T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞİMLİ SAHALARDA TÜNEL ZEMİN ETKİLEŞİMİ

Sinan ÇAKIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Danışman

Prof. Dr. Havvanur KILIÇ

Şubat, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞİMLİ SAHALARDA TÜNEL ZEMİN ETKİLEŞİMİ

Sinan ÇAKIR tarafından hazırlanan tez çalışması 27.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Havvanur KILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Havvanur KILIÇ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa _____

Danışmanım Prof. Dr. Havvanur KILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Eğimli Sahalarda Tünel Zemin Etkileşimi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sinan ÇAKIR

İmza

Eşime

ve

oğluma

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın hazırlanmasında bilimsel ve akademik katkılarıyla yol gösteren, değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak çalışmama yön veren değerli tez danışmanım Prof. Dr. Havvanur KILIÇ'a en içten sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma sürecimde kıymetli zamanlarını ayırarak çalışmamı değerlendiren ve çok değerli katkılar sunan jüri üyelerim Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK ve Dr. Murat Ergenekon SELÇUK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam kapsamında sağladıkları veri, teknik destek ve mesleki bilgi paylaşımı ile araştırmamın uygulama yönünün güçlenmesinde katkıda bulunan İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistemler Müdürlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Bu akademik yolculuk boyunca bana destek olan bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım tüm akademisyenlere, meslektaşlarıma ve bu süreçte manevi desteğini esirmeyen aileme ve arkadaşlarıma en derin teşekkürlerimi sunarım.

Sinan ÇAKIR

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ **ix**

TABLO LİSTESİ **xiii**

ÖZET **xiv**

ABSTRACT **xvi**

1 GİRİŞ **1**

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Projesinin Tanıtımı 9

1.3 Güzergah Hakkında Genel Bilgi 9

1.4 Tezin Amacı 11

1.5 Hipotez 12

2 TÜNELLER **13**

2.1 Giriş 13

2.2 Metrolarda Kullanılan Tünel Enkesitleri 15

2.3 Kullanım Amaçlarına Göre Tünellerin Sınıflandırılması 19

2.3.1 Barınak ve Tapınak Tünelleri 19

2.3.2 Karayolu, Demiryolu, Su Yolu Gibi Ulaşım Tünelleri 19

2.3.3 Maden Galerileri 20

2.3.4 Su İletim Tünelleri 21

2.3.5 Kanalizasyon ve Kamu Hizmet Tünelleri 21

2.3.6 Stokaj Tünelleri 22

2.3.7 Korunma ve Savunma Amaçlı Tüneller 23

3 YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ 24

3.1 NATM Yöntemi Tarihçesi ve Geşimi 24

3.2 NATM Yönteminin Uygulanması 25

3.3 NATM Yönteminde Kullanılan Ekipmanlar 27

3.4 NATM Sisteminde Kullanılan Destek Elemanları 30

3.4.3 Püskürtme Beton 30

3.4.4 Hasır Çelik 32

3.4.5 Kaya Bulonu ve Zemin Çivisi 33

3.4.7 Şemsiye Süren 36

3.4.8 Süren 37

4 ÇALIŞMA HAKKINDA GENEL BİLGİLER 40

4.1 Topoğrafya ve Tüneller 40

4.2 NATM Tünel Kesiti 42

4.3 Genel ve Yerel Jeoloji 45

4.3.1 Koyunbaba Formasyonu 45

4.3.2 Soğucak Formasyonu 45

4.3.3 Ceylan Formasyonu 46

4.3.4 Pınarhisar Formasyonu 46

4.3.4 Danişmen Formasyonu 46

4.3.5 Alüvyon (Qal) 47

4.4 Yapısal Jeoloji ve Aktif Tektonik 47

4.5 Depremsellik 49

4.6 Hidrojeoloji 50

5 NATM TÜNEL KAZISINDA MEYDANA GELEN OTURMALARIN AMPİRİK YÖNTEMLE BELİRLENMESİ 51

5.1 Yüzey Oturma Eğrisi ve Gauss Hata Fonksiyonu 51

5.2 Hacimsel Kayıp ve Eğri Genişlik (K) Değerlerinin Hesaplanması 54

5.3 Yan Yana Açılan Tünellerde Yüzey Oturması Tahmini..... 55

6 YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİNDE (NATM) SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ 62

6.1 Giriş..... 62

6.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi..... 63

6.3 Plaxis 2D Sonlu Elemanlar Programı Hakkında Genel Bilgiler..... 66

7 S1 ŞAFTI MAHMUTBEY İSTASYONU ARASI TÜNELLERİN GEOTEKNİK DEĞERLEDİRMESİ VE SONLU ELEMAN ANALİZLERİ 69

7.1 Geoteknik Değerlendirme..... 69

7.2 Plaxis 3D Sonlu Eleman Analizleri ve Zemin Parametrelerinin Tayini 73

7.2.3 3D Tünel Tasarım Girdileri 74

7.2.4. 3D Plaxis Analiz Sonıçları 76

7.3 Plaxis 2D Analizleri 80

7.3.1 Kesit-1 Analizleri ve Sonuçları 82

7.3.2 Kesit-2 Analizleri ve Sonuçları 84

7.4 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Saha Verileriyle Karşılaştırılması 86

8 TOPOĞRAFYA EĞİMİNİN TÜNEL KAZISI SONUCU DEĞİŞEN GERİLME VE YER DEĞİŞTİRME ETKİSİ 89

8.1 Giriş..... 89

8.2 Topoğrafya Eğimi %0 Analiz ve Sonuçları 90

8.3 Topoğrafya Eğimi %15 Analiz ve Sonuçları 93

8.4 Topoğrafya Eğimi %30 Analiz ve Sonuçları 95

8.5 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi..... 98

8.5.1 Yüzeyde Oluşan Gerilme ve Yer Değiştirmeler 99

8.5.2 z=-5 Kotunda Oluşan Gerilme veYer değiştirme Değerleri 103

8.5.3 Tünel Üzerinde Oluşan Gerilme ve Deformasyon Değerleri 107

8.5.4 Tünel Üzerindeki Noktanın (z=-15) Şekil Değiştirmeler Yönünden İncelenmesi 111

9 SONUÇ 112

KAYNAKÇA 115

A GÜZERGAH ÜZERINDE YAPILAN SONDAJLAR 119

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 140

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Düşey deplasman grafiği 8
Şekil 1.2 Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Hattı Güzergahı 9
Şekil 2.1 Bazı meslek gruplarına göre tünellerin anlamlandırılması 14
Şekil 2.2 Barınak ve tapınak tipine bir örnek 19
Şekil 2.3 Karayolu tünellerine ilişkin örnek görünüm ve tipik bir enkesit şekli 20
Şekil 2.4 Demiryolu tünellerine ilişkin tipik iki enkesit şekli 20
Şekil 2.5 Maden galerilerine ilişkin bir örnek 21
Şekil 2.6 Su iletim tünellerine ilişkin enkesit örnekleri 21
Şekil 2.7 Kanalizasyon ve bazı hizmet tünellerine ilişkin kesit örnekleri 22
Şekil 2.8 Stokaj tünelleri için kesit örnekleri 23
Şekil 2.9 Askeri üslerin korunmasında ve ülke savunmasında kullanılan tünel örnekleri 23
Şekil 3.1 Örnek bir NATM kesiti ve inşaat aşamaları 25
Şekil 3.2 Aşamalı tünel kazısı örneği 27
Şekil 3.3 Jumbo delgi makinesi 28
Şekil 3.4 Kazıcı ile zeminin kazılması işlemi 28
Şekil 3.5 Püskürtme beton makinesi 29
Şekil 3.6 Tünelden çıkan malzemeyi kamyona yükleyen loader 29
Şekil 3.7 Püskürtme beton uygulaması 32
Şekil 3.8 Hasır çelikleri yerleştirilmiş püskürtme beton için hazır tünel 33
Şekil 3.9 Tipik bir kaya bulonu kesiti 35
Şekil 3.10 Kaya bulonu torklaması 35
Şekil 3.11 İksası yerleştirilmiş tünel kesiti 36
Şekil 3.12 Şemsiye sürenlerin tünel ilerleme yönüne yerleştirilmesi 37
Şekil 3.13 Süren montajı yapılmış tünel 39
Şekil 4.1 İnceleme bölgesi ve tünel yerleşimi 40
Şekil 4.2 Güzergah boy kesit 41
Şekil 4.3 S1 Şaftı 3D görünümü 42
Şekil 4.4 Kullanılan İksa detayı 43

Şekil 4.5 A tüneli kazı destek kesiti 44
Şekil 4.6 Marmara Denizi yapısal jeoloji haritası 48
Şekil 5.1 Yüzey tasman profili 51
Şekil 5.2 Oturma eğrilerinin görünümü ve notasyonlar 53
Şekil 5.3 Oturma ve yatay birim deformasyon formülleri 54
Şekil 5.4 Kil zeminlerde açılan ikiz tünelerde deformasyon mekanizması 57
Şekil 5.5 Çalışmada kullanılan kesitler 57
Şekil 5.6 Kesit-1'in geometrik özellikleri 58
Şekil 5.7 Kesit-1 için ikiz tünel kazılarından dolayı oluşan yüzey tasmanlarının teorik gösterimi 59
Şekil 5.8 Kesit-2'nin geometric özellikleri 60
Şekil 5.9 Kesit-2 için ikiz tünel kazılarından dolayı oluşan yüzey tasmanlarının teorik gösterimi 60
Şekil 6.1 Sonlu elemanlar yönteminde düğüm noktaları ve elemanlar 64
Şekil 6.2 Kesit-1 için oluşturulan Plaxis 2D'de oluşrurulan sonlu elemanlar modeli 65
Şekil 6.3 Plaxis 3D'de oluşrurulan sonlu elemanlar modeli 66
Şekil 6.4 Plan düzlemi-Eksenel simetri 67
Şekil 6.5 Plaxis 3D Tunnel designer sekmesi 67
Şekil 6.6 Ayna azaltma yönteminin aşamaları 68
Şekil 7.1 SPT-N verilerinin derinlikle değişim grafiği 70
Şekil 7.2 Geoteknik izleme noktaları ve analiz kesitleri 74
Şekil 7.3 Plaxis 3D Output düşey deplasman sonucu 77
Şekil 7.4 MAH-43 düşey oturma grafiği 78
Şekil 7.5 MAH-44 düşey oturma grafiği 78
Şekil 7.6 Kesit-1 yüzey oturma grafiği 79
Şekil 7.7 Kesit-1 yüzey oturma grafiği 79
Şekil 7.8 Kesit-1 için toplam yer değiştirme değeri 82
Şekil 7.9 MAH-43 düşey yer değiştirme değeri 83
Şekil 7.10 Kesit-1 yüzey yer değiştirme değeri 84
Şekil 7.11 Kesit-2 için toplam yer değiştirme değeri 85
Şekil 7.12 MAH-44 düşey yer değiştirme değeri 85
Şekil 7.13 Kesit-2 yüzey yer değiştirme değeri 86
Şekil 7.14 Kesit-1 düşey yer değiştirme değerleri özet tablosu 87
Şekil 7.15 Kesit-2 düşey yer değiştirme değerleri özet tablosu 87

Şekil 8.1 Topoğrafya eğimi %0 üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ağ diyagramı 90
Şekil 8.2 Topoğrafya eğimi %0 üç boyutlu toplam deplasman grafiği 91
Şekil 8.3 Topoğrafya eğimi %0 iki tünel arası toplam deplasman grafiği 91
Şekil 8.4 Topoğrafya eğimi %0 üç boyutlu σ_{yz} grafiği 92
Şekil 8.5 Topoğrafya eğimi %15 üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ağ diyagramı 93
Şekil 8.6 Topoğrafya eğimi %15 üç boyutlu toplam deplasman grafiği 94
Şekil 8.7 Topoğrafya eğimi %15 iki tünel arası toplam deplasman grafiği 94
Şekil 8.8 Topoğrafya eğimi %15 üç boyutlu σ_{yz} grafiği 95
Şekil 8.9 Topoğrafya eğimi %30 üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ağ diyagramı 96
Şekil 8.10 Topoğrafya eğimi %30 sonlu elemanlar modeli toplam deplasman grafiği 97
Şekil 8.11 Topoğrafya eğimi %30 iki tünel arası toplam deplasman grafiği 97
Şekil 8.12 Topoğrafya eğimi %30 σ_{yz} grafiği 98
Şekil 8.13 Topoğrafya eğimi %0 yüzeydeki değerlendirme noktası 99
Şekil 8.14 Topoğrafya eğimi %15 yüzeydeki değerlendirme noktası 99
Şekil 8.15 Topoğrafya eğimi %30 yüzeydeki değerlendirme noktası 100
Şekil 8.16 Düşey yer değiştirme grafiği 100
Şekil 8.17 Toplam yer değiştirme grafiği 101
Şekil 8.18 Düşey gerilme (σ_z) değişim grafiği 102
Şekil 8.19 Kayma gerilmesi (σ_{yz}) değişim grafiği 102
Şekil 8.20 Topoğrafya eğimi %0 z=-5 değerlendirme noktası 103
Şekil 8.21 Topoğrafya eğimi %15 z=-5 değerlendirme noktası 103
Şekil 8.22 Topoğrafya eğimi %30 z=-5 değerlendirme noktası 104
Şekil 8.23 Düşey yer değiştirme grafiği 104
Şekil 8.24 Toplam yer değiştirme grafiği 105
Şekil 8.25 Düşey gerilme (σ_z) değişim grafiği 106
Şekil 8.26 Kayma gerilmesi (σ_{yz}) değişim grafiği 106
Şekil 8.27 Topoğrafya eğimi %0 z=-15 değerlendirme noktası 107
Şekil 8.28 Topoğrafya eğimi %15 z=-15 değerlendirme noktası 107
Şekil 8.29 Topoğrafya eğimi %30 z=-15 değerlendirme noktası 108
Şekil 8.30 Düşey yer değiştirme grafiği 108
Şekil 8.31 Toplam yer değiştirme grafiği 109
Şekil 8.32 Düşey gerilme (σ_z) değişim grafiği 110

Şekil 8.33 Kayma gerilmesi (σ_{yz}) değişim grafiği 110
Şekil 8.34 Kayma şekil değiştirmesi (γ_{yz}) değişim grafiği 111

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Metrolarda kullanılan tünel kesitleri 16
Tablo 3.1 Tüneller için önerilen sonraj aralıkları 26
Tablo 5.1 TBM tünelleri için önerilen matris yöntemi 55
Tablo 7.1 Presiyometre deneylerine ait sonuçlar 71
Tablo 7.2 Sondaj numunelerinin laboratuvar deney sonuçları 72
Tablo 7.3 Umbrella iyileştirilmiş zon parametreleri 75
Tablo 7.4 Sayısal analizlerde dikkate alınan zemin parametrleri 76
Tablo 7.5 Plaxis 2D kazı aşamaları 80

ÖZET

Eğimli Sahalarda Tünel Zemin Etkileşimi

Sinan ÇAKIR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Havvanur KILIÇ

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

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

Ayrıca üçüncü boyut etkisi daha net ortaya koyabilmek adına çeşitli eğimlerde modeller oluşturulmuştur. Bu sayısal analizler sonucunda gerçekleşen gerilme ve deformasyon değişimleri karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda tünel

kazılarında üçüncü boyuttan gelen etkilerin yer değiştirme ve gerilmeleri önemli bir şekilde etkilediği görülmüş ve buna yönelik tavsiler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *NATM tünel, Plaxis, Yeraltı Yapılar*

ABSTRACT

Tunnel Soil Interaction on Sloping Fields

Sinan ÇAKIR

Department of Civil Engineer

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Havvanur KILIÇ

Infrastructure activities are crucial role in developing cities. Metro lines and urban tunnels are indispensable construction activities for planning of transportation and infrastructure in metropolitan cities. The estimation of deformations and stress anticipated in tunnels using two-dimensional (2D) finite element software is widely applied. However, in certain topographical and geotechnical conditions, the influence of the third dimension on structural behavior becomes significant.

This study investigates the stress-strain behavior of two adjacent metro tunnels excavated in a slopping topography. In this context, settlements occurring on the surface and surrounding structures were monitored and recorded using geotechnical instruments. The deformations measured in the field were compared with the results of the two dimensional (2D) and three dimensional (3D) numerical analyses. To achieve this, the effect of the third dimension in the tunnel excavated in sloping topography was examined and verification analyses were conducted for these on going twin metro tunnels.

Additionally, to more clearly highlight the third dimensional effect, models were created for various slopes. The stress and deformation variations observed in the numerical analysis were compared. The analysis results showed that the effects

from the third dimension significantly influenced diplacements and strain in tunnel excavations, and recommendations were provided accordingly.

Keywords: *NATM tunnel, Plaxis, Underground structures.*

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Gelişen şehirlerle birlikte tünelcilik önemli bir inşai faaliyet olmuştur. Tüneller tarih boyunca çeşitli amaçlarla yapılmıştır. Günümüzde kent içi ulaşım sistemlerinden biri olan metrolar yer altından giden tünellerle istasyonları birbirine bağlamaktadır. Kent içinde yapılan yeraltı faaliyetleri yapımı, planlanması ve projelendirilmesi açısından oldukça zordur ve iyi bir mühendislik deneyimi gerektirir.

Tüneller geçtikleri güzergah boyunca farklı zemin ve/veya kayao ortamlardan geçebilmektedir. Zemin profillerde açılan tünellerde tünel-zemin-yapı etkileşimlerinin detaylı şekilde incelenmesi gerekmektedir. Tünel faaliyetleri sırasında tünel içinden ve tünel dışındaki arazi ile etkileşim alanında bulunan çevre yapıların oturma, açısal dönme limitlerinin takip edilerek kayıt altına alınması gerekmektedir. Ayrıca tünellerin tasarımı sırasında ortam gerilme koşulları belirlenirken tünel çevresindeki diğer yer altı ve yer üstünde gerçekleştirilecek olan diğer faaliyetleri dikkate almak önem arz etmektedir. Bu çalışmalar yapılırken günümüzde 2D ve 3D analiz programlarıyla karmaşık problemler çözülebilmektedir. Tünellerin açım yöntemleri ve tasarımlarıyla ilgili günümüze kadar çeşitli çalışmalar yapılmış ve halen yapılmaktadır. Literatürde yer alan bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

(Möller, 2006) tarafından yapılan çalışmada β yöntemi açıklanmıştır. Burada tünellerin kazılması ve püskürtme beton ile kaplanması sırasında izin verilen zemin deformasyonlarını bir β katsayısına bağlamıştır. $0<\beta<1$ arasında değişmektedir. Yapılan çalışmada bu sayının 0.5 civarında kabul edilebileceği açıklanmıştır. Tünel

destek basıncı bu katsayı oranında azaltılarak gerçek zemin deformasyonlarına izin verilmektedir.

Bu yöntem tünel kazılarında üç boyutlu etkilerin iki boyutlu analizlerde dikkate alınabilmesi için kullanılan bir gerilme azaltma yöntemidir. Bu yöntemde tünel kazısı sırasında çevre zeminde meydana gelen boşluk nedeniyle oluşan deformasyonların iki boyutlu olark analiz etme amacı taşımaktadır. Tünel kazısı sonrasında oluşan gerilmelerin azaltılması ve yükün tünel kaplaması üzerinde dağılımını hesaplamada kullanılan bu yöntem, deformasyon ve yapı güvenliği açısından da önemlidir.

Beta yöntemi gerilme azaltma yöntemi olarak iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada tunel kazısı nedeniyle zeminde meydana gelen ferahlama P_o olarak dikkate alınmıştır. Bu gerilmenin azaltma faktörü olarak bir β katsayısıyla çarpılarak $P_o * \beta$ değeri elde edilmektedir. Burada kazıdan dolayı oluşan ferahlama durumu analizlere yansıtılmaya çalışılmaktadır. Bu aşamada zeminde meydana gelecek olan deformasyonlar tünel kazısından dolayı oluşak yer değiştirmenin oluşturacağı etkileri tanımlamak için kullanılmaktadır.

İkinci aşamada tünel kaplamasının yapılması aşamasında kalan yük zeminden zamana bağlı olarak kaplama tarafına aktarılmasıdır. β değerinin düşük olması zeminde daha fazla gerilmenin oluşarak deformasyonların artmasına neden oluken kaplamaya gelen yük azaltmaktadır. Yüksek beta değeri ise zeminde gerçekleşecek olan deformasyonları sınırlandırarak kaplamaya gelen yapısal kuvvetlerin artmasına neden olamaktadır. Dolayısıyla β değeri belirlenirken zemin özellikleri, kazı derinliği ve güvenlik faktörleri gibi etkenler göz önünde bulundurulmalıdır.

β yöntemiyle üç boyutlu etkileri iki boyuta indirgerken tünel kazısındaki stabilite analizlerinin yapılmasını sağlar. Bu yöntemle zemindeki gerilme dağılımlarının ve buna bağlı olarak gerçekleşecek olan yer değiştirmelerin doğru bir şekilde belirlenmesi gerilme ve deformasyonların doğru bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır.

Bu bağlamda β yöntemi tünel açma projelerinde zemin tünel etkileşimini doğru bir şekilde dikkate alabilmek ve güvenliği sağlamak için uygulanmaktadır. Böylece, yüzeyde ve yapılarda meydana gelebilecek hasarlar önceden tahmin edilerek gerekli önlemlerin alınması bakımından önemlidir. Literatürde bu yöntemin

kullanımı tünel ve zemin deformasyonlarını ön görmede geniş bir uygulama alanı bulmuştur.

Lee vd. (2006) yaptıkları çalışma kapsamında yumuşak killi zeminlerde tünel açma sırasında yüzey oturmaları, aşırı boşluk suyu basıncı, tünel stabilitesi ve kemerlenme etkilerini detaylı biçimde ele almışlardır. Tünel stabilitesi ve kemerlenme durumunu belirlemek için bir dizi laboratuvar deneyini sayılsal modeler ile karşılaştırmışlardır. Özellikle örtü yükü ve tünel çapı oranı (C/D) ile iki tünel arasındaki mesafe ve çap oranı (d/D) faktörleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar yüzeyde meydana gelen yerdeğişimi sırasındaki aşırı yük faktörlerinin etkisini anlamaya çalışmışlardır. Burada;

- C: tüneli üzerindeki örtü yükü
- D: tünel çapı
- d: iki parallel tünelin merkezden merkeze olan mesafesini ifade etmektedir.

Bu durumda, d/D oranı, iki tüneli birbirine olan mesafesinin çaplara göre normalize edilmesiyle hesaplanır. Örneğin d/D=1.5 olması durumunda tüneller arasındaki mesafe tünel çapının 1.5 katı olarak belirlenmiştir. Bu oran özellikle tünel stabilitesi ve zemin üzerindeki kemerlenme etkileri açısından kritik bir parametre olarak ifade edilmiştir.

Çalışmada kemerlenme etkisinin zamana göre gelişimini belirlemek amacıyla kemerlenme oranları tanımlanmıştır. Kemerlenme, zemindeki gerilmenin çevredeki rirjlik farkı sebebiyle dağıtılarak ortamdaki gerilmenin azakması ile meydana gelmektedir. Bu durumu açıklamak amacıyla pozitif ve negatif kemerlenme bölgeleri tanımlanmıştır. Sayısal analizler yardımıyla bu bölgelerin sınırları belirlenmiş ve tek tünel ve parallel tüneller için ayrı ayrı senaryolar oluşturularak oluşacak zemin göçmelerine karşı sınır değerler önerilmiştir.

Laboratuvar modellerinde tünel destek basıncını kademeli olarak azaltarak tünel açma süreci modellenmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşım tünel stabilitesinin ölçülebilmesi açısından kritik önem taşırken yüzey deformasyonları ve boşluk suyu basıncındaki artışından elde edilen verilerle sağlanmıştır. Bu durum özellikle eğimli topoğrafyalarda tünel açarken oluşabilecek karmaşık gerilme dağılımlarının önceden bilinmesi ve çevresel deformasyonların azaltılması açısından oldukça önemlidir.

Laboratuvar modellerinden elde edilen veriler, iki boyutlu sonlu farklar analizi yapan FLAC 2D yazılımı ile gerçekleştirilen sayısal analizler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar her iki yöntemde de yüzey deformasyonları ve aşırı boşluk suyu basıncı belirlemede doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Sayısal analizlerde tünel çevresinde gerçekleşen kemerlenmenin oluşma mekanizması için kemerlenme oranı parametresinin kullanılmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca parallel tünellerdeki zemin üzerindeki etkilerinin hesaplanabilmesi için tünellerden tek tek elde edilen verilerin süperpoze yapılmasını sağlayan yaklaşım geliştirilmiştir.

Tünel stabilitesi için önemli olan aşırı yük faktörü (OF) laboratuvar modeli kullanılarak incelenmiş ve elde edilen veriler sayısal analizlerle doğrulanmıştır. Çalışmada tek tünel ve ikiz tünel durumlarındaki aşırı yük faktörleri karşılaştırılmış ve ikiz tünellerin daha düşük stabilitede olduğu belirlenmiştir. Bu durum özellikle eğimli topoğrafyalardaki tünel açma süreçlerinde dikkate alınması gereken önemli bir konu olmaktadır.

Sonuç olarak elde edilen bulgularda NATM ile tünel açma süreçlerinde yapıların korunması için mühendislik önlemlerinin alınması gerektiği çalışma vurgulamıştır. Yumuşak killi zeminlerde tünel kazılarının etkilerini inceleyen çalışma özellikle eğimli topoğrafyalardaki kemerlenme etkisini etkileyen faktörlerin anlaşılması açısındanda önemli olmaktadır.

Çolak ve Aksoy (2019) yerleşimin yoğun olduğu bir bölgede açılan sığ tünellerde meydana gelen yüzey deformasyonlarını incelemiştir. Açılan tünellerde yüzeyde bulunan tarihi yapılara en az hasarla tünel inşaatını tamamlamak için kafes kirişli iksa yerine çelik I profiller kullanmıştır. Mevcut kemerlenme basıncının artırılması açısından koruyucu kemer uygulaması yapılmış ve deformasyonlar istenen seviyeye çekilmiştir.

Bu çalışmada NATM tünel yapımında çevre kayaların kemerlenme etkisinin tünel üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Kemerlenme etkisiyle kayanın kendi kendini taşıyarak daha ekonomik, güvenli ve daha az deformasyon ile tünel yapılması tartışılmıştır. Özellikle zorlu zemin şartlarında tercih edilen NATM yöntemi tünel çevresindeki deformasyonların sürekli izlenmesi ve gerektiğinde ilave tedbirlerin alınması gerektiğini vurgulamıştır.

Araştırmada İzmir Buca-Onat tünel inşaatının NATM uygulamalarını detaylandırarak sürecin ilk aşamasından itibaren gerçekleşen deformasyon ölçümlerinin önemininden de bahsetmiştir. Deformasyon ölçümleri, tünel kesiti üzerinde meydana gelen gerilmelerin optimize edilerek ve kontrollü bir şekilde gerçekleşmesini sağlamıştır. Bu ölçümler zemin özelliklerinin tünel yapısının üzerindeki etkilerini anlama konusunda önemli bir veri kaynağı olduğu bilinmektedir. Yapılan incelemeler sonucunda tünel içerisinde meydana gelen gerilme deformasyon davranışları incelenmiş, kaya ortamında meydana gelen değişimlerin bu durumu nasıl etkilediği açıklanmıştır.

NATM tünelin güvenli bir şekilde uygulanması sahadan elde edilen verilerin hassasiyetine ve bu verilerin doğru bir şekilde yorumlanmasına dayanmaktadır. Bu çalışma kapsamında açılan söz konusu tünellerde aletsel gözlem cihazlarının kalibrasyonu, yerleştirildikleri konumları ve ölçüm sıklıkları gibi teknik detaylara da yer verilmiştir. İzmir Buca-Onat tüneli projesi NATM uygulamasında gerçekleştirilen arazi ölçümlerinin tünel açma sırasındaki önemi vurgulanmıştır. Bu çalışmada NATM uygulamalarının yerel koşullara uyarlanması ve deformasyon verilerinini etkin bir şekilde değerlendirmesiyle tünel inşaatlarının daha güvenli bir hale getirirlebileceğini göstermektedir.

Osman (2010) yumuşak zeminlerde açılan ikiz tünellerin yüzeyde oluşan deformasyonlarını incelemiştir. Derinlik ve eşdeğer tünel çapının bir fonksiyonu olarak yaklaşımlar geliştirilmiştir. Yan yana açılan tünellerin göçme eğrileri süperpozisyon ilkesiyle elde edilmiştir.

Çalışmada tünel kaplamasının yumuşak ve suya doygun kil tabakasındaki stabilitesi analiz edilmiştir. Özellikle birbirine yakın paralel tüneller arasındaki etkileşim daha detaylı olarak irdelenmiştir. Bu çalışmada tüneller kontrol edilirken üst sınır limit analizi yöntemi kullanılarak ikiz tünellerde plastik deformasyon mekanizmasının üst sınır çözümlemeleri geliştirilmiştir. Bu analizlerde her iki tünel için ayrı ayrı geliştirilmiş plastik deformasyon mekanizmaları üst üste süperpoze edilmesiyle elde edilen birleşik deformasyon mekanizması kullanılmıştır. Böylece mekanizma ile minimum içsel enerji kaybı sağlanarak tünellerin göçme yük değerlerinin en düşük değerine ulaşılmıştır.

Çalışma bulgularına göre tünellerin birbirine olan mesafesi stabilite üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle yüzeye yakın konumlanan ve birbirine çok yakın olan tünellerde (kaplama kalınlığı/tünel çapı düşük olanlarda) stabilite %35 oranında düşmektedir. Daha derinde olan tünellerde ise bu etkileşimin stabiliteye olan etkisi %22 seviyelerinde olduğu açıklanmıştır. Bu sonuçlar tünel stabilitesinin sağlanmasında tüneller arasındaki mesafenin ve tünel derinliğinin kritik olduğunu göstermektedir.

Ayrıca klasik olarak kullanılan rijit blok kayma mekanizmalarına dayanan stabilite analizleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmada geliştirilen dağıtılmış kayma mekanizmasının özellikle ikiz paralel tüneller için, literatürde daha önce önerilen rijit blok mekanizmalarına göre daha güvenilir çözümler sunduğu ifade edilmiştir. Bu mekanizmanın göçme yüklerini belirlemede daha düşük ve güvenilir üst sınır değeri sunduğu dolayısıyla tasarım güvenliğini artırabileceği belirtilmektedir.

Özetle bu çalışmada ikiz tünellerde kullanılan üst sınır analiz yöntemlerini geliştirmekte ve yumuşak kil tabakasında paralel tünel inşaatlarında stabilite problemlerine yönelik pratik çözüm önerileri sunmaktadır. Çalışmada yer verilen analizlerin tünel stabilitesini artırmak ve yeraltı yapı projelerinde daha güvenilir tasarımlar geliştirmek için faydalı olabileceği vurgulanmıştır.

Wilson vd. (2014) yan yana açılan iki dairesel tünelin drenajsız durumdaki stabilitesini incelemiştir. Tünel aralığının stabilite üzerindeki etkisi, sonlu elemanlar yöntemi ve yarı rijit blok teknikleri ile değerlendirilmiştir. Tüneller düzlem gerilme koşulları altında modellenmiş ve sonsuz uzunlukta kabul edilmiştir. Analizlerde zemin Tresca kriterleri göz önünde bulundurularak modellenmiştir. Drenajsız kayma dayanımı (C_u), birim hacim ağırlık (γ), tünel çapı (D) ve tüneller arası mesafe (S) gibi parametreler boyutsuz hale getirilerek analizler yapılmıştır. Stabilite $(S_s-S_t)/C_u$ parametresi üzerinden ifade edilmiştir. Burada S_s zemin yüzeyine uygulanan yükü, S_t ise tünel iç basıncını temsil etmektedir.

Araştırmada üst ve alt sınır teoremleri, tünellerin stabilitesini değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu yöntemler, plastik limit analizlerine dayanır ve optimizasyon tekniğiyle çözülmüştür. Stabilite sınırları, stabilite grafiklerine dönüştürülerek mühendislik uygulamalarında kullanılabilir hale dönüştürülmüştür. Sonuçlar sonlu elemanlar ile elde edilen alt ve üst sınırların doğruluğu açısından birbirine çok yakın

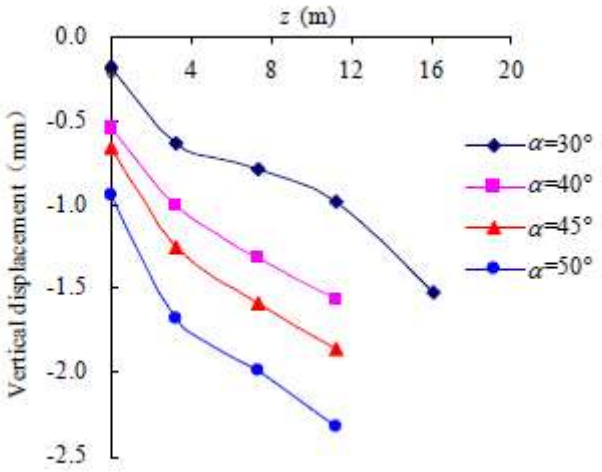
olduğunu göstermektedir. Çalışmada tüneller arasındaki mesafe arttıkça stabiliteni her zaman artmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle tüneller birbirine çok yakın olduğunda taşıma kapasitesindeki artışın oluşan ilave zemin basıncını karşılayamadığı ve stabilitenin buna bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Ancak tüneller arasındaki mesafenin S/D>4 değerini aştığında tünellerin birbirini etkilemediği ve stabilitelerinin bozulmadığı görülmüştür.

Daha derin tünellede (H/D) oranı yüksek veya zemin birim ağırlığının fazla olduğu durumlarda göçme mekanizmasının daha geniş alana yayıldığı ve tünel tabanında belirgin bir kabarma oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu kabarma zemindeki plastik enerji dağılımını artırarak stabilitenin üzerinde önemli bir etki oluşturmuştur. Çalışmada kullanılan sonlu elemanlar yöntemleri farklı zemin türleri ve tabaka dağılımları ve karmaşık yükleme koşullarını modellemekte önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma yan yana açılan iki dairesel tünelin stabilitesini detaylı bir şekilde ele almış ve elde edilen bulgular özetlenmiştir.

Wu ve Jin (2021) yaptıkları çalışmada eğimli topoğrafyalarda yer alan tünel girişlerinin stabilitesine yamaç eğiminin (α) ve tünel ile yamaç arasındaki açı (β) ilişkisinin etkilerini detaylı şekilde incelenmiştir. Mevcut literatürde, özellikle iki enine doğrultulu arazi stabilitesine yönelik çok sayıda çalışma yapılmışken, boyuna doğrultudaki deformasyon etkileri üzerinde araştırmanın sınırlı olduğunu belirtmiştir. Bu eksiklik tünel kazıları sırasında meydana gelen çatlama, kayma ve göçme gibi ciddi sorunların yeterince öngörülememesine ve buna bağlı yapım güvenliği riskinin oluşmasına neden olmaktadır. Çalışmada örnek olaylar tünel portallarındaki kazılarda karşılaşılan sorunların önemli kısmının boyuna yöndeki eğimden kaynaklı deformasyonlara bağlı olduğunu göstermektedir.

Çalışmada FLAC 3D yazılımı ile oluşturulan üç boyutlu bir model kullanılarak ön yamaç eğimleri α: 30°, 40°, 45°, 50° ve tünel-yamaç eğimi açıları β:0°, 10°, 20°, 30° ve 40° olarak modellenmiştir. Öncelikle α açısının etkileri analiz edilmiş ve α'nın 40°'yi aştığı durumlarda deformasyonların oldukça arttığı belirlenmiştir. Bu artış hem düşey hem de yatay yer değiştirmelerde gözlemlenmiş ve yamacın stabilitesi üzerinde ciddi riskler oluşturmuştur. Ayrıca α küçük değerlerde iken deformasyonların daha sınırlı olduğu ancak 40° ve üzerinde hızla büyüyerek yamaç

stabilitesinin hızla bozulduğu tespit edilmiştir. Yamaç deformasyonlarının kazıya yakın bölgelerde daha yoğun olduğu ve bu etkilerin yamacın derinliklerine doğru giderek azaldığı belirlenmiştir. Deformasyonların çoğunlukla düşey yönde olduğu ve bu tür deformasyonların arazide büyük göçmelere yol açabilecek düzeyde olduğu ortaya koyulmuştur.



Şekil 1.1 Düşey deplasman grafiği

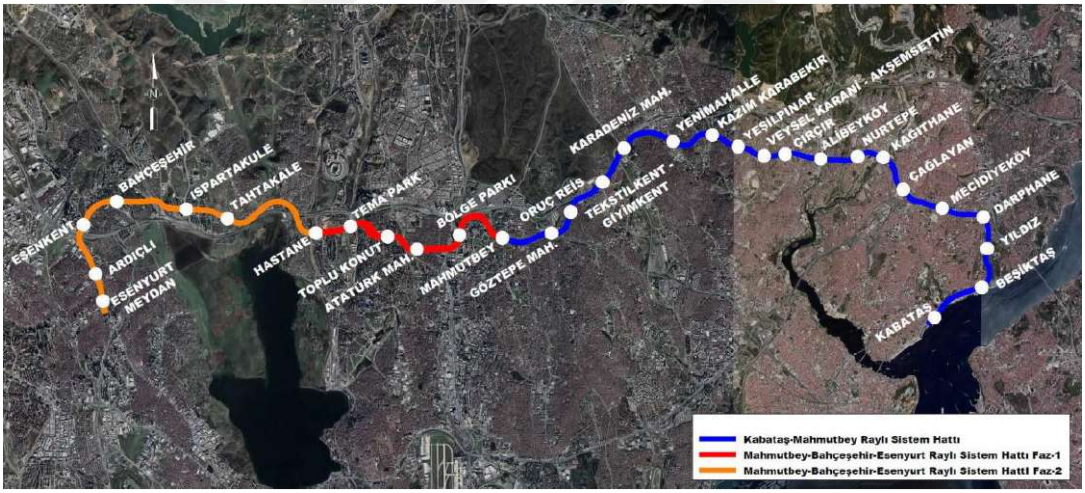
Tünel ekseni ile ön yamaç eğimi arasındaki açının (β) etkilerine yönelik analizler ise en uygun açının β=0° olduğunu göstermiştir. Bu durumda, tünelin yamaca dik giriş yaptığı senaryolarda büyük deformasyonların kontrol altına alınabileceği saptanmıştır. β açısının artmasıyla birlikte deformasyonların boyut ve kapsam olarak büyüdüğü, özellikle 30° ve üzerindeki açılarda yamacın arka kenarlarında daha ciddi etkilerin ortaya çıktığı belirlenmiştir. Buna bağlı olarak tünelin yamaca dik olarak giriş yaptığı tasarımların daha tercih edilebilir olduğu vurgulanmıştır.

Yapılan çalışmaların sonuçları, tünel kazısı öncesinde uygun iyileştirme ve destek önlemlerinin alınmasının gerekliliği belirlenmiştir. Kazı sırasında yamaç deformasyınlarının sürekli olarak izlenmesi ve bu sayede potansiyel risklerin önceden tespit edilmesi yapım güvenliği açısından kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca daha güvenli bir kazı süreci için hem tasarım hem de saha uygulamaları açısından mevcut mühendislik yaklaşımlarına değerli katkılar sunmuştur. Bu bulgular eğimli topoğrafyalarda tünel kazı ve destek tasarımına yönelik önemli bir referans niteliğindedir.

1.2 Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Projesinin Tanıtımı

Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Hattı, İstanbul'un Avrupa yakasında yer almaktadır. Kabataş-Mahmutbey (M7) metrosunun uzatma hattı olarak Mahmutbey'den başlayarak doğu-batı eksenindebir güzergah takip edip, TEM otoyolunun kuzeyinde son bulmaktadır.

Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Hattı, Avrupa yakasında işletilmekte olan ve yapılması planlanan hatları birbirine bağlamaktadır. Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metrosunun ilk durağı olan Mahmutbey İstasyonu, Kirazlı-Başakşehir-Olimpiyatköy (M3) ve Kabataş-Mahmutbey (M7) raylı system hatlarıyla entegrasyonunun gerçekleştiği yerdir. Uzatma hattında yapılacak olan Atatürk Mahallesi İstasyonunda ise Ataköy İkitelli Metrosuyla entegrasyon sağlanabilmektedir. Şekil 1.1'de Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Hattı Güzergahı gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Hattı Güzergahı

1.3 Güzergah Hakkında Genel Bilgi

Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Raylı Sistem Hattı, Mahmutbey İstasyonu yaklaşık 38 m derinliktedir. Bu istasyonda Kirazlı-Başakşehir-Olimpiyatköy Metrosuyla entegrasyon sağlanmaktadır. İstasyon sonrasında önce R=450 m kurpla kuzeybatı doğrultusunda devam eden hat, TEM otoyoluna gelmeden R=390 m kurpla güney batı yönüne dönerek, Bölge Parkı yapılması planlanan alanda bir sonraki istasyona ulaşmaktadır. Mahmutbey İstasyonundan sonra arazinin eğimi çok yüksek olduğu için, %4,70 eğimle iniş yapmaktadır.

Bölge Parkı İstasyonu, yapılacak olan uzatma hattının ilk istasyonu olup yaklaşık derinliği 35 m dir. İstasyon Basın Ekspres yolunun doğusunda, Taşocağı Caddesi'nin yanında yer almaktadır. Tünel peron olarak yapılması planlanan istasyon sonrasında hat açıklığı 12 m'ye kadar düşüp, R= 300 m kurpla güneybatı doğrultusunda ilerleyerek önce Taşocağı Caddesi'nin daha sonra da Basın Ekspres Yolu'nun altından geçmektedir. Sonrasında hat açıklığı R=1500 m kurpla tekrar 32 m'ye açılarak M3 hattının bir uzantısı olarak projelendirilen Ataköy-İkitelli Raylı Sistem Hattıyla entegrasyonun yapılacağı Atatürk Mahallesi İstasyonu'ndan sonra önce -%4.20 eğimle iniş yapan hat, akabinde %1,80 eğimle istasyonun yapılacağı derinliğe ulaşmaktadır.

Atatürk Mahallesi İstasyonu, yaklaşık 38,60 m derinliğinde yapılacak uzatma hattının 2. Istayonudur. Zühtü Şenyuva İlköğretim Okulu'nun altında yer alan istasyondan sonra R=350 m kurpla kuzeybatı doğrultusunda ve %4,10 eğimle tırmanarak Hürriyet Caddesi ve Arenapark Alışveriş Merkezi'nin altından geçip Kent Bulvarı'nda sistemi 3. Istasyonu olan Toplu Konut İstasyonuna ulaşmaktadır.

Toplu Konut İstasyonu top-down inşaat yöntemiyle yapılması planlanmış ve bu şekilde yapılmaktadır. Toplu Konut İstasyonu peron tünelleri S makas ile birbirine bağlanmaıştır. İstasyondan sonra %4,70 eğimle Tema Park istasyonu için inişe geçen hat, R=620 m kurpla güneybatı eksenine doğru dönüp istasyon yapısının yer alacağı bölgeye ulaşmaktadır. Tema Park İstasyonu yaklaşı 25 m derinlikte yapılmaktadır.

4. İstasyon olan Tema Park ile 5. İstasyon olan Hastane İstasyonları arasında eğim %0'dır. Bu istasyonlar arasında trenlerin parklanma yapacağı ayrı bir tünel yapılmaktadır. Ayrıca burada ana hatlar arasında karşılıklı çapraz geçişin sağlanması açısından kruvazman tipinde bir makas teşkil edilmiştir. Hastane İstasyonu'nun, çıkış kollarından bir tanesi Kanuni Sultan Süleyman Hastanesi'nin bahçesine çıkmaktadır.

Tahtakale İstasyonu, sistemdeki 6. İstasyon olup derinliği yaklaşık 22 m dir. İstasyon sonrasında bulunan çapraz makas takımıyla iki hat birbirine bağlanmaktadır. Makas bölgesinden sonra %3,46 eğimle tırmanışa geçen hat, R=350 m kurpla Ispartakule istasyonunun yapılacağı doğu-batı doğrultusuna girmektedir.

Ispartakule İstasyonu, raylı system hattının 7. Istasyonu olarak planlanmış olup, konutların yoğun olduğu bir bölgede yer almaktadır. Yaklaşık derinliği 27 m olan istasyon, TEM yanyol bağlantısı üzerinde yer almaktadır.

Ispartakule İstasyonu'ndan sonra R=350 m kurpla kuzeybatıya yönelen hat, -%3,58 eğimle 3. Çevre yolu bağlantısının altından geçip arkasından %3 eğimle viyadüğe çıkmaktadır. Viyadükte sırasıyla Ispartakule Caddesi, TCDD yolarının üstünden geçip R=400 m kurpla İSKİ arıtma tesislerinin yanından geçmektedir. Viyadükte devam eden hat Arı Kuşu Caddesi'ni de geçtikten sonra Bülbül Caddesine gelmeden -%1 eğimle tünel giriş yapmaktadır. Viyadükte 4,70 m olan hat açıklığı, tünele girdikten sonra tekrar 32 m'ye genişlemektedir. 8. İstasyon olarak projelendirilen Bahçeşehir İstasyonu, Havuzlu Kavşağının bir kolu olan Ahmet Taner Kışlalı Caddesi üzerinde yer almaktadır.

Esenkent İstasyonu ortalama 23 m derinliktedir. Bahçeşehir İstayonu'ndan sonra R=850 m kurpla güneybatı aksına dönerek istasyonun yapılacağı Hoşdere-Esenyurt yolunun olduğu bölgeye denk gelmektedir. İstasyon öncesinde bulunan çapraz makas takımı, iki hattan birine geçişin yapılabilmesi ve bu istasyondan araçları geri dönüş yapabilmesine olanak sağlamaktadır. Güzergah Esenkent istasyonundan sonra Ardıçlı istasyonundan geçerek Esenyurt Meydan İstasyonunda son bulmaktadır.

1.4 Tezin Amacı

Artan nüfuslu dünyada ulaşım yatırımları yapmak kaçınılmaz olmuştur. Şehirler arası yollar ve kent içi ulaşım yatırımları büyük bütçeli işler haline gelmiştir. Özellikle ülkemizde yer şekillerinden dolayı yatırım maliyetleri daha da artmaktadır. Tüneller karayolu, demiryolu ve kent içi ulaşım sistmlerinden olan metro hatlarının işlevsel olması açısından inşa edilmektedir.

Tüneller çeşitli rijitlikteki kayalarda açılabildiği gibi farklı zemin türlerinde de açılmaktadır. Tünel tasarımı sırasında kaya ve zeminin mühendislik özellikleri belirlenip tasarlanmaktadır. Ancak tünel inşası sırasında mevcut zemin hareketleri ölçülerek kazı sırasında eleman boyut ve sayılarılarının artırılıp azaltılması mümkün olmaktadır.

Tüneller açılırken yüzeyde meydana gelecek deformasyon sınırlarının önceden belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu deformasyonların takibi açısından sahada geoteknik ölçme ve değerlendirme ekibi kurulmalıdır. Belirli zaman dilimlerinde yüzeyde ve etki alanında bulunan binaların hareketlerinin gözlemlenmesi gerekmektedir.

Tünellerin tasarımı sıklıkla 2D sonlu eleman yazılımlarıyla yapılmaktadır. Bu tasarım yapılırken üçüncü boyutta oluşan gerilme ve deformasyonları ifade edebilmek açısından çeşitili yaklaşımlar kullanılmaktadır.

Bu çalışmada açılmakta olan ikiz metro tünelinden dolayı yüzeyde meydana gelen deformasyon verileriyle 2D ve 3D analiz sonuçları karşılaştırılarak sunulmuştur.

1.5 Hipotez

Eğimli topoğrafyalarda açılan tünellerden dolayı meydana gelecek olan deformasyonlar 3D sonlu elemanlar yöntemiyle daha gerçekçi olarak tahmin edilebilmektedir.

2
TÜNELLER

2.1 Giriş

Ulaşım amaçlı planlanan yaya, su iletimi, demiryolu ulaşımı veya karayolunun yer üstünden iletiminin teknik ve ekonomik açıdan mümkün olmadığı durumlarda güzergah boyunca belirli kısımlarının yer altından geçirilmesi için yapılan silindirik yer altı yapılarına tünel adı verilir (Bozkurt, 1970 ve Vardar, 1979).

Gelişen metropol şehirlerde insanlar yaşamlarını sürdürmek için; barınma, savunma, depolama gibi alanlara ihtiyaç duymaktadır. Bütün bu gereksinimlerin karşılanması için ve çevreye verilecek olan tahribatın da azaltılabilmesi için tünelleri yapmak kaçınılmaz olmuştur (Öztürk ve Durmuş, 2008).

