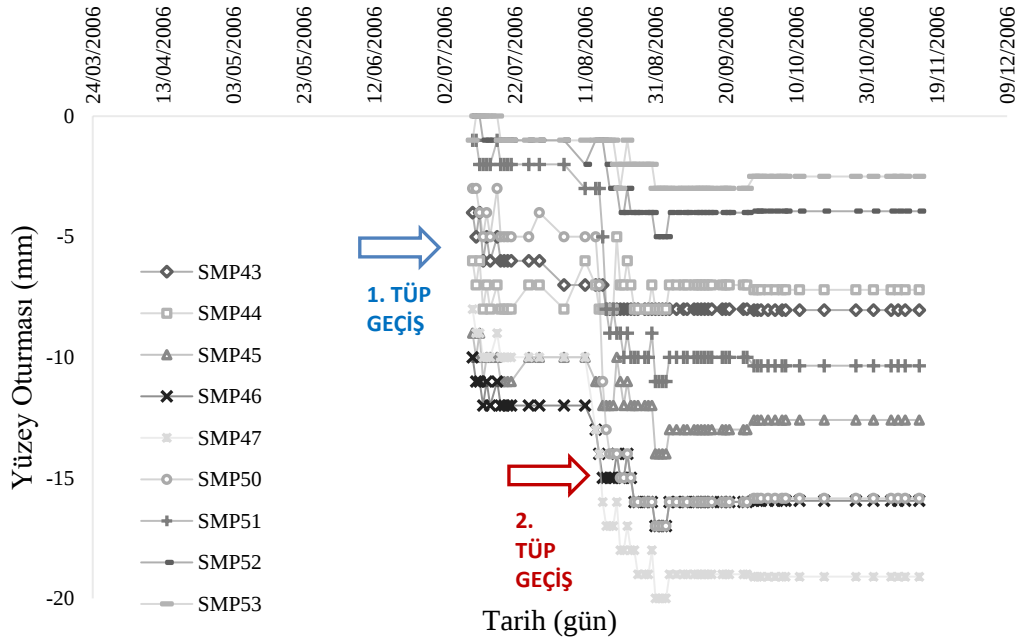
Çizelge A.3 (devam) : SK-1 ve SK-2 Sondajlarından Alınan Örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	Su İçeriği Wn (%)	Atterberg Limitleri			Elek Analizi		Zemin Sınıfı
			LL	PL	PI	+4	-200	
SK2	2,50–3,00	30,20	-	-	-	-	-	-
SK2	3,00–3,45		47	19	28	-	-	CL
SK2	4,50–4,95		51	20	31	-	-	CL
SK2	5,00–5,50	31,20	-	-	-	-	-	-
SK2	7,50–7,95	28,80	NP	NP	NP	-	53	ML
SK2	13,50–13,95		-	-	-	-	22	-
SK2	15,00–15,45		-	-	-	-	29	-

EK B: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 0+900.00 – 1+000.00 Arası Yüzey Oturma Değerleri



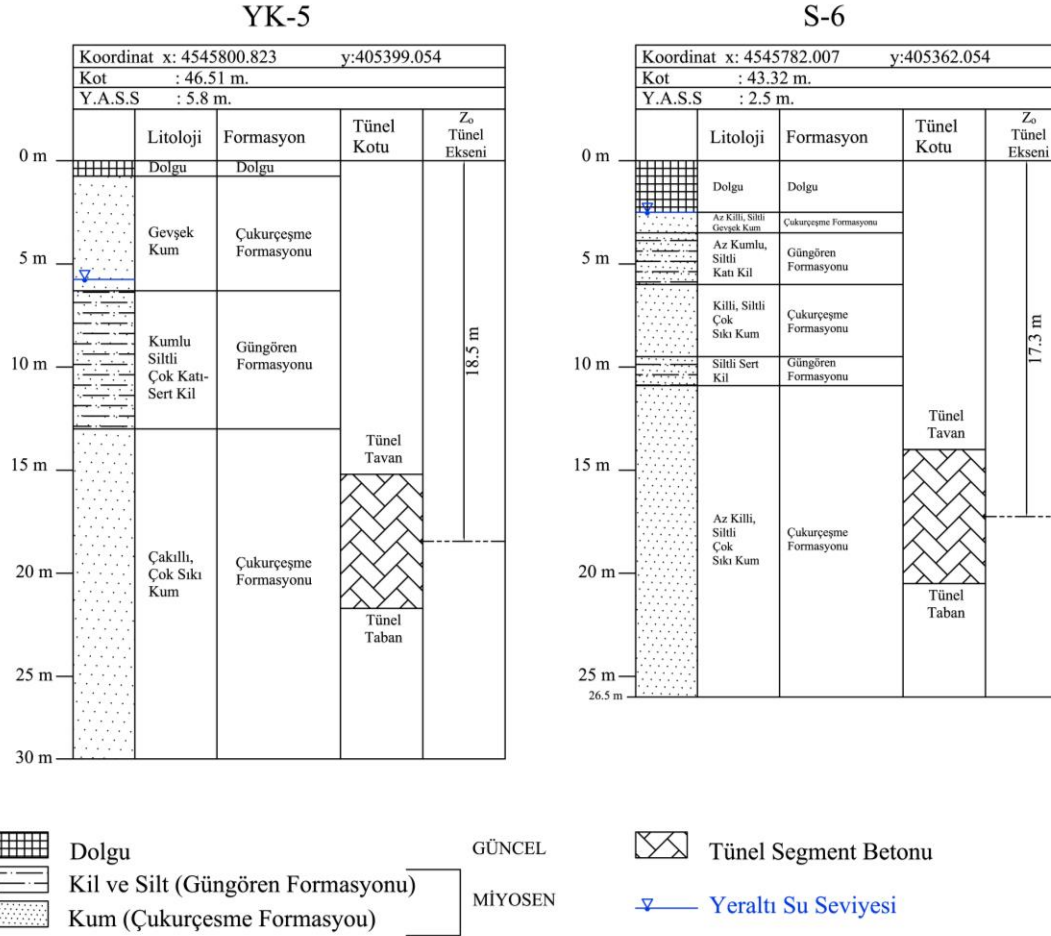
Şekil B.1 : A₁-A₁' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil B.2 : A₂-A₂' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.



EK C: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 1+850.00 – 1+900.00 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri



Şekil C.1 : Hattı yakın açılan sondajlara ait loglar (Ayson,2005).

