

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TBM METODU İLE AÇILAN İKİZ TÜNELLERDE
MEYDANA GELEBİLECEK DEFORMASYONLARIN
SONLU ELEMANLAR METODU VE NUMERİK
HESAPLARLA TAHMİNİ**

İnş. Müh. M. Tuna DOĞRUOĞLU

FBE İnşaat Anabilim Dalı Geoteknik Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN

İstanbul, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2 Tünel ve Galerilerde Kullanılan Terimler	2
2. TÜNEL İNŞAATLARINDA MEYDANA GELEN ŞEKİL DEĞİŞTİRMELER..	3
2.1 Giriş	3
2.2 Deformasyonların Sınıflandırılması	3
2.2.1 İç Geometrik Değişimler	5
2.2.2 Dış Geometrik Değişimler	6
2.3 Yer kabuğunda Deformasyona Neden Olan Faktörler	10
2.3.1 Tektonik Hareketler	10
2.3.2 Lokal Hareketler	11
2.4 Deformasyon Ölçüm Modelleri	11
2.4.1 Statik Model	11
2.4.2 Dinamik Model	12
2.4.3 Kinematik Model	12
2.5 Tünelde Deformasyona Neden Olan Faktörler	12
2.5.1 Zeminin Jeolojik Yapısı	12
2.6 Tünel Üzerinde Yer Alan Zemin Tabakalarının Deformasyonu	13
2.6.1 Nümerik Çalışmalar	13
2.7 Deneysel Çalışmalar	21
2.8 Tünelde Beklenen Deformasyonlar	24
3. ÖLÇÜM ALETLERİ	26
3.1 Deformasyon Ölçmelerinde Jeodezik Yaklaşımın Tarihçesi	26
3.2 Tünel İnşaatlarında Güzergah Üzerinde Tünel İçi ve Yüzey İzleme	27
3.2.1 İzleme Ekipmanları	27
4. TÜNEL AÇMA METODLARI	36
4.1 TBM Tünel Açma Makineleri	36
4.1.1 TBM Gelişim Süreci	36
4.1.2 TBM Genel Özellikleri	37
4.1.3 TBM Sınıflandırılması	37
4.1.4 TBM Tipleri	39
4.2 NATM Tünel İnşa Metodu	47
4.2.1 Kazı	47
4.2.2 Ön Destekleme	47
4.2.3 Drenaj ve Su Gelirinin Bertaraf Edilmesi	49
5. DÜNYA NÜFUS ARTIŞI ve ULAŞIM	50
5.1 Otogar – Başakşehir Arası İstanbul Metro Tünelleri Projesi	51
6. TÜNEL JEOLJİSİ	54

6.1	Genel Stratigrafi	54
6.1.1	Paleozoik Temel	54
6.1.2	Kırklareli Formasyonu.....	54
6.1.3	Gürpınar Formasyonu.....	54
6.1.4	Çukurçeşme Formasyonu	55
6.1.5	Güngören Formasyonu	55
6.1.6	Bakırköy Formasyonu	55
6.1.7	Alüvyon	56
7.	ZEMİN ORTAMINDA EPB TBM İLE TÜNEL KAZISI SIRASINDA ÖRTÜ KALINLIĞI VE HACİM KAYBININ YÜZEY DEPLASMANLARINA ETKİSİ	58
7.1	Giriş	58
7.2	İncelenen Kesitlerin Özellikleri	58
7.3	Hesap Parametreleri Seçimi.....	59
7.4	Seçilen Tünel Kesitlerinin Sayısal Analizi	61
7.4.1	Kesit 1	62
7.4.2	Kesit 2	73
7.4.3	Kesit 3	85
7.4.4	Kesit 4	94
7.4.5	Kesit 5	103
7.4.6	Kesit 6	112
8.	Sonuç ve Öneriler	121
9.	Kaynaklar.....	125

SİMGE LİSTESİ

S_c	Kazı Yüksekliği
H	Zemin Üst Yüksekliği
S_{max}	Yüzeydeki En Büyük Oturma
x	Eksenden İtibaren Uzaklık
B	Merkezden İtibaren Oturma Çanağının Genişliği
V_1	Zemin Yüzeyindeki Oturma Çanağının Hacmi
U_{max}	İkinci Zemin Tabakası Yüzeyindeki Maksimum Oturma Değeri
S	Tünel Ekseninden X Mesafesindeki Yüzey Oturması
i	Eğrinin Standart Sapması ve Eğrinin Dönme Noktası
S'	En Büyük Oturma Miktarı
V_s	Hacim Kaybı Parametresi
V_L	Hacim Kaybı Oranı
E	Elastisite Modülü
G	Kayma Modülü
γ	Özgül Ağırlık
ν	Poisson Oranı
k_x	Permeabilitite Katsayısı
c	Kohezyon
ϕ	İçsel Sürtünme Açısı

KISALTMA LİSTESİ

NATM	The New Austrian Tunnel Method (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi)
TBM	Tunnel Boring Machine (Tünel Açma Makinesi)
SMP	Surface Measurement Point (Yüzey Ölçüm Noktası)
EIN	Ekstanso-Inklinometre (Düşey ve Yatay Deformasyon Ölçüm Kuyusu)
INK	Inklinometre (Yatay Deformasyon Ölçüm Kuyusu)
BMP	Building Measurement Point (Bina Ölçüm Noktası)
YASS	Yer Altı Suyu Seviyesi
EPB	Earth Pressure Balance (Arazi Basınç Dengeleme Makinesi)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 di vektörü.....	3
Şekil 2.2 a ve b	5
Şekil 2.3 Eğilme	5
Şekil 2.4 Burulma (Özhan, 1994).....	6
Şekil 2.5 Burkulma.....	6
Şekil 2.6 Y düzleminde ötelenme.....	7
Şekil 2.7 X düzleminde ötelenme.....	7
Şekil 2.8 Düşey ötelenme	8
Şekil 2.9 Karma hareket	8
Şekil 2.10 Uzama.....	9
Şekil 2.11 Tektonik hareketler.....	10
Şekil 2.12 Zemin yüzeyindeki maksimum oturma (Briggs, 1929)	14
Şekil 2.13 Zemin yüzeyindeki oturma çanağının hesabı (Beyer, 1945).....	14
Şekil 2.14 Üst yüzey oturma çanağı (Kramer, 1974)	15
Şekil 2.15 Zemin yüzeyindeki oturmaların hesabı (Aversin, 1954).....	15
Şekil 2.16 Üst oturma eğrisinin hesabı (Steinfeld, 1962).....	16
Şekil 2.17 Zemin üst yüz oturma hesabı (Szechy, 1969)	17
Şekil 2.18 Değişik zeminlerdeki birçok tünel için oturma çanağının etkili genişlik parametresinin tünel genişliğine oranı $2i/B$ ile tünel taban derinliğinden itibaren zemin yüksekliğinin tünel genişliğine oranı $(h+B/2)/B$ arasındaki bağıntı (Peck, 1969).....	18
Şekil 2.19 Gauss oturma eğrisi	20
Şekil 2.20 Tünel parametreleri (Chow, 1994).....	21
Şekil 2.21 Düşen kapak deneyi, (Terzaghi, 1936).....	21
Şekil 2.22 Tünel tavanının oturmasına bağlı olarak zeminde meydana gelen yer değişmeler (Loos ve Breth, 1949)	22
Şekil 2.23 Tünel etkiyen kuvvetler.....	24
Şekil 2.24 P1 kuvvetinin etkisiyle tünel deformasyonu	24
Şekil 2.25 P2 kuvvetinin etkisiyle tünel deformasyonu	25
Şekil 3.1 İnklinometre ölçüm seti.....	28
Şekil 3.2 İnklinometre borusu	30
Şekil 3.3 Bir Tünelin kazısı tamamlanıp diğerinin daha açılmadığı durum.....	31
Şekil 3.4 İki Tünel kazısı tamamlandıktan sonraki durum	31
Şekil 3.5 Yüzey izleme noktaları temsili yerleştirilmesi.....	32

Şekil 3.6 Yüzey izleme noktası tip kesiti	32
Şekil 3.7 Konverjans ölçümü için kullanılan şerit ekstansometre.....	34
Şekil 3.8 Konverjans kesiti ve ara mesafeler.....	34
Şekil 4.1 TBM bastırma ve tork sistemleri.....	38
Şekil 4.2 Şiltsiz TBM	40
Şekil 4.3 Tipik bir tek şiltli TBM	41
Şekil 4.4 Tipik Çift Şiltli TBM.....	42
Şekil 4.5 EPB Şilti kesit görünümü	45
Şekil 5.1 Projenin İstanbul'daki yeri	52
Şekil 5.2 Hatta incelenecek olan kısım.....	53
Şekil 7.1 Kohezyonlu zeminlerde plastisite indisine bağlı içsel sürtünme açısı değerleri. (Terzaghi, Peck and Mesri,1996).....	59
Şekil 7.2 Kesit 1 planı	62
Şekil 7.3 Kesit 1 'in olduğu kısmın düşey kesiti	63
Şekil 7.4 Kesit 1'de 1.Tünel kazısından sonra Chow (1994)' a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	64
Şekil 7.5 Kesit 1 de 1.Tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan deplasman değerlerin gerçekleşenlerle karşılaştırılması.....	66
Şekil 7.6 Kesit 1 de 1.Tünel kazısından sonra Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar.....	67
Şekil 7.7 Kesit 1 de 1.Tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanları	68
Şekil 7.8 Kesit 1'de Sadece 2.Tünel kazısından kaynaklı deplasmanların Chow (1994)' a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerinin karşılaştırılması.....	69
Şekil 7.9 Kesit 1 de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. tünel kazısından kaynaklanan deplasman değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	70
Şekil 7.10 Kesit 1 de 2.Tünel kazısından sonra Plaxis'te hesaplanan deplasmanlar.....	70
Şekil 7.11 Kesit 1 de 2.Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar	71
Şekil 7.12 Kesit 1'de gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar	71
Şekil 7.13 Kesit 2 planı	73
Şekil 7.14 Kesit 2 'nin olduğu kısmın düşey kesiti	74
Şekil 7.15 Kesit-2 'de 1. tünel kazısından sonra Chow (1994)'a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	75
Şekil 7.16 Kesit-2'de 1. tünel kazısından sonra Gauss eğrisi ile hesaplanan deplasman değerlerinin gerçekleşenlerle karşılaştırılması.....	76

Şekil 7.17 Kesit-2’de 1. tünel kazısından sonra Plaxis’te hesaplanan deplasmanlar	77
Şekil 7.18 Kesit 2’de 1. tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanları	77
Şekil 7.19 Kesit 2’de 1 tünel kazısından sonraki durumda inklinometre ölçümleri	79
Şekil 7.20 Kesit-2’de 2. tünel kazısından kaynaklı deplasmanların Chow (1994)’a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 7.21 Kesit-2’de Gauss eğrisi ile hesaplanan 2. Tünel kazısından kaynaklanan deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	81
Şekil 7.22 Kesit-2’de 2. tünel kazısından sonra Plaxis’te hesaplanan deplasmanlar	81
Şekil 7.23 Kesit 2’de 2. tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanları	82
Şekil 7.24 Kesit 2’de 2 tünelde kazı yaptıktan sonraki durumda inklinometre ölçümleri	83
Şekil 7.25 Kesit 2’de gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar	84
Şekil 7.26 Kesit-3 planı	85
Şekil 7.27 Kesit 3 ‘ün olduğu kısmın düşey kesiti	86
Şekil 7.28 Kesit 3’de 1. tünel kazısından sonra Chow (1994)’a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	87
Şekil 7.29 Kesit 3’de Gauss eğrisi ile hesaplanan Tünel kazısından kaynaklanan deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	88
Şekil 7.30 Kesit 3’de 1. tünel kazısından sonra Plaxis’te hesaplanan deplasmanlar.....	89
Şekil 7.31 Kesit 3’de 1. tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan yüzey deplasmanları	89
Şekil 7.32 Kesit-3’de 2. tünel kazısından kaynaklı deplasmanların Chow (1994)’a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerin karşılaştırılması.....	90
Şekil 7.33 Kesit-3’de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. tünel kazısından kaynaklanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	91
Şekil 7.34 Kesit-3’de 2. tünel kazısından sonra Plaxis’te hesaplanan deplasmanlar	91
Şekil 7.35 Kesit 3’de 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar	92
Şekil 7.36 Kesit 3’te gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar	92
Şekil 7.37 Kesit 4 planı	94
Şekil 7.38 Kesit 4 ‘ün olduğu kısmın dikine kesiti	95
Şekil 7.39 Kesit 4 ‘de 1. Tünel kazısından sonra Chow (1994)’a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	96
Şekil 7.40 Kesit 4 ‘de 1. tünel kazısından sonra Gauss eğrisi ile hesaplanan deplasman	

değerlerinin gerçekleşenlerle karşılaştırılması.....	97
Şekil 7.41 Kesit 4’de 1. tünel kazısından sonra Plaxis ile hesaplanan deformasyonlar	98
Şekil 7.42 Kesit 4’de 1. tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanları	98
Şekil 7.43 Kesit-4’de 2. tünel kazısından kaynaklı deplasman Chow (1994)’a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerin karşılaştırılması	99
Şekil 7.44 Kesit-4’de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. tünel kazısından kaynaklanan deplasmanların gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması	100
Şekil 7.45 Kesit-4’de 2. tünel kazısından sonra Plaxis’te hesaplanan deplasmanlar	100
Şekil 7.46 Kesit 4’de 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar	101
Şekil 7.47 Kesit 4’de gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar	102
Şekil 7.48 Kesit 5 planı	103
Şekil 7.49 Kesit 5 ‘in olduğu kısmın düşey kesiti	104
Şekil 7.50 Kesit 5’de 1. Tünel kazısından sonra Chow (1994)’a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	105
Şekil 7.51 Kesit 5’de 1. tünel kazısından sonra Gauss eğrisi ile hesaplanan deplasman değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	106
Şekil 7.52 Kesit 5’de 1. tünel kazısından sonra Plaxis’le hesaplanan deplasmanlar.....	107
Şekil 7.53 Kesit 5’de 1. tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanları	107
Şekil 7.54 Kesit-5’de sadece 2. tünel kazısından kaynaklı deplasmanların Chow (1994)’a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerin karşılaştırılması	108
Şekil 7.55 Kesit-5’de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. tünel kazısından kaynaklanan deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	109
Şekil 7.56 Kesit-5’de 2. tünel kazısından sonra Plaxis’te hesaplanan deplasmanlar	110
Şekil 7.57 Kesit 5’de 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar	110
Şekil 7.58 Kesit 5’de gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar	111
Şekil 7.59 Kesit 6 planı	112
Şekil 7.60 Kesit 6 ‘nın olduğu kısmın dikine kesiti	113
Şekil 7.61 Kesit 6’de 1. Tünel kazısından sonra Chow (1994)’a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	114
Şekil 7.62 Kesit 6’de 1. tünel kazısından sonra Gauss eğrisi ile hesaplanan deplasman değerlerin gerçekleşenlerle karşılaştırılması.....	115

Şekil 7.63 Kesit 6’de 1. tünel kazısından sonra Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar.....	116
Şekil 7.64 Kesit-6’de 1. tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanları	116
Şekil 7.65 Kesit-6’da 2. tünel kazısından kaynaklı deplasmanların Chow (1994)’a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerinin karşılaştırılması.....	117
Şekil 7.66 Kesit-6’de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. Tünel kazısından kaynaklanan deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	118
Şekil 7.67 Kesit-6’de 2. tünel kazısından sonra Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar	118
Şekil 7.68 Kesit 6’de 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar	119
Şekil 7.69 Kesit 6’da gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar	119

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Geometrik değişimler (Özhan, 1994).....	4
Çizelge 4.1 TBM sınıflandırılması	38
Çizelge 5.1 Proje bilgileri.....	52
Çizelge 6.1 İstanbul'un stratigrafisi (Yıldırım, 2003).....	57
Çizelge 7.1 Seçilen kesitlerin genel özellikleri	58
Çizelge 7.2 Eu değerleri (Yıldırım, 2004).....	60
Çizelge 7.3 Granüler zeminde Es değerleri (AASHTO, 2003).....	61
Çizelge 7.4 YK-05 Sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları	62
Çizelge 7.5 Nümerik hesap parametreleri	63
Çizelge 7.6 Kesit 1'de 1. tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan hacim kaybına bağlı deformasyonlar	65
Çizelge 7.7 Plaxis programında Kesit-1 için kullanılan parametreler.....	66
Çizelge 7.8 Kesit 1'de Gauss Eğrisi ile hesaplanan sadece 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar.....	69
Çizelge 7.9 YK-05 Sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları	73
Çizelge 7.10 Nümerik hesap parametreleri	74
Çizelge 7.11 Kesit 2'de 1. tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar	75
Çizelge 7.12 Plaxis programında Kesit-2 için kullanılan parametreler Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	
Çizelge 7.13 Kesit 2'de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar.....	80
Çizelge 7.14 BH7-DT sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları.....	85
Çizelge 7.15 Nümerik hesap parametreleri	86
Çizelge 7.16 Kesit 3'de 1. Tünelden sonra Chow (1994)'a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması.....	87
Çizelge 7.17 Plaxis programında Kesit 3 için kullanılan parametreler	88
Çizelge 7.18 Kesit 3'de 2. Tünel kazısından sonra hacim kaybına bağlı deplasmanlar.....	90
Çizelge 7.19 BCP-02 Sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları.....	95
Çizelge 7.20 Nümerik hesap parametreleri	96
Çizelge 7.21 Kesit 4'de 1. Tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar	96
Çizelge 7.22 Plaxis programında Kesit 4 için kullanılan parametreler	97
Çizelge 7.23 Kesit 4'de Gauss Eğrisi ile hesaplanan sadece 2. tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar.....	99

Çizelge 7.24 YK-02 Sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları	103
Çizelge 7.25 Nümerik hesap parametreleri	104
Çizelge 7.26 Kesit 5’de 1. Tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar	105
Çizelge 7.27 Plaxis programında Kesit 5 için kullanılan parametreler	106
Çizelge 7.28 Kesit 5’de Gauss Eğrisi ile hesaplanan sadece 2. tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar	109
Çizelge 7.29 BH5-DT Sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları	113
Çizelge 7.30 Nümerik hesap parametreleri	114
Çizelge 7.31 Kesit 6’de 1. Tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar	114
Çizelge 7.32 Plaxis programında Kesit 6 için kullanılan parametreler	115
Çizelge 7.33 Kesit 6’de 2. tünel kazısından sonra hacim kaybına bağlı deformasyonlar	117
Çizelge 8.1 Kesitlerin toplu sonuçları	122

ÖNSÖZ

Tezin yürütülmesi sırasında tüm iyi niyetiyle bana her türlü yardımı sağlayan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN'a, deneyimlerini ve bilgilerini benden esirgemeyen Sayın Prof Dr. Sönmez YILDIRIM'a ve Doç. Dr. Mehmet BERİLGEN'e, Gülermak-Doğuş adi ortaklığı yönetim kadrosu ve tüm çalışanlarına, tüneller konusundaki engin bilgilerini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Ergin ARIOĞLU'na, tez süresi boyunca sonsuz manevi desteklerini aldığım müstakbel eşim İnş. Müh. Gökçe SÖNMEZ'e ve tüm Aileme teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Bu çalışmada zemin ortamlarında açılan şehir içi tünellerde oluşan zemin yer değiştirmeleri ve düşey deplasmanları incelenmiştir. Farklı örtü kalınlıklarına sahip ikiz tüneller üzerinde oluşan yüzey deplasmanlarının dağılımı değişik sayısal analiz yöntemleri ile değerlendirilmiştir.

Araştırmada İstanbul'da inşa edilmekte olan Otogar-Bağcılar metro hattının Otogar-Kirazlı kesiminde yer alan 6 adet kesit üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kesitlerin seçiminde örtü kalınlıklarının farklı olmasına ve zemin yüzeyinde yeterinde ölçüm noktası tesis edilmiş olmasında dikkat edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında tünellerin açılmasından dolayı oluşacak yüzey deplasmanlarını değerlendirmek için üç farklı yaklaşımdan yararlanılmıştır. İlk olarak Chow(1994) tarafından geliştirilen ve tünel kazısı ile oluşan zemin kaybını tünel doğrultusu boyunca bir çizgisel yük olarak kabul ederek meydana gelen düşey yüzey deplasmanları veren bağıntı kullanılarak yüzey deplasman dağılımları elde edilmiştir. İkinci yöntem olarak araştırmacıların kullandığı ve Gauss oturma eğrisi olarak bilinen yöntem tünel kazısı sırasında oluşan hacim kaybı oranları için farklı değerler kabul edilerek kullanılmış ve yüzey oturmaları dağılımı elde edilmiştir. Üçüncü olarak ise sonlu elemanlar yöntemi ile kullanılan PLAXIS isimli programdan yararlanılarak incelenen kesitler modellenmiş ve zeminde oluşan deplasmanlar hesaplanmıştır. Kullanılan üç yöntem ile hesaplanan yüzey deplasmanları birbirleri ile ve yerinde yapılan ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda örtü kalınlığının 16-34 metre arasında olduğu dört adet kesitlerde maksimum 8-30mm arasında yüzey deplasmanlarının, gerekli parametrelerin doğru seçilmesi durumunda, yararlanılan üç değerlendirme yöntemi ile de gerçeğe oldukça yakın olarak hesaplanabileceği ancak Plaxis ile daha iyi tanımlanmış çözümler elde edilebileceği saptanmıştır. Örtü kalınlığının yaklaşık 7 tünel çapı (47m) olduğu kesitte ve tünel tavanında 2m kalınlığında bir grovak tabakasının yer aldığı diğer kesitte oluşan ihmal edilebilir mertebelerdeki yüzey deplasmanlarını (1-2mm) ise kullanılan hesap yöntemleri ile tam olarak tanımlamak mümkün olmamıştır.

Anahtar Kelimeler: EPB TBM, TBM ile tünel açma, zemin koşullarında tünel kazısı, oturma, deplasman, deformasyon

ABSTRACT

In this study the soil displacements and surface settlements caused by tunneling operations in residential areas are investigated. The surface settlement profiles due to twin tunnels opened at varying depths are evaluated utilizing different numerical analysis methods.

Within the scope of the investigation analyses are performed using 6 different sections taken along the Otogar-Bağcılar metro Project which currently under construction. In choosing these typical sections attention is paid to include various overburden depths and to have sufficient number of surface settlement measurement points in the close vicinity.

In order to evaluate the surface soil displacements expected to occur due to opening of tunnels three different approaches are used. Firstly, the relationship developed by Chow(1994) in which the soil loss due to tunnel excavation is modelled as a line load acting at the center along the tunnel and soil displacements caused are calculated is used. Secondly, the so called Gauss Settlements Curve approach developed by investigators such as Peck(1969), O'Reilly and New(1982), Fujita(1989) and New O'Reilly(1991) is used assuming different volume loss ratio values to obtain surface settlement profiles. As a third approach finite element analyses are carried out using the computer code called PLAXIS and soil displacements expected to occur due to Tunnel excavations are determined. The surface settlements calculated using three different methods are compared with each other the actual values measured in the field.

As a result of the calculations are carried out on four of the sections studied, it is determined that surface settlements in the order of 8-30 mm maximum values caused by Tunnel excavations opened at overburden depths varying between 16-34m can be closely estimated with all three methods used provided that appropriate values are used for relevant parameters. Out of the three methods used the finite element solutions are found to be more appropriate to properly define the soil displacement fields. As far as the other two sections studied, one of which had an overburden thickness of more than 7 times the Tunnel diameter (47m) and the other included a 2 m thick rock layer at the Tunnel ceiling, the surface settlements were very small (maximum 1-2mm) and could not be properly defined with any of the methods used.

Key Words: EPB TBM, Tunneling with TBM, tunnel boring in soil conditions, deformation

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Maliyeti yüksek ve kapsamı büyük olan mühendislik yapılarında (Köprü, baraj, metro, kule vs.) olası bir risk faktörünü ortadan kaldırmak için deformasyonların tespiti zorunludur. Çünkü ölçü sonuçlarından faydalanılarak yapılan yorumlara bağlı olarak hareketin yönü, kaynağı ve büyüklüğü hakkında bilgi edinilir ve gerekli önlemler alınır.

Bu çalışmada amaç günümüzde yerleşimin çok olduğu bölgelerde tünel kazımı için tercih edilen modern tünel açma metodu olan TBM (Tam cephe tünel açma makinesi) ile tünel kazımı sırasında yüzeyde meydana gelebilecek deformasyonların hesaplanması ve Otogar Bağcılar Hattı metro inşaatında yapılan deformasyon ölçme çalışmaları hakkında genel bir bilgi sunmaktır.

Tünel açıldığı zaman başlıca iki nedenden dolayı yüzeyde oturmalar meydana gelmektedir.

- Açılan tünel bir drenaj kanalı gibi çalışmakta ve yeraltı su seviyesinde oluşan bu değişiklik zeminde su kaybına yol açmaktadır. Bu durum özellikle killi formasyonlarda konsolidasyon oturmalarıyla son bulmaktadır.
- Tüneldeki kazı sonucu tünel çevresindeki zemin kaybı tünel kazısında uygulanan kazı destekleme yöntemine, tüneli çevreleyen zeminlerin jeomekanik büyüklüklerine ve tünel geometrisine (çap, derinlik) bağlı olarak yüzeye yansımaktadır.

Tünel kazısı nedeniyle oluşan çökme profili “Gauss Hata Fonksiyonu-Normal Dağılım Eğrisi”ne uymaktadır (Birön ve Arıoğlu, 1980). Bu eğrinin başlıca iki büyüklüğü söz konusudur. Bunlar maksimum yüzey oturması “Smax” ve dönüm noktasının tünel eksenine olan uzaklığı “i” dir. Yapı hasarları üzerinde etkili olan farklı oturma ve uzama (çekme), kısalma (basınç) deformasyonu büyüklükleri de yine yukarıda sıralanan iki parametrenin birer fonksiyonudur (Arıoğlu ve Yüksel, 1984).

Bu çalışmada Otogar-Bağcılar Metro Tüneli kazısında birkaç farklı ölçüm kesitindeki yüzey oturma profilleri Gauss Hata Fonksiyonu-Normal Dağılım Eğrisi ve Plaxis adlı paket program ile belirlenecektir. Hesaplanan sonuçlar bu bölgede yapılan Geoteknik ve Jeodezik ölçümler ile karşılaştırılacaktır.

Bu deformasyonlar insan hayatının güvenliği ile doğrudan ilgili olduğu için; bunların yapılara zarar verecek düzeyde olup olmadıkları belirlenecektir.

1.2 Tünel ve Galerilerde Kullanılan Terimler

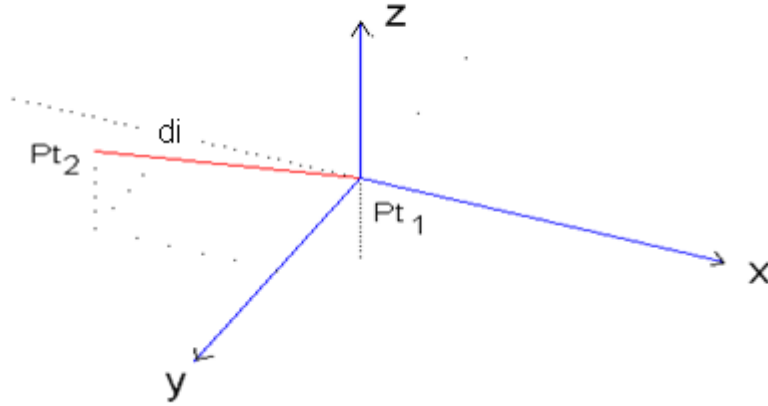
Yerkabuğu içinde yüzeyden itibaren belirli derinliklerde inşa edilen tünel ve galerilerde kullanılan çeşitli terimler bulunmaktadır. Yer kabuğunda düşey olarak gerçekleştirilen kazılar “Baca” – “Şaft” – “Kuyu”, yukarı eğimli olanlara “Baş yukarı”, aşağıya eğimli olanlara “Baş aşağı”, normal yükseklik ve genişlikten fazla kazılmış kısımlar “Oda” terimleriyle belirtilirler. Açılan tünel veya galerinin tavanından yüzeye kadar olan kısma “Örtü veya et kalınlığı”, kazı sırasında çıkarılan malzemeye “Pasa” adı verilir.

2. TÜNEL İNŞAATLARINDA MEYDANA GELEN ŞEKİL DEĞİŞTİRMELER

2.1 Giriş

Her türlü mühendislik yapılarında (köprü, baraj, tünel, yüksek binalar, karayolları, kuleler) ve yer kabuğu üzerinde geçici veya kalıcı etkiler altında, zamana bağlı değişimler meydana gelebilir bunlara genel olarak DEFORMASYON adı verilir. Bu değişimler yapılarda ve yeryüzünde çökme, kayma, burkulma ve benzeri şekillerde görülebilir. Bu değişimlerin izlenmesi ölçülmesi ve zamanla ilişkisinin sürekli olarak izlenmesi insan hayatının güvenliği ile doğrudan ilgilidir.

Başka bir ifade ile; bazı kuvvetlerin etkideği bir bölgede seçilen karakteristik noktanın t_1 ve t_2 zamanlarında konumlarının belirlendiğini varsayalım. t_1 zamanındaki konumu P_{t_1} , t_2 zamanındaki konumu ise P_{t_2} oluyorsa ve aralarındaki d_i uzaklığının istatistiksel metotlarla sıfırdan farklı olduğu kanıtlanmışsa, d_i uzunluk vektörüne deformasyon denir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 d_i vektörü

t_1 anında P noktasının koordinatları sıfırken t_2 anında bir takım kuvvetlerin etkisi altında koordinatlarının değiştiği gözlemlenmektedir.

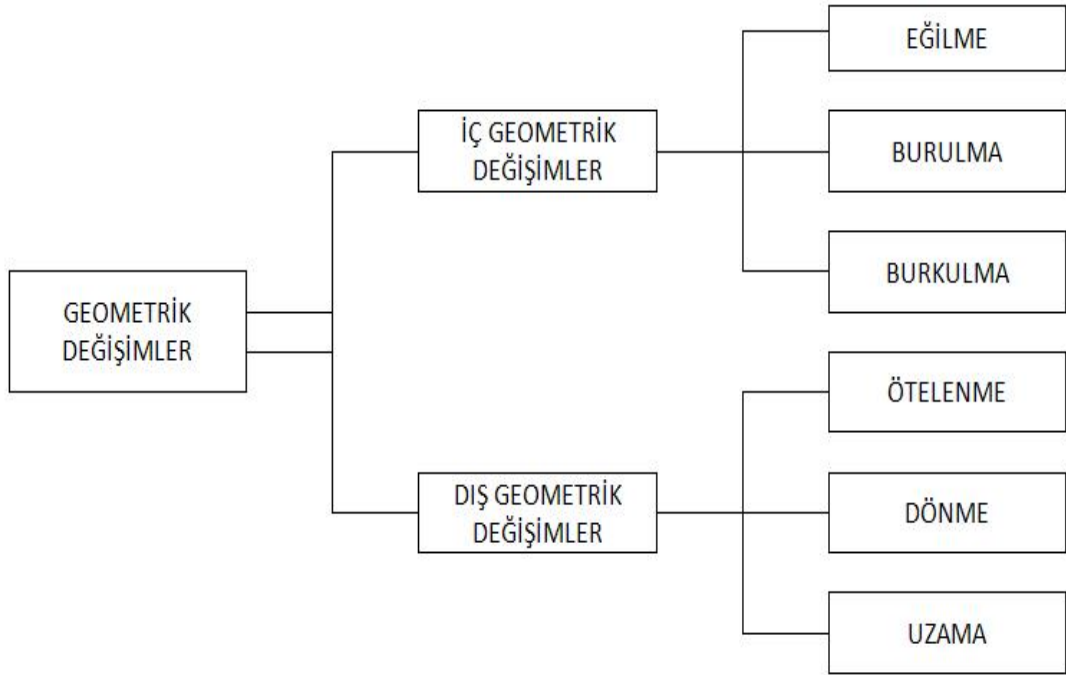
2.2 Deformasyonların Sınıflandırılması

Deformasyonlar 3 şekilde ele alınabilir bunlar;

1. Elastik deformasyonlar,
2. Plastik deformasyonlar,
3. Elasto-plastik deformasyonlar.

Cisme etki eden kuvvetin ortadan kalkması durumunda cismin tekrar eski haline dönme durumuna Elastik (geçici) deformasyon denir. Kuvvet ortadan kalksa dahi cisim eski haline dönemiyorsa bu duruma Plastik (kalıcı) deformasyon denir. Kuvvet ortadan kalktıktan sonra cisim eski durumunu almaya çalışıyor fakat bunu başaramıyorsa bu duruma Elasto-plastik deformasyonlar denir.

Bir de geometrik değişimin yapısına göre meydana gelen deformasyon şekilleri vardır. Bunlar ötelenme, dönme, uzama, eğilme, burkulma ve burulma şeklinde olabilirler (Çizelge 2.1).