Tüneller yer altında açılan, çeşitli sistemlerle mühendislik teknikleriyle iyileştirilmiş ve belirli kazı destek elemanlarıyla desteklenerek kalıcı bir boşluk oluşturulan yeraltı kaya yapısıdır. (Vardar, 2013)

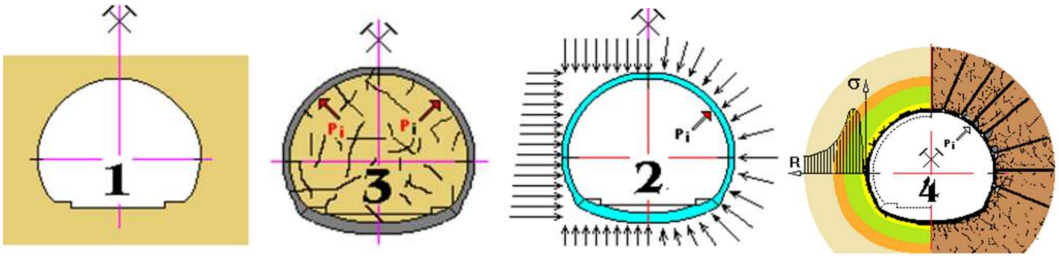
Tüneller çeşitli meslek grupları tarafından ortak bir tartışma sonucu planlanmakta bunun sonucunda projelerin hazırlanması ve inşa edilmesi süreci planlanmaktadır. Tüneller hangi amaçla yapılırsa yapılsın belirli bir güzergahı olmalıdır. Güzergahın planlanması bu alanda uzman inşaat mühendisleri tarafından yapılmaktadır. Güzergah seçilirken tünelin amacına yönelik olarak boyuna eğimlerin değerlerinin izin verdiği ölçüde tasarlanmalıdır. Ayrıca burada dikkat edilmesi gereken diğer husus tünel derinliğidir. Boyuna eğimlere bağlı olarak toğprafyanın izin verdiği ölçüde inşaat şaftlarının derinlikleri inşaat hızını istenen değerde tutabilecek ve tünelin güvenli bir şekilde açılmasına olanak verecek derinlikte olmalıdır.

Bu yüzden tüneller açılırken inşaat mühendiliğinin o alanda uzmanlaşmış tecrübeli mühendisleri, madenciler, mimarlar gibi meslek gruplarıyla ortak bir çalışma olarak tasarlanmalı ve inşa edilmelidir.

Mimari açıdan tünel; boyut ve biçimi ile kullanım ve görsel nitelikleri amaca göre tanımlanmış, içinden geçilebilen oyulmuş bir mekandır. Bu yaklaşımda çevre kayaçları, ortam koşulları ve değişkenleri dikkate alınmamakta, çoğu kez taşıyıcı sistemler ve diğer teknik öğeler ile de doğrudan ilgilenilmemektedir.

Madencilik açısından tünel; içi boşaltılması (kazılması) gereken bir yeraltı açıklığıdır. Madencilikte çevre kayaçları ve koşullarıyla ilgilenilmekle birlikte, temel hedef kazı-üretim verimliliği ve ilerleme hızı olduğundan, genelde deplasmanların küçük tutulması, konforun ve kalıcı stabilitenin sağlanması gibi beklentilerden uzaklaşılmaktadır. Hatta bazen daha da ileri gidilerek, kazıyı kolaylaştırmak amacıyla gerilmeleri yoğunlaştıran köşeli kazı geometrileri ve oransız açıklık boyutları da seçilebilmektedir.

İnşaat mühendisi açısından tünel; tanımlanmış olan yüklenme koşullarını karşılayan ve projesine uygun olarak dayanıklı ve nitelikli şekilde oluşturulması gereken bir taşıyıcı sistemdir. Bu yaklaşım, tünellerin "içi boşaltılmış bir geçişin taşıyıcı iç ve dış kaplamaları" olarak anlaşılmasına ve statik hesapların doğru olması koşulunun tünelin yapımına yetebileceği anlayışına kadar varabilmektedir (Vardar, 2013). Şekil 2.1'de bazı meslek gruplarına göre tünellerin anlamlandırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Bazı meslek gruplarına göre tünellerin anlamlandırılması
(1) Mimar gözüyle tünel (2) Madenci gözüyle tünel (3) İnşaat mühendisi gözüyle tünel (4) Gelişmiş mühendislik gözüyle tünel

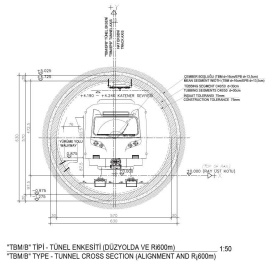
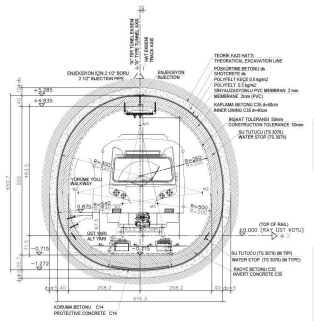
2.2 Metrolarda Kullanılan Tünel Enkesitleri

Dünyanın birçok yerinde yapılmış ve yapılmakta olan metro hatları bulunmaktadır. Yıllardır mühendisler ve mimarlar bu hatların yolcu konforu ve işletme koşulları açısından daha iyi nasıl olabilir diye tartışmaktadır. Yapılması planlanan her metro hattının projelendirme aşamasında güzergaha uygun olarak tünel enkesitleri oluşturulmaktadır. Tünel enkesitleri oluşturulurken mimari ve mekanik ihtiyaçlar doğrultusunda kesitin sınır şartları belirlenmektedir. Ancak enkesitin tünel açma yöntemlerine de uygun olması gerekmektedir.

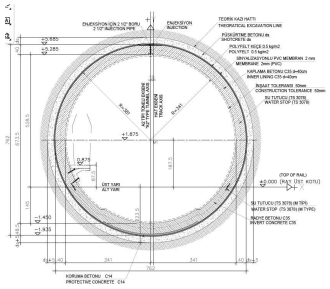
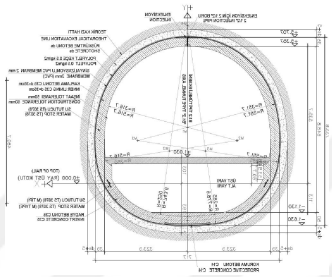
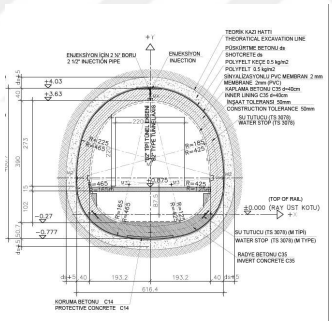
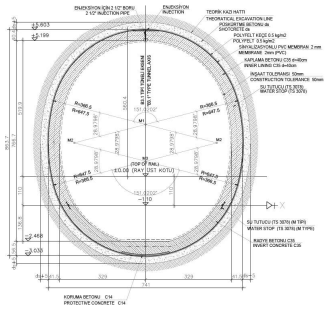
Tünel enkesiti belirlenirken geoteknik açıdan da değerlendirmek gerekmektedir. Özellikle büyük kesitli ($A>70\ m^2$) tünellerde geometri daha da önemli olmaktadır. Tüneller inşaat mantıkları gereği belirli deformasyonlara izin verilerek kaplamaya gelecek olan yükü azalması kapsamında tünelin açıldığı ortama göre zemin ve kayada kemerleşmenin olması kaplamada gerilmeleri azaltma mantığına dayanmaktadır. Hal böyle iken tünel geometrisi belirlenirken gelişmiş mühendislik gözüyle de tünel geometrisini incelemek ve ona göre karar vermek gerekmektedir.

Metro güzergahı boyunca hattın işletme, mekanik, mimari ihtiyaçları açısından bir çok tünel enkesiti kullanılmaktadır. Bunlar ana hat tünelleri, bağlantı tünelleri, peron tünelleri, makas tünelleri, yolcu ulaşım tüneli gibi kesitlerden oluşmaktadır. Genel anlamda tasarımı yapılan metro projelerinde kullanılan kesitler birbiri ile uyumludur. Proje özelinde bazı teknik nedenlerde kesitler üzerinde değişiklik yapılabilmektedir. Tablo 2.1'de metrolarda kullanılan tünel kesitleri gösterilmiştir.

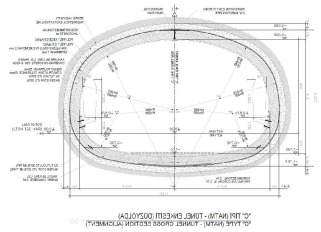
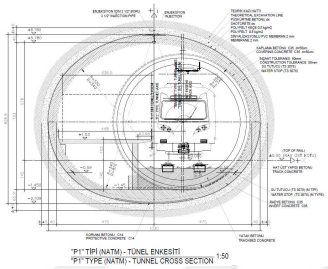
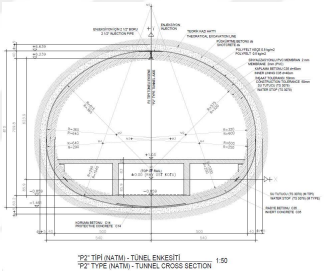
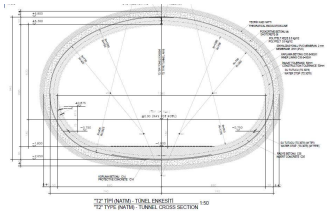
Tablo 2.1 Metrolarda kullanılan tünel kesitleri

Tünel Tipi	**Tünel Kesiti**	**Kullanım Amacı**
B Tipi Tünel		TBM ile açılacak tünellerde kullanılır. Kesiti TBM'e uygun olarak daireseldir.
A Tipi Tünel		İstasyonları birbirine bağlamak amaçlı yapılan ana hat tünellerinde kullanılır. Kesiti tren gabarisine göre belirlenir.

Tablo 2.2 Metrolarda kullanılan tünel kesitleri (devamı)

A2 Tipi Tünel		TBM'lerin içinden geçebileceği ölçülerde olmalıdır. İstasyonların giriş ve çıkış bölgelerine TBM'in girişini kolaylaştırmak amaçlı yapılır.
B1.2 Tipi Tünel		Yolcuların rahat bir şekilde peronlar arası geçiş ve istasyondan çıkışı sağlamak amaçlı yürüyüş yapacağu tüneldir.
B2 Tipi Tünel		Anahat tünellerini acil kaçış senaryoları kapsamında birbirine bağlamak için kullanılır.
B3.1 Tipi Tünel		Katlar arası ulaşımı sağlamak amacıyla yapılan eğimli merdiven tünellerinde kullanılan kesittir.

Tablo 2.3 Metrolarda kullanılan tünel kesitleri (devamı)

C Tipi Tünel		İki trenin birlikte uzun süreli parklanma yapabileceği geometridedir.
P1 Tipi Tünel		Trenin istasyona gelip kısa sürekli duraklama yatığı, yolcuların trene rahatlıkça binebileceği bir platformun bulunduğu tünel tipidir.
P2 Tipi Tünel		Metro istasyonunun havalandırma, elektrik ve elektromekanik gibi mahallerinin konumlandırıldığı tüneldir.
T2 Tipi Tünel		Bu tünelde trenlerin diğer hatta geçmek için kullandığı makas yer almaktadır.

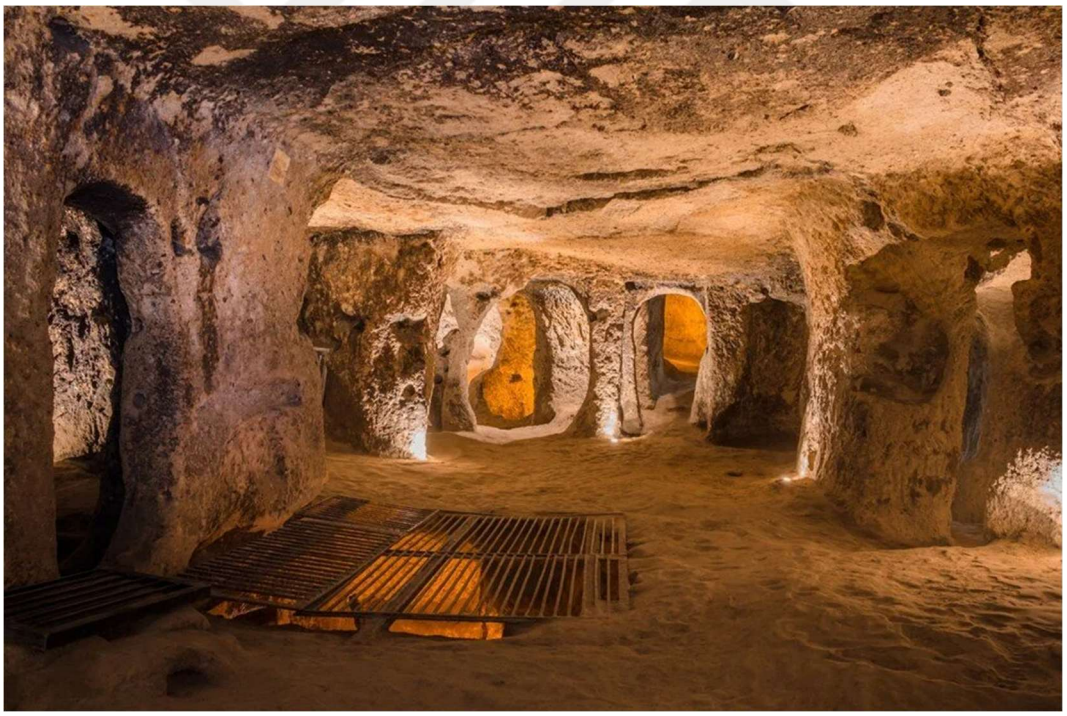
Metrolar en çok tünel kesitinin bulunduğu projelerdir. Dolayısıyla metro projeleri hazırlanması da oldukça zahmetli ve uzman mühendislik yetenekleri gerektirmektedir. Tünel kesit alanları en az 35 m^2, en fazla da 130 m^2 civarındadır.

2.3 Kullanım Amaçlarına Göre Tünellerin Sınıflandırılması

Tüneller geçmişten günümüze insanlar tarafından çeşitli amaçlarla yapılmış ve uzun yıllar kullanılmıştır. Tünellerin yaygın olarak ulaşım ve iletim amaçlı kullanılmaktadır. Ancak ihtiyaca göre farklı kesitlerde farklı amaçla içinde zamanla tüneller yapılmıştır. Bu amaçlar; barınak ve tapınak tünelleri, kanalizasyon ve kamu hizmet tünelleri, maden galerileri, stokaj tünelleri, askeri amaçlı tünellerdir.

2.3.1 Barınak ve Tapınak Tünelleri

İnsanlar yaşadıkları ortamda daha güvende hissetmek için yer altında kendilerine yaşam alanı oluşturmuşlardır. Bu yapılar genelde derinde inşa edilmiş ve bir çok odası bulunmaktadır. İçerlerinde yaşam alanları, mutfaklar, ibadethaneler ve tapınaklar da yapmışlardır. Bu barınaklar genelde yumuşak kayaçlarda kış aylarında inşa edilmişlerdir. Anadolu'da da bu tür yer altı şehirlerinin bir çok örnekleri vardır (Şekil 2.2).



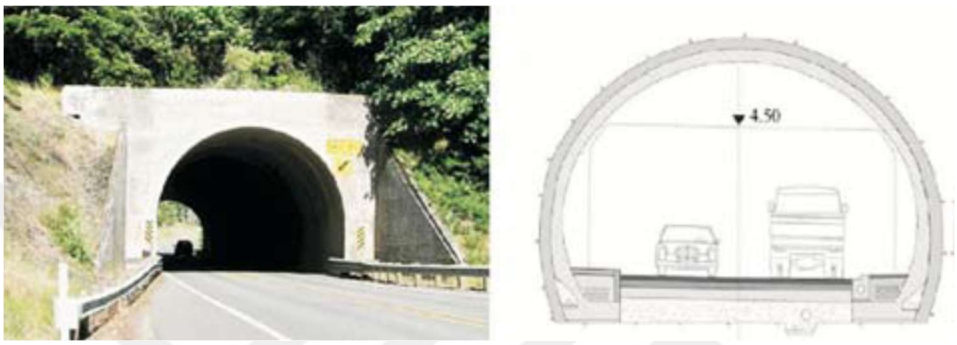
Şekil 2.2 Barınak ve tapınak tipine bir örnek

2.3.2 Karayolu, Demiryolu, Su Yolu Gibi Ulaşım Tünelleri

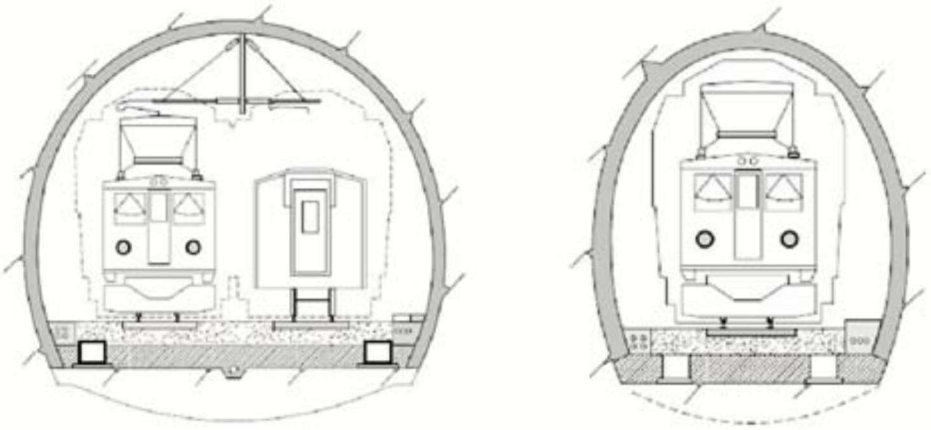
Yüzey ulaşımı ekonomik olmayan veya olanaksız olan yerlerde dağları delip tünel açarak güzergah belirlemek gerekir. Ulaşım yatırımları insanların refah düzeyinin gelişmesinde önemli bir paramatredir. Ayrıca ekonomik açıdan düşünüldüğünde de

güzergahın kısalması, eğimin azalması, yol konfor şartlarının artması da ciddi anlamda tasarruf sağlamaktadır.

Ulaşım tünelleri tek tüp olabildiği gibi yan yana iki farklı tünel şeklinde de olabilir. Ayrıca bu güzergahın araç yoğunluğuna ve arazi şartlarına göre karar verilmesi gereken bir konu olmaktadır. Şekil 2.3 ve şekil 2.4'te tipik bir karayolu ve demir yolu tüneli enkesitleri verilmiştir.



Şekil 2.3 Karayolu tünellerine ilişkin örnek görünüm ve tipik bir enkesit şekli (Kolymbas, 2005)



Tek Hatlı Tünel Çift Hatlı Tünel

Şekil 2.4 Demiryolu tünellerine ilişkin tipik iki enkesit şekli (Kolymbas, 2005)

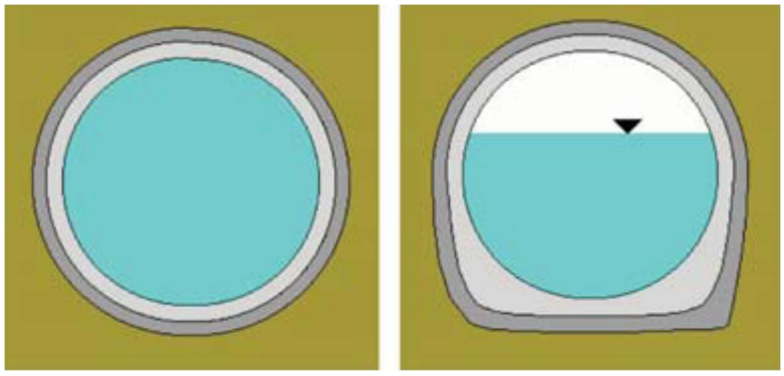
2.3.3 Maden Galerileri

Bu galeriler maden sahalarında yüzeyden cevhere ulaşmak ve cevheri işlemek amacıyla yer yüzüne çıkarılmasını sağlayan yapılardır. Şekil 2.5'te maden galerisine örnek verilmiştir.

Şekil 2.5 Maden galerilerine ilişkin bir örnek

2.3.4 Su İletim Tünelleri

Su iletüm tünelleri de tünel sektöründe önemli bir paya sahiptir. Şehirlerde kent içi suyun ve tarımsal sulama suyunun kaynaktan istenilen yere ulaşması için yapılırlar. Açık su iletim sistemlerinde su kaybı çok fazla olurkan burada kayıp miktarı minimum düzeylerde olmaktadır. Suyun tünellerle iletilmesi sırasındaki kayıp sızma şeklinde olmaktadır. Burada su iletimi basınçlı veya cazibeli akış şeklinde olabilir. Su iletim tünelleri TBM ve NATM yöntemleri ile yapılabilmektedir. Şekil2.6'da su iletim tünellerinde basınçlı ve basınçsız sistem gösterilmiştir.



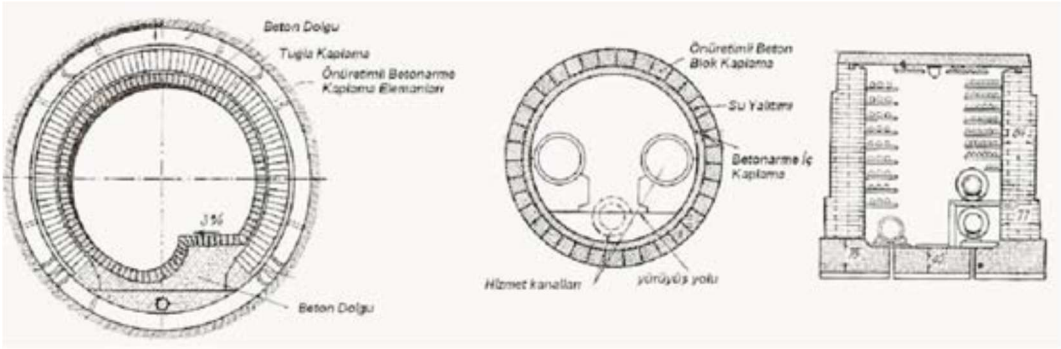
basınçlı sistem basınçsız sistem

Şekil 2.6 Su iletim tünellerine ilişkin enkesit örnekleri (Öztürk, 2007)

2.3.5 Kanalizasyon ve Kamu Hizmet Tünelleri

Genel mantık olarak su iletim tünelleine benzeyen bu tüneller dar kesitli yapılan tünellerdir. Bu tünellerde cazibeli akış söz konusu olup bundan dolayı iç basınç

yoktur. Tünelin kaplama tasarımları yapılırken bunun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Hizmet tünelleri de genel olarak elektrik, telefon, internet ve doğalgaz gibi alt yapı faaalitlerini içerisinde bulunduran tünel kesitidir. Bu tünellerde arıza durumuyla karşılaşılmasında müdehale açısından belirli mesafe ve belirli noktalarda tünele giriş şaftlarının yapılması gerekmektedir. Şekil 2.7'de kamu tünellerine ait örnekler sunulmuştur.



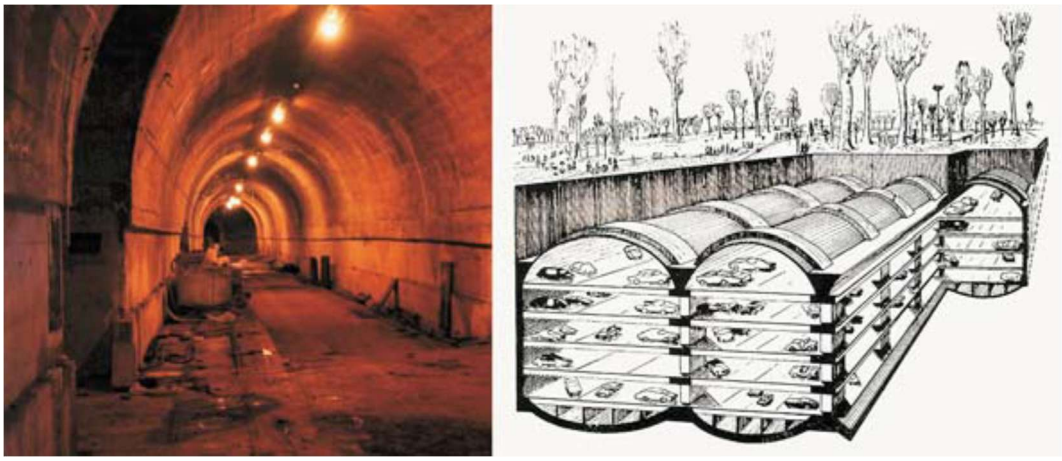
kanalizasyon gaz elektrik

Şekil 2.7 Kanalizasyon ve bazı hizmet tünellerine ilişkin kesit örnekleri

(Szechy, 1970)

2.3.6 Stokaj Tünelleri

Yeraltında çeşitli kimyasal, radyoaktif gibi diğer atıkları ve depolanmaya ihtiyaç duyulan araç ve gereçlerin stokların depolanması amacıyla yapılan tünellerdir. Burada depolanacak maddeye göre kesit ve diğer gerekliliklerin belirlenip tasarımların buna göre yapılması önem arz etmektedir. Şekil 2.8'da stokaj tünellerine örnekler verilmiştir.



(a) mühimmat için (b) Taşıtlar için

Şekil 2.8 Stokaj tünelleri için kesit örnekleri (Szechy, 1970)

2.3.7 Korunma ve Savunma Amaçlı Tüneller

Bu tip tüneller savaş, doğal afet gibi tehlikeler karşısında sivil halkın korunmasına yönelik yapılan ve yapılması gereken tünellerdir. Ayrıca bu tünellerde uçak ve mühimmat depolaması da yapılabilmektedir (Şekil 2.9).

Şekil 2.9 Askeri üslerin korunmasında ve ülke savunmasında kullanılan tünel örnekleri

3
YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ

3.1 NATM Yöntemi Tarihçesi ve Geşimi

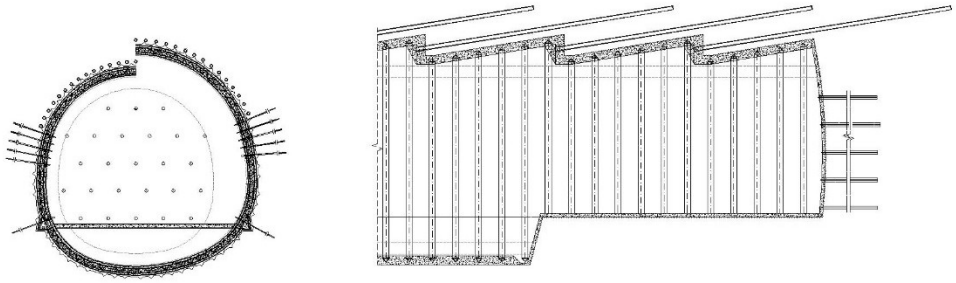
Günümüz tünelcilik sektöründe oldukça sık kullanılan yöntem olan Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin (NATM) temelleri 1950'nin sonları 1960'ın başlarında Avusturyalı mühendisler tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. L. Vın Rabcewicz tarafından 1963 yılında NATM yöntemi patentlenmiştir (Vardar, 1979). Bu dönemlerde geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen tünel açma faaliyetleri sırasında yaşanan zorluklar ve iş kazalarının azaltılması amacıyla burada yeni bir tasarım felsefesi arayışına gidilmek zorunda kalınmıştır.

NATM yöntemi ilk olarak Avusturya Alplerinde yapılan tünel projelerinde denenmeye başlanmıştır. Bu bölgede açılan tüneller yöntemin gelişmesine büyük ölçüde katkı sağlamıştır. Bu projelerde elde edilen tecrübeler, NATM yönteminin güvenli bir tünel açma yöntemi olmasında ve daha da gelişerek bugünkü halini almasında önemli bir rol oynamaktadır.

1960 yıllarının sonlarına doğru NATM yöntemi diğer Avrupa ülkeleri ve dünyanın çeşitli bölgelerindeki tünel projelerinde denenmeye ve uygulanmaya başlanmıştır. Özellikle İsviçre, Almanya, Fransa, İtalya gibi ülkelerde büyük tünel projelerinde NATM yöntemi başarıyla uygulanmıştır. Bu yöntem Avrupada ilk olarak 1969 yılında Frankfurt metrosunda uygulanmıştır (Satıcı ve Topal, 2015)

NATM yöntemi yıllar içerisinde günümüze kadar teknik olarak geliştirilmiştir. Yöntem jeolojik şartların, tünel geometrisinin ve tünel derinliğine bağlı olarak farklı tahkimat sistemleriyle güçlendirilmiştir. Günümüzde jeolojik koşullar ve yer altı suların belirlenmesiyle çeşitli sonlu elemanlar programları yardımıyla da uzman mühendisler tarafından projelendirilmektedir.

Bugün NATM yöntemi neredeyse yapılmakta olan tünel projelerinin tümünde tercih edilmektedir. Gelişen Zemin iyileştirme yöntemleriyle birlikte tüm kaya ve Zemin şartlarında da uzman mühendisler ve ekipler tarafından uygulanabilmektedir. Şekil 3.1 örnek bir NATM tünel kesiti ve inşaat aşamaları verilmiştir.



Şekil 3.1 Örnek bir NATM kesiti ve inşaat aşamaları

3.2 NATM Yönteminin Uygulanması

NATM sistemi kayalarda öngörülebilir deformasyon oluşturarak yapısal elemanlara gelecek olan yükün azaltılması tekniğine dayanmaktadır. NATM sisteminin ana felsefesi bundan oluşmaktadır (Rabcewicz, 1975).

NATM yöntemi günümüzde artık tünellerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple mühendisler ve uzman ekipler tarafından doğru bir şekilde sahada uygulanmaktadır. NATM ile açılan tünellerin projelendirmesi ön proje olarak yapılmakta ve saha koşullarına göre kazı destek için gerekli olan elemanların sayıları artırılıp azaltılmaktadır. Ayrıca boyuna yöndeki elemanların boy uzunluğuda değiştirilebilmektedir.

Bu yöntemle açılan tünellerde tünel içinde ve tünel dışında yüzeyde deformasyonların belirli periyotlarda izlenmesi ve bunların zaman içerisinde değişimi büyük önem arz etmektedir. Tünelin açıldığı zemine, tünel kesitine göre tasarımcının belirlediği yer değiştirmenin limitler dahilinde kalıp kalmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir.

Tünel açılırken tünel arından ve tünel çevresinden gelen suyun niteliğini bilmek de oldukça önemlidir. İnşaat çalışmaları başlamadan önce belirlenen güzergaha göre yönetmelik ve şartnamelerin belirttiği aralık ve boyda sondaj çalışmalarının

yapılmalıdır. Yapılan sondajlardan elde edilen verilerle tasarım parametreleri belirlenmeli ve gerekli jeolojik haritalamalar yapılmalıdır. Sondaj aralıkları ve yerleşimi için FHWA (2009) değişik tünel tipleri için Tablo 3.1'deki sondaj aralıklarını önermiştir.

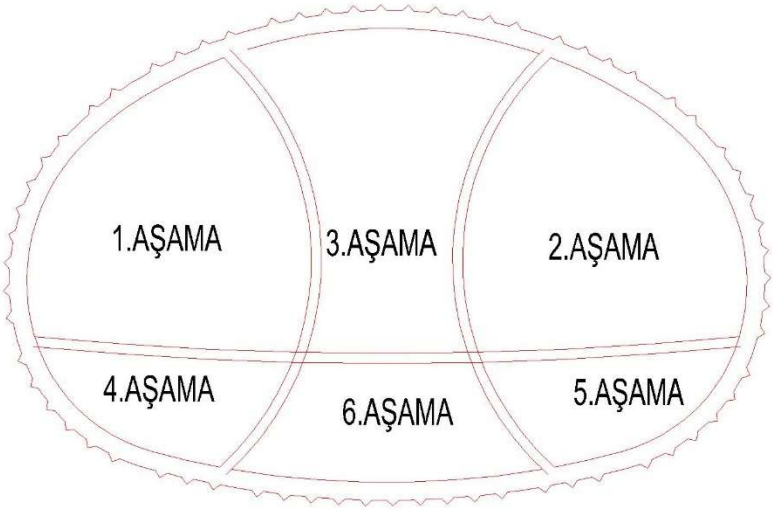
Tablo 3.1 Tüneller için önerilen sonraj aralıkları (FHWA, 2009)

Tünel Tipi	**Zemin/Kaya**	**Sondaj Aralığı**
Aç-kapa tüneller	-	30 m – 100 m
Kaya tünelleri	Olumsuz kaya koşullarında	15 m -60 m
	Olumlu kaya koşullarında	150 m – 300 m
Zemin tünelleri	Olumsuz zemin koşullarında	15 m – 30 m
	Olumlu zemin koşullarında	100 m – 150 m
Karışık kesitli tüneller	Olumsuz kaya koşullarında	8 m – 15 m
	Olumlu kaya koşullarında	15 m – 25 m

Tünel inşası sırasında uygun makine ve teçhizatı kullanmak gerekmektedir. Kullanılan ekipmanlar kayanın sertliğine ve zemine göre değişiklikler göstermektedir. Aynı zamanda bu tip tünel işlerinde operator tecrübesi de çok önemli bir unsur olmaktadır.

Ön tasarımı yapılan tünelde açma işlemini gerçekleşebilmesi için öncelikle kaya ve zemin türüne göre süren veya umbrella arch uygulaması yapılmalıdır. Bu elemamanlar çakılırken açısı ve doğrultusu uygun olmalıdır. Ayrıca süren ve

umbrella arch borularının çevresi enjeksiyon ile iyice doldrurulup sabitlenmelidir. NATM yönteminde kesit genişliğine bağlı olarak kaya ortamında, oluşabilecek gerilmekleri en az ve en düzgün şekilde olması için kazı düzgün geometrilere bölünerek parçalı olarak yapılmalıdır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Aşamalı tünel kazısı örneği

Tünel inşaat aşamaları arasında gerilme bölgelerinin iç içe girişim yapmaması açısından aşamalar arasına belirli bir mesafe olmalıdır. Buna benzer olarak yan yana açılan tünellerde tünel aynaları arasında ilerleme yönünde belirli bir mesafe olması gerekmektedir.

3.3 NATM Yönteminde Kullanılan Ekipmanlar

Tünel içerisinde delgi, kazı, betonlama işleri için çeşitli ekipmanlar kullanılmaktadır. Bunlarda bazıları sadece tünel içinde bazıları ise hem tünelde hem de tünel dışında kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte de tünel içinde makinalaşma artmakta ve daha kolay hale gelmektedir. Tünel kazısi için lullanılan başlıca ekipmanlar şunlardır;

- Delgi makineleri
- Kazıcı makineler
- Püskürtme beton makinesi
- Enjeksiyon makinesi ve kazanları
- Yükleyici makineler (loaeder)

- Transmikserler

a) Delgi Makineleri

Tünel içerisinde yatay, düşey ve açılı olarak zemin çivisi, kaya bulonu, süren, umbrella arch elemanlarının yerleştirilmesi için belirli çaplarda delikler açılmasını sağlar. Burada jumbo veya paletli tek boomlu delgi makinası kullanımı yaygındır. Şekil 3.3'te Jumbo delgi makinası delgi işlemi gösterilmiştir.

Şekil 3.3 Jumbo delgi makinesi

b) Kazıcı Makineler

Kazı destek imalatları yapıldıktan sonra projesine uygun olarak kaya ve zeminin boşaltılmasını sağlar. Kaya formasyonlarında önce kırıcı yardımıyla küçük parçalara ayrılıp kazılması kolaylaştırılır. Çok sert kayalarda ise patlayıcı madde kullanılıp kaya parçalara ayrılır (Şekil 3.4).

Şekil 3.4 Kazıcı ile zeminin kazılması işlemi

c) Püskürtme Beton Makinesi

Sahaya beton santrallerinden hazır olarak gelen püskürme beton belirli basınç altında yüzeye fırlatmak suretiyle yapışıp priz hızlandırıcı katkı yardımıyla aniden betonun donmasını sağlayan makinedir. Bu makinenin başlık kısmı serbest olup

işlem sırasında uniform dağılım sağlanması açısından oynamaktadır. Şekil 3.5'da püskürtme beton makinası örneği verilmiştir.

Şekil 3.5 Püskürtme beton makinesi

d) Enjeksiyon Makinesi

Enjeksiyon makinesi, tünel içerisinde kazı destek elemanlarının yerine tatbiki sırasında gerekli olan çimento ve su karışımının istenilen basınçta yerine iletilmesini sağlamaktadır.

e) Yükleyici Makineler (Loader)

Tünel içerisinde kazıdan çıkan malzemenin şaft başındaki portal vinç kovasına veya tünel portalına kolaylıkla pratik bir şekilde getirir. Tünel içeriside en efektif kullanılan makinadır. Tünel içerisindeki her türlü sevkiyatı kovası yardımıyla yapar (Şekil 3.6).

Şekil 3.6 Tünelden çıkan malzemeyi kamyona yükleyen loader

f) Transmikserler

Santralden gelen püskürtrme betonun kazı aynasına ulaşması için kullanılır.

3.4 NATM Sisteminde Kullanılan Destek Elemanları

Tünel açma işlerine başlamadan önce uygunacak kesite özel olarak tasarlanan kazı destek sisteminin belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar için bazı ampirik yaklaşımlar geliştirilmiş olup günümüzde sonlu elemanlar sayısal analiz programlarından da yardım alınabilmektedir.

NATM kazı destek sistemi yüzeydeki yapıların ve tünel içi güvenliği sağlayacak şekilde dizayn edilmelidir. Burada projelendirme öncesi kaya ve zemini analiz edip iyice anlamak gerekmektedir. Ayrıca kazı sırasında da yer altı çalışmalarıyla uyumu kontrol edilip değişiklikle karşılaşıldığı sırada zaman kaybetmeden kazı destek sistemi değiştirilmelidir.

Bu sistemde kullanılan kaze-destek elmanlarının projesine uygun olarak tasarlanması oldukça önemlidir. Tünel projeleri genellikle büyük bütçeli işler olmaktadır. Tünel açma işleri ise bu projelerde maliyetteki en büyük payı almaktadır. Düzgün tasarlanmış ve yerinde düzgün uygulanmış bir tünelde maliyet büyük ölçüde kontrol edilmiş ve kaynaklar düzgün kullanılmış demektir.

Tünel açma sistemlerinde kullanılan kazı destek elemanları şunlardır;

- Püskürtme beton
- Hasır çelik
- Kaya bulonu
- Zemin çivisi
- Çelik iksa
- Şemsiye süren (umbrella arch)
- Süren

3.4.3 Püskürtme Beton

Püskürtme beton, inşaat sektöründe, özellikle tünel projelerinde yaygın olarak tercih edilen bir uygulama yöntemidir. Bu yöntemde, özel olarak tasarlanmış püskürtme makineleri yardımıyla beton karışımı yüksek basınç altında tünel

yüzeylerine uygulanır. Püskürtme işlemi, betonu tünel duvarlarına homojen bir şekilde dağıtarak yüzeylerin kısa sürede kaplanmasını sağlar. Ayrıca, uygulama esnasında hızlı ve pratik bir çözüm sunarak iş süreçlerini önemli ölçüde hızlandırır.

Püskürtme betonun en önemli avantajları arasında esneklik, dayanıklılık ve homojen uygulama kabiliyeti yer alır. Bu özellikler, yöntemin zorlu ve erişilmesi güç alanlarda dahi etkili bir şekilde kullanılmasına olanak tanır. Özellikle su geçirimsizliği sağlama kabiliyeti, su basıncının yüksek olduğu tünel yapılarında püskürtme betonu öne çıkaran bir unsur olarak dikkat çeker. Diğer betonlama yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve daha verimli sonuçlar alınabilmesi, bu yöntemin tercih edilme nedenlerinden biridir.

Püskürtme beton, maden tünellerinden karayolu ve demiryolu tünellerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yöntem, tünel inşaatlarının güvenli ve dayanıklı bir şekilde tamamlanmasında kritik bir rol oynar. Özellikle büyük ölçekli altyapı projelerinde sıkça kullanılması, püskürtme betonun tünel inşaatlarındaki vazgeçilmezliğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Karayolları teknik şartnamesine göre, püskürtme beton karışımında kullanılan agreganın tane çapının 16 mm'yi aşmaması gerekmektedir. Buna ek olarak, püskürtme hortumunun çapı ile uyumlu olarak, agrega tane boyutunun hortum çapının üçte birinden büyük olmaması da şart koşulmuştur. Bu standartlar, püskürtme beton uygulamalarında işin kalitesini artırmak ve uygulama sırasında olası tıkanıklıkların önüne geçmek amacıyla belirlenmiştir. Agrega boyutlarının doğru seçimi, püskürtme betonun hem mekanik hem de fiziksel performansı açısından önem taşımaktadır. Özellikle iri taneli agregaların uygun oranda kullanılması, betonun sıkışma performansında iyileşme sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, agrega boyutlarının optimize edilmesi büzülme miktarını azaltarak, çatlama riskini en aza indirir (Kırbaş, 1995). İri agregalar, betonun bükülmeye karşı direncini artırarak, yapının daha dayanıklı olmasını sağlar. Aynı zamanda, iri agregaların uygun seçimi ve kullanımı, betonun bağlanma kapasitesini güçlendirir ve yapısal bütünlüğün korunmasına katkıda bulunur. Bu doğrultuda, agrega boyutlarının püskürtme betonun dayanıklılık ve performansı üzerindeki etkisi büyüktür. Teknik şartnamede belirtilen bu kurallar, uygulamanın uzun vadede başarılı sonuçlar vermesi açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 3.7'de püskürtme beton atım işlemi gösterilmiştir.

Şekil 3.7 Püskürtme beton uygulaması

3.4.4 Hasır Çelik

Tünel açma işlemleri esnasında geçici destek imalatlarının süreleri büyük bir öneme sahiptir. Bu süreçte kullanılan malzemelerin de imalat hızına uygun olması, yapımın etkinliği açısından kritik bir faktördür. Tünel içinde ihtiyaç duyulduğunda donatı çelikleri tercih edilmekte, bu sayede yapı güvenliği sağlanmaktadır. Donatı çeliklerinden hasır çelikler, iki farklı tipte üretilmektedir: Q ve R tipi. Q tipi hasır çelikler, boyuna 15 adet, enine ise 33 adet çubuktan oluşur. R tipi hasır çeliklerde ise boyuna 15 adet, enine 20 adet çubuk bulunmaktadır.

Her iki hasır çelik tipi de standart ölçülerde üretilmektedir. Hasır çeliklerin boyutları 5.00 metreye 2.15 metre olacak şekilde belirlenmiştir. Malzemelerin akma dayanımının en az 5000 kg/cm² olması, tünel inşaatında yapısal dayanıklılık açısından zorunlu bir gerekliliktir. Tünel projelendirme ve destekleme süreçlerinde bu tür teknik bilgiler, yapı güvenliği ve performansı açısından hayati önem taşımaktadır. Özellikle geçici destek yapılarında hasır çeliklerin doğru tip ve ölçülerde seçilmesi, tünelin uzun ömürlü ve güvenli olmasına katkı sağlar.

İmalat sırasında hasır çeliklerin sürekliliği, bindirme yapılması suretiyle sağlanmaktadır. Bu yöntem, yapısal bütünlüğün korunmasına yardımcı olurken aynı zamanda tünelin dayanıklılığını artırır. Hasır çeliklerin doğru şekilde

bindirilmesi, yük dağılımını homojen hale getirir ve zayıf noktaların oluşmasını engeller. Tüm bu uygulamalar, tünel yapımında kullanılan malzemelerin ve yöntemlerin, imalat sürecinde optimum performans göstermesi için son derece önemlidir. Dolayısıyla, tünel projelerinin başarılı bir şekilde tamamlanmasında donatı çeliklerinin etkisi büyüktür. Şekil 3.9'da hasır çeliklerin yerleştirme işlemi tamamlanmış tünel gösterilmektedir.

Şekil 3.8 Hasır çelikleri yerleştirilmiş püskürtme beton için hazır tünel

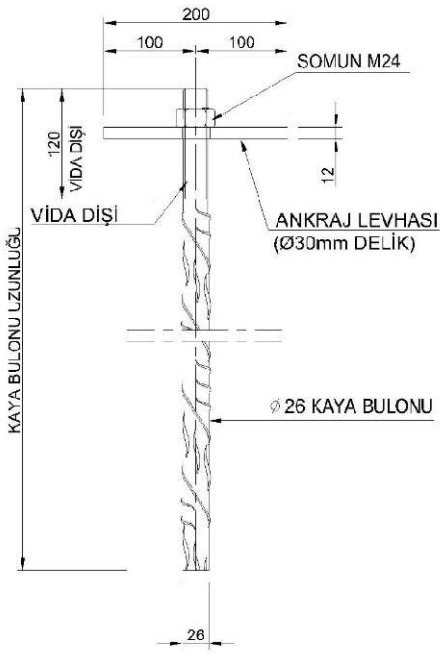
3.4.5 Kaya Bulonu ve Zemin Çivisi

Kaya formasyonlarında açılan tünellerde, kazı desteği sağlamak amacıyla çeşitli elemanlar kullanılmaktadır. Bu destek elemanlarından biri olan kaya bulonları, özellikle tünel yan duvarları ve tavan desteğinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Kaya bulonlarının yerleştirilmesi, püskürtme beton imalatı tamamlandıktan sonra, proje karelajına uygun şekilde gerçekleştirilir. İlk olarak, delgi makineleriyle projesine uygun çapta delikler açılır ve bu deliklere bir ucu yivli olan bulon çubukları yerleştirilir. Delgi işleminin doğru çapta ve derinlikte yapılması, bulonların işlevselliği açısından son derece önemlidir.

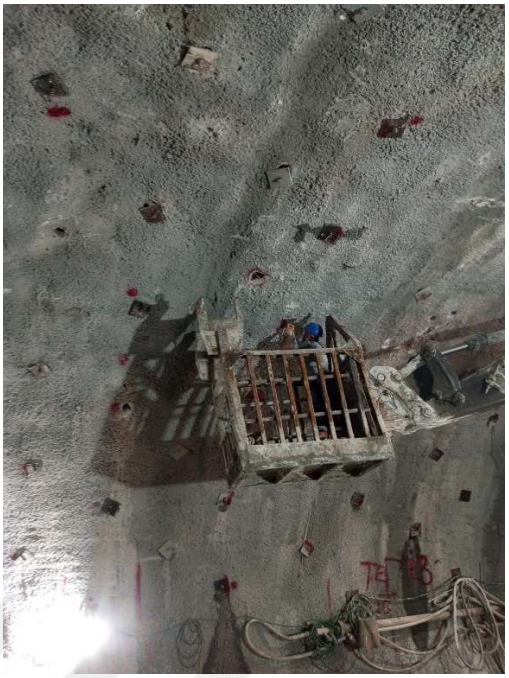
Kaya bulonlarında, bulon çevresinin enjeksiyonlanması önemli bir uygulama adımıdır. Bulonların etrafına yapılan enjeksiyon işlemi, bulonun kayaya sağlam bir şekilde tutunmasını sağlar ve yapının güvenliğini artırır. Kaya bulonlarının çalışma prensibi, pasif ankraj sistemi olarak tanımlanır. Bu sistemde, bulonun donatı kısmının kopması, donatının enjeksiyondan sıyrılması veya enjeksiyonun kayadan sıyrılması gibi kontrol parametrelerinin izlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler, bulonların yapısal dayanımını ve uzun ömürlülüğünü değerlendirmek için kritik veriler sağlar. Genellikle bulon donatı çapı 26 mm olarak tercih edilmekte olup, bu çap, hem yeterli dayanımı sağlamak hem de montaj kolaylığı sunmak amacıyla seçilmektedir.

Bulonlar, yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra torklanarak kilitlenir. Genellikle 5 tonluk bir tork uygulamasıyla bulonun kitlenmesi sağlanır ve bu işlem, bulonun etkin bir şekilde yük taşımasını mümkün kılar. Torklama işlemi, bulonun yerinde sabitlenmesini sağlayarak, yüklerin güvenli bir şekilde aktarılmasına yardımcı olur. Kaya bulonlarının uygun şekilde monte edilmesi, tünelin yapısal bütünlüğünü korumak ve uzun vadeli stabilitesini sağlamak açısından hayati öneme sahiptir. Dolayısıyla, kaya formasyonlarında açılan tünellerde kullanılan bu sistemler, tünelin güvenli ve uzun ömürlü olmasına katkıda bulunan kritik destek elemanları arasında yer alır.

Kaya formasyonlarda açılan tünellerde kazı destek elemanı olarak kullanılır. Daha çok tünel yan cidarlarında ve tavan desteğinde kullanılır. Bulonlar püskürtme beton imalatı tamamlandıktan sonra karelajına uygun olarak yapılır. Delgi makinasıyla projesine uygun çapta delgi yapıldıktan sonra bir ucu yivli olan bulon çubuğu yerine yerleştirilir Kaya bulonlarında bulon çevresi enjeksiyonlaması önem arz etmektedir. Kaya bulonlarının çalışma prensibi pasif ankraj sistemidir. Burada bulon donatısı kopması, donatının enjeksiyondan sıyrılması, enjeksiyonun kayadan sıyrılması control parametrelerine bakılması gerekmektedir. Bulon donatı çapı genelde 26 mm olarak tercih edilmektedir (Şekil 3.9). Bulon yerine yerleştirmesi tamamlandıktan sonra 5 tona torklanarak kitlenmesi yapılmaktadır (Şekil 3.10).