Çizelge C.1 : YK-05 ve S-6 sondajlarına ait SPT değerleri (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	N ₃₀ Darbe Sayısı
YK 05	1,95	5
YK 05	3,45	8
YK 05	4,95	9
YK 05	6,45	14
YK 05	7,95	18
YK 05	9,45	21
YK 05	10,95	42
YK 05	12,45	59
YK 05	13,95	67
YK 05	15,45	75
YK 05	16,95	67

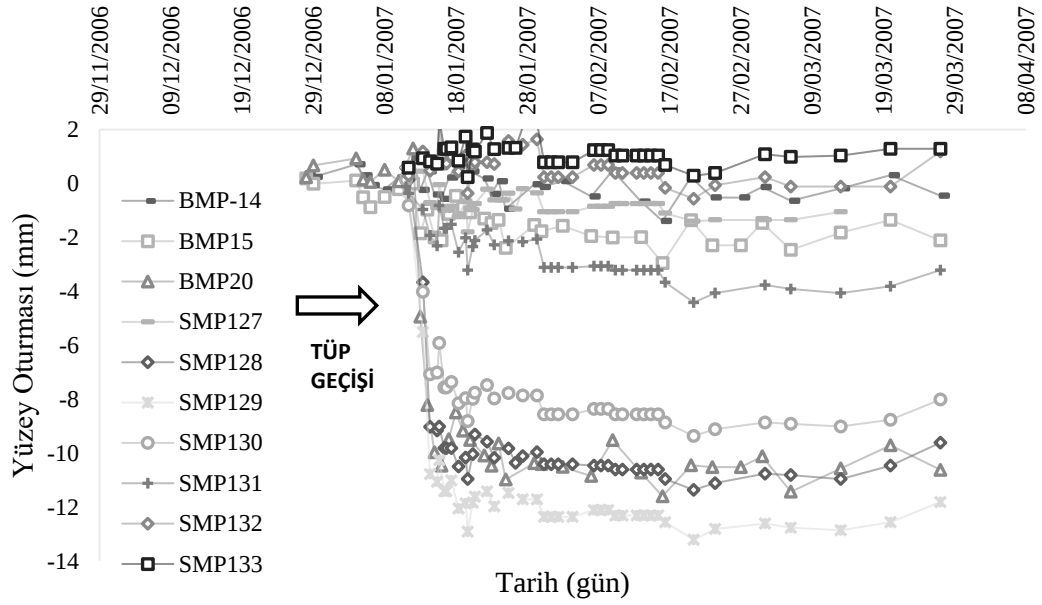
Çizelge C.1 (devam) : YK-05 ve S-6 sondajlarına ait SPT değerleri (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	N ₃₀ Darbe Sayısı
YK 05	18,45	73
YK 05	19,95	69
YK 05	21,25	>50
YK 05	22,95	81
YK 05	24,45	86
YK 05	25,95	78
YK 05	27,45	79
YK 05	28,45	>50
S6	1,50	19
S6	3,00	8
S6	4,50	16
S6	6,00	>50

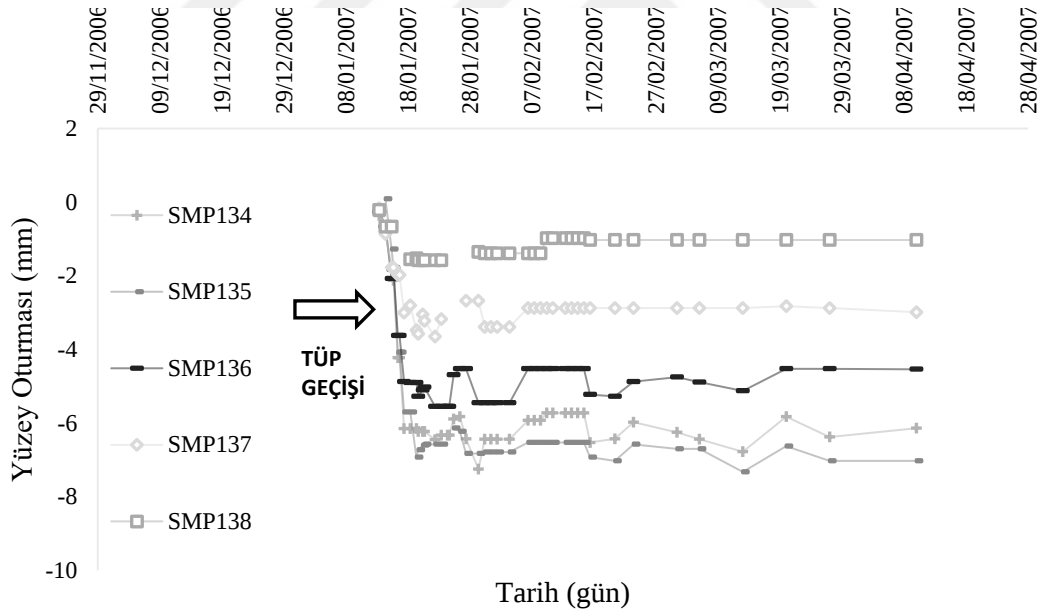
Çizelge C.1 (devam) : YK-05 ve S-6 sondajlarına ait SPT değerleri (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	N ₃₀ Darbe Sayısı
S6	7,50	>50
S6	9,00	>50
S6	10,50	72
S6	12,00	>50
S6	13,50	>50
S6	15,00	>50
S6	16,50	>50
S6	18,00	>50
S6	19,50	>50
S6	21,00	>50
S6	22,50	>50
S6	26,00	>50

**EK D: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 1+850.00 – 1+900.00 Arası
Yüzey Oturma Değerleri**



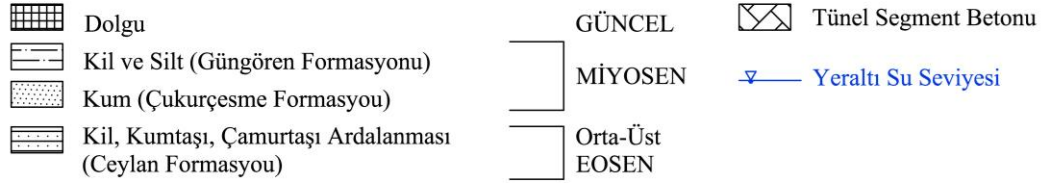
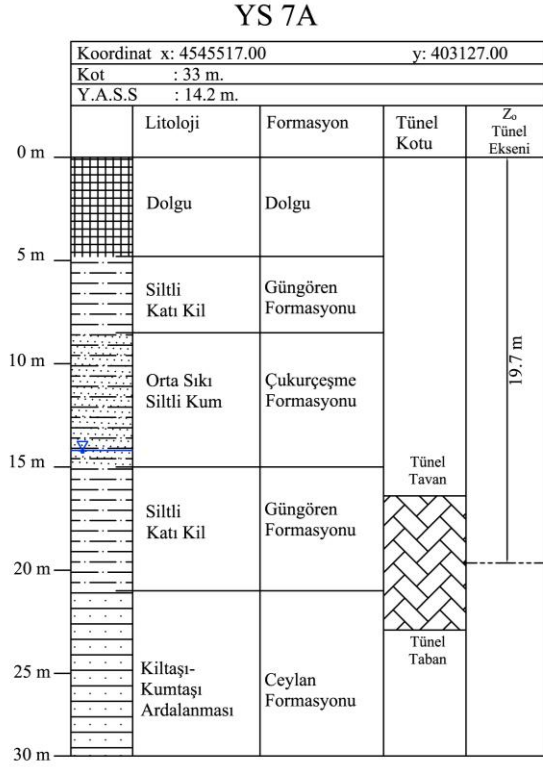
Şekil D.1 : B₁-B₁' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil D.2 : B₂-B₂' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.