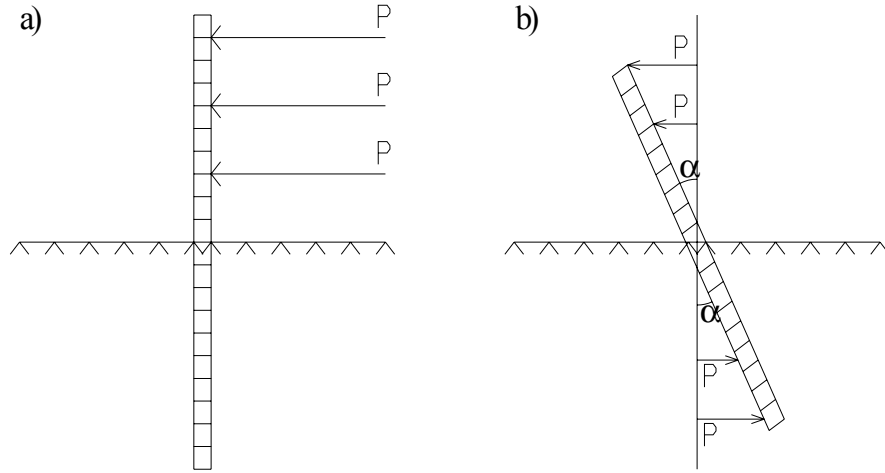


Çizelge 2.1 Geometrik değişimler (Özhan, 1994)

2.2.1 İç Geometrik Değişimler

2.2.1.1 Eğilme

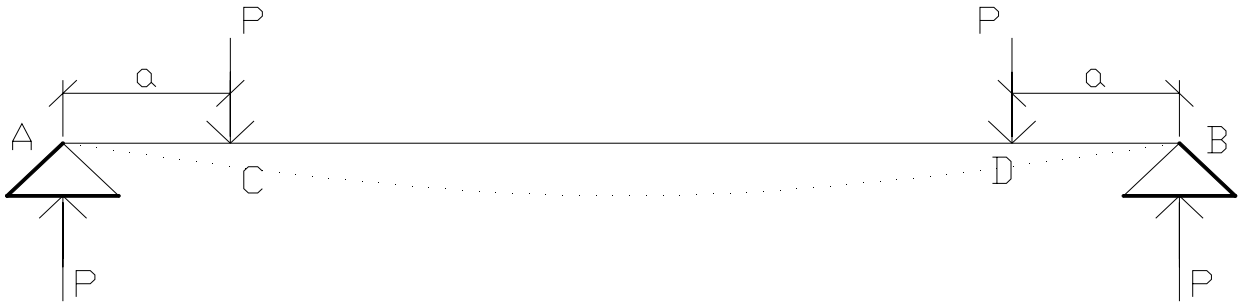
Bir cisme yalnızca eğilme momenti kuvveti etki ediyorsa, cisimde eğilme meydana gelir.



Şekil 2.2 a ve b

Şekil 2.2.a' da cismin kuvvet etkisine maruz kalmadan önceki durumu ve moment etkisi oluşturacak kuvvetin cisme nasıl etkiyeceği görülmektedir. Cismin kuvvetin etkisi ile yapmış olduğu " α " açısı kadar eğilme görülmektedir.

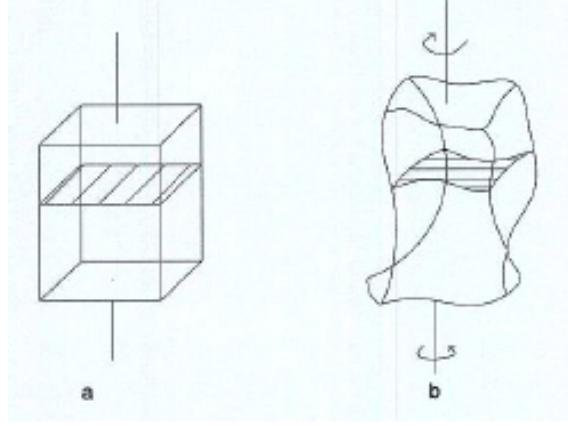
Bir cisme Kesme kuvveti ile moment kuvveti aynı anda etkirse cisimde Basit Eğilme görülür. Bunlara ilaveten normal kuvvet de etkirse bileşik eğilme görülür. Şekil 2.3'teki cisme C-D aralığında sadece moment etki ederken; D-B ve A-C aralığında moment ve kesme kuvvetleri birlikte etkimekte ve basit eğilme meydana gelmektedir.



Şekil 2.3 Eğilme

2.2.1.2 Burulma

Cismin değişik moment kuvvetlerinin ve yüklerinin etkisi altında düzgün geometrik bir şekilden düzensiz bir şekle dönüşme durumudur.

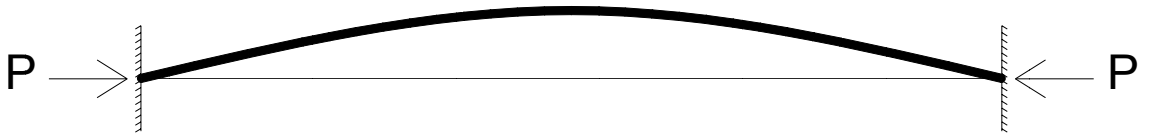


Şekil 2.4 Burulma (Özhan, 1994)

Şekil 2.4a' da düzgün kesitli geometrik yapıya sahip bir cisim ve Şekil2.4b' de düzensiz kesite sahip bir şekil oluşumu görülmektedir.

2.2.1.3 Burkulma

Boyu kesitine göre büyük olan narin çubuklarda doğru eksenli çubuk doğrusal durumu değiştirerek eğrisel bir form alır. Bu olaya burkulma denir. Şekil 2.5' de P kuvvetinin etkisiyle cisimde meydana gelen burkulma görülmektedir.



Şekil 2.5 Burkulma

2.2.2 Dış Geometrik Değişimler

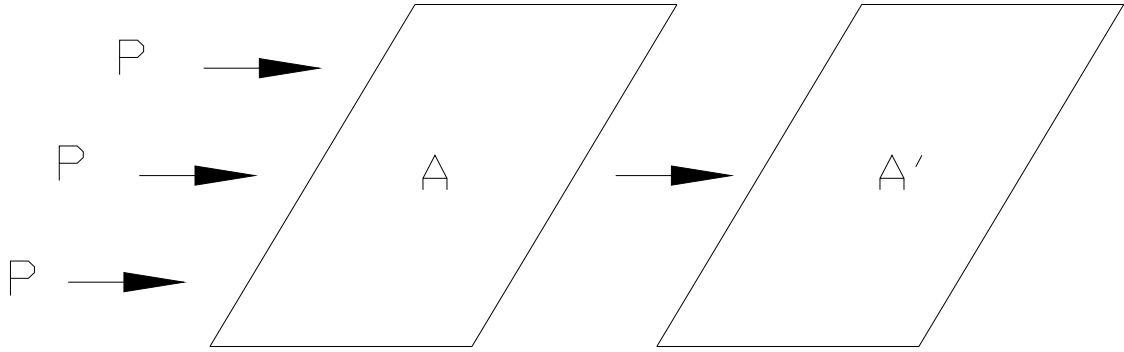
2.2.2.1 Ötelenme

Bir cisim bir kuvvetin etkisi altında yer değiştiriyor ise buna ötelenme denir.

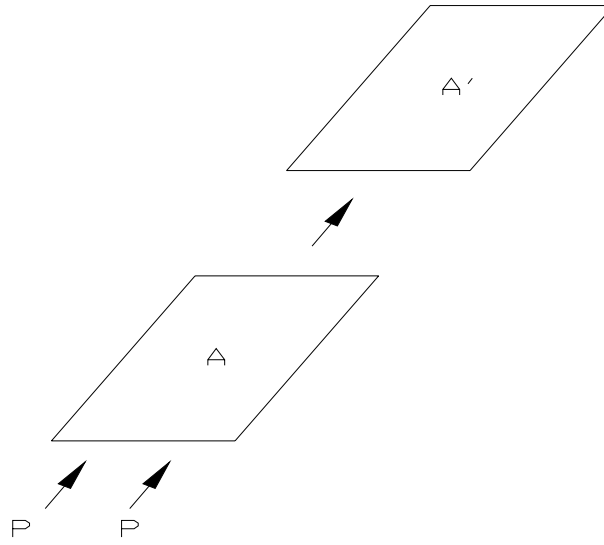
Hareket yatay kuvvetlerin etkisiyle yatay düzlemde yapılıyorsa yatay ötelenme denir.

Yatay ötelenme düzenli bir harekettir. Cismin her noktası aynı miktara ötelenir. Yani cisme ait her noktanın x' i veya y' si ya da her ikisi birden eşit miktarda hareket ederler. Burada bir

yüzeyin şekli korunarak, başka bir yere ötelenmesi söz konusudur.



Şekil 2.6 Y düzleminde ötelenme

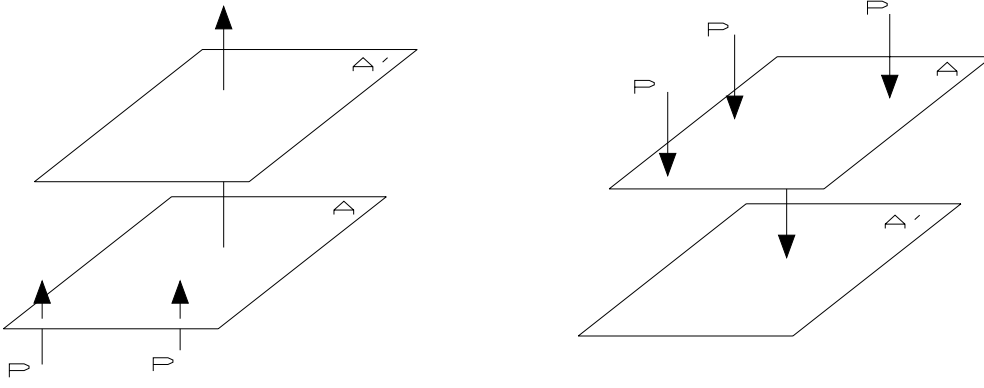


Şekil 2.7 X düzleminde ötelenme

Şekil 2.6' de cisim P kuvvetinin etkisiyle X-Y düzleminde Y doğrultusunda hareket etmiştir. Şekil 2.7' de ise cisim P kuvvetinin etkisiyle X-Y düzleminde X doğrultusunda hareket etmiştir.

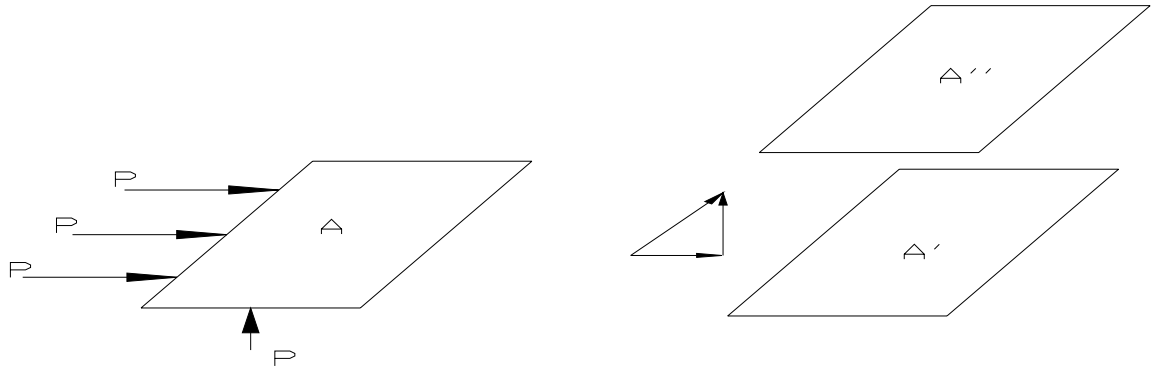
Ötelenme, cisme etkiyen itme kuvvetinin sürtünme direncinden büyük olması durumunda söz konusu olabilir.

Yapının oturduğu zemin, düşey yüklerin tamamını karşılayacak kuvvette değilse düşey ötelenme meydana gelir. Düşey ötelenme aşağı veya yukarı yönde olabilir. Şekil 2.8 'de cismin düşey ötelenmesi görülmektedir.



Şekil 2.8 Düşey ötelenme

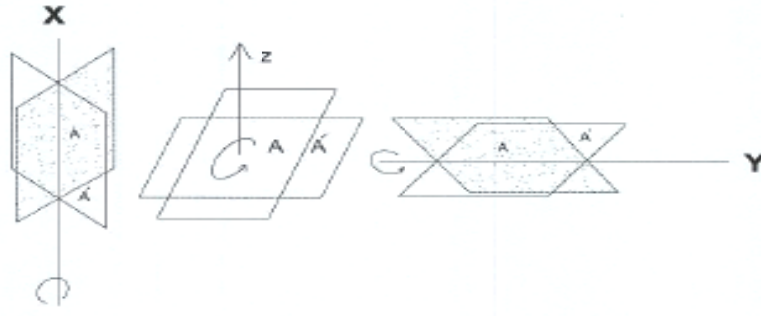
Eğer hareket hem düşey hem de yatay yönde meydana geliyorsa bu tür bir ötelenmeye karma hareket denir. Karma hareket cisme etkiyen kuvvetlerin bileşkesi yönünde meydana gelir. Şekil 2.9 'da düşey ve yatay kuvvetlerin etkisiyle meydana gelen karma hareket görülmektedir. Burada A cismi yatay kuvvetlerin etkisiyle A' konumuna; düşey kuvvetlerin etkisiyle A'' konumuna gelmektedir.



Şekil 2.9 Karma hareket

2.2.2.2 Dönme

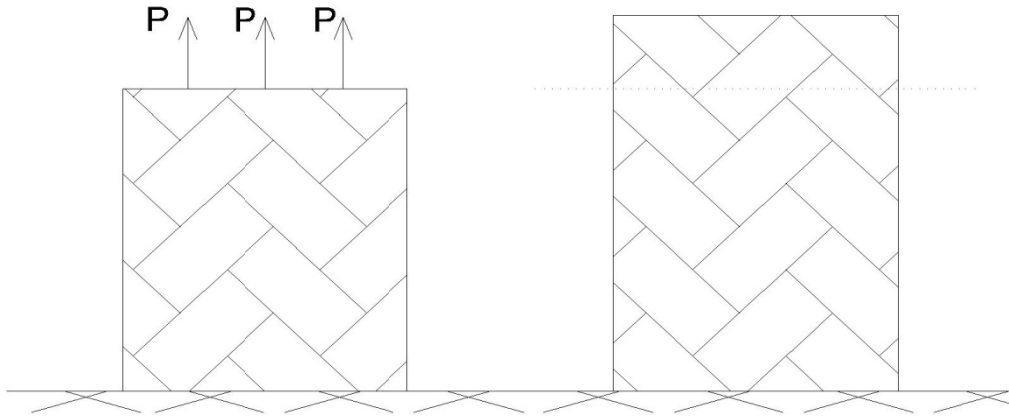
Döndürme momenti kuvvetinin etkisi ile cisimde meydana gelen dönel harekettir. Cismin yatay düzlemde, düşey eksen etrafında yaptığı harekete yatay dönme denir. Cismin düşey düzlemde, yatay eksen etrafında yaptığı harekete de düşey dönme denir.



Şekil 2.9 Dönme

2.2.2.3 Uzama

Çekme veya basınç kuvveti etkisi altında cismin boyunda meydana gelen değişimlere uzama veya kısalma denir. Bunu yanında sıcaklığın cisimlerde genleşme veya büzülme yol açtığından da söz edilebilir. Şekil 2.10'da P kuvvetinin etkisiyle cisimde meydana gelen uzama görülmektedir.



Şekil 2.10 Uzama

Deformasyonları türlerine göre de iki gruba ayırmak mümkündür:

- Hassas ölçülerle fark edilebilen ve yapıda tehlike yaratmayan deformasyonlara **Önemsiz Deformasyonlar** denir.
- Yapıda ve yer kabuğunda zaman içerisinde, fiziksel olarak gözle görülemeyecek büyüklükte ve sürekli olarak gelişen deformasyonlar çok tehlikeli olabilirler. Bu tür deformasyonlara **Önemli Deformasyonlar** denir.

Bütün bunlara ek olarak, cisim üzerinde meydana gelen düzensiz deformasyonlar da mevcuttur. Akarsuların zeminde oluşturduğu aşınmalar sonucu oyulmalar, meteorolojik ve jeolojik olaylardan dolayı oluşan çatlama, parçalanma gibi yüzey bozulmaları bu gruba örnek

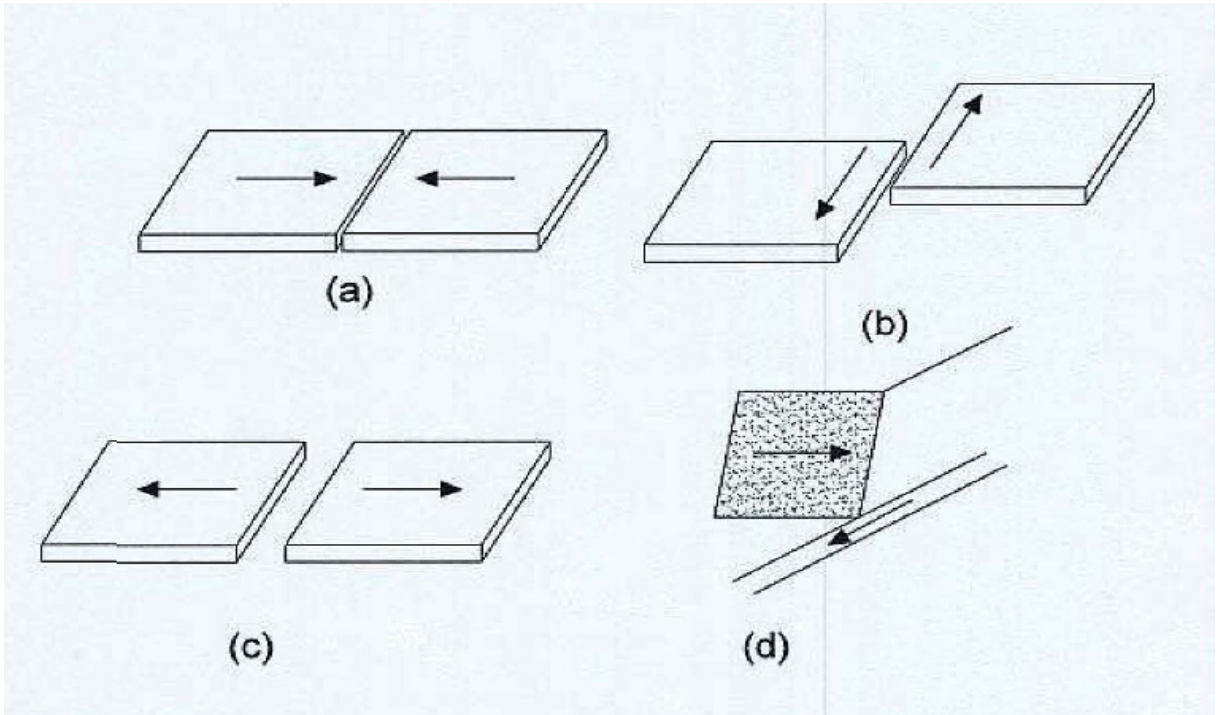
olarak verilebilir.

2.3 Yer kabuğunda Deformasyona Neden Olan Faktörler

Çok çeşitli olan bu hareketler içinde, oluşumu can kaybına ve çevre felaketlerine neden olabilecek nitelikler araştırılmıştır. Bu hareketlerin irdelenmesi onların oluşum mekanizmalarını kavramak ve böylece isabetli tahminlerde bulunarak tehlikeyi önleyici tedbirler almak bakımından çok gerekli ve önemlidir. Araştırılması gereken etkenler Tektonik ve Lokal Hareketler olarak sınıflandırılabilir.

2.3.1 Tektonik Hareketler

Yerkabuğu hareketli bir takım plakalardan oluşmaktadır. Tektonik plaka hareketleri Şekil 2.11'de görülmektedir. Şekil 2.11.a' da plakalar birbirinden uzaklaşmaktadır. Bu tür bir hareket şiddetli bir sarsıntıya sebep olmakla birlikte, Şekil 2.11.b' de plakaların yan yana sürtünmeleri sonucu zayıf noktada oluşan çatlak oyuncu ilerleyen kırılmalar meydana gelmektedir. Şekil 2.11.c' de karasal plakalar arasındaki yaklaşma çarpma işlemi ile sonuçlanmakta ve büyük sarsıntıya neden olmaktadır. Şekil 2.11.d' de ise okyanus plakalarının ara plakalarının altına kayması görülmektedir. Bu durumda zemin üzerinde büyük çatlaklar meydana gelmektedir. Bütün bu tektonik hareketler aslında dünya yüzeyi oluşumunun henüz tamamlanmadığının bir göstergesidir.



Şekil 2.11 Tektonik hareketler

2.3.2 Lokal Hareketler

Toprak kayması bu tür hareketlerde karakteristik bir örnek oluşturur. Çoğu kez bu durum dış etkiler altındaki bir tabakanın altında bulunan ve dış etkilerden etkilenmeyen tabakadan ayrılması şeklinde oluşur.

Bununla birlikte, aşağıdaki etkenler de deformasyona neden olmaktadır.

- Yer altı zenginliklerinin alınması halinde meydana gelen hareketler. Örneğin, kapalı maden işletmesinde açılan galerinin çökmesi. Bu gibi hareketlerde çoğu zaman jeolojik yapının dengesi bozulur. Bu denge yeniden sağlanıncaya kadar hareket devam eder.
- Okyanuslarda, gel git olayının etkisiyle okyanus tabanında oluşan ve sarsıntıya yol açan hareketler.
- Güneş ışınları, ısı değişiklikleri, fırtınalar gibi bazı meteorolojik etkilerden doğan hareketler.
- Yapıya etki eden dış yükler.
- Yapım, proje ve işletme hatalarından kaynaklanan hareketler.
- Trafiğin yoğunluğu veya makine tesislerinin meydana getirdiği küçük çaptaki sarsıntılar sonucu temelde oluşan gevşemeler.
- Büyük kentleşme sonucu yerkabuğuna aşırı yüklemeye neden olan hareketler.

2.4 Deformasyon Ölçüm Modelleri

Deformasyonlar, beklenen hareket tarzına, yerel koşullara bağlı olarak belirlenen ölçme yöntemleri ile tespit edilirler. Ölçme yöntemleri de problemin şekline ve uygulama yapılacak bölgenin büyüklüğüne göre seçilir. Bütün bunlar için farklı modeller geliştirilmiştir. Bu modeller aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- Statik model
- Dinamik model
- Kinematik model

2.4.1 Statik Model

Bu modelde, deformasyon ölçümü yapılacak bölgede ölçümler tamamlanıncaya kadar karakteristik noktaların sabit kaldığı kabul edilir. Yani deformasyonun ölçüm esnasında

zamandan ve etkiyen kuvvetlerden bağımsız olarak belirlenmesi ilkesine dayanır. Geometrik değişimlerin başlangıç zamanı ölçümler tamamlandıktan sonra kabul edilir ve belli periyodlarla yenileme ölçümleri yapılır. Deformasyon analizi bu iki ölçüm zamanı arasındaki değişimlere göre istatistik hesapların da yardımıyla yapılabilir.

2.4.2 Dinamik Model

Bu modelde geometrik değişimlerle beraber deformasyona neden olan kuvvetlerin zamana ve dış etkenlere bağlı olarak değişimi, birbirleriyle olan ilişkileri ve kuvvetlerin oluşumlarına neden olan dönüşüm fonksiyonu irdelenmelidir. Örneğin bir su tüneli ele alınacak olursa suyun miktarındaki değişim, suyun akış hızı, kaplama içindeki gerilmeler, tünel etrafındaki yerkabuğu hareketleri deformasyon nedeni olarak gösterilebilir. Deformasyonların oluşumu, buna etkiyen kuvvetlere yapı karakteristiklerinden oluşan bir dönüşüm fonksiyonunun zamana bağlı olarak belirlenmesi, nedenleri ve oluşan deformasyonların yer, zaman ve frekans ilişkilerinin ortaya konmasıdır.

2.4.3 Kinematik Model

Bu model üzerinde deformasyon araştırması yapılacak karakteristik noktaların yaptığı hareketler ve bu hareketlerin hızları incelenmektedir.

Deformasyonun araştırılması, bölgenin uzun bir süre gözlenmesiyle elde edilmektedir. Örneğin bir bölgede yerkabuğunun hareketlerini belirlemek için ölçümler yapılırken sadece nivelman ölçümlerinin yenilenmesi 3-4 yıl sürmektedir. Bu süre içinde nivelman noktalarına ait yükseklikler olası bir hareketin sonucu değişebilir ve değerlendirme sonuçları pek güvenilir olmayabilir. Bu durumda değerlendirme kriteri olarak noktaların yükseklikleri değil yükseklik değişimleri zamanın bir fonksiyonu olarak ele alınmalı ve düşey hareketin hızı incelenmelidir.

2.5 Tünellerde Deformasyona Neden Olan Faktörler

Tünellerde deformasyona neden olan faktörler zeminin jeolojik yapısı ve tünellerin inşaa yöntemi olmak üzere iki başlık altında toplanabilir.

2.5.1 Zeminin Jeolojik Yapısı

Yer yüzeyinden derinlere doğru inildikçe yumuşak ve ayrışmış zemin yerini kaya ya da sağlam zeminlere bırakır. Zeminin homojenliğini bozan değişik yüzeylerdeki tabakalanmalar, kırıklar, çatlaklar, fay kuşakları ve yer altı suyu hareketlerinin etkisi, sağlam zeminden beklenen mukavemeti azalır. Bu nedenden dolayı tünel güzergâhının jeolojik yapısı

araştırılmalıdır. Bunun için yüzeyde uygun görülen sıklıkla belirli noktalarda sondaj işlemi yapılmalıdır. Sondaj işlemleri sonucu jeolojik yapılanmaya göre oluşabilecek yaklaşık deformasyon miktarı belirlenir ve tünel güzergâhı boyunca ne oranda takviye yapılacağı bulunur.

Bunlardan başka mevcut yapılanma da deformasyona sebep olabilir. Bu da binaların boyutları, taşıyıcı sistemleri ve yapının yaşı gibi kriterler hakkında bilgi edinmeyi zorunlu kılar. Bunlardan başka kanalizasyon, gaz ve su borularının (bunlar için kullanılan malzemeler) tünel hattına göre konumları da belirlenmelidir. (Özhan, 1994)

2.6 Tünel Üzerinde Yer alan Zemin Tabakalarının Deformasyonu

2.6.1 Nümerik Çalışmalar

Geçen yüzyıldan başlayarak uzmanlar maden galerilerinin açılımının zemin üst yüzündeki etkisini incelemişlerdir. Bu incelemeleri yaparken belli tecrübelerini ve mekanik kanunları kullanmışlardır.

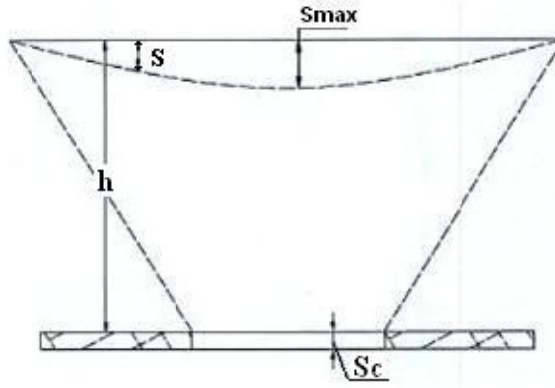
Tünel inşaatları ile ilgili hesap yöntemleri ilk önce madenciler tarafından gözlem ve deneyime bağlı olarak geliştirilmiştir.

Yüzeğe yakın tüneller civarındaki deformasyonlar, literatürde sık olarak basit oturma şeklinde ele alınmıştır. Değişik çalışmalar arasındaki farklılık oturan bölümün geometrisinin idealize edilme şeklinden kaynaklanmaktadır.

Teoriler başlıca iki grupta toparlanabilir. İlk grupta, oturma çanağının genişliği ve en büyük oturma miktarından oturma çanağının şeklini tayin etme yöntemleri, ikinci grupta ise zeminin mekanik özelliklerinden ve tünel civarındaki oturmalarından yola çıkarak zemin yüzeyindeki oturmaların bulunması yöntemleri yer alır.

Tünelcilik alanında yaklaşık yüz yıldır zemin yüzeyindeki maksimum oturma miktarını, tünel en kesit alanına ve örtü tabakası kalınlığına bağlayan çalışmalar yapılmaktadır.

Briggs (1929) zemin yüzeyindeki maksimum oturmayı ampirik olarak aşağıdaki şekilde vermiştir (Şekil 2.12).

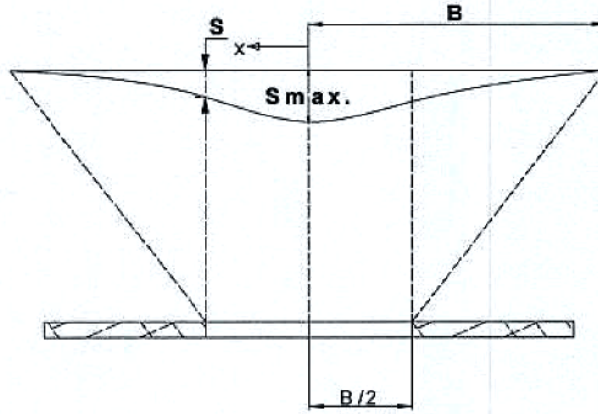


Şekil 2.12 Zemin yüzeyindeki maksimum oturma (Briggs, 1929)

$$S_{max} = S_c \frac{2,2}{2,2 + \sqrt{h/100}} \quad (2.1)$$

Burada, S_c kazı yüksekliğini (tünel çapını) ve h zemin yüzeyine uzaklığı (örtü kalınlığı) metre olarak gösterilmektedir.

Bir başka ampirik eşitlik ise Beyer (1945) tarafından (2.2) ile verilmiştir (Şekil 2.13).

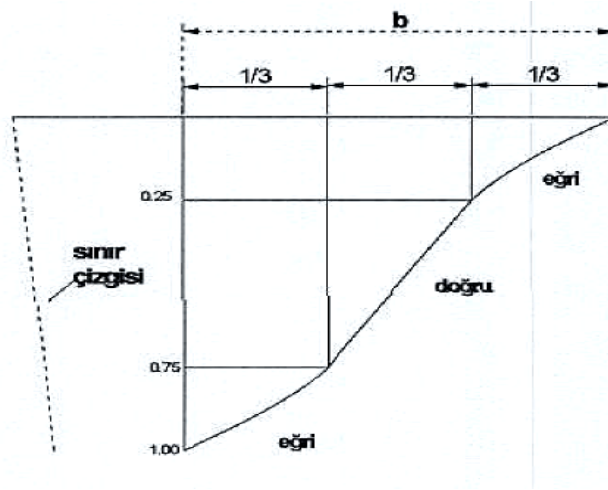


Şekil 2.13 Zemin yüzeyindeki oturma çanağının hesabı (Beyer, 1945)

$$S = S_{max} \left(1 - \frac{x^2}{2B}\right)^2 \quad (2.2)$$

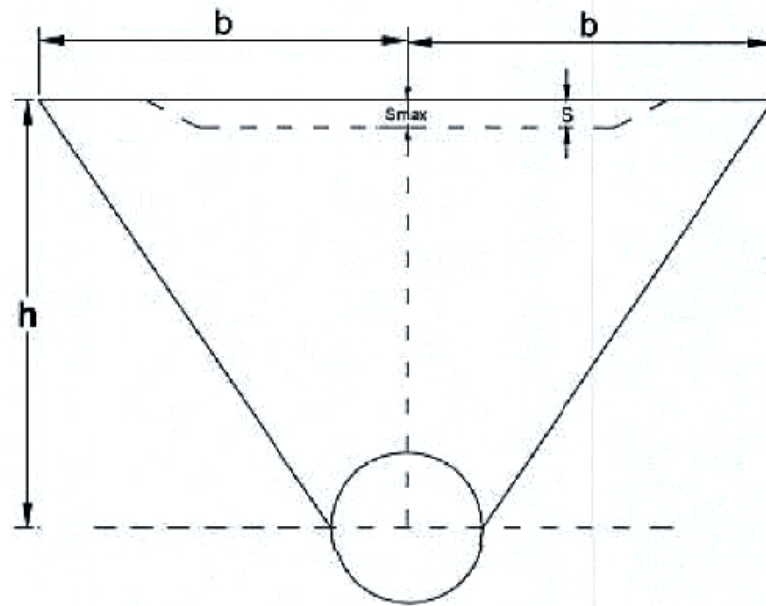
Burada, S_{max} yüzeydeki en büyük oturma değerini ve x eksenden itibaren uzaklığı ifade etmektedir.

Kramer (1974) üst yüzey oturma çanağının şeklini zemin yüzeyindeki maksimum oturmaya bağlı olarak aşağıdaki şekilde vermiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 Üst yüzey oturma çanağı (Kramer, 1974)

Tünellerde üst yüzey oturmalarının hesabı ile ilgili olarak Aversin (1954) tarafından da çalışmalar yapılmıştır. Aversin (1954) zemin yüzeyindeki maksimum oturma miktarından oturma çanağının şeklini olasılık eğrisini kullanarak belirlemiştir.



Şekil 2.15 Zemin yüzeyindeki oturmaların hesabı (Aversin, 1954)

Buna göre merkezden x kadar uzaklıktaki oturma,

$$S = S_{\max} \left(h \frac{x^2}{b} \right)^4 e^{\frac{4x}{b}} \quad (2.3)$$

olarak bulunabilir. Burada S max zemin yüzeyindeki en büyük oturma değeri ve b merkezden itibaren oturma çanağının genişliğidir.

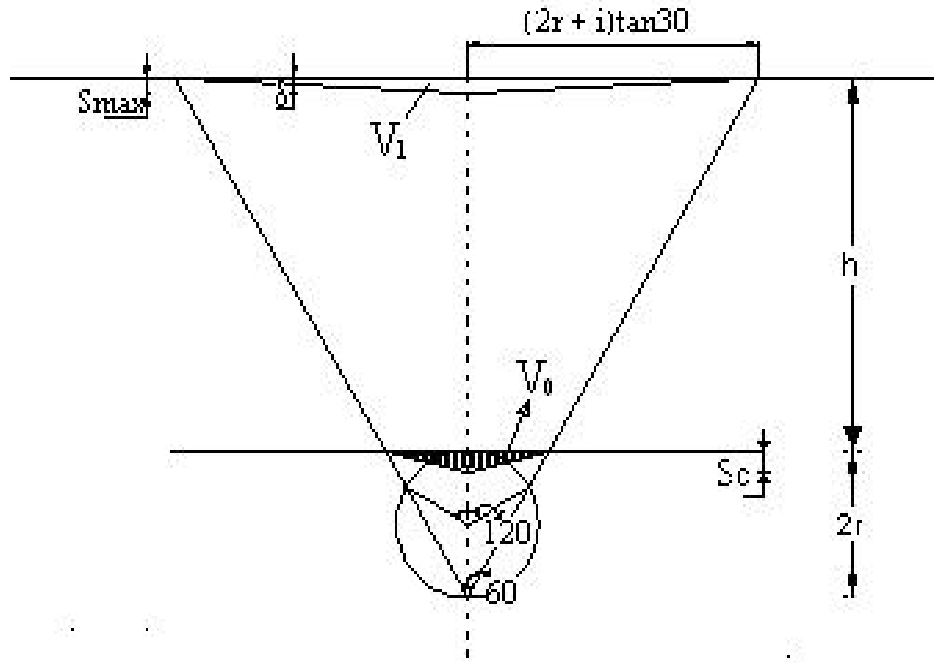
Mortos (1958) tünel üzerindeki oturmanın şeklinin, düzlem cevher yatakları üzerindeki

oturumların arazi gözlemlerini istatistiksel yöntemlerle değerlendirerek eşitlik 2.4 'de verilen bir hata fonksiyon eğrisi ile elde edebileceğini belirtmiştir.

$$S = S_{\max} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (2.4)$$

Burada, “S” tünel ekseninden itibaren “x” mesafedeki yüzey oturması, “ S_{\max} ” tünel merkezindeki en büyük zemin yüzü oturması, “i” eğrinin dönüm noktasının tünel merkezine olan uzaklığıdır.