Şekil 3.9 Tipik bir kaya bulonu kesiti

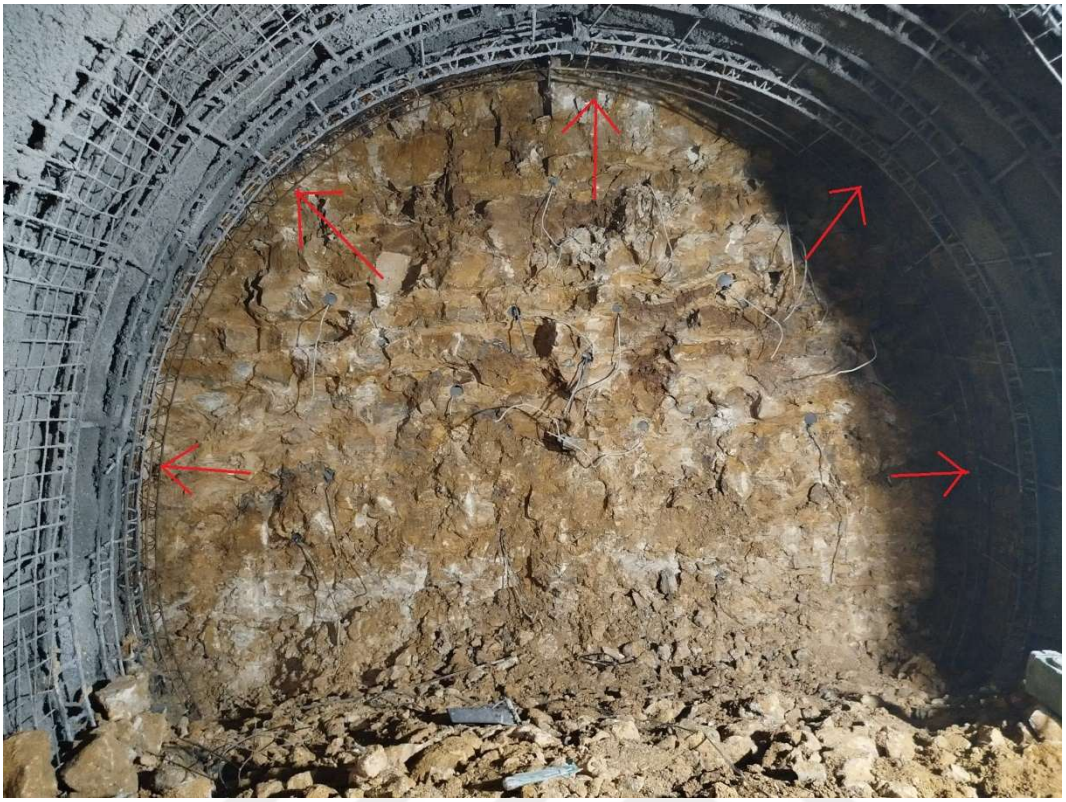


Şekil 3.10 Kaya bulonu torklaması

3.4.6 Çelik İksa

Tünel açma işlemleri sırasında göçmenin önlenmesi amacıyla kullanılan ilk destek elemanı çelik iksalardır. Bu iksalar, tünelin geometrisine uygun olarak özel parçalar halinde üretilmekte ve tünel içerisinde montajlanmaktadır. Tasarım sürecinde yapılan kabullere bağlı olarak, çelik iksalar betonarme kesitinin kapasitesine dahil edilebilir veya bu kapasiteye katkıda bulunmadan destekleyici görev üstlenebilir. Tünel boyunca yapılan haritasal ölçümler de bu iksalar üzerinden gerçekleştirilir. Güzergahın düzgünlüğü ve tünelin stabilitesi açısından iksa yerleşimi büyük önem taşımaktadır. İksaların doğru konumlandırılması, tünelin yapısal bütünlüğünü koruma ve olası deformasyonları minimize etme açısından kritik rol oynar.

Çelik iksalar, donatı çubuklarından oluşturulan kafes yapılar halinde üretilebildiği gibi, çelik profillerden de imal edilebilmektedir. Özellikle çelik profillerden yapılan iksalar, şehir içi sığ tünellerde sıklıkla tercih edilir. Bu uygulama, yüzeyde bulunan yapı stoğuna zarar vermemek ve zemin deformasyonlarını minimumda tutmak amacıyla önem arz etmektedir. Tünel kazısının stabilitesini sağlamak ve çevresel etkileri kontrol altında tutmak için çelik iksa sistemleri tünel projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.11'de iksası yerleştirilmiş bir tünel kazısı gösterilmiştir.



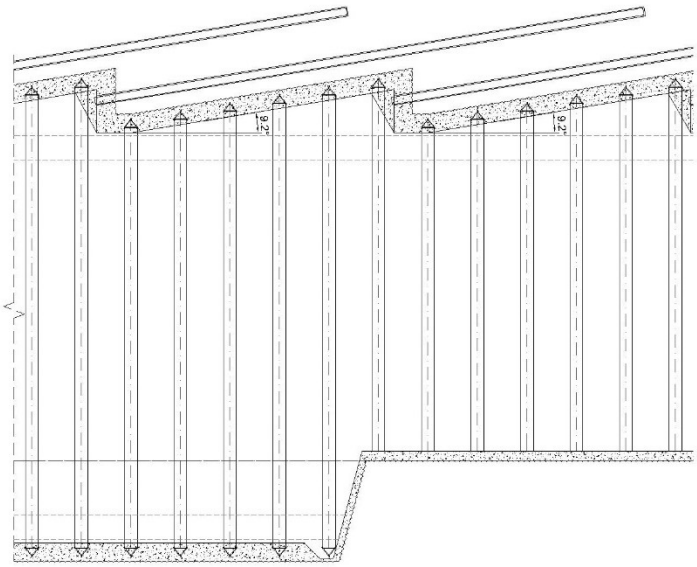
Şekil 3.11 İksası yerleştirilmiş tünel kesiti

3.4.7 Şemsiye Süren

Şemsiye sürenler, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile yapılan tünel kazılarında önemli bir koruyucu yapı elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem kapsamında, şemsiye sürenler tünel açma yönüne yaklaşık olarak 9-13 derece açıyla yerleştirilir. Şemsiye sürenlerin amacı tünel kazısında oluşabilecek zemin göçmelerini ve deformasyonları minimize ederek kazının güvenli bir şekilde ilerlemesini sağlamaktır. Tünel kazı sürecinde, özellikle zayıf zemin koşullarında şemsiye sürenlerin kullanılması, tünelin stabilitesinin sağlanması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Şemsiye sürenlerin yerleştirilme aralıkları, tünel kesitine göre belirlenir ve genellikle her 20 cm'de bir şemsiye süren yerleştirilmesi planlanır. Ancak bu aralıklar, zemin özelliklerine ve zeminin taşıma kapasitesine bağlı olarak artırılabilir ya da azaltılabilir. Daha zayıf zemin koşullarında, şemsiye sürenlerin daha sık yerleştirilmesi gerekebilirken, daha sağlam zeminlerde aralıklar genişletilebilir. Böylece, tünel kazısı sırasında zemin deformasyonları kontrol altında tutulur ve tünel içindeki güvenlik sağlanmış olur.

Şemsiye sürenler, 114.3 mm dış çapında ve 6.3 mm et kalınlığına sahip çelik malzemelerden üretilmektedir. Bu çelik malzemeler yüksek elastisite modülü sayesinde tünel tavanında iyileştirilmiş bir zon oluşturarak zeminin kemerlenmesini sağlar. Zemin içerisinde oluşturulan bu kemerlenme etkisi, zemin yüklerinin kontrollü bir şekilde tünel çevresine dağıtılmasını mümkün kılar ve tünelin uzun vadede stabilitesini sağlar. Bu sistem, zemin koşullarına bağlı olarak tünel açma sürecinin güvenli ve verimli bir şekilde ilerlemesine olanak tanır (Oke, 2016). Şekil 3.12'te şemsiye sürenlerin proje üzerindeli şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.12 Şemsiye sürenlerin tünel ilerleme yönüne yerleştirilmesi

3.4.8 Süren

Sürenler, kaya formasyonlarında açılan tünellerde, özellikle NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) kapsamında sıklıkla kullanılan önemli bir kazı destek elemanıdır. Bu elemanların ana işlevi, tünel kazısı sırasında kaya yüzeylerinden meydana gelebilecek kopma ve dökülmeleri önleyerek iş güvenliğini sağlamaktır. Sürenlerin kemerlenmeye doğrudan katkısı olmadığı kabul edilmektedir. Dolayısıyla, bu elemanlar tünelin yapısal bütünlüğünden ziyade, tünel açma işleminin güvenli ilerlemesi amacıyla kullanılır. Tünel açma sırasında, kazı alanında ortaya çıkabilecek kaya düşmeleri veya parçalanmalar, iş güvenliğini tehdit eden unsurlar arasında yer aldığından, sürenlerin bu tür olumsuzlukları engellemesi kritik bir işlevdir.

Süren boruları genellikle 1 inç ile 2 inç çapında üretilmekte ve farklı kaya türlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şemsiye sürenlere benzer şekilde, bu borular da tünel tavanına belirli bir açıyla yerleştirilir ve bu açının doğru belirlenmesi tünel kazısının güvenliği açısından büyük önem taşır. Kaya formasyonlarda tünel tavanında oluşabilecek kaya kopmalarını engelleyerek, kazı çalışmalarının duraksamadan ve güvenli bir şekilde sürdürülmesine katkı sağlar. Sürenlerin yerleştirilme açıları ve pozisyonları, tünel kazısının ön tasarım aşamasında belirlenir ve saha koşullarında bu tasarımda değişiklikler yapılabilir.

Süren borularının tünel içindeki yerleştirilme aralıkları da ön tasarımda belirli varsayımlar üzerinden yapılır ve bu aralıklar genellikle 2 metre olarak planlanmaktadır. Ancak saha koşulları, kaya formasyonlarının özellikleri ve kayalarda bulunan eklem ve süreksizliklerin durumu, sürenlerin yerleştirilme aralıklarını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Bu nedenle, tünel kazısı sırasında kaya formasyonlarının jeoteknik özellikleri dikkate alınarak aralıklar yeniden düzenlenebilir. Kaya içindeki eklemli yapılar, süreksizlikler ve boşluklar, tünel kazısının ilerleme hızını ve güvenliğini belirleyen kritik faktörler arasında yer almakta olup, sürenlerin bu yapılar dikkate alınarak yerleştirilmesi büyük önem taşır. Şekil 3.13'te sürenlerin montajı yapılmış tünel gösterilmiştir.

Şekil 3.13 Süren montajı yapılmış tünel

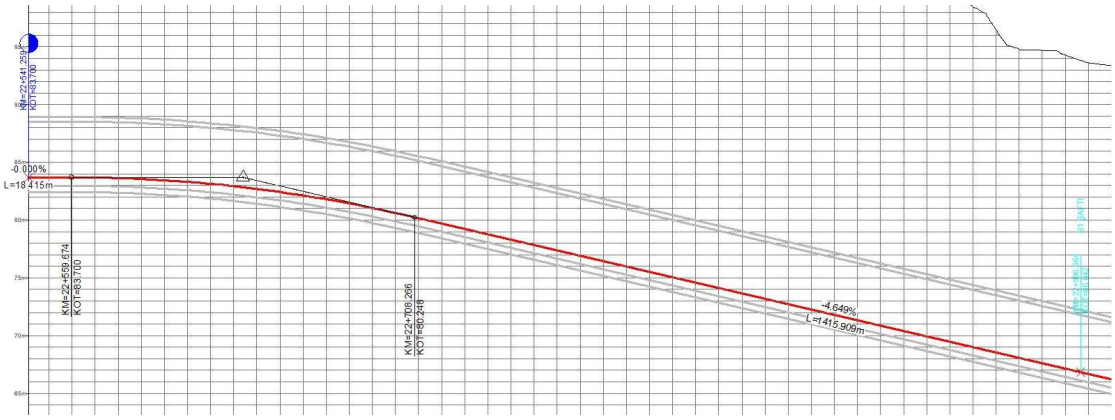
4
ÇALIŞMA HAKKINDA GENEL BİLGİLER

4.1 Topoğrafya ve Tüneller

Çalışma kapsamında incelenen tüneller Kabataş-Mecidiyeköy-Mahmutbey Hattının (M7) devamı niteliğinde olan Mahmutbey-Bahçeşehir-Esenyurt Metro Projesinin S1 Şaftı ile Mahmıtbey İstasyonu arasında kalan hat tünelleridir (Şekil 4.1). Bu tüneller Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile açılmakta olup A tüneli en kesitine sahiptir.

Şekil 4.1 İnceleme bölgesi ve tünel yerleşimi

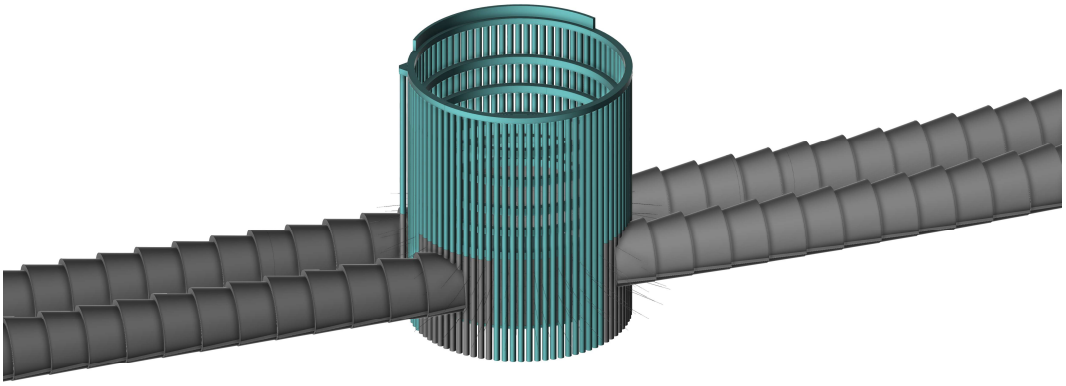
İlgili güzergah boyunca yer alan tüneller, yan yana açılan ikiz tüneller şeklindedir. Tünellerin güzergah üzerindeki boyuna eğimi arazi şartlarından kaynaklı olarak %4,65 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.2). Bu eğim projenin teknik gereksinimlerine uygun olarak belirlenmiş ve tasarımlar bu şekilde ilerlemiştir.



Şekil 4.2 Güzergah boy kesit

Ayrıca topoğrafya eğimi ortalama %9,50 seviyesindedir. Bu eğim tünel açma işlemmleri sırasında karşılaşılan geoteknik zorlukları etkileyen önemli bir faktör olmaktadır. Tünellerin örtü kalınlığı 21,70 m ile 38,20 m arasında değişikli göstermekedir. Tünel açma çalışmaları öncesi yapılan analizlerde örtü kalınlıklarına dikkat edilmesi önemli bir konu olmaktadır.

S1 Şaftı inşaat amacıyla yapılmıştır. Bu şafttan hem ileri hem de geri yönlerde olmak üzere toplamda dört aynadan tünel kazısı yapılmaktadır. S1 Şaftı konum itibariyle lojistik şartlar düşünülerek en uygun lokasyonda planlanmıştır. Şaftın genişliği net 26 m dir. Şaftın derinliği ise 28.75 m olarak belirlenmiştir. Bu genişlik planlanırken her iki tünelide kapsayarak inşaat hızının artırılması hedeflenmiştir. Ayrıca olası işlev değişikliğinde TBM çıkışına da olanak sağlayaması hedeflenmiştir. Şaftta tünel ilk girişlerinde daha kolay ve güvenli bir kazı ortamı oluşturması açısından şaft kazıklar tünel üst kotunda bırakılmıştır. Tünel aynasının olduğu bölüm iste püskütme beton ve hasır çelikle detaylandırılmış ve buyuna yönde zemin çivileri kullanılmıştır. Zemin çivilerinin kullanılmasının amacı püskürtme beton tabakasını zemine sabitlemek ve tünel açımı sırasında zeminin göçmesini önlemektir. Şekil 4.3’te tünel kazılarının yapıldığı şaftın 3D görünümü verilmiştir.



Şekil 4.3 S1 Şaftı 3D görünümü

4.2 NATM Tünel Kesiti

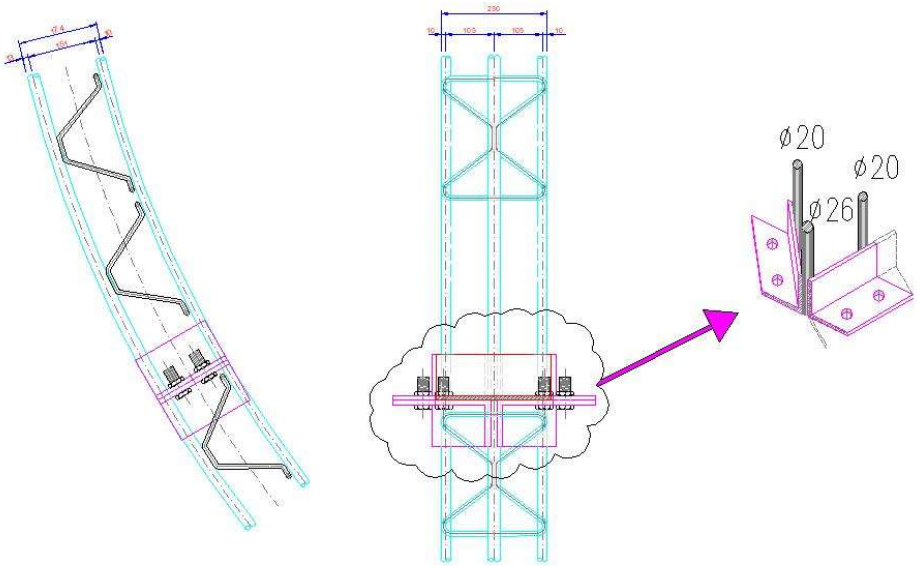
Tünel kesiti olarak A tipi tünel kullanılmıştır. Bu tünel enine basık bir şekilde olarak formlandırılmıştır. Tünel kesitleri belirlenirken açılma kolaylığı ve güvenliği göz önünde bulundurulmaktadır. Aşamalı tünel kazılarında da bu durum göz önüne alınmaktadır. Tünel kazı aşamalarında ardından gelecek kazının formu önceki kazının formuna uyum sağlaması büyük bir önem arz etmektedir. Kazı sırasında da bu sisteme dikkat edip tünel tahkimatlandırılması projesine uygun olarak yapılmaktadır.

Kullanılan tünelde kazı destek elemanları olarak 9 m boyunda, 114.3 mm çapında ve 6.3 mm et kalınlığında şemsiye süren kullanılmışıtır. 29 adet olarak projelendirilen bu elemanlar tünel açılması sırasında ilk olarak imalatı gerçekleştirilen elemanlardır. Şemsiye sürenler daha çok gevşek ve yumuşak zeminlerde uygulanabilmektedir. Bu zeminlerde uygulanmasının sebebi kendini tutamayan ve taşıma gücü açısından zayıf zeminlerde daneler arası aktarılan gerilmeyi taşıyarak tünel ayaklarına doğru aktarılmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla tünel geçici kaplamasına gelen yük azalmakta ve güvenli bir kazı ortamı oluşturmaktadır.

Şemsiye süren imalatlarını yapılmasının ardından projesine göre ilk kazı aşamasına başlanmaktadır. NATM tünel yapımında kazılar yumuşak zeminlerde kovalı kazıcı makineler ile yapılmaktadır. Kovalı kazıcının yeterli olmadığı daha sert zemin ve kayalarda uygun kırıcı makine kullanılarak kazı işlemi gerçekleştirilmektedir.

Herhangi bir olası göçük ihtimaline karşı tünel kazısı sırasında makine operatörü hariç hiçbir personel ayna çevresinde bulundurulmamalıdır. Tünel kazısı tamamlandığında ise personeller ayna çevresinin ve kazı ortamını kontrol ederek buraya yaklaşabilirler.

Tünel kazısının ardından aynaya ve tünel duvarlarına vakit geçirmeden emniyet amaçlı ve betonarme kesitin paspayını oluşturmak açısından ilk püskürtmr beton uygulaması yapılmaktadır. Bu işleminde hızlıca gerçekleştirilip projesine uygun olarak birinci sıra hasır çelik ve ardından iksanın koyulması gerekmektedir. Proje kapsamında kullanılan iksa H=174 mm lik 1Ø26+2Ø20 donatıdan oluşan kafes tipi iksa kullanılmıştır (Şekil 4.4). Tünel boyuna yönde ise iksa aralığı 80 cm olarak planlanmıştır. Ancak saha şartlarına göre bu aralık 60 cm ye kadar düşürülebilmektedir. 60 cm den daha düşük iksa aralığı tercih edilmemektedir. Bu mesafeden daha düşük iksa aralığı gerekiyorsa proje revizyonuna gidilerek umrella sayısı artırılabilir. Bunu da yeterli olmadı durumlarda zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmalıdır.

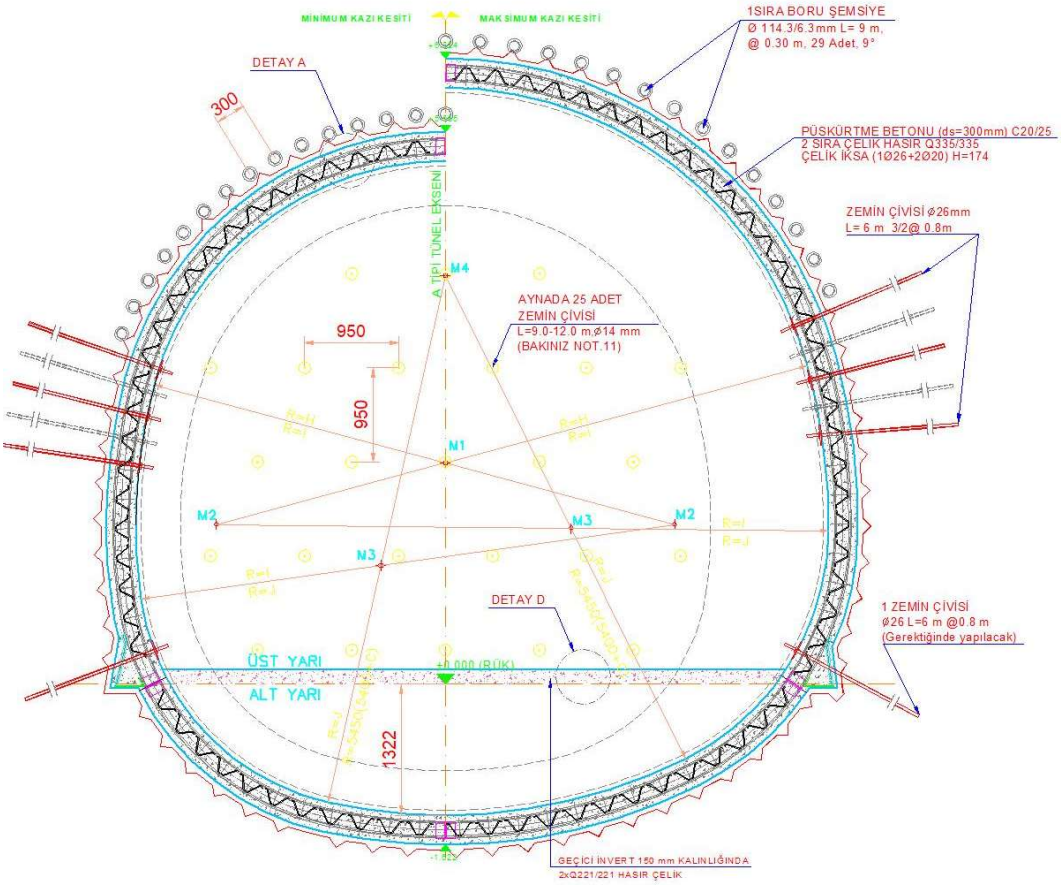


Şekil 4.4 Kullanılan İksa detayı

Birinci sıra hasır çelik ve iksanın koyulmasının ardından son kat hasır çelik de koyulması gerekmektedir. Hasır çelik olarak Q335/335 seçilmiş ve tünellerde

kullanılmıştır. Hasır çelik imalatının da tamamlanmasının ardından 25 cm kalınlığında püskütme beton atılarak betonarme kesit oluşturulmaktadır.

Tünel kazı desteğinin son elemanı olan kaya bulonu ve zemin çivileridir. A tünellerinde kullanılan zemin çivisi her iki yan olmak üzere 3/2 karelajda Ø26 çapında, 6 m boyundadır. Zemin çivileri ugun delgi yöntemiyle delinmektedir. Delginin tamamlanmasının ardından zemin çivisi boşluk içine yerleştirilip çimento enjeksiyonuyla bulon ve zemin arası doldurulmaktadır. Enjeksiyonun priz almasının ardından zemin çivisi 5 tonluk yük ile troklaması yapılmaktadır. Şekil 4.5'te A tünelinin kazı destek kesiti verilmiştir.



Şekil 4.5 A tüneli kazı destek kesiti

4.3 Genel ve Yerel Jeoloji

İstanbul'un kuzeybatısındaki araştırma alanı, Istaranca Masifi'ne ait metamorfik kayaçlar ve İstanbul Palezoyiğine ait sedimenter birimlerin hakimiyetindedir (Şen, Koral, & Önalan, Küçükçekmece-Çatalca Dolayında Trakya Havzası Doğusunun Jeolojisi ve Gelişimi: Yeni Bulgular, 1998) . Bu temel kayaçlar üzerinde Trakya havzasına ait tersiyer çökel kayaçlar yerleşmiştir. Trakya havzasındaki çökelleri transgresif bir çökelleşme ile başlamış, denizel delta, lagün ve akarsu ortamlarında çökeltiler birikerek regresif bir çökelleşme süreciyle sonlanmştır. Bölgede Koyunbaba, Soğucak, Mezardere, Pınarhisar, Osmancık, Danişmen, Çukurçeşme ve Bakırköy formasyonları ile Güngören üyesi yer almaktadır (Sayar, 1977). Bu jeolojik evrim sonrası bölgede yeni bir karasal dönem başlamış ve zaman zaman etkin olan menderesli akarsuların etkisiyle Oligosen yaşlı Gürpınar Formasyonu, bölgedeki en eski litostratigrafik birim ortaya çıkmıştır.

Gürpınar Formasyonu kil içeren tabakalardan oluşur ve üzerinde çakıllı kum ve kumlu çakıldan meydana gelen miyosen yaşlı Çukurçeşme formasyonu yer alır. Bunun üzerine yine miyosen yaşlı Güngören formasyonu gelmekte olup en üst seviyede kavkılı kireçtaşları ve tebeşirli marnlardan oluşan Bakırköy kireçtaşı birimi gözlemlenir.

4.3.1 Koyunbaba Formasyonu

Koyunbaba formasyonu, Temel kayaçlar üzerinde yer alan ilk litostratigrafik birimdir ve litolojik olarak çakıl ve kum içerir. Bu formasyon kalınlığı yerel olarak değişkenlik göstererek 0-10 m arasında değişir. Koyunbaba formasyonu Temel kayaçlarda uyumsuz bir şekilde yerleşirken üzerinde geçişli bir şekildes Soğucak Formasyonu gelir. Birim karasal ve sığ denizel ortamda çökelmiştir (Şen vd., 1998) .

4.3.2 Soğucak Formasyonu

Soğucak formasyonu Trakya Havzasında yaygın olarak görülen, makro ve mikro fosil açısından zengin kireçtaşlarıdan oluşan birimdir. Ünal (1967) tarafından tanımlanan bu formasyon beyaz, gri, sarımsı beyaz, krem, açık gri ve gri tonlarında olup genellikle orta kalınlıkta tabakalar şeklinde yer alır ve yatay ya da hafif eğilimli tabakalanma gösterir. Fosil içerikleri arasında kavlıklı, erime boşluklu kireçtaşları ve yer yer mercan, nummulit gibi mikro fosiller içeren kireçtaşları

bulunur. Trakya Havzasının kuzey şelf alanında çökelmiş olan Soğucak formasyonu batıda Bulgaristan sınırından İstanbul'un batısına kadar uzanır. Çekmece ve Çatalca civarında kalınlığı 75 metreye kadar ulaşır. Orta-üst Eosen döneminde sıcak ve sığ deniz ortamlarında mercanlar, hidrozoalar ve kırmızı alg kolonileri bu formasyonu oluşturmuştur. Soğucak formasyonu, Koyunbaba formasyonunun olmadığı yerlerde doğrudan temele açısal uyumsuzlukla gelir ve üst üste Ceylan Formasyonu ile uyum gösterir (Şen, 1994)

4.3.3 Ceylan Formasyonu

Ceylan formasyonu kireçtaşı, killi kireçtaşı ve silt-kum ara tabakalı şeyl-marn ardalanmalarından oluşan birimdir. Bu formasyon Ünal (1967) tarafından ayrı bir formasyon olarak tanımlanmıştır. Gri ve sarımsı killi kireçtaşı ile nadiren silt-kum içerikli şeyl-marn ardalanmasından oluşan bu birim Trakya Havzasında şelf ortamında çökelmiş olup kalınlığı 400-100 metre arasında değişirmektedir (Şen, 1994).

4.3.4 Pınarhisar Formasyonu

Pınarhisar formasyonu kireç, çimentolı çakıltaşı ve çakıllı kumtaşından oluşan bir litostratigrafik birimdir. İlk kez Kemper (1961) tarafından Keşan formasyonuna ait bir üye olarak tanımlanan bu birim daha sonra da Keskin (1971) tarafından bağımsız bir formasyon olarak ele alınmıştır. Pınarhisar formasyonu oolitli, pelletoidli ve algli makosofil içeren kireçtaşları ile çakıllı kireçtaşlarından oluşur. Alt seviyelerinde bol miktarda Congeria fosilleri bulunur. Bu formasyon Soğucak kireçtaşı ile açısal uyumsuzlukla üstlenir ve genellikle şeyil ve karton şeyil birimleriyle uyumlu olarak gözlemlenir (Şen, 1994).

4.3.4 Danişmen Formasyonu

Danişmen formasyonu, Trakya Havzasında taşkın ovası, göl ve bataklık çökellerini içeren regresif delta ortamına ait çökel kayaçlardan oluşmaktadır. Bu formasyon önceki çalışmalarda Yenimuhacir formasyonu Holmes (1961), Danişmen Formasyonu Ünal (1967) ve Danişmen şeyili Ünal (1967) gibi adlarla tanımlanmıştır. Birim kumtaşı, çakıltaşı, miltaşı ve kömür düzeylerden oluşur ve dört ana üye içerir.

- **Suluoğlu Şeyil Üyesi:** Varvlı yapıya sahip şeyil birimlerinden oluşur ve ince levhamsı yarılmalar gösterdiği için Karton şeyil olarak da adlandırılır.

Çatalca çevresinde bu üye gözlemlenir ve Pınarhisar formasyonu ile uyum gösterir.

- **Gürpınar Üyesi:** İnce kumtaşı, miltaşı ve kiltaşı şeyil türü kayaçlardan oluşur.Yer yer linyit ve tüf-tüfit ara düzeyleri içerir.
- **Çantaköy Volkanit Üyesi:** Gürpınar yerleşim alanındaki tüf-tüfit düzeylerinden oluşur. Bu tüfler, Tekirdağ yöresindekli yüzeylemelerle benzerlik gösterir. Çantaköy tüfiti ya da Çantaköy formasyonu olarak da tanımlanmıştır.
- **Ağaçlı Üyesi:** Özellikle Ağaçlı beldesindeki kömürlü düzeyleri ile tanınan bu üye kömürlü düzeylerde karakterizedir ve ekonomik değeri vardır. Kalınlıkları 1-5 m arasında değişir ve kum-çakıl düzeyleriyle birlikte kömür arakatkılı kil düzeylerini içerir.

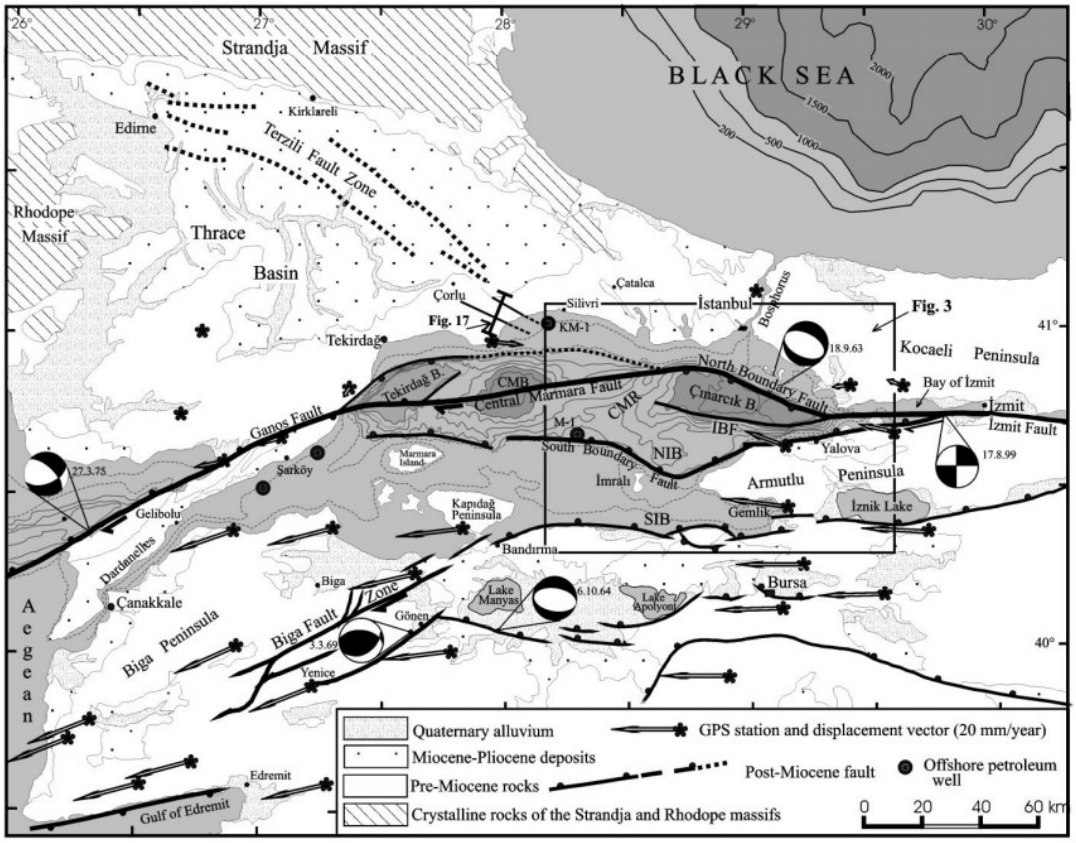
4.3.5 Alüvyon (Qal)

Alüvyon İstanbul yarımdasındaki akarsu ortamlarında çökelmiş gevşek çakıl, kum ve kil birimlerinden oluşur ve genellikle geç kuvaterner yaşlıdır. Bu birim çapraz tabakalanma yapısı ve devresel çökeller gösterir. Akarsuların çevresel özelliklerine bağlı olarak alüvyon biriminin kalınlığı değişkenlik gösterir ve bu birim Halosen yaşlı çökeller olarak geniş bir alanda yayılmaktadır.

4.4 Yapısal Jeoloji ve Aktif Tektonik

İstanbul'daki jeolojik yapı büyük ölçüde karmaşık bir nitelik taşır. Bunun başlıca nedenleri stragrafik istiflerde birbirine benzeyen kayaç biriminin sıklıkla tekrarlanmasıdır. Kılavuz düzeylerinin nadir ve belirgin olmaması, orojenik hareketler, interferans kıvrımları ve birçok fayın varlığı ile andezit ya da diyabaz dayklarının bölgeye sokulmasıdır. Ayrıca yerleşim alanlarındaki örtü ve dolgular da bu yapısal unsurların izlemesini güçleştirir. Çeşitli doğrultudaki kıvrımlar ve interferans kıvrımları hem yatay hem de düşey kesitlerde karmaşık geometriler oluşturur. İstanbul'un Paleozoik çökelleri Hersiniyen orojenezi sırasında kıvrımlanmış ve bu kıvrımlar genellikle sıkışık, kapalı, asimetrik ve konsantrik özellikler gösterir. Yerel olarak diapirik kıvrımlar da gözlemlenebilir. Paleozoik birimler içinde dayanımlı birimlerin bulunduğu yerlerdeki kıvrımlar daha geniş ve konsantrik, daha az dayanımlı birimlerde ise sıkışık kıvrımlar ortaya çıkmaktadır. Alpin orojenezi etkisiyle daha eski birimler Üst Kretase-Paleosen ve Alt Eosen yaşlı

birimler üzerine itilmiş bu hareketlerle Paleozoik yaşlı birimler yeniden kıvrımlanmış, Mesozoyik ve Alt Tersiyer yaşlı birimler ise ilk kez kıvrım yapmıştır. Alt Eosen sonrası dönemde bölgedeki sedimentasyon alltaki temel kırılmalarına bağlı olarak açık kıvırmlar oluşturmuştur. İstanbul'daki Paleozoik birimlerin üzerine açısal uyumsuzlukla örtülenen Eosen, Oligosen ve Miyosen çökelleri genellikle yataya yakın veya az eğimli tabakalara sahiptir. Soğucak, Ceylan, Karaburun, Gürpınar, Çukurçeşme, Güngören ve Bakırköy formasyonları epirojenik hareketlerin hareketlerin etkisiyle şekillenmiş ve Trakya formasyonunun palecoğrafik konumundan önemli ölçüde etkilenmiştir. Bu çökellerde Paleozoik yükselmesi nedeniyle havza yönünde eğimler oluşmuş ve çökelme sırasında kalınlaşma gözlemlenmiştir. Pliyosen'den itibaren Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun etksiyle bölgede sıyrılma tektoniği görülmüş ve bu hareketler İstanbul Yarımdası'nın güneyindeki Neojen istiflerinde açık kıvrımlanmalara ve faylanmalara yol açmıştır.



Şekil 4.6 Marmara Denizi yapısal jeoloji haritası (Okay vd, 2000)

4.5 Depremsellik

Marmara Denizi'ndeki Kuzey Anadolu Fayı orta derinlikte bir deniz tabanında nispeten genç aktif doğrultu atımlı fay zonudur. Tektonik faaliyetleri büyük deprem üretme potasiyeline ragmen zayıf bir şekilde biliniyordu. Tarihi kayıtlar Marmara Denizi'ndeki büyük yıkıcı depremlerin İstanbul'u etkilediğini göstermektedir.

Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey kolu İzmit Körfezi başında Marmara Denizi'ne girer ve Mürefte yakınlarındaki Ganosdağ'ın hemen güneyinden çıkar. Depremselliği 1939'dan beri on yılda vir veya daha fazla büyük (M>6.5) deprem oluşturur. Bu şokların merkez üssü doğu ucundan Marmara Denizin'e doğru düzenli bir batıya doğru göçünü göstermektedir.

17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde Kuzey Anadolu Fay Hattı boyunca batıdan göç eden büyük şoklar serisinin sonuncu oldu. Bir çok araştırmaya göre Marmara Denizi'ndeki bir sonraki büyük deprem (M>7) 20 yıl gibi kısa bir sürede meydana gelmesi beklenmektedir.

Bölge sismisite açısından incelendiğinde metro hattı bölgesi Marmara Denizi'nin alt kısmındaki Kuzey Anadolu Fay kesimini 20-30 km uzaklıktadır. Bununla birlikte daha önceki bazı çelışmalar Haliç boyunca geçen KB-GD dikkat çeken bir fay bulunduğuna dikkat çekmektedir. Ancak bu fayın potansiyel olarka pasif veya aktif durumda olduğu bilinmemekle birlikte yeri de kesin değildir. Bu bağlamda bu fayı da tasarım açısından dikkate almak mümkün olmamaktadır.

Çekmece formasyonunun Avrupa yakasındaki çökellerinde atıfta bulunulan temel kazısında düşey atımlı faylar sıklıkla görülür. Faylarda meydana gelen yer değiştirme 5-10 metreye kadar ulaşabilmektedir. Geç Miyosen-Pliosen gerilme kuvvetleri tarafından tektonik olarak üretilen bu faylar Marmara havzasının oluşumuna katkıda bulunmuştur. Bu birimde yapılacak kazılar, ayrışma ve kırık bölgeler dışındaki kayaların sökülmesi açısından oldukça zordur. Tünel açma durumunda bu sert kayalar zayıf bölgelerdeki bazı özel koşullar hariç kazı sırasında kısa ve orta vadede çökmeden kendilerini koruyabilir.

4.6 Hidrojeoloji

Sondaj çalışmaları sırasında gözlemlenen su seviyelerinin yer altı su seviyesinden mi yoksa çatlak sistemlerine dolan yüzey sularından mı kaynaklı olduğu net bir şekilde belirlenememektedir. Tünel açma işlemi sırasında değişen basınç koşulları suyun formasyon içerisindeki çatlaklar, faylar ve ezilme bölgeleri boyunca sızmasına neden olmaktadır. Bu sızma sonucunda tünel içerisine giren sular kazı işlemi tamamlandıktan sonra tünel çevresindeki kayaları doğrudan etkilemektedir. Tünel yüzeyine giren bu sular kayanın yüzeyinde zamanla zayıflamalara ve parçalanmalara sebebiyet vermektedir. Bu olayın ana nedeni formasyondaki süreksiz yüzeylerin bazı bölgelerde kil çoğunlukla ise kalsit dolgu malzemesi içermesidir. Süreksizlik yüzeyleriyle biriken kalsit ve kil gibi dolgular suyun etkisiyle yıkanarak kaybolmaktadır. Dolgu malzemesinin bu şekilde yıkanması süreksizliklerin stabilitesini bozarak ayrılarına neden olmaktadır.

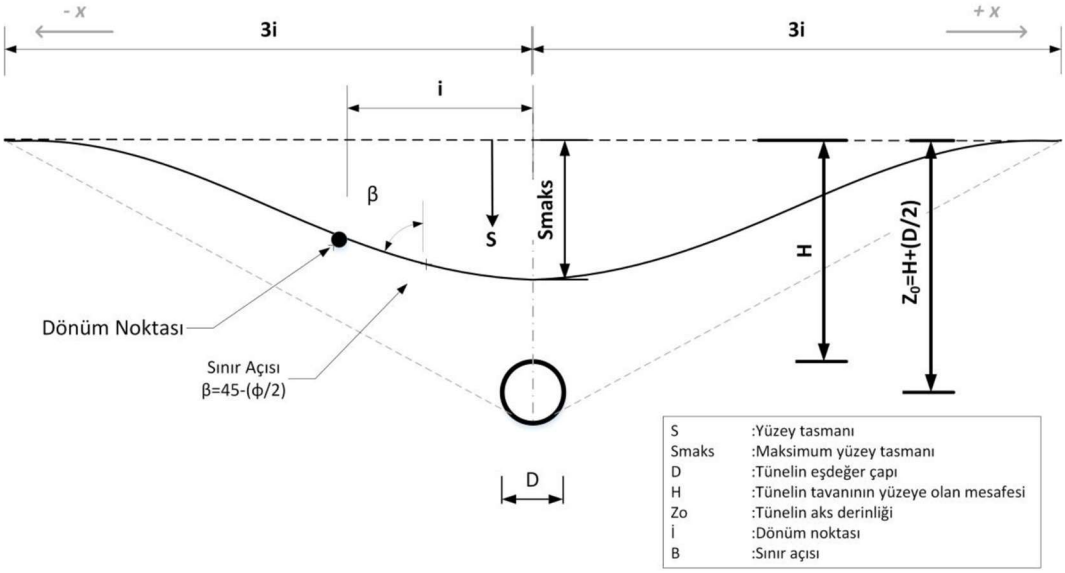
Su akışı dolayısıyla kayaların yüzeyindeki süreksizlik dolguları zamanla erozyona uğramaktadır. Söz konusu dolguların suyun etkisiyle çözülmesi, kayaların birbirine tutunmasını azaltarak ayrılmalarını kolaylaştırmatadır.

Yeraltı suyu veua yüzey suyu kaynaklı sızmalar tünel kazısının tamamlanmasından sonra dahi kaya yüzeylerinde kalıcı hasarlar yaratabilmektedir. Tünelin yapısal bütünlüğü özellikle çatlak dolgularının su etkisiyle yıpranması sonucu uzun vadede zayıflayabilmektedir. Bu süreçlerin sonucunda süreksizliklerin kaybolması tünel duvarlarının stabilitesini tehlikeye sokmakta ve hasar riskini artırmaktadır.

5
NATM TÜNEL KAZISINDA MEYDANA GELEN OTURMALARIN AMPİRİK YÖNTEMLE BELİRLENMESİ

5.1 Yüzey Oturma Eğrisi ve Gauss Hata Fonksiyonu

İlk olarak Martos (1958) tarfından, gerçekleştirilen maden kazılarında oluşan yüzey deformasyonlarının Gauss veya normal dağılımla belirtilebileceği görüşü ortaya atılmıştır. Bundan yola çıkarak Schmidt (1969) ve Peck (1969) aynı yöntemin tek açılan tünellerde de kullanılabileceği belirtilmiştir. Gauss modelini daha sonraki deneyimlerle de birleştirerek O'Reilly ve New (1982) Gauss modelini geliştirerek Şekil 5.1 deki gibi yüzey tasmanı tipik profildeki gibi olacağı belirtilmiştir.



Şekil 5.1 Yüzey tasman profili

O'Reilly ve New (1982) tünel kazısına bağlı oluşan oturma değerinin bulunması için eşitlik 5.1 önerilmiştir.

$$S = S_{max} . e^{(-\frac{x^2}{2i^2})} \tag{5.1}$$

Şekil 5.1'de de belirtildiği üzere tek tüplü tünelde tünel etki alan 3i, Gauss eğrisi dönüm noktası i, sınır açısı β olarak ifade edilmiştir. β = 45-ϕ/2 olarak hesaplanmaktadır. ϕ değeri ise zemin veya kaya kütlesinin içsel sürtünme açısını belirtmektedir.

Peck (1969) tarafından Chicago metrosunda yapılan gözlemler neticesinde 5.2'de gösterilen eşitlik geliştirilmiştir. Burland (2012) tarafından sunulan yöntemle tünel aksında gerçekleşecek olan oturma değeri aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$S_{max} = \frac{V_L \pi D^2/4}{\sqrt{2\pi} i} = \frac{0{,}303 V_L D^2}{i} \tag{5.2}$$

Bu formülde yine D tünel çapını, i ise dönüm noktasını ifade etmektedir. Dönme noktası eşitlik 5.3'teki şekilde hesaplanmaktadır.

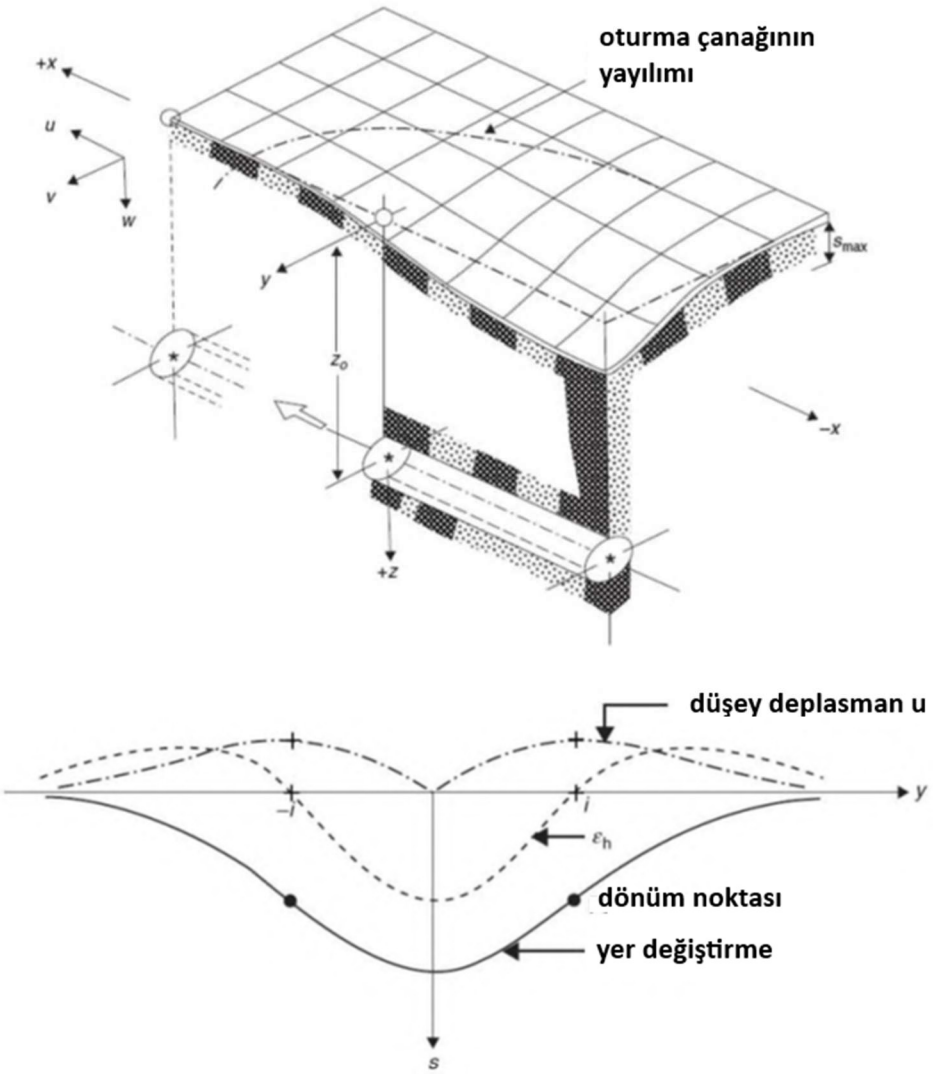
$$i = K.z_0 \tag{5.3}$$

Burada ise K eğri genişlik parametresi ve z_0 tünel orta noktasının derinliği olarak verilmektedir.