EK E: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 4+360.00 – 4+470.00 Arası
Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri



Şekil E.1 : YS 7A sondajına ait log (Ayson, 2005).

Çizelge E.1 : YS-7A Sondajına Ait SPT Değerleri (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	N ₃₀ Darbe Sayısı	Litoloji
YS 07A	1,50	8	Dolgu
YS 07A	3,00	24	Dolgu
YS 07A	4,50	14	Dolgu
YS 07A	6,00	13	Kil
YS 07A	7,50	14	Kil
YS 07A	9,00	30	Kil
YS 07A	10,50	37	Kil
YS 07A	12,00	>50	Kil
YS 07A	13,50	29	Kil
YS 07A	15,00	28	Kil
YS 07A	16,50	27	Silt
YS 07A	18,00	34	Silt
YS 07A	19,50	34	Silt
YS 07A	21,00	>50	Silt

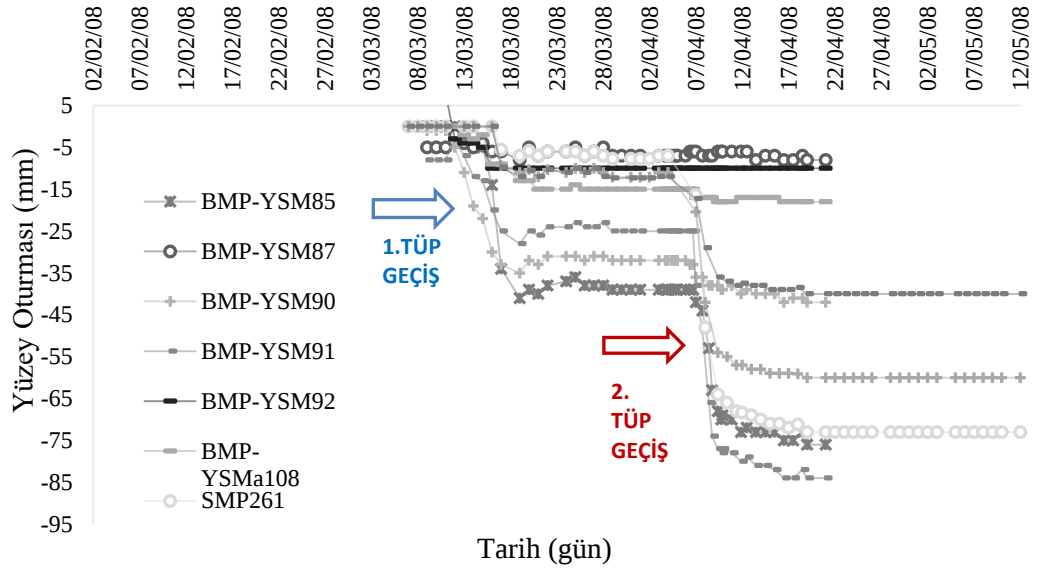
Çizelge E.2 : YS-7A Sondajından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	Özgül Ağırlık Gs	Su İçeriği Wn (%)	Zemin Sınıfı
YS 07A	3.00	-	2.673	26.96	CH
	4.50	1.802	-	27.50	CH
	6.00	-	2.681	24.31	CH
	7.50	-	2.659	21.42	CL
	9.00	-	2.651	22.36	CL
	12.00	-	2.656	22.93	CL
	13.50	-	2.652	21.98	CL
	15.00	-	2.664	22.67	CL
	16.50	1.917		25.74	MH
	18.50	1.947	-	26.55	MH

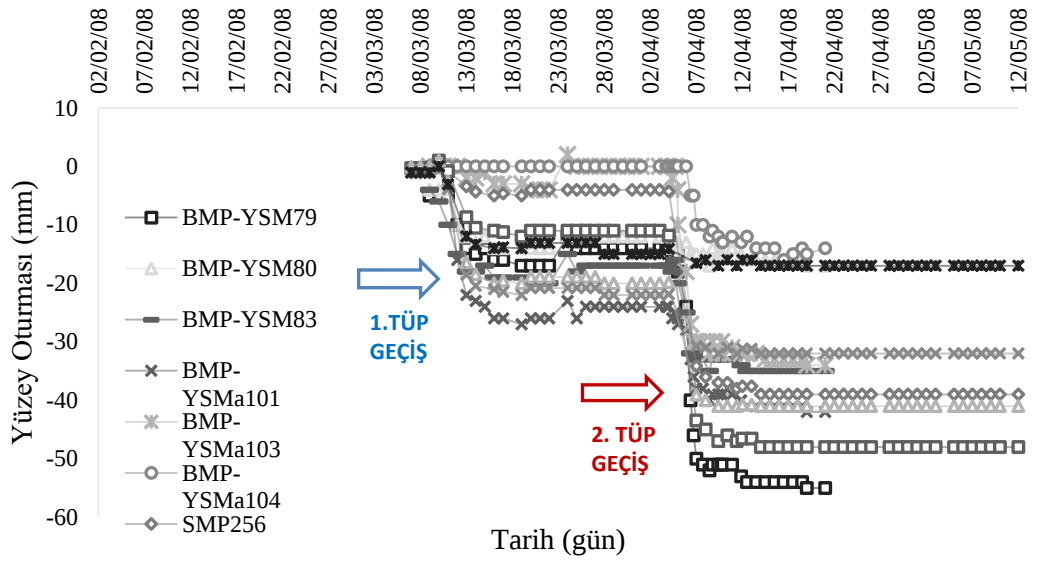
Çizelge E.3 : YS-7A sondajından alınan örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları (Ayson, 2005).

Sondaj No	Derinlik (m)	Su İçeriği W _n	Atterberg Limitleri			Elek Analizi		Zemin Sınıfı
			LL	PL	PI	+4	-200	
YS-07A	3.00	26.96	58.37	22.61	35.76	-	-	CH
	4.50	27.50	51.76	21.24	30.51	-	-	CH
	6.00	24.31	53.97	23.27	30.70	-	-	CH
	7.50	21.42	37.85	21.40	16.44	15.17	52.65	CL
	9.00	22.36	35.59	22.11	13.48	22.46	51.65	CL
	12.00	22.93	38.18	23.51	14.67	5.21	52.43	CL
	13.50	21.98	37.45	23.69	13.76	17.01	53.72	CL
	15.00	22.67	36.74	21.24	15.51	0.00	51.96	CL
	16.50	25.74	57.24	31.71	25.53	-	-	MH
	18.50	26.55	61.87	33.57	28.29	-	-	MH