Steinfeld (1962) tünel tavanının S_c oturmasından dolayı hacimsel deformasyon hacmi V_0 'ı, deformasyonların tünel tabanından başlayarak düşeyle 30° lik açı yapan bir doğru ile sınırlı olduğunu kabul ederek hesaplamıştır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 Üst oturma eğrisinin hesabı (Steinfeld, 1962)

Üst yüzey oturma çanağı hacminin tünel tavanı üzerindeki deformasyon hacmine eşitlenmesiyle

$$V_0 = V_1 \quad (2.5)$$

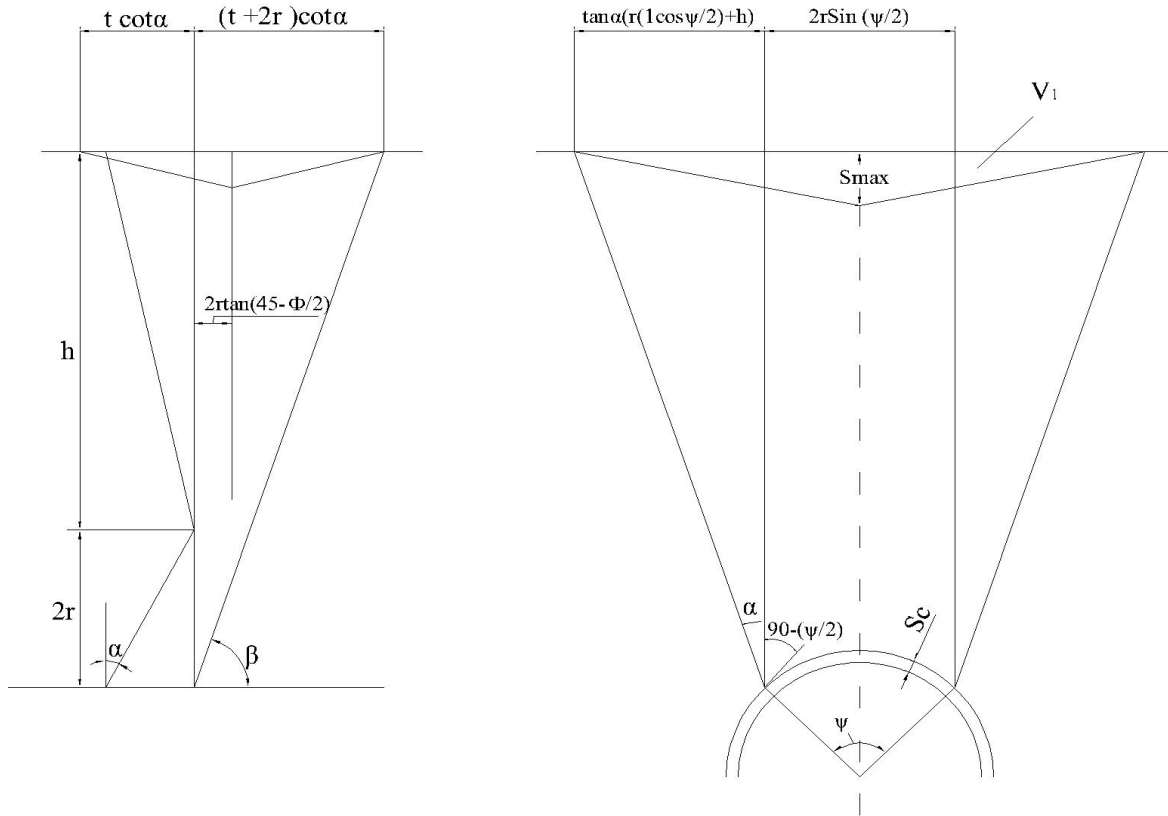
$$S_{\max} = \frac{2r \cdot \tan 30^\circ \cdot S_c}{(2r + h) \tan 30^\circ} \quad (2.6)$$

olarak bulunur.

Steinfeld, oturma alanı sınırı olarak verilen üst yüzey için bir δ dönme açısından yola çıkarak geometrik bağlantılardan minimum tünel üstü zemin yüksekliğini aşağıdaki eşitlik ile vermiştir.

$$h = 2r + \frac{2rS_c}{\text{tg}\delta \cdot \text{tg}30} \quad (2.7)$$

Szechy (1969) Steinfeld gibi doğrularla sınırlandırılmış oturma gövdelerinden yola çıkmıştır (Şekil 2.18).



Şekil 2.17 Zemin üst yüz oturma hesabı (Szechy, 1969)

Szechy (1969), daha önce belirlenen tünel tavanının S_c oturmasından oturma sonucu oluşan boşluğa doğru hareket eden zemin kütlelerinin V_0 hacmini, oturma çanağının eksen üzerindeki S_{max} ve eksen doğrultusundaki S' en büyük oturma miktarlarını aşağıdaki eşitlikler ile ifade etmektedir. Formülde “ Ψ ” radyan cinsindedir.

$$S_{max} = \frac{\psi r S_c}{\text{tg}\alpha \left[r \left(1 - \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + h \right) \right]} \quad (2.8)$$

$$S' = \frac{3\pi^2 \operatorname{tg} \alpha}{\left(\frac{4}{\sin \beta}\right) \cdot (h+r) + \left(4+r^2 + 2h + \frac{h^2}{r}\right)} \quad (2.9)$$

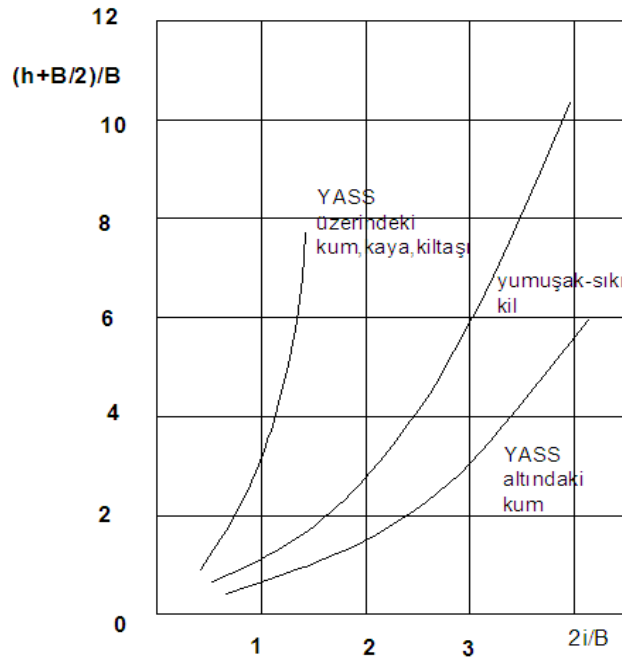
$$S = S' + S_{\max} \quad (2.10)$$

$$V_0 = V_1 \quad (2.11)$$

Szechy zemin yüzündeki oturma çanağının genişliğinin tünel tabanından başlayıp yatay ile $(45 + \frac{\phi}{2})$ 'lik bir açı yapan doğruyla sınırlı olduğunu belirtmiştir.

Steinfeld yalnızca iki boyutlu durumu ele alırken Szechy kalkan yöntemindeki tecrübelerinden de yola çıkarak tünel eksenini doğrultusunda gelişen oturmaları da göz önüne almıştır.

Peck (1969), zemin özelliklerine bağlı olarak, arazi gözlemlerinden elde edilen değişik zeminlerdeki tünel inşaatları sonucu meydana gelen zemin yüzündeki oturmaları incelemiş, oturma çanağının etkili genişlik parametresi “ i ” ‘yi tünel üstü zemin yüksekliği ve zeminin özelliği ile tamamlanmıştır (Şekil 2.20). B tünel genişliği, “ h ” tünel üstündeki zemin kalınlığı ve “ i ” tünel eksenini ve dönüm noktası arasındaki yatay mesafe olarak Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.18 Değişik zeminlerdeki birçok tünel için oturma çanağının etkili genişlik parametresinin tünel genişliğine oranı $2i/B$ ile tünel taban derinliğinden itibaren zemin yüksekliğinin tünel genişliğine oranı $(h+B/2)/B$ arasındaki bağıntı (Peck, 1969)

Müller (1978), Szechy gibi oturma çanağının şeklini bir dağılım fonksiyonu ile vermeye çalışmış olup Hamburg Metro inşaatı yüzey deformasyonu en büyük oturma değerini ve oturma çanağının genişliğini hesaplamıştır.

Attewell ve Farmer (1974), zemin üst yüz oturmalarının artan üst zemin yüksekliği ile orantılı olarak azalmasını göstererek, üst yüzey oturmalarını etkileyen ana faktör olarak şekil değiştiren zemin hacmini vermişlerdir.

Acar (1980), elastik bir oturmadaki dairesel açıklıkların dış yüklerle veya zeminin kendi ağırlığı altında yüklendikleri zaman zemin yüzeyindeki ve açıklık civarındaki deplasmanları ve gerilme durumunu analitik olarak ve sonlu elemanlar yöntemi ile çözmüştür.

O'Reilly ve New (1982), verdikleri bilgisayar destekli hesap yöntemi ile oturma çanağının şekli ile zemindeki gerilme-deformasyon yayılımını arazi ölçüm sonuçlarına dayanarak incelemiş ve sonuçları model deneyleri ile karşılaştırmışlardır. Lineer regresyon hesabı ile oturma çanağı genişliği ile zemin üst yüksekliği arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir.

New ve O'Reilly (1991) ve Fujita (1989), inşa edilen tünellerde ölçülen oturmaları analiz ederek bu oturma okumalarını bir Gauss oturma eğrisi ile göstermişlerdir (Şekil 2.19).

$$S = S_{\max} e^{(-x^2/2i^2)} \quad (2.12)$$

S, x mesafesindeki yüzey oturması, S_{\max} tünel merkezi üstündeki maksimum yüzey oturması, “ i ” merkez çizgisi ile oturma bükülme noktasındaki yatay mesafe ve x merkez çizgisi ile yatay mesafedir. Dönüm noktası (i) için 2.13'teki yaklaşım gözönüne alınmaktadır (Yapı Merkezi, 1992, Arıoğlu vd, 1992, Arıoğlu vd., 2002c)

$$i = 1,392 \times r \times \left(\frac{Z_0}{2 \times r} \right)^n \quad (2.13)$$

Burada “ r ” tünel yarıçapı, “ Z_0 ” tünel merkezinin yüzeye olan uzaklığı, “ n ” ise büyük ölçüde formasyon cinsi ve uygulanan tünel teknolojisine bağlı istatistiksel katsayıdır. Killi formasyonlar için $n=0,704$ değerleri kabul edilmiştir. (Yapı merkezi,1992, Arıoğlu vd., 1992, Arıoğlu vd., 2002c).

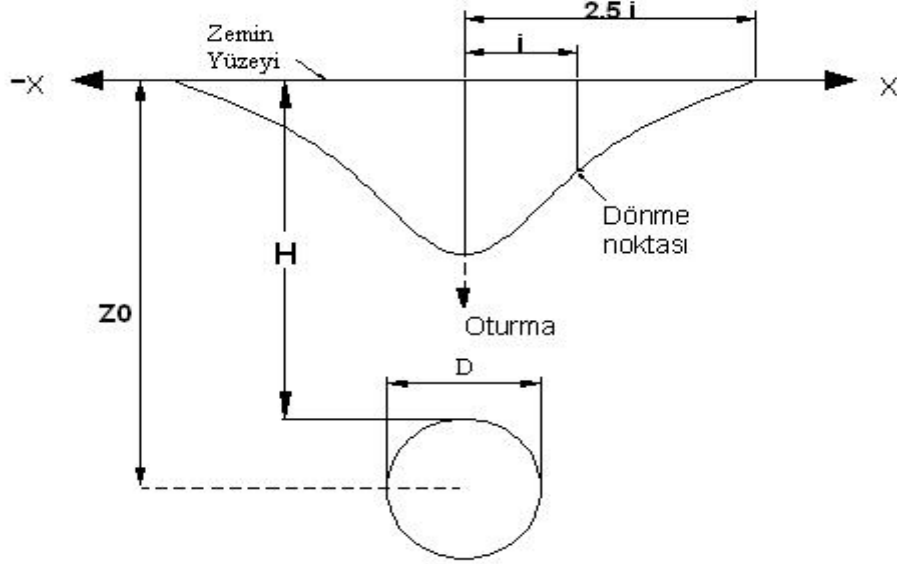
Hacim kaybı parametresi V_s ise Eşitlik 2.14 ile bulunabilir.

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{\max} \quad (2.14)$$

Genelde hacim kaybı (V_s) Eşitlik 2.15'deki ile elde edilebilir. Burada, $\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right)$ tünel daire

kesit alanıdır. “D” tünel daire çapını, “V₁” ise hacim oranını göstermektedir.

$$V_s = V_l \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.15)$$

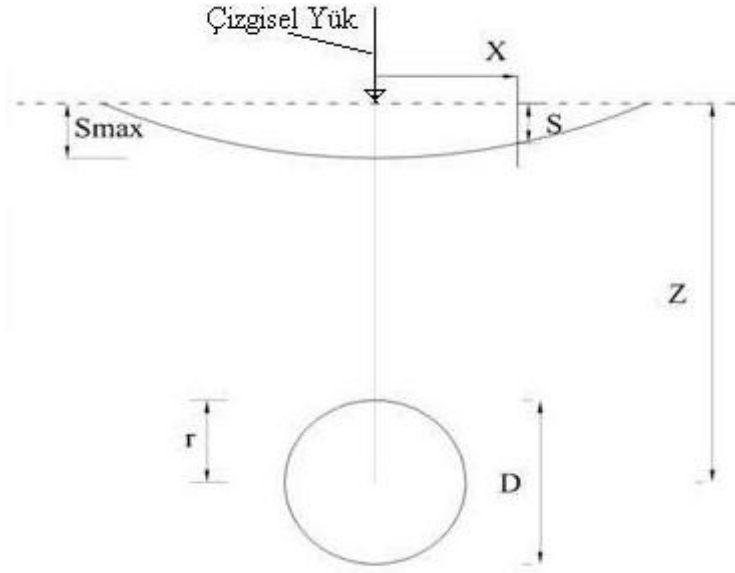


Şekil 2.19 Gauss oturma eğrisi

Chow (1994) yüzeyde uygulanan bir nokta yükten uzakta, düşey deplasmanları hesaplamaya çalışmıştır. Kazı nedeniyle oluşan zemin kaybını, tünel doğrultusu boyunca çizgisel yük olarak modellemiştir. Tünel üzerindeki oturma “S” pratikte;

$$S = \frac{\gamma D^2 Z^2}{8G(x^2 + Z^2)} \quad (2.16)$$

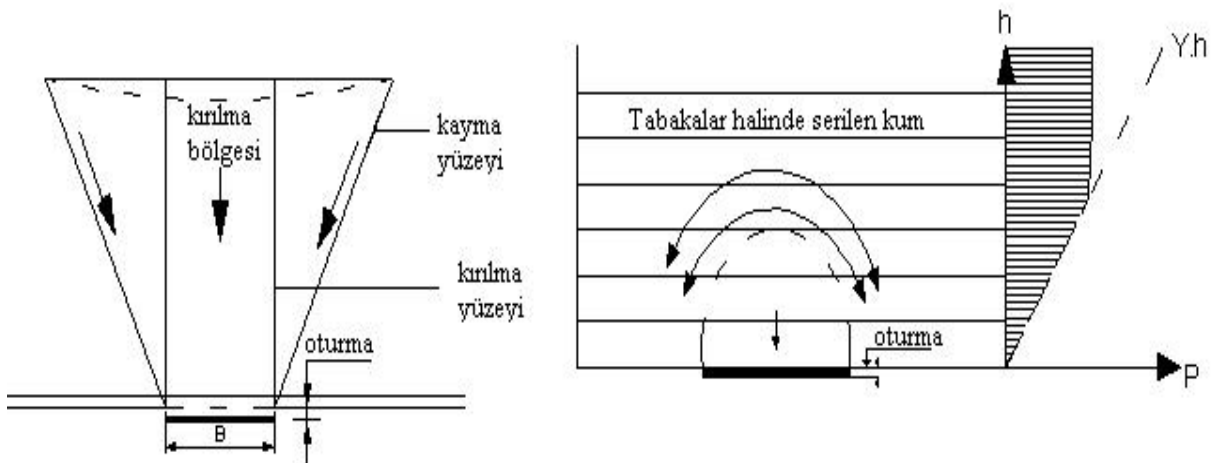
bağıntısı ile ifade edilmiştir. Burada “ γ ” zeminin birim hacim ağırlığı, “D” tünel çapı, Z tünel merkezinin derinliği, “x” tünel ekseninden itibaren yatay mesafe, “G” zeminin kayma modülüdür.



Şekil 2.20 Tünel parametreleri (Chow, 1994)

2.7 Deneysel Çalışmalar

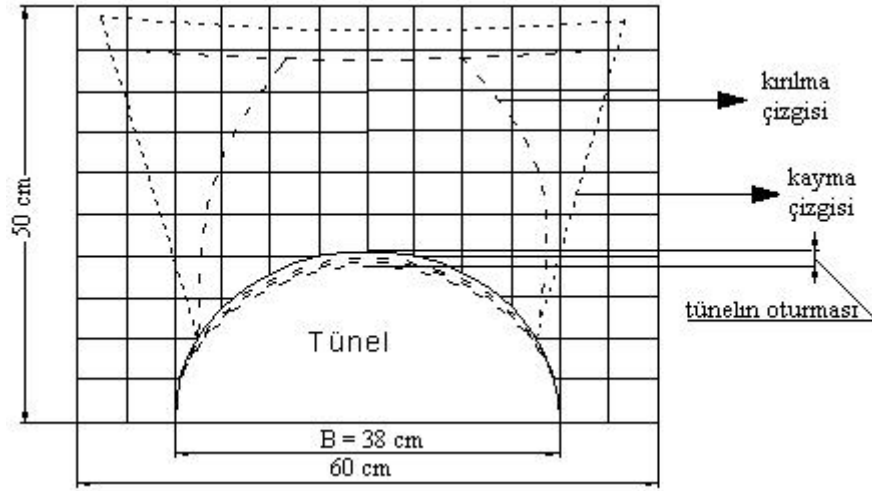
Mevcut çok sayıdaki arazi ölçüm sonuçlarına kıyasla yüzeye yakın tünellerdeki deformasyonlarla ilgili az sayıda teorik ve deneysel çalışma vardır. Model çalışmaları, daha çok tünel açılımı ile zeminde meydana gelen gerilmeleri belirlemek amacıyla yapılmış olup tünel civarındaki yer değişimleri gözlenmiştir. Yamaguti (1930) jelatin model üzerinde iki boyutlu deneyler yapmıştır. Terzaghi (1936) yaptığı düşen kapak sistemli deneyi ile esnek kaplamalı tüneller üzerindeki zeminlerde kemerlenme olayını incelemiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 Düşen kapak deneyi, (Terzaghi, 1936)

Loos ve Breth (1949) kumda yaptıkları model çalışmasında esnek kaplamalı tüneller üzerindeki yer değiştirmeleri ve tünele etki eden gerilmeleri belirlemek amacıyla orta ve ince

kum malzemesi kullanarak bir seri deney yapmışlardır (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 Tünel tavanının oturmasına bağlı olarak zeminde meydana gelen yer değişimleri
(Loos ve Breth, 1949)

Atkinson, Brown ve Potts (1975), yüzeye yakın tünellerde statik ve santrifüj deneyler yapmışlardır. Cambridge Üniversitesi'nde kaplamasız sığ tüneller üzerinde yapılan deneylerde deformasyonların meydana gelişi gözlenmiştir. Teorik analiz yöntemlerini inceleyerek yeni hesap yöntemleri geliştirmişlerdir.

Potts (1976), kumda yaptığı model tünel deneylerinde kaplamaya gelen basınçları ölçmüş, deformasyon durumunu incelemiştir. Sığ tünellerde zemin yüzü oturmalarının hata fonksiyon eğrisi ile ifade edebileceğini belirtmiştir. Potts yaptığı deneyler sonucunda tünelde göçme meydana gelinceye kadar efektif genişlik parametresindeki değişimin çok az olduğunu, tünel göçtüktan sonra ise büyük deformasyonların meydana geldiğini ve zemin yüzü oturma çanağının hata fonksiyon eğrisinden saptığını belirtmiştir.

Atkinson, Potts ve Shofield (1977), yüzeye yakın tünellerde yaptıkları model deneylerinde, model santrifüj aletinde döndürülürken, tünel iç basıncını σ_T azaltarak göçme anındaki σ_T değerini ve göçme şeklini tespit etmişlerdir.

Atkinson ve Potts (1979), gevşek zeminlerdeki sığ tüneller civarındaki gerilme ve yer değiştirmeleri belirlemek amacıyla model deneyleri yapmışlardır. Cambridge Üniversitesi'nde yapılan deneylerde tünel tavanının oturmasına bağlı olarak tünel üstü zemindeki yer değiştirmeleri araştırmışlardır. Tünel tavanının oturmasını tünel iç basıncını azaltarak simüle etmişlerdir.

Tünel üstü zemindeki yer değiştirmeler radyografi tekniğiyle belirlenmiş, model malzemesi

olarak kum ve kil kullanılmıştır. Atkinson ve Potts (1979) model deneyleri sonucunda tünel üstü zemindeki yer değiştirmelerin zeminin cinsine ve tünel üstündeki örtü kalınlığına bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte tünelde meydana gelen deformasyonların zemin yüzünde oturmalar meydana getirdiğini saptayarak bu oturmaların tünel tavanının oturmasına ve tünel üstündeki örtü kalınlığına bağlılığını amprik olarak vermişlerdir.

Sauer (1976), yüzeye yakın tünellerde gerilme dağılışı ve üst yüzey oturmalarını belirlemek için yaptığı 1/30 ölçeğindeki model çalışmasında özellikle bitişik iki metro tüneli arasındaki duvarda gerilmeleri incelemiş ve sonuçları inşa halindeki Frankfurt metrosunda çeşitli noktalardaki ölçüm sonuçları ile karşılaştırmıştır.

Kimura ve Mair (1981), santifüj aletinde inşa ettikleri geomekanik modele yer ivmesinin birkaç katına varan ivmeler uygulayarak deney gövdesinde arazideki gerçek gerilmelere eşdeğer yüksek gerilmeler meydana getirmişlerdir.

Egger (1987), değişik detayların simüle edilebilmesi amacıyla gevşek zeminde yüzeye yakın 1/20 ölçekli bir model tünel üzerinde normal ve ön gerilmeli ankrajlar kullanarak deneyler yapmıştır.

Graf (1984), kohezyonsuz zeminlerdeki tünellerde tavana gelen zemin basınçlarını teorik olarak rijit ve esnek kaplama halinde ayrı ayrı incelemiş ve bulduğu sonuçları geçerliliğini küçük ölçekli model deneyleri ile kontrol etmiştir.

Melix (1986), kohezyonlu ve sürtünmeli homojen bir zemindeki yüzeysel tünellerin denge durumunu incelemek amacıyla yaptığı model çalışmasında ($0.5 < h/B < 3.0$), tünel iç basıncı olmadan dengede kalan tünellerde, zeminin kohezyon değerini $0.5\gamma B$ olarak belirlemiştir. Bu değerini geliştirdiği diğer hesap yöntemlerinden elde ettiği C_{\min} değerine eşit olduğunu saptamıştır.

B.R.Wu ve C.J. Lee (2003) yaptıkları model deney sonuçlarına dayanarak z derinliğinde D çapında tek tünel için maksimum yüzey oturması ile hacim kaybı arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir.

$$\frac{S_{\max}}{D} = 0.00327 \left(\frac{z}{D}\right)^{-0.43} V_i \quad (2.17)$$

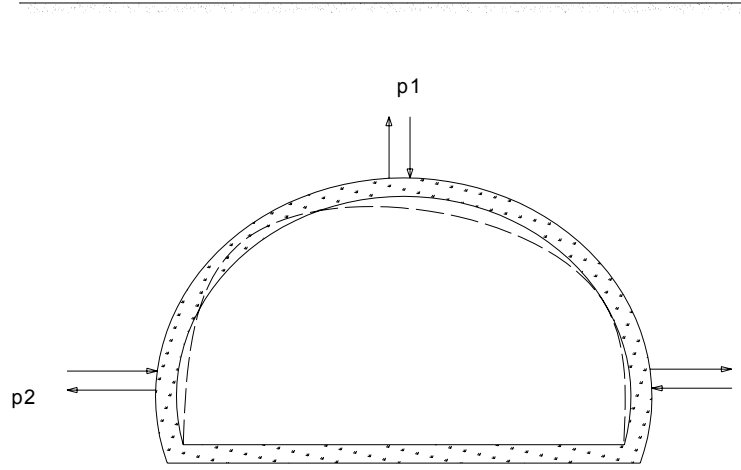
Paralel çift tünel içinde $d/D=1,5$ koşulu sağlanmak şartıyla

$$\frac{S_{\max}}{D} = 0.00494 \left(\frac{z}{D}\right)^{-0.39} V_i \quad (2.18)$$

eşitliğini geliştirmişlerdir.

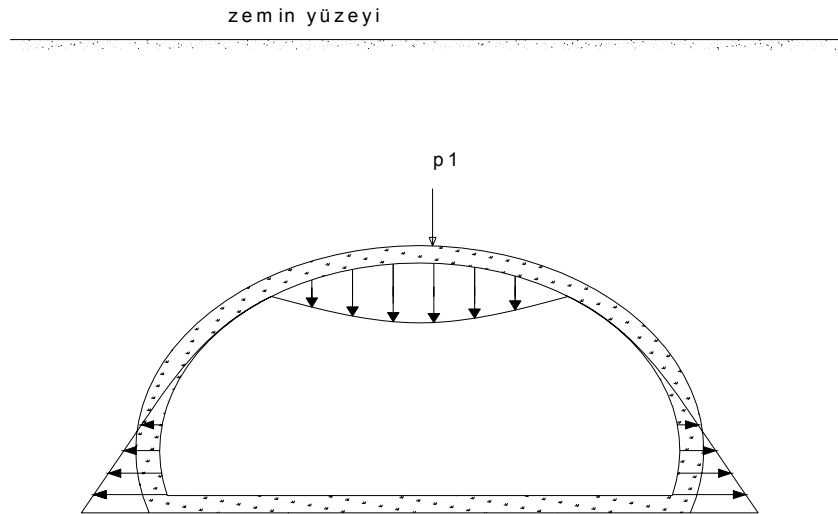
2.8 Tünelde Beklenen Deformasyonlar

Tünel güzergâhı boyunca kazı devam ederken oluşan boşluk nedeniyle tünel kesitine bir takım kuvvetler etkir. Bu kuvvetler arazinin yükü ve iç kaplamalar nedeniyle oluşan sistemin kendi ağırlığıdır. Yine tünel kesitinde jeolojik yapının değişmesinden dolayı nadiren de olsa tünel tabanında kabarma veya çökme de olabilir (Şekil 2.23).



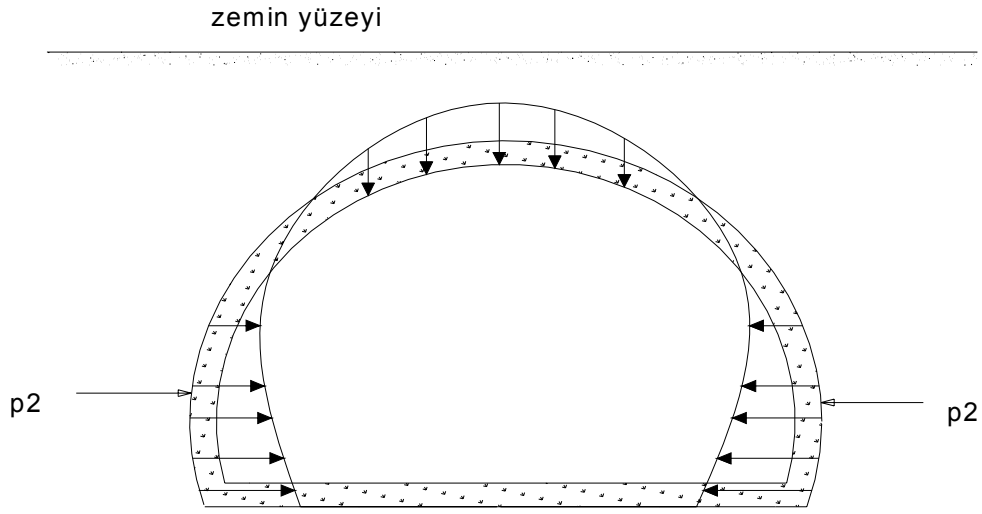
Şekil 2.23 Tünel etkiyen kuvvetler

“ P_1 ” kuvvetinin etkisiyle tünel tavanında aşağı doğru bir eğilme gözlenir. Buna bağlı olarak da tünel duvarları yana doğru açılabilir. Şekil 2.24’de “ P_1 ” kuvvetinin etkisiyle meydana gelen şekil değişikliği görülmektedir.



Şekil 2.24 P_1 kuvvetinin etkisiyle tünel deformasyonu

P_2 kuvvetinin etkisiyle de tünel duvarları tünel içine doğru şekil değiştirirler. Buna bağlı olarak da bu değişim tünel tavanının yukarı doğru itilmesine sebep olur. Şekil 2.25’de P_2 kuvvetinin etkisinden dolayı meydana gelen şekil değiştirmeler görülmektedir.



Şekil 2.25 P_2 kuvvetinin etkisiyle tünel deformasyonu

Tünel hattının geçirildiği zeminin yapısından dolayı blok halinde kaymalar da olabilir. Örneğin bir heyelan veya yersarsıntısı zemin kütlelerinin bir bölümünü blok halinde kaydırabilir. Bu da tünelin şeklini değiştirmeden tünel hattının yerinin değişmesine neden olur. Tünel kazısı nedeniyle, tünel içinde mevcut yapıyı bozan konum ve şekil değişikliklerini belirlemek, etkiyen kuvvetlerin büyüklüklerini, yönlerini ve kaynaklarını tespit etmek amacıyla yapılan ölçümlere “geoteknik ölçümler” veya “aletsel geoteknik gözlem” denir (Özhan N.,1994)

3. ÖLÇÜM ALETLERİ

Mühendislik yapılarının inşaatı ve sonrasında zemin ve yapılarda oluşabilecek deformasyonların izlenmesi; hem iş güvenliği hem de inşaat alanının stabilitesi açısından büyük önem arz etmektedir. Bu deformasyonların izlenmesi için bazı ölçüm aletlerinden faydalanılmaktadır. Bu aletler genel olarak 4 grupta toplanabilir.

- Şev hareketlerinin izlenmesinde kullanılan aletler
- Yeraltı suyu basınçlarının ve yeraltı suyu seviyesindeki değişimlerin ölçülmesinde kullanılan aletler
- Kaya ve toprak basınçlarının ölçülmesinde kullanılan aletler
- Zemindeki titreşimlerin izlenmesinde kullanılan aletler

3.1 Deformasyon Ölçmelerinde Jeodezik Yaklaşımın Tarihçesi

İlk deformasyon ölçüsü 1860'da ABD'nin California Eyaleti'nde San-Adreas Fay kuşağında yapılmış ve 1876-1906 yıllarında yatay açı gözlemleri tekrarlanmıştır. Mühendislik yapılarındaki en büyük deformasyonlar barajlarda meydana geldiğinden dolayı, bu yönde yapılan çalışmalar oldukça geliştirilmiş ve literatürde geçen ilk deformasyon ölçümü bir baraj hakkında oluşmuştur. Bu söz konusu ölçümler 1908 yılında Almanya'nın Thunsingen Eyaleti'nde bulunan Gotheur Barajı'nda yapılmış olan ölçümlerdir. Burada baraj kretinin ortasında seçilen iki noktanın yatay hareketleri, aliyman yöntemi ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu konuda ikinci önemli bir uygulama, yine Almanya'da bir kemer baraj olan Pfafensprung'da 1928 yılında yapılmıştır. Bütün bu çalışmalar yapılırken basit sayısal çözümler veya grafik tespitler kullanılmıştır. Zamanla gelişen dünyanın enerji sorununa çare olması amacıyla hızlı bir şekilde baraj yapımına başlanmış ancak bunların bazıları deformasyonlar iyi incelenmediğinden dolayı ya yıkılmış ya da yıkılma tehlikesi bulunduğundan kullanıma açılmamışlardır.

1928 yılında ABD'de 50m yüksekliğindeki San-Francisco barajının çökmesi sonucu 436 kişinin ölümüyle sonuçlanan faciadan sonra, deformasyon ölçmelerinde oldukça hassas yöntemlerin kullanılma zorunluğu ortaya çıkmıştır.

Bu zamana kadar yıkılan baraj sayısı 250'yi bulunca 1928 yılında düzenlenen bir sempozyumda konu ele alınmış ve hemen ardından aynı yılda bu konuda ilk yazılı kitap

W.Lang tarafından yayımlanmıştır.

Deformasyon ölçme teknikleri ve uygulaması ülkemizde 1960'lı yıllardan sonra gündeme gelmiştir. Ancak tam anlamıyla ciddi boyutta araştırmalar yapılamamıştır. Örnek verecek olursak Kemer-Bozdoğan Barajı'nda ölçüm tesisleri kurulmuş fakat ölçümler yıllarca alınamamıştır. Yine Sarıyer Barajı'nda ilk ölçüm değerleri elde edilmiş fakat bunların nasıl değerlendirileceği bilinemediğinden dolayı ölçümler tekrarlanmamıştır. Daha sonra yapılmış olan Keban, Gökçekaya barajlarında yapılan ölçümler ilk bilimsel nitelikteki ölçümlerdir.