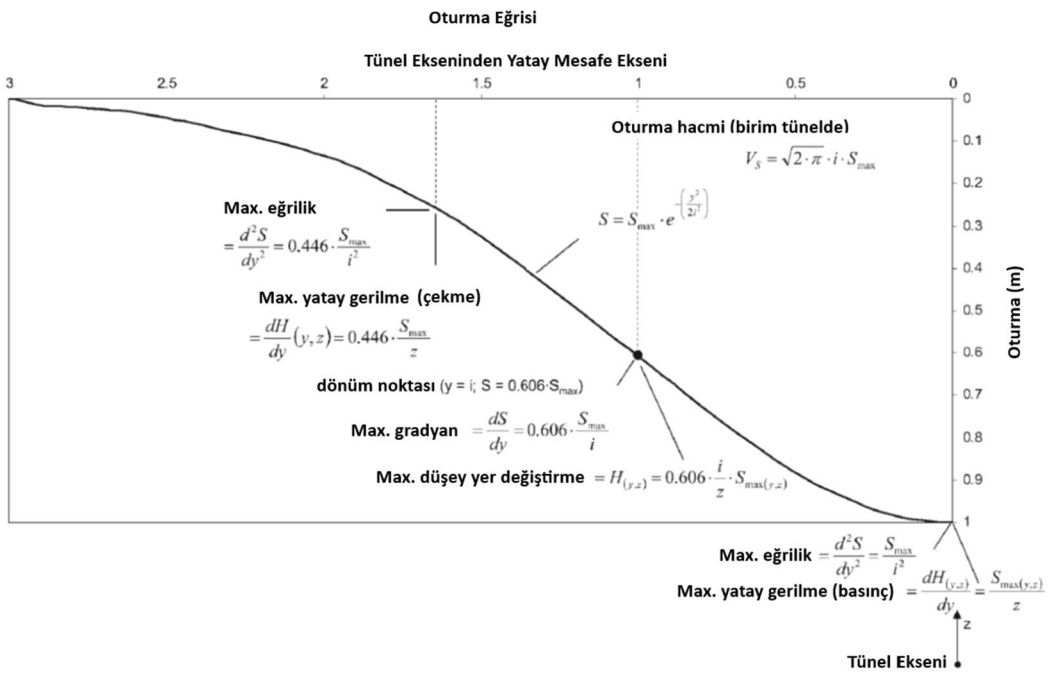
Yatay deplasmanlar ise O'Reilly ve New (1982) deplasman vektörünün tünel aksını göstermesi gerektiği varsayımıyla eşitlik 5.4'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$u = s.\frac{y}{z_0} \tag{5.4}$$

Şekil 5.2 de görüldüğü gibi, u yatay deplasman, y tünel aksına yatay mesafedir. Maidl vd. (2012) tarafından sunulan Şekil 5.2 grafik, tünel oturma eğrsindeki formülleri ve birim deformasyon hesaplarını göstermektedir.



Şekil 5.2 Oturma eğrilerinin görünümü ve notasyonlar



Şekil 5.3 Oturma ve yatay birim deformasyon formülleri

5.2 Hacimsel Kayıp ve Eğri Genişlik (K) Değerlerinin Hesaplanması

NATM ve TBM tünellerinden kaynaklı oturmalar hacimsel kayıp yöntemiyle ifade edilebilmektedir. Hacimsel kayıp değerinin belirlenmesi için birkaç yöntem bulunmakta olup akademik literatürde ve pratikte en yaygın olarak kullanılan yöntem ampirik ölçümlerden geri analizlerle elde edilen hacimsel kayıp değerinin kullanılmasıdır.

Tünel tasarımların kullanılan hacimsel kayıp değerlerinin zemin tipine bağlı olması gerekmektedir. Zemin tipine bağlı hacimsel kayıplar ile ilgili Guglielmetti vd. (2008)'in önerdiği değerler literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Tablo 5.1'de bu değerler özetlenmiştir.

Tablo 5.1 Guglielmetti vd. (2008) Tarafından TBM tünelleri için önerilen matris yöntemi

VL ve K Matrisi		Tünel Aynasındaki Jeolojik Durum			
		1) Zemin Tipi Malzeme	**2) Karışık Malzeme (Zemin ve Kaya)**	**3) Fay ve/veya Ayrışmış Zon**	**4) Parçalı Kaya Kütlesi veya Zayıf Kaya**
Tünel Örtüsünün Durumu	**A) Zemin Tipi Malzeme**	Tünel çevre kohezyonu: c=0 → VL=%1.0, k=0.3 c>0 → VL=%0.8, k=0.5	Tünel çevre kohezyonu: c=0 → VL=%1.2, k=0.3 c>0 → VL=%1.0, k=0.5	Tünel çevre kohezyonu: c=0 → VL=%1.0, k=0.3 c>0 → VL=%0.8, k=0.5	Tünel çevre kohezyonu: c=0 → VL=%0.8, k=0.3 c>0 → VL=%0.5, k=0.5
	B) Karışık Malzeme (Zemin ve Kaya)	VL=%0.5-0.7 Tünel çevre kohezyonu: c=0 → k=0.3 c>0 → k=0.5	VL=%0.6-0.8 Tünel çevre kohezyonu: c=0 → k=0.3 c>0 → k=0.5	VL=%0.5-0.8 k=0.5-0.7	VL<%0.5 k=0.5-0.7
	C) Fay ve/veya Ayrışmış Zon	VL=%0.4-0.8 Çatlak kohezyonu: c=0 → k=0.3 c>0 → k=0.5	VL=%0.5-0.9 Çatlak kohezyonu: c=0 → k=0.3 c>0 → k=0.5	VL=%0.6-1.2 Çatlak kohezyonu: c=0 → k=0.3 c>0 → k=0.5	VL=%0.4-0.9 k=0.5-0.7
	D) Parçalı Kaya Kütlesi veya Zayıf Kaya	VL=%0.3-0.5 k=0.5-0.7	VL=%0.4-0.6 k=0.5-0.7	VL<%0.4 k>0.7	VL<%0.2 k>0.7

5.3 Yan Yana Açılan Tünellerde Yüzey Oturması Tahmini

Şehir içi metro tüneli projelerinde hat tünelleri ve peron tünellerinin inşaat ve işletme sürecindeki durumları dikkate alındığında tünellerin tek tüp olarak yapılmasının zorlukları açıkça görülmektedir. Tek tüp tünel inşaasının gerektirdiği tasarım ve yapısal koşulların karşılanması özellikle yoğun şehir merkezlerinde oldukça karmaşık ve maliyetli bir süreç haline gelmektedir. Bunun başlıca sebeplerinden biri tek tüp tünel çapının oldukça büyük olması gerektiği ve bunun hem geoteknik mühendisliği açısından riskleri artırdığı hem de inşaat sürecini uzattığı gerçeğidir.

Tek tüp tünelin kazılması sırasında oluşabilecek yüzey deformasyonları yapısal hasar riskini artıran önemli bir faktördür. Büyük çaplı tünel kazılarında tünel çevresindeki zemin özellikleri ve yer altı suyu etkisi yüzeyde ciddi yer değiştirmelere neden olabilmektedir. Bunun gibi deformasyonlar yer üstündeki

yapıların güvenliğini tehdit ederken aynı zamanda projenin genel maliyetini artıran zemin iyileştirme ve stabilizasyon çalışmalarını zorunlu kılmaktadır. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalar büyük çaplı tünellerin çevresel etkilerinin genellikle daha belirgin olduğu ve bu tür projelerde daha titiz bir planlama gerektirdiğini göstermektedir.

Bununla birlikte küçük çaplı ikiz tüneller hem inşaat hem de işletme sürecinde daha avantajlı bir alternatif sunmaktadır. İkiz tünel sistemlerinde her bir tünelin çapı daha küçük olduğundan kazı sırasında oluşan zemin deformasyonları daha sınırlı kalmaktadır. Ayrıca ikiz tünellerin inşaat hızının genellikle daha yüksek olması projelerin zamanında tamamlanmasını kolaylaştırmaktadır. Bu tünel türleri aynı zamanda TBM kullanımı açısından da daha elverişli olmaktadır.

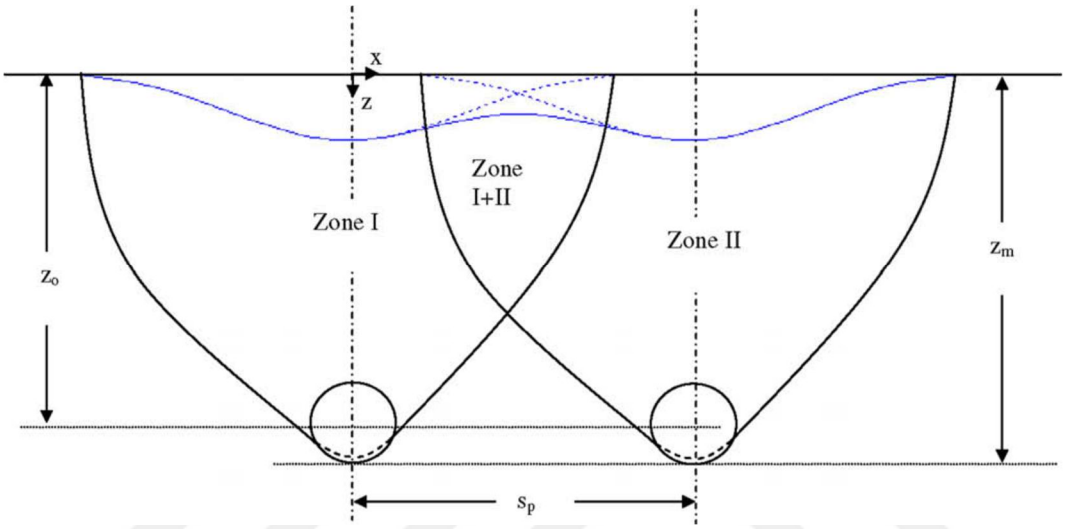
Yan yana açılan tünellerde tünel açma sırasına bağlı olarak tünellerin birbiri üzerindeki etkisi önemli bir değerlendirme konusu olmaktadır. İlk açılan tünelin inşaatı sırasında meydana gelen gerilme boşalması ikinci tünel açıldığında zemin davranışını doğrudan etkilemektedir. Peck (1969) bu konuya dikkat çekerek ilk açılan tünelin gerilme boşalmasından kaynaklanan etkilerin daha sonra açılan tünelin çevresindeki zeminde belirgin bir hareket yarattığını vurgulamıştır. İkinci tünel kazılırken zeminde meydana gelen bu hareketler ilk açılan tünelin kaplamasında belirgin bir yük artışına neden olamaktadır.

İlk tünelin açılması sırasında oluşan zemin rahatlaması zeminde gerilmenin yeniden dağılımına neden olmakta ve bu durum ikinci tünel kazıldığında zemin hareketlerini daha öngörülebilir hale getirmektedir. Bu nedenle inşaat sıralamasının doğru bir şekilde planlanması her iki tünelin yapısal bütünlüğünün korunması açısından kritik önem taşımaktadır. İkiz tünel sistemlerinde inşaat sırasına bağlı olarak kaplama üzerinde oluşabilecek ilave yük artışlarının dikkatli bir şekilde hesaplanması önemlidir.

İkiz tünelerin ampirik yöntemlerle deformasyon tahmininde süperpozisyon ilkesi önemli bir yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır. Özellikle doğrusal elastik teorisi çerçevesinde deformasyon tahmini için kullanılmış ve son yıllarda plastik analizlerde de uygulanmıştır Sagaseta (1987) ve Loganathan ve Poulus (1998). Bununla birlikte süperpozisyon yöntemi tünellerin eş zamanlı olarak açılması ve konsolidasyon gibi etkileri hesaba katma konusunda sınırlıdır. Yinede drenajız

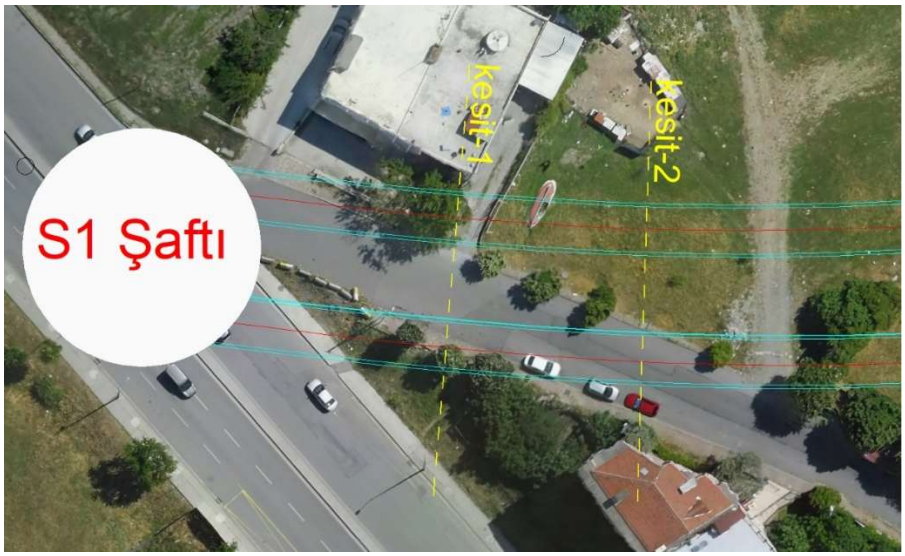
olarak yapılan analizlerde bu yöntem basit ve pratik bir çözüm sunar (Mair vd, 1981). İkiz tünellerde deformasyon mekanizmaları bireysel tünellerin makanizmalarının süperpoze edilmesiyle modellenebilir ve bu modelleme yer değiştirme süreksizliği olmadan uyumlu bir deformasyon profili sağlamaktadır.

Yapılan tüm bu çalışmaları Osman (2010) özetleyerek çalışmasında yer vermiştir. İkiz tünellerin deformasyon modeliyle oluşturulan otrma eğrilerini bölgelere ayırarak Şekil 5.4'te ifade etmiştir.

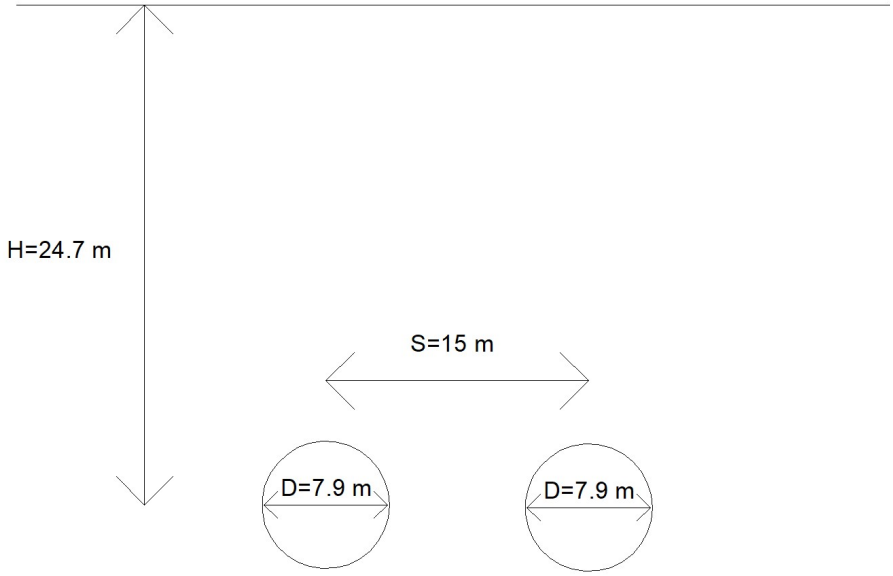


Şekil 5.4 Kil zeminlerde açılan ikiz tünelerde deformasyon mekanizması (Osman, 2010)

Çalışmada ampirik yöntemlerle yüzey otuma tahmini için inceleme bölgesi güzergahında iki farklı kesit seçilmiştir. Bu kesitler kesit-1 ve kesit-2 olarak adlandırılmıştır (Şekil 5.5). Bu bölgelerin geometrik olarak özellikleri de Şekil 5.6'de sunulmuştur.



Şekil 5.5 Çalışmada kullanılan kesitler



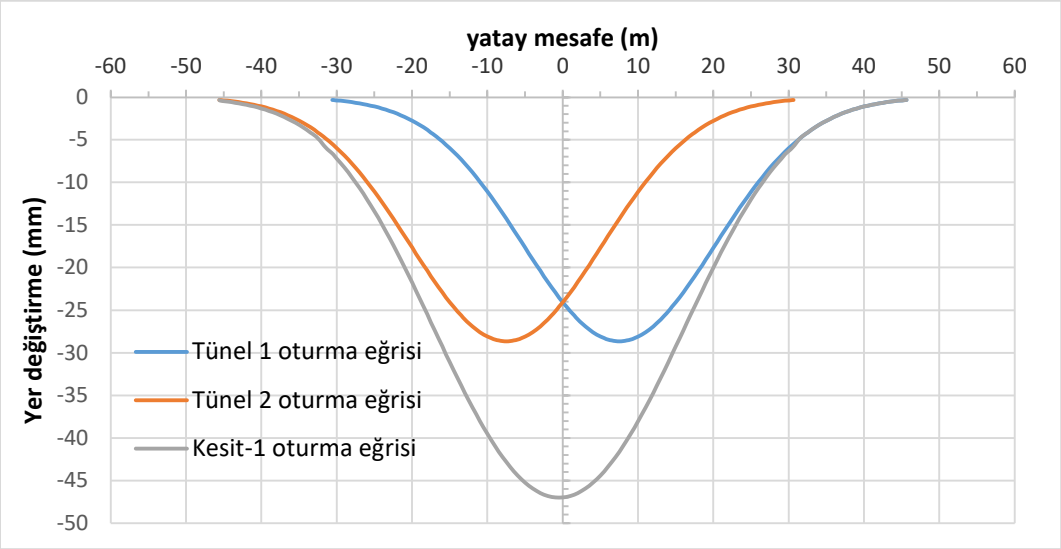
Şekil 5.6 Kesit-1'in geometrik özellikleri

Şekil 5.6'da güzergahta belirtilen tünel derinliği ile tüneller arası mesafeye göre oluşturuan geometrik özet sunulmaktadır. Bu analizlerde kullanılan ampirik yöntemler genellikle tünel çapını temel olarak almakta ancak çalışma kapsamında incelenen tünellerin formları tam anlamıyla dairesel olarak kabul edilmemektedir. Bu tüneller yanlardan daha basık bir profile sahiptir. Bu durum tünelin eninin boyuna göre daha kısa olmasına neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı eşdeğer çap belirleme yöntemi kullanulmıştır.

Tünel kesitinin toplam alanı 49.01 m^2 olarak ölçülmüştür. Tünel alanına dayalı olarak tanımlanan eşdeğer çap matematiksel yöntemlerle belirlenmiş ve Şekil 5.6'da gösterildiği gibi 7.90 m olarak hesaplanmıştır. Tüneller arası mesafe S olarak ifade edilmektedir. Bu mesafe tünellerin aksları arasındaki mesafe olarak belirtilmektedir. Güzergah üzerinden yapılan ölçümlerde bu mesafe 15 m olarak ölçülmüştür.

Tünel derinliği ise ampirik yöntemlerle yapılan hesaplamalarda diğer bir kritik parametredir. Tünel derinliği 24.7 m olarak ölçülmüş ve geometrik özette de buna yer verilmiştir. Bu mesafe tünelin çevresindeki zemin davranışlarını ve kazı sırasında oluşabilecek yüzey deformasyonlarını doğrudan etkilemektedir.

Şekil-5.7'da kesit-1 için ikiz tünel kazılarından kaynaklanan yüzey tasmanlarının teorik olarak modellenmiş gösterimi sunulmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere tünel-1 ve tünel-2'ye ait yüzey oturma eğrileri ayrı ayrı hesaplanarak grafik üzerinde koordinatlı bir şekilde ifade edilmiştir. Her iki tünelin yüzey etkileri incelenmiş ve maksimum oturma değerlerinin tünel eksenleri hizasında oluştuğu belirlenmiştir.

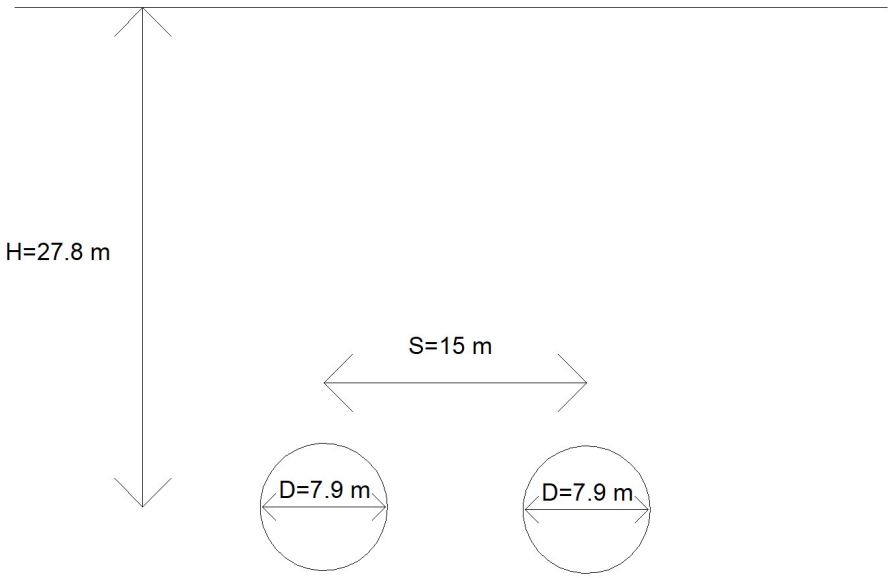


Şekil 5.7 Kesit-1 için ikiz tünel kazılarından dolayı oluşan yüzey oturmalarının teorik gösterimi

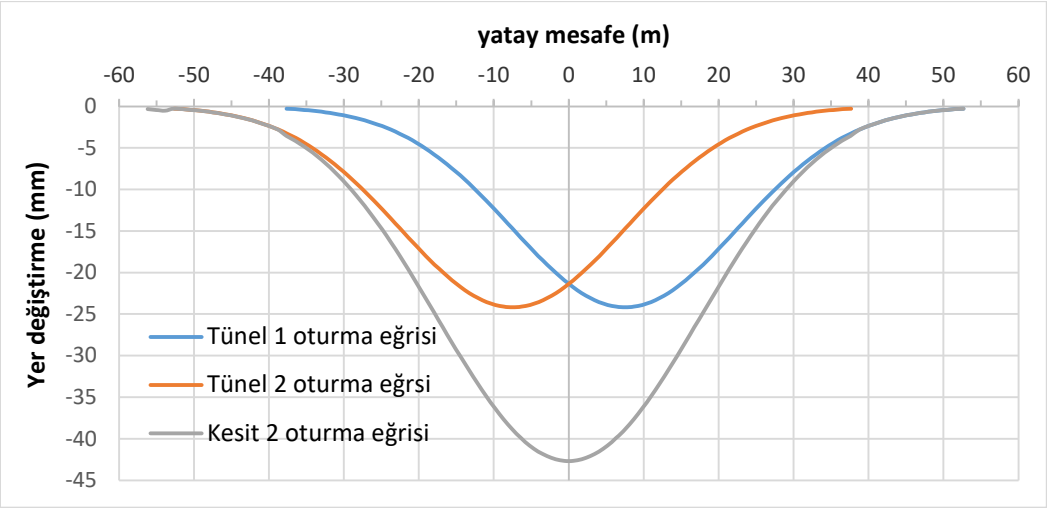
Tünel-1 ve tünel-2'ye ait maksimum oturma değerleri ampirik hesaplama yöntemi ile belirlenmiş ve her bir tünel için bu değer 28,30 mm olarak bulunmuştur. Bununla birlikte ikiz tünellerin oturma eğrilerinin her iki tünelin oturmalarının superpoze edilmesiyle elde edilen grafik kesit-1 oturma eğrisi olarak Şekil 5.7'de

gösterilmiştir. Bu eğri tünellerin birbiriyle etkileşimini ve birleşik yüzey deformasyonlarını temsil etmektedir. Süperpoze edilmiş oturma değeri teorik olarak 46,84 mm olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.8'de güzergahta belirtilen tünel derinliği ve tüneller arası mesafeye göre geometri verilmiştir. Bu ampirik yöntemlerde tünel çapından bahsetmekte ancak çalışmada kullanılan tünel formları tam olarak deiresel değildir. Yanlardan daha basık olduğundan tüneli eni boyuna göre daha kısadır. Dolayısıyla burada tünelin alanına göre eşdeğer bir çap belirlenmiştir. Tünel alanı 49.01 m^2 olduğundan eşdeğer çap da şekilde gösterildiği gibi 7.90 m olmaktadır. Tüneller arası S mesafesi 15 m olarak ölçülmüş olup amprik hesaplamalarda kullanılmıştır. Tünel derinliği ise hesaplamada tünel çapına olan mesafeler olarak anlatılmaktadır. Bu mesafe ise 27.8 m olmaktadır.



Şekil 5.8 Kesit-2'nin geometrik özellikleri



Şekil 5.9 Kesit-2 için ikiz tünel kazılarından dolayı oluşan yüzey tasmanlarının teorik gösterimi

Şekil 5.9'de kesit-2 için ikiz tünel kazılarından dolayı oluşan yüzey tasmanlarının teorik olarak gösterimi verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere tünel 1 ve tünel 2'nin oturma tasmanları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Grafik koordinatlı olarak oluşturulmuştur. Tünel-1 ve tünel-2 için verilen değerlerde maksimum oturma değerinin tünel eksenlerinin hizasında olduğu apaçık bellidir. Bu değerler ampirik olarak hesapladığında 24,42 mm olarak görülmektedir. İkiz tünel olarak iki tünelin oturma değerleri süperpoze edildiği değer grafikte kesit-2 otuma eğrisi olarak adlandırlmaktadır. Bu değer ise 42.83 mm mertebesine ulaşmaktadır.

6
YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİNDE (NATM) SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

6.1 Giriş

Günümüz geoteknik mühendisliği anlayışında, karmaşık ve komleks projelerin ekonomik ve güvenli bir şekilde tasarım ve üretim sürecinin her aşamasında verimliliği ön planda tutmayı amaçlamaktadır. Bu anlayışla birlikte karmaşık problemlerin çözümü ve analiz edilmesi mümkün olabilmektedir. Bu anlamda mühendislik tasarımlarında güvenlikli, işlevsel ve verimli olarak matematiksel modelleme teknikleri gelişmiştir. Söz konusu teknikler arasında yer alan sonlu elemanlar yöntemiyle karmaşık geometrili ve çevresel etmenler altındaki malzemelerin gerçeğe yakın olarak mekanik davranışları modellenebilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi 1950'lerden sonra bilgisayar ve programalama tekniklerinin gelişmesiyle mühendislik uygulamalarında yer almıştır. Özellikle son otuz yılda geoteknik tasarımlarda önemli bir yer edinmiştir. Karmaşık geometrilerde, kademeli inşaat süreçlerinde ve malzeme davaranışlarında doğru bir şekilde modelleme gereksinimine cevap verebilmesi nedeniyle bu yöntem tünel tasarımlarında da sıkça tercih edilmektedir.

Tünel mühendisliğinde inşaat aşamaları tasarımı önemli ölçüde etkilemektedir. Tünel açılması sırasında zeminde ve kayaçlarda meydana gelen gerilme ve deformasyon durumları çevre yapıları ve tünel geçici ve kalıcı kaplamasının makanik özellikleri üzerinde önemli bir etki oluşturmaktadır. Bu durumun mühendislik olarak irdelenmesi oldukça zor ve anlaşılması güç olmaktadır. Tasarım sırasında güvenli bir süreç yönetilmesi açısından, tünel iksa kaplaması ve kalıcı kaplama ile zemin şartları, çevre yapıları ve tünel kazısından etkilenen diğer mühendislik yapılarıyla birlikte modellenmesini zorunlu kılmaktadır.

Burada oluşacak olan gerilme ve deformasyon değişimlerini belirlemek için ampirik, analitik ve sayısal yöntemler tek başına veya kombine olarak kullanılmalıdır. Bu problemlerin çözümü için tünel mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi detaylı ve güvenilir analizler için önemli bir araç olarak kabul edilmektedir.

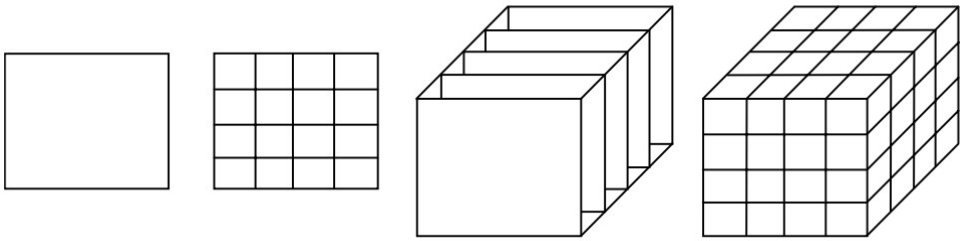
Bu çalışma kapsamında sonlu elemanları yazılımı olarak Plaxis 2D ve Plaxis 3D yazılımı kullanılmıştır.

6.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

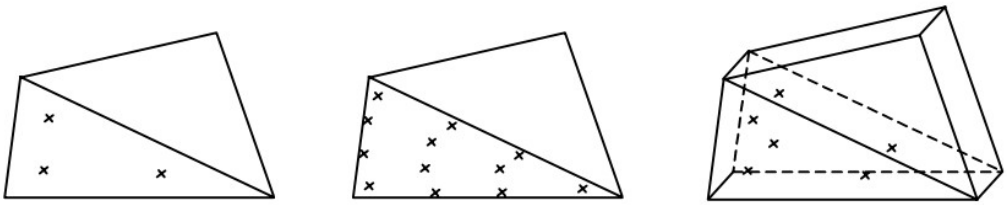
Sonlu elemanlar yöntemi (SEM), mühendislik alanında karmaşık yapıların analizinde kullanılan etkili bir sayısal yöntemdir. Bu yöntem, analizi analitik olarak zor veya imkansız olan sistemleri daha küçük ve çözümü kolay parçalara yani "sonlu elemanlara" bölmek suretiyle veriler elde edilir. Her bir eleman matematiksel modellerle tanımlanır ve tüm elemanlar birleştirildiğinde sistemin genel davranışı ortaya çıkar. SEM, özellikle karmaşık geometrilere heterojen malzemeler ve farklı sınır koşullarına sahip yapıların incelenmesine olanak tanır.

Yöntem problemin geometrisinde ağ (mesh) adı verilen bir yapıya böler ve bu ağdaki her bir elemanın fiziksel davranışı belirli bir diferansiyel denklem sistemi ile tanımlanır. Elemanlar arasındaki etkileşim birleşik bir matris çözümü ile ele alınarak yapıdaki gerilme ve deformasyon gibi değerlerin elde edilmesine olanak sağlar. Şekil 6.1'de sonlu elemanlar yöntemine göre elemanlar ve düğüm noktalarına ait gösterim sunulmuştur.

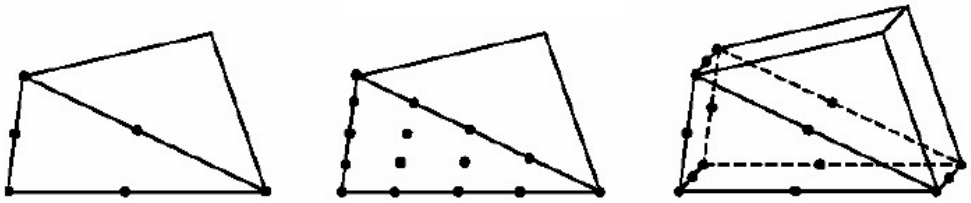
Yapısal mühendislikte köprüler, barajlar ve binaların analizinden, geoteknik mühendislikte zemin-yapı etkileşimi ve tünel davranışları gibi analizlerde kullanılmaktadır. Sürekli olarak gelişen bilgisayar teknolojisi sonlu elemanlar yönteminin mühendislikteki yerini artırmıştır.



Düşey kesit modeli | 2 boyutlu ağ | 3 boyutlu model | 3 boyutlu ağ



Gerilme noktaları

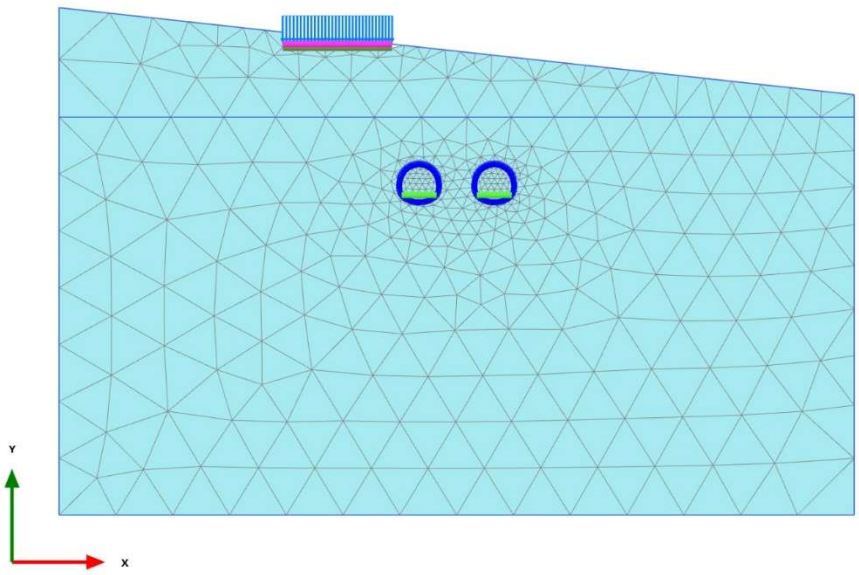


6 düğüm noktalı üçgen | 15 düğüm noktalı üçgen | 15 düğüm noktalı kama

Şekil 6.1 Sonlu elemanlar yönteminde düğüm noktaları ve elemanlar

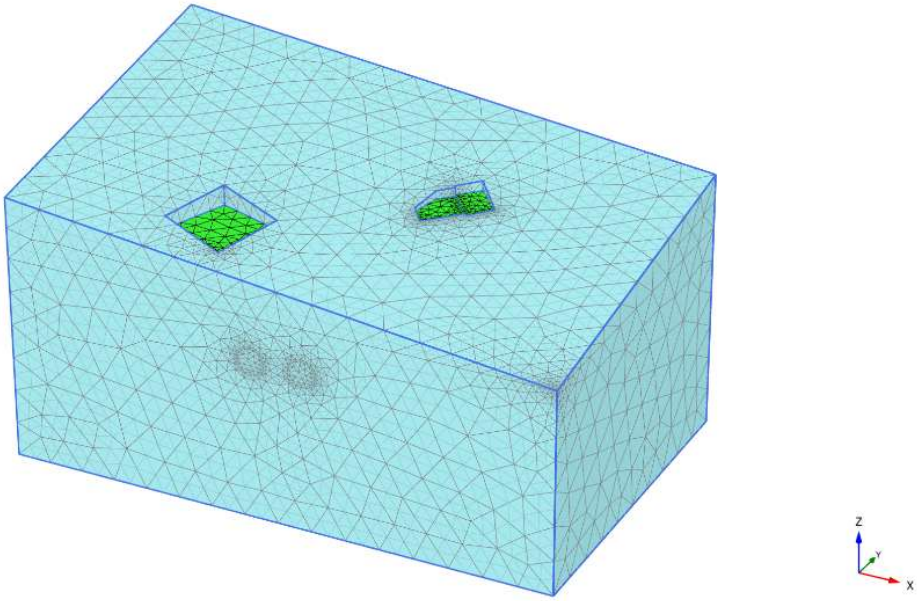
Sonlu elemanlar yönteminde sonlu elemanın yaptığı deplasmanı bulmak için hareket denklemleri yardımıyla düğüm noktasının deplaman değeri elde edilir. Sistemin yapacağı deplasman, denge denklem takımlarının toplanması ile sağlanır. Bu denklemler yardımıyla bilinen deplasman sınır şartları çerçevesinde üretildikten sonra ortaya çıkan denklem takımından deplasmanların bulunabileceği eşitlikler oluşturulur ve deplasman değerleri hesaplanır. Hesaplanan bu deplasman değerlerinden gerilme-şekil değiştirme bağıntılarıyla bu değerler elde edilir.

Bu çalışmada sonlu elemanlar yazılımı olarak Plaxis'in 2D ve 3D analiz programları kullanışmıştır. Programlarda üretilen sonlu eleman ağ diyagramları Şekil 6.2 ve şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Kesit-1 için oluşturulan Plaxis 2D'de oluşrurulan sonlu elemanlar modeli

3D analizlerde 10 düğüm noktasından oluşan üçgen elemanlar kullanılmıştır. Analizde kullanılan toplam düğüm noktası sayısı 112765 adettir. Model boyutu enine yönde 160 m, boyuna yönde ise 80 m boyutundadır (Şekil 6.3).



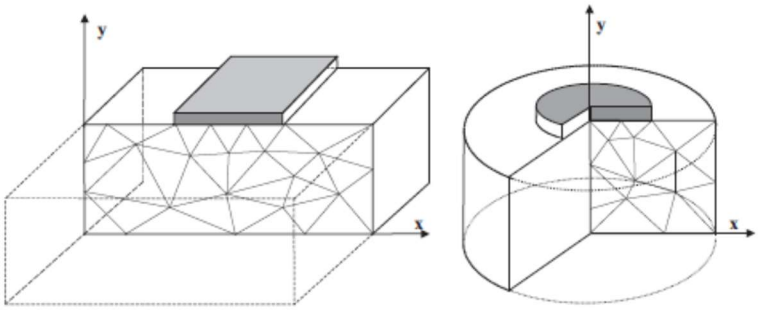
Şekil 6. 3 Plaxis 3D'de oluşrurulan sonlu elemanlar modeli

6.3 Plaxis 2D Sonlu Elemanlar Programı Hakkında Genel Bilgiler

Plaxis 2D, geoteknik mühendisliği alanında kullanılan iki boyutlu sonlu elemanlar analizine dayalı bir bilgisayar yazılımıdır. Bu program özellikle zemin-yapı etkileşimi, temel tasarımı, kazı destek sistemleri, tünel inşaatı, zemin stabilitesi ve konsolidasyon gibi geoteknik problemlerin çözümünde tercih edilmektedir. Bu program 1987 yılında Hollanda'da Delft Teknoloji Üniversitesi'nin akademisyenleri tarafında geliştirilmiştir (Brinkgreve ve Broere, 2004).

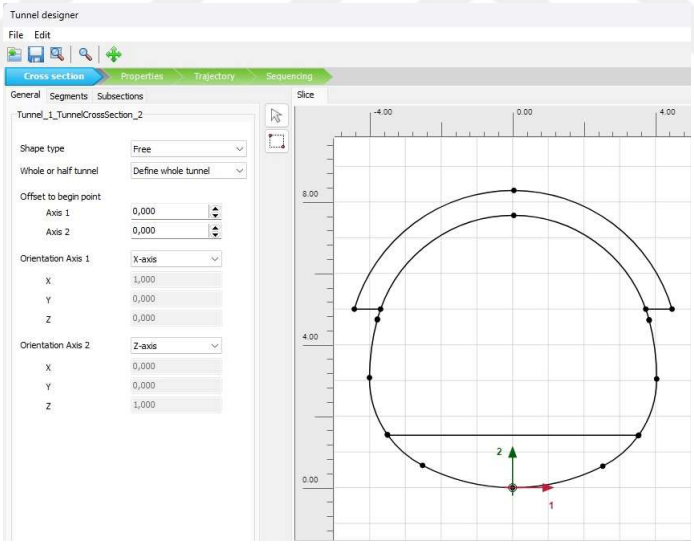
Programın temeli zeminlerin karmaşık mekanik davranışlarını modellemek için geliştrilmiş ileri zemin modellerine dayanır. Plaxis, Mohr-Cloumb, Hardening Soil, Soft Soil Creep gibi birçok farklı zemin modellerini destekler.

Yazılım içerisinde sonlu elemanlar ortam geometrisinin gerçeğe yakın olarak modellenebilmesi açısında bir çok geometri modülü bulunmaktadır. Programda modelleme seçenekleri arasında plan düzleminde ve eksenel simetri koşullarında modeller üretilebilmektedir (Şekil 6.4). Üretilen modeli ise kullanıcı seçeneğine bağlı olarak 6 düğüm noktalı ve 15 düğüm noktalı sonlu elemanlara en uygun biçimde ayırmaktadır.



Şekil 6.4 Düzelem şekil değiştirme ve eksenel simetri koşulları
(Plaxis 2D Reference Manuals, 2024)

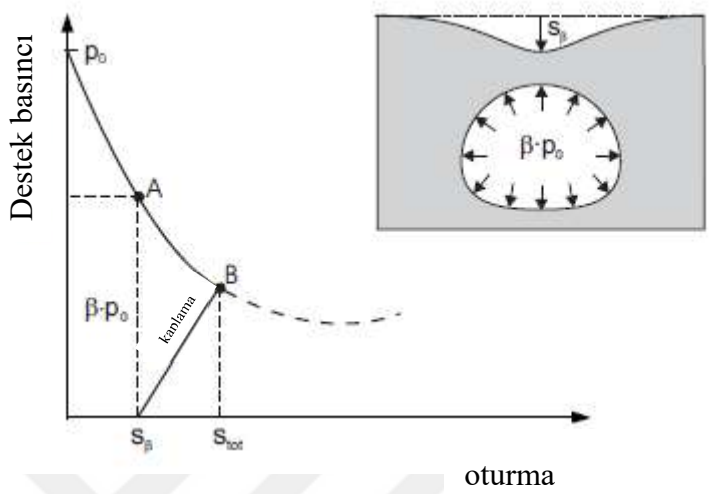
Tez kapsamında yapılan analizlerin tümü 2D ve 3D plaxis yazılımıyla modellenmiştir. Tunnel designer sekmesi altında tüneller modellenebilmektedir. Burada öncelikle tünel kesiti oluştulması gerekmektedir. Plaxis 3D'de farklı olarak tünelin geçtiği güzergahın plan düzleminde ve boyuna yöndeki geometrilerinin de girilmesi gerekmektedir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Plaxis 3D Tunnel designer sekmesi

Yaklaşan tünel kazısı tünel aynasının gerisinde deformasyon oluşturmaktadır. Ayna gerisindeki deformasyonun 2D Plaxis'teki analizlere yansıtılması açısından bazı yaklaşımlar gerekmektedir. Burada üçüncü boyut etkisini iki boyutlu analizlere doğru bir şekilde yansıtmak çok önemlidir. Plaxis burada yük azaltma yöntemini (Convergence-Confinement veya λ yöntemi) önermektedir. Bu yöntem literatürde β yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Möller (2006) tarafından detaylandırılan

gerilme azaltma yönteminde β değeri gerilme azaltma faktörünü ifade etmektedir. Bu değer Plaxis'teki deconfinement veya ΣMstage değeri ile ilişkilidir. ΣMstage başlandıçta sıfırdır. Başlangıç sıfır koşulu doğal gerilmelerin hakim olduğu durumdur. ΣMstage değeri yükseldikçe deformasyon değerleri yükseldikçe yapısal kuvvetler düşmektedir (Şekil 6.6).

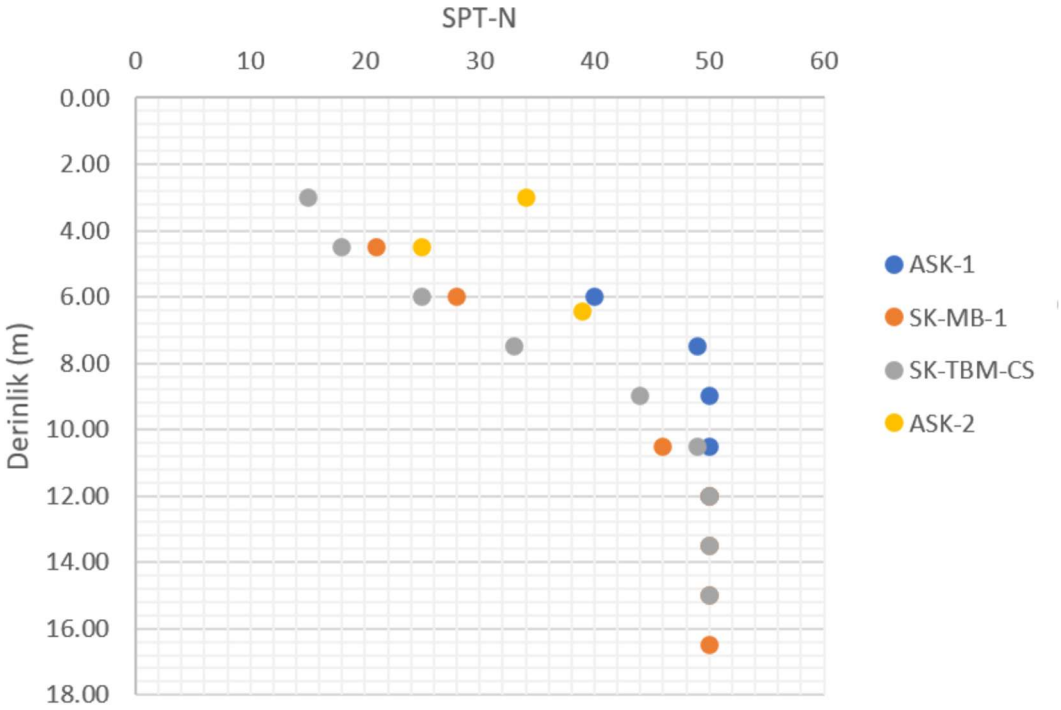


Şekil 6.6 Ayna azaltma yönteminin aşamaları (Möller, 2006)

7
S1 ŞAFTI MAHMUTBEY İSTASYONU ARASI TÜNELLERİN GEOTEKNİK DEĞERLEDİRMESİ VE SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

7.1 Geoteknik Değerlendirme

Proje kapsamında A tünellerinin açılacağı bölgede zemin araştırma çalışmaları sırasında bir çok sondaj yapılmıştır. Bu tez kapsamında sadece S1 Şaftı ile Mahmutbey İstasyonu arasındaki A tünelleri değerlendirldiği için burada yapılan ASK-1, ASK-2, SK-TBM-CS ve SK-MB-1 sondajları değerlendirlmiştir. Bu sondajlarda yerinde zemin koşullarına bağlı olarak 1.5 m ara ile SPT (standart penetrasyon testi) ve 3 m ara ile de presiyometre testi yapılmıştır. Buradan elde edilen SPT-N verileri belirlenmiş ve alınan zemin numuneleri belirlenmiştir. Şekil 7.1'de derinlik-SPT-N grafiği verilmiştir. Tablo 7.1'de sondaj sırasında yapılan presiyometre deney sonuçları sunulmuştur.



Şekil 7.1 SPT-N verilerinin derinlikle değişim grafiği

Tablo 7. 1 Presiyometre deneylerine ait sonuçlar

Sondaj No	Presiyometre Deneyi		
	Deney derinliği (m)	Ep (kg/cm^2)	PL* (kg/cm^2)
ASK-1	6	432.61	22.20
	12	322.91	19.14
	18	220.14	19.26
	24	416.66	25.72
	30	412.19	28.74
ASK-2	6	83.70	8.9
	12	121.86	11.9
	18	164.78	13.18
	24	471.67	25.19
	30	678.91	24.24
SK-TBM-CS	6	148.37	16.56
	12	119.88	18.60
	18	273.26	20.07
	24	247.80	19.80
	30	766.82	27.26
SK-MB-1	6	108.49	6.18
	12	391.98	18.83
	18	190.45	24.75
	24	335.25	28.51
	30	542.98	27.21

Sondajlardan elde edilen zemin numuneleri üzerinde çeşitli laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler su muhtevasının belirlenmesi, doğal birim hacim ağırlığı deneyi, likit limit, plastik limit deneyleri ile serbest basınç dayanımı ile üç eksenli basınç deneyidir. Bu deneylerin sonuçları Tablo 7.2'de özetlenmiştir.