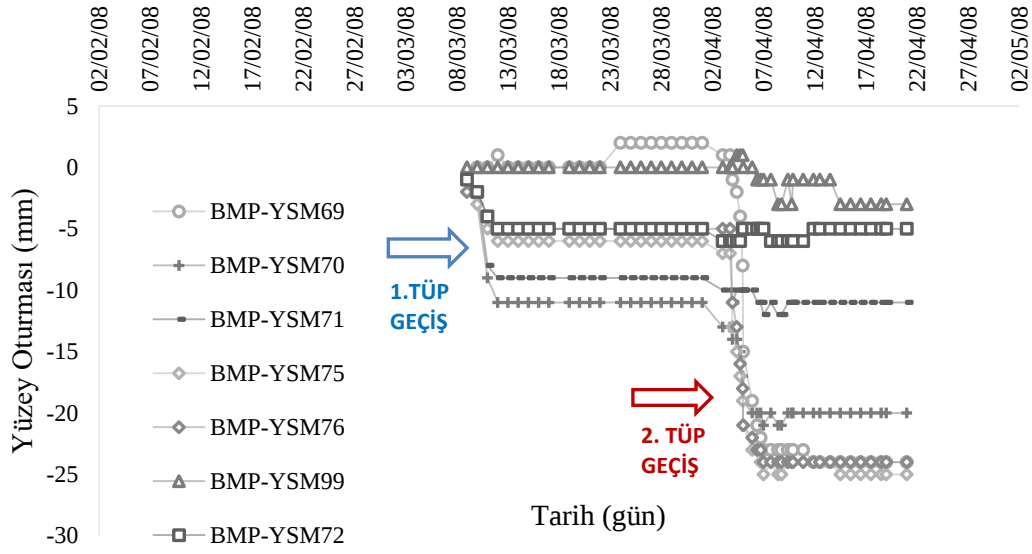
EK F: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 4+360.00 – 4+470.00 Arası
Yüzey Oturma Değerleri



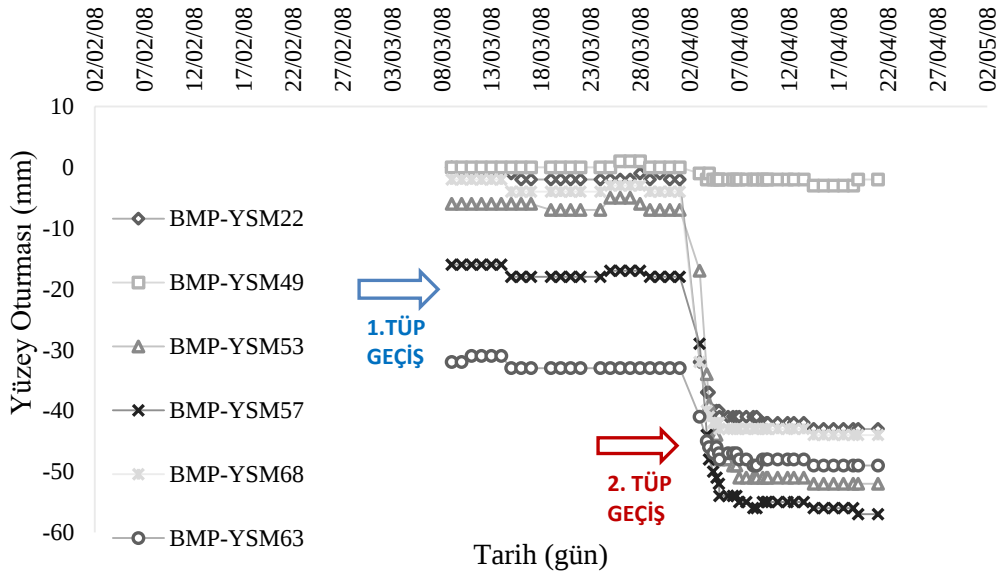
Şekil F.1 : C₁-C₁' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil F.2 : C₂-C₂' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.

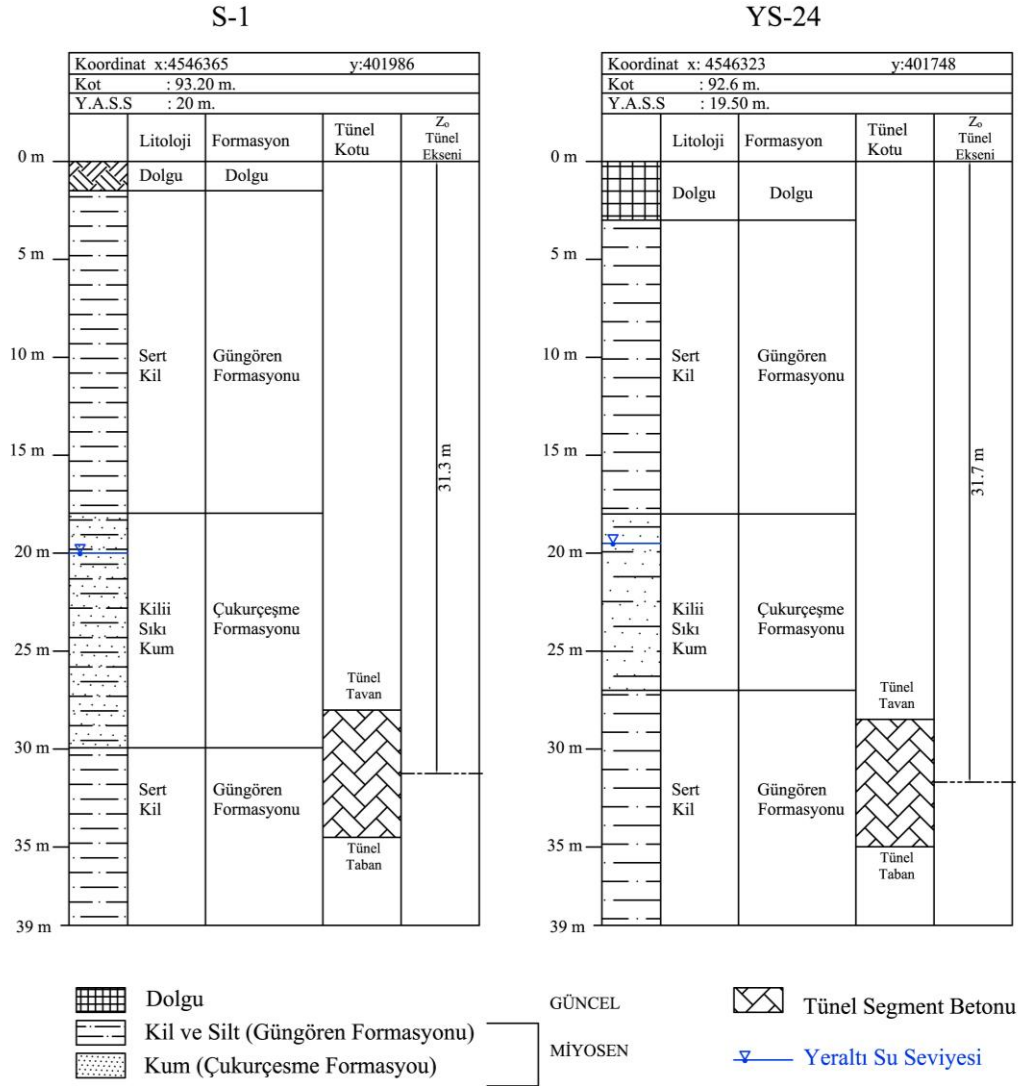


Şekil F.3 : C₃-C₃' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil F.4 : C₄-C₄' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.