Ayrıca toprak dolgu baraj olarak inşa edilen Alibey Barajı için İTÜ ve YTÜ tarafından gözlemsel çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmada 29 adet ölçüm noktası kullanılmıştır. Bu ölçüm noktalarından 10 adeti kenar kaya üzerinde, 3 adeti baraj kreti üzerinde, 9 adeti mansap yönü şevi üzerinde, 4 adeti memba yönü şevi üzerinde olacak şekilde teşkil edilmiştir. Ölçümler 1987-1991, 1991-1996 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Arazi yerdeğiştirme ölçümü sonuçları ile hesaplanan yerdeğiştirmeler karşılaştırılmıştır. (Özaydın v.d., 2006)

Yine Kuzey Anadolu Fay kuşağında yer kabuğu hareketleri araştırılmış ve bu çalışmalar belirli aralıklarla yinelenmiştir.

3.2 Tünel İnşaatlarında Güzergah Üzerinde Tünel içi ve Yüzey İzleme

Şehir içinde yapılan tünel çalışmalarında özellikle yüzeyde yerleşimler bulunduğu için izleme büyük önem arz etmektedir.

3.2.1 İzleme Ekipmanları

Zemin hareketlerini izlemek için ekipman olarak aşağıdaki aletler kullanılmaktadır.

- İnklinometre
- Ekstanso-inklinometre
- Yüzey oturma bulonu
- Katlı ekstansometre
- Tesis izleme noktası
- Tünel içi konverjans

3.2.1.1 İnklinometre

Yüzeyden itibaren belirli derinliklerde oluşabilecek yatay hareketlerin izlenmesinde güvenilir bir yöntem olarak kabul edilen inklinometre ölçümleri, yatay ve düşey olarak açılmış sondaj kuyularına yerleştirilen 3 metre boyunda, sıcağa karşı dayanıklı ve yüksek sıkışma dayanımına sahip plastik veya alüminyum boruların ilksel konumlarından olan sapmaların inklinometre cihazı aracılığıyla belirlenmesi esasına dayanır.

Yerleştirilen sondaj deliğinin eksenine dik yönde oluşan hareketlerin ölçülmesinde kullanılan inklinometreler yardımıyla düşey doğrultudaki deliğin iki tarafında 10-20° 'lik sapmalar ölçülebilmekte, hareketin yeri, büyüklüğü ve yönü saptanabilmektedir.

İnklinometre bize deliğin yatay yönlerdeki hareketini vermektedir. Tünel kazılarında özellikle tünelin olduğu kısımlarda yoğun hareket beklenmekte olup bu kısımlara özen gösterilmesi gereklidir.

İnklinometre aleti prensip gereği alt ucunu sabit alarak ölçülmeye programlanmış olduğu için bu uç kısmının mutlaka etki alanının altına indirilmesi gerekir.

İnklinometre ölçüm aralığı sondaj verilerinden yararlanılarak, beklenen kayma hareketinin hızına göre seçilmelidir.



Şekil 3.1 İnklinometre ölçüm seti

3.2.1.2 Ekstanso-inklinometre

Ekstanso-inklinometre diye tabir edilen ölçüm mekanizması, bir ekstansometre (uzama,

kısalma ölçme aleti) ve bir inklinometre (yatay deformasyon ölçme aleti) 'nin birleşiminden oluşur.

Extanso-inklinometre'nin montajı, inklinometre aletinin ölçümü için açılan kuyuya yerleştirilen boruların etrafına bir metrede bir yerleştirilen manyetik ringler ile yapılır. Bu ringler sayesinde bu kuyudan uzama kısalma ölçümü de alınabilir hale getirilmiş olur.

Ringlerin bir metrede bir yerleştirilmesinin nedeni ekstansometre aletinin probe (kuyuya indirilen metal aksamı alıcı) kısmının uzunluğundan kaynaklanmaktadır. Bu probe'ın içindeki alıcı kısımlar bir metrede bir teşkil edilmiştir.

Ölçüm mekanizmasının uzama-kısalma ölçüm kısmı yukarıdan aşağıya doğru probe'un salınması ve her bir metrede bir (probe'un alıcı kısımlarının manyetik ringlerin olduğu kısımlara denk gelmesi sağlandıktan sonra) ölçüm alınması ile gerçekleşir. Kuyunun en üst noktası çökme veya kabarmaya uğramamış olarak kabul edilir ve aşağıya doğru her manyetik ring'in bir alt metredeki ring ile arasındaki mesafenin ne kadar değişime uğradığı ölçülebilir. Toplam olarak kuyunun ne kadar çöktüğü ya da zeminde ne kadarlık bir hacim kaybı olduğu veya hangi bölgelerin aşırı sökülmeyle maruz kaldığı gibi bilgiler hakkında fikir sahibi olunabilir.

Bu kuyu içindeki yatay deformasyon ölçümleri ise inklinometre aleti ile aynı şekilde yapılmaktadır. Dolayısıyla aslında kuyunun inklinometre kuyusundan tek farkı inklinometre ölçümü bittikten sonra aynı kuyudan alınabilen ekstansometre ölçümüdür.

Bu kuyularda ölçümlerin sağlıklı olmasını sağlayan en önemli faktör montajın itinalı ve doğru yapılmasıdır.

- **İnklinometre ve Ekstanso-inklinometre kuyularında montaj yapılması**

Öncelikle montaj yapılacak yerde pafta üzerinden bir ön tespit yapılmalı ve yerin koordinatları belirlenmelidir. Bu koordinatlar topograf ekibine sahada işaretlendirilip daha sonra bu kuyunun trafik, kazı gibi durumlardan zarar görmeyeceğinden emin olunmalıdır. Özellikle ölçüm aletlerinin ağır olmasından dolayı uzun mesafede taşınma güçlükleri göz önüne alınmalıdır. Eğer bu nokta yukarıda söylenen koşulları sağlamıyor ise daha uygun bir noktaya kaydırılması proje için de uygunsa gerçekleştirilmelidir.

Ölçüm borusu 70 mm'lik bir iç çapa sahiptir. İnklinometre kuyusu için 90mm 'lik kuyu delgisi yapılabilir. Kuyunun içine muhafaza borusu indirilip bu muhafazanın içinden boruların indirilmesi boruların hasar görmemesi için daha uygundur. Boru indirilmeden önce kuyu iyice taranmalıdır. Borular 3 metrelik üretilmektedir ve uç uca eklendiğinde içinde bulunan 4 kanal

birbirini tamamlamalıdır. Kuyuların özellikle bağlantı noktaları içeri yabancı madde girişini engellemek için iyice izole edilmelidir. Borular bağlantı noktalarından dönerek ya da koparak zayi olabileceği için bu bölgeler pop perçinler ile sabitlenmelidir. Boru etrafına enjeksiyon hortumu sarılarak kuyuya indirilmelidir. Bu enjeksiyon hortumunun sıkışmamasına ve kopmamasına özen gösterilmelidir hatta delgi çapı borunun genişliği de göz önüne alınarak seçilmelidir. Kuyunun içindeki borunun enjeksiyonu “çimento-su” ya da “kum-çimento-su” karışımı ile boşluk kalmayacak şekilde tamamlanmalıdır. Enjeksiyon montajdan hemen sonra ağız kısmına kadar tamamen doldurulmalıdır. Birkaç gün izlenmeli ve eksilen kısım yüzeyden tamamlanmalıdır.

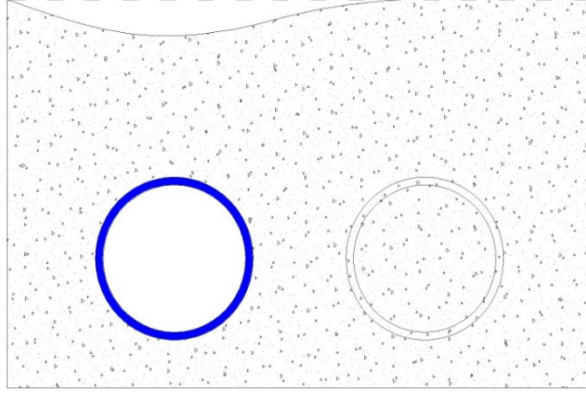
Borunun içinde alttaki şekilde de görüldüğü gibi kanallar mevcuttur. Bu kanallardan bir tanesi montaj sırasında deformasyonun beklendiği yöne doğru yönlendirilmelidir.



Şekil 3.2 İnklinometre borusu

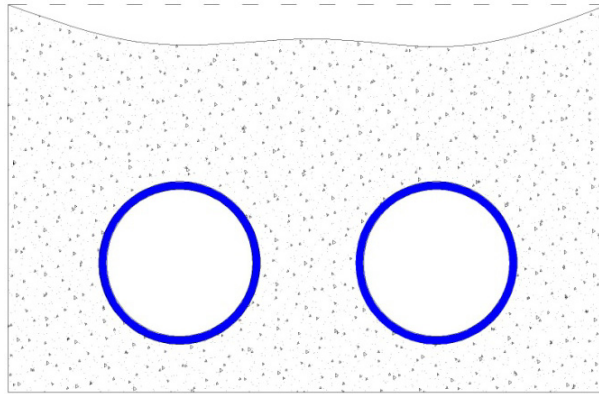
3.2.1.3 Yüzey Oturma Bulonu

Yüzey oturma bulonu tünel üstündeki zeminde meydana gelen hacim kayıplarını belirlemek için yerleştirilir. Zeminin bir çanak şeklinde çöktüğü kabul edilir. Tünel kazısı sırasında tüneller arasında yaklaşık 100 metre mesafe bulunur. İlk tünel kazısı tamamlandığında zeminde meydana gelen deformasyonun Şekil 3.3’ deki gibi olduğu kabul edilir.



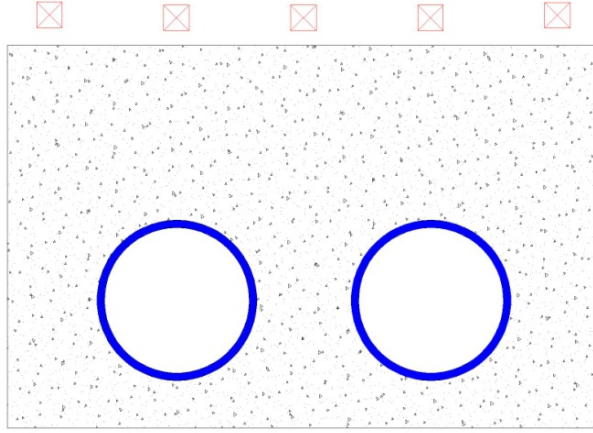
Şekil 3.3 Bir Tünelin kazısı tamamlandıktan sonraki durum

İkinci tünel kazısı da tamamlandığında zeminde beklenen deformasyonlar özellikle 2.Tünel üstünde deformasyonlar oluşmuş ve bu deformasyonlar bazı kesimlerde ilk tünel kazısından dolayı oluşan deformasyonlar ile keşmiş bu noktalardaki deformasyonlar oldukça artmıştır. Özellikle bu deplasmanlar dikkate alınarak ikiz tüneller arasında kalan mesafeler tasarım aşamasında belirli sınırlar dâhilinde tutulmuştur. İki tünel kazısı da tamamlandıktan sonra zeminin deformasyonu Şekil 3.4 'teki gibi olduğu tahmin edilir.

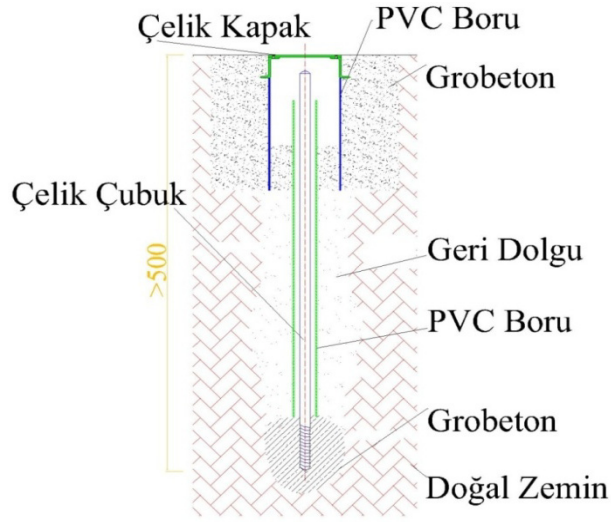


Şekil 3.4 İki Tünel kazısı tamamlandıktan sonraki durum

Yüzey izleme noktaları zeminde genellikle aşağıdaki şekilde yerleştirilir.



Şekil 3.5 Yüzey izleme noktaları temsili yerleştirilmesi



Şekil 3.6 Yüzey izleme noktası tip kesiti

Yüzey izleme noktaları yüzeyden en az 50 cm aşağıya inecek yuvarlak başlı bir çelik çubuk ile teşkil edilir. Bu çelik çubuğun alt kısmı beton ile sabitlenerek zeminle birlikte hareket etmesi sağlanır. Betonun üst kısmında çelik çubuğun kenarları kum ile doldurularak çubuğun rahat hareket etmesi sağlanır. Üst kısmı çelik bir yüzey muhafazası ile koruma altına alınır. Yüzeyden gelebilecek trafik gibi etkenlerden etkilenmemesi için çelik çubuk üst kottan bir miktar aşağıda kalacak şekilde monte edilir.

Bu yüzey izleme noktalarının montajından sonra koordinatları ölçülüp pafta üzerinde işaretlenir ve numaralandırılır. Ölçümleri nivelman yöntemiyle alınıp ilk okuması baz kabul edilir. Baz okuma en az ilk tünel bu noktaya 50 metre kala alınmış olmalıdır. Tüneller 50 metre yaklaştığı anda okumalar günlük takip edilmeye başlanmalıdır. Ölçümler son tünel bu noktayı 100 metre geçene kadar günlük devam etmelidir.

3.2.1.4 Katlı Ekstansometre

Katlı ekstansometre belirli bir derinlikteki zeminin ne kadar çöktüğünü görmek için monte edilir. Uzun ve serbest hareket eden bir borunun uç kısmında bulunan demir zeminle birlikte hareket eder. Bu demir üstteki borunun içindeki serbest kısımda aşağıya doğru çeker. Montajdan ve enjeksiyon prizini aldıktan sonra yüzeyden kumpas ile serbest kısmın ne kadar içeride olduğu ölçülür ve bu okuma baz olarak kabul edilir. Zaman içinde bu mesafedeki değişim kaydedilir ve raporlanır. Mesafedeki değişimlerin tünel kazısı ve ilerlemesi ile birlikte değerlendirilmesi gereklidir.

Katlı ekstansometre adından da anlaşıldığı üzere, tek katlı teşkil edilebileceği gibi, çok katlı da monte edilebilir. Bu katların uzunlukları zeminde birimin değiştiği yerlere göre seçilir. Katlı ekstansometre tünel işlerinde genellikle tünel ekseninin tam üstüne monte edilir. Tünel üstüne monte edilen ekstansometrelerin en uzun katı tünel üst kotunun yaklaşık 2 metre üstünde olacak şekilde belirlenir.

Katlı ekstansometre ve Ekstanso-inklinometre'ler monte edildikten sonra kapak kotları nivelman yöntemi ile ölçülmelidir. Ekstansometreden kumpasla alınan ölçüm alt noktadaki demirin üst kapaktan ne kadar uzaklaştığını bize gösterir ama yüzeydeki deformasyonlar (oturmalar) göz önüne alınmalıdır. İki deformasyon ancak birlikte değerlendirildiğinde zeminle ve tünel kazısı ile ilgili bir fikir sahibi olunabilir.

3.2.1.5 Tünel İçi Konverjans Ölçümleri

Tünel içi konverjans ölçümü NATM tünellerde tercih edilen bir sistemdir. İlk kaplamadan hemen sonra monte edilir. Nihai beton kaplaması yapılmadan önce bu ölçümlerin sönümlendiğinden emin olunmalıdır.

TBM tünellerde yapılan ilk kaplama aynı zamanda son kaplamadır. Tünel makineleri çok uzun ve yüksek olduğu için kazıdan hemen sonra prizmalar monte edilememektedir. En büyük deplasmanlar ise kazıdan hemen sonra olmaktadır. Bu yüzden prizmalar yerleştirilse bile çok fazla anlam ifade etmemektedir.

Şerit ekstansometre ile konverjans ölçümü 0.01 mm. hassasiyetli ölçüm aleti vasıtasıyla tünel tavanı ve duvarlarının relatif hareketlerini gözlemek amacıyla kullanılır.

Ölçümler bir adeti tavanda ve ikişer adedi yan duvarlarda olmak üzere toplam beş adet toplama bulonu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Tünellerde ortalama her yirmi metrede bir ölçüm kesitleri oluşturulmaktadır.

Konverjans ölçümlerinin sıklığı aşağıdaki gibidir:

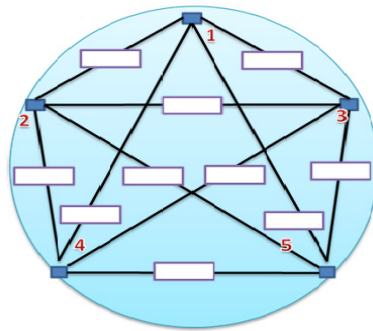
- Kazı işlemleri tamamlanmaz toplama bulonları yerleştirilir ve püskürtme betonu prizi aldıktan sonra ilk ölçümler alınır.
- Tünel aynası ölçüm kesitini 10 m. geçinceye kadar, her gün ölçüm yapılır..
- Tünel aynası ölçüm kesitini 30 m. geçinceye kadar, iki günde bir ölçüm alınır. 30 m.'den sonra ölçümlerin alınması deformasyonlara bağlıdır.



Şekil 3.7 Konverjans ölçümü için kullanılan şerit ekstansometre

Konverjans ölçümünde esas olan ara mesafelerdir. İlk okumadaki ara mesafe baz alınarak daha sonra bu tünel kesitinin hareketi noktaların birbirlerine yaklaşıp uzaklaşması ile belirlenir. Bu ölçümler İkitelli Güney Sanayi-Olimpiyat Köyü hattı NATM tünellerinde tünel içinde ölçüm zorlukları göz önüne alınarak optik sistemle gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde toplama bulonlarının olduğu noktalarda optik prizmalar teşkil edilir. Prizmaların dünya koordinatlarında yerleri belirlenip bu noktalar arası mesafeler formüllerle vektörel olarak belirlenir. Bu sayede ölçümler daha hassas yapılabilmekte ve daha hızlı okuma alınabilmektedir.

5 noktalı bir kesitte 10 adet ara mesafe değeri bulunmaktadır. Kesitin görünümü Şekil 3.8'deki gibidir.



Şekil 3.8 Konverjans kesiti ve ara mesafeler

3.2.1.6 Tesis İzleme Noktaları

Tünel güzergahlarında ilk olarak tünel kazısının etki edeceği alan belirlenir. Bu bölge içine giren binalara tesis izleme noktası yerleştirilerek bu binaların yatayda ve düşeyde hareketleri izlenir. Bu deformasyonların ölçümü insanların can güvenliği açısından ve tünelde uygulanan kazı yönteminin doğruluğunun takibi açısından en önemli ölçüttür.

Bu deformasyonlarda yapı beton ve proje kalitesinin, temel sisteminin ve bölge jeolojisinin etkisi çok büyük olmaktadır. Örneğin tünel kazıları yer altı suyunun drene olmasına neden olduğu için killi zeminlerde konsolidasyon oturmaları görülebilir.

Binalarda takip edilmesi gereken en önemli deformasyon farklı oturma kriteridir. Bu doğrudan binanın temel sistemi ile bağlantılıdır. Binanın toplu oturması genellikle radye temelli binalarda daha fazla görülür. Bu tarz binalar daha fazla oturmayı tolere edebilir. Binanın köşelerinde meydana gelecek farklı oturmalar öncelikle taşıyıcı olmayan tuğla duvarlarda çatlaklar olarak görülür. Eğer farklı oturmalar daha fazla ise bu taşıyıcı sistemde çatlaklara yol açabilir. Bu durumda taşıyıcı sitemlerin güçlendirilmesi ya da güçlendirilemeyecek durumda ise binanın yıkılması gerekebilir.

Tesis izleme noktaları bir merkezden total station ile koordinatları alınarak takip edilir. Yerleştirilen prizmalara total station milimetrenin % 1'i hassasiyetle otomatik bağlanabilir. Yeni sistemlerde bir bölgedeki prizmalar merkez bir noktaya Total Station aleti kurularak otomatik okuma moduyla istenilen aralıklarla sürekli olarak ölçülebilmekte bu da internete aktarılıp küçük paket programlar ile grafiklenip dünyanın her yerinden anlık takip edilebilmektedir.

3.2.1.7 Diğer İzleme Ekipmanları

Bunların haricinde gerektiği durumlarda tünel inşaatlarında;

- Tünel kazısı sırasında bazı noktalarda tünel içine zeminden gelen yüklerin belirlenmesi için yük hücreleri,
- Belirlenen çatlaklardaki ilerlemeleri saptamak için çatlak ölçerler,
- Kazıdan ve gerektiği durumlarda yapılan patlamalardan binaların etkilenip etkilenmediğini ölçmek için titreşim ölçerler
- Binalardaki eğilme miktarını bulmak için eğimölçerler kullanılmaktadır.

4. TÜNEL AÇMA METODLARI

4.1 TBM Tünel Açma Makineleri

Madencilik ve inşaat sektöründe yeraltı yapılarının önemi teknolojik gelişmelere paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle yerleşim merkezleri ve büyük şehirlerde elektrik, su, kanalizasyon telefon doğalgaz ve metro tünelleri gibi yapıların açılması sırasında, çevreye ve yer üstünde yapılara zarar vermemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi son derece önemlidir. Her ne kadar ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) tasman gibi istenilmeyen yeraltı hareketlerini önleme kabiliyeti, daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir. Sert, orta sert, yumuşak ve akıcı formasyonlar için kullanılacak kafa dizaynları ve keski tipleri, makineyi dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri çeşitli yönlerden farklılıklar göstermektedir. Açılacak yeraltı boşluğu boyunca geçilecek formasyonların önceden tespiti, kullanılacak makinenin seçiminde en önemli faktörlerden biri olmaktadır.

4.1.1 TBM Gelişim Süreci

Amerika'da ilk tünel açma makinesi Hoosac Tünelinde kullanılmıştır. Bu makine daire şeklinde döner bir kazma kafasına sahipti ve keski konsantrik daireler çizerek kazı yapacak şekilde dizilmişlerdi. Tutunma mekanizması, itme (baskı) mekanizması ve pasa uzaklaştırma düzenleri vardı. Fakat yıl 1856 idi ve ne metalürji ne de yapısal tasarım şekli makinenin sert kayalarda başarılı olarak çalışabileceği seviyede idi. Herman Haupt isimli meşhur inşaat mühendisi, bu makine ile 3 metrelik bir ilerleme yapmayı başarmıştır.

TBM'in esasını oluşturan bu kavram, izleyen 100 yıl için güçsüz kalmış ve hiçbir gelişme gerçekleşmemiştir. Bazı keski ve kesme cihazları ile donatılmış TBM'ler yumuşak kayalar ve kömür damarlarında denenmek istenmiş fakat istenen sonuçlara ulaşılamamıştır. James Robbins isimli mühendis 1956 yılında, kalem keski yerine döner disklerin kullanılması fikrini ortaya atmıştır. Toronto'daki bir uygulamada günde 38m'lik ilerleme gerçekleşmiştir. Bu uygulama, TBM'lerin yumuşak ve orta sert kayalarda ekonomik olarak kullanılabilmesinin göstergesi olmuştur.

Toronto'daki uygulamayı izleyen 26 yıl boyunca teknoloji oldukça yavaş ilerlemiştir. TBM yapımcıları dene-gör politikası izleyerek makinelerin daha sert ve aşındırıcı kayalarda kullanılmasını sağlamaya çalışmışlardır. 1970'lerin sonu ve 1980'li yılların başlarında Amerika ve Avrupa'da birçok üniversite ve araştırma kurumu disk kesicilerin sert

kayaçlardaki performansının fizik prensiplerini anlamak üzere çok sayıda araştırma yapmışlardır. Benzer şekilde yumuşak arazideki tünel teknolojisi de, Times nehrini 1824-1840 yılları arasında geçtiği meşhur Brunei şildinden başlayarak gelişim göstermiştir. Brunei'nin tasarımları 1864'de dairevi şilt patenti alan Peter Parlow tarafından geliştirildi. Bu şilt içine yerleştirilen astar segmentlerin itilmesi suretiyle baskı oluşturulması ve ön tarafında çamur (pasa) akışını ve uzaklaştırılışını temin edecek açıklığa sahipti. Bu şildin bir benzeri ile 1869'da Times nehri bir yılda geçilmiştir.

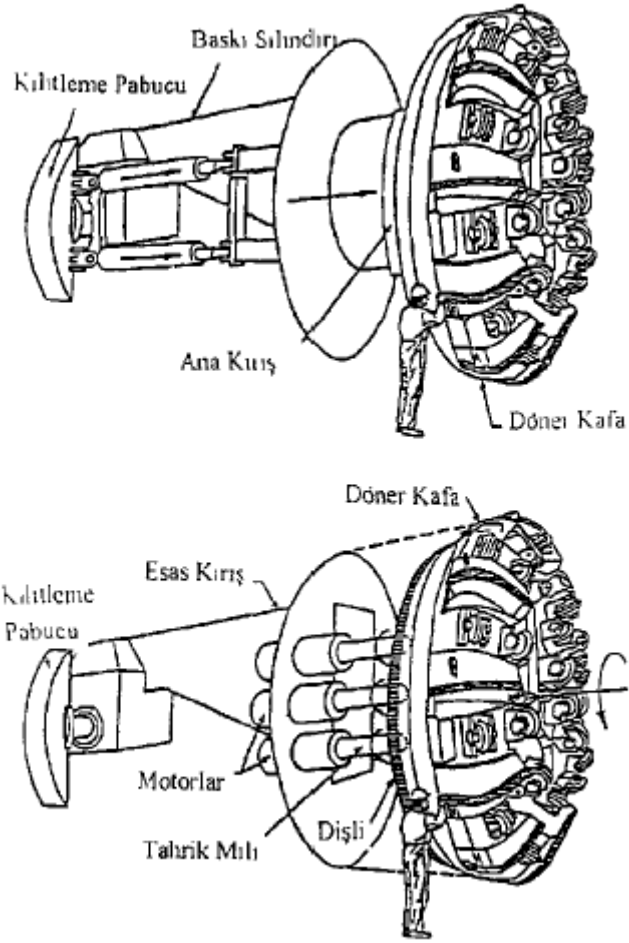
Bu makine, Arazi Basınç Dengeleme Makinesinin (EPB) ilk tipini teşkil etmektedir. EPB ve biraz daha karmaşık yapılı çamur basınçlı makineler kavram olarak esasta Avrupa'dan çıkmışsa da, asıl gelişmesini Japonya'da yapmıştır. Japonlar yeraltında yaptıkları nakliye ağını genişletirken, 1960'lardan 1980'lere doğru, bu tür şiltlerden yüzlercesini üretmiştir.

4.1.2 TBM Genel Özellikleri

TBM'lerin yapısal elemanları olarak kesici kafa, itme silindirleri, yönlendirme silindirleri, kilitleme pabuçları (gripper), kesici kafayı döndüren motorlar, beton tahkimat elemanlarını yerleştiren erektörler sayılabilir. TBM arkasında bulunan ve back-up sistemleri olarak adlandırılan kısımda ise hidrolik güç üniteleri, elektrik trafoları, tavan civataları için bir delici, havalandırma fanları, pasa nakliyatı için bant konveyörler, vagonlar bulunmaktadır. Şekil.4.1'de TBM bastırma ve tork sistemleri şematik olarak gösterilmiştir.

4.1.3 TBM Sınıflandırılması

TBM'ler genel olarak çalıştıkları formasyonlara göre sınıflandırılır. Genel anlamda sert kaya ve yumuşak formasyonlar olmak üzere iki ana grup mevcuttur. Sertten, yumuşak formasyona doğru gidildikçe TBM yapısal özellikleri de önemli ölçüde değişim gösterir. Çizelge 4.1'de çalışılan formasyonlara göre TBM sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.1 TBM bastırma ve tork sistemleri

	Yumuşak Zemin	Sert Kaya
EPB Şilt		
Çamur Şilti		
EPB Şilt (Yüksek Yoğunluklu Çamur)		
Çamur Şildi (Disk Keskinlerle)		
Şiltli TBM		
Şiltsiz TBM		
	Homojen Yumuşak Sert	Kompleks Homojen Yumuşak Sert

Çizelge 4.1 TBM sınıflandırılması

4.1.4 TBM Tipleri

150 yıllık bir gelişmeden sonra TBM 'ler her türlü tünel şartında mekanik kazının yapılabildiği noktaya gelmiştir. Eskiden sadece delme- patlatma ile açılacak formasyonlar bile artık TBM 'ler kullanılarak açılabilir.

Tam cephe tünel açma makineleri aynayı tamamen kesikleri ile kavrar ve kazı yapar. Kazma işleminin gerçekleşmesi için iki önemli kuvvet vardır. Kesici kafanın aynaya doğru itilmesi ve bu itilme sırasında kafanın dönmeye başlaması kazı olayını gerçekleştirir. Aynadan kazılan malzeme kesici kafa üzerinde bulunan kanatçıklar tarafından kesici kafa arkasındaki hazneye aktarılır. Hazne içerisinde bulunan konveyör çıkan pasanın nakliyatını yapar. Aynanın kesici kafa tarafından tamamen kapatılması aynaya yanaşmayı engeller. Bu yüzden kesiklerin değiştirilmesi zordur. Kimi durumlarda kesici kafanın önüne bir işçi geçerek kesikleri kontrol edebilir. Yeni geliştirilen modellerde kesikler kesici kafa içinden değiştirilebilmekte böylece aynaya geçmeye gerek kalmamakta ve çalışma güvenliği tehlikeye atılmamış olmaktadır.

Çalışacakları formasyona göre kesici kafa dizaynları ve kullanılan kesikler değişmektedir. Genel olarak yumuşak formasyonlarda ripper dişler, kale kesikler kullanılır. Kompleks zeminlerde ise kesici kafa hem ripperler hemde disk kesiklerden oluşur. Disk kesikler olası sert damarlı kayaları kesmek için kesici kafaya yerleştirilmiştir. Sert zeminlerde ise kesici kafada sadece disk kesikler bulunur. Lovat firmasının ürettiği TBM 'lerde kesikler kesici kafanın arkasından değiştirilebilmektedir.

4.1.4.1 Sert Kayaç Tünel Açma Makineleri (TBM)

- Şiltsiz TBM: Sert ve kendini tutabilen zeminlerde şiltsiz TBM'ler tercih edilebilir. Bu tarz TBM'ler ile kazı devam ederken tahkimat arka kısımda yapılabilir.

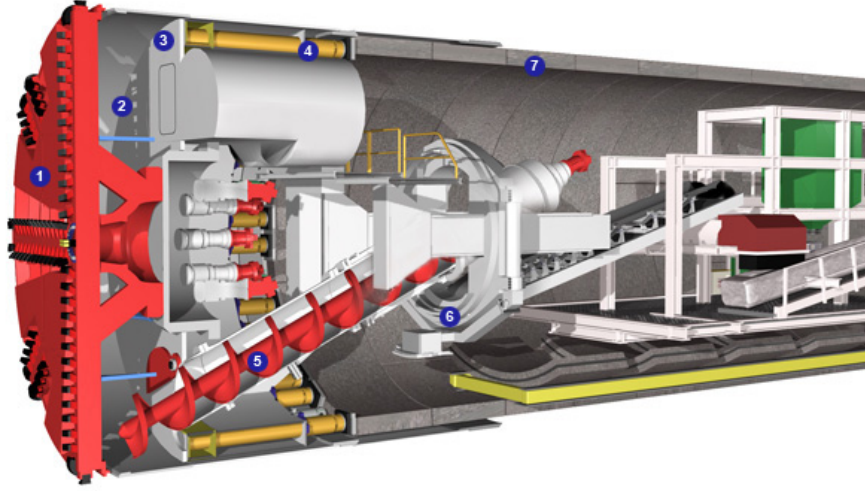


Şekil 4.2 Şiltsiz TBM

Hidrolik itme düzeni olan bir tam kesit tünel açma makinesi Şekil 4.2’de görülmektedir. Bu tarz TBM’lerle ilerleme yapılırken itme gücü; hidrolik tırnakların yandaki sağlam zemine basınç yapıp iyice sıkıştırılmasından sonra en önde bulunan ve kazıyı yapan kısmın ileri doğru hidrolik pistonlar vasıtası ile itilmesiyle sağlanır. Her kazı aşaması hidrolik pistonların uzunluğu kadar yapılabilir. Kazı işlemi bittikten sonra yan kısımlarda bulunan ve tırnak görevi gören pistonlar boşaltılır. Daha sonra arka kısım, ön kısma doğru çekilir ve tırnaklar tekrar sabitlenir. Bu işlemlerden sonra bir sonraki kazı işlemi başlatılır. Tahkimat sistemi ise önde kazı devam ederken arka kısımda yapılabilir.

Bu tarz TBM ‘ler ancak çok sağlam olan kaya ortamlarında kullanılabilir. Kayanın kendini tutabilecek ve itme silindirlerinin yapmış olduğu basınca dayanabilecek kalitede olması gerekmektedir.

- Tek Şiltli TBM: Tam daire şeklinde komple bir şilt mevcuttur. Tek şiltli TBM’ler yumuşak zeminlerde, kompleks zeminlerde ve kaya içerisinde açılacak tünellerde kullanılabilirler. Tahkimat olarak beton prekast segmentler kullanılır. Şekil 4.3 de tipik bir tek şiltli TBM görülmektedir.