Tablo 7.2 Sondaj numunelerinin laboratuvar deney sonuçları

Numunenin			Su içeriği	Doğal Birim Hacim Ağırlığı Deneyi	Likit Limit Tayini	Plastik Limit Tayini	Plastisite İndeksi	Serbest Basınç Dayanımı	Üç Eksenli Basınç Deneyi	
Sondaj No	Derinlik (m)									
			w_n (%)	γ_n (gr/cm^3)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	q_u kg/cm^2	c kg/cm^2	ϕ (°)
ASK-1	5.50	6.00	34.18	1.924	56.92	21.36	35.56	1.49		
	8.70	9.00	45.36	1.932	75.34	25.86	49.50		0.78	10.10
	12.50	12.75		1.935	53.81	23.00	30.81	1.94		
	15.50	16.00		1.934					0.85	10.60
	20.60	21.00	30.71		62.61	26.12	36.49	2.73		
	24.70	25.00	40.30	1.946	80.92	30.73	50.19		0.96	12.50
	29.50	30.00	21.72	1.940	65.39	23.65	41.74		1.22	13.60
	33.50	34.00	13.86	1.945	55.44	26.99	28.45		1.71	15.70
	39.00	39.50		1.951				3.84		
ASK-2	5.00	5.50	18.42	1.925	36.69	16.44	20.25			
	7.50	8.00	18.64	1.932	40.77	21.62	19.15			
	10.00	10.50	12.15	1.866	28.71	14.53	14.18			
	13.50	14.00	6.55	1.841		NP				
SK-TBM-CS	5.00	5.50	23.91	1.925	40.60	15.09	25.51			
	11.00	11.50	26.96	1.928	44.53	14.58	29.95	1.99		
	14.00	14.50	33.00	1.930	56.31	21.97	34.34		1.02	10.10

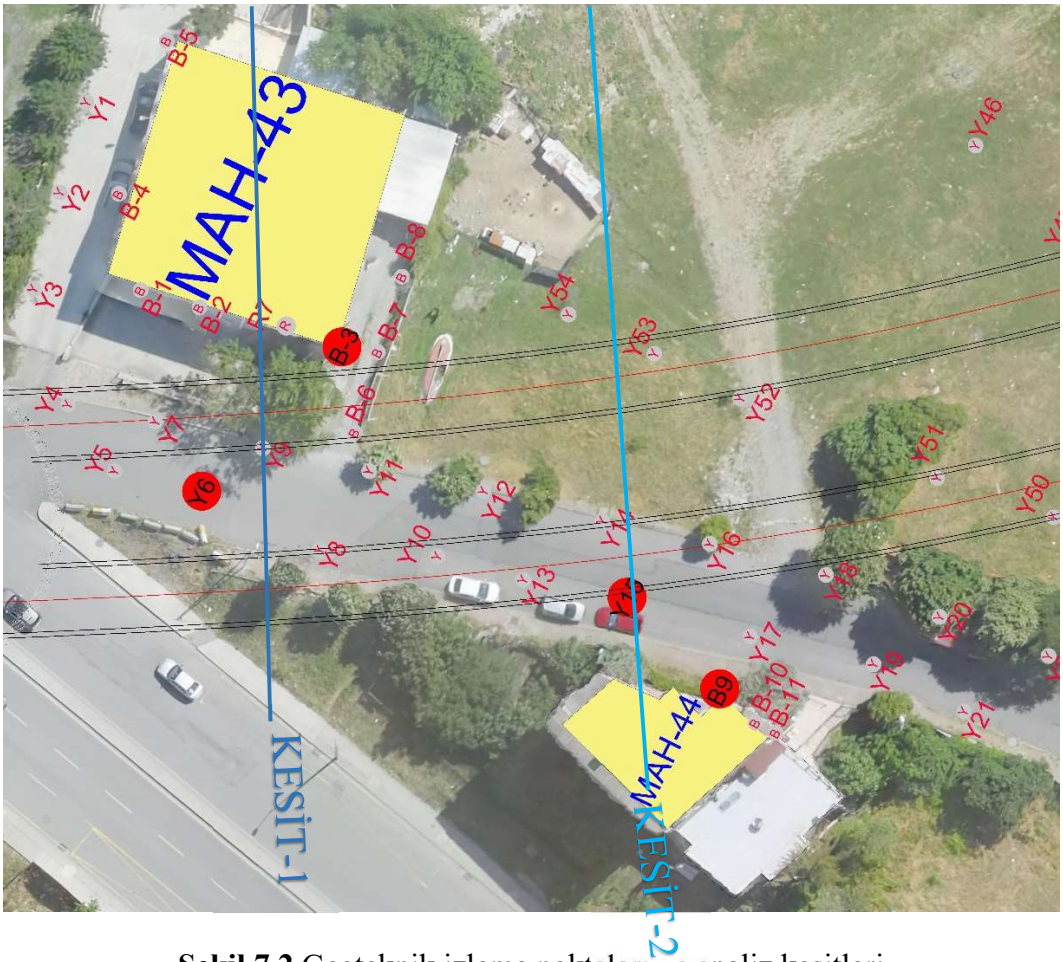
Tablo 7.2 Sondaj numunelerinin laboratuvar deney sonuçları (devamı)

	15.00	15.50	29.00	1.930	55.49	23.17	32.32			
	19.50	20.00	21.51	1.932	42.33	19.10	23.79			
	25.60	26.00	27.91	1.934	54.38	23.60	30.78		1.30	15.20
	31.00	31.50	27.06	1.935	57.08	21.58	35.50	3.29		
	35.50	36.00	32.28	1.928	60.92	25.45	35.47		1.56	12.60
	41.80	43.00	12.83	1.871	30.82	14.29	16.33			
	44.00	44.50	15.60	1.944	51.68	22.57	29.11			
SK-MB-1	4.00	4.50	22.13	1.924	38.17	17.49	20.98			
	13.00	13.50	36.44	1.927	50.84	17.41	33.43	2.48		
	19.00	19.50		1.930	36.65	15.95	20.17			
	23.50	24.00		1.844						
	26.50	27.00	28.45	1.932	52.65	22.68	49.97			
	33.00	33.50		1.936	62.85	20.79	42.06	3.50		
	38.50	39.00	44.68		76.35	25.84	50.51		1.73	10.80
	44.50	45.00		1.940	72.24	26.70	45.54		2.02	10.70
	50.50	51.00	25.19	1.946	65.45	22.19	43.26	4.46		
	56.50	57.00		1.951	68.74	23.99	44.75	4.92		
	59.50	60.00	29.83	1.955	69.58	28.87	40.71			

7.2 Plaxis 3D Sonlu Eleman Analizleri ve Zemin Parametrelerinin Tayini

Bu tez çalışması kapsamında incelemesi yapılan tüneller için öncelikle sahada uygulaması yapıldığı şekilde Plaxis'te 3D model kurularak arazide ölçülen bina oturma değerleri ve yüzey oturma değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Analizlerde referans olarak 2 farklı kesit kullanılmıştır. Her iki kesit üzerinde de binalar mevcuttur. Bu binalar üzerine tünel kazısına başlanmadan önce oturma bulonları yerleştirilmiştir. Zemin parametrelerinin doğrulaması yapılırken MAH-43 nolu bina üzerindeki B-3 oturma bulonu ve yüzey oturma değeri için de Y-6 yüzey otuma bulonu ile MAH-44 nolu bina üzerindeli B-9 oturma bulonu ve yüzey oturma değeri

içinde Y-15 yüzey oturma bulonu değerleri referans alınmıştır (Şekil 7.2). Zemin parametrelerinin doğrulaması sırasında bir dizi 3D analizler yapılarak düşey deformasyon değerleri kontrol edilmiştir.



Şekil 7.2 Geoteknik izleme noktaları ve analiz kesitleri

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

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

7.2.3 3D Tünel Tasarım Girdileri

Tünellerde kazı destek elemanı olarak püskürtme beton, umbrella, zemin çivisi, çelik iksa kullanılmıştır. Ancak çalışma kapsamında tünel kapasitesinden çok yüzeyde gerçekleşen yer değiştirme değerleri incelendiğinden zemin çivileri

modele dahil edilmemiştir. Modele dahil edilmemesinin diğer bir nedeni 3D modelin analiz süresinin çok fazla uzamasıdır. Analizlerde, umbrella iyileştirilmiş bölge lineer elastik malzeme modeli dikkate alınarak modellenmiştir (Tablo 7.4).

C20 püskürtme beton dış duvarlar

Püskürtme beton kalınlığı h= 0.30 m
Birim hacim ağırlığı γ= 25 kN/m^3

Elastisite modülü= 28 000 000 kPa
Poission oranı ν= 0.20

C20 püskürtme beton dış duvarlar

Püskürtme beton kalınlığı h= 0.10 m
Birim hacim ağırlığı γ= 25 kN/m^3

Elastisite modülü= 28 000 000 kPa
Poission oranı ν= 0.20

Tablo 7.3 Umbrella iyileştirilmiş zon parametreleri

	Alan (m^2)	γ (kN/m^3)	E (MPa)
İyileştirilecek zemin	2.63	19.00	42
Umbrella	0.29	78.50	200 000
İyileştirilmiş Kompozit Zemin	2.63	25.56	23193

Etkileşimde olan MAH-43 ve MAH-44 nolu binaların temelleri geometrisine uygun plate eleman olarak modellenmiştir. Binaların ağırlığı plate eleman üzerine yayılı yük olarak etki ettirilmiştir. MAH-43 nolu bina için 70 kN/m^2, MAH-44 nolu bina için ise 110 kN/m^2 düşey yayılı yük etki ettirilmiştir.

Tünellerin kazı aşamalarında umbrella zonunun aktif edilmesi, üst yarının kazılması, üst yarı ve geçici inverte püskürtme beton atılmasının ardından altyarı kazısının yapılması ve alt yarının püskürtme betonunun atılması şeklinde devam etmektedir. Tünellerin kazı adımları arasındaki mesafe 4.80 m arayla birbirlerini takip etmektedir.

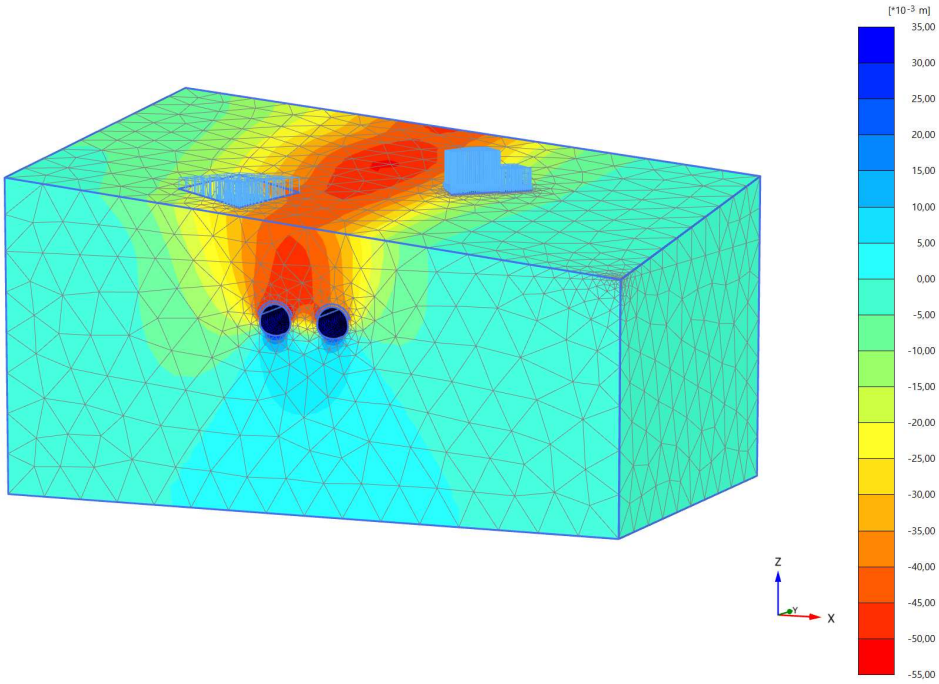
Yapılan 3D analizlerle (geri analizle) zemin parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan bir dizi analizler neticesinde düşey yer değiştirme değerleriyle uyumlu hale gelen Hardening Soil zemin parametreleri Tablo 7.5'te verilmiştir.

Tablo 7.4 Sayısal analizlerde dikkate alınan zemin parametrleri

Parametre	Sembol	Birim	Katı Kil
Bünye Modeli	-	-	HS
Birim hacim ağırlık	γ	[kN/m^3]	19
Elastisite modulü3	E	[MPa]	42
Poisson oranı	ν	[-]	0.20
Kohezyon	c	[kN/m^2]	30
Kayma mukavemeti açısı	φ	[°]	27
Üstel parametre	m	-	0.5
Göçme oranı	R_f	-	0.9
Referans gerilme	P_{ref}	[kPa]	100
Arayüzey eleman katsayısı	R_{inter}	[-]	1.0

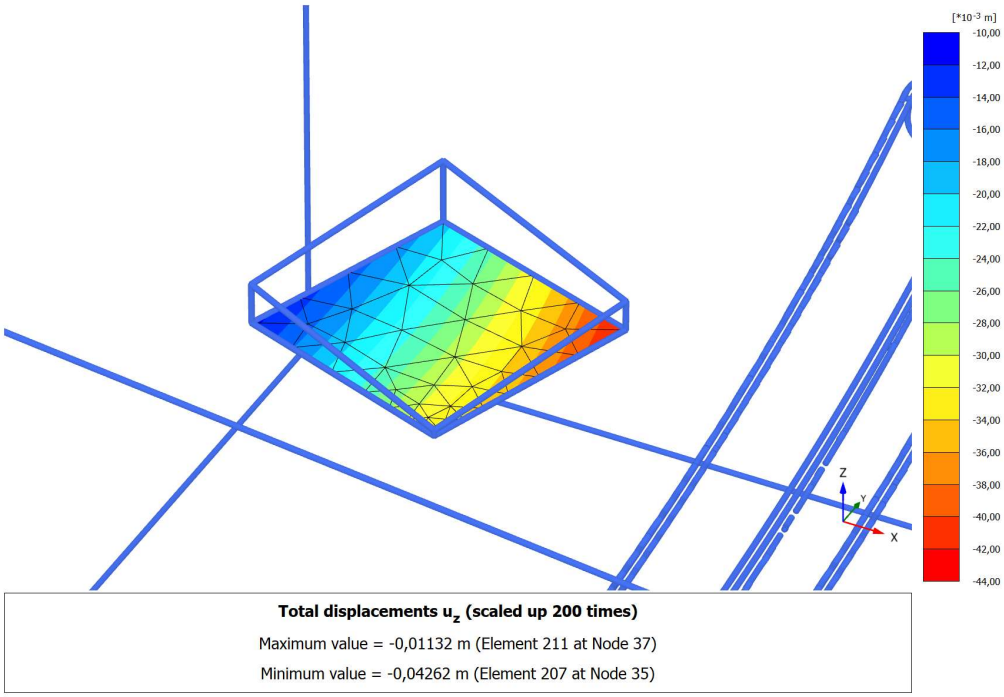
7.2.4. 3D Plaxis Analiz Sonıçları

Tünel tasarım girdilerine göre tünel kazı aşaması adımı 2.4 m olarak Plaxis'te kazı adımları ardışık olarak tanımlanmıştır. Analiz modeli toplam 48 aşamadan oluşmaktadır. Plaxiste her aşama bir inşaat adımını simüle etmektedir. Bu durum sahada gerçekleşen imalata göre programa yansıtılmaktadır. Bu çalışmada her aşama bir kazı adımı olara ifade edilmektedir. Analiz sonuçları Plaxis'in Output modülünden incelenmektedir (Şekil 7.3).

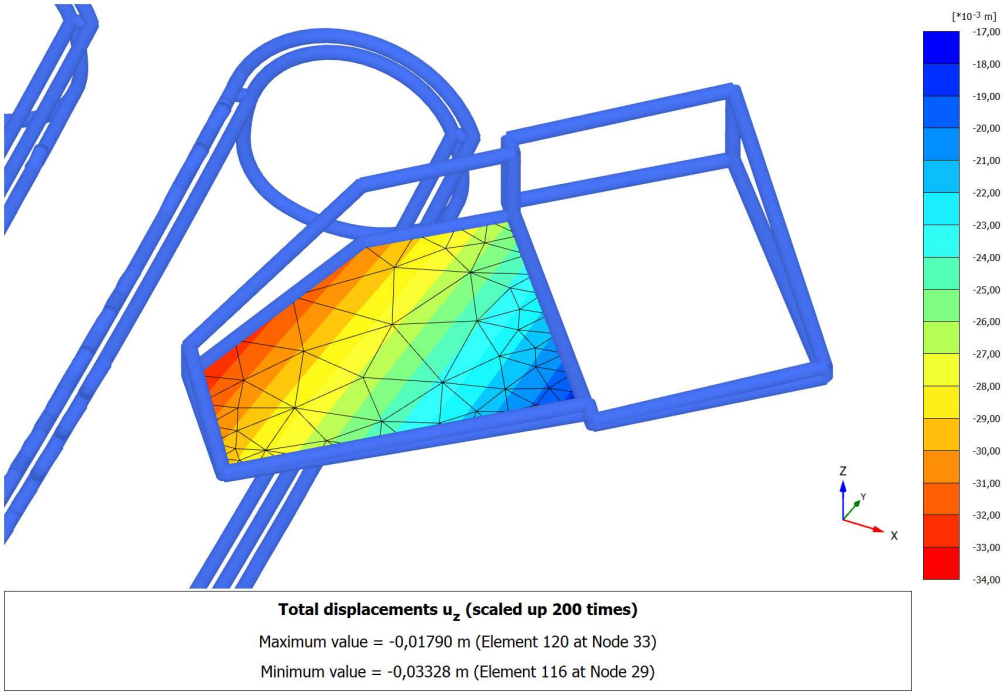


Şekil 7.3 Plaxis 3D Output düşey deplasman sonucu

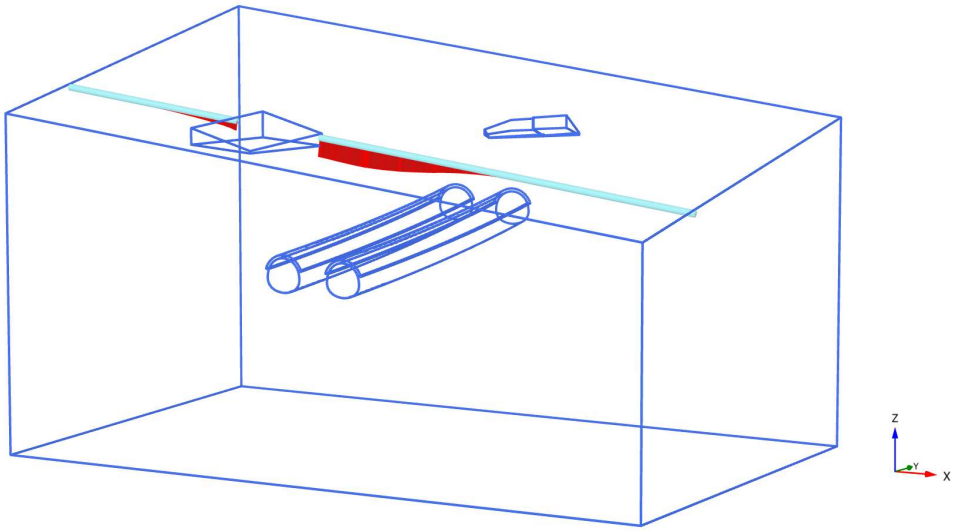
MAH-43 ve MAH-44 ile kesit-1 ve kesit-2 oturma değerleri ayrı ayrı incelenmiştir. Arazide ölçüm alınan bulonların bulunduğu noktalara uygun olarak deplasman noktaları seçilmiş, düşey deplasman grafikleri Şekil 7.4, 7.5, 7.6 ve Şekil 7.7'de sırasıyla çizdirilmiştir.



Şekil 7.4 MAH-43 düşey oturma grafiği



Şekil 7.5 MAH-44 düşey oturma grafiği

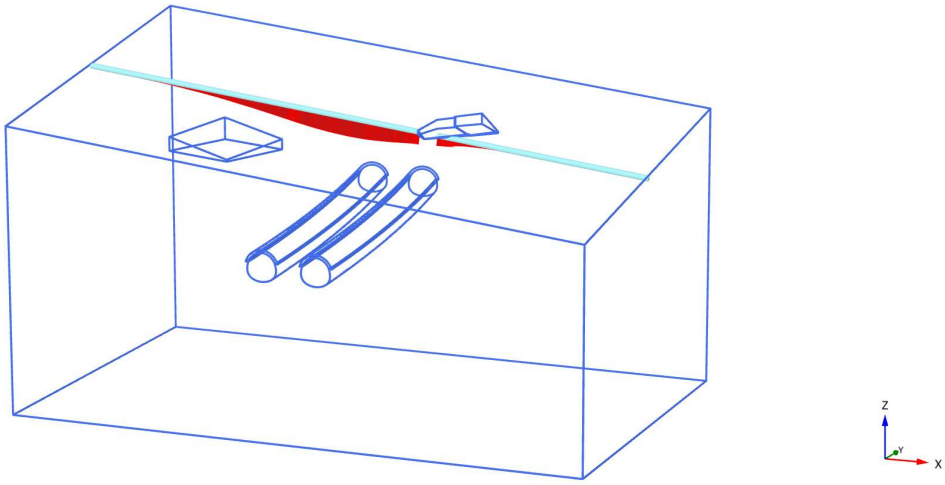


Total displacements u_z (scaled up 100 times)

Maximum value = $-1{,}549*10^{-3}$ m

Minimum value = -0,04540 m

Şekil 7.6 Kesit-1 yüzey oturma grafiği



Total displacements u_z (scaled up 100 times)

Maximum value = $-1{,}903*10^{-3}$ m

Minimum value = -0,04968 m

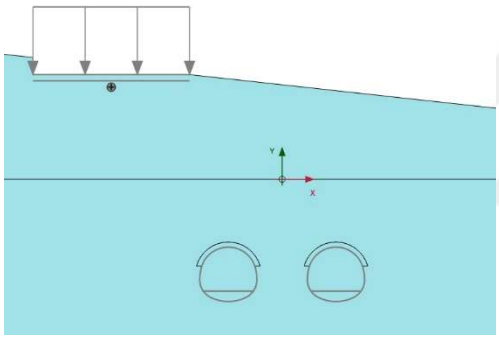
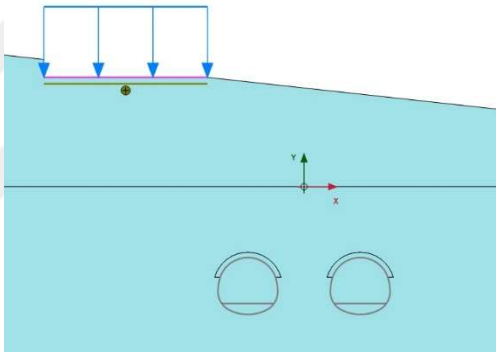
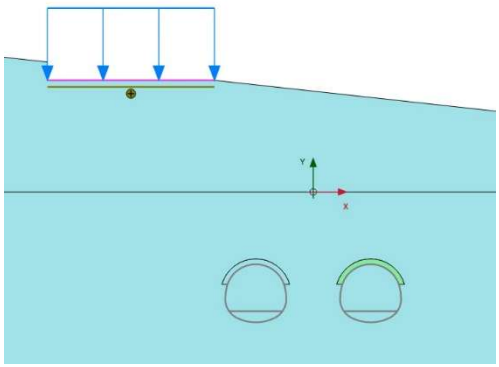
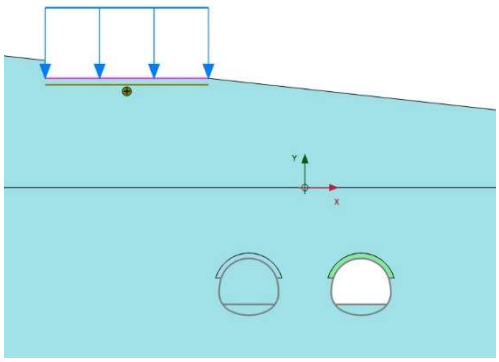
Şekil 7.7 Kesit-2 yüzey oturma grafiği

7.3 Plaxis 2D Analizleri

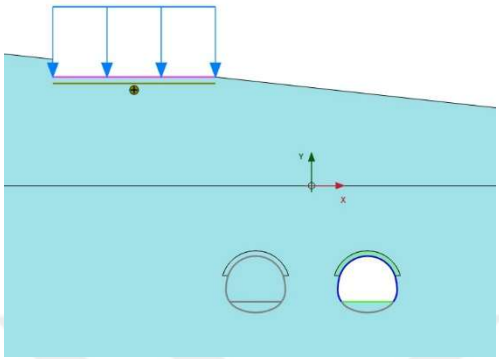
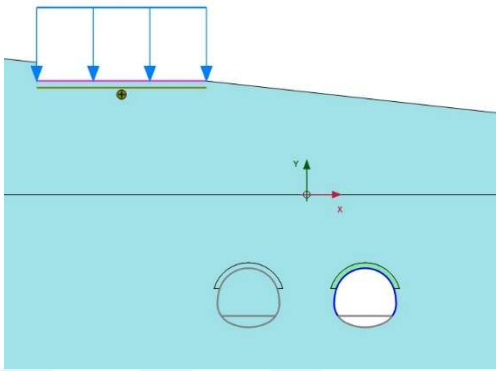
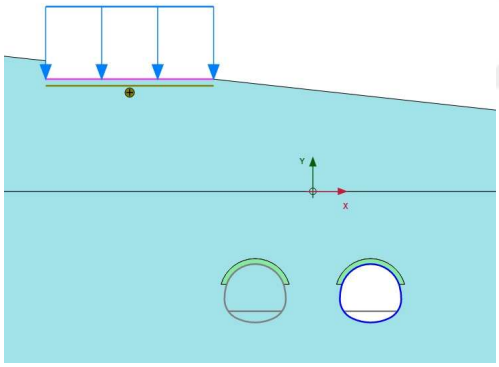
Belirlenen zemin parametrelerine göre Plaxis 2D sonlu elemanlar yazılımında iki boyutlu analizler yapılmıştır. Analiz kesitleri MAH-43 ve MAH-44 nolu binaları içeren kesit-1 ve kesit-2 olmak üzere farklı iki kesittir. Analizlerde bina temelleri plate eleman olarak modellenmiş olup üzerlerine bina ağırlığı temsilen doğrusal yayılı yük teşkil edilmiştir.

İki boyutlu analizlerde yukarıdaki bölümlerde bahsedildiği üzere ayna azaltma yöntemi kullanılacaktır. λ yöntemine göre kazı ve kaplama aşamasında alınan değerler kazı aşamaları üzerinde detaylı olarak gösterilmiştir (Tablo 7.5).

Tablo 7.5 Plaxis 2D kazı aşamaları

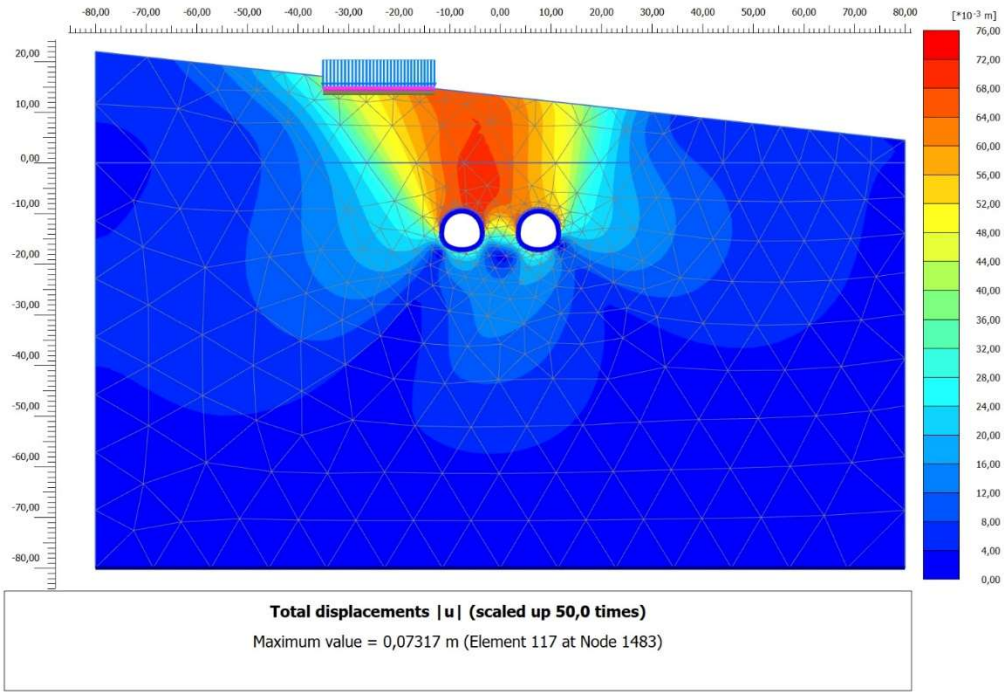
Aşama-1 Gravity loading ilk yükleme aşaması	Aşama-2 Yüzey yüklemeleri yapılmıştır.
	
Aşama-3 Umbrella tanımlaması aktive edilmiştir.	Aşama-4 ΣMstage oranı %60 olarak üstyarı kazısı yapılmıştır.
	

Tablo 7.5 Plaxis 2D kazı aşamaları (devamı)

Aşama-5 Üstyarı püskürtme beton aktive edilerek ΣMstage oranı %100 yapılmıştır.	Aşama-6 ΣMstage oranı tekrar %60 olarak alt yarı kazısı yapılmıştır.
	
Aşama-7 Altyarı püskürtme beton aktive edilerek ΣMstage oranı %100 yapılmıştır.	Aynı aşamalar sol tünel için de yapılıp toplam 10 aşamada tamamlanmaktadır.
	

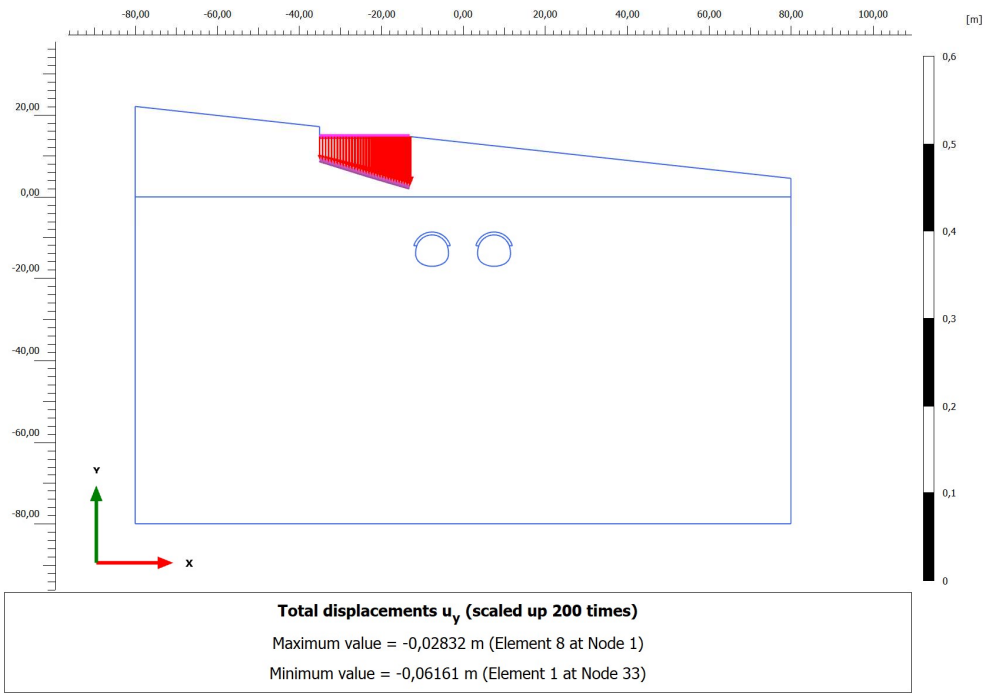
7.3.1 Kesit-1 Analizleri ve Sonuçları

Kesit-1 için oluşturulan analiz modelinde MAH-43 nolu bina ve bu kesitte oluşan düşey yüzey yer değiştirme değerleri incelenmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde sol tünel üzerinde sağdaki tünele göre daha fazla yer değiştirme olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin arazi eğiminden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Buna göre meydana gelen maksimum yer değiştirme değeri 73.17 mm olarak görülmektedir (Şekil 7.8).



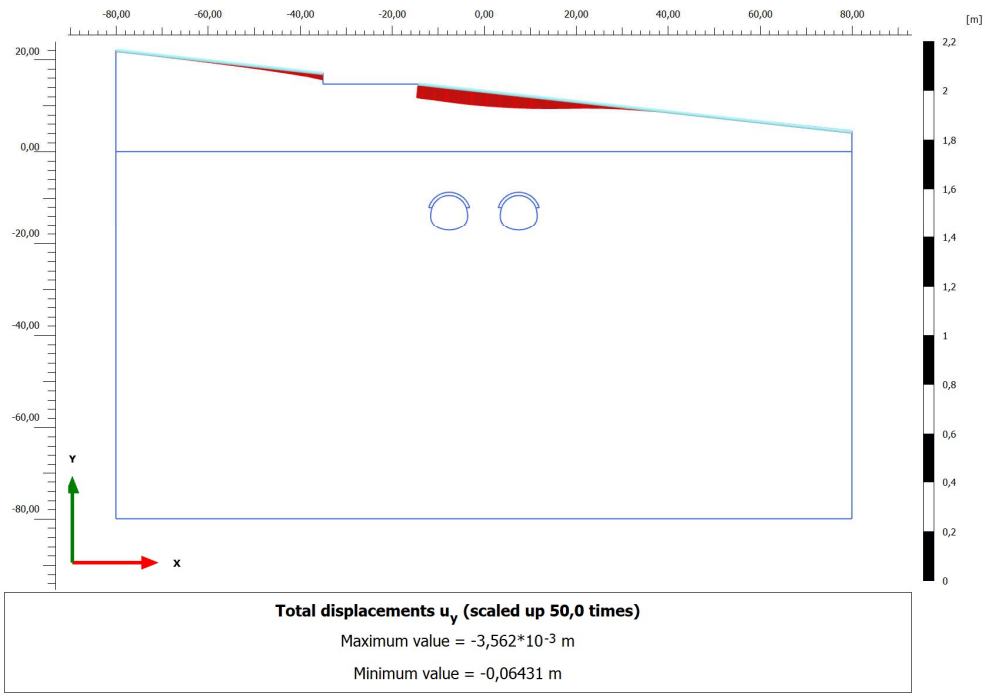
Şekil 7.8 Kesit-1 için toplam yer değiştirme değeri

Aynı analizde MAH-43 için yapılan inceleme sonucunda tünel kazılarından dolayı meydana gelen düşey yer değiştirme değeri 61.61 mm mertebesindedir (Şekil 7.9).



Şekil 7.9 MAH-43 düşey yer değiştirme değeri

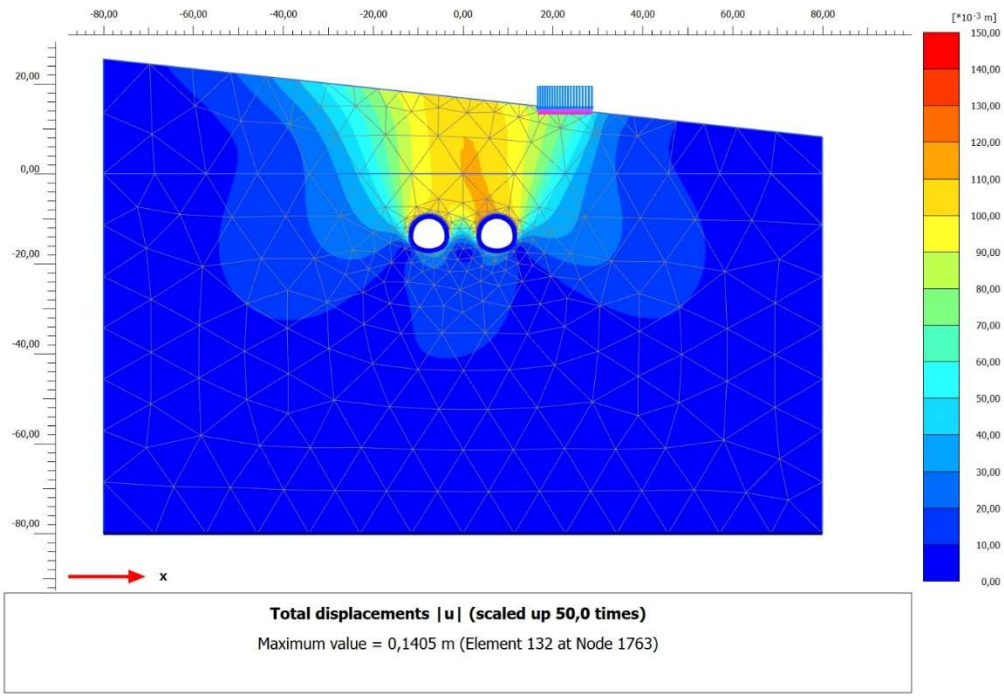
Tünel kazısından dolayı yüzey profilinde meydana gelen yer değiştirme değeri için yüzeyden kesit alınarak bu bölgede meydana gelen değerler anlaşılmaya çalışılmıştır (Şekil 7.10). Kesit-1 için yüzeyde meydana gelen düşey yer değiştirme değeri 64.31 mm olarak analiz edilmiştir.



Şekil 7.10 Kesit-1 yüzey yer değiştirme değeri

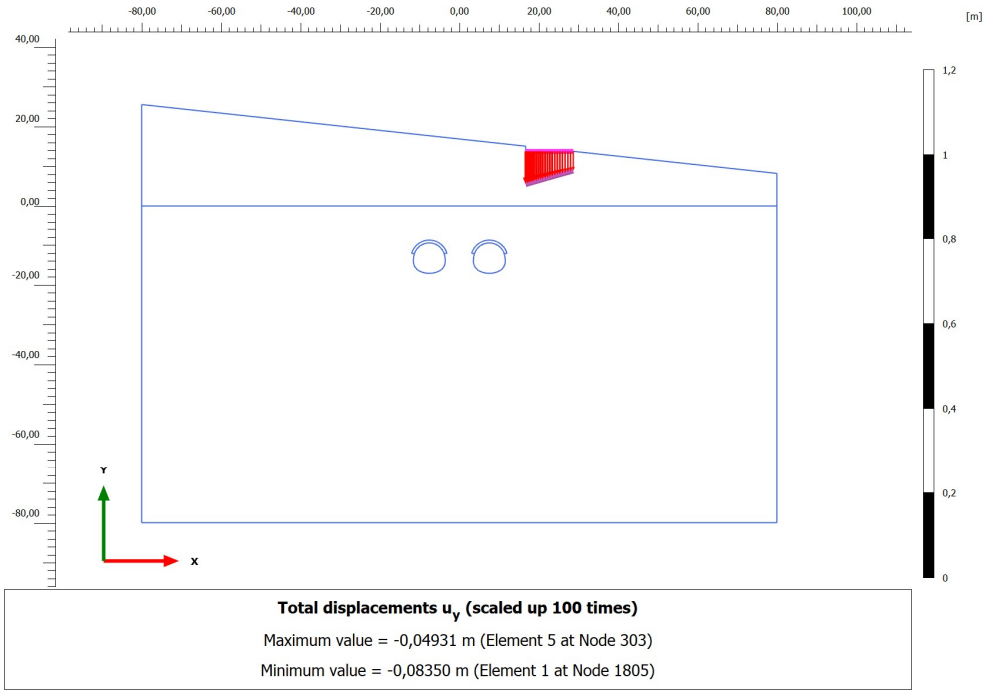
7.3.2 Kesit-2 Analizleri ve Sonuçları

Kesit-1 için oluşturulan modelin ardından Kesit-2'ye geometrisi için sonlu elemanlar analiz modeli oluşturulmuştur. Bu analiz modelinde MAH-44 nolu bina temelinde oluşan düşey yer değiştirme miktarı ile bu kesite ait yüzey oturma değerleri saptanmaya çalışılmıştır. Bu kesitte gerçekleşen maksimum düşey oturma değeri 140.5 mm olarak analiz sonuçlarında görülmüştür (Şekil 7.11).



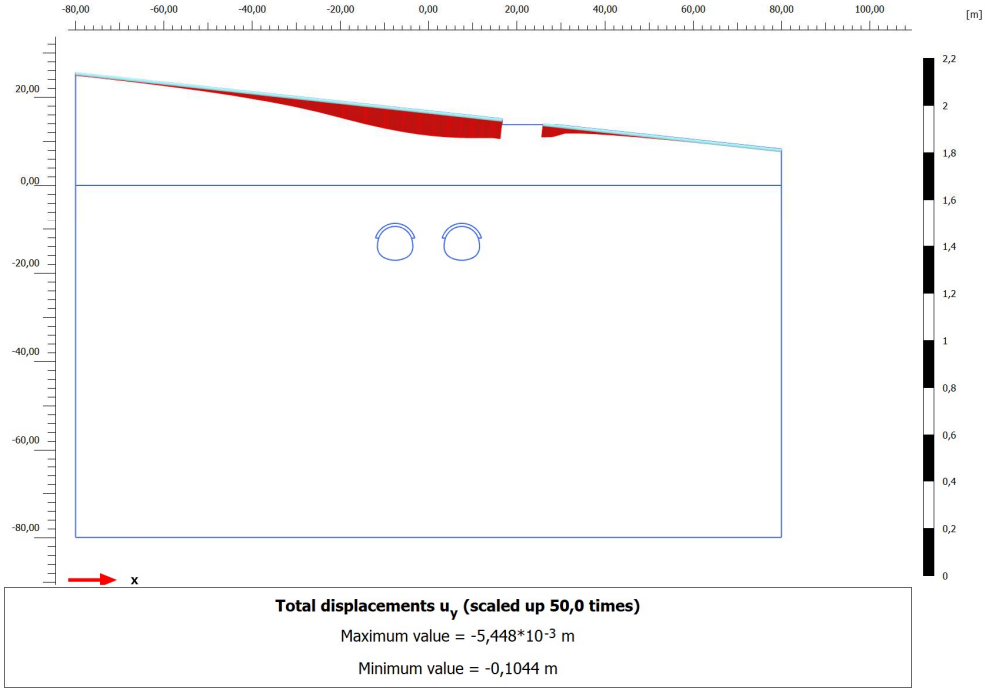
Şekil 7.11 Kesit-2 için toplam yer değiştirme değeri

Aynı kesitte MAH-44 nolu binanın temelini simgeleyen plate elemanda gerçekleşen düşey oturma değeri 83.50 mm mertebesinde gerçekleşmiştir (Şekil 7.12).



Şekil 7. 12 MAH-44 düşey yer değiştirme değeri

Kesit-2'de gerçekleşen yüzey oturma eğrisinin belirlenmesi için bu analiz üzerinden yüzey oturma eğrisi oluşturulmuştur. Yüzey oturma değeri 104.40 mm olarak analiz sonucunda hesaplanmıştır (Şekil 7.13).



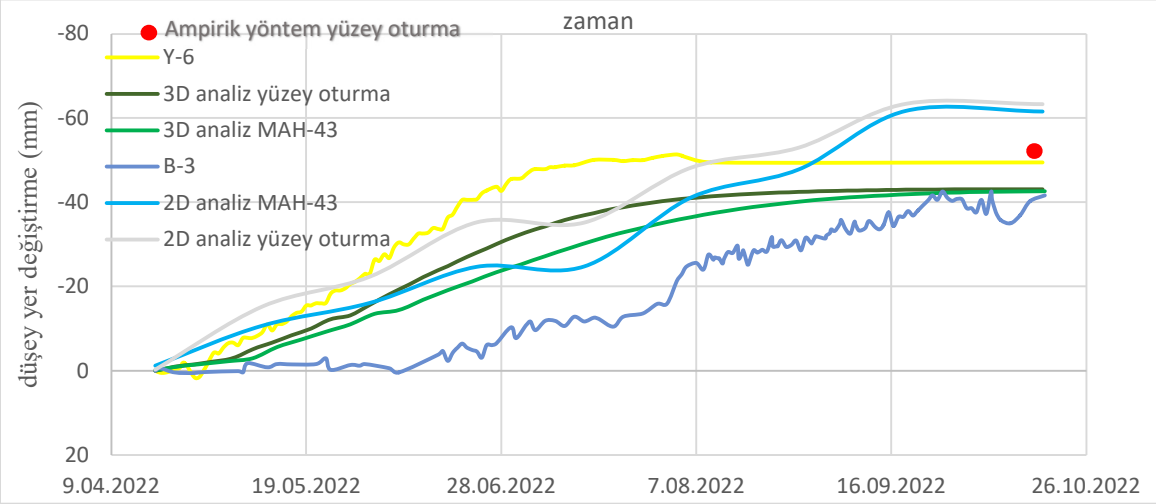
Şekil 7.13 Kesit-2 yüzey yer değiştirme değeri

7.4 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Saha Verileriyle Karşılaştırılması

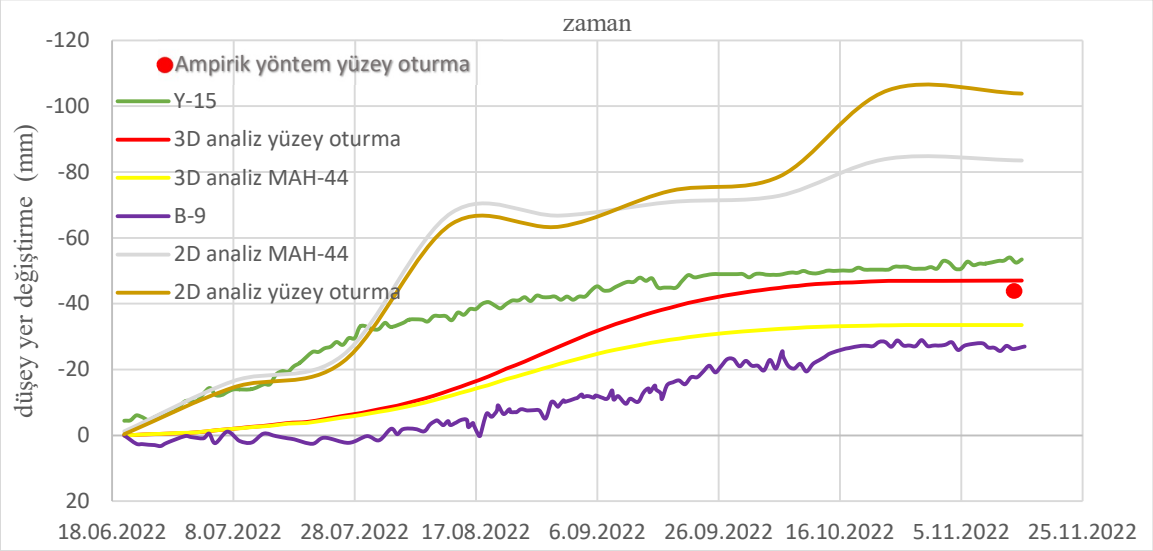
Tez kapsamında tünel inşaat aşamalarına göre oluşturulan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu sonlu elemanlar modelinde doğrulama analizleri yapılarak sahada ölçülen düşey yer değiştirme değerleri geri analizler yapılarak elde edilmeye çalışılmış ve zemin parametreleri belirlenmiştir. Aynı zemin parametleri ve tasarım girdileriyle iki boyutlu sonlu elemanlar modeli kurularak analizler yapılmıştır. Elde edilen üç boyutlu, iki boyutlu analiz verileri ile saha verileri ve ampirik yöntemle elde edilen yüzey oturması değeri karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır.

Değerlendirme sonucunda eğimli bir topoğrafyada gerçekleştirilen tünel kazısında üçüncü boyut etkisiyle düşey yer değiştirmenin nasıl geliştiği, iki boyutlu ve üç boyutlu modelleme sonucu oluşan farklılıklar ortaya koyulmuştur.

Elde edilen tüm veriler düşey yer değiştirme-zaman grafiğine işlenerek değerlendirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca inşaat aşamalarına göre yer değiştirme miktarının zamana bağlı olarak gelişimi ifade edilmeye çalışılmıştır (Şekil 7.14 ve Şekil 7.15).



Şekil 7.14 Kesit-1 düşey yer değiştirme - zaman ilişkisi



Şekil 7.15 Kesit-2 düşey yer değiştirme - zaman ilişkisi

Grafik incelendiğinde elde edilen bilgilere göre sahada ölçülen bina oturma ve yüzey oturma bulonlarının değerlerinin üç boyunlu sonlu elemanlar yazılımda yapılan analizlerin sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu görülmüştür. Zamana bağlı olarak düşey yer değiştirmeler anlamlı bir eğilim sergilemektedir. Ayrıca ampirik yöntemle elde edile maksimum yüzey oturma değerinin de sahadakiyle aynı düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

İki boyutlu analiz sonuçlarında ise gerilme deformasyon durumlarından dolayı daha yüksek yer değiştirme sonucu elde edilmiştir. Bu durum iki boyutlu sonlu elemanlar analizlerine göre beklenen bir durum olmaktadır. Zemin ortamının izotropik yapısı ve gerilme koşullarında üç boyutlu sistemin iki boyutlu sisteme göre çok farklı davranacağı apaçık ortaya koyulmuştur.

Yapılan analizler neticesinde çıkan sonuçlar irdelendiğinde yer değiştirme değerlerinin iki boyutlu analizlerde gerçekleşen değere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Çıkan bütün sonuçlara ilave olarak gerçekleşecek olan tünel kazısının zemin ortamında yapacağı gerilme ve deformasyon değişimini incelemek amacıyla çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada farklı eğimlerde açılan tünelin analiz sonuçları irdelenecektir.

8
TOPOĞRAFYA EĞİMİNİN TÜNEL KAZISI SONUCU DEĞİŞEN GERİLME VE YER DEĞİŞTİRME ETKİSİ

8.1 Giriş

Yapılan iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerin yanı sıra ampirik yöntemin de kullanıldığı bu çalışmada, sahada elde edilen düşey yer değiştirme değerleri ile kapsamlı bir karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamlı yaklaşım, farklı analiz yöntemlerinin sonuçlarını bir araya getirerek, tünel kazılarında meydana gelen yer değiştirmelerin ve bu kazıların zemin üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması hedeflenmiştir. Çalışmada, elde edilen bulgular ışığında önemli çıkarımlar yapılmış ve bu çıkarımlar önceki bölümde özetlenmiştir.