EK G: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 9+740 – 9+800 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri



Şekil G.1 : Hatta yakın açılan sondajlara ait loglar (Demir, 2018).

Çizelge G.1 : Sondajlarda yapılan SPT deneylerinin derinlikleri, litoloji ve SPTN değerleri (Bakılar, 2006).

Sondaj No	Derinlik (m)	SPT N_{30}	Litoloji
YS-24	3,00	50	Yapay Dolgu
	4,50-18,00	39-50	Marnlı sert Kil
	19,50-27,00	50	Siltli sıkı Kum
	30,00-30,00	44-50	Sert Kil
S-1	3,00-7,50	30-50	Marn- Sert Kil
	9,00-18,00	33-48	Sert Kil
	19,50-27,00	51-57	Killi Sıkı Kum
	30,00-39,00	49-52	Sert Kil

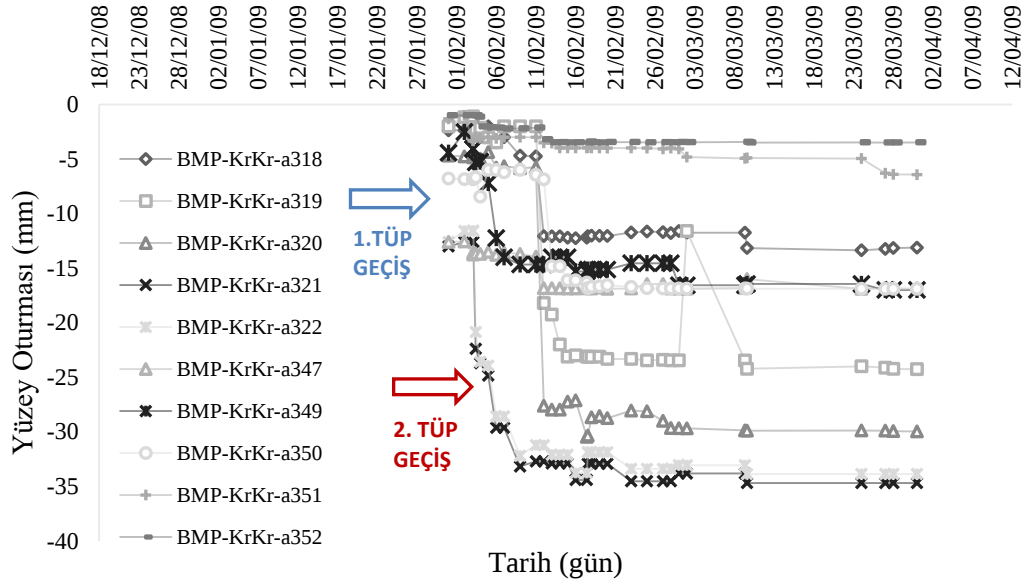
Çizelge G.2 : Sondajlardan alınan SPT numuneleri (örselenmiş örnekler) üzerinde yapılan zemin sınıflama deneylerinin sonuçları (Bakılar, 2006).

Sondaj No	Derinlik (m)	Atterberg Limitleri			Doğal Su İçeriği <i>W_n</i> (%)	Elek Analizi			Zemin Sınıfı (USCS)
		Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi		Çakıl (%)	Kum (%)	Silt+Kil (%)	
		<i>LL</i> (%)	<i>PL</i> (%)	<i>PI</i> (%)					
YS-24	4.50	49	16	33	32.30	-	-	-	CL
YS-24	12.50	60	18	42	28.10	-	-	-	CH
YS-24	21.00	-	-	-	21.00	0	66	34	SC
YS-24	24.00	-	-	-	19.60	0	76	24	SC
YS-24	39.00	60	27	33	38.00	-	-	-	CH
YS-24	51.00	57	18	39	28.00	-	-	-	CH
S-1	35,00	53	26	27	28,20	0,00	6,09	93,91	CH
S-1	10,00	44	21	23	24,30	0,00	19,51	80,49	CL
S-1	25,00	35	24	11	15,60	0,00	78,10	21,90	SC

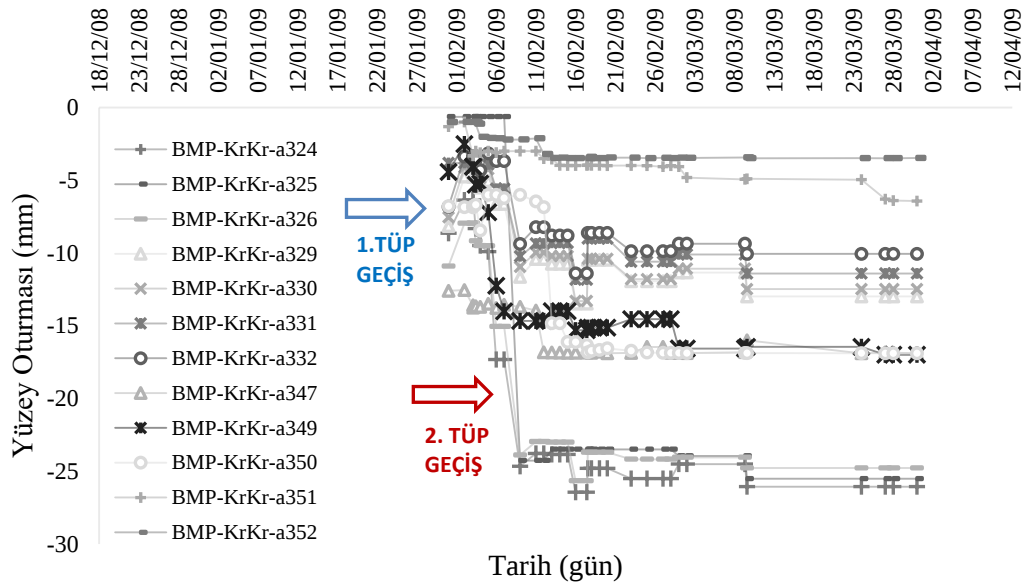
Çizelge G.3 : Örselenmemiş örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerine ait sonuçlar (Bakılar, 2006).