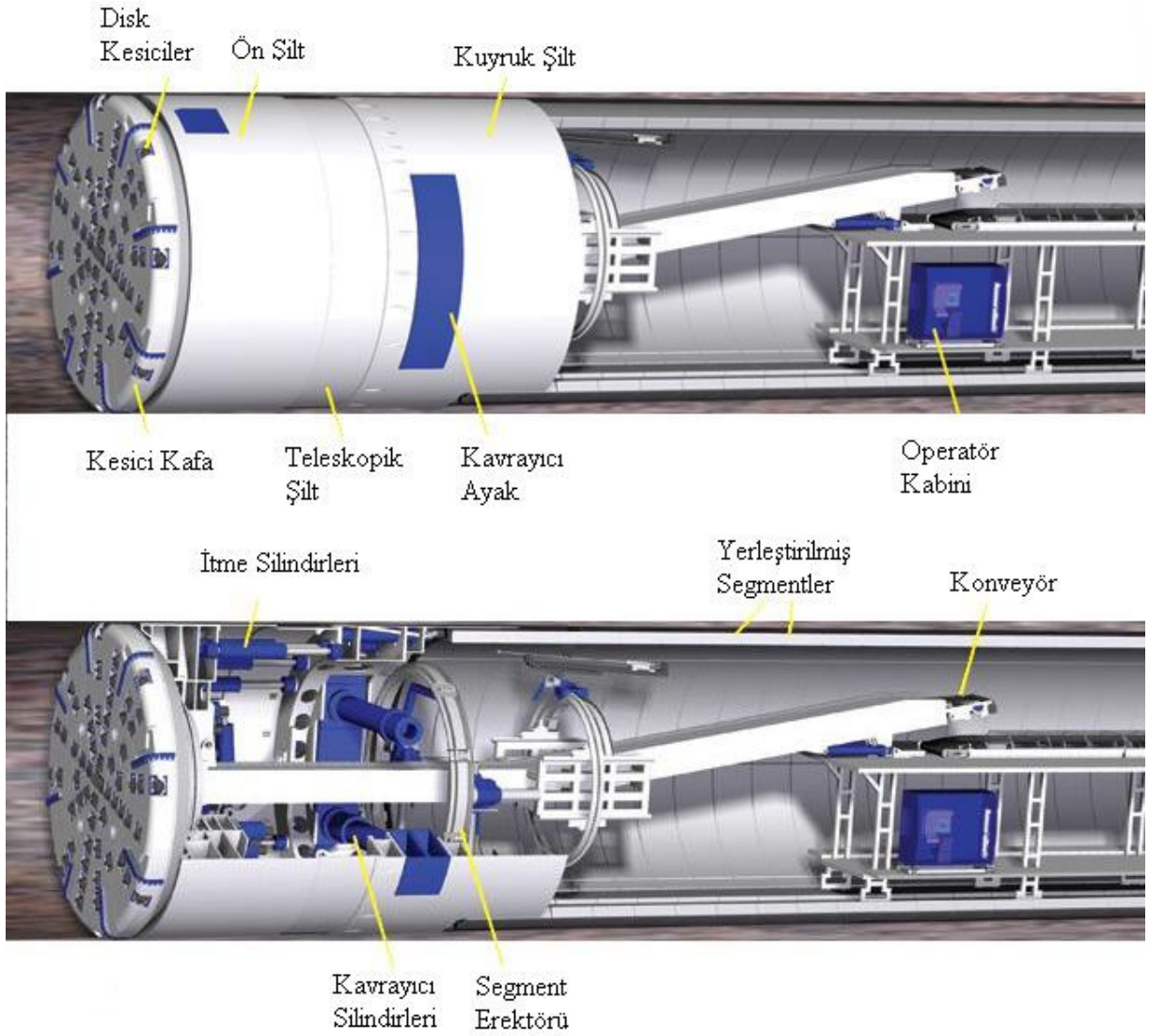
Şekil 4.3 Tipik bir tek şiltli TBM

Şekil 4.3'te "1" ile gösterilen kısım kesici kafa, "2" ile gösterilen kısım kazı bölmesi, "3" ile gösterilen kısım basınç bölümü, "4" ile gösterilen kısım itme silindirleri, "5" ile gösterilen kısım burgu konveyör, "6" ile gösterilen kısım erektör, "7" ile gösterilen kısım ise prekast beton segmentlerdir.

Bu tarz TBM 'lerde kazı 5 aşamada yapılır;

1. Aşama: İtme silindirleri segmentlere dayanarak kafayı ileri doğru iter. Bu durumda kafa hem aynaya doğru ilerlemekte hemde dönmektedir. Bu şekilde kazı yapılmaktadır. Kazıdan çıkan pası burgu konveyör ile aktarılıp atılmaktadır.
2. Aşama: Bir adımlık kazı tamamlanmış, silindirler tamamen açılmış ve kafa dönüş işlemi durdurulmuştur.
3. Aşama: İtme silindirleri kısım kısım kapatılır ve prekast segmentler yerleştirilir.
4. Aşama: Segmentlerin arka kısmına grout enjekte edilip tahkimat tamamlanır.
5. Aşama: Silindirler son yerleştirilen segmentlere dayanır ve TBM kazıya hazır hale getirilir.

- Çift Şiltli TBM: Çift şiltli makinelerde hem tek şiltli olarak hem de teleskopik olarak ana şildin içine uzanabilen kuyruk tarafındaki ikinci şildi bir kavrayıcılar (gripper) düzeneği ile kullanmak mümkündür. Bu tür yapının avantajı sabit kuyruk şildinde kaplama işi ile, kavrayıcıları iterek yapılacak delme işlerinin aynı anda gerçekleştirilmesine imkan sağlayan iyi arazi şartlarında çalıştığı zaman ortaya çıkar. Bu makineler sert ve kompleks zeminlerde kullanılabilir. Şekil 4.4 de tipik bir çift şiltli TBM görülmektedir.



Şekil 4.4 Tipik Çift Şiltli TBM

Çift şiltli TBM lerin gelişmesi 1980'li yıllarda olmuştur. Ön şilt kepçe tasarımı geliştirilmiş, keski ve kepçeler kırıklı arazide çalışırken görebilecekleri hasara karşı korunmuşlardır. 7-14 MPa dayanımlı yumuşak tüflerde geniş aralıklı disk kesiciler kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Çift şiltli TBM'ler tek şiltli gibi kullanılabilir. Bu durumda;

1. Aşama: Kavrayıcılar kapalı durumdadır. Çift şiltli TBM in tek şiltli gibi kullanımında kavrayıcı ve ana itme silindirleri kullanılmaz. İkincil itme silindirleri beton segmentlere dayanarak kesici kafayı aynaya doğru iter ve kafa dönmeye başlar.
2. Aşama: Kazı bitmiş itme silindirleri tamamen açılmış ve kesici kafa durdurulmuştur.
3. Aşama: İkincil itme silindirleri kapatılır ve erektör yardımı ile segmentler yerleştirilir

4. Aşama: İkincil silindirler segmentlere dayanmış ve TBM kazı için hazır konuma gelmiştir.

Klasik çift şiltli çalışma düzeninde ise;

1. Aşama: Kavrayıcılar açılmış ve TBM sabitlenmiştir. Ana itme silindirleri kesici kafayı aynaya doğru iter ve kesici kafa dönmeye başlar.

2. Aşama: TBM kazı yaparken erektör segmentleri yerleştirilir.

3. Aşama: Ana itme silindirleri tam olarak açılmış ve kazı bitmiştir. Kavrayıcılar kapatılır ve ikincil itme silindirleri segmentlere dayanarak kavrayıcı şildini kapatırlar.

Bu çalışma düzeninin en büyük avantajı kazı yapılırken aynı anda segmentlerin yerleştirilebilmesidir. Bu şekilde zamandan tasarruf edilir ve daha verimli çalışmak mümkün olur.

4.1.4.2 Yumuşak Zemin Tünel Açma Makineleri

- **Toprak Basıncı Dengeleme Makineleri (EPB)**

Arazi basınçlarını dengeleme esasına göre çalışan EPB makineleri ilk olarak Japonya'da 1960-70'li yıllarda görülmeye başlamıştır. (Maidle, 1996). Yapışkan olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminlerde ilerlemeler sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Genellikle bu gibi alanlarda kendini kısa süreli bile tutamayan kayaçların kazısında bu makineden faydalanılır. Temel çalışma prensibi su gelirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması, "bizzat arazi içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkan verilmesi" diye tanımlanabilir (Fiarant, 1994). Bir başka deyişle amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve tüm yüzeyi desteklemesidir. Bu destekleme basıncının tünel kalınlığındaki doğal arazi basıncını karşılayacak bir değerde ayarlanması gerekir. Bu makineler 10 bara (1MPa) kadar ulaşan basınç altında çalışabilecek şekilde yapılabilirler. En iyi çalışma koşulları arazi nemlilik oranının %10-15 veya daha az olduğu durumlardır.

EPB makinesi çok sert kayaçlardan (diskli) çok yumuşak olanlarına (kalem kesikli) kadar, değişik kayaç ve zemin formasyonlarında kullanılmak üzere tasarımılandırılabilirler. Çalışmalarındaki basitlik ve uygulama alanlarının genişliğinden dolayı, giderek çamur makinelerinin (slurry machines) yerlerinin almaktadırlar.

Bir EPB makinesinde kazılan malzeme bir burgu konveyör vasıtası ile kesici kafa haznesinden çıkarılır. Kazı bölgesindeki arazi basıncı azalmalarını ve bu yüzden oluşacak

oturmaları engellemek için malzeme aktarımının kontrollü bir şekilde yapılması gereklidir. Bu yüzden burgu konveyörün hızı malzeme çıkış hızını kontrol etmek için ayarlanabilir. İstenilen bir şekilde burgu hızı ayarlaması bilgisayarlı bir monitörden izleme sistemi ile yapılabilir. Dengeli ve güvenli bir kazı yapabilmek için malzeme çıkış hızının makine ilerleme hızına eşit olması gerekmektedir. Böylece zemin oturmalarına yol açabilecek fazla malzeme çıkışına izin verilmez. Eğer ortamda bulunan suyun basıncı atmosfer basıncının üzerine çok fazla çıkarsa kazı basınç kilitleri gerekebilir. Basınç kilitleri burgunun bir yanından diğerine doğru bir patlamayı önlemek için gereklidir ve burgunun çıkış kapısına konumlandırılır.

EPB makinelerinde diğer metotların aksine ikincil bir destekleme metodu kullanılmaz (sıkıştırılmış hava, süspansiyon). Akıcı formasyon döner kafadaki kesiciler tarafından kazılır. İttirme kuvveti aynaya kazı haznesinin doldurulmasıyla meydana getirilen basınç duvarı yoluyla transfer edilir. Böylece kazı bölgesinde kontrolden çıkmış bir şekilde malzeme akışı engellenmiş olur. Kazı bölgesindeki formasyon uygulanan ittirme kuvveti nedeniyle daha fazla yük alamadığı anda denge sağlanmış olacaktır. Formasyonu destekleme basıncı sağlanan dengenin üzerine çıkarılırsa kazı bölgesindeki akıcı formasyon çok daha sağlam bir hale gelecektir. Eğer tünel yeryüzüne yakınsa uygulanan ittirme basıncı sebebiyle kabarma meydana gelebilir.

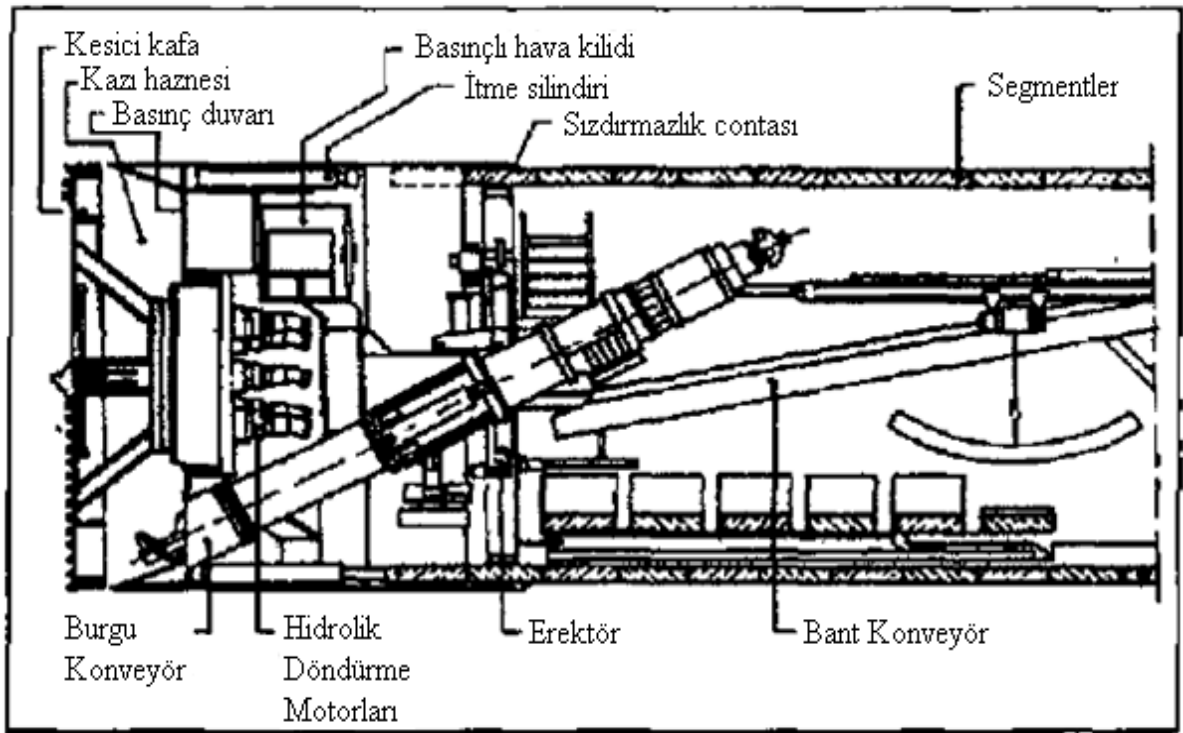
Tünel boyunca taşıma bant konveyörlerle, vagonlarla, damperli kamyonlarla ya da borular içerisinde taşınmayı kolaylaştıran bir katkı maddesi eklendikten sonra katı taşıma pompaları yardımıyla yapılabilir.

EPB çalışma prensiplerine bağlı olarak çeşitli isimler alır: Malzeme Hapsedici Şiltleri (Soil Confinement Shields), Su Basıncını Destekleme Şiltleri (Water Pressure Balance Shields), Yüksek Yoğunluktaki Çamur Şiltleri (High Density Slurry Shields) ve Çamur Şiltleri (Mud Shields). Eğer malzeme destekleme basıncını sağlayabilecek durumda ve burgu konveyörle taşınacak kıvamda değilse çeşitli kıvamlaştırıcı katkı maddeleri eklemek gerekebilir. Standart durumda, çeşitli katkı maddeleri kayaca ya kazı aynasında iken direkt olarak ya da kesici kafa haznesine alındıktan sonra enjekte edilir, fakat verimlilik açısından en iyisi birinci seçenektir. Bu maddeler 3 amaç için malzemeye enjekte edilir:

- Malzemenin akışkanlığını artırarak kesici kafa ve burgu konveyörden geçişini kolaylaştırmak,
- Kesici kafadaki herhangi bir boşluğu doldurmak ve stabiliteyi sağlamak,
- Kazılan kaya eğer geçirgense su fişkırmalarını önleyen hemen hemen sızdırmaz bir engel oluşturmak.

EPB makinesinin kazı anında çalışma aşamaları da şu şekilde gerçekleşmektedir:

Şekil 4.5 'te elemanları görülen bir EPB makinesinde öncelikle kesici kafanın döndürme motorları ile döndürülmesi ve kesici kafaya itirme silindirleri ile araziye destekleyecek kadar ya da biraz daha fazla kuvvet verilmesiyle akıcı zemin kazı haznesine dolmaya başlar. Kazı haznesi tamamen dolduktan sonra istenilen destekleme ortamı yaratılır ve kazılan malzeme burgu konveyör yardımıyla normal basınçtaki bölgeye alınmaya başlanır. Burada burgu konveyörün en önemli görevi aynada oluşturulan basıncın kademeli olarak düşürülmesi ve normal basınca indirilerek düzenli bir malzeme çıkışının sağlanmasıdır. Burgu konveyörün çıkış kapısından bant konveyöre boşalan malzeme kuyruk bölümde bekleyen vagonlara ulaşır ve buradan da kuyu ağzına taşınır.



Şekil 4.5 EPB Şilti kesit görünümü

Eğer kazı sırasında istenilen miktarda malzeme geliri olmuyorsa yani malzeme yerine su geliyor veya zeminin fazlasıyla kuru olması nedeniyle burgu konveyörden malzeme geçişi mümkün olmuyorsa, kazı aynasına doğru malzemeyi daha kaygan yapan ve böylece su geçişini engelleyen bir katkı maddesi enjekte edilmesi gerekebilir. Kazı ilerlerken şildin tam arkasına taşıyıcı raylarla getirilen beton segmentler erektörler yardımıyla yerleştirilirler. Bu arada segmentler ve zemin arasında kalan boşluklar beton-bentonit karışımı ile doldurularak kapatılırlar.

- **Çamur Şilti (Slurry Machine)**

Bu tip şiltler, arazinin çok akıcı olduğu veya tünel güzergâhı boyunca böyle akıcı formasyonlara da rastlanabileceği durumlar için yapılmışlardır. Makine, değişken devirli tam cephe kesme kafasına sahip, astarlara dayanarak itmek suretiyle kuvvet oluşturan tam bir şilt tasarımıdır. Genel olarak kalem keskilere kullanılmakla birlikte bazen disk keskilere kombinezon da yapılabilmektedir. Diskler kalem keskilere nazaran biraz daha öne çıkmış vaziyette olurlar. Böylece, büyük bloklara rastlandığında disklerin onları parçalaması ve kalem keskilere kırılması önlenmiş olmaktadır.

Makine kalem keskilere tam cephe şilt tipinden "daima basınç altındaki kafa ile çalışıyor" olma özelliğiyle anılmaktadır. Akıcı çamur (genellikle bentonit) ayna ile kesme kafası arasındaki boşluğa pompalanmaktadır. Bu sıvı aynadan sıyrılarak kazılıp çıkarılan malzeme ile karışmakta ve bu karışım bir çamur pompası ile geri tarafa alınıp yeryüzüne pompalanmaktadır. Yeryüzünde süzülüp temizlenen sıvı, yeniden devreye sokularak kullanılmaktadır.

Bu makine Japonya'da ve Batı Avrupa'da göçmeyi önlemek için kazı aynasını basınç altında tutmanın gerekli olduğu şartlarda geniş çapta kullanılmaktadır. Çalışma esnasında dikkat edilecek başlıca hususlar:

- Aynaya gereğinden fazla basınç vermemek (bu durumda yeryüzünde kubbeler oluşabilir),
- Yeryüzüne ulaşacak şekilde baca oluşmasını önlemek için kazılan malzeme miktarını dikkatle ölçmek.

Bu tip makineler derinliği az olan yerlerde kullanılmakta olup, uygulanan basınç değeri 3 bar mertebesinde dir.

4.2 NATM Tünel İnşa Metodu

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nin amacı, zeminin mukavemetini korumak, tüneli çevreleyen zeminde kendi kendini destekleyen geniş bir zon oluşturmaktır. Diğer bir deyişle, bu yöntemde jeolojik ortamda iksasız veya ekonomik iksa kullanımı ile tünel açılmaktadır. Tünel açılımı sonucu meydana gelecek deformasyonlar dolayısıyla çatlakların en aza indirilmesi için tünel açıldıktan sonra kısa zamanda bir ön kaplama yapılması gereklidir. Bunun için pasif iksa yerine esnek iksa denilen aktif iksa sisteminin kullanılması günümüzde daha yaygındır. Bu iksa uygulamasında shotcrete (püskürtme beton) ve bulonlar kullanılmakta ve iksa ortamının mukavemetinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır (Vardar M.,1977).

Ayna kazısı en az iki aşamada yapılır. Tünel geometrisinin büyük olması ve zeminin kötüleşmesi durumunda tünel aynasındaki kazı üç aşamalı olarak yürütülür. Kazı aşamaları sırasıyla;

- Üst Yarı,
- Alt Yarı
- Taban (gerekirse)

şeklindedir.

4.2.1 Kazı

Ayna kazısı desteklemesi ve pasa taşıma işlemleri aşağıda belirtilen ekipmanlar yardımıyla yapılır:

- Tünel Tipi Paletli Ekskavatör (kırıcılı)
- Paletli Yükleyici (tünelde)
- Lastik Tekerlekli Yükleyici (şaft tabanı stok alanında)
- Damperli Kamyonlar

4.2.2 Ön Destekleme

Tünelin ilk desteği olan dış kaplamanın görevi iç kaplama yapılana kadar hafriyatı yapılmış olan boşluğun güvenli bir şekilde korunmasıdır. Bu süre yaklaşık olarak 6-7 ay ile birbuçuk sene arasında değişebilmektedir. NATM'da tünel desteklenmesi prensip olarak bir açıdan yerüstündeki hafriyat çukurlarının desteklenmesine benzemekte olup aradaki fark tünel tavanının dairesel şeklinden istifade edilmesi ve çevreleyen zeminin aşırı gevşemesine müsaade etmeden zeminin/kayanın kendi taşıma gücünden yararlanılmasıdır.

Tünel desteğinin (çelik kafes iksa + çelik hasır + püskürtme beton + kaya bulonu) ve çevreleyen zemin birlikte bir kemer oluşturması ve bunun korunmasının sağlanması ile tünel üzerine gelen arazi yükü taşınabilmektedir. Sorunlu zeminlerde her kazı aşamasından sonra tünel desteği oluşturulmaktadır. Normal durumlarda ise bu işlem tüm ayna hafriyatının tamamlanmasını müteakip yapılmaktadır.

Üst yarıdaki her ilerleme adımında yapılan işlemlerin genel sıralaması aşağıdaki gibidir:

- a) Süren çubuk yerleştirilir (gerekirse),
- b) Hafriyat (tek hamlede – yada kötü zemin koşullarında 2-3 parçada),
- c) Tek bir kat ince püskürtme betonun tatbiki ile yeni açılan kaya yüzeyi kaplanır,
- d) Hasır çelik donatısı yerleştirilir,
- e) Kaya sınıfına göre varsa çelik kafes iksa yerleştirilir
- f) Püskürtme beton tatbik edilir,
- g) Kaya bulonları tatbik edilir.

Alt yarıda her ilerleme adımında yapılan işlemlerin genel sıralaması aşağıdaki gibidir:

- a) Hafriyat,
- b) Görünür kaya yüzeyini örtecek kadar yapılan püskürtme beton,
- c) Hasır çelik teçhizatın yerleştirilmesi,
- d) Kaya sınıfına göre varsa iksanın geri kalan kısımlarının yerine yerleştirilmesi,
- e) Püskürtme beton tatbikatı,
- f) Kaya bulonlarının montajı.

Zemin koşullarının beklenilenden çok daha kötü olduğu olağanüstü durumlarda ya da beklenilmeyen reaksiyonlarla karşılaşıldığında aşağıdaki tedbirlerin alınmasına gerek görülebilir:

- a) İlerleme miktarının değiştirilmesi (ilerleme adımının kısaltılması, destekleme elemanları ilgili miktarların artırılması),
- b) Aynanın kısmi olarak kazılması ve açılan kaya yüzeyinin hemen püskürtme beton ile desteklenmesi,
- c) Kaya bulonlarının adetlerinin ve boylarının ve püskürtme beton kalınlığının artırılması,

d) Püskürtme beton ayağın kemerin dışına doğru kalınlaştırılması.

Desteklemenin yeterliliği, ilave desteklerin gerekliliği ve acil durumlarda alınacak tedbirler geoteknik ölçümlerle gözlenir.

4.2.3 Drenaj ve Su Gelirinin Bertaraf Edilmesi

Tünel içerisinde su ile karşılaşılabilceğinin beklenilmesi gerekmektedir. Su gelirinin nitelik ve niceliği jeolojik koşullara bağlı olmaktadır. Karşılaşılan durumlara göre alınması gereken tedbirler aşağıda ifade edilmiştir:

a) Su gelirinin az olması hali: Böyle durumlarda tünel etrafının püskürtme beton ile örtülmesi sonucunda su gelirinin kesileceği beklenmektedir.

b) Mevzi su gelirinin olması hali: Su gelirinin çıktığı noktalarda plastik boru veya hortum kesilerek çabuk donan harç veya püskürtme beton yardımıyla tesbit edilmek suretiyle sürekli drenaj temin edilir.

c) Geniş alanlarda su gelirinin olması halinde ise plastik örtü duvara çakılabilir.

Son kaplama çalışmalarına başlanmadan önce taban seviyesi üzerinde bulunan dolgu malzemesinin kazısı ve temizliği yapılır.

Kaya bulonları ile civataları arasındaki fazladan çıkıntı yapan kısımları kesilerek su izolasyonu için daha sonra yapılacak membran kaplamaya zarar vermemesi için çıkıntılı kısımları harç ile kaplanır. İnvart betonu dökülmeden önce tabana tesviye amacıyla grobeton dökülür.

5. DÜNYA NÜFUS ARTIŞI ve ULAŞIM

Dünya nüfusu 1804 yılında 1 milyar, 1927'de yani 123 yıl sonra 2 milyar, 33 yıl sonra 1960'ta ise 3 milyardı. Bundan yalnızca 14 yıl sonra 1974'te 4 milyara ulaştı. 1987'de (13 yıl sonra) 5 milyar oldu. 1999'da (12 yıl sonra) ise 6 milyar kişiye ulaştı (UNPDID, 2007). Önümüzdeki elli yıl içinde beklenen dünya nüfusu ise şu şekilde özetlenebilir: 2010'da 6.8 milyar, 2020'de 7,6 milyar, 2030'da 8.3 milyar, 2040'ta 8.9 milyar, 2050'de 9.4 milyar (USCBID, 2007). Sonuç olarak nüfusun artması, ancak bu artmanın yavaşlaması beklenmektedir.

Günümüzde her biri birkaç ülke nüfusuna eşit devasa şehirlerde yaşayan insanların başlıca sorunlarından biri ulaşım"dır. Geleneksel yöntemlerle yavaş çözülen ya da çözülemeyen ulaşım sorunu bu süreçte bir çok yan etkiler doğuran ve belirli stratejik emeller sonucunda yükselen karayolu taşımacılığı, enerjiye bağımlı ve sanayisi gelişmemiş (ya da gelişmekte olan – belki de sömürgeleşmekte olan!) ülkeleri tam bir çıkmaza sürüklemektedir. Geleceği görme becerisine sahip yöneticilerin ve mühendislerin hem gezegeni kurtarma, hem de daha kaliteli (ucuz, hızlı, hatasız vb.) ulaşım yöntemlerini uygulamaya başlamaları ile birlikte artık olmazsa olmaz bir sistem olan toplu taşımacılık ve bunun özellikle raylı biçimleri son derece gündemdedir ve uygulanmaktadır.

Şehir planlayıcılar, mimar ve mühendislerin ortak çalışmaları ile artık şehirler dikey yönde büyüme eğilimine girmişlerdir. Yüzeyde yatay gelişme, yeşil alanların yok edilmesi, gezegenin gereğinden çok ısınması, gereksiz biçimde karayolu ve fosil yakıtlara yönelme, altyapı sistemleri olmayan ya da yarım yamalak olan köy şehirlerin ya da dev köylerin kurulmasına yol açmış, öngörüsü, ufku, vicdanı kıt ve insan sevgisinden yoksun kişilerin önderliğinde bir çok devletin ekonomik bağımsızlığı tehlikeye düşmüş, insanlığının mutsuzluğu bir çok ek sorunlar getirmiş, mühendisliğin ana amaçlarında olan hayat kalitesini yükseltme gibi bir ülkü gündemden düşmüştür.

Nüfus, yerleşim alanı (yüzölçümü), kişi başına düşen milli gelir ve yaşam kalitesi düzeyleri gibi basit parametreler ile ilişki kurularak şehirleşme ve bunun getirdiği değişim ihtiyaçları arasında bir bağlantı sağlanabilir. Şehirleşmenin gelişmesi, nüfus artışına paralel olarak yeni yerleşim bölgelerinin açılması (yüzeyde yatay gelişme) ya da mühendislik disiplinlerinin daha etkin ve akılcı kullanılmasıyla dikey büyümeye olanak sağlanmıştır. Artık üzerinde her biri yüzlerce metrelik binalar olan ve yerin altında kat kat tünellerin kullanılmakta olduğu şehirler bu ihtiyacın sonucudur. Gelişmiş ülkelerde planlamacılar, mimar ve mühendisler 50-100 yıl sonrasının şehirlerinin tasarımını bugünden yaparlarken, muazzam yükseklikte yapılar ve

karayolunun olmadığı, ulaşımın yeni anlamlar taşıdığı dikey yerleşim bölgeleri hayal etmektedirler. Yüzyıllar boyunca insanoğlunun eğilimi iki boyutlu bir uzayda ve yerin yüzeyinde kalmak olmuştur(ITA-AITES,2007).

Sonraları ihtiyaçlar sonucunda, bazen de merak ve araştırma nedeniyle bu uzayın dışına çıkma arzusu ve çabası ortaya çıkmıştır. Bunun için önce yine iki boyutta genellikle genişleme, daha sonra ise 3. boyutta yukarıya ya da aşağıya ilerleme yöntemi kullanılmıştır.

Yer altı yapılarının inşası zor olmakla birlikte aslında insanlığın ilk yerleşimlerinde de yer altı yapılarını görmekteyiz. Doğanın kendisinin oluşturduğu yer altı açıklıkları, insanoğlunun korunma, yerleşme barınma ve saklanma ihtiyaçlarını karşılamıştır. İnsan-Yer altı ilişkisini belkide en eski ve en iyi örneklerinden biri İç Anadolu bölgemizdeki “Kapadokya” olarak adlandırılan kesimdeki yerleşimlerdir. M.S. 400 civarına kadar giden bu yapılar 1985’ten beri UNESCO tarafından kültürel miras olarak kabul edilmiş olup koruma altındadırlar. Çevredeki birkaç yanardağın püskürttüğü ve yaklaşık 10000 hektara yayılan ve Neogen’e kadar uzanan bir yaşa sahip bu genelde yumuşak malzemeler burada yaşayan insanlar tarafından barınma mekanı, kilise ve manastıra dönüştürülmüştür. Bu bölgedeki yer altı şehirleri ve temiz su – atık su tünelleri o dönem için hayati önem taşımaktaydı.

Günümüzde şehirlerdeki ulaşım amaçlı tüneller, yüzeyden trafik yükünü aldığı gibi trafik gürültüsünü de ortadan kaldırmaktadır. Bunun yanında hava kirliliğini azaltıcı çok önemli etkenlerdir, trafik ortadan kalkınca alanlar başka ve daha yararlı amaçlar için kullanılabilen, toplu ulaşımlarla trafik daha akıcı olmaktadır (Köksal, 2007).

5.1 Otogar – Başakşehir Arası İstanbul Metro Tünelleri Projesi

İstanbul metrosunun ilk yapım aşaması Taksim-4.Levent arasında 1992’de başlamış ve 2000 yılında hat kullanıma açılmıştır. Şu anda bu hattın uzatılması işleri ve ayrıca yeni hatların yapımı devam etmektedir. Esenler (Otogar) ve Başakşehir arasında çift hat şeklinde kazılan 21.2 Km uzunluğundaki metro hattı bunlardan birisidir. Hattın hizmet edeceği bölgede nüfus oldukça yoğundur ve çevrede çok katlı binalar, sanayi bölgeleri ve yoğun trafik söz konusudur. Proje sahibi İETT ve müteahhit firma Gülermak-Doğuş Konsorsiyumu’dur.

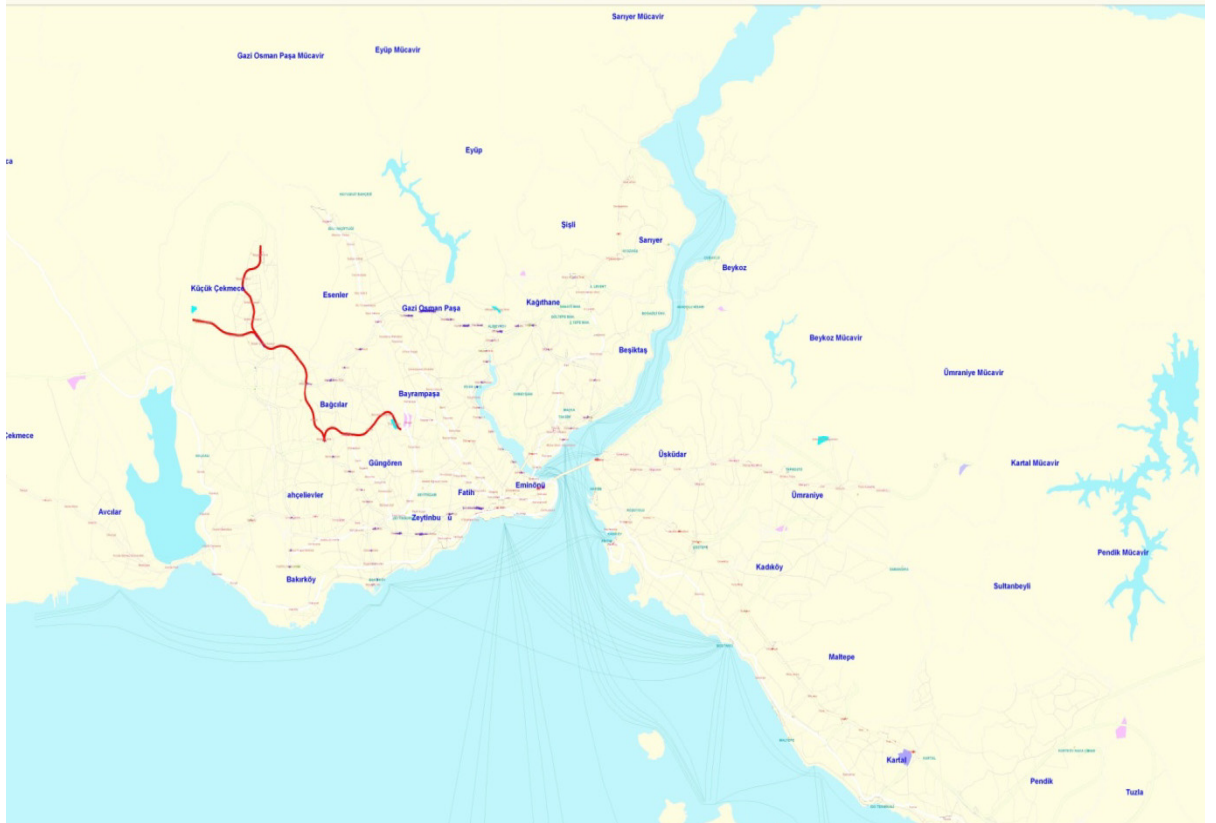
Esenler-Başakşehir hattının kazısı Mayıs 2006’da başlamıştır. Hattın Esenlerden Kirazlı istikametine doğru iki EPB TBM ve Başakşehirden Kirazlı 1 yönünde iki TBM ile kazısı sürdürülmektedir. İkitelli Güney Sanayi ile Olimpiyat hattı kazısı NATM metodu ile yapılmaktadır.