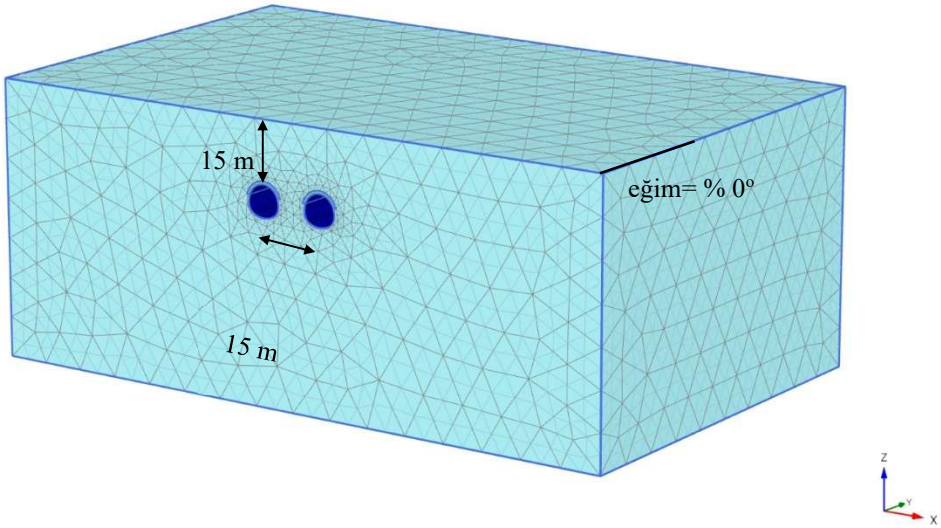
Çalışmanın sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi ve mevcut zemin davranışlarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla, aynı zemin parametrelerine ve tünel geometrisine sahip bir dizi üç boyutlu analiz modeli, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu modeler, topoğrafyadaki farklı eğim durumlarının etkilerini incelemek üzere detaylı bir şekilde tasarlanmıştır. Analizlerde, topoğraftadaki eğim açısının değiştirilmesi ile tünel kazısının zemin üzerinde oluşturduğu yer değiştirme değerindeki değişimler araştırılmıştır. Bu yaklaşım, farklı eğim durumlarında meydana gelen yer değiştirmelerin büyüklüğünü ve dağılımını anlamaya yöneliktir.

Buna ek olarak, tünel kazısı sonucu oluşan gerilme dağılımlarının farklı topoğrafya eğimleri altındaki davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Topoğrafyanın eğimi, yalnızca yer değiştirmeleri değil, aynı zamanda zemin içerisindeki gerilme dağılımlarını da önemli ölçüde etkilemektedir. Bu bağlamda, gerilme yoğunluklarının tünel çevresinde ve zemin içerisinde nasıl değiştiği, eğimin bu değişimlere olan etkisi ile birlikte analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar topoğrafik eğimin zemin deformasyonları ve gerilme durumları üzerindeki etkisinin kapsamlı

şekilde anlaşılmasına olanak sağlamış ve bu etkilerin tasarım sürecine dahil edilmesinin önemi vurgulanmıştır.

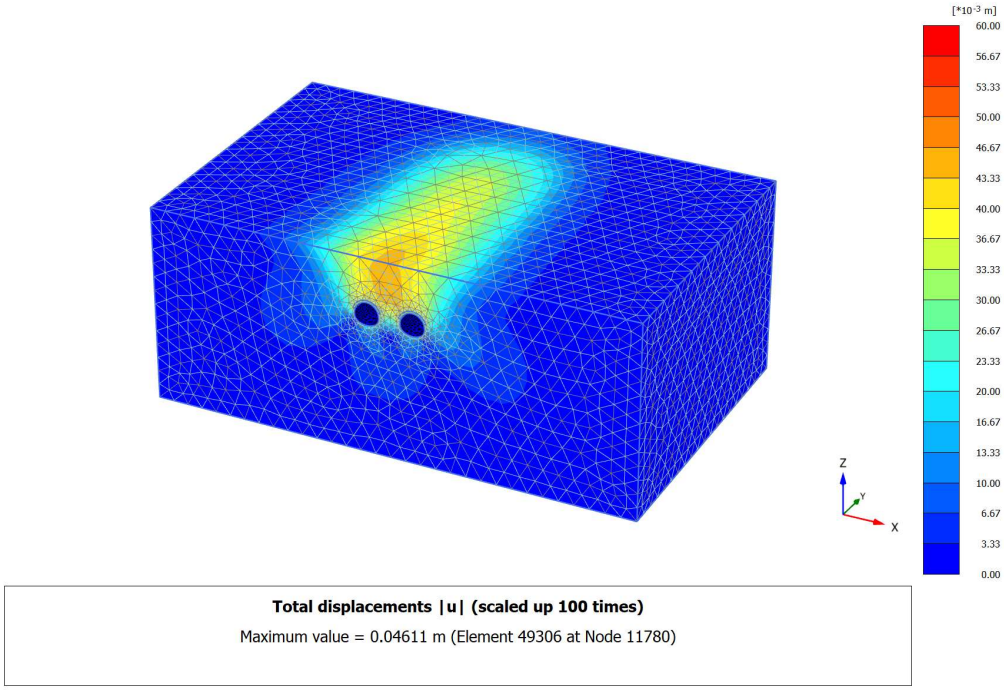
8.2 Topoğrafya Eğimi %0 Analiz ve Sonuçları

Tünel geometrisi ve zemin profilini değiştirmeden analiz yapılmıştır. Üç boyutlu fiziksel modelde tünel başlangıç örtü kalınlığı 15 m dir. Boyuna doğrultudaki eğim %0 olduğundan ötürü tünel ilerledikçe tünel örtü kalınlığı da sabittir (Şekil 8.1)

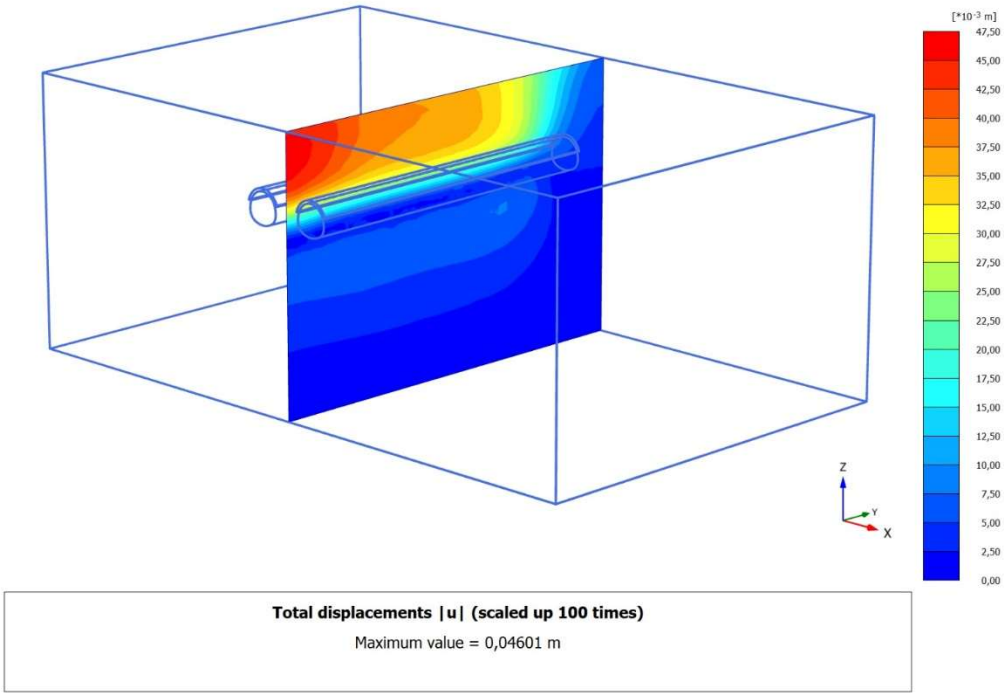


Şekil 8.1 Topoğrafya eğimi %0 üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ağ diyagramı

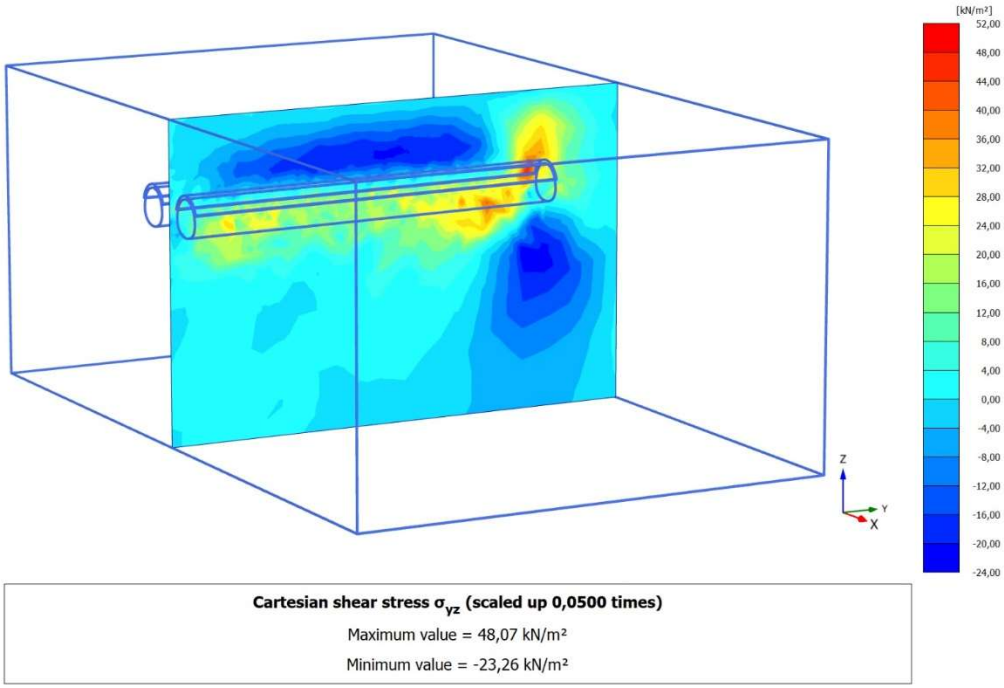
Analiz sonucunda düşey yer değiştirme, toplam yer değiştirme ile σ_{zz} , σ_{yz} değerleri irdelenmiştir. Toplam düşey yer değiştirme maksimum 46.11 mm değere ulaşılmıştır (Şekil 8.2 ve Şekil 8.3). İki tünel arası kesitte ise 46.01 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 8.3). Kayma gerilmesi σ_{yz} değerinde ise minimum -23.26 kN/m^2, maksimum olarak ise 48.07 kN/m^2 değeri elde edilmiştir (Şekil 8.4). Minimum gerilmeler tünel tavanında ve kazının devam etmesiyle birlikte ayna ön tabanında oluşmuştur. Maksimum kayma gerilmeleri tünel aynası önünde oluşmuştur.



Şekil 8.2 Topoğrafya eğimi %0 üç boyutlu toplam yer değiştirmeler



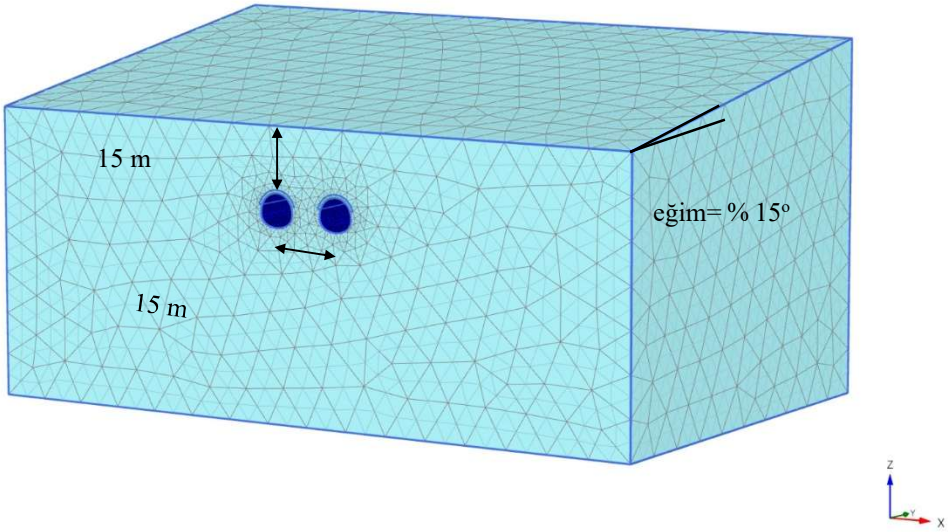
Şekil 8.3 Topoğrafya eğimi %0 iki tünel arası toplam yer değiştirmeler



Şekil 8.4 Topoğrafya eğimi %0 üç boyutlu kayma gerilmeleri, σ_{yz}

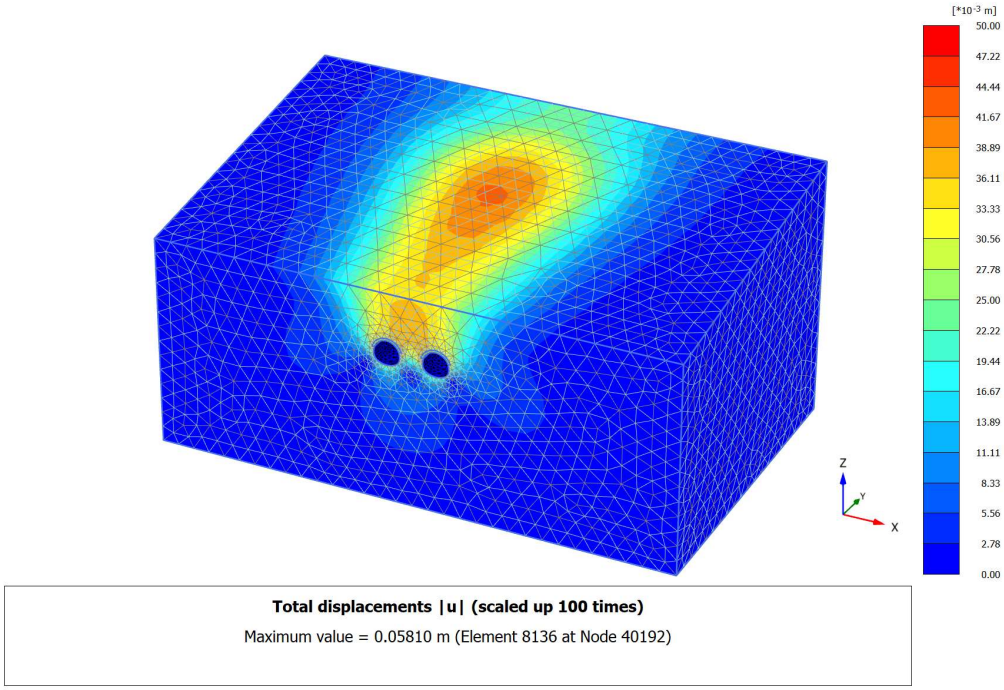
8.3 Topoğrafya Eğimi %15 Analiz ve Sonuçları

Bu eğim değerinde tünel başlangıcında örtü kalınlığı ve diğer geometrik unsurlar sabit tutulmuştur. Boyuna yönündeki topoğrafya eğimi %15 olarak alınmıştır. Buna bağlı olarak sonlu elemanlar modelinde tünel sonundaki örtü kalınlığı 27 m değerinde olmaktadır (Şekil 8.5).

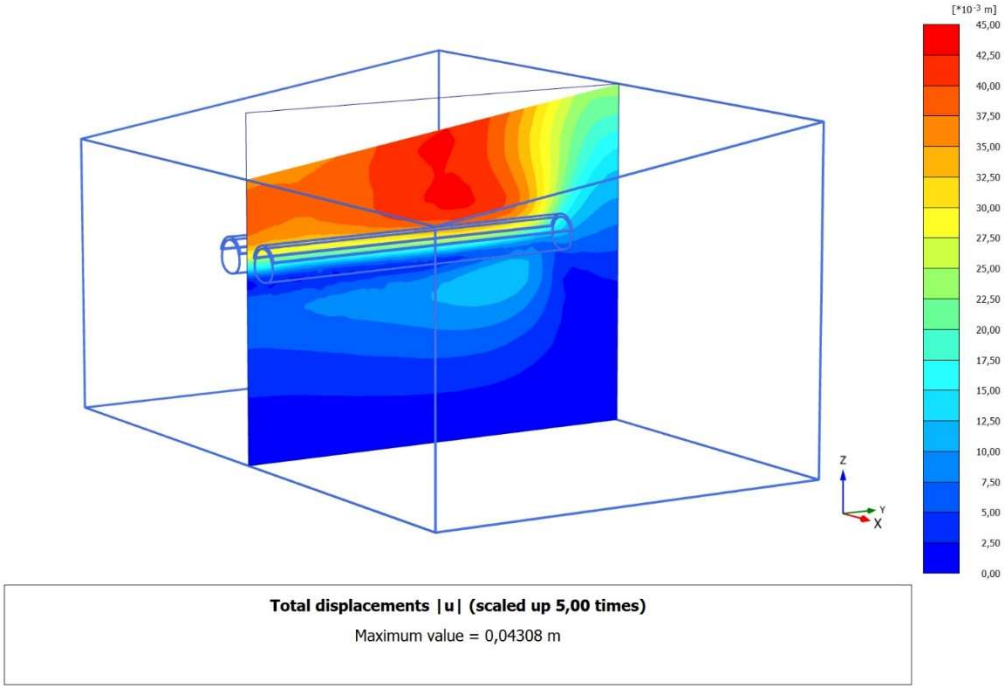


Şekil 8.5 Topoğrafya eğimi %15 üç boyutlu sonlu elemanlar ağı modeli

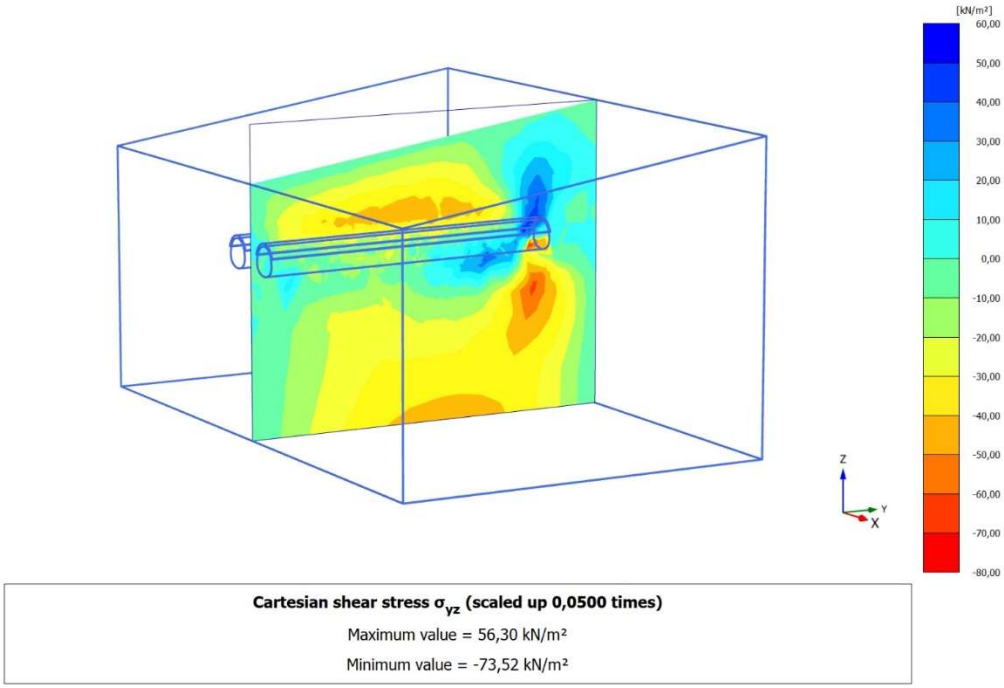
Topoğrafya eğimi %15 olan sonlu elemanlar analiz modeli sonucuna göre maksimum toplam yer değiştirme 58.10 mm değerindedir (Şekil 8.6 ve Şekil 8.7). Bu değer topoğrafya eğimi %0 olan analiz sonucuna göre daha fazladır. Ayrıca topoğrafya eğimi arttıkça maksimum yer değiştirmenin yerinin de değiştiği sonuçlardan görülmektedir. Kayma gerilmeleri σ_{yz} açısından değerlendirildiğinde minimum kayma gerilmesi değerinin -73.52 kN/m^2, maksimum kayma gerilmesi değerinin ise 56.32 kN/m^2 olduğu görülmüştür (Şekil 8.8).



Şekil 8.6 Topoğrafya eğimi %15 üç boyutlu toplam yer değiştirmeler



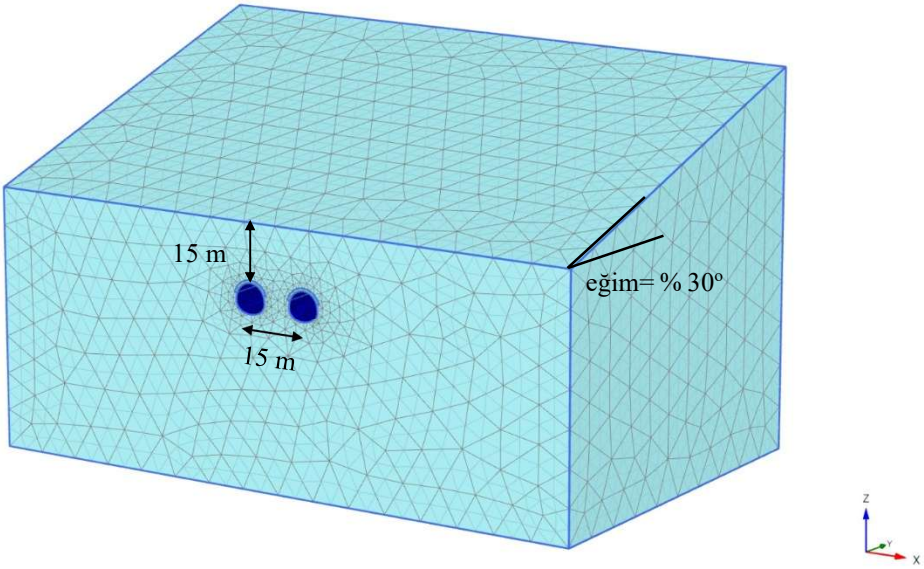
Şekil 8.7 Topoğrafya eğimi %15 iki tünel arası toplam yer değiştirmeler



Şekil 8.8 Topoğrafya eğimi %15 üç boyutlu kayma gerilmeleri, σ_{yz}

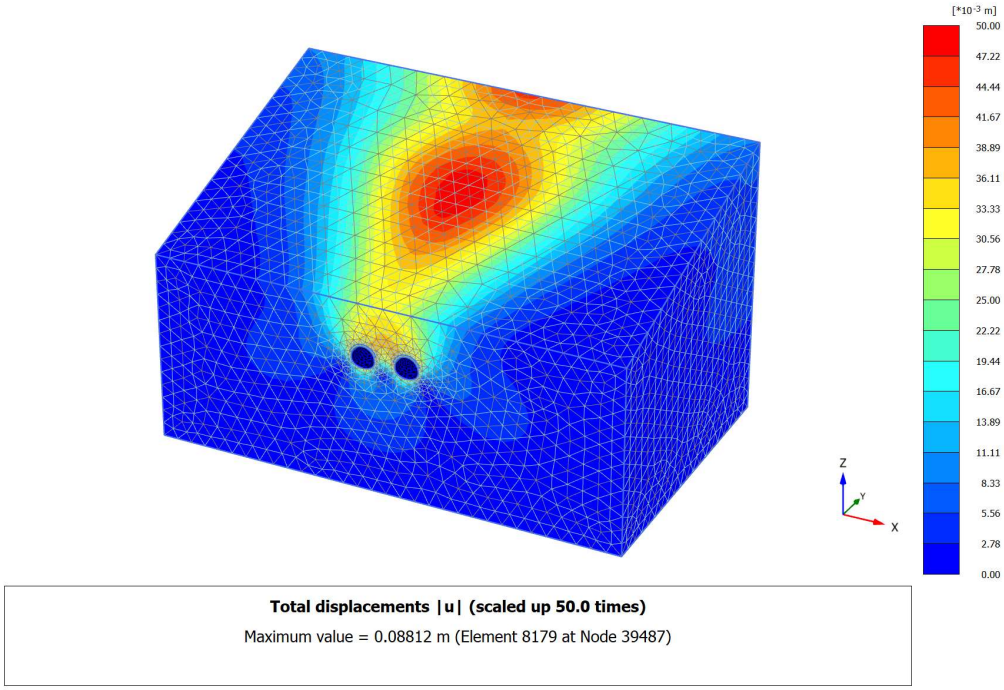
8.4 Topoğrafya Eğimi %30 Analiz ve Sonuçları

Çalışmadaki maksimum eğim değeri olarak %30 eğim değeri çalışılmıştır. Bu analiz modelinde de aynı şekilde yer değiştirmeler ve gerilmeler açısından incelenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde tünel başlangıç örtü kalınlığı tüm analizlerde sabit tutulmuştur. Tünel ilerledikçe topoğrafya eğimine bağlı olarak tünel sonundaki örtü kalınlığı değeri artmaktadır (Şekil 8.9). Burada maksimum örtü kalınlığı 39 m olmaktadır.

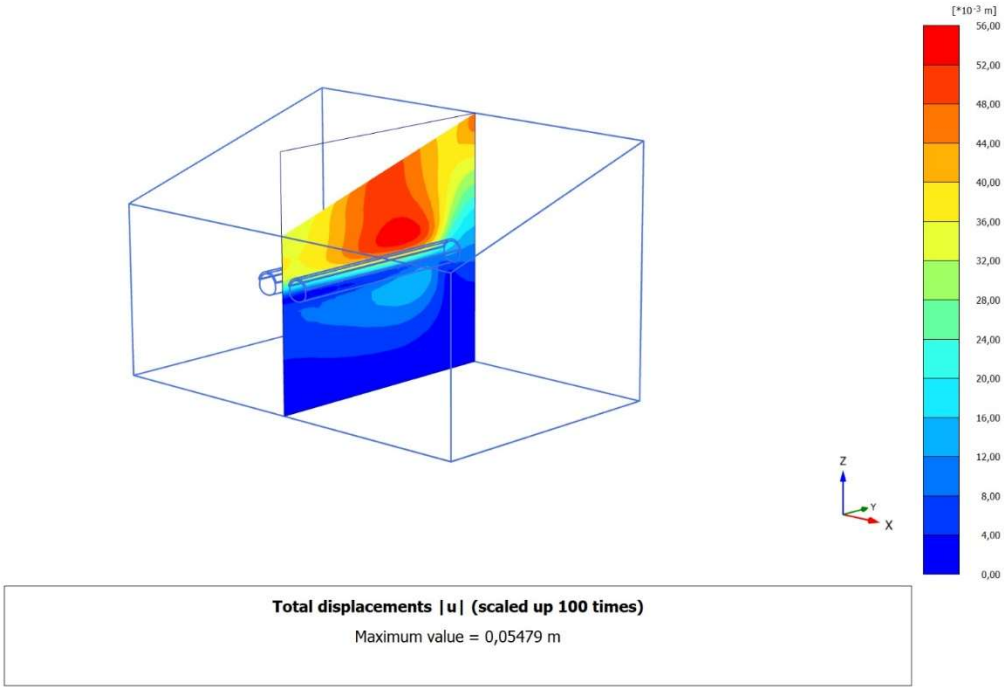


Şekil 8.9 Topoğrafya eğimi %30 üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ağ diyagramı

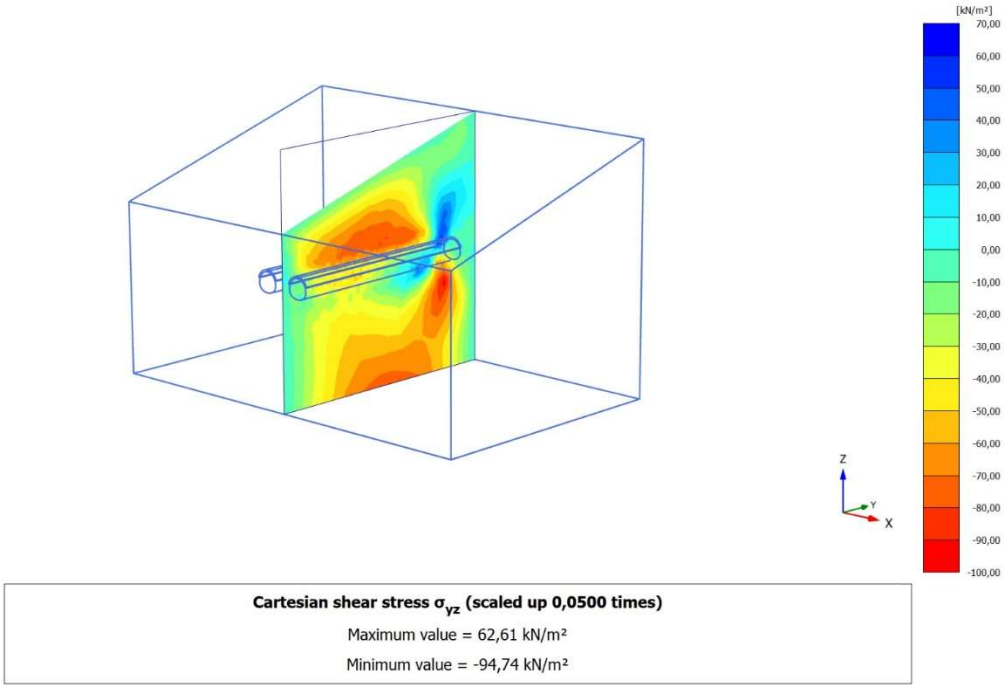
Analiz sonuçlarına göre toplam maksimum yer değiştirme 88.12 mm değerinde tünel aynasında çıkmaktadır. İki tünel arası kesitte ise maksimum yer değiştirme 54.79 mm olarak yüzeyde görülmektedir (Şekil 8.10 ve Şekil 8.11). Kayma düzleminde kayma gerilmesi σ_{yz} minimum -94.74 kN/m^2, maksimum değerde ise 62.61 kN/m^2 olmaktadır (Şekil 8.12).



Şekil 8.10 Topoğrafya eğimi %30 sonlu elemanlar modeli toplam yer değiştirmeler



Şekil 8.11 Topoğrafya eğimi %30 iki tünel arası toplam yer değiştirmeler



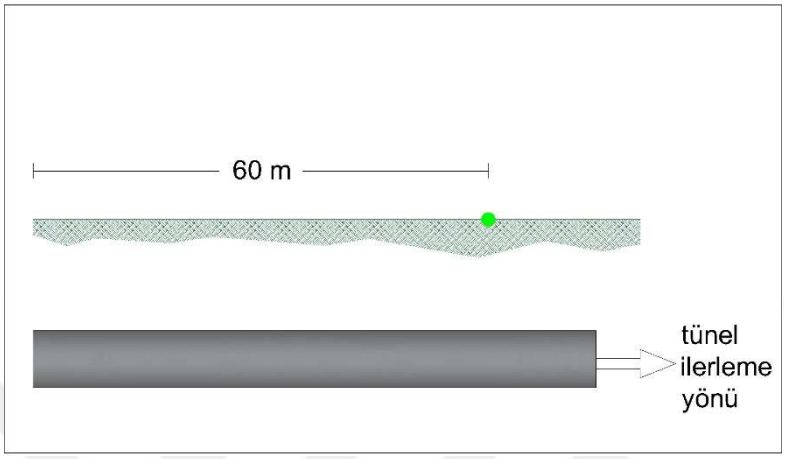
Şekil 8.12 Topoğrafya eğimi %30 kayma gerilmesi, σ_{yz}

8.5 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

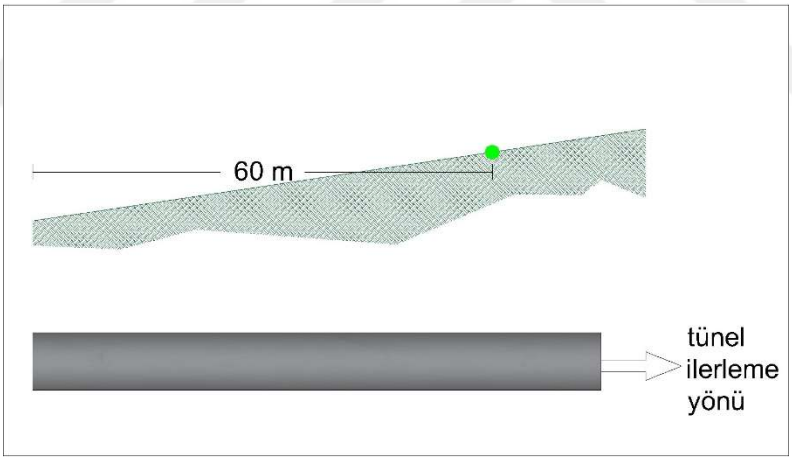
Tünellerde üçüncü boyut etkisini değerlendirmek amacıyla %0, %15 ve %30 topoğrafya eğimlerinde çalışma yapılması tercih edilmiştir. Eğimin artışıyla yüzeyde oluşan toplam yer değiştirme ve düşey yer değiştirme değerleri irdelenmiştir. Gerilmelerin değerlendirilmesi açısından düşey gerilme σ_{zz} ve kayma gerilmesi σ_{yz} değerleri araştırılarak üçüncü boyutun etkisinden dolayı bu değişimler anlamlandırılmaya çalışılmıştır. Analiz modelinde deformasyon ve gerilme değerlerinin karşılaştırılması açısından bütün kesitlerde sabit noktalar alınmıştır. (Guglielmetti, Mahtab, & Xu, 2008) (Kemper, 1961)Bu noktalar, model boyutları göz önünde bulundurularak gerçeğe en yanın şekilde simüle edilebilecek değerler dikkate alınarak seçilmiştir.

8.5.1 Yüzeyde Oluşan Gerilme ve Yer Değiştirmeler

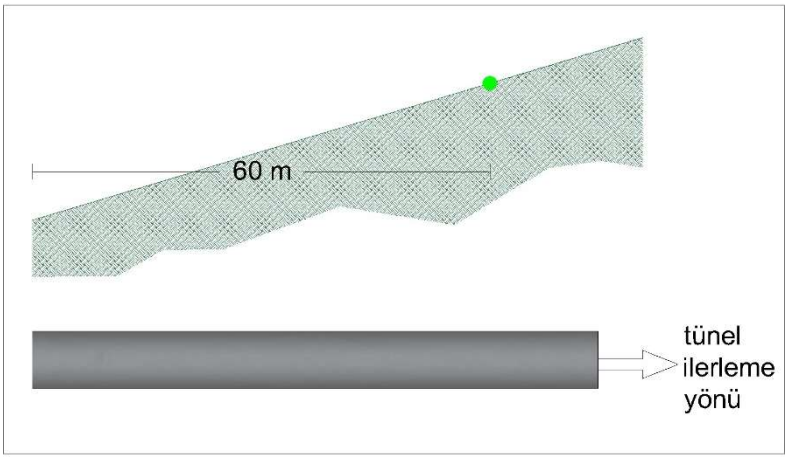
Topoğrafya eğiminin %0, %15 ve %30 olduğu durumlar için sırasıyla Şekil 8.13, Şekil 8.14 ve Şekil 8.15'de tünel ilerleme yönünden yatayda 60 m uzaklıkta zemin yüzeyinde belirlenen noktalarda yer değiştirmeler ve gerilmelerin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 8.13 Topoğrafya eğimi %0 yüzeydeki değerlendirme noktası

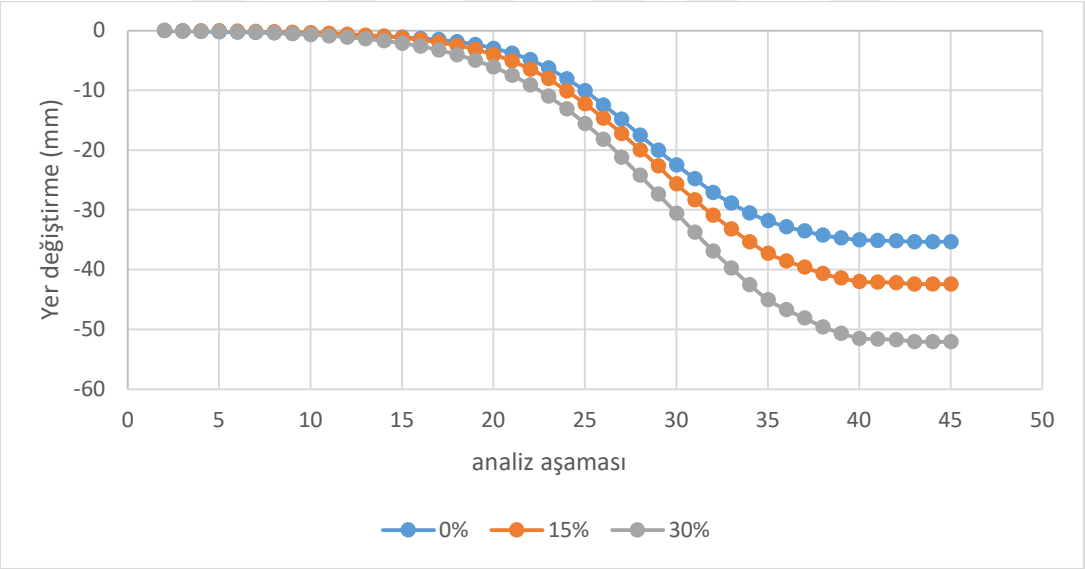


Şekil 8.14 Topoğrafya eğimi %15 yüzeydeki değerlendirme noktası

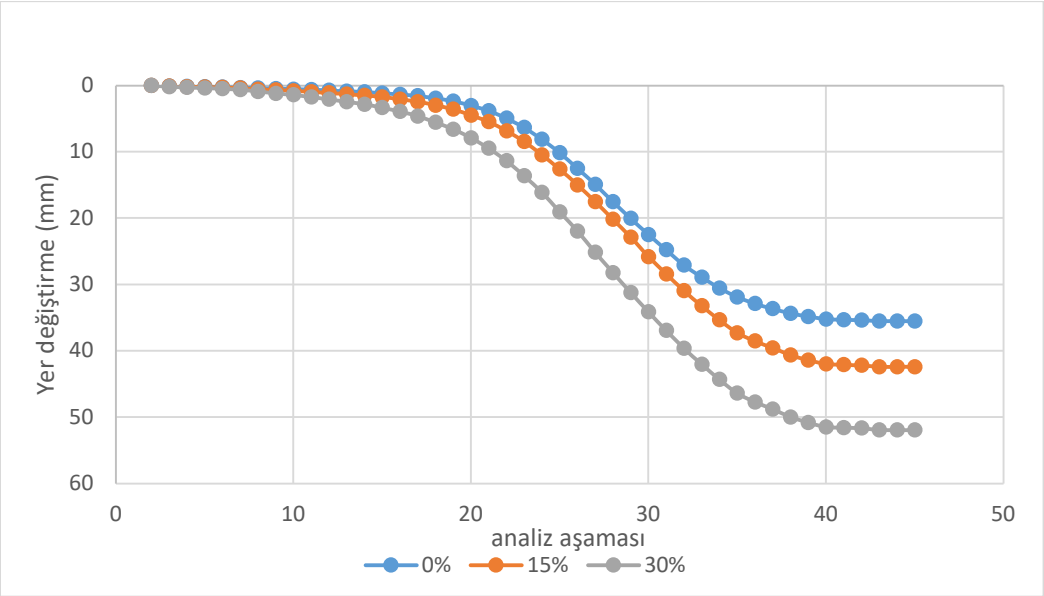


Şekil 8.15 Topoğrafya eğimi %30 yüzeydeki değerlendirme noktası

Şekil 8.16 ve Şekil 8.17'de sırasıyla yukarıda belirtilen noktalar için (Şekil 8.13, 8.14 ve 8.15'te) hesaplanan düşey yer değiştirmenin analiz aşaması boyunca değişimi ifade edilmiştir. Topoğrafya eğiminin artmasıyla birlikte yüzeyde oluşan yer değiştirmelerin de bununla birlikte arttığı gözlemlenmiştir.

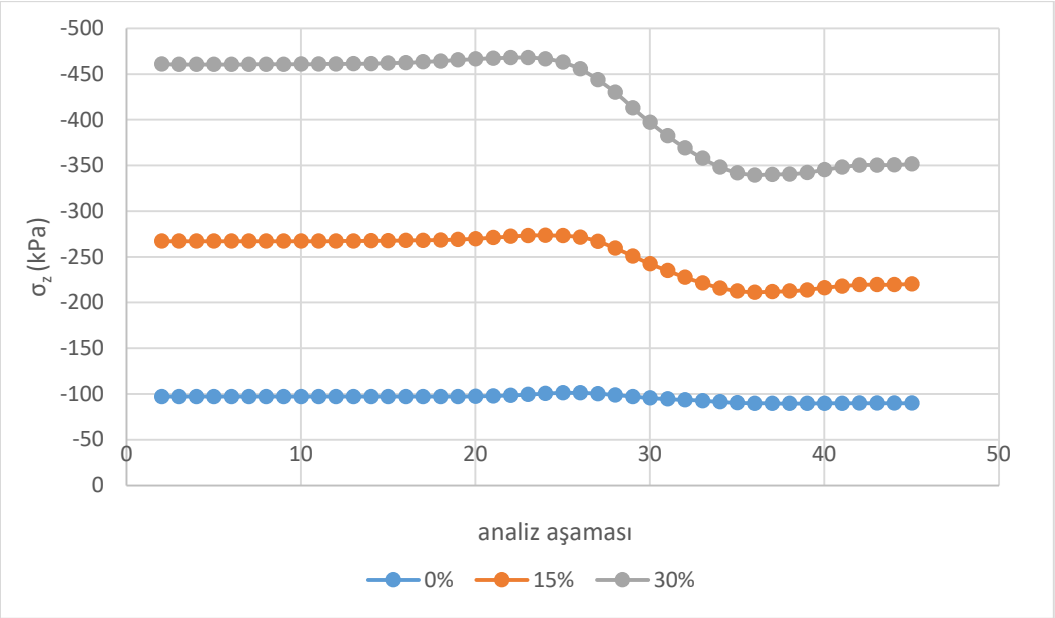


Şekil 8.16 Düşey yer değiştirme

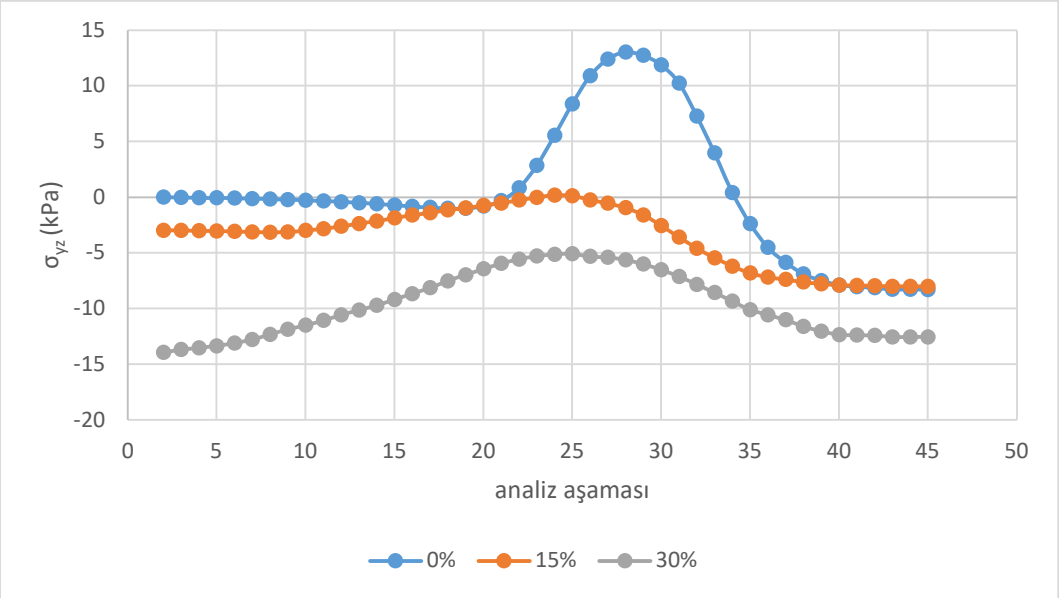


Şekil 8.17 Toplam yer değiştirme

Benzer şekilde Şekil 8.18 ve Şekil 8.19'da sırasıyla yukarıda belirtilen noktalar için (Şekil 8.13, 8.14 ve 8.15'te) hesaplanan düşey gerilme ve kayma gerilmesinin analiz aşaması boyunca değişimi ifade edilmiştir. Düşey gerilme değerlerinde devam eden tünel kazısıyla birlikte %0 eğim değerinde %15 ve %30 eğim değerine göre daha fazla gerilme değişimi görülmüştür. Aynı durum kayma gerilmesi değerinde de vardır.



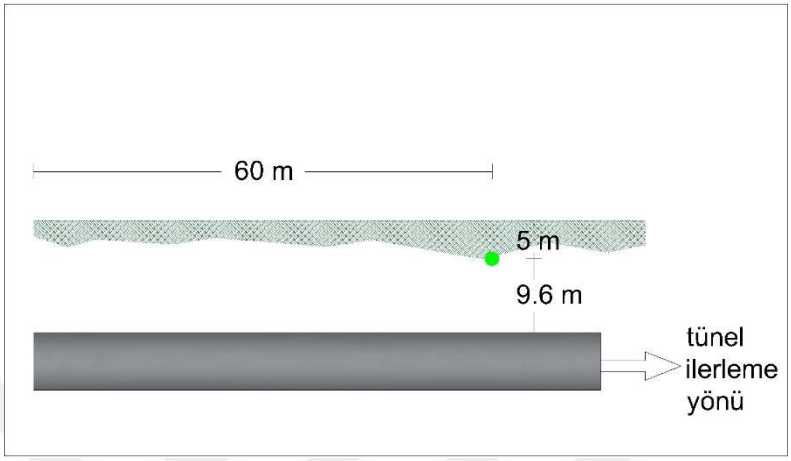
Şekil 8.18 Düşey gerilme (σ_z) değişimi



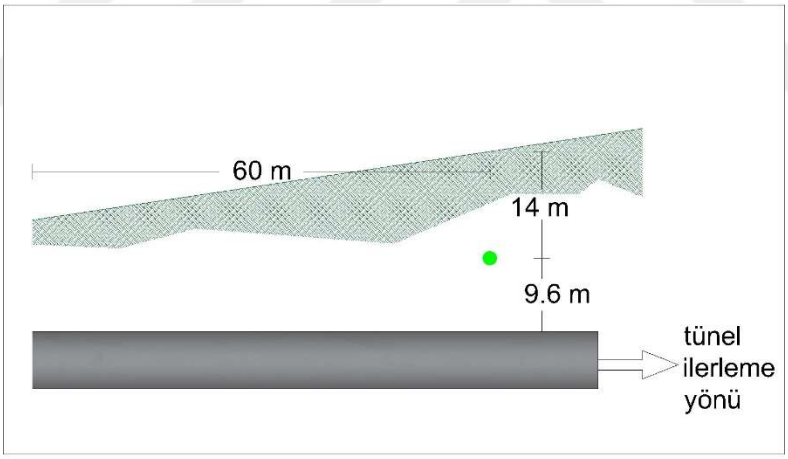
Şekil 8.19 Kayma gerilmesi (σ_{yz}) değişimi

8.5.2 z=-5 Kotunda Oluşan Gerilme veYer değiştirme Değerleri

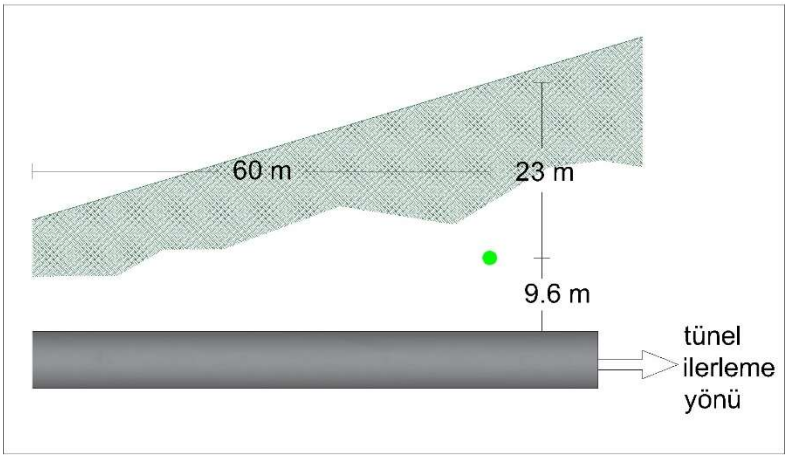
Topoğrafya eğiminin %0, %15 ve %30 olduğu durumlar için sırasıyla Şekil 8.20, Şekil 8.21 ve Şekil 8.22'de tünel ilerleme yönünden yatayda 60m uzaklıkta zemin yüzeyinden 5m aşağıda belirlenen noktalarda yer değiştirmeler ve gerilmelerin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 8.20 Topoğrafya eğimi %0 z=-5 değerlendirme noktası

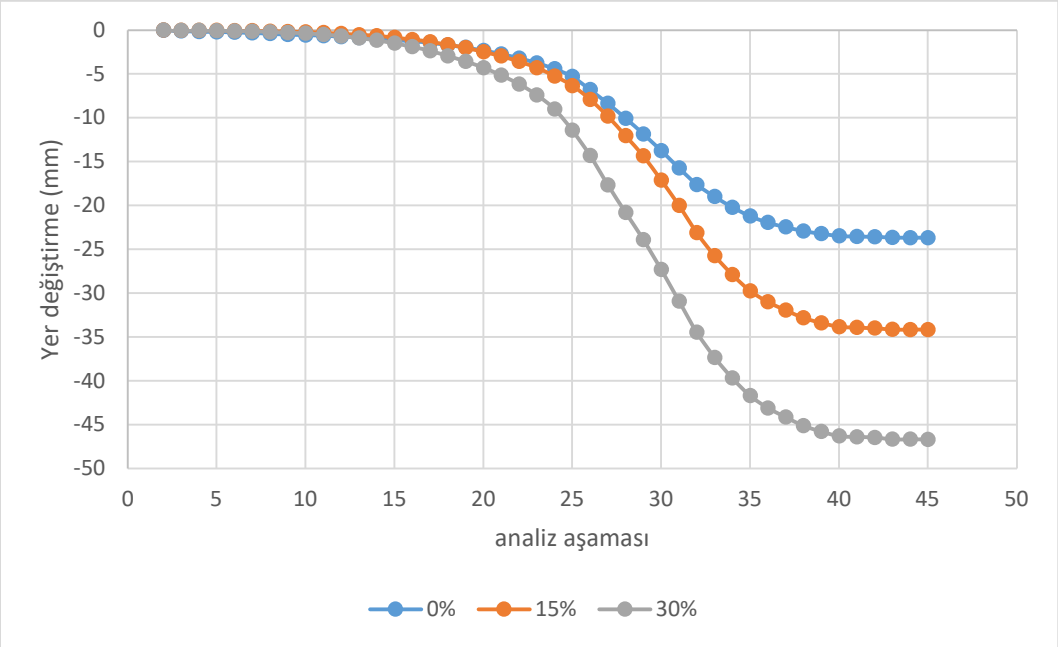


Şekil 8.21 Topoğrafya eğimi %15 z=-5 değerlendirme noktası

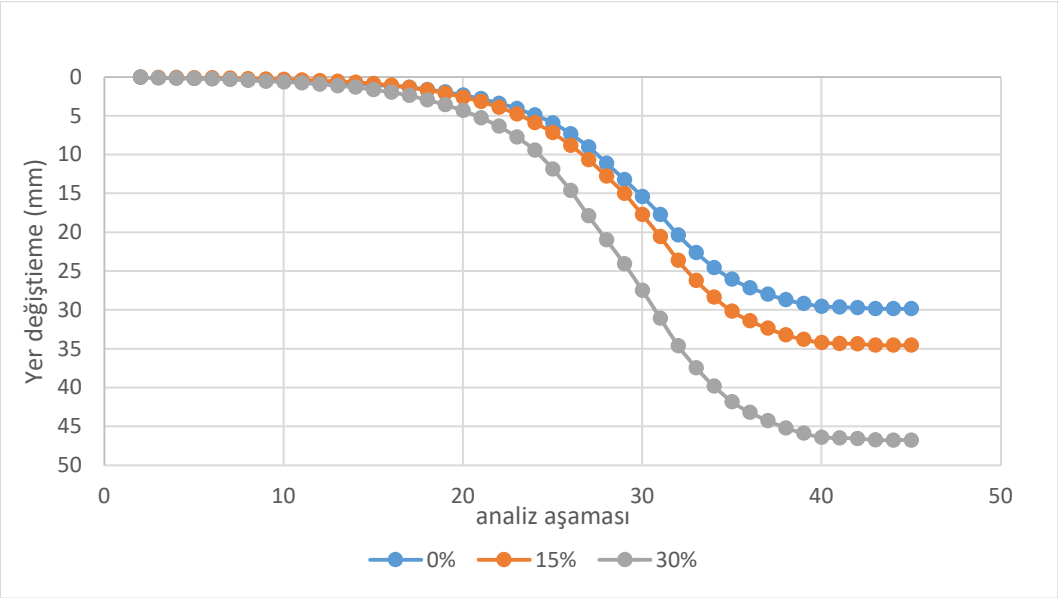


Şekil 8.22 Topoğrafya eğimi %30 z=-5 değerlendirme noktası

Şekil 8.23 ve Şekil 8.24'de sırasıyla yukarıda belirtilen noktalar için (Şekil 8.20, 8.21 ve 8.22'de) hesaplanan düşey yer değiştirmenin analiz aşaması boyunca değişimi ifade edilmiştir. Bu derinlikte yer değiştirme değerinin eğimle birlikte arttığı belirlenmiştir. Toplam yer değiştirme ve düşey yer değiştirme değerlerinde %0 topoğrafya eğiminde üçüncü boyut etkisi daha net görülebilmektedir.