Sondaj No	Deney Türü	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı σ_u (kPa)	Drenajsız Makaslama Dayanımı c_u (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ϕ (°)
YS-24	Tek Eksenli	12.50	-	165	-	-
S-1	Tek Eksenli	35,00	19,67	449	224	-
S-1	Üç Eksenli	10,00	19,50	-	162	7
S-1	Doğrudan Makaslama	25,00	19,31	-	9	28

EK H: Kirazlı-Olimpiyat-Başakşehir Metro Hattı Km 9+740 – 9+800 Arası Yüzey Oturma Değerleri



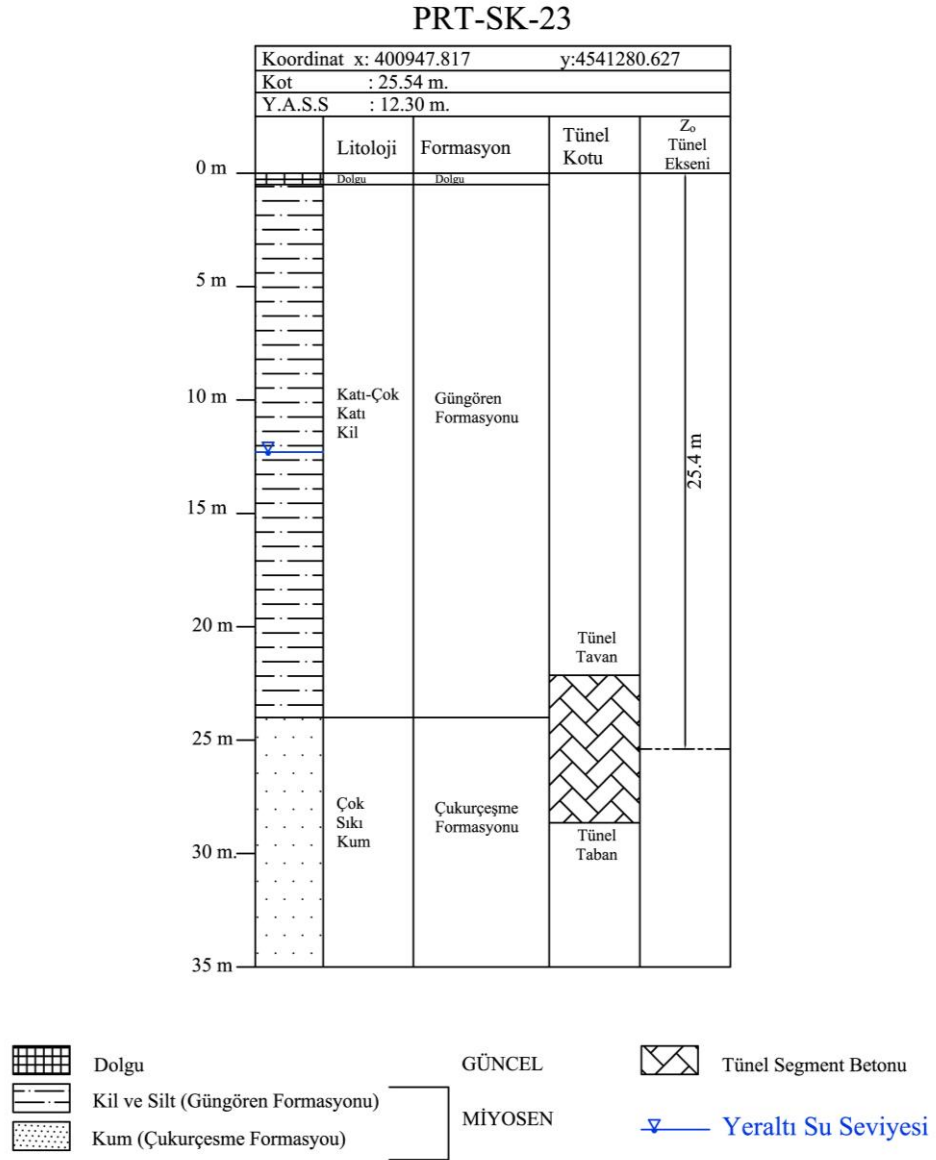
Şekil H.1 : D₁-D₁' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil H.2 : D₂-D₂' kesit hattına ait yüzey oturma değerlerinin zamana bağlı değişimi.



EK I: Ataköy-İkitelli Metro Hattı Km 8+760.00 -8+860.00 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri



Şekil İ.1 : Hatta yakın açılan sondaja ait log (İ.B.B, 2017).

Çizelge İ.1 : PRT-SK-23 Sondajına Ait SPT Değerleri (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	N_{30} Darbe Sayısı	Litoloji
PRT-SK-23	1.5 - 1.95	9	Kil, katı - çok katı
	3 - 3.45	17	Kil, katı - çok katı
	4.5 - 4.95	21	Kil, katı - çok katı
	6 - 6.45	16	Kil, katı - çok katı
	7.5 - 7.95	24	Kil, katı - çok katı
	9 - 9.45	22	Kil, katı - çok katı
	10.5 - 10.95	26	Kil, katı - çok katı
	12 - 12.45	39	Kil, sert
	13.5 - 13.95	37	Kil, sert
	15 - 15.45	>50	Kil, sert
PRT-SK-23	16.5 - 16.85	Refü	Kil, sert
	19.5 - 19.95	36	Kil, sert
	21 - 21.45	43	Kil, sert

Çizelge İ.1 (devam) : PRT-SK-23 Sondajına Ait SPT Değerleri (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	N_{30} Darbe Sayısı	Litoloji
PRT-SK-23	22.5 - 22.95	>50	Kil, sert
	24 - 24.45	>50	Siltli kum, kil ara seviyeli, sarı ince, mikalı
	25.5 - 25.95	>50	Siltli kum, kil ara seviyeli, sarı ince, mikalı
	27 - 27.45	>50	Siltli kum, kil ara seviyeli, sarı ince, mikalı
	28.5 - 28.95	44	Siltli kum, kil ara seviyeli, sarı ince, mikalı
	30 - 30.2	Refü	Siltli kum, kil ara seviyeli, sarı ince, mikalı
	31.5 - 31.75	Refü	Siltli kum, kil ara seviyeli, sarı ince, mikalı
	35 - 35.2	Refü	Siltli kum, kil ara seviyeli, sarı ince, mikalı

Çizelge İ.2 : PRT-SK-23 Sondajına Ait Hidrolik İletkenlik Değerleri (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Deney Başlangıç Derinliği (m)	Deney Bitiş Derinliği (m)	Hidrolik İletkenlik k_s (m/sn)	Geçirgenlik Durumu	Litoloji
PRT - SK 23	24.00	25.50	5,4x10-6	Geçirimsiz	Siltli kum, kil ara seviyeli, sarı ince, mikalı

Çizelge İ.3 : PRT-SK-23 Sondajına Ait Presiyometre Değerleri (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Limit Basınç (kg/cm ²)	Net Limit Basınç <i>PL</i> (kg/cm ²)	Elastisite Modülü <i>E_p</i> (kg/cm ²)	Litoloji
PRT SK 23	15.00	9.2	8.5	68	Kil, sert
	24.00	14.8	13.6	166	Siltli kum, kil ara seviyeli, sarı ince, mikalı

Çizelge İ.4 : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Su İçeriği Wn (%)	Atterberg Limitleri			Elek Analizi		Zemin Sınıfı
			LL	PL	PI	+4	-200	
PRT-SK-23	1.5 - 1.95	36.9	74.0	12.0	62.0	0.0	84.8	CH
	2.5 - 3	37.4	53.0	18.0	35.0	0.0	92.3	CH
	3 - 3.45	45.0	63.0	14.0	49.0	0.0	99.2	CH
	4.5 - 4.95	42.4	76.0	15.0	61.0	6.7	79.3	CH
	5.5 - 6	34.1	51.0	15.0	36.0	0.0	70.1	CH
	7.5 - 7.95	32.7	83.0	24.0	59.0	0.0	71.0	CH
	8.5 - 9	40.8	51.0	15.0	36.0	0.0	100.0	CH
	9 - 9.45	40.6	75.0	26.0	49.0	7.3	90.0	CH
	10.5 - 10.95	33.6	83.0	25.0	58.0	0.0	99.8	CH