Projedeki hatlar, uzunlukları, ulaşım tipleri ve kazım metotları alttaki tabloda görülmektedir.

Başlangıç	Bitiş	Metro Kazı Tipi	Raylı Sistem Tipi	Uzunluk (Km)
Otogar	Kirazlı	EPM TBM	LRTS (Hafif raylı)	5,3
Kirazlı	Başakşehir	TBM	METRO	11,5
İkitelli	Olimpiyat	NATM	METRO	4,1

Çizelge 5.1 Proje bilgileri

Kirazlı 1 istasyonundan başlayacak metro sistemi Mahmutbey, İstoç, İkitelli, İmes sanayi sitesine ulaşacaktır. Buradan itibaren iki ayrı yol izleyecek olan metro hattının birincisi Başakşehir Konutlarına diğeri de ise Olimpiyat Stadına uzanacaktır. Hat üzerinde toplam 16 istasyon bulunacaktır. Esenler'de Aksaray- Havalimanı hafif metrosu ile bütünleşmiş olacak Otogar-Bağcılar-İkitelli-Başakşehir-Olimpiyat Stadı metrosunun İkitelliye kadar Esenler, Menderes, Çiçin, Bağcılar, Kirazlı 1, Kirazlı, Mahmutbey, İstoç, İkitelli, Güney Sanayi istasyonlarından oluşmakta, burada ikiye ayrılan metro hattının Olimpiyat Stadı bölümü ise Halkalı Yolu, Viyadük, Olimpiyat Parkı ve Araç deposu duraklarından oluşmaktadır. Başakşehir hattında ise İkitelli Sanayi 2, İkitelli Sanayi, Başak Konutları 1 ve Başak Konutları 4 istasyonları yer alacaktır.



Şekil 5.1 Projenin İstanbul'daki yeri



Şekil 5.2 Hatta incelenecek olan kısım

6. TÜNEL JEOLJİSİ

6.1 Genel Stratigrafi

İnceleme alanında Karbonifer temel ve Eosen, Oligosen, Miyosen ve Kuvaterner yaşlı birimler yüzeylemektedir. Görünür tabanda Paleozoik yaşlı bir temel ile bu temel üzerinde Mesozoik çökeller olmaksızın direk olarak Senozoik yaşlı çökeller diskordan olarak oturmaktadır.

6.1.1 Paleozoik Temel

Yaygın olarak Trakya Formasyonu olarak isimlendirilen ve kumtaşı - kıltaşı - silttaşı ve şeyl aralanmalarından oluşan, genel olarak Grovak olarak isimlendirilen formasyonun litolojilerinin; sağlam kaya - geçiş kayacı ve zemin özellikleri içeren değişik seviyelerden oluştuğu bilinmektedir. Sağlamlılık bakımından değişik özellikler sunan bu formasyon; yer yer çok sağlamken üst seviyelerde ayrışma ve bozuşma sonucu topraksı bir görünüm kazanmıştır. Hersiniyen ve Alp Orojenik hareketlerinden etkilenerek son derece kıvrımlı ve kırıklı özellikler kazanan formasyonun kaya mekaniği karakteri litolojik heterojenliğinin yanında aynı zamanda kapsadığı çok miktardaki süreksizlik düzlemleri ile tariflenebilir. Farklı tektonik hareketlerin oluşturduğu çok değişik konumda eklem takımları, tabakalanma düzlemleri ve dislokasyon zonlarının etkisi ile kaya aşırı kırıklı ve çatlaklı bir özellik kazanmıştır.

6.1.2 Kırklareli Formasyonu

Yörede Trakya Formasyonu üzerinde diskordan olarak oturan ilk birim; Eosen yaşlı Kırklareli Formasyonudur. Eosen Denizin derinliğine göre; resifal kireçtaşı, kireçtaşı - kumtaşı - marn - şeyl seviyeleri ile temsil olur. Denizin sığ kesimlerinde resifal kireçtaşları, nispeten daha derinde kireçtaşı - kumtaşı - marn karmaşığı, daha derinde ise marn ve şeyl çökelmiştir.

Resifal kireçtaşları; beyaz - kirli beyaz renkli karstik boşluklu, orta sert - sert, bol fosilli (mercan, alg, nummulit, bryozoa), tabakalanmasız ve kırıklıdır.

Kireçtaşı - kumtaşı - marn aralanmasında; kireçtaşları kirli beyaz renkli, orta sert - sert olup yer yer ayrılmış, kırıklı, boşluklu ve fosillidir.

Marn seviyeleri; kirli beyaz renkli, kırılma yüzeyleri midye kabuğu şeklindedir.

6.1.3 Gürpınar Formasyonu

Altta Kırklareli kireçtaşlarının üzerine diskordans olarak; Üst Oligosen yaşlı Gürpınar

Formasyonu gelir. Birim; tabanda, seyrek kil bantlı kum, çakıl seviyeleri ile başlamaktadır. Üste doğru kum, silt bantlı kil seviyeleri hakim olmaktadır. Beyaz-kirli beyaz - kahverengi - sari renkli kumtaşı ve çakıltaşı seviyeleri; gevsek yer yer iyi çimentoludur. İnce, orta, çok kalın tabakalı, kamalanmalı, yanal ve düşey geçişlidir.

Killi seviyeler; mavi yeşil renkli, plastik yarı plastik, fisürlü ve kalın tabakalı olup yer yer kum, çakıl ve silt ihtiva eder. Kil seviyeleri içinde ince bantlar halinde linyit kömürü tabakalarına rastlanmıştır.

6.1.4 Çukurçeşme Formasyonu

Üst Miyosen yaşlı Çukurçeşme Formasyonu, Gürpınar Formasyonunun üzerinde diskordan olarak bulunur. Bu formasyonun hakim litolojisi kumdur. Bununla birlikte kumlar yanal yönde sık sık siltli kum, çakıllı düzeyele geçmekte ve seyrek olarak bu birimlerle ara katkılı kil bantları gözlenmektedir.

Kum; sari kahverengi, bağlantısız veya zayıf kil bağlantılıdır. Dane boyutları; ince kumdan çok kaba kuma kadar değişiktir.

Çakıl seviyeleri; bağlantısız ve az kil bağlantılıdır. Daneler; ince çakıl, iri blok boyutlarında, köşeli ve az yuvarlaktır.

6.1.5 Güngören Formasyonu

Altta bulunan Çukurçeşme Formasyonu üzerinde konkordan olarak bulunan birim; Üst Miyosen yaşlıdır. Gölsel fasiyeste çökelen bu formasyon; kil, marn ve seyrek kireçtaşlarının ardalaşmasından oluşmuştur.

Killer; yeşil, mavi renkli, yumuşak, düzensiz ince tabakalı ve bol maktra fosillidir. Marn ve kireçtaşları; beyaz, kirli beyaz renkli, orta sert - yumuşaktır. Kireçtaşları; boşluklu olup ince ve düzensiz tabakalıdır.

6.1.6 Bakırköy Formasyonu

Alttaki Güngören Formasyonu üzerine uyumlu olarak oturan Üst Miyosen yaşlı birim; krem-beyaz renkli, fosilli ve boşluklu bir yapı sergilemektedir. Yer yer kristalize olan kireçtaşı tabakalarında oolitik yapı gözlenmektedir. Formasyon tabanında mavi-yeşil renkli, yumuşak kil ve marn seviyeleri artmaktadır. Kil ve marnlarda merceksel tabakalanma ve kamalanma gözlenmektedir.

6.1.7 Alüvyon

Çevreye hakim litolojilerin kırılması, parçalanması, erozyonu sonucu taşınması ve vadilerde çökmesi ile oluşmuşlardır. Bu çökeller genellikle kireçtaşı, grovak gibi kayalardan oluşan ufak çakıllı, kum ve kil boyutunda tutturulmamış taneler ile ince kum ve kil bantlarından meydana gelmiştir. Çizelge 6.1'de İstanbul'un genel stratigrafik kesiti gösterilmiştir (Yıldırım, 2003).

Bu çalışmada incelenen Otogar-Bağcılar metro hattı tünelleri genel olarak Gürpınar ve Güngören Formasyonlarına ait killi zemin tabakaları içinde açılmaktadır.

PALEOZOYİK	MESOZOYİK				SENOZOYİK				LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
	ORDOVİSİYEN → KARBON.	KRETASE	TERTİYER		TERTİYER		KALINLIK (m)			
			ÜST KRETASE	KIRKLARELİ	Ü. EOSEN-A. OLİGOSEN	PLİYOSEN				
								TRAKYA		
				KURU-ÇEŞME	BAKIRKÖY	KUVA-TERNER	HOLOSEN			
								5 - 20	ÇAKIL, KUM, SİLT, KİL (ALÜVYON)	Uyumsuzluk
								10 - 50	SİLTİLİ KİL : Kızıl renkli, kumlu, yuvarlak - yarı yuvarlak kuvarsit çakıllı, çok katı - sert, gevşek tutturulmuş	Uyumsuzluk
								20 - 30	KİREÇTAŞI - MARN : Beyaz, tebeşirimsi, Maktra'lı, kil-kum arakatmanlı	
								10 - 30	KİL: Koyu gri - boz renkli, karbonatsız veya az karbonatlı, siltli, bitki artıklı, yüksek plastisiteli	
								20 - 30	KUM: Sarımsı gri, açık kahverenkli, çakıllı ve siltli, kil arakatmanlı, tutturulmamış veya çok gevşek tutturulmuş	
								> 200	KİL / KİLTAŞI - KUM ARDALANMASI : Kil : Grimsi yeşil, aşırı konsolide, fissürlü Kiltaş : Gri - yeşil, ince - orta katmanlı Kum : Açık gri, sarımsı krem renkli, kuvarsit-kireçtaşı çakıllı ve bloklu	Uyumsuzluk
								> 250	MARN - KİREÇTAŞI: Beyaz - sarımsı bej - gri renkli orta-kalın katmanlı, fosilli KARBONATLI KUMTAŞI : Krem renkli, ince taneli RESİFAL KİREÇTAŞI : Beyaz - bej renkli, sert, som yapılı, karstik, bol fosilli ÇAKILTAŞI - MARN: Grimsi bej renkli, bol grovak çakıllı, kum - silt - kil arakalanmalı	Uyumsuzluk
								> 250	KİREÇTAŞI - LAV - TÜF: Grimsi mor - kahve rengi, sert, yer yer çok ayrılmış, bloklu, çörtlü KİREÇTAŞI-KONGLOMERA-FLİŞ: Kahverengi, ince - orta katmanlı, yanal geçişli	Uyumsuzluk
								> 1000	KUMTAŞI (Grovak) - SİLTTAŞI - KİLTAŞI: Mavimsi gri - kahverenkli, kireçtaşı mercekli SİLİSLİ ŞEYL - RADYOLARYALI ÇÖRT YUMRULU KİREÇTAŞI : Mavimsi boz renkli KİREÇTAŞI - ŞEYL : Kumlu - siltli, KİREÇTAŞI: İri yumrulu KİREÇTAŞI - ŞEYL - SİLTTAŞI KUMTAŞI - SİLTTAŞI - KUVARSİT. KUVARSİT: Beyazımsı gri, çok sert ARKOZ - ŞEYL : Alacalı, pembe, çapraz tabakalı KONGLOMERA-KUMTAŞI : Mor renkli, iri çakıllı, arkoz görünümlü	(Ölçeksiz)
								> 2500		

Çizelge 6.1 İstanbul'un stratigrafisi (Yıldırım, 2003)

7. ZEMİN ORTAMINDA EPB TBM İLE TÜNEL KAZISI SIRASINDA ÖRTÜ KALINLIĞI VE HACİM KAYBININ YÜZEY DEPLASMANLARINA ETKİSİ

7.1 Giriş

Araştırma bölgesi olarak Otogar-Bağcılar metro hattının Esenler - Çiçin istasyonları arasında yeralan bölgesi seçilmiştir. Bu bölgede örtü kalınlığı çok değişken olup bölgede yoğun yapılaşma vardır.

Kazı sağ hat tüneline Lovat marka, sol hatta ise Herrenknecht marka EPB TBM makineleri ile yapılmıştır. Tünel aynası ve tavanı bu kısımda genç yaşlı çökellerden oluşmaktadır. Bölgedeki yapı kalitesinin düşük olması nedeniyle, yoğun bir ön araştırma sürecinden sonra özenli bir kazı aşaması ile bölgede kazı tamamlanmıştır.

Örtü kalınlığının, zemin parametrelerinin, yeraltı su seviyesinin ve kazı sırasındaki hacim kaybının yüzey deformasyonlarıyla doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. Tezin bu kısmında yaklaşık aynı zemin koşullarında, farklı örtü kalınlıklarına sahip ve yoğun deplasman ölçümlerinin olduğu kısımlarda seçilen 6 bölgedeki yüzey deplasmanları incelenmiştir.

7.2 İncelenen Kesitlerin Özellikleri

Yüzey deformasyonlarının hangi parametrelere bağlı olduğunu anlayabilmek için İstanbul Otogar Bağcılar Metro hattının Esenler ve Bağcılar ilçeleri içinde kalan kısmından 6 farklı kesit seçilmiştir. Bu kesitlerin seçiminde örtü kalınlıklarının farklı olmasına ve seçilen bölgelerde deformasyon ölçüm noktalarının yoğun olmasına özen gösterilmiştir.

<u>Kesit No</u>	<u>Kilometre</u>	<u>Tünel Merkezinin Derinliği (m)</u>	<u>YASS (m)</u>
Kesit 1	2+114	16	13
Kesit 2	1+859	19	5,5
Kesit 3	1+970	20	15
Kesit 4	1+075	34	22
Kesit 5	1+242	47	33
Kesit 6	1+482	23	-

Çizelge 7.1 Seçilen kesitlerin genel özellikleri

Seçilen kesitler yaklaşık 1 kilometre uzunluğundaki bir kısımdan seçilmiştir. Böylelikle benzer jeolojik formasyonlara ait zemin birimlerinin genel davranışının birbirlerine yakın olacağı düşünülmüştür.

7.3 Hesap Parametreleri Seçimi

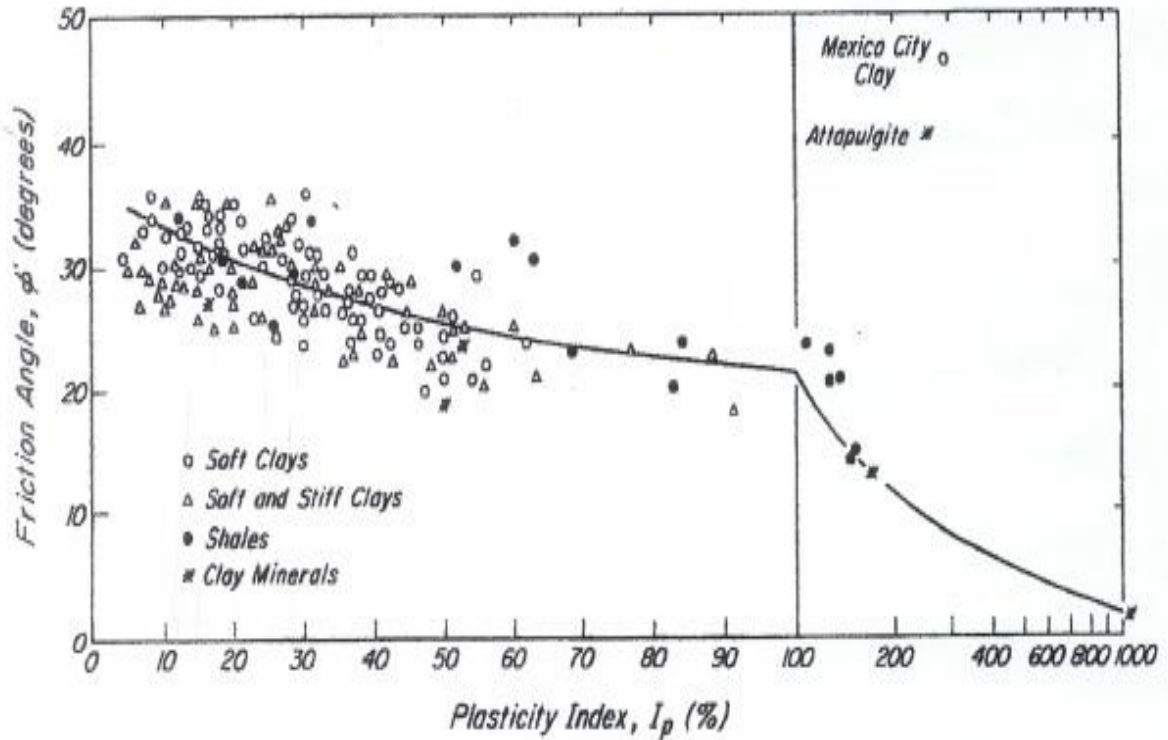
Hesaplarda kullanılacak olan zemin parametrelerinin değerleri sondaj verilerine göre seçilmiştir.

Dolgu katmanında herhangi bir veri olmayışından ve birimin heterojen olmasından dolayı yaklaşık değerler alınmıştır.

Killi zeminlerde drenajsız kohezyon değeri SPT deneyi darbe sayılarına bağlı olarak aşağıdaki formülden hesaplanabilir. Formülde f_1 değeri yüksek plastisiteli killerde 4kN/m^2 , düşük plastisiteli killerde ise 6kN/m^2 olarak seçilebilir (Stroud, 1974).

$$C_u = f_1 \times N \quad (7.1)$$

Kohezyonlu zeminler için efektif içsel sürtünme açısı (ϕ) tahmininde plastisite indisine bağlı olarak Şekil 7.1 deki abaktan yararlanılmıştır. (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996)



Şekil 7.1 Kohezyonlu zeminlerde plastisite indisine bağlı içsel sürtünme açısı değerleri.

(Terzaghi, Peck and Mesri, 1996)

Kohezyonlu zeminlerde “ E_u ” değeri drenajsız elastisite modülü olup drenajsız kayma dayanımı Su ya ve plastisite indisine bağlı olarak Çizelge 7.2’ den alınabilir. (Yıldırım, 2004)

OCR	Eu / Su		
	Ip<30	Ip= 30-50	Ip>50
<3	600	300	125
3-5	400	200	75
>5	150	75	50

Çizelge 7.2 Eu değerleri (Yıldırım, 2004)

Bu bölgedeki killerin tamamı hafif aşırı konsolide (OCR<3) nitelikte olup plastisite indisleri ortalama 30-50 arasında bulunmaktadır. Hesaplarda,

$$E_U = 300S_U \quad (7.2)$$

olarak alınmıştır. Hesaplar drenajlı parametrelerle yapılmıştır. Drenajsız elastisite modülünü drenajlı elastisite modülüne çevirmek için 7.3 'teki formülden yararlanılmıştır. Pressiyometre deney yapılan noktalarda da aynı işlem yapılmış pressiyometre sonuçları ile karşılaştırılarak elastisite modülü seçilmiştir.

$$E' = \frac{2(1+\nu^1)}{3} E_U \quad (7.3)$$

Bu formüldeki “ ν^1 ”poisson oranı, “ E' ” drenajlı elastisite modülü, “ E_U ” değeri ise drenajsız elastisite modülüdür.

Granüler zeminlerde içsel sürtünme açısı (ϕ) seçiminde, düşey efektif gerilmeye göre düzeltilmiş SPT değeri (N_1) ile 7.4 'teki denklemden yararlanılmıştır (Wolf, 1989).

$$\phi^0 = 27.1 + 0.3N_1 - 0.054N_1^2 \quad (7.4)$$

Granüler zeminlerde SPT 'ye göre önerilen Es değerleri için AASHTO (2003)'te verilen Çizelge 7.3'den faydalanılmıştır.

Zemin Cinsi	400 N_1
Siltler, kumlu siltler, az kohezyonlu karmaşıklar	700 N_1
Kaba kumlar ve az çakıllı kumlar	1000 N_1
Kumlu çakıllar ve çakıllar	1200 N_1

Çizelge 7.3 Granüler zeminde Es değerleri (AASHTO, 2003)

Buradaki “ N_1 ” değeri derinlik için düzeltilmiş SPT sayısıdır.

Kayma modülü ise Elastisite modülüne bağlı olarak 7.5’ teki formülden hesaplanmıştır.

$$G = \frac{E'}{2(1+\nu)} \quad (7.5)$$

Buradaki “G” zeminin kayma modülü, “E” elastisite modülü, “ ν ” değeri ise poisson oranıdır.

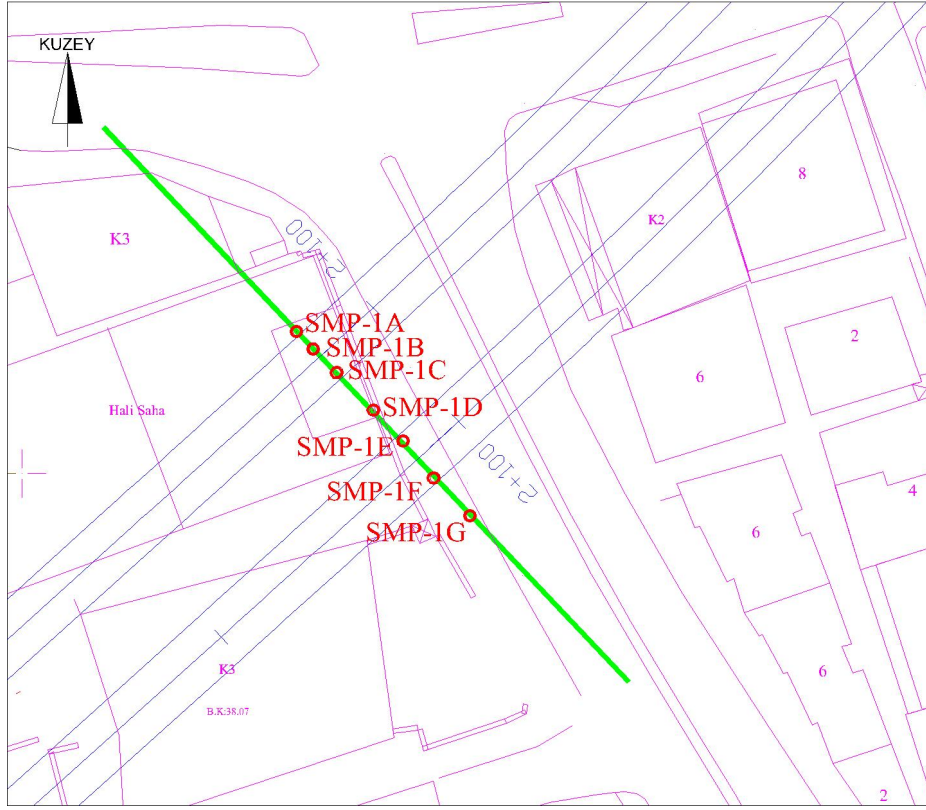
7.4 Seçilen Tünel Kesitlerinin Sayısal Analizi

İnceleme bölgesi içinde seçilen tünel kesitlerinde öncelikle ölçülen yüzey deplasmanları Chow (1994) ve Gauss eğrisi (Peck, 1969; O’Reilly ve New,1982; New O’Reilly,1991; Fujita,1989) yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiş ve yüzey düşey deplasmanları dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, bu tünel kesitleri arazi zemin tabakalanması ve zemin özellikleri dikkate alınarak “Plaxis 2D Version 8.2” isimli bilgisayar programından yararlanılarak modellenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar analizi sonuçları arazi ölçümleri yanında Chow ve Gauss eğrisi modelleri ile karşılaştırılmıştır. Aşağıda incelenen kesitler için kesit özellikleri ve analiz sonuçları sunulmuştur.

7.4.1 Kesit 1

Kesit 1 Sağ hattaki tünele göre Km: 2+114'te denk gelmektedir. Bu noktada örtü kalınlığı yaklaşık 12,75 metredir. Yer altı su seviyesi yüzeyden 13 metre derindedir. Kesitin yer aldığı bölgenin vaziyet planı Şekil 7.2'de, düşey kesiti ise Şekil 7.3 de gösterilmiştir.



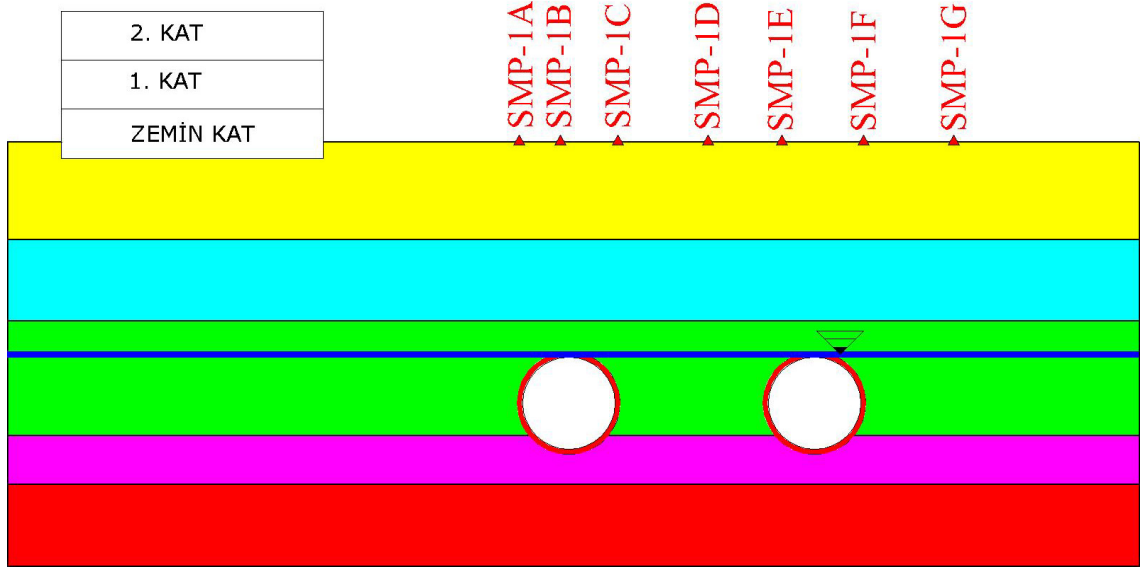
Şekil 7.2 Kesit 1 planı

Bölgeye en yakın sondaj YK-05B 'dir. Bu sondaja ait laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları alttaki tabloda özetlenmiştir (Çizelge 7.4).

KESİT-1											
YK-05B SONDAJI											
LİTOLOJİ	Derinlik	DBHA (g/cm ³)	ÖZGÜL AĞIRLIK	LL (%)	PL (%)	PI	SPT		PRESİYOMETRE	E(kg/cm ²)	PL (kg/cm ²)
0-6m Dolgu							0-6				
6-11m Kil-1	6m	1,803	2,673	46	23	23	6-11m	Nort :16	10.00 m	203,78	8,6
	10,50m	1,854	2,687	54	26	28					
11-18m Kum-1	13,50m		2,652	30	-	-	11-18m	Nort :33	15.00 m	42,35	5,7
	15m	1,904	2,691	56	25	31					
18-21m Kil-2	19,5m		2,655	28	-	-	18-21m	Nort :33	20.00 m	125,17	11,2
	22,50m		2,66	36	22	14					
21-26m Kum-2	24		2,658	37	22	15	21-26m	Nort :50	25	380,07	≥ 11
	25,5		2,659	33	20	13					

Çizelge 7.4 YK-05 Sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları

DÜŞEY DEPLASMAN OKUMA NOKTALARI



Şekil 7.3 Kesit 1 'in olduğu kısmın düşey kesiti

7.4.1.1 1. Tünel Kazısı Tamamlandıktan Sonraki Deplasmanların Tahminleri

Kesit -1'in olduğu kısımda 1. Tünel kazısını tamamladıktan sonra gerçekleşen deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Chow (1994) yüzeyde uygulanan bir nokta yükten uzakta, düşey deplasmanları hesaplamaya çalışmıştır. Kazı nedeniyle oluşan zemin kaybını, tünel doğrultusu boyunca çizgisel yük olarak modellemiştir. Tünel üzerindeki oturma "S" pratikte;

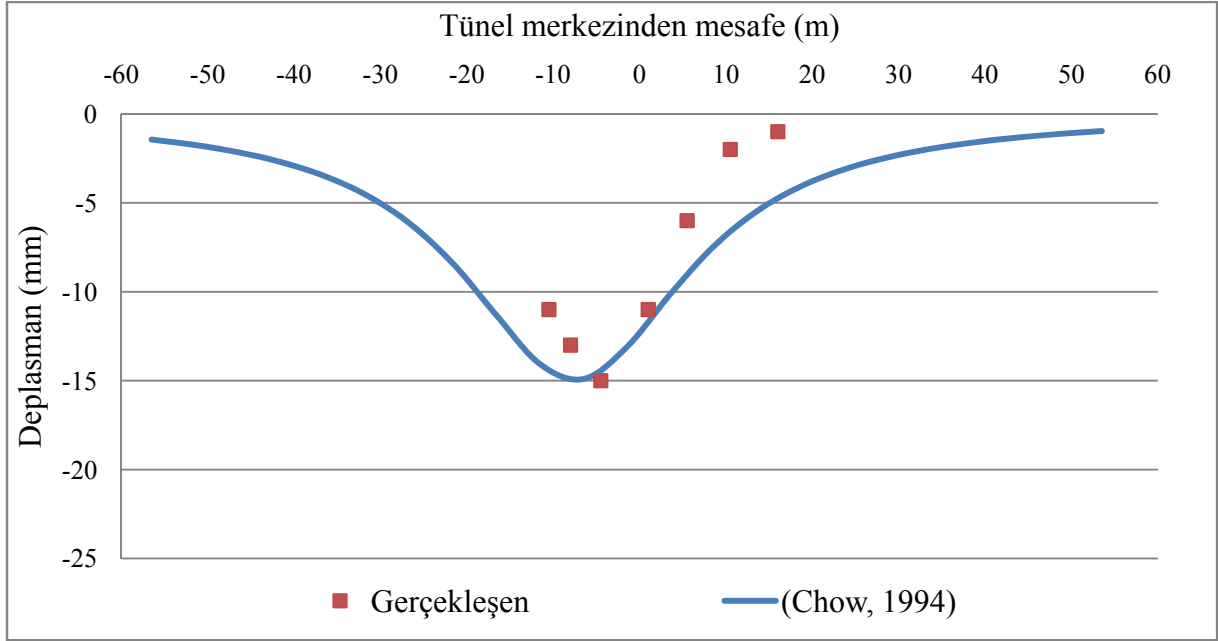
$$S = \frac{\gamma D^2 Z^2}{8G(x^2 + Z^2)} \quad (2.16)$$

bağıntısı ile ifade edilmiştir. Burada "γ" zeminin birim hacim ağırlığı, "D" tünel çapı, Z tünel derinliği, "x" tünel ekseninden itibaren yatay mesafe, "G" zeminin kayma modülüdür. Zeminin homojen olması kabulü ile Çizelge 7.5'de verilen ortalama değerler seçilmiştir.

KM: 1+859	ÖRTÜ KALINLIĞI (m)	TÜNEL ÇAPI (m)	BİRİM HACİM AĞIRLIK kN/m ³	G kayma Modülü kN/m ²
TÜNELLER	12,75	6,5	17	6000

Çizelge 7.5 Nümerik hesap parametreleri

Hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlar ile karşılaştırılması Şekil 7.4'te gösterilmiştir.



Şekil 7.4 Kesit 1'de 1. Tünel kazısından sonra Chow (1994)'a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Tünel açılması sırasında yüzeyde oturma plakalarından alınan oturma değerleri kullanılarak tünelin açılması sırasında meydana gelen hacim kaybı tahmin edilmiştir. Hacim kaybı değerlendirmelerinde birçok araştırmacı tarafından önerilen (Peck, 1969; O'Reilly ve New, 1982; New ve O'Reilly, 1991; Fujita, 1989) ve yaygın olarak kullanılan normal olasılık eğrisi (Gauss eğrisi);

$$S = S_{\max} e^{(-x^2/2i^2)} \quad (2.12)$$

eşitliğinden yararlanılmıştır. Bu eşitlikte S_{\max} tünel merkezi üzerindeki maksimum yüzey oturmasını, "x" tünel merkez çizgisine yatay uzaklığı ve "i" ise oturma eğrisinin büküm noktasının tünel merkezine yatay uzaklığını göstermektedir. Formülde "i" için aşağıdaki yaklaşım gözönüne alınmaktadır (Yapı Merkezi, 1992, Arıoğlu vd, 1992, Arıoğlu vd., 2002c)

$$i = 1,392 \times r \times \left(\frac{Z_0}{2 \times r} \right)^n \quad (2.13)$$

Burada "r" tünel yarıçapı, " Z_0 " tünel merkezinin yüzeye olan uzaklığı, "n" ise büyük ölçüde formasyon cinsi ve uygulanan tünel teknolojisine bağlı istatistiksel katsayıdır. Killi

formasyonlar için $n=0,704$ değerleri kabul edilmiştir. (Yapı merkezi,1992, Arıoğlu vd., 1992, Arıoğlu vd., 2002c).

Yüzey oturmasına bağlı birim uzunluktaki hacim kaybı V_s ise aşağıdaki eşitlikler yardımı ile bulunmaktadır.

$$V_s = \sqrt{2\pi i} S_{\max} \quad (2.14)$$

Hacim kaybı (V_s) 2.15' teki eşitlik ile elde edilebilir. Burada, $(\pi \times r^2)$ tünel daire kesit alanıdır. "r" tünel daire yarıçapını " V_L " ise hacim kaybı oranını göstermektedir.