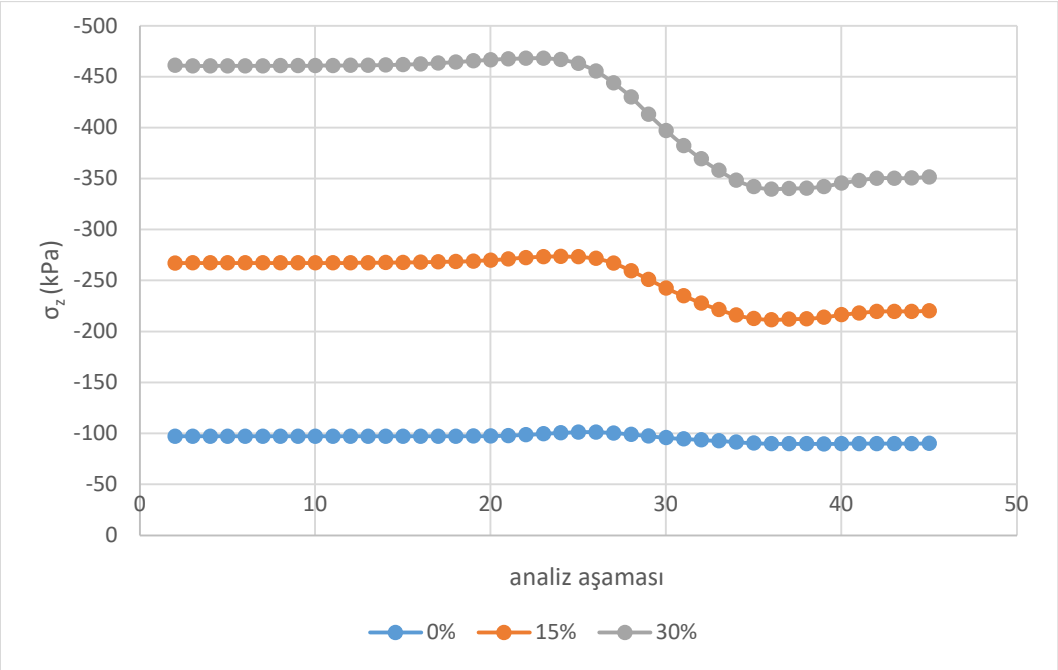


Şekil 8.23 Düşey yer değiştirme

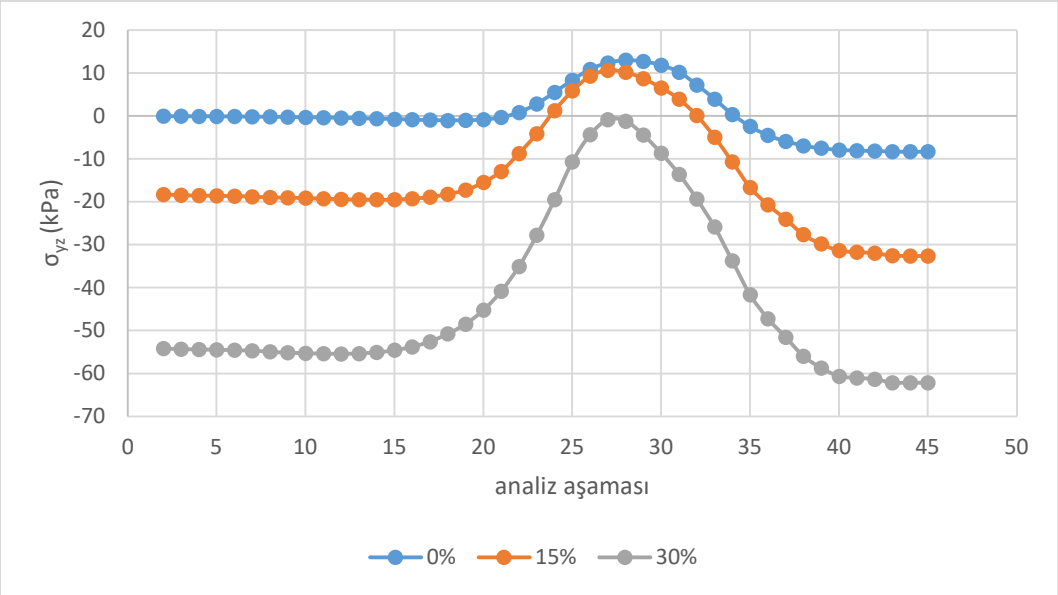


Şekil 8.24 Toplam yer değiştirme

Benzer şekilde Şekil 8.25 ve Şekil 8.26'da sırasıyla yukarıda belirtilen noktalar için (Şekil 8.20, 8.21 ve 8.22'de) hesaplanan düşey gerilme ve kayma gerilmesinin analiz aşaması boyunca değişimi ifade edilmiştir. Gerilme değerleri grafiklerinden de anlaşılacağı üzere %0 eğimde düşey gerilmede büyük değişimler görülmemekte ancak kazının yaklaşma izi gerilme değerlerinde izlenmektedir. Kayma gerilmelerinde eğimin artması ve eğimle birlikte o noktadaki düşey gerilmenin artmasıyla gerilme ferahlamalarında eğimin etkisi yansımıştır.



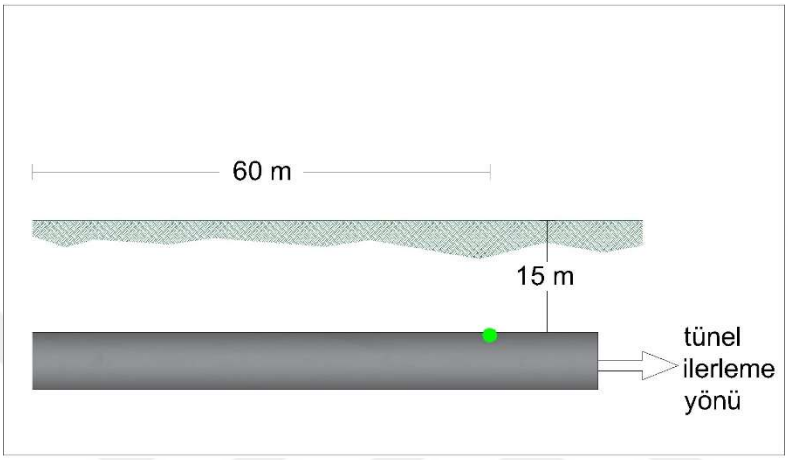
Şekil 8.25 Düşey gerilme (σ_z) değişimi



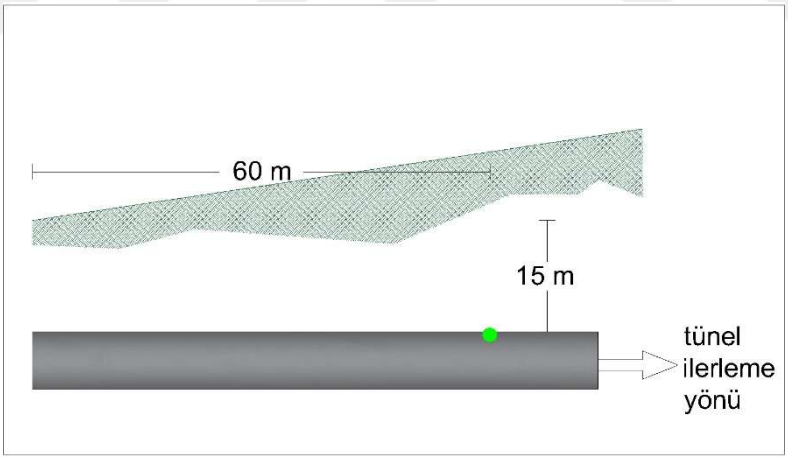
Şekil 8. 26 Kayma gerilmesi (σ_{yz}) değişimi

8.5.3 Tünel Üzerinde Oluşan Gerilme ve Deformasyon Değerleri

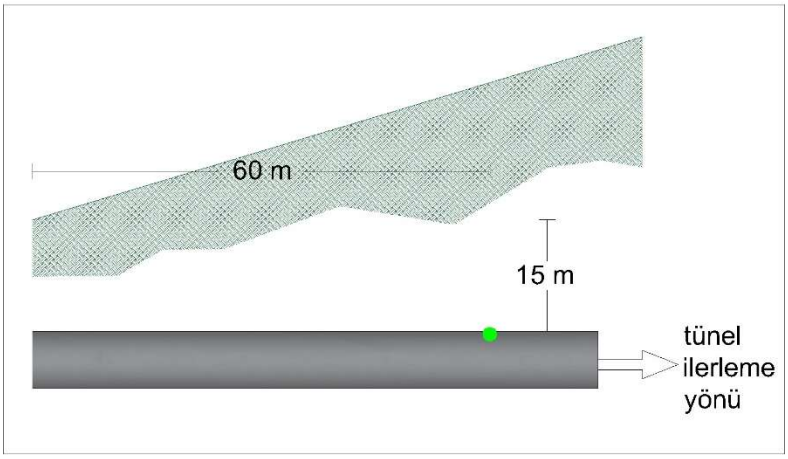
Topoğrafya eğiminin %0, %15 ve %30 olduğu durumlar için sırasıyla Şekil 8.27, Şekil 8.28 ve Şekil 8.29'da tünel ilerleme yönünden yatayda 60m uzaklıkta zemin yüzeyinden 15m aşağıda belirlenen noktalarda yer değiştirmeler ve gerilmelerin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 8.27 Topoğrafya eğimi %0 z=-15 değerlendirme noktası

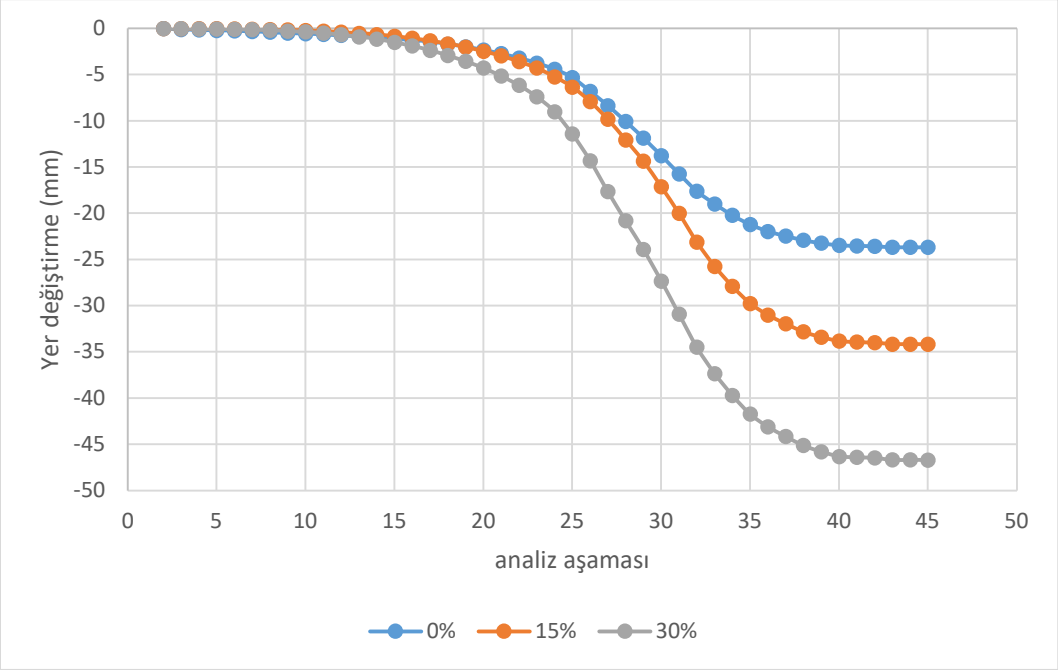


Şekil 8. 28 Topoğrafya eğimi %15 z=-15 değerlendirme noktası

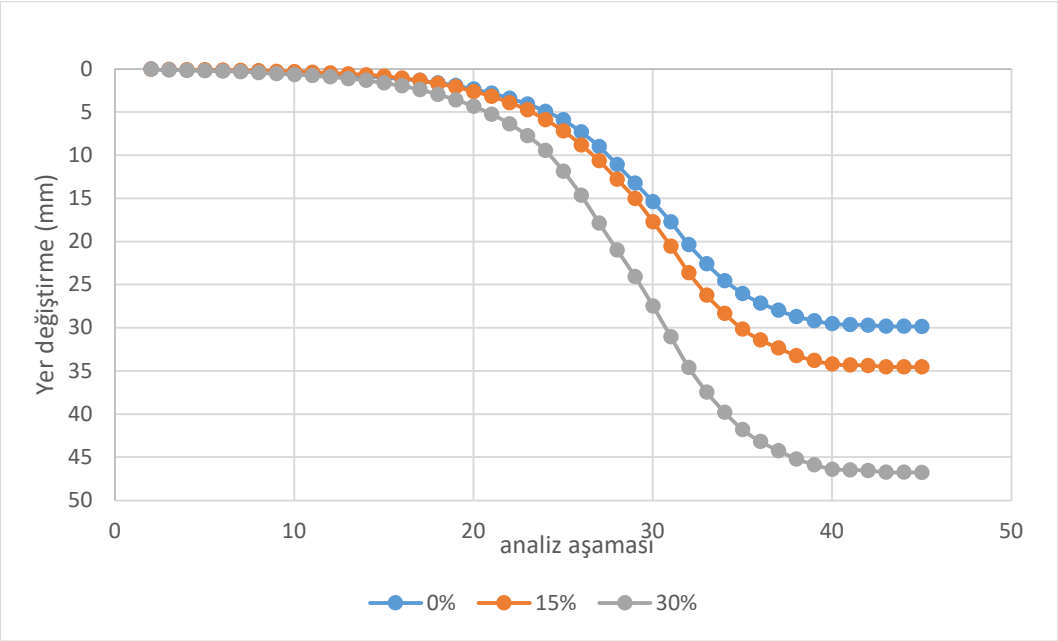


Şekil 8.29 Topoğrafya eğimi %30 z=-15 değerlendirme noktası

Şekil 8.30 ve Şekil 8.31'de sırasıyla yukarıda belirtilen noktalar için (Şekil 8.27, 8.28 ve 8.29'da) hesaplanan düşey yer değiştirmenin analiz aşaması boyunca değişimi ifade edilmiştir. Bu kotta da yer değiştirme değerinin eğimle birlikte arttığı gözlemlenmiştir.

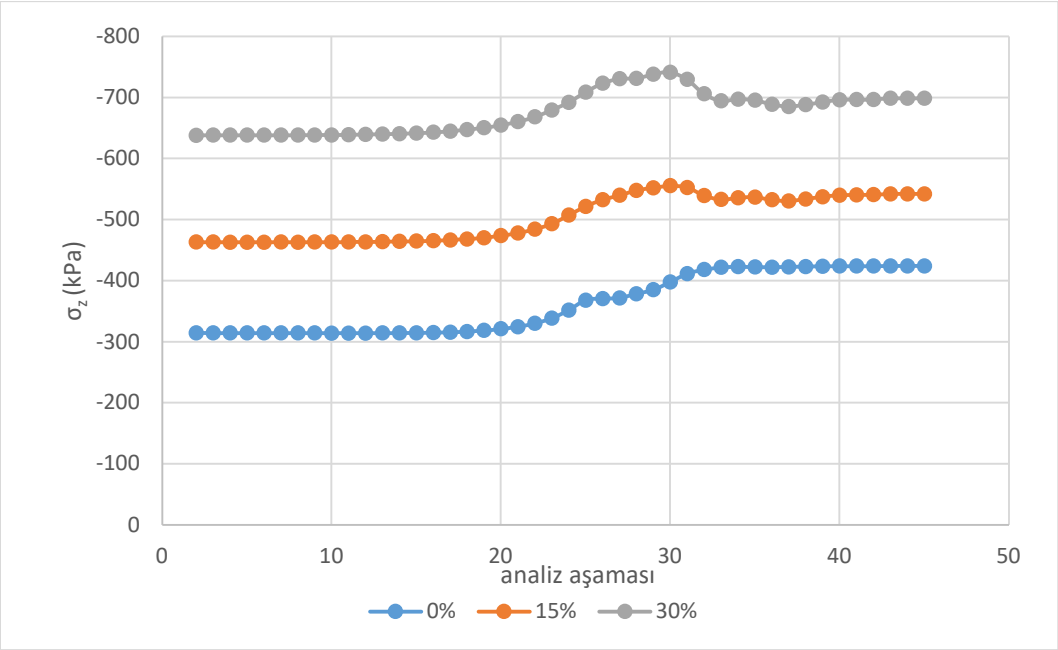


Şekil 8.30 Düşey yer değiştirme grafiği

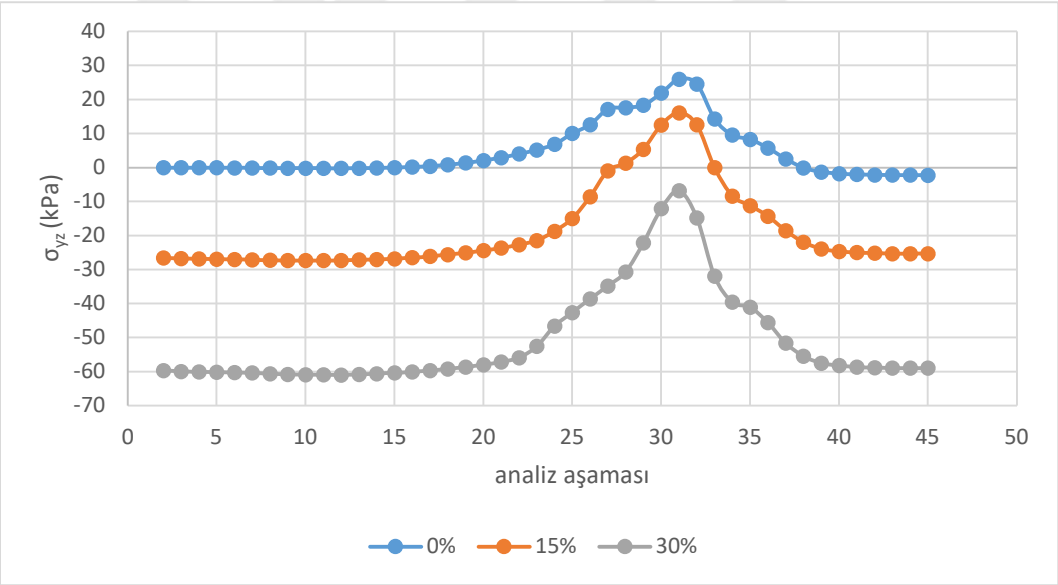


Şekil 8.31 Toplam yer değiştirme grafiği

Aynı durum, Şekil 8.32 ve Şekil 8.33'te sırasıyla yukarıda belirtilen noktalar için (Şekil 8.27, 8.28 ve 8.29'da) hesaplanan düşey gerilme ve kayma gerilmesinin analiz aşaması boyunca değişimi ifade edilmiştir. Gerilme değerleri grafiklerinden de görüldüğü üzere düşey gerilme değerleri tünel kazısının yaklaşmasıyla birlikte önce artış eğilimi daha sonra azalarak başlangıç noktasına göre daha yüksek bir değerde eğilim sergilemiştir. Kayma gerilmeleri yönünde eğimin artmasıyla birlikte gerilme boşalması şiddeti daha da artmıştır. %30 eğimde değişim yalaşık 60 kPa değerinde ilen %0 eğimde 25 kPa mertebelerinde seyretmiştir.



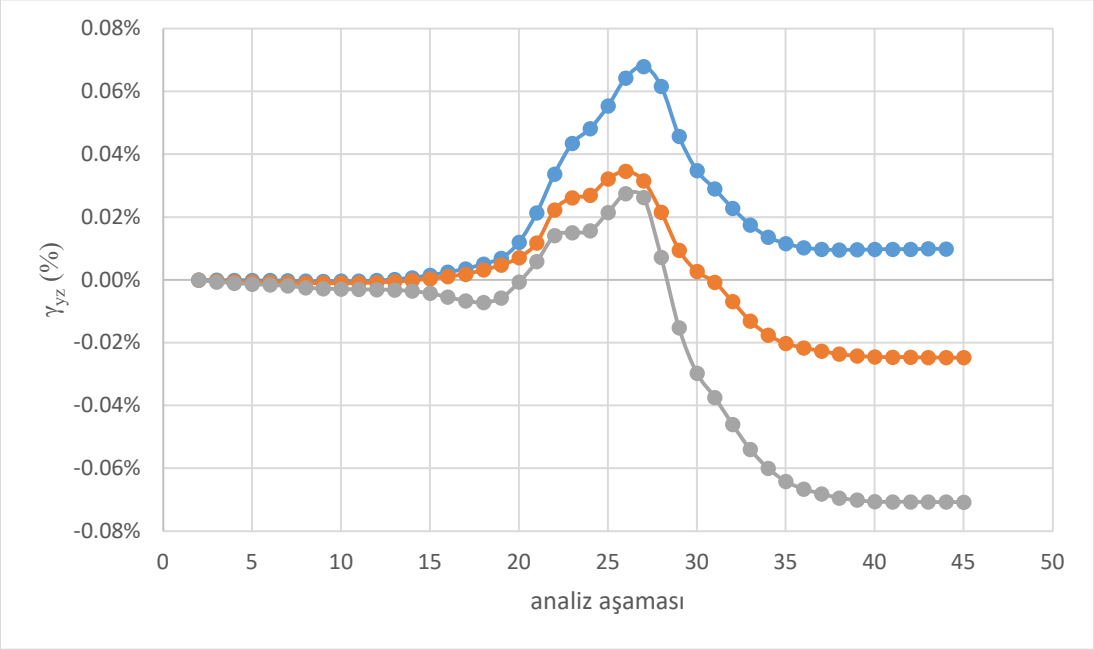
Şekil 8.32 Düşey gerilme (σ_z) değişim grafiği



Şekil 8.33 Kayma gerilmesi (σ_{yz}) değişim grafiği

8.5.4 Tünel Üzerindeki Noktanın (z=-15) Şekil Değiştirmeler Yönünden İncelenmesi

Tünel başlangıcından 50 m mesafede ve tünel üst kotunda (z=-25) gerçekleşen xy düzlemindeki şekil değiştirme değerleri de ayrıca incelenmiştir. Bu değerlerin kazı adımına bağlı olarak değişimi şekil 8.34'te sunulmuştur.



Şekil 8.34 Kayma şekil değiştirmesi (γ_{yz}) değişim grafiği

Şekil 8.4'deki grafik incelendiğinde şekil değiştirme değerleri yaklaşık olarak %-0.07 ile %0.07 arasında değiştiği görülmüştür.

9
SONUÇ

Bu tez çalışmasında, eğimli topoğrafyalarda açılan tünellerde üçüncü boyut etkisinin zemin kazı ortamında oluşturabileceği etkiler değerlendirilmiş ve detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın temelini, eğimli topoğrafyalarda açılmakta olan bir metro tüneline ilişkin veriler oluşturulmuştur. Çalışmanın amacı, tünel tasarımında optimum yöntemlerin geliştirilmesi ve üçüncü boyut etkisinin zemin ortamında meydana getirebileceği davranışların önceden tahmin edilmesidir.

Günümüzde tünel tasarımlarında genellikle iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerin yeterli olduğu kabul edilmektedir. Ancak bu çalışmada, iki boyutlu analizlerde daha yüksek yer değiştirme ve gerilme değerlerinin elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, mühendislik açısından güvenli tarafta kalınmasını sağlamakla birlikte, sınır koşullarının kısıtlı olduğu veya kritik parametrelerin önemli olduğu durumlarda ise yetersiz kalabilmektedir. Böyle durumlarda, üç boyutlu analizlere başvurulmasının daha doğru ve gerçekçi sonuçlar sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Özellikle şehir içi tünel tasarımlarında sınır yer değiştirme değerleriyle karşılaşılması muhtemeldir. Bu tür koşullara tarihi sit alanları, müzeler, askeri bölgeler veya hassas titreşim periyotlarında çalışan makinelerin bulunduğu alanlar örnek olarak verilebilir. Bu gibi durumlarda, tünel kazısının son derece düşük yer değiştirme değerleriyle tamamlanması gerekmektedir. Bu nedenle, üç boyutlu analizler yapılarak üçüncü boyut etkilerinin daha doğru şekilde tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada ortaya konan analizler, tünel tasarımında gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesine ve optimize edilmiş çözümler üretilmesine katkı sağlamaktadır.

Böylelikle, kritik koşullarda güvenli ve ekonomik tasarımlar gerçekleştirmek mümkün hale gelmektedir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analiz sonuçlarının detaylı bir şekilde incelenmesi, topoğrafya eğiminin yer değiştirme ve gerilme değerleri üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymuştur. Topoğrafya yüzeyinden elde edilen veriler doğrultusunda, yer değiştirme miktarının topoğrafyanın eğim değerine bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle eğim değerinin yüksek olduğu bölgelerde deformasyon seviyelerinin daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, zemin davranışlarınınn topoğrafya eğimi ile nasıl ilişkilendirildiğine dair önemli bir veri sunmaktadır.

Analiz sonuçlarına göre, düşey yöndeki gerilme değerleri, topoğrafya eğiminden bağımsız olarak, kazı ilerledikçe azalma eğilimi göstermiştir. Bu azalma, zemin gerilme boşalmasnın meydana geldiği süreçle ilişkilendirilmektedir. Ancak kayma gerilmeleri incelendiğinde, eğimin artışına bağlı olarak kayma gerilmelerinde daha yüksek bir ferahlama eğilimi gözlenmiştir. Özellikle %0 eğim durumunda kayma gerilmelerindeki en büyük ferahlama miktarının meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar topoğrafya eğiminin kayma gerilmesi üzerindeki doğrudan etkisini göstermesi açısından önemlidir.

Devam eden incelemelerde, tünel başlangıç noktasının kotundan itibaren 5 metre derinlikteki yer değiştirme ve gerilme değerleri analiz edilmiştir. Bu derinlikte eğime bağlı olarak örtü kalınlıklarını artması göz ardı edilerek kazıdan kaynaklanan farklılıkların incelenmesine odaklanılmıştır. Bu derinlikte yapılan analiz sonuçlarında kazı ilerledikçe en büyük yer değiştirme mktarının %30 eğim durumunda meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu bulgu topoğrafya eğiminim deformasyon büyüklüğü üzerindeki etkisinin net bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca düşey gerilme değerlerinin topoğrafya eğimiyle doğru orantılı bir artış eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Kayma gerilmesi açısından değerlendirildiğinde, eğim değerinin artmasıyla birlikte gerilme ferahlaması miktarının da belirgin bir artış meydana geldiği görülmüştür.

Tünel tavan kotunda gerçekleştirilen incelemeler, bu kotta düşey yer değiştirmelerin diğer kotlardaki genel seyirle paralel bir şekilde gerçekleştirğini ortaya koymuştur. Ancak düşey gerilmelerin bu kotta azalma eğiliminde olduğu

belirlenmiştir. Bu durum zemin üzerindeki gerilme dağılımının topoğrafya eğimi ve derinlik gibi parametrelere bağlı olarak nasıl farklılaştığını açıkça göstermektedir.

Sonuç olarak, topoğrafya eğiminin zemin ortamındaki yer değiştirme ve gerilme değerleri üzerinde önemli değişikliklere neden olduğu tespit edilmiştir. Bu değişiklikler, topoğrafya yüzeyinden derinliğe doğru farklı yönelimler ve büyüklükler sergilemektedir. Özellikle topoğrafya eğiminin artışı, zemin deformasyonlarının büyüklüğünde ve gerilme boşalmalarında daha belirgin bir etki yaratmaktadır. Bununla birlikte, üçüncü boyut etkisinin gerilme ve deformasyın değişimlerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Üçüncü boyut etkisinin gerilme değişimlerinin tahmin edilmesi sürecindeki rolü, yapılan analizlerin boyutları ile yakından ilişkilidir. Bu çalışmada, üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinin gerekliliği bir kez daha ortaya çıklmaktadır. Özellikle topoğtafya eğimi ve tünel geometrisinin karmaşık etkilerinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için çüç boyutlu modelleme yöntemlerine başvurulması daha doğru ve hassas sonuçlara yönlendirmektedir Gelecekte yapılacak çalışmalarda, bu etkilerin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi için üç boyutlu analizlerin yanı sıra saha verilerini kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Bozkurt, M. (1970). *Tüneller ders notları,* İTÜ Talebe Cemiyeti Yayını.

Brinkgreve, R. B., & Broere, W. (2004). Plaxis 3D manual version *2.* Delft University of Technology & PLAXIS B.V.

Burland, J. B. (2012). Building response to ground movements. In *ICE Manual of geotechnical engineering,* pp. 281-296. Thomas Telford ltd.

Çolak, M. B., & Aksoy, C. O. (2019). İzmir Buca Onat tünellerinde uygulanan yeni avusturya yöntemi ve deformasyon ölçümlerinin değerlendirilmesi. *MT Bilimsel*, (16), pp. 25-33.

Federal Highway Administration (FHWA). (2009).

Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*. CRC Press.

Holmes, A. W. (1961). *A stratigraphic review of thrace.* TPAO Raporu 368 (Yayımlanmamış). Ankara.

Kemper, E. (1961). The Kirklareli limestone (Upper Eocene) of the northen basin rim. *C. Deilmann Bergbau GmbH. Geol. T. 37*, İstanbul.

Keskin, C. (1971). Pınarhisar alanının jeolojisi. *T.J.K. Bült. XIV.*, *14*(1), pp. 31-83.

Kirbaş, T. (1995). *Tünel açma işlemleri, karşılaşılan sorunlar ve uygulanan çözüm*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and Tunnel.* Springer.

Lee, C., Wu, B., Chen, H., & Chiang, K. (2006). Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil. In *Tunnelling and Underground Space Technology*.

Loganathan, B. N., & Poulus, H. G. (1998). Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays. In *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 124 (9)*, pp. 846-856.

Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2012). *Mechanised shield tunnelling.* John Wiley & Sons.

Mair, R. J., Gunn, M. J., & O'Reilly, M. P. (1981). Ground Movements around shallow tunnels in soft clay. In *Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 323-328.

Martos, F. (1958). Concerining an approximate equation of the subsidence trough and its time factors. In *International Strada Control Congress*, pp. 191-205. Berlin.

Möller, S. (2006). *Tunnel induced settlements and structural forces in linings.*

Okay, A. I., Özcan, A. K., İmren, C., Güney, A. B., Demirbağ, E., & Kuşçu, İ. (2000). Active faults and evolving strike-slip basins in the Marmara Sea, northwest Turkey: a multichannel seismic reflection study. In *Tectonophysics 321*, pp. 189–218.

Oke, J. D. (2016). *Determination of nomenclature, mechanistic behaviour, and numerical modelling optimization ofumbrella arch systems.* Ontario, Kanada.

O'Reilly, M. P., & New, B. M. (1982). Settlements above tunnel in the United Kingdom: Their magnitude and prediction. In *Tunneling'82,* pp. 173-181. London: IMM.

Osman, A. S. (2010). Stability of unlined twin tunnels in undrained clay. In *Tunnelling and Underground Space Technology*.

Öztürk, H. T. (2007). *Tüneller ve tasarım ilkeleri* (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Öztürk, H. T., & Durmuş, A. (2008). Tünellere Toplu Bir Bakış ve Savunma Tünellerinin Türkiye İçin Önemi. In *İMO İsatanbul Bülten*, pp. 11-17.

Peck, R. B. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. In *Procoodings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 225-290.

Plaxis. (2024). *2D Reference Manuals*.

Plaxis. (2024). *3D Reference Manuals.*

Rabcewicz, L. (1975, October). Tunnel under Alps uses new, cost-saving lining method. In *Civil Engineering-ASCE*, pp. 66-68.

Sagaseta, C. (1987). Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. In *Geotechnique 37 (3)*, pp. 301-320.

Satici, Ö., & Topal, T. (2015). Tünel açma yöntemlerinin mühendislik jeolojisi ve kaya sınıflama sistemleri ile değerlendirilmesi. In *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*.

Sayar, C. A. (1977). *İstanbul Yeni İskan Yöreleri Geoteknik ve Sismik Etüdü, Basılmamış rapor, Cilt I, Büyükçekmece-Küçükçekmece Göller Arası Yöre.* B.Ü. Deprem Araştırma Enstitüsü Raporu, İstanbul.

Schmidt, B. (1969). *Settlements and ground movements associated with tunneling in soils*. (Phd. Thesis). University of Illinois, Urbana.

Szechy, K. (1970). *The Art of Tunneling.* Akademiai Kıado, Budapest.

Şen, Ş. (1994). *Çekmece gölleri arasındaki bölgenin jeolojisi ve sedimenter özellikleri*. (Yüksek lisans tezi), İstanbul Üniversitesi.

Şen, Ş., Koral, H., & Önalan, M. (1998). Küçükçekmece-Çatalca dolayında Trakya Havzası doğusunun jeolojisi ve gelişimi: yeni bulgular. In *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yer Bilimleri Dergisi*, pp. 27-36.

Ünal, O. T. (1967). *l. Bölge (Marmara) Trakya jeoloji ve petrol imkanları* . TPAO Arşiv No:391.

Vardar, M. (1979). Mühendislik Jeolojisi-Yer Altı Kaya Mekaniği İlişkisi. *DSİ 6. mühendislik Jeolojisi Sempozyumu.* Ankara.

VARDAR, M. (1979). Yer altı kaya yapıları mekaniğinde yeni avusturya tünel açma yönteminin ana ilkeleri, ankrajlar ve boyutlandırılması. In *6. Mühendislik Jeolojisi Konferansı*, pp. 4-16. Yalova.

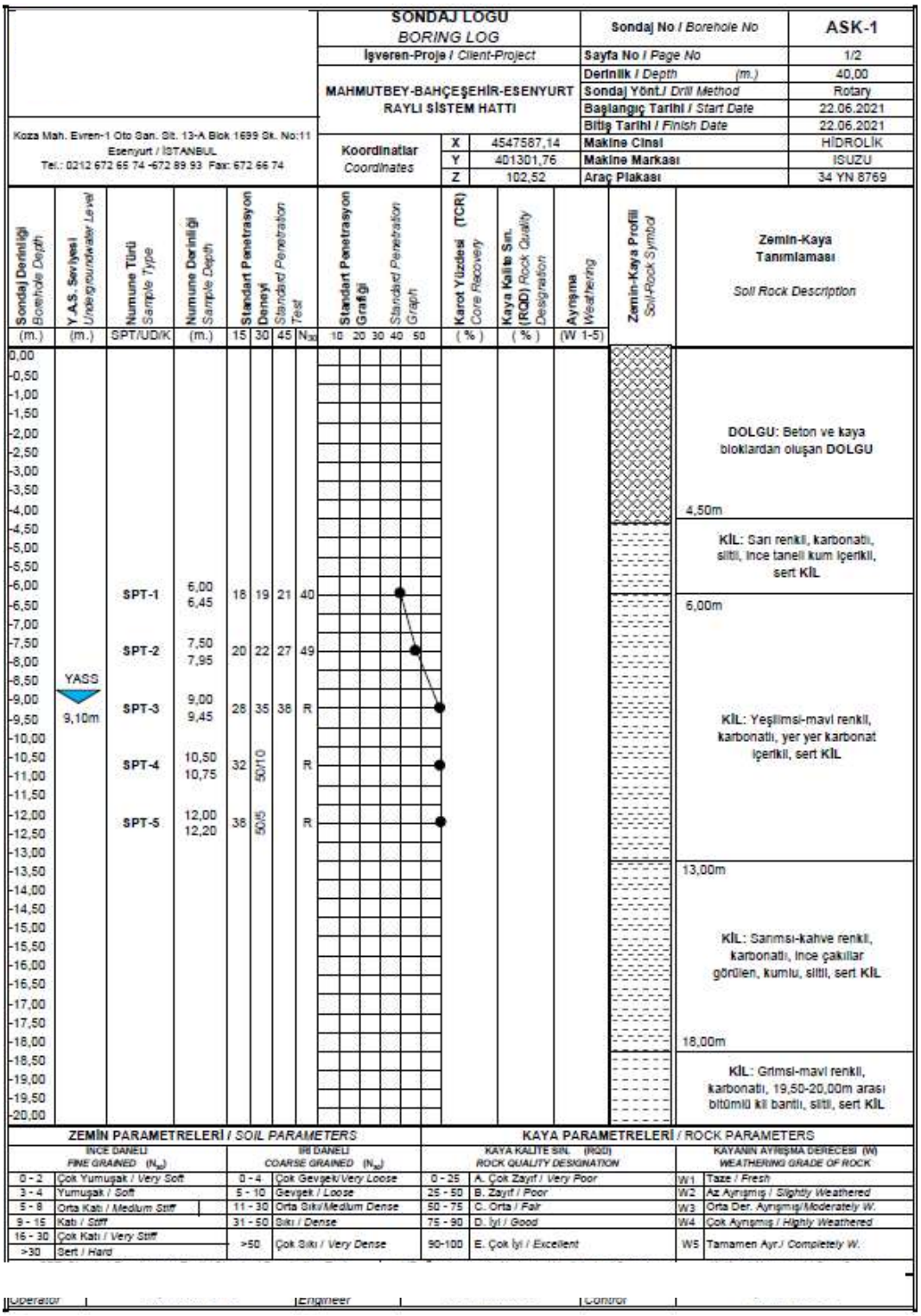
Vardar, M. (2013). *Dünyada ve Türkiye'de tünelcilik ve yeraltı geçişleri.* Ankara.

Wilson, D. W., Abbo, A. J., Scott W. Sloan, M., & Lyamin, A. V. (2014). Undrained stability of dual circular tunnels. In *International Journal of Geomechanics*, pp. 69-79.