Çizelge İ.4 (devam) : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Su İçeriği Wn (%)	Atterberg Limitleri			Elek Analizi		Zemin Sınıfı
			LL	PL	PI	+4	-200	
PRT-SK-23	12 - 12.45	27.9	64.0	17.0	47.0	0.0	92.4	CH
	13.1 - 13.35	25.6	48.0	17.0	31.0	0.0	99.0	CL
	15 - 15.45	24.3	54.0	11.0	43.0	0.0	99.1	CH
	15.7 - 16	29.1	73.0	14.0	59.0	0.0	98.7	CH
	16.5 - 16.85	23.6	39.0	13.0	26.0	11.4	44.6	SC
	19.5 - 19.95	27.5	70.0	19.0	51.0	0.0	95.4	CH
	20.5 - 20.9	32.8	65.0	17.0	48.0	0.0	98.4	CH
	22.5 - 22.95	26.6	55.0	11.0	44.0	0.0	91.1	CH
	24 - 24.45	15.4	33.0	11.0	22.0	0.0	39.5	SC

Çizelge İ.4 (devam) : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Su İçeriği W_n (%)	Atterberg Limitleri			Elek Analizi		Zemin Sınıfı
			LL	PL	PI	+4	-200	
PRT-SK-23	25.5 - 25.95	18.3	NP	NP	NP	0.0	40.7	SM
	26.1 - 26.3	17.0	30.0	12.0	18.0	0.0	52.6	ML
	28.5 - 28.95	26.4	NP	NP	NP	0.0	30.3	SM
	30.6 - 30.9	22.6	NP	NP	NP	0.4	36.7	SM
	31.5 - 31.75	17.0	NP	NP	NP	18.1	17.0	SM
	33.4 - 33.9	24.8	33.0	20.0	13.0	1.8	72.6	ML
	35 - 35.25	21.2	40.0	19.0	21.0	4.1	85.4	CL

Çizelge İ.5 : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Özgül Ağırlık G_s (gr/cm ³)	Su İçeriği W_n (%)	Zemin Sınıfı
PRT-SK-23	1.5 - 1.95	-	2.75	36.9	CH
	2.5 - 3	1.740	2.70	37.4	CH
	3 - 3.45	-	2.71	45.0	CH
	4.5 - 4.95	-	2.68	42.4	CH
	5.5 - 6	1.755	2.75	34.1	CH
	7.5 - 7.95	-	2.64	32.7	CH
	8.5 - 9	1.717	2.74	40.8	CH
	9 - 9.45	-	2.74	40.6	CH
	10.5 - 10.95	-	2.60	33.6	CH

Çizelge İ.5 (devam) : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Özgül Ağırlık G_s (gr/cm ³)	Su İçeriği W_n (%)	Zemin Sınıfı
PRT-SK-23	12 - 12.45	-	2.70	27.9	CH
	13.1 - 13.35	1.746	2.73	25.6	CL
	15 - 15.45	-	2.79	24.3	CH
	15.7 - 16	1.765	2.70	29.1	CH
	16.5 - 16.85	-	2.66	23.6	SC
	19.5 - 19.95	-	2.77	27.5	CH
	20.5 - 20.9	1.659	2.71	32.8	CH
	22.5 - 22.95	-	2.71	26.6	CH
	24 - 24.45	-	2.67	15.4	SC

Çizelge İ.5 (devam) : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Özgül Ağırlık G_s (gr/cm ³)	Su İçeriği W_n (%)	Zemin Sınıfı
PRT-SK-23	25.5 - 25.95	-	2.76	18.3	SM
	26.1 - 26.3	1.738	2.66	17.0	ML
	28.5 - 28.95	-	2.78	26.4	SM
	30.6 - 30.9	1.854	2.63	22.6	SM
	31.5 - 31.75	-	2.79	17.0	SM
	33.4 - 33.9	1.802	2.60	24.8	ML
	35 - 35.25	-	2.62	21.2	CL

Çizelge İ.6 : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin Üzerinde Yapılan Doğrudan Makaslama ve Üç Eksenli Sıkışma Sonuçları (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Doğrudan Makaslama Deneyi		Üç Eksenli Sıkışma (UU)		Zemin Sınıfı
		c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	
PRT-SK-23	1.5 - 1.95	-	-	-	-	CH
	2.5 - 3	-	-	-	-	CH
	3 - 3.45	-	-	-	-	CH
	4.5 - 4.95	-	-	-	-	CH
	5.5 - 6	-	-	37.55	12.72	CH
	7.5 - 7.95	-	-	-	-	CH
	8.5 - 9	76.63	5.95	-	-	CH
	9 - 9.45	-	-	-	-	CH

Çizelge İ.6 (devam) : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin Üzerinde Yapılan Doğrudan Makaslama Deneyi ve Üç Eksenli Sıkışma Sonuçları (İ.B.B, 2017).

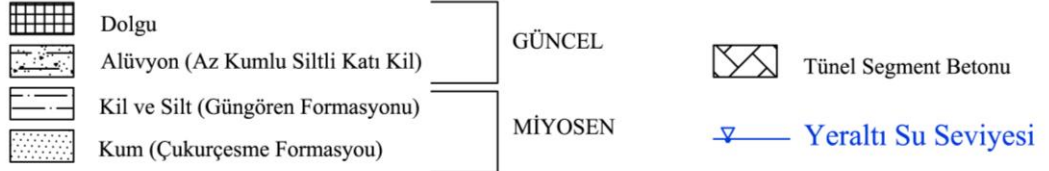
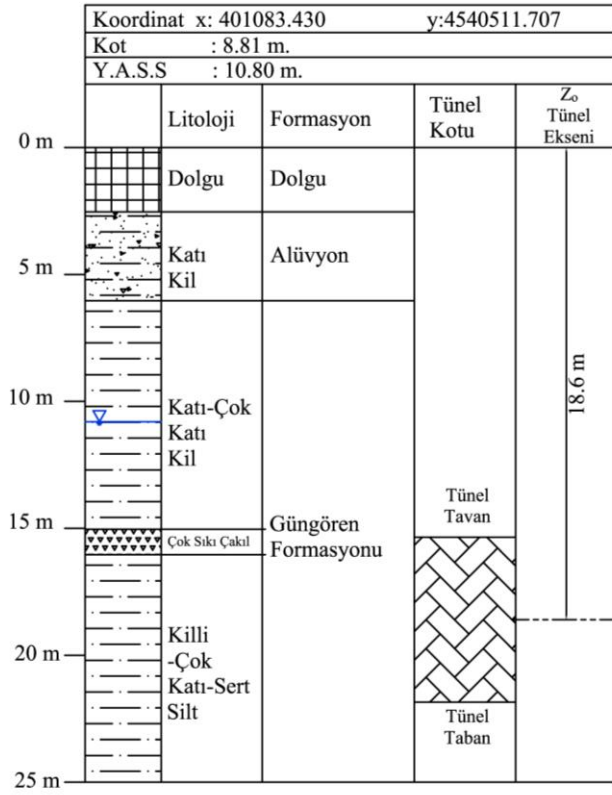
Sondaj No	Derinlik (m)	Doğrudan Makaslama Deneyi		Üç Eksenli Sıkışma (UU)		Zemin Sınıfı
		c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	
PRT-SK-23	10.5 - 10.95	-	-	-	-	CH
	12 - 12.45	-	-	-	-	CH
	13.1 - 13.35	-	-	-	-	CL
	15 - 15.45	-	-	-	-	CH
	15.7 - 16	-	-	-	-	CH
	16.5 - 16.85	-	-	-	-	SC
	19.5 - 19.95	-	-	-	-	CH
	20.5 - 20.9	51.73	16.47	-	-	CH