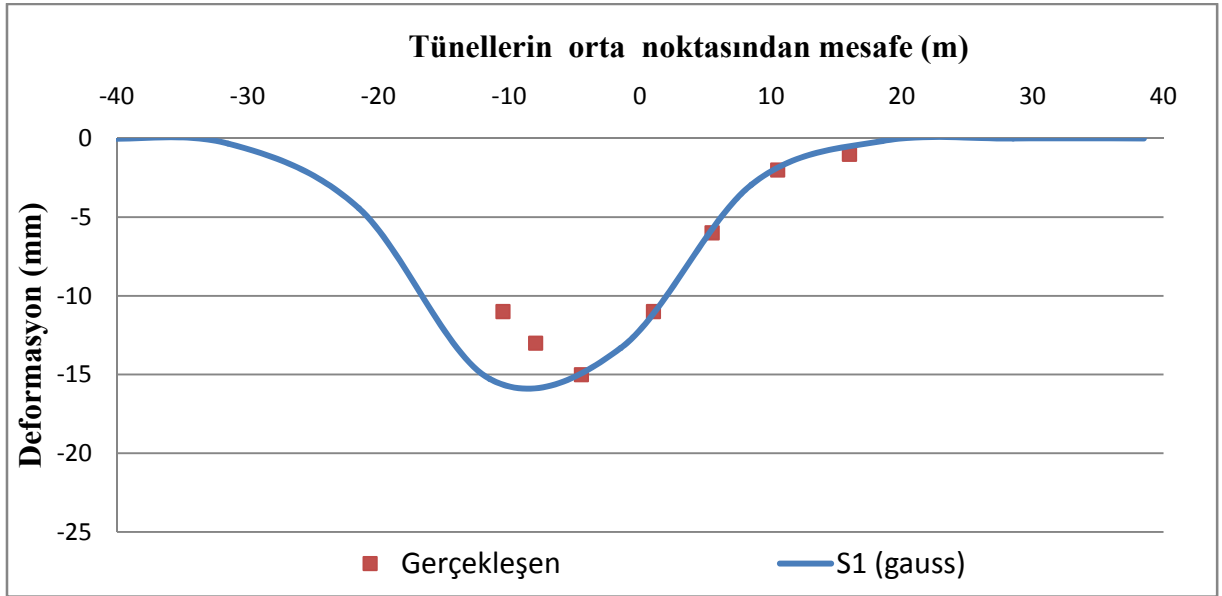
$$V_s = V_L \times \pi \times r^2 \quad (2.15)$$

S_{\max} 'a bağlı Gauss Eğrisi tahmininde gözönüne alınan hacim kaybı oranına göre hesaplanan deplasmanlar Çizelge 7.6'deki gibidir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)					
Nokta no:	0,80%	0,90%	1,00%	1,10%	S gerçekleşen
SMP-1A	-11,66	-13,12	-14,57	-16,03	-11,00
SMP-1B	-12,38	-13,93	-15,48	-17,02	-13,00
SMP-1C	-11,66	-13,12	-14,57	-16,03	-15,00
SMP-1D	-7,55	-8,49	-9,44	-10,38	-11,00
SMP-1E	-3,88	-4,37	-4,85	-5,34	-6,00
SMP-1F	-1,34	-1,51	-1,67	-1,84	-2,00
SMP-1G	-0,28	-0,31	-0,35	-0,38	-1,00

Çizelge 7.6 Kesit 1'de 1. tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan hacim kaybına bağlı deformasyonlar

Burada S_{\max} değerine göre " V_L " değeri % 1,1 seçilmiştir. Bu hacim kaybı oranına göre Gauss eğrisinden hesaplanan deplasmanlarla gerçekleşen deplasmanlar Şekil 7.5'te görülebilir.

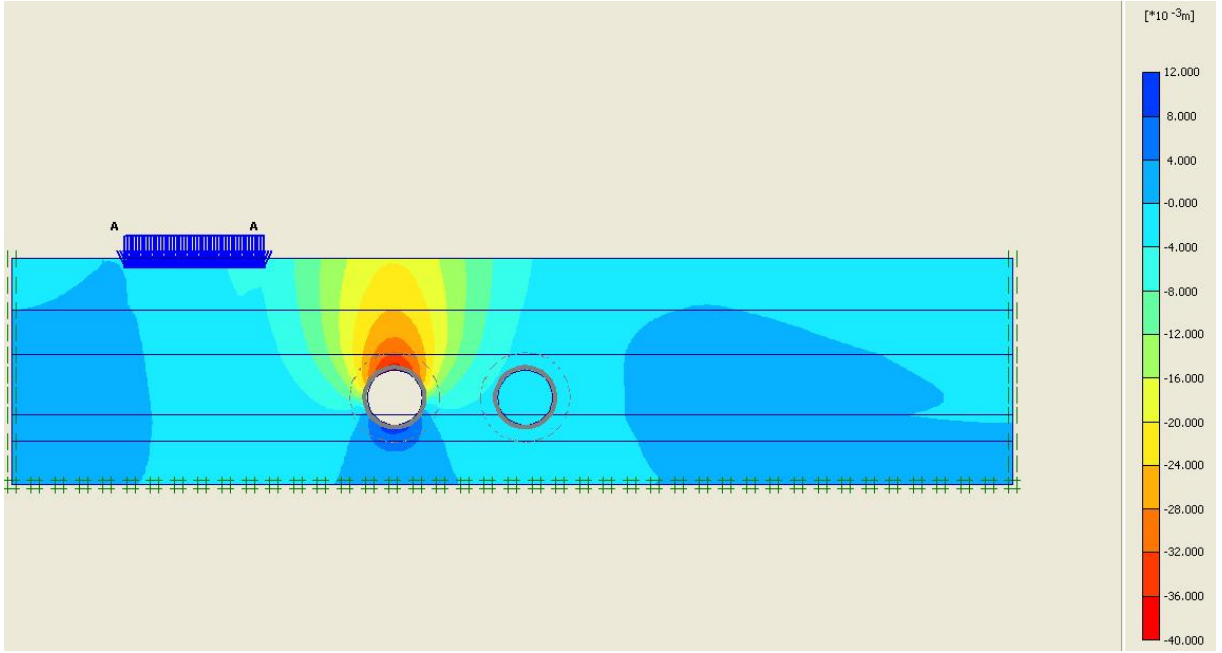


Şekil 7.5 Kesit 1 de 1. Tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan deplasman değerlerinin gerçekleşenlerle karşılaştırılması

Kesit-1 aynı zamanda Plaxis isimli sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiştir. Modellemede Çizelge 7.7'deki parametreler kullanılmıştır. Araziye uygulanan presiyometre deney sonuçlarından hesaplanan Elastisite modülleri sondaj verilerine göre bulunan değerlerden daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bölgede aynı birim içinde yapılan presiyometre sonuçlarının dahi birbirinden farklı sonuçlar vermesi gözönüne alınarak hesaplarda sondaj verilerine göre hesaplanan Elastisite modülleri kullanılmıştır.

Kesit-1		γ_n	γ_s	$k_x = k_y$	E'	ν	c'	ϕ	YASS
Tabaka Sınırları	Litoloji	kN/m ³	kN/m ³	m/gün	kN/m ²	-	kN/m ²	°	m
0-6 m	Dolgu	16	18	0,1	10000	0,3	1	20	13
6-11 m	Kil-1	18,2	20,2	0,0001	22500	0,4	2	28	
11-18 m	Kum-1	18,7	20,7	1	21500	0,3	0,1	35	
18-21 m	Kil-2	19	21	0,0001	47500	0,45	8	28	
21-26m	Kum-2	19	21	1	63000	0,35	0,1	40	

Çizelge 7.7 Plaxis programında Kesit-1 için kullanılan parametreler

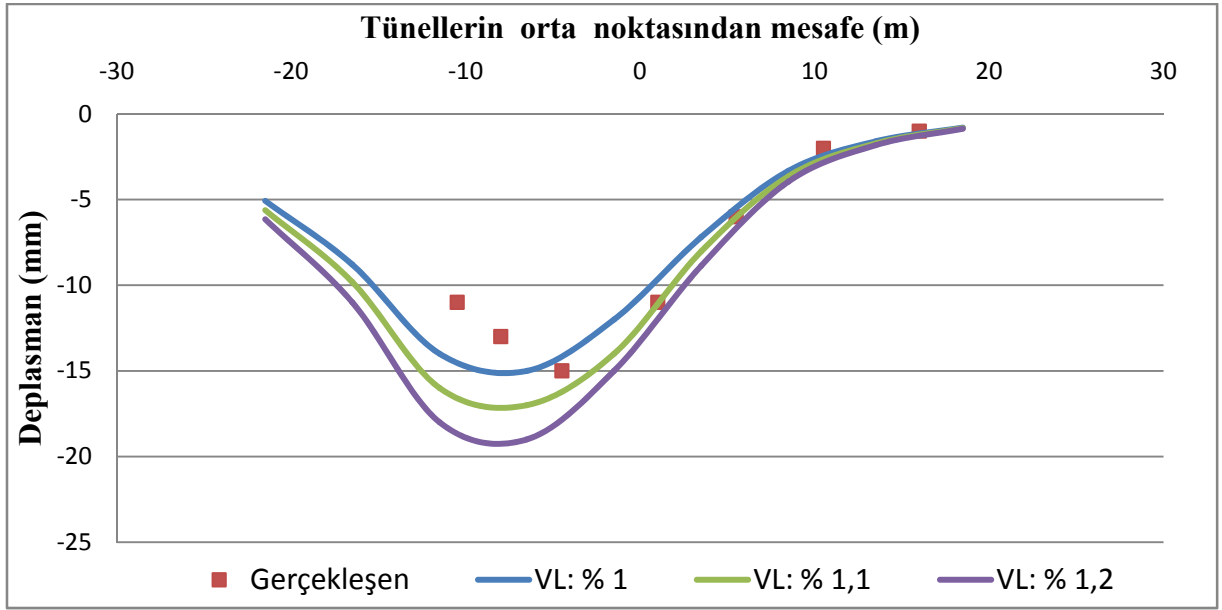


Şekil 7.6 Kesit 1 de 1.Tünel kazısından sonra Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar

Plaxis programında model; zemin parametreleri tanımlanarak oluşturulur. Analiz adımları;

1. Adım: Yüzeyde yayılı yük olarak tanımlanan bina yükleri aktif edilir ve çözülür,
2. Adım: Bina yüklerinden kaynaklanan deplasmanlar sıfırlanarak başlanır. 1. Tünelin bulunduğu kısımdaki zemin pasif edilir ve bu kısımdaki zemin suyu boşaltılır. TBM aktif edilir ve tünelde bir büzülme (hacim kaybı) oranı tanımlanır.
3. Adım: TBM pasif hale getirilip tünelde kalıcı kaplama olarak kullanılacak prekast segmentler aktif hale getirilir.
4. Adım: 2. Tünelin içinde bulunun zemin pasif hale getirilip zemin suyu boşaltılır. TBM aktif hale getirilip hacim kaybı oranı tanımlanır.
5. Adım: TBM pasif hale getirilip segmentler aktif hale getirilir ve kazı tamamlanmış olur.

Nümerik model çözümünde tünel kazımı aşamasında tünelde belirli bir büzülme katsayısı tanımlanır. Bu katsayı hacim kaybı oranına eşittir. Şekil 7.7’de değişik hacim kaybı oranı kabulleri ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanı dağılımları ve ölçülen değerler gösterilmiştir.



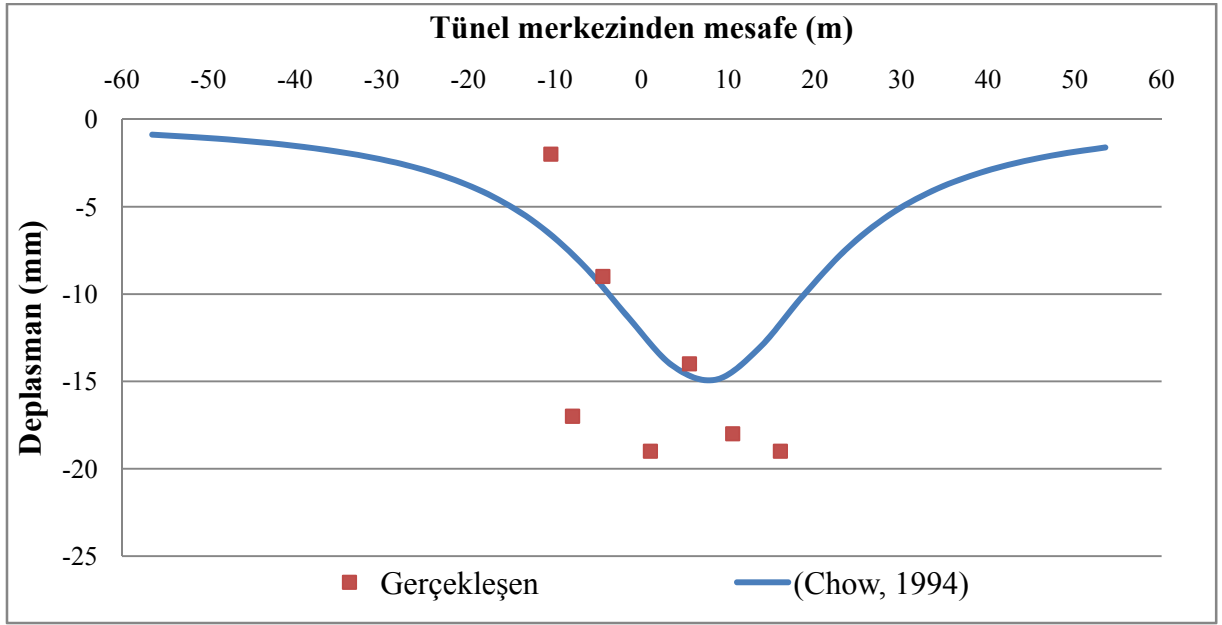
Şekil 7.7 Kesit 1 de 1. Tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanları

Nümerik modelleme ile hesaplanan deplasmanları gerçekleşen deplasmana en yakın elde edildiği hacim kaybı oranı değerinin Kesit-1 deki 1. Tünel için %1,1 olduğu gözlenmektedir..

7.4.1.2 Sadece 2. Tünel Kazısından Kaynaklanan Deplasmanların Tahminleri

Kesit -1'in olduğu kısımda 2. Tünel kazısı tamamlandıktan sonra gerçekleşen deplasmanlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Kesit -1 için parametreler Çizelge 7.4'teki gibi seçilmiştir. Chow (1994)'ün nümerik yaklaşımları ile hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması Şekil 7.8'da gösterilmiştir.



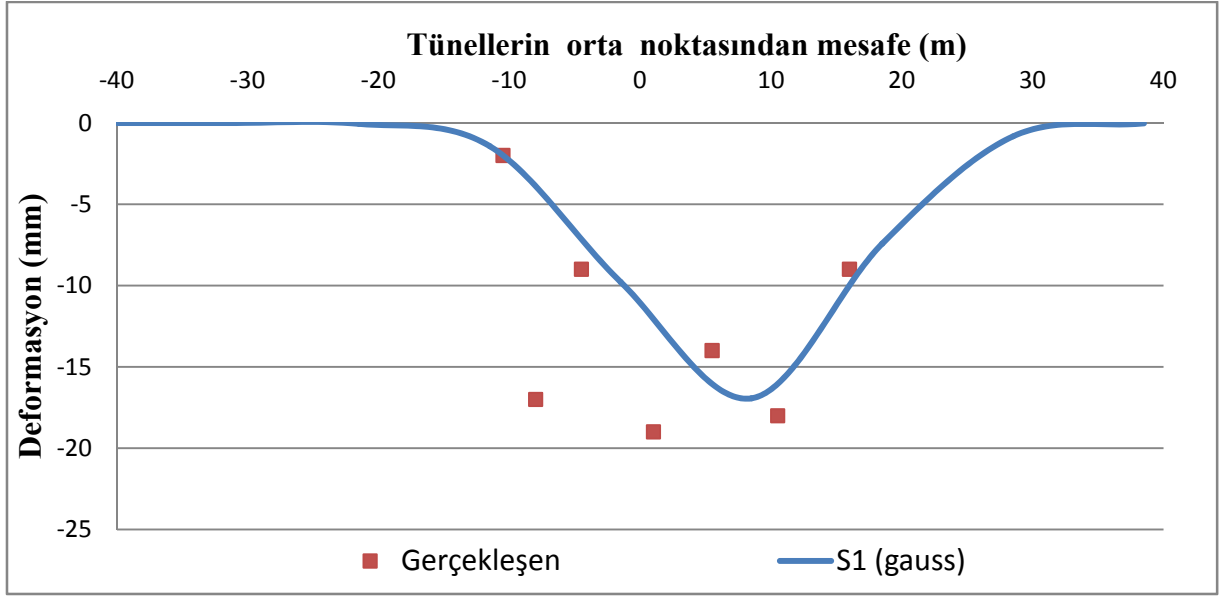
Şekil 7.8 Kesit 1’de Sadece 2.Tünel kazısından kaynaklı deplasmanların Chow (1994)’ a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerinin karşılaştırılması

Smax’a bağlı Gauss Eğrisi tahmininde varsayılan hacim kaybı oranına göre hesaplanan deplasmanlar Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)					
Nokta no:	0,90%	1,00%	1,10%	1,20%	S gerçekleşen
SMP-1A	-1,51	-1,67	-1,84	-2,01	-2,00
SMP-1B	-2,68	-2,97	-3,27	-3,57	-17,00
SMP-1C	-5,19	-5,76	-6,34	-6,92	-9,00
SMP-1D	-10,44	-11,60	-12,76	-13,92	-19,00
SMP-1E	-13,58	-15,08	-16,59	-18,10	-14,00
SMP-1F	-13,12	-14,57	-16,03	-17,49	-18,00
SMP-1G	-8,49	-9,44	-10,38	-11,32	-9,00

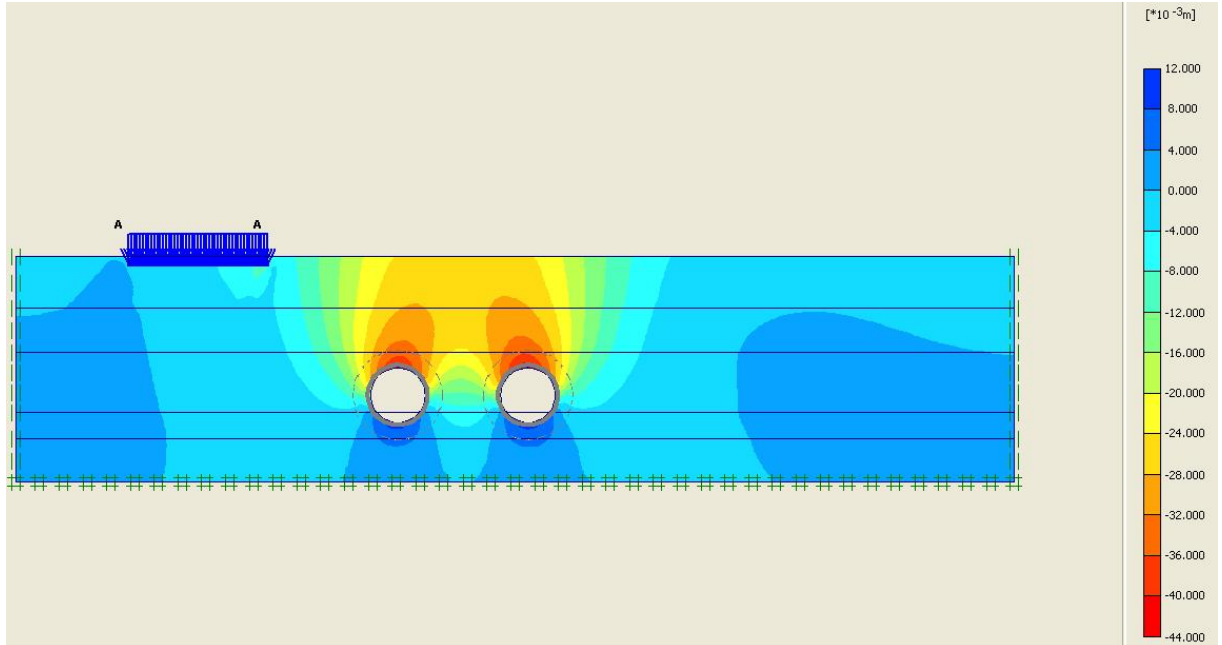
Çizelge 7.8 Kesit 1’de Gauss Eğrisi ile hesaplanan sadece 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar

Gauss Eğrisi ile yapılan çözümde “ V_L ” değerinin % 1,2 kabul edilmesi durumunda hesaplanan deplasmanlarla gerçekleşen deplasmanlar Şekil 7.9’da görülmektedir.



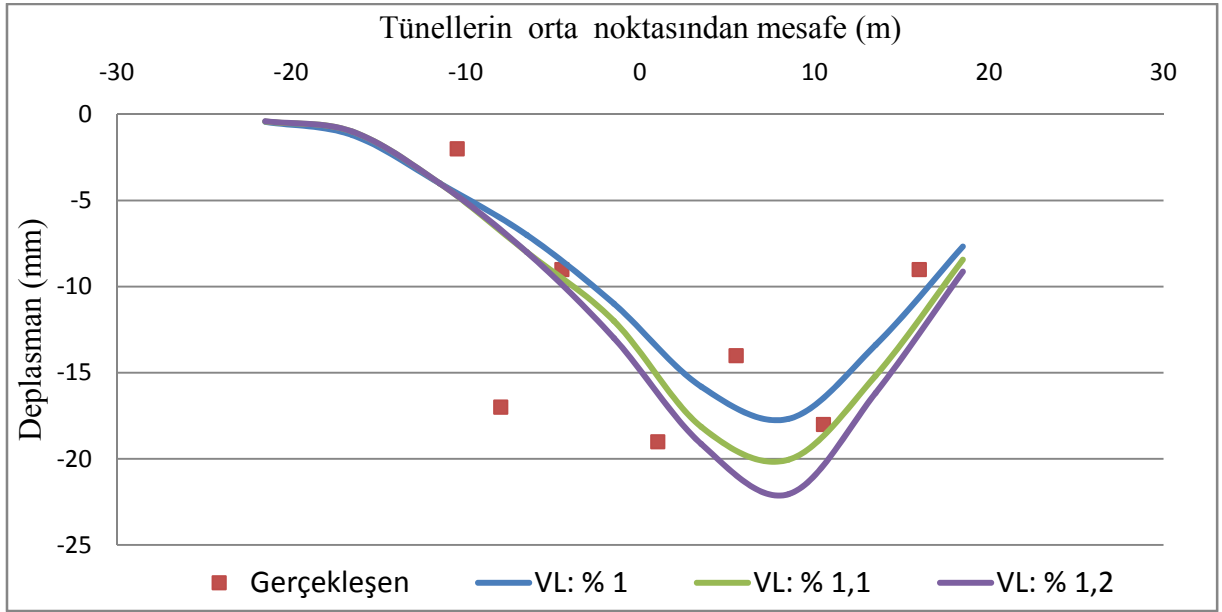
Şekil 7.9 Kesit 1 de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. tünel kazısından kaynaklanan deplasman değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Kesit-1'in Plaxis isimli sonlu elemanlar programı ile nümerik modellenmesi sonucu 2. Tünel kazısından sonra hesaplanan deplasmanlar Şekil 7.10'da gösterilmektedir. Modellemede Çizelge 7.6'daki parametreler kullanılmıştır.



Şekil 7.10 Kesit 1 de 2. Tünel kazısından sonra Plaxis'te hesaplanan deplasmanlar

Model çözümünde tünel kazımı aşamasında tünelde belirli bir büzülme katsayısı tanımlanır. Bu katsayı hacim kaybı oranına eşittir. Şekil 7.11'de değişik hacim kaybı oranları için hesaplanan düşey deplasman dağılımları gösterilmiştir.

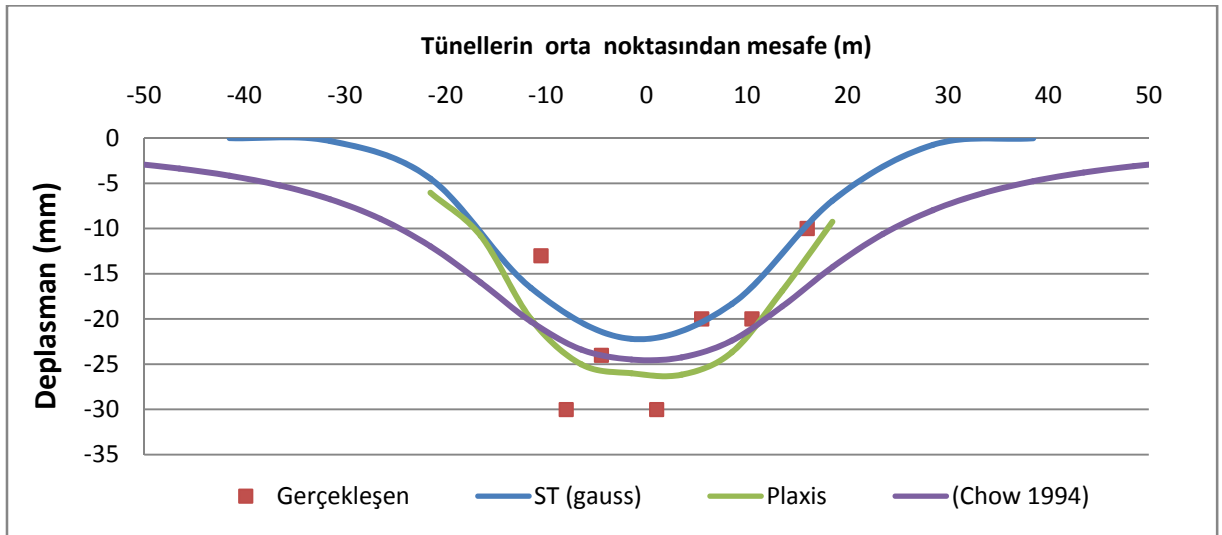


Şekil 7.11 Kesit 1 de 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar

Modelden hesaplanan deplasmanların gerçekleşen deplasmana en yakın elde edildiği hacim kaybı oranının Kesit-1 deki 2. Tünel için %1,1 olduğu gözlenmektedir.

7.4.1.3 2 Tünel Kazısı Tamamlandıktan Sonraki Toplam Deplasman Tahminleri

Tünel kazısı tamamlandıktan sonra kazı makinesi bölgeden uzaklaştıktan sonra bölgede gerçekleşen ve hesaplanan nihai deplasmanlar Şekil 7.12'de gösterilmiştir.



Şekil 7.12 Kesit 1'de gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar

Chow ve Plaxis hesaplarında arazi ve laboratuvar deneylerine göre zemin parametreleri seçilmiştir. Zemin yüzeyinde deplasmana asıl neden olan faktör tünellerin kazısından

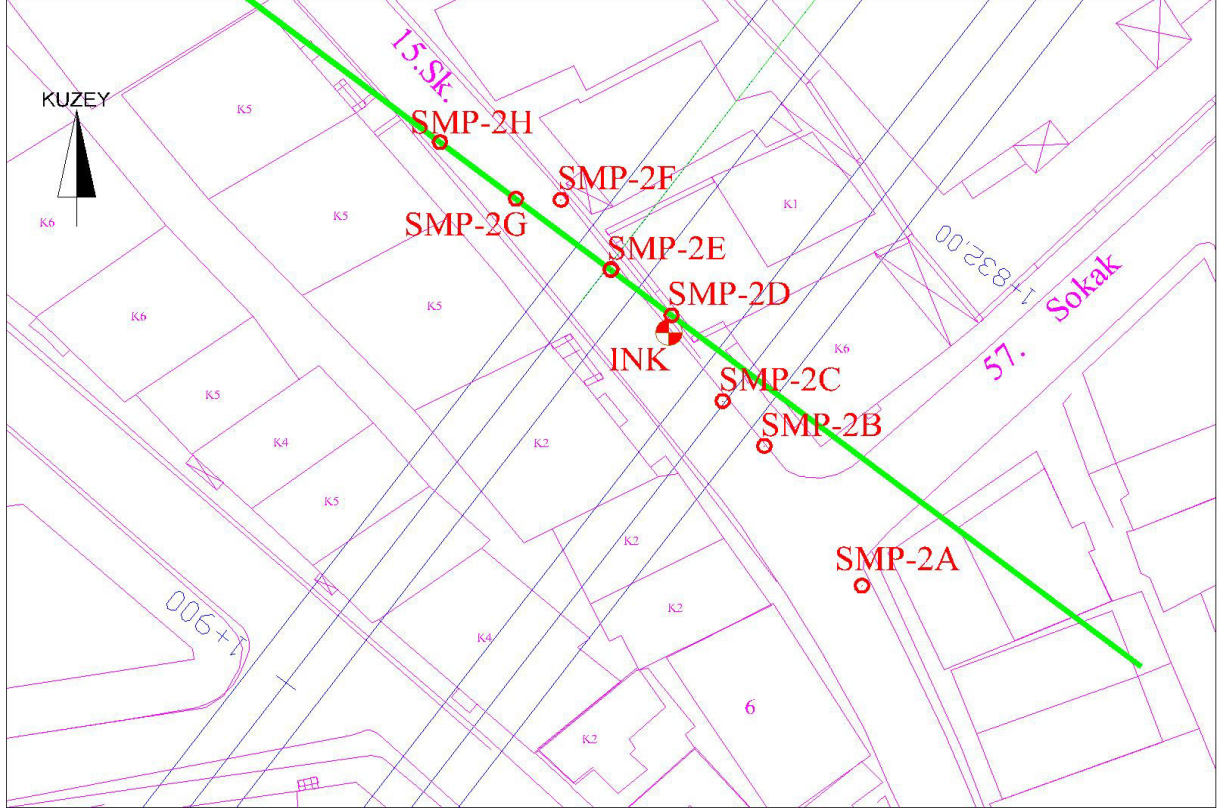
meydana gelen hacim kaybı (V_L) dır. Hacim kaybı oranı genel olarak TBM makinesinin kesici uçlarının tasarımı, yer altı su seviyesi, kohezyon, içsel sürtünme açısı, elastisite modülü, örtü kalınlığı gibi değerlerle doğrudan bağıntılıdır. Zemin koşullarında EPB basınçları çok önemlidir. EPB basıncı aynadaki zeminin dengelenmesi açısından çok büyük önem taşımaktadır. EPB basınçlarının yüksek uygulanması durumunda gerekenden daha az hacimde malzeme alınması ve yüzeyde kabarmalar gibi sonuçlar görülebilir. EPB basıncının olması gerekenden düşük uygulanması durumunda ise fazla malzeme alınması gibi sonuçlar görülebilir. Bu da yüzeyde oturmalara hatta göçüklere neden olabilir.

Çözümlerde hacim kaybının farklı değerlerine göre yüzey deplasmanları hesaplanmıştır. Seçilen hacim kaybı oranına göre hesaplanan deplasmanlar gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılmıştır ve gerçekleşen deplasmanlara en yakın olan hacim kaybı oranı belirlenmiştir.

Gauss yaklaşımına göre hacim kaybı oranları olarak 1. Tünel için $V_L = \% 1,1$, 2. Tünel için $V_L = \% 1,2$ değerleri, Plaxis modelinde ise; 1.Tünel için $V_L = \% 1,1$, 2.Tünel için $V_L = \% 1,1$ değerleri arazi gözlemleri ile en iyi uyumlu sonuçları vermektedir.

7.4.2 Kesit 2

Kesit 2 sağ hattaki tünele göre Km: 1+859'ta yer almaktadır. Bu noktada örtü kalınlığı yaklaşık 15,75 metredir. Yer altı su seviyesi yüzeyden 5,5 metre derindedir. Kesitin yer aldığı bölgenin vaziyet planı Şekil 7.13'de, düşey kesiti ise Şekil 7.14'de gösterilmiştir.