Wu, H., & Jin, H. (2021). Influence of front slope gradient and the angle between tunnel and slope on stability of tunnel portal. In *3rd International Conference on Civil, Architecture and Urban Engineering.*

A
GÜZERGAH ÜZERINDE YAPILAN SONDAJLAR

ASK-1 NOLU SONDAJ



SONDAJ LOGU / BORING LOG			
İşveren-Proje / Client-Project		Sondaj No / Borehole No	ASK-1
MAHMUTBEY-BAHÇEŞEHİR-ESENYURT RAYLI SİSTEM HATTI		Sayfa No / Page No	1/2
		Derinlik / Depth (m.)	40,00
		Sondaj Yönt./ Drill Method	Rotary
		Başlangıç Tarihi / Start Date	22.06.2021
		Bitiş Tarihi / Finish Date	22.06.2021
Koza Mah. Evren-1 Oto San. Sit. 13-A Blok 1699 Sk. No:11 Esenyurt / İSTANBUL Tel.: 0212 672 65 74 -672 89 93 Fax: 672 66 74	Koordinatlar / Coordinates: X 4547587,14; Y 401301,76; Z 102,52	Makine Cinsi	HİDROLİK
		Makine Markası	ISUZU
		Araç Plakası	34 YN 8769

Sondaj Derinliği / Borehole Depth (m.)	Y.A.S. Seviyesi / Underground water Level (m.)	Numune Türü / Sample Type SPT/UD/K	Numune Derinliği / Sample Depth (m.)	Standart Penetrasyon Deneyi / Standard Penetration Test 15	30	45	N_{30}	Standart Penetrasyon Grafiği / Standard Penetration Graph (10 20 30 40 50)	Karot Yüzdesi (TCR) / Core Recovery (%)	Kaya Kalite Sın. (RQD) / Rock Quality Designation (%)	Aynşma / Weathering (W 1-5)	Zemin-Kaya Profili / Soil-Rock Symbol	Zemin-Kaya Tanımlaması / Soil Rock Description
0,00													DOLGU: Beton ve kaya bloklardan oluşan DOLGU
-0,50													
-1,00													
-1,50													
-2,00													
-2,50													
-3,00													
-3,50													
-4,00													4,50m
-4,50													KİL: Sarı renkli, karbonatlı, siltli, ince taneli kum içerikli, sert KİL
-5,00													
-5,50													
-6,00		SPT-1	6,00 / 6,45	18	19	21	40						6,00m
-6,50													
-7,00													
-7,50		SPT-2	7,50 / 7,95	20	22	27	49						
-8,00													
-8,50	YASS												
-9,00	9,10m	SPT-3	9,00 / 9,45	28	35	38	R						KİL: Yeşilimsi-mavi renkli, karbonatlı, yer yer karbonat içerikli, sert KİL
-9,50													
-10,00													
-10,50		SPT-4	10,50 / 10,75	32	50/10		R						
-11,00													
-11,50													
-12,00		SPT-5	12,00 / 12,20	38	50/5		R						
-12,50													
-13,00													13,00m
-13,50													
-14,00													
-14,50													
-15,00													KİL: Sarımsı-kahve renkli, karbonatlı, ince çakıllar görülen, kumlu, siltli, sert KİL
-15,50													
-16,00													
-16,50													
-17,00													
-17,50													
-18,00													18,00m
-18,50													KİL: Grimsi-mavi renkli, karbonatlı, 19,50-20,00m arası bitümlü kil bantlı, siltli, sert KİL
-19,00													
-19,50													
-20,00													

ZEMİN PARAMETRELERİ / SOIL PARAMETERS				KAYA PARAMETRELERİ / ROCK PARAMETERS			
İNCE DANELİ / FINE GRAINED (N_{30})		İRİ DANELİ / COARSE GRAINED (N_{30})		KAYA KALİTE SIN. (RQD) / ROCK QUALITY DESIGNATION		KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ (W) / WEATHERING GRADE OF ROCK	
0 - 2	Çok Yumuşak / Very Soft	0 - 4	Çok Gevşek/Very Loose	0 - 25	A. Çok Zayıf / Very Poor	W1	Taze / Fresh
3 - 4	Yumuşak / Soft	5 - 10	Gevşek / Loose	25 - 50	B. Zayıf / Poor	W2	Az Ayrışmış / Slightly Weathered
5 - 8	Orta Katı / Medium Stiff	11 - 30	Orta Sıkı/Medium Dense	50 - 75	C. Orta / Fair	W3	Orta Der. Ayrışmış/Moderately W.
9 - 15	Katı / Stiff	31 - 50	Sıkı / Dense	75 - 90	D. İyi / Good	W4	Çok Ayrışmış / Highly Weathered
16 - 30	Çok Katı / Very Stiff	>50	Çok Sıkı / Very Dense	90-100	E. Çok İyi / Excellent	W5	Tamamen Ayr./ Completely W.
>30	Sert / Hard						

Operator | Engineer | Control

	SONDAJ LOGU *BORING LOG*	**Sondaj No** / *Borehole No*	**ASK-1**
	İşveren-Proje / *Client-Project*	**Sayfa No** / *Page No*	2/2
	MAHMUTBEY-BAHÇEŞEHİR-ESENYURT RAYLI SİSTEM HATTI	**Derinlik** / *Depth* (m.)	40,00
		Sondaj Yönt./ *Drill Method*	Rotary
		Başlangıç Tarihi / *Start Date*	22.06.2021
		Bitiş Tarihi / *Finish Date*	22.06.2021
Koza Mah. Evren-1 Oto San. Sit. 13-A Blok 1699 Sk. No:11 Esenyurt / İSTANBUL Tel.: 0212 672 65 74 -672 89 93 Fax: 672 66 74	**Koordinatlar** *Coordinates* X: 4547587,14	**Makine Cinsi**	HİDROLİK
	Y: 401301,76	**Makine Markası**	ISUZU
	Z: 102,52	**Araç Plakası**	34 YN 8769

Sondaj Derinliği *Borehole Depth* (m.)	Y.A.S. Seviyesi *Underground Water Level* (m.)	Numune Türü *Sample Type* SPT/UD/K	Numune Derinliği *Sample Depth* (m.)	Standart Penetrasyon Deneyi *Standard Penetration Test* 15	30	45	N_{30}	Standart Penetrasyon Grafiği *Standard Penetration Graph* 10 20 30 40 50	Karot Yüzdesi (TCR) *Core Recovery* (%)	Kaya Kalite Sın. (RQD) *Rock Quality Designation* (%)	Ayrışma *Weathering* (W 1-5)	Zemin-Kaya Profili *Soil-Rock Symbol*	Zemin-Kaya Tanımlaması *Soil Rock Description*
-20,00													
-20,50													
-21,00													**KİL**: Grimsi-mavi renkli, karbonatlı, 19,50-20,00m arası bitümlü kil bantlı, siltli, sert **KİL**
-21,50													
-22,00													
-22,50													
-23,00													
-23,50													23,00m
-24,00													
-24,50													
-25,00													
-25,50													**BİTÜMLÜ KİL**: Yer yer ince kömür bantları görülen **BİTÜMLÜ KİL**
-26,00													
-26,50													
-27,00													
-27,50													
-28,00													
-28,50													
-29,00													
-29,50													29,00m
-30,00													
-30,50													
-31,00													
-31,50													
-32,00													
-32,50													
-33,00													
-33,50													
-34,00													**KİL**: Kırmızımsı-sarı renkli, karbonatlı, 35,00-37,00m arası kum bantlı, kumlu, siltli, sert **KİL**
-34,50													
-35,00													
-35,50													
-36,00													
-36,50													
-37,00													
-37,50													
-38,00													
-38,50													
-39,00													
-39,50													
-40,00													40,00m **KUYU SONU**

ZEMİN PARAMETRELERİ / *SOIL PARAMETERS*

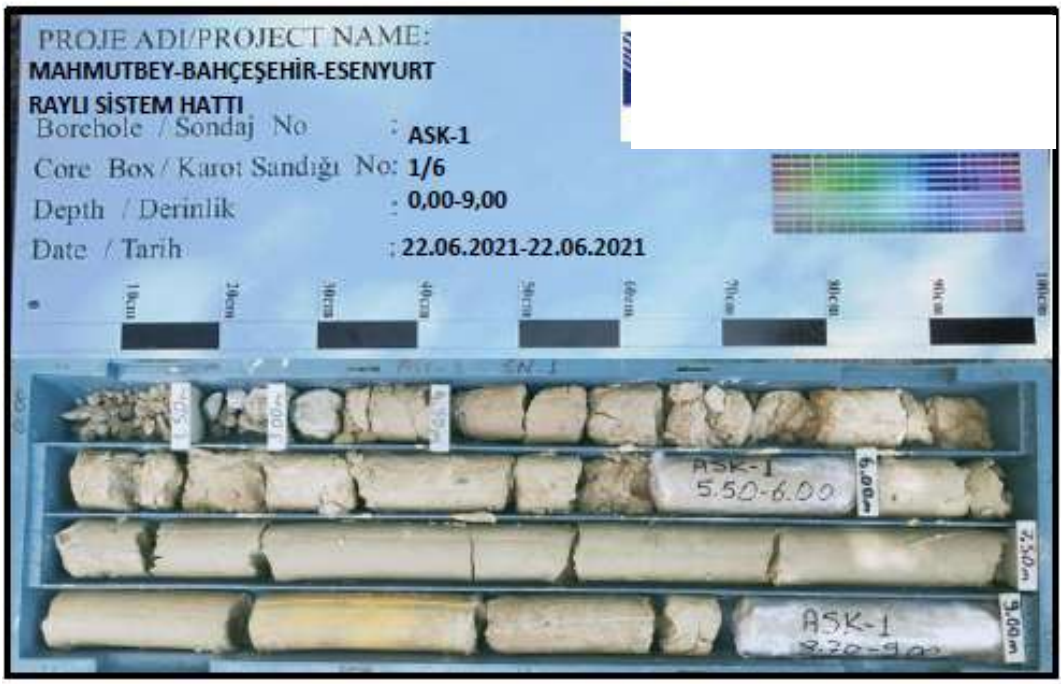
İNCE DANELİ *FINE GRAINED* (N_{30})		İRİ DANELİ *COARSE GRAINED* (N_{30})	
0 - 2	Çok Yumuşak / *Very Soft*	0 - 4	Çok Gevşek/*Very Loose*
3 - 4	Yumuşak / *Soft*	5 - 10	Gevşek / *Loose*
5 - 8	Orta Katı / *Medium Stiff*	11 - 30	Orta Sıkı/*Medium Dense*
9 - 15	Katı / *Stiff*	31 - 50	Sıkı / *Dense*
16 - 30	Çok Katı / *Very Stiff*	>50	Çok Sıkı / *Very Dense*
>30	Sert / *Hard*		

KAYA PARAMETRELERİ / *ROCK PARAMETERS*

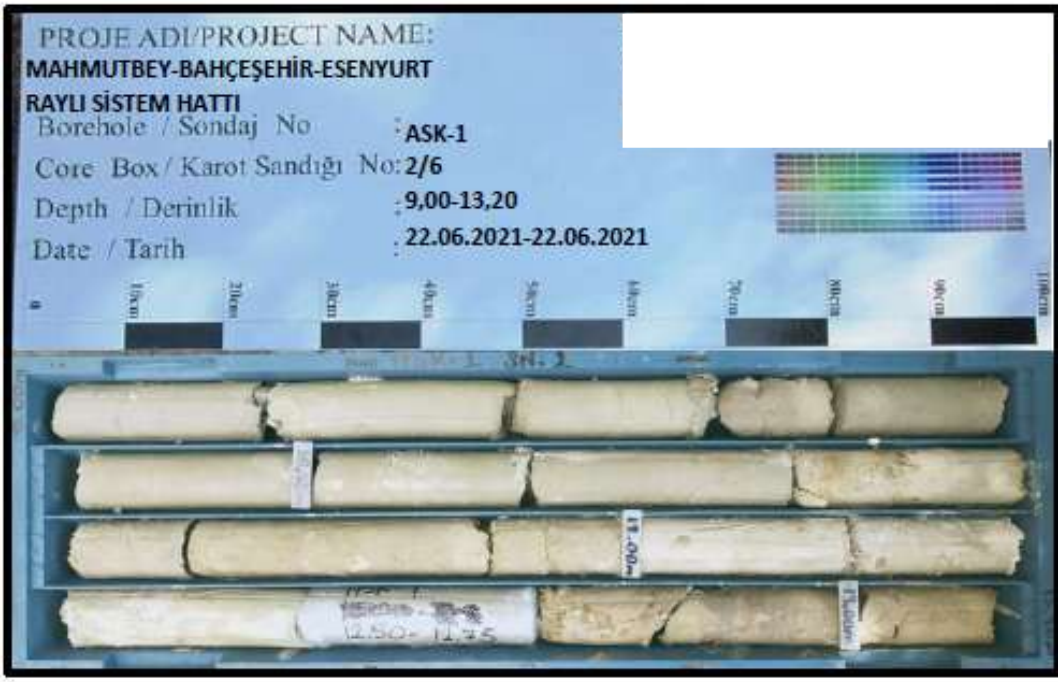
KAYA KALİTE SIN. (RQD) *ROCK QUALITY DESIGNATION*		KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ (W) *WEATHERING GRADE OF ROCK*	
0 - 25	A. Çok Zayıf / *Very Poor*	W1	Taze / *Fresh*
25 - 50	B. Zayıf / *Poor*	W2	Az Ayrışmış / *Slightly Weathered*
50 - 75	C. Orta / *Fair*	W3	Orta Der. Ayrışmış/*Moderately W.*
75 - 90	D. İyi / *Good*	W4	Çok Ayrışmış / *Highly Weathered*
90-100	E. Çok İyi / *Excellent*	W5	Tamamen Ayr./ *Completely W.*

Operator		Engineer		Control	

ASK-1 SANDIK-1



ASK-1 SANDIK-2



ASK-1 SANDIK-3

ASK-1 SANDIK-4

ASK-1 SANDIK-5

ASK-1 SANDIK-6

ASK-2 NOLU SONDAJ

Koza Mah. Evren-1 Oto San. Sit. 13-A Blok 1699 Sk. No:11 Esenyurt / İSTANBUL Tel.: 0212 672 66 74 -672 69 93 Fax: 672 66 74	**SONDAJ LOGU** *BORING LOG*	Sondaj No / *Borehole No*	**ASK-2**
	İşveren-Proje / *Client-Project*	Sayfa No / *Page No*	1/2
	MAHMUTBEY-BAHÇEŞEHİR-ESENYURT RAYLI SİSTEM HATTI	Derinlik / *Depth* (m.)	30,00
		Sondaj Yöntemi / *Drill Method*	Rotary
		Başlangıç Tarihi / *Start Date*	03.07.2021
		Bitiş Tarihi / *Finish Date*	03.07.2021
	Koordinatlar / *Coordinates* X: 4547937,753	Makine Cinsi	HİDROLİK
	Koordinatlar / *Coordinates* Y: 401058,821	Makine Markası	ISUZU
	Koordinatlar / *Coordinates* Z: 69,30	Araç Plakası	34 CDB 92

Sondaj Derinliği *Borehole Depth* (m.)	Y.A.S. Seviyesi *Underground water Level* (m.)	Numune Türü *Sample Type* SPT/UD/K	Numune Derinliği *Sample Depth* (m.)	Standart Penetrasyon Deneyi *Standard Penetration Test* 15	30	45	N_{30}	Standart Penetrasyon Grafiği *Standard Penetration Graph* 10 20 30 40 50	Karot Yüzdesi (TCR) *Core Recovery* (%)	Kaya Kalite Sın. (RQD) *Rock Quality Designation* (%)	Ayrışma *Weathering* (W 1-5)	Zemin-Kaya Profili *Soil-Rock Symbol*	Zemin-Kaya Tanımlaması *Soil Rock Description*
0,00													DOLGU: Çakıllı, siltli, kumlu, kil DOLGU
0,50													
1,00													
1,50													
2,00													
2,50													2,00m
3,00		SPT-1	3,00	8	14	20	34						
3,50			3,45										
4,00													
4,50		SPT-2	4,50	6	10	15	25						
5,00			4,95										
5,50													
6,00		SPT-3	6,00	8	13	26	39						
6,50			6,45										
7,00													KİL: Sarımsı-kahverenkli, karbonatlı, siltli, yer yer çakıllı, kumlu, sert KİL
7,50		ÇAKIL											
8,00													
8,50													
9,00		ÇAKIL											
9,50													
10,00													
10,50		ÇAKIL											
11,00													
11,50													
12,00		ÇAKIL											
12,50													12,00m
13,00													
13,50		ÇAKIL											
14,00													
14,50													
15,00		ÇAKIL											
15,50													
16,00													
16,50		ÇAKIL											KUVARSİT ÇAKILI: Sarımsı-kahve renkli, siltli, killi, kumlu KUVARSİT ÇAKILI
17,00													
17,50													
18,00		ÇAKIL											
18,50													
19,00													
19,50		ÇAKIL											
20,00													

ZEMİN PARAMETRELERİ / *SOIL PARAMETERS*

İNCE DANELİ *FINE GRAINED* (N_{30})		İRİ DANELİ *COARSE GRAINED* (N_{30})	
0 - 2	Çok Yumuşak / *Very Soft*	0 - 4	Çok Gevşek/*Very Loose*
3 - 4	Yumuşak / *Soft*	5 - 10	Gevşek / *Loose*
5 - 8	Orta Katı / *Medium Stiff*	11 - 30	Orta Sıkı/*Medium Dense*
9 - 15	Katı / *Stiff*	31 - 50	Sıkı / *Dense*
16 - 30	Çok Katı / *Very Stiff*	>50	Çok Sıkı / *Very Dense*
>30	Sert / *Hard*		

KAYA PARAMETRELERİ / *ROCK PARAMETERS*

KAYA KALİTE SIN. (RQD) *ROCK QUALITY DESIGNATION*		KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ (W) *WEATHERING GRADE OF ROCK*	
0 - 25	A. Çok Zayıf / *Very Poor*	W1	Taze / *Fresh*
25 - 50	B. Zayıf / *Poor*	W2	Az Ayrışmış / *Slightly Weathered*
50 - 75	C. Orta / *Fair*	W3	Orta Der. Ayrışmış/*Moderately W.*
75 - 90	D. İyi / *Good*	W4	Çok Ayrışmış / *Highly Weathered*
90-100	E. Çok İyi / *Excellent*	W5	Tamamen Ayr / *Completely W.*

Operator | Engineer | Control

Koza Mah. Evren-1 Oto San. Sit. 13-A Blok 1699 Sk. No:11 Esenyurt / İSTANBUL Tel.: 0212 672 65 74 -672 69 93 Fax: 672 66 74	**SONDAJ LOGU** *BORING LOG*	**Sondaj No** / *Borehole No*	**ASK-2**
	İşveren-Proje / *Client-Project*	**Sayfa No** / *Page No*	2/2
	MAHMUTBEY-BAHÇEŞEHİR-ESENYURT RAYLI SİSTEM HATTI	**Derinlik** / *Depth* (m.)	30,00
		Sondaj Yönt./ *Drill Method*	Rotary
		Başlangıç Tarihi / *Start Date*	03.07.2021
		Bitiş Tarihi / *Finish Date*	03.07.2021
	Koordinatlar *Coordinates* X: 4547937,75	**Makine Cinsi**	HİDROLİK
	Y: 401058,82	**Makine Markası**	ISUZU
	Z: 69,30	**Araç Plakası**	34 CDB 92

Sondaj Derinliği *Borehole Depth* (m.)	Y.A.S. Seviyesi *Underground Water Level* (m.)	Numune Türü *Sample Type* SPT/UD/K	Numune Derinliği *Sample Depth* (m.)	Standart Penetrasyon Deneyi *Standard Penetration Test* 15 30 45 N_{30}	Standart Penetrasyon Grafiği *Standard Penetration Graph* 10 20 30 40 50	Karot Verdesi (TCR) *Core Recovery* (%)	Kaya Kalite Sın. (RQD) *Rock Quality Designation* (%)	Ayrışma *Weathering* (W 1-5)	Zemin-Kaya Profili *Soil-Rock Symbol*	Zemin-Kaya Tanımlaması *Soil Rock Description*
-20,00										
-20,50										
-21,00		ÇAKIL								KUVARSİT ÇAKILI: Sarımsı-kahve renkli, siltli, killi, kumlu KUVARSİT ÇAKILI
-21,50										
-22,00										
-22,50						30	0	W3		22,00m
-23,00										
-23,50						17	7	W3		
-24,00	YASS									
-24,50										
-25,00	24,76m					20	0	W3		
-25,50										
-26,00										KİREÇTAŞI: Bej renkli, parçalı, bloklu, az-orta ayrışmış KİREÇTAŞI
-26,50						22	0	W3		
-27,00										
-27,50										
-28,00						20	8	W3		
-28,50										
-29,00										
-29,50						20	17	W3		
-30,00										
-30,50										30,00m KUYU SONU
-31,00										
-31,50										
-32,00										
-32,50										
-33,00										
-33,50										
-34,00										
-34,50										
-35,00										
-35,50										
-36,00										
-36,50										
-37,00										
-37,50										
-38,00										
-38,50										
-39,00										
-39,50										
-40,00										

ZEMİN PARAMETRELERİ / *SOIL PARAMETERS*

İNCE DANELİ *FINE GRAINED* (N_{30})		İRİ DANELİ *COARSE GRAINED* (N_{30})	
0 - 2	Çok Yumuşak / *Very Soft*	0 - 4	Çok Gevşek/*Very Loose*
3 - 4	Yumuşak / *Soft*	5 - 10	Gevşek / *Loose*
5 - 8	Orta Katı / *Medium Stiff*	11 - 30	Orta Sıkı/*Medium Dense*
9 - 15	Katı / *Stiff*	31 - 50	Sıkı / *Dense*
16 - 30	Çok Katı / *Very Stiff*	>50	Çok Sıkı / *Very Dense*
>30	Sert / *Hard*		

KAYA PARAMETRELERİ / *ROCK PARAMETERS*

KAYA KALİTE SIN. (RQD) *ROCK QUALITY DESIGNATION*		KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ (W) *WEATHERING GRADE OF ROCK*	
0 - 25	A. Çok Zayıf / *Very Poor*	W1	Taze / *Fresh*
25 - 50	B. Zayıf / *Poor*	W2	Az Ayrışmış / *Slightly Weathered*
50 - 75	C. Orta / *Fair*	W3	Orta Der. Ayrışmış/*Moderately W.*
75 - 90	D. İyi / *Good*	W4	Çok Ayrışmış / *Highly Weathered*
90-100	E. Çok İyi / *Excellent*	W5	Tamamen Ayr. / *Completely W.*

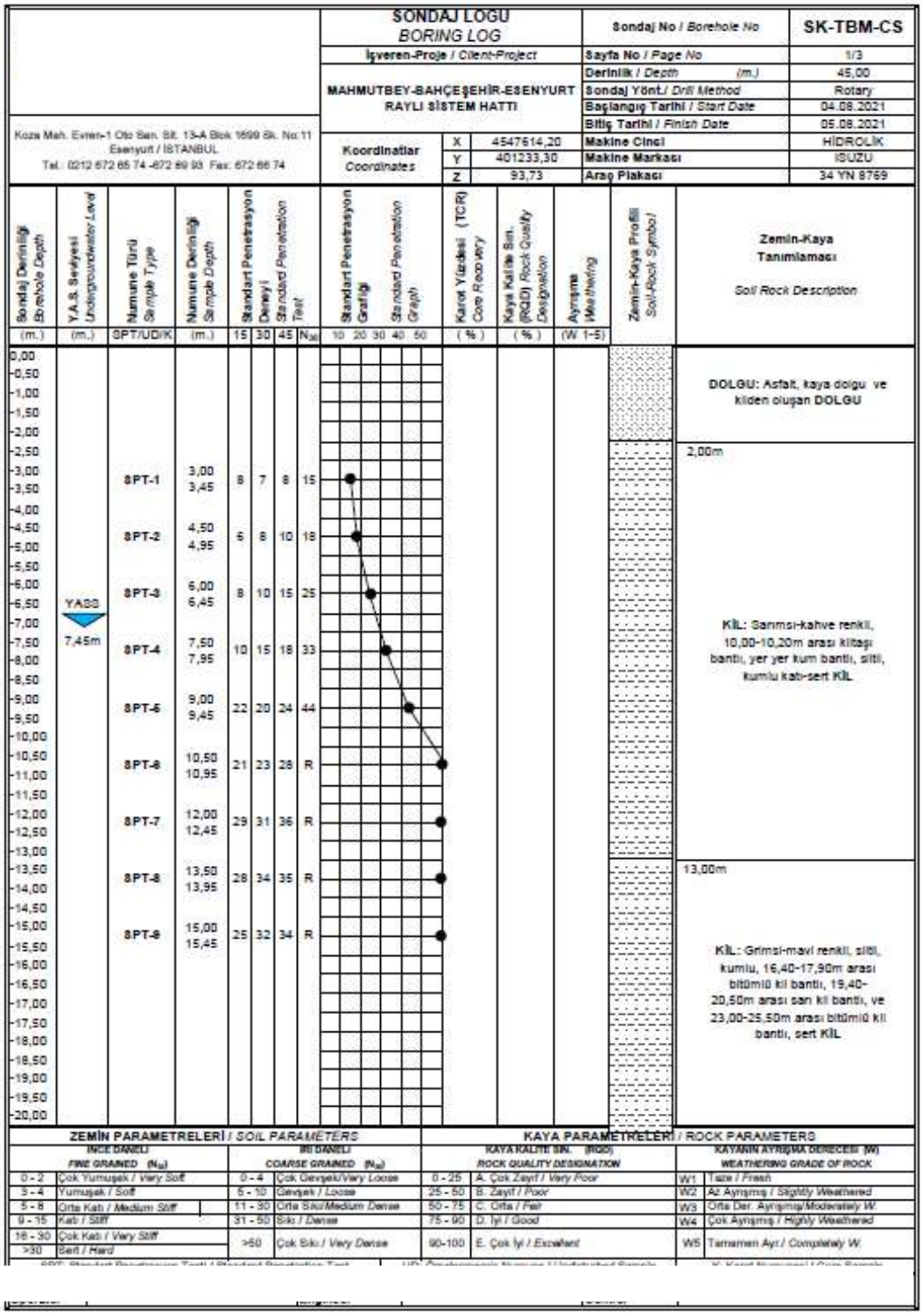
SPT: Standart Penetrasyon Testi / *Standard Penetration Test* | UD: Örselenmemiş Numune / *Undisturbed Sample* | K: Karot Numunesi / *Core Sample*

ASK-2 SANDIK-1

ASK-2 SANDIK-2

ASK-2 SANDIK-3

SK-TBM-CS NOLU SONDAJ



SONDAJ LOGU
BORING LOG

Sondaj No / *Borehole No*	SK-TBM-CS
Sayfa No / *Page No*	1/3
Derinlik / *Depth (m.)*	45,00
Sondaj Yönt./ *Drill Method*	Rotary
Başlangıç Tarihi / *Start Date*	04.08.2021
Bitiş Tarihi / *Finish Date*	05.08.2021
Makine Cinsi	HİDROLİK
Makine Markası	ISUZU
Araç Plakası	34 YN 8769

İşveren-Proje / *Client-Project*: MAHMUTBEY-BAHÇEŞEHİR-ESENYURT RAYLI SİSTEM HATTI

Koordinatlar / *Coordinates*: X 4547614,20; Y 401233,30; Z 93,73

Koza Mah. Evren-1 Oto San. Sit. 13-A Blok 1699 Sk. No:11 Esenyurt / İSTANBUL
Tel.: 0212 672 65 74 -672 69 93 Fax: 672 66 74

Sondaj Derinliği / *Borehole Depth* (m.)	Numune Türü / *Sample Type*	Numune Derinliği / *Sample Depth* (m.)	Standart Penetrasyon Deneyi / *Standard Penetration Test* 15	30	45	N_{30}	Karot Yüzdesi (TCR) / *Core Recovery* (%)	Kaya Kalite Sın. (RQD) / *Rock Quality Designation* (%)	Ayrışma / *Weathering* (W 1-5)	Zemin-Kaya Tanımlaması / *Soil Rock Description*
0,00–1,50										DOLGU: Asfalt, kaya dolgu ve kilden oluşan DOLGU
2,00–13,00										KİL: Sarımsı-kahve renkli, 10,00-10,20m arası kiltaşı bantlı, yer yer kum bantlı, siltli, kumlu katı-sert KİL
2,50–3,50	SPT-1	3,00–3,45	8	7	8	15				
4,00–5,00	SPT-2	4,50–4,95	6	8	10	18				
5,50–6,50	SPT-3	6,00–6,45	8	10	15	25				
6,50	YASS	7,45m								
7,00–8,00	SPT-4	7,50–7,95	10	15	18	33				
8,50–9,50	SPT-5	9,00–9,45	22	20	24	44				
10,00–11,00	SPT-6	10,50–10,95	21	23	28	R				
11,50–12,50	SPT-7	12,00–12,45	29	31	36	R				
13,00–14,00	SPT-8	13,50–13,95	28	34	35	R				
14,50–15,50	SPT-9	15,00–15,45	25	32	34	R				
13,00–20,00										KİL: Grimsi-mavi renkli, siltli, kumlu, 16,40-17,90m arası bitümlü kil bantlı, 19,40-20,50m arası sarı kil bantlı, ve 23,00-25,50m arası bitümlü kil bantlı, sert KİL

ZEMİN PARAMETRELERİ / *SOIL PARAMETERS*

İNCE DANELİ / *FINE GRAINED* (N_{30})		İRİ DANELİ / *COARSE GRAINED* (N_{30})	
0 - 2	Çok Yumuşak / *Very Soft*	0 - 4	Çok Gevşek/*Very Loose*
3 - 4	Yumuşak / *Soft*	5 - 10	Gevşek / *Loose*
5 - 8	Orta Katı / *Medium Stiff*	11 - 30	Orta Sıkı/*Medium Dense*
9 - 15	Katı / *Stiff*	31 - 50	Sıkı / *Dense*
16 - 30	Çok Katı / *Very Stiff*	>50	Çok Sıkı / *Very Dense*
>30	Sert / *Hard*		

KAYA PARAMETRELERİ / *ROCK PARAMETERS*

KAYA KALİTE SIN. (RQD) / *ROCK QUALITY DESIGNATION*		KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ (W) / *WEATHERING GRADE OF ROCK*	
0 - 25	A. Çok Zayıf / *Very Poor*	W1	Taze / *Fresh*
25 - 50	B. Zayıf / *Poor*	W2	Az Ayrışmış / *Slightly Weathered*
50 - 75	C. Orta / *Fair*	W3	Orta Der. Ayrışmış/*Moderately W.*
75 - 90	D. İyi / *Good*	W4	Çok Ayrışmış / *Highly Weathered*
90-100	E. Çok İyi / *Excellent*	W5	Tamamen Ayr./ *Completely W.*

	SONDAJ LOGU *BORING LOG*	Sondaj No / *Borehole No*	**SK-TBM-CS**
	İşveren-Proje / *Client-Project*	Sayfa No / *Page No*	2/3
	MAHMUTBEY-BAHÇEŞEHİR-ESENYURT RAYLI SİSTEM HATTI	Derinlik / *Depth* (m.)	45,00
		Sondaj Yönt./ *Drill Method*	Rotary
		Başlangıç Tarihi / *Start Date*	04.08.2021
		Bitiş Tarihi / *Finish Date*	05.08.2021
Koza Mah. Evren-1 Oto San. Sit. 13-A Blok 1699 Sk. No:11 Esenyurt / İSTANBUL Tel.: 0212 672 65 74 -672 69 93 Fax: 672 66 74	**Koordinatlar** *Coordinates* X: 4547614,20	Makine Cinsi	HİDROLİK
	Y: 401233,30	Makine Markası	ISUZU
	Z: 93,73	Araç Plakası	34 YN 8769

Sondaj Derinliği *Borehole Depth* (m.)	Y.A.S. Seviyesi *Underground water Level* (m.)	Numune Türü *Sample Type* SPT/UD/K	Numune Derinliği *Sample Depth* (m.)	Standart Penetrasyon Deneyi *Standard Penetration Test* 15	30	45	N_{30}	Standart Penetrasyon Grafiği *Standard Penetration Graph* 10 20 30 40 50	Karot Yüzdesi (TCR) *Core Recovery* (%)	Kaya Kalite Sın. (RQD) *Rock Quality Designation* (%)	Ayrışma *Weathering* (W 1-5)	Zemin-Kaya Profili *Soil-Rock Symbol*	Zemin-Kaya Tanımlaması *Soil Rock Description*
20,00													KİL: Grimsi-mavi renkli, siltli, kumlu, 16,40-17,90m arası bitümlü kil bantlı, 19,40-20,50m arası sarı kil bantlı, ve 23,00-25,50m arası bitümlü kil bantlı, sert KİL
20,50													
21,00													
21,50													
22,00													
22,50													
23,00													
23,50													
24,00													
24,50													
25,00													
25,50													
26,00													
26,50													
27,00													
27,50													
28,00													
28,50													
29,00													
29,50													
30,00													
30,50													
31,00													
31,50													
32,00													
32,50													
33,00													
33,50													
34,00													
34,50													
35,00													
35,50													
36,00													
36,50													
37,00													
37,50													
38,00													
38,50													
39,00													38,80m
39,50													KİL: Sarımsı-kahve renkli, 40,00-41,00m arası kumlu bantlı, kumlu, ince kum bantları görülen sert KİL
40,00													

ZEMİN PARAMETRELERİ / *SOIL PARAMETERS*

İNCE DANELİ *FINE GRAINED* (N_{30})		İRİ DANELİ *COARSE GRAINED* (N_{30})	
0 - 2	Çok Yumuşak / *Very Soft*	0 - 4	Çok Gevşek/*Very Loose*
3 - 4	Yumuşak / *Soft*	5 - 10	Gevşek / *Loose*
5 - 8	Orta Katı / *Medium Stiff*	11 - 30	Orta Sıkı/*Medium Dense*
9 - 15	Katı / *Stiff*	31 - 50	Sıkı / *Dense*
16 - 30	Çok Katı / *Very Stiff*	>50	Çok Sıkı / *Very Dense*
>30	Sert / *Hard*		

KAYA PARAMETRELERİ / *ROCK PARAMETERS*

KAYA KALİTE SIN. (RQD) *ROCK QUALITY DESIGNATION*		KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ (W) *WEATHERING GRADE OF ROCK*	
0 - 25	A. Çok Zayıf / *Very Poor*	W1	Taze / *Fresh*
25 - 50	B. Zayıf / *Poor*	W2	Az Ayrışmış / *Slightly Weathered*
50 - 75	C. Orta / *Fair*	W3	Orta Der. Ayrışmış/*Moderately W.*
75 - 90	D. İyi / *Good*	W4	Çok Ayrışmış / *Highly Weathered*
90-100	E. Çok İyi / *Excellent*	W5	Tamamen Ayrı / *Completely W.*

Operator | Engineer | Control

Koza Mah. Evren-1 Ofo San. Sit. 13-A Blok 1699 Sk. No:11 Esenyurt / İSTANBUL Tel.: 0212 672 65 74 -672 89 93 Fax: 672 66 74	**SONDAJ LOGU** *BORING LOG*	**Sondaj No** / *Borehole No*	**SK-TBM-CS**
	İşveren-Proje / *Client-Project*	**Sayfa No** / *Page No*	3/3
	MAHMUTBEY-BAHÇEŞEHİR-ESENYURT RAYLI SİSTEM HATTI	**Derinlik** / *Depth* (m.)	45,00
		Sondaj Yönt./ *Drill Method*	Rotary
		Başlangıç Tarihi / *Start Date*	04.08.2021
		Bitiş Tarihi / *Finish Date*	05.08.2021
	Koordinatlar *Coordinates* X: 4547614,20	**Makine Cinsi**	HİDROLİK
	Y: 401233,30	**Makine Markası**	ISUZU
	Z: 93,73	**Arazi Plakası**	34 YN 8769

Sondaj Derinliği *Borehole Depth* (m.)	Y.A.S. Seviyesi *Underground Water Level* (m.)	Numune Türü *Sample Type* SPT/UD/K	Numune Derinliği *Sample Depth* (m.)	Standart Penetrasyon Deneyi *Standard Penetration Test* 15 30 45 N_{30}	Standart Penetrasyon Grafiği *Standard Penetration Graph* 10 20 30 40 50	Karot Yüzdesi (TCR) *Core Recovery* (%)	Kaya Kalite Sin. (RQD) *Rock Quality Designation* (%)	Ayrışma *Weathering* (W 1-5)	Zemin-Kaya Profili *Soil-Rock Symbol*	Zemin-Kaya Tanımlaması *Soil Rock Description*
-40,00										KİL: Sarımsı-kahve renkli, 40,00-41,00m arası kumtaşı bantlı, kumlu, ince kum bantlan görülen sert KİL
-40,50										
-41,00										
-41,50										
-42,00										
-42,50										
-43,00										
-43,50										
-44,00										
-44,50										
-45,00										
-45,50										46.00m KUYU SONU
-46,00										
-46,50										
-47,00										
-47,50										
-48,00										
-48,50										
-49,00										
-49,50										
-50,00										
-50,50										
-51,00										
-51,50										
-52,00										
-52,50										
-53,00										
-53,50										
-54,00										
-54,50										
-55,00										
-55,50										
-56,00										
-56,50										
-57,00										
-57,50										
-58,00										
-58,50										
-59,00										
-59,50										
-60,00										

ZEMİN PARAMETRELERİ / *SOIL PARAMETERS*

İNCE DANELİ *FINE GRAINED* (N_{30})		İRİ DANELİ *COARSE GRAINED* (N_{30})	
0 - 2	Çok Yumuşak / *Very Soft*	0 - 4	Çok Gevşek/*Very Loose*
3 - 4	Yumuşak / *Soft*	5 - 10	Gevşek / *Loose*
5 - 8	Orta Katı / *Medium Stiff*	11 - 30	Orta Sıkı/*Medium Dense*
9 - 15	Katı / *Stiff*	31 - 50	Sıkı / *Dense*
16 - 30	Çok Katı / *Very Stiff*	>50	Çok Sıkı / *Very Dense*
>30	Sert / *Hard*		

KAYA PARAMETRELERİ / *ROCK PARAMETERS*

KAYA KALİTE SIN. (RQD) *ROCK QUALITY DESIGNATION*		KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ (W) *WEATHERING GRADE OF ROCK*	
0 - 25	A. Çok Zayıf / *Very Poor*	W1	Taze / *Fresh*
25 - 50	B. Zayıf / *Poor*	W2	Az Ayrışmış / *Slightly Weathered*
50 - 75	C. Orta / *Fair*	W3	Orta Der. Ayrışmış/*Moderately W.*
75 - 90	D. İyi / *Good*	W4	Çok Ayrışmış / *Highly Weathered*
90-100	E. Çok İyi / *Excellent*	W5	Tamamen Ayrı / *Completely W.*

SPT: Standart Penetrasyon Testi / *Standard Penetration Test* — UD: Çıkarılmamış Numune / *Undisturbed Sample* — K: Karot Numunesi / *Core Sample*

SK-TBM-CS SANDIK-1

SK-TBM-CS SANDIK-2

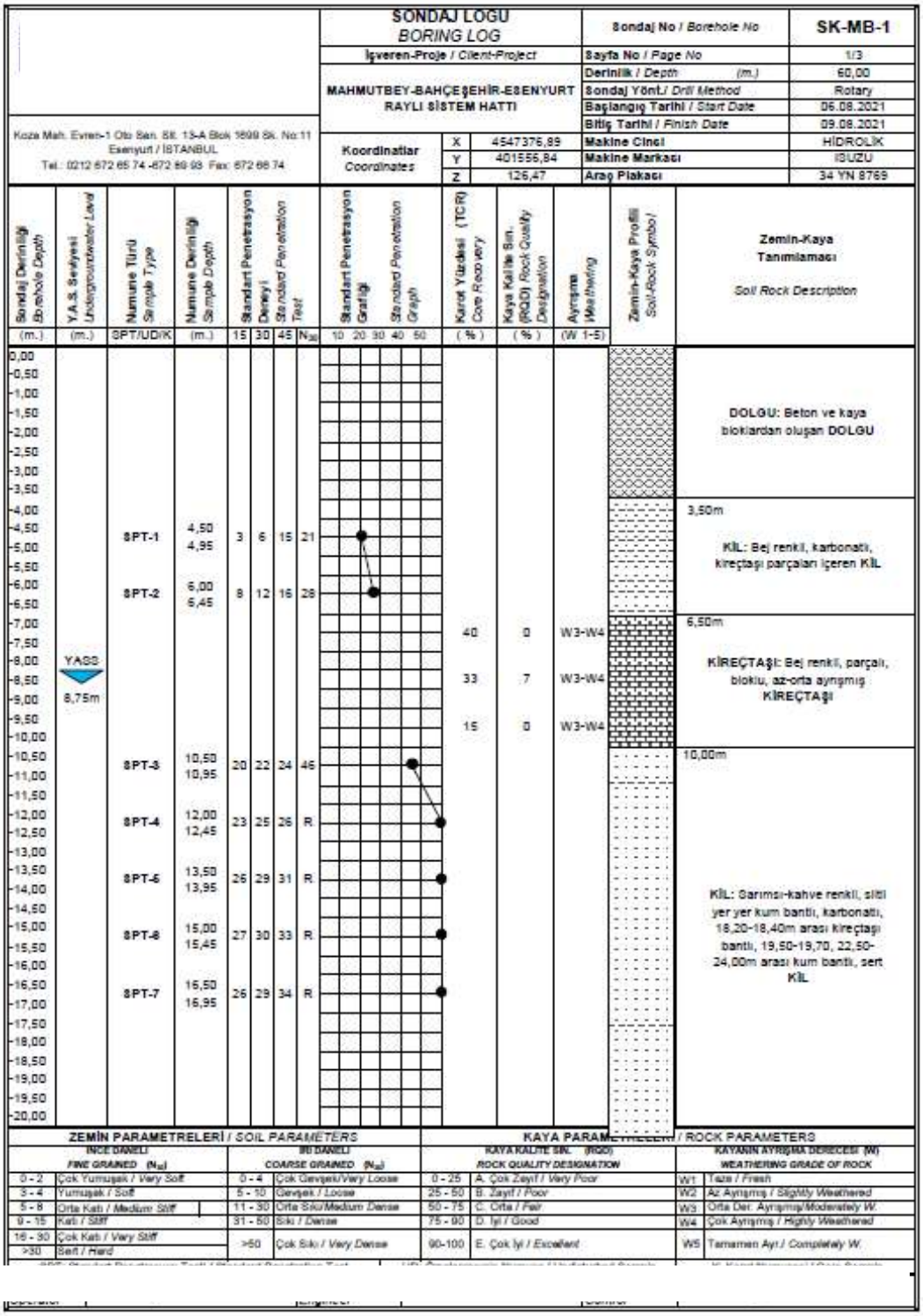
SK-TBM-CS SANDIK-3

SK-TBM-CS SANDIK-4

SK-TBM-CS SANDIK-5

SK-TBM-CS SANDIK-6

SK-MB-1 NOLU SONDAJ



SONDAJ LOGU *BORING LOG*		**Sondaj No** / *Borehole No*	**SK-MB-1**
İşveren-Proje / *Client-Project*		**Sayfa No** / *Page No*	1/3
MAHMUTBEY-BAHÇEŞEHİR-ESENYURT RAYLI SİSTEM HATTI		**Derinlik** / *Depth* (m.)	60,00
		Sondaj Yönt./ *Drill Method*	Rotary
		Başlangıç Tarihi / *Start Date*	06.08.2021
		Bitiş Tarihi / *Finish Date*	09.08.2021
Koza Mah. Evren-1 Oto San. Sit. 13-A Blok 1699 Sk. No:11 Esenyurt / İSTANBUL Tel.: 0212 672 66 74 -672 69 93 Fax: 672 66 74	**Koordinatlar** *Coordinates* X 4547376,89	**Makine Cinsi**	HİDROLİK
	Y 401556,84	**Makine Markası**	ISUZU
	Z 126,47	**Araç Plakası**	34 YN 8769

Sondaj Derinliği *Borehole Depth* (m.)	Y.A.S. Seviyesi *Undergroundwater Level* (m.)	Numune Türü *Sample Type* SPT/UD/K	Numune Derinliği *Sample Depth* (m.)	Standart Penetrasyon Deneyi *Standard Penetration Test* 15	30	45	N_{30}	Standart Penetrasyon Grafiği *Standard Penetration Graph* 10 20 30 40 50	Karot Yüzdesi (TCR) *Core Recovery* (%)	Kaya Kalite Sin. (RQD) *Rock Quality Designation* (%)	Ayrışma *Weathering* (W 1-5)	Zemin-Kaya Profili *Soil-Rock Symbol*	Zemin-Kaya Tanımlaması *Soil Rock Description*
0,00													
0,50													
1,00													
1,50													**DOLGU: Beton ve kaya bloklardan oluşan DOLGU**
2,00													
2,50													
3,00													
3,50													
4,00													3,50m
4,50		SPT-1	4,50 4,95	3	6	15	21						**KİL: Bej renkli, karbonatlı, kireçtaşı parçaları içeren KİL**
5,00													
5,50													
6,00		SPT-2	6,00 6,45	8	12	16	28						
6,50													
7,00									40	0	W3-W4		6,50m
7,50													
8,00	YASS												**KİREÇTAŞI: Bej renkli, parçalı, bloklu, az-orta ayrışmış KİREÇTAŞI**
8,50									33	7	W3-W4		
9,00	8,75m												
9,50									15	0	W3-W4		
10,00													
10,50		SPT-3	10,50 10,95	20	22	24	46						10,00m
11,00													
11,50													
12,00		SPT-4	12,00 12,45	23	25	26	R						
12,50													
13,00													
13,50		SPT-5	13,50 13,95	26	29	31	R						
14,00													**KİL: Garımsı-kahve renkli, siltli yer yer kum bantlı, karbonatlı, 18,20-18,40m arası kireçtaşı bantlı, 19,50-19,70, 22,50-24,00m arası kum bantlı, sert KİL**
14,50													
15,00		SPT-6	15,00 15,45	27	30	33	R						
15,50													
16,00													
16,50		SPT-7	16,50 16,95	26	29	34	R						
17,00													
17,50													
18,00													
18,50													
19,00													
19,50													
20,00													

ZEMİN PARAMETRELERİ / *SOIL PARAMETERS*				KAYA PARAMETRELERİ / *ROCK PARAMETERS*			
İNCE DANELİ *FINE GRAINED* (N_{30})		İRİ DANELİ *COARSE GRAINED* (N_{30})		KAYA KALİTE SİN. (RQD) *ROCK QUALITY DESIGNATION*		KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ (W) *WEATHERING GRADE OF ROCK*	
0 - 2	Çok Yumuşak / *Very Soft*	0 - 4	Çok Gevşek/*Very Loose*	0 - 25	A. Çok Zayıf / *Very Poor*	W1	Taze / *Fresh*
3 - 4	Yumuşak / *Soft*	5 - 10	Gevşek / *Loose*	25 - 50	B. Zayıf / *Poor*	W2	Az Ayrışmış / *Slightly Weathered*
5 - 8	Orta Katı / *Medium Stiff*	11 - 30	Orta Sıkı/*Medium Dense*	50 - 75	C. Orta / *Fair*	W3	Orta Der. Ayrışmış/*Moderately W.*
9 - 15	Katı / *Stiff*	31 - 50	Sıkı / *Dense*	75 - 90	D. Iyi / *Good*	W4	Çok Ayrışmış / *Highly Weathered*
16 - 30	Çok Katı / *Very Stiff*	>50	Çok Sıkı / *Very Dense*	90-100	E. Çok Iyi / *Excellent*	W5	Tamamen Ayr./ *Completely W.*
>30	Sert / *Hard*						

Koza Mah. Evren-1 Oto San. Sit. 13-A Blok 1690 Sk. No: 11 Esenyurt / İSTANBUL Tel.: 0212 672 65 74 -672 69 93 Fax: 672 66 74	**SONDAJ LOGU** *BORING LOG*	**Sondaj No** / *Borehole No*	**SK-MB-1**
	İşveren-Proje / *Client-Project*	**Sayfa No** / *Page No*	2/3
	MAHMUTBEY-BAHÇEŞEHİR-ESENYURT RAYLI SİSTEM HATTI	**Derinlik** / *Depth (m.)*	60,00
		Sondaj Yönt./ *Drill Method*	Rotary
		Başlangıç Tarihi / *Start Date*	06.08.2021
		Bitiş Tarihi / *Finish Date*	09.08.2021
	Koordinatlar *Coordinates* X: 4547376,89	**Makine Cinsi**	HİDROLİK
	Y: 401556,84	**Makine Markası**	ISUZU
	Z: 126,47	**Araç Plakası**	34 YN 8769

Sondaj Derinliği *Borehole Depth* (m.)	Y.A.S. Seviyesi *Undergroundwater Level* (m.)	Numune Türü *Sample Type* SPT/UD/K	Numune Derinliği *Sample Depth* (m.)	Standart Penetrasyon Deneyi *Standard Penetration Test* 15 30 45 N_{30}	Standart Penetrasyon Grafiği *Standard Penetration Graph* 10 20 30 40 50	Karot Yüzdesi (TCR) *Core Recovery* (%)	Kaya Kalite Sın. (RQD) *Rock Quality Designation* (%)	Ayrışma *Weathering* (W 1-5)	Zemin-Kaya Profili *Soil-Rock Symbol*	Zemin-Kaya Tanımlaması *Soil Rock Description*
-20,00										KİL: Sarımsı-kahve renkli, siltli yer yer kum bantlı, karbonatlı, 18,20-18,40m arası kireçtaşı bantlı, 19,50-19,70, 22,50-24,00m arası kum bantlı, sert KİL
-20,50										
-21,00										
-21,50										
-22,00										
-22,50										
-23,00										
-23,50										
-24,00										
-24,50										
-25,00										
-25,50										
-26,00										
-26,50										
-27,00										
-27,50										
-28,00										
-28,50										
-29,00										
-29,50										
-30,00										
-30,50										
-31,00										
-31,50										
-32,00										
-32,50										
-33,00										
-33,50										33,00m KİL: Grimsi-siyah renkli, bitumlü kil bantlı, 35,80-36,50m arası kömür laminaları gözlenen, kumlu, siltli, sert KİL
-34,00										
-34,50										
-35,00										
-35,50										
-36,00										
-36,50										
-37,00										
-37,50										
-38,00										
-38,50										
-39,00										
-39,50										
-40,00										

ZEMİN PARAMETRELERİ / *SOIL PARAMETERS*

İNCE DANELİ *FINE GRAINED* (N_{30})		İRİ DANELİ *COARSE GRAINED* (N_{30})	
0 - 2	Çok Yumuşak / *Very Soft*	0 - 4	Çok Gevşek/*Very Loose*
3 - 4	Yumuşak / *Soft*	5 - 10	Gevşek / *Loose*
5 - 8	Orta Katı / *Medium Stiff*	11 - 30	Orta Sıkı/*Medium Dense*
9 - 15	Katı / *Stiff*	31 - 50	Sıkı / *Dense*
16 - 30	Çok Katı / *Very Stiff*	>50	Çok Sıkı / *Very Dense*
>30	Sert / *Hard*		

KAYA PARAMETRELERİ / *ROCK PARAMETERS*

KAYA KALİTE SIN. (RQD) *ROCK QUALITY DESIGNATION*		KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ (W) *WEATHERING GRADE OF ROCK*	
0 - 25	A. Çok Zayıf / *Very Poor*	W1	Taze / *Fresh*
25 - 50	B. Zayıf / *Poor*	W2	Az Ayrışmış / *Slightly Weathered*
50 - 75	C. Orta / *Fair*	W3	Orta Der. Ayrışmış/*Moderately W.*
75 - 90	D. İyi / *Good*	W4	Çok Ayrışmış / *Highly Weathered*
90-100	E. Çok İyi / *Excellent*	W5	Tamamen Ayr. / *Completely W.*

SPT: Standart Penetrasyon Testi / *Standard Penetration Test* — UD: Örselenmemiş Numune / *Undisturbed Sample* — K: Karot Numunesi / *Core Sample*

SONDAJ LOGU *BORING LOG*		**Sondaj No** / *Borehole No*	**SK-MB-1**
İşveren-Proje / *Client-Project*		**Sayfa No** / *Page No*	3/3
MAHMUTBEY-BAHÇEŞEHİR-ESENYURT RAYLI SİSTEM HATTI		**Derinlik** / *Depth* (m.)	60,00
		Sondaj Yönt./ *Drill Method*	Rotary
		Başlangıç Tarihi / *Start Date*	06.08.2021
		Bitiş Tarihi / *Finish Date*	09.08.2021
Koza Mah. Evren-1 Oto San. Sit. 13-A Blok 1699 Sk. No:11 Esenyurt / İSTANBUL Tel.: 0212 672 65 74 -672 69 93 Fax: 672 66 74	**Koordinatlar** *Coordinates* X: 4547376,89	**Makine Cinsi**	HİDROLİK
	Y: 401556,84	**Makine Markası**	ISUZU
	Z: 126,47	**Araç Plakası**	34 YN 8769

Sondaj Derinliği *Borehole Depth* (m.)	Y.A.S. Seviyesi *Undergroundwater Level* (m.)	Numune Türü *Sample Type* SPT/UD/K	Numune Derinliği *Sample Depth* (m.)	Standart Penetrasyon Deneyi *Standard Penetration Test* 15	30	45	N_{30}	Standart Penetrasyon Grafiği *Standard Penetration Graph* 10 20 30 40 50	Karot Yüzdesi (TCR) *Core Recovery* (%)	Kaya Kalite Sn. (RQD) *Rock Quality Designation* (%)	Ayrışma *Weathering* (W 1-5)	Zemin-Kaya Profili *Soil-Rock Symbol*	Zemin-Kaya Tanımlaması *Soil Rock Description*
-40,00													
-40,50													
-41,00													
-41,50													
-42,00													
-42,50													
-43,00													
-43,50													
-44,00													
-44,50													
-45,00													
-45,50													
-46,00													
-46,50													
-47,00													
-47,50													
-48,00													
-48,50													
-49,00													**KİL:** Grimsi-siyah renkli, bitumlü kil bantlı, 35,80-36,50m arası kömür laminaları gözlenen, kumlu, siltli, sert **KİL**
-49,50													
-50,00													
-50,50													
-51,00													
-51,50													
-52,00													
-52,50													
-53,00													
-53,50													
-54,00													
-54,50													
-55,00													
-55,50													
-56,00													
-56,50													
-57,00													
-57,50													
-58,00													
-58,50													
-59,00													
-59,50													
-60,00													**60,00m KUYU SONU**

ZEMİN PARAMETRELERİ / *SOIL PARAMETERS*

İNCE DANELİ *FINE GRAINED* (N_{30})		İRİ DANELİ *COARSE GRAINED* (N_{30})	
0 - 2	Çok Yumuşak / *Very Soft*	0 - 4	Çok Gevşek/*Very Loose*
3 - 4	Yumuşak / *Soft*	5 - 10	Gevşek / *Loose*
5 - 8	Orta Katı / *Medium Stiff*	11 - 30	Orta Sıkı/*Medium Dense*
9 - 15	Katı / *Stiff*	31 - 50	Sıkı / *Dense*
16 - 30	Çok Katı / *Very Stiff*	>50	Çok Sıkı / *Very Dense*
>30	Sert / *Hard*		

KAYA PARAM / *ROCK PARAMETERS*

KAYA KALİTE SIN. (RQD) *ROCK QUALITY DESIGNATION*		KAYANIN AYRIŞMA DERECESİ (W) *WEATHERING GRADE OF ROCK*	
0 - 25	A. Çok Zayıf / *Very Poor*	W1	Taze / *Fresh*
25 - 50	B. Zayıf / *Poor*	W2	Az Ayrışmış / *Slightly Weathered*
50 - 75	C. Orta / *Fair*	W3	Orta Der. Ayrışmış/*Moderately W.*
75 - 90	D. İyi / *Good*	W4	Çok Ayrışmış / *Highly Weathered*
90-100	E. Çok İyi / *Excellent*	W5	Tamamen Ayr. / *Completely W.*

SK-MB-1 SANDIK-1

SK-MB-1 SANDIK-2

SK-MB-1 SANDIK-3

SK-MB-1 SANDIK-4

SK-MB-1 SANDIK-5

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

Çakır, S., Kılıç, H., (2024, Ekim 17-18). Eğimli topoğrafyalarda açılan tünellerde üçüncü boyut etkisi, In *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 19. Ulusal Konferansı.*Ankara.