Çizelge İ.6 (devam) : PRT-SK-23 Sondajından Alınan Örneklerin Üzerinde Yapılan Doğrudan Makaslama Deneyi ve Üç Eksenli Sıkışma Sonuçları (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Doğrudan Makaslama Deneyi		Üç Eksenli Sıkışma (UU)		Zemin Sınıfı
		c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	
PRT-SK-23	22.5 - 22.95	-	-	-	-	CH
	24 - 24.45	-	-	-	-	SC
	25.5 - 25.95	-	-	-	-	SM
	26.1 - 26.3	31.25	7.45	-	-	ML
	28.5 - 28.95	-	-	-	-	SM
	30.6 - 30.9	43.74	25.67	-	-	SM
	31.5 - 31.75	-	-	-	-	SM
	33.4 - 33.9	39.03	11.11	-	-	ML
	35 - 35.25	-	-	-	-	CL

EK J: Ataköy-İkitelli Metro Hattı Km 9+660.00 – 9+ 780.00 Arası Sondaj ve Yer Malzemesi Bilgileri

PRT-SK-19



Şekil J.1 : Hatta yakın açılan sondajlara ait log (İ.B.B, 2017).

Çizelge J.1 : PRT-SK-19 Sondajına Ait SPT Değerleri (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	N_{30} Darbe Sayısı	Litoloji
PRT-SK-19	1.5 - 1.95	12	Kil, katı
	3 - 3.45	12	Kil, katı
	4.5 - 4.95	14	Kil, çok katı
	6 - 6.45	14	Kil, çok katı
	7.5 - 7.95	23	Kil, çok katı
	9 - 9.45	25	Kil, çok katı
	10.5 - 10.95	24	Kil, çok katı
	12 - 12.45	15	Kil, çok katı
	13.5 - 13.95	30	Kumlu Çakıl, çakıllar ince taneli
	15 - 15.45	>50	Sert Silt
	16.5 - 16.95	37	Sert Silt
	18 - 18.45	27	Sert Silt
	19.5 - 19.95	>50	Sert Silt
	21 - 21.25	Refü	Sert Silt
	22.5 - 22.95	42	Sert Silt

Çizelge J.2 : PRT-SK-19 Sondajına Ait Hidrolik İletkenlik Değerleri (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Deney Başlangıç Derinliği (m)	Deney Bitiş Derinliği (m)	Hidrolik İletkenlik (m/sn)	Geçirgenlik Durumu	Litoloji
PRT - SK 19	15.00	16.50	1.0×10^{-6}	Yarı Geçirimli	Kumlu Çakıl, çakıllar ince taneli

Çizelge J.3 : PRT-SK-19 Sondajından Alınan Örneklerin Su İçeriği, Atterberg Limitleri, Elek Analizi Sonuçları (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Su İçeriği W_n (%)	Atterberg Limitleri			Elek Analizi		Litoloji
			LL	PL	PI	+4	-200	
PRT-SK-19	2.5 - 3	25.6	51	13	38	10.1	89.9	Kil, katı
	4.1 - 4.5	34.9	63	12	51	7.94	91.68	Kil, katı
	6 - 6.45	21.7	44	13	31	15.16	84.84	Kil, çok katı
	9 - 9.5	25.3	46	16	30	10.12	89.88	Kil, çok katı
	10.5 - 10.95	25.3	51	11	40	13.3	85.68	Kil, çok katı
	12 - 12.45	26.3	52	11	41	22.16	71.6	Kil, çok katı
	13.1 - 13.5	26.1	38	12	26	35.86	63.7	Kil, çok katı
	17 - 17.25	23.7	NP	NP	NP	50.96	49.04	Sert Silt
	18 - 18.45	26.1	47	10	37	24.3	72.64	Sert Silt
	21 - 21.1	7	-			21.5	38.25	Sert Silt
	22.25 - 22.5	26.2	68	14	54	7.86	91.76	Sert Silt

Çizelge J.4 : PRT-SK-19 Sondajından Alınan Örneklerin İndeks Özellikleri ve Zemin Sınıfları (İ.B.B, 2017).

Sondaj No	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Özgül Ağırlık G_s (gr/cm ³)	Su İçeriği W_n (%)	Litoloji
PRT-SK-19	2.5 - 3	1.918	2.5	25.6	Kil, katı
	4.1 - 4.5	1.831	2.49	34.9	Kil, katı
	6 - 6.45		2.61	21.7	Kil, çok katı
	9 - 9.5	1.886	2.64	25.3	Kil, çok katı
	10.5 - 10.95		2.63	25.3	Kil, çok katı
	12 - 12.45		2.63	26.3	Kil, çok katı
	13.1 - 13.5	1.657	2.62	26.1	Kil, çok katı
	17 - 17.25	1.825	2.72	23.7	Sert Silt
	18 - 18.45		2.67	26.1	Sert Silt
	21 - 21.1		2.68	7	Sert Silt
	22.25 - 22.5	1.825	2.69	26.2	Sert Silt



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Candaş TOPAL

EĞİTİM

Lisans

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi,
Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
Mezuniyet Yılı: 2007

Nişantaşı Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık
Fakültesi, **İnşaat Mühendisliği Bölümü,**
Mezuniyet Yılı: 2018

Yüksek Lisans

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi,
Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
Mezuniyet Yılı: 2014

İŞ TECRÜBESİ

IHI Infrastructure Systems Co.,Ltd.

Şef Tünel Mühendisi

PARSONS Corporation

Uzman Geoteknik/Tünel Mühendisi

EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.

Jeoteknik Ölçüm ve Değerlendirme Kontrol
Mühendisi
Proje Müdürü

BORDRILL Sondaj Müteahhitliği ve Ticaret A.Ş

GAMA Güç Sistemleri,

Jeoloji Mühendisi/Sondaj Mühendisi

TAISEI Corporation

Jeoloji Mühendisi/Tünel Mühendisi

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Topal, C., Mahmutoglu, Y. (2021) Assessment of surface settlement induced by tunnel excavations for the Esenler–Başakşehir (Istanbul, Turkey) Subway Line. Environ Earth Sci 80, 188 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09509-6>