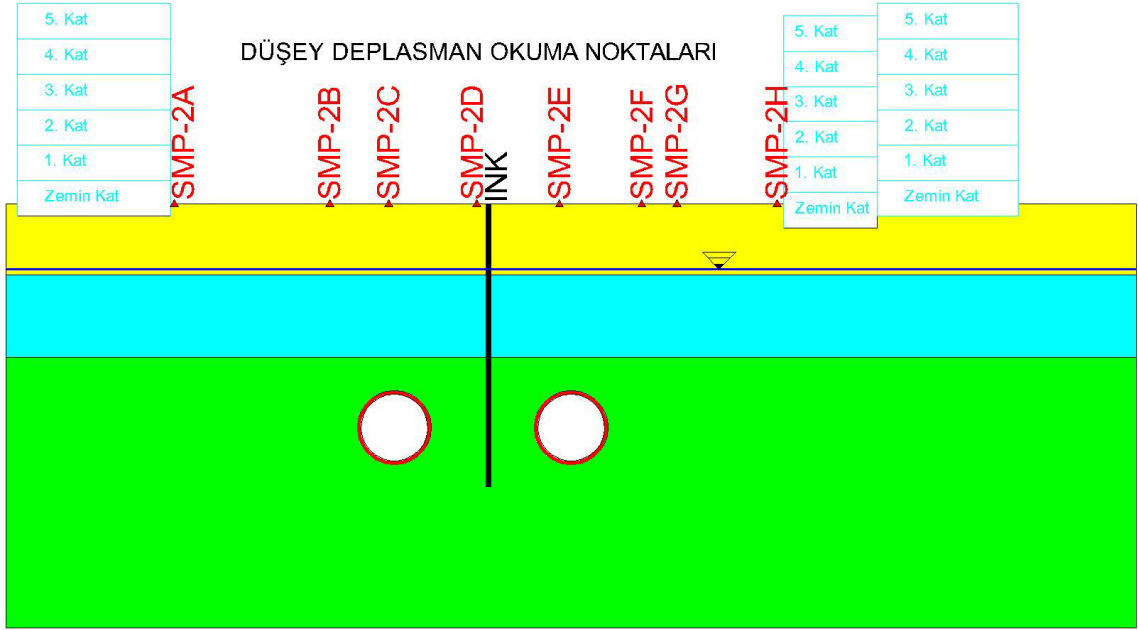


Şekil 7.13 Kesit 2 planı

Bölgeye en yakın sondaj YK-05 'dir. Bu sondaja ait laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları alttaki tabloda özetlenmiştir.(Çizelge 7.9)

KESİT-2							
YK-05 SONDAJI							
LİTOLOJİ	Derinlik	DBHA (g/cm ³)	LL (%)	PL (%)	PI	SPT	YASS
0-6m Gevşek Kum	6.00m		42	19	23	0-6m	Nort : 7
6-13m Sert Kil	9.00m		77	28	49	6-13m	Nort :31
13-36m Sıkı Kum	27.00m		42	21	21	13-36m	Nort :75
	28.50m	1,8					
	30.50m						
	32.00m		68	30	38		

Çizelge 7.9 YK-05 Sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları



Şekil 7.14 Kesit 2 'nin olduğu kısmın düşey kesiti

7.4.2.1 1. Tünel Kazısını Tamamladıktan Sonraki Deplasmanların Tahminleri

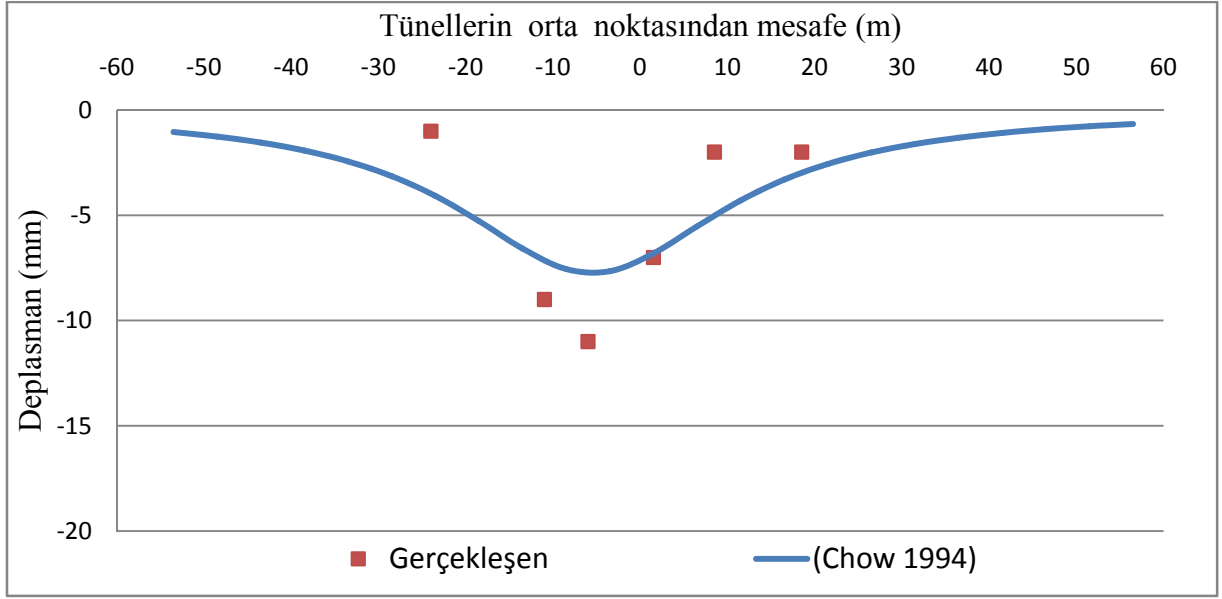
Kesit-2'nin olduğu kısımda 1. tünel kazısını tamamladıktan sonra gerçekleşen deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Chow (1994) 'ün nümerik yaklaşımları ile deplasmanlar hesaplanmıştır. Kesit -2 için parametreler Çizelge 7.10 daki gibidir.

KM:	ÖRTÜ KALINLIĞI	TÜNEL ÇAPI	BİRİM HACİM	G kayma Modülü
1+859	(m)	(m)	AĞIRLIK kN/m ³	kN/m ²
TÜNELLER	15,75	6,5	17	11600

Çizelge 7.10 Nümerik hesap parametreleri

Hesaplanan deplasmanların gerçekleşen deplasmanlar ile karşılaştırılması Şekil 7.15'te gösterilmiştir.



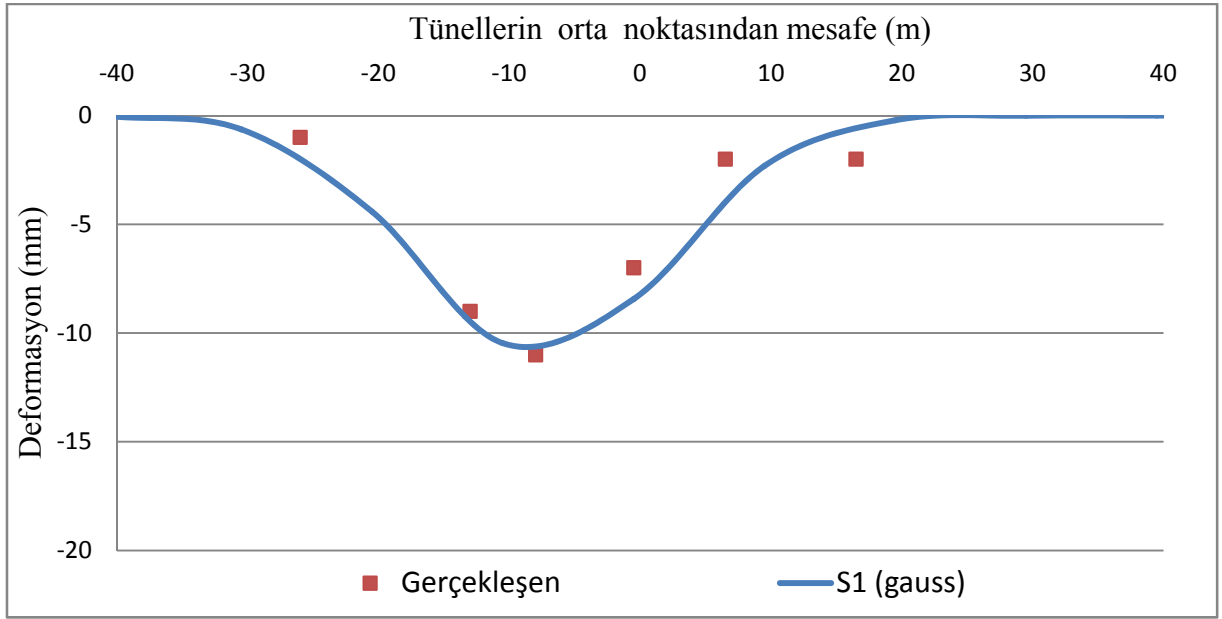
Şekil 7.15 Kesit-2 'de 1. tünel kazısından sonra Chow (1994)'a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Smax'a bağlı Gauss Eğrisi fonksiyonunda varsayılan hacim kaybı oranlarına göre düşey deplasmanlar Çizelge 7.11'de verilmiştir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)					
Nokta no:	0,80%	0,90%	1,00%	1,10%	S gerçekleşen
SMP-2A	-2	-2	-2	-2	-1
SMP-2B	-9	-11	-12	-13	-9
SMP-2C	-11	-12	-14	-15	-11
SMP-2D	-8	-9	-11	-12	-7
SMP-2E	-4	-4	-5	-5	-2
SMP-2F	-1	-1	-1	-1	1
SMP-2G	0	-1	-1	-1	-2
SMP-2H	0	0	0	0	1

Çizelge 7.11 Kesit 2'de 1. tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar

Gauss eğrisi ile yapılan çözümde $V_L = \% 0,8$ kabul edilmesi durumunda hesaplanan deplasmanlarla, gerçekleşen deplasmanların karşılaştırılması Şekil 7.16'de verilmektedir.

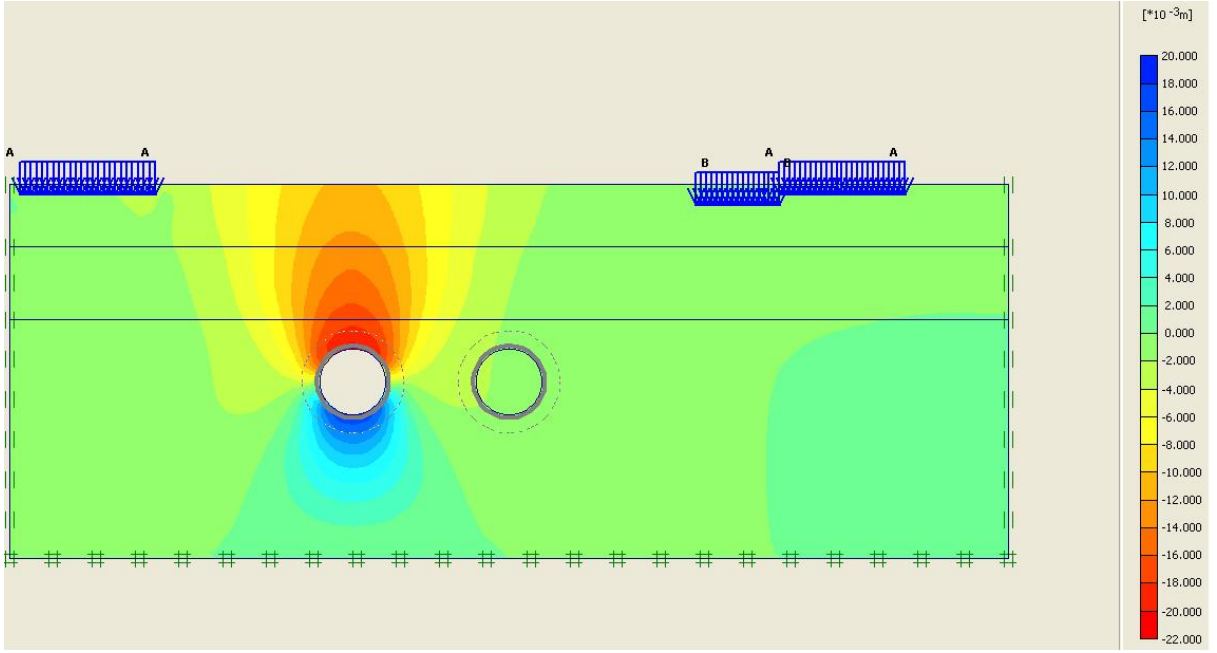


Şekil 7.16 Kesit-2'de 1. tünel kazısından sonra Gauss eğrisi ile hesaplanan deplasman değerlerinin gerçekleşmelerle karşılaştırılması

Kesit-2 aynı zamanda Plaxis isimli sonlu elemanlar programında modellenmiştir. Modelleme yapılırken Çizelge 7.12' deki parametreler kullanılmıştır.

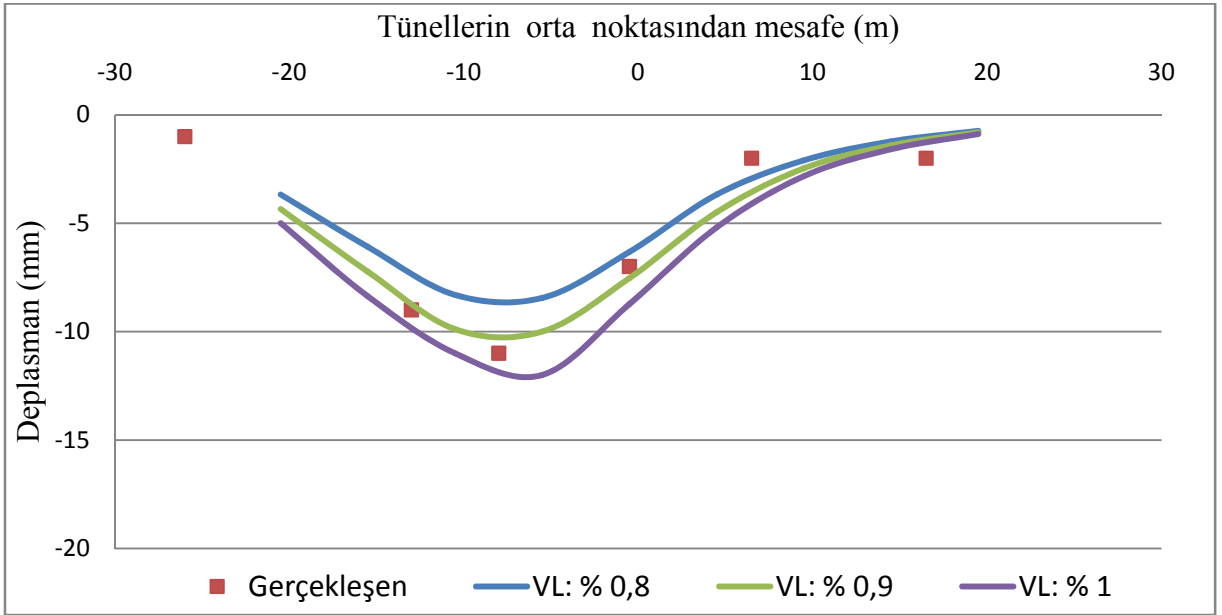
Kesit-2		γ_n	γ_s	$k_x = k_y$	E'	ν	c'	ϕ	YASS
Tabaka Sınırları	Litoloji	kN/m^3	kN/m^3	m/gün	kN/m^2	-	kN/m^2	$^\circ$	m
0-6 m	Gevşek Kum	16	18	1	4500	0,3	0,1	28	5,5
6-13 m	Sert Kil	18	20	0,0001	42000	0,4	8	26	
13-36 m	Sıkı Kum	19	21	1	63000	0,35	0,1	40	

Çizelge 7.12 Plaxis programında Kesit-2 için kullanılan parametreler



Şekil 7.17 Kesit-2'de 1. tünel kazısından sonra Plaxis'te hesaplanan deplasmanlar

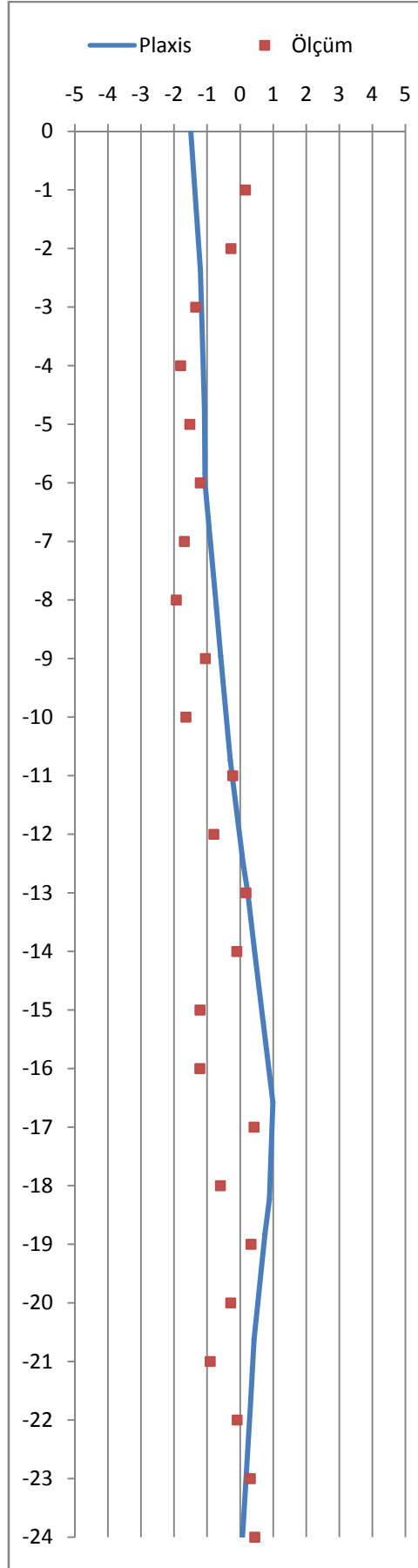
Şekil 7.18'de değişik hacim kaybı oranları için hesaplanan düşey deplasman dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 7.18 Kesit 2'de 1. tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanları

Modelden hesaplanan deformasyonların gerçekleşen deformasyona en yakın bulunduğu hacim kaybı oranı değeri Kesit-2 deki 1. Tünel için $V_L = \% 0,9$ olduğu gözlenmiştir.

Plaxis modelinde 1. tünel kazısı tamamlandıktan sonraki durumda tünellerin ortasında teşkil edilmiş olan inklinometre de gerçekleşmesi beklenen deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmış ve gerçekleşen ile karşılaştırılmıştır. Şekil 7.19’de hesaplanan ve ölçülen yanal zemin yerdeğiştirmelerinin çok küçük ve oldukça uyumlu olduğu gözlenmektedir.

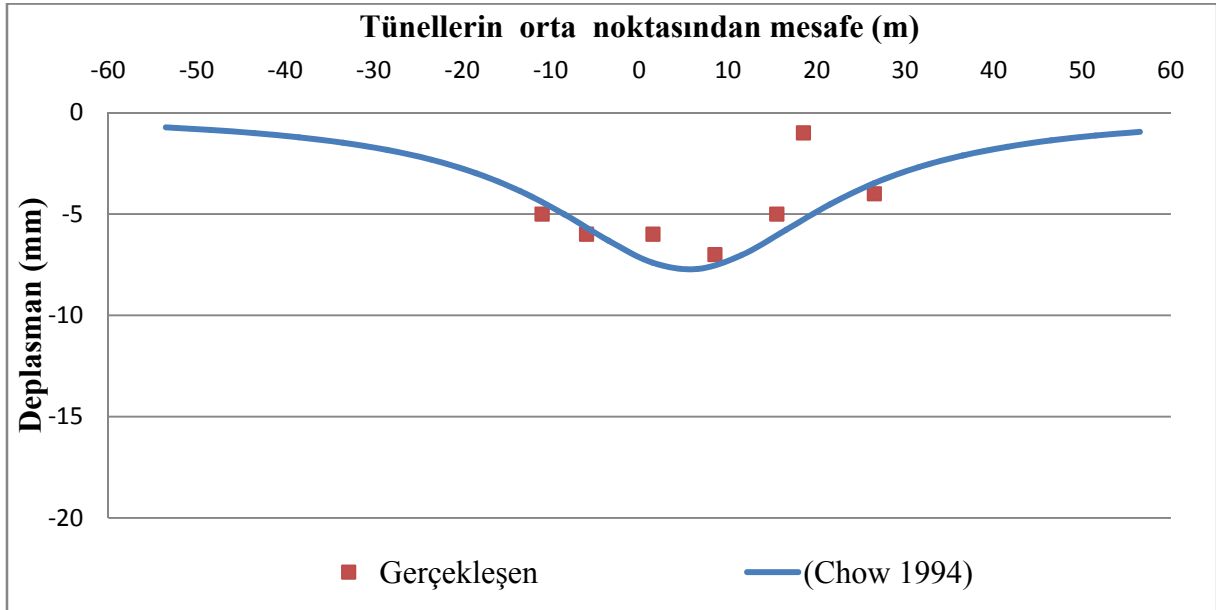


Şekil 7.19 Kesit 2'de 1 tünel kazısından sonraki durumda inklinometre ölçümleri

7.4.2.2 Sadece 2. Tünel Kazısından Kaynaklanan Deplasmanların Tahminleri

Kesit 2'nin olduğu kısımda 2. Tünel kazısını tamamladıktan sonra gerçekleşen deplasmanlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Kesit-2 için parametreler Çizelge 7.9' deki gibi seçilmiştir. Chow (1994) 'ün numerik yaklaşımları ile hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlara göre değişimi Şekil 7.20' de gösterilmiştir.



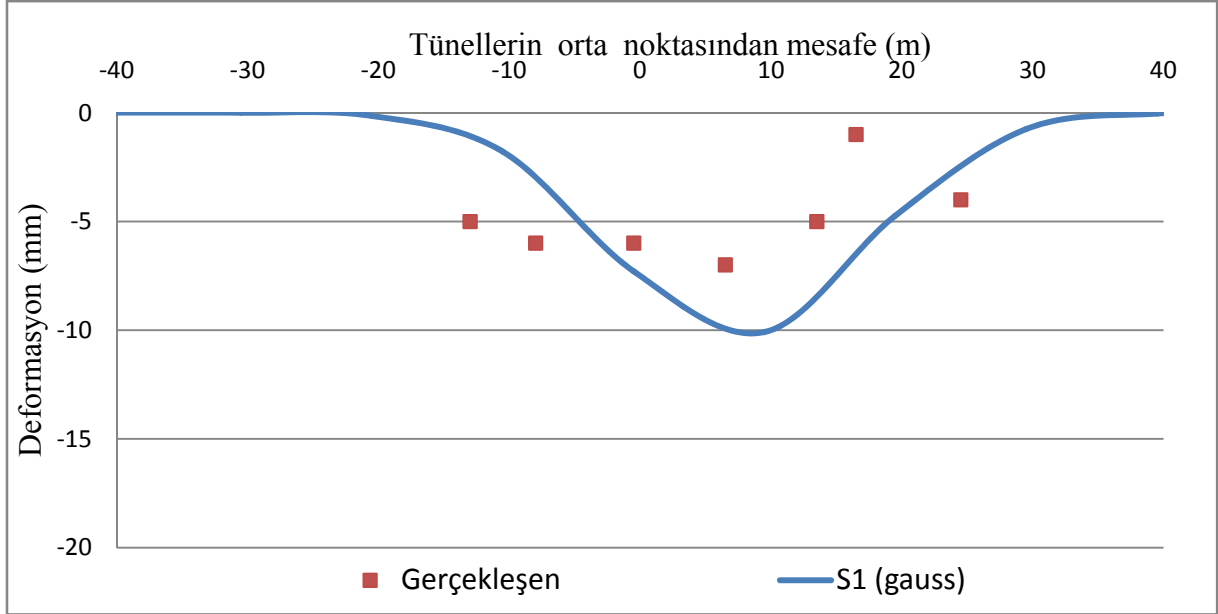
Şekil 7.20 Kesit-2'de 2. tünel kazısından kaynaklı deplasmanların Chow (1994)'a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerinin karşılaştırılması

Smax'a bağlı Gauss Eğrisi fonksiyonunda varsayılan hacim kaybı oranına göre hesaplanan deplasmanlar Çizelge 7.13'de verilmiştir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)				
Nokta no:	0,65%	0,75%	0,85%	S gerçekleşen
SMP-2A	0	0	0	3
SMP-2B	-1	-1	-1	-5
SMP-2C	-2	-3	-3	-6
SMP-2D	-6	-7	-8	-6
SMP-2E	-9	-10	-12	-7
SMP-2F	-7	-8	-10	-5
SMP-2G	-6	-7	-8	-1
SMP-2H	-2	-2	-2	-4

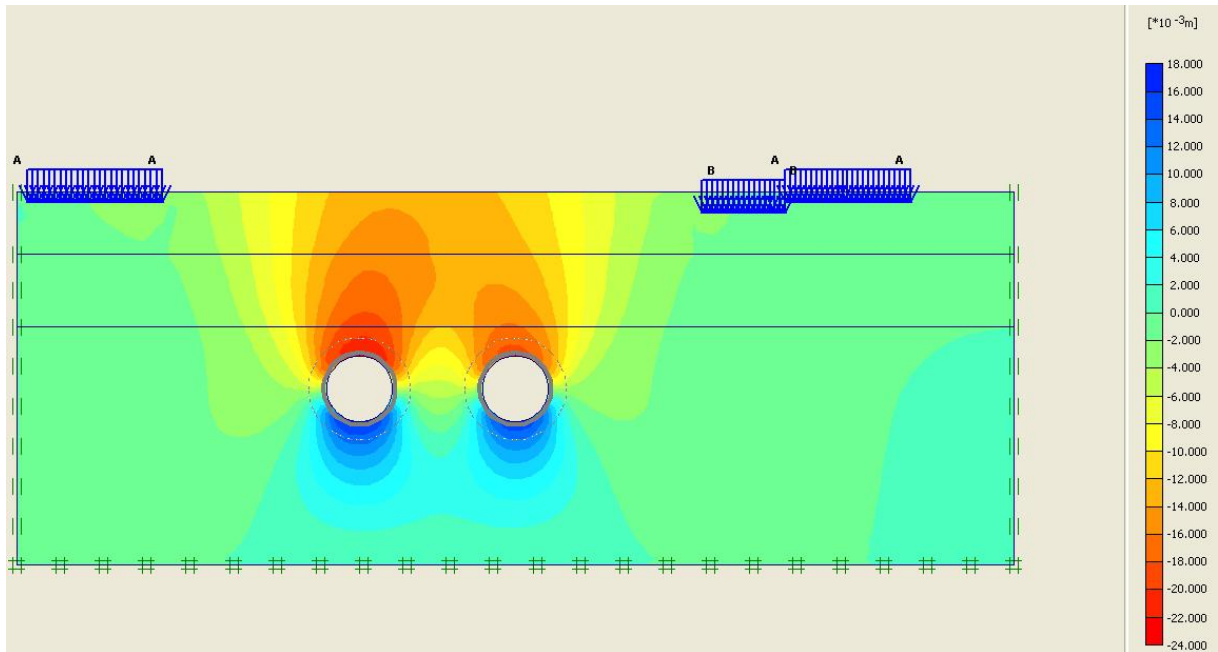
Çizelge 7.13 Kesit 2'de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar

Burada S_{max} değerine göre V_L değerinin % 0,75 kabul edilmesi durumunda hesaplanan ve gerçekleşenler deplasmanların karşılaştırılması Şekil 7.21’de görülmektedir.



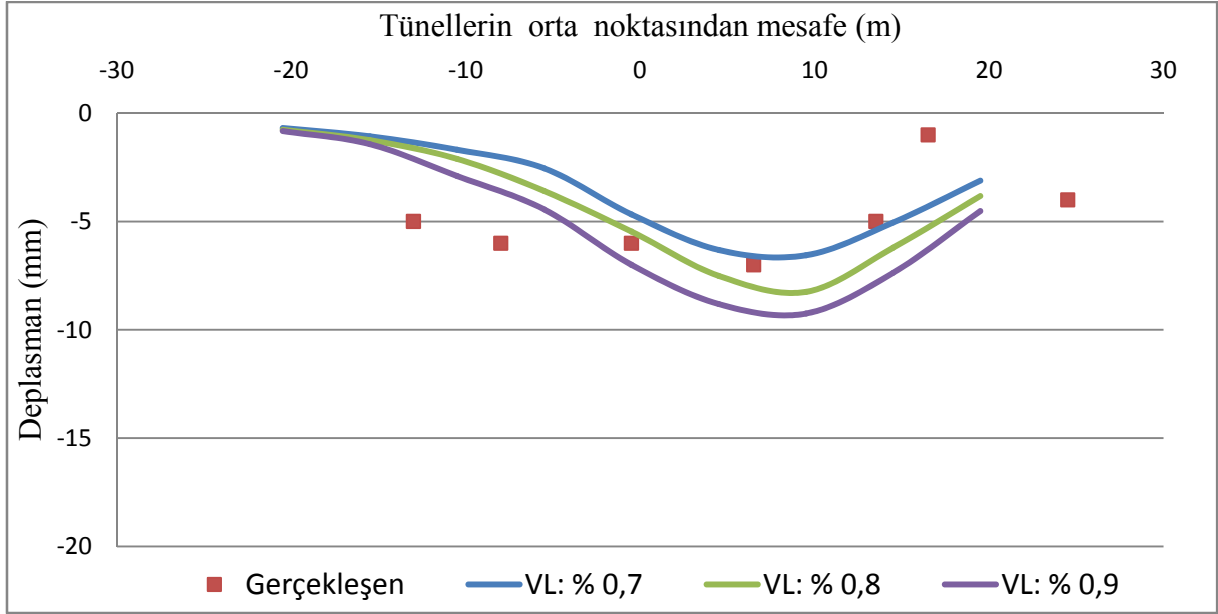
Şekil 7.21 Kesit-2’de Gauss eğrisi ile hesaplanan 2. Tünel kazısından kaynaklanan deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Kesit-2’nin Plaxis isimli sonlu elemanlar programı ile numerik modellenmesi sonucu 2. Tünel kazısından sonra hesaplanan deplasmanlar Şekil 7.22’de gösterilmiştir. Modellemede Çizelge 7.12’deki parametreler kullanılmıştır.



Şekil 7.22 Kesit-2’de 2. tünel kazısından sonra Plaxis’te hesaplanan deplasmanlar

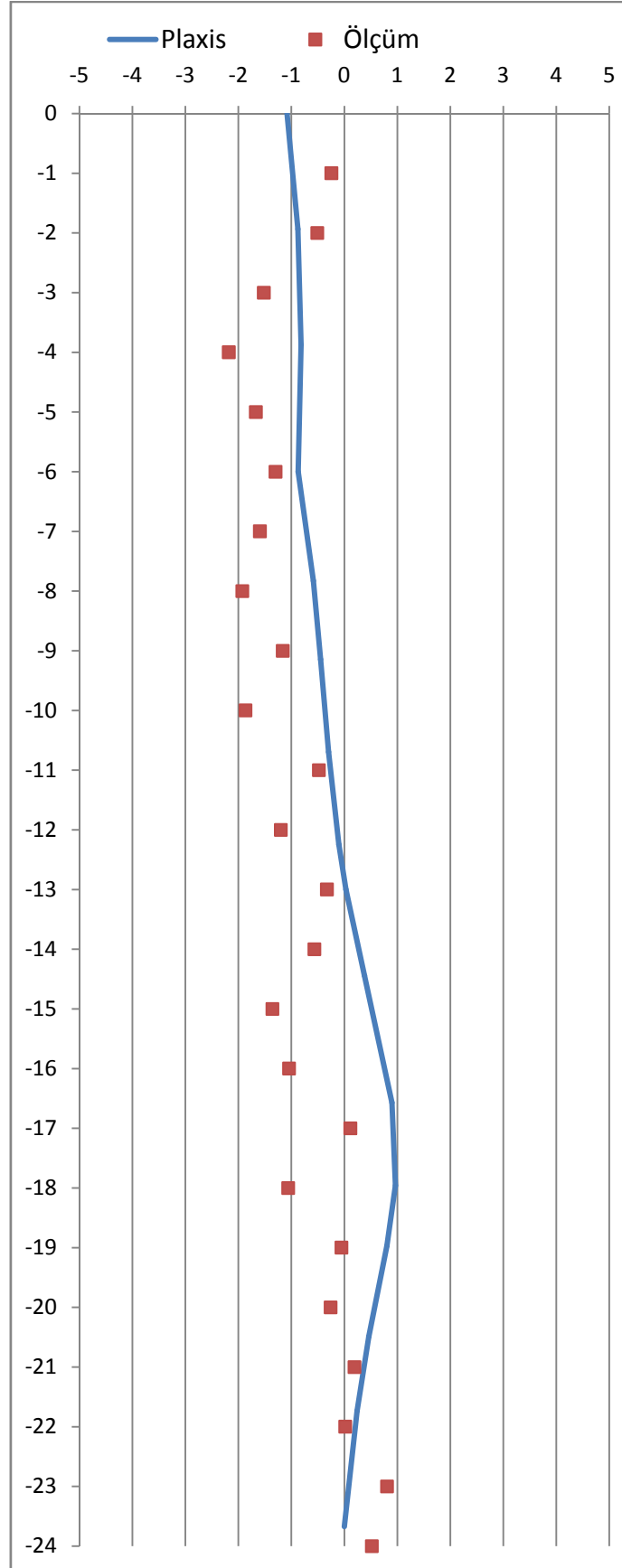
Şekil 7.23'te değişik hacim kaybı oranları için hesaplanan düşey deplasman dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 7.23 Kesit 2'de 2. tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanları

Modelden hesaplanan deplasmanların gerçekleşen deplasmanlara en yakın bulunduğu hacim kaybı oranı değerinin Kesit-2'deki 2. tünel için $V_L = \% 0,80$ olduğu gözlenmiştir.

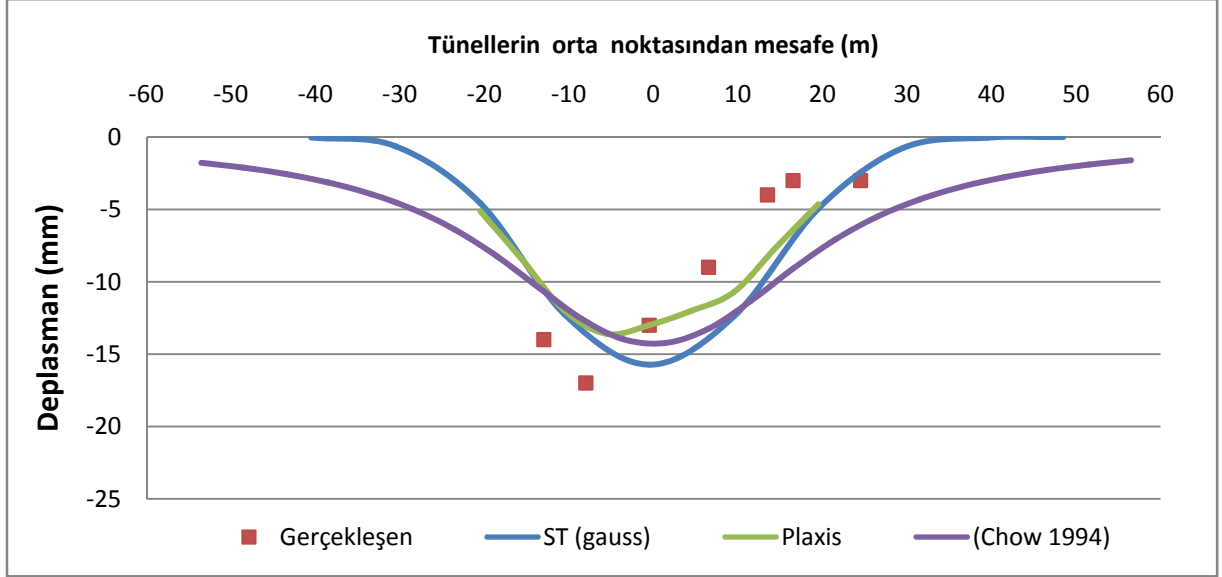
Plaxis modelinde 2 tünel kazısı tamamlandıktan sonraki durumda tünellerin ortasında teşkil edilmiş olan inklinometre de gerçekleşmesi beklenen deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmış ve arazi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 7.24'de hesaplanan ve ölçülen, yanal zemin yerdeğiştirmelerinin çok küçük değerler aldığı gözlenmektedir.



Şekil 7.24 Kesit 2'de 2 tünelde kazı yaptıktan sonraki durumda inklinometre ölçümleri

7.4.2.3 2 Tünel Kazısı Tamamlandıktan Sonraki Toplam Deplasman Tahminleri

Tünellerin kazısını tamamlayıp bölgeden uzaklaştıktan sonra bölgede gerçekleşen ve hesaplanan nihai deplasmanlar Şekil 7.25’ de gösterilmiştir.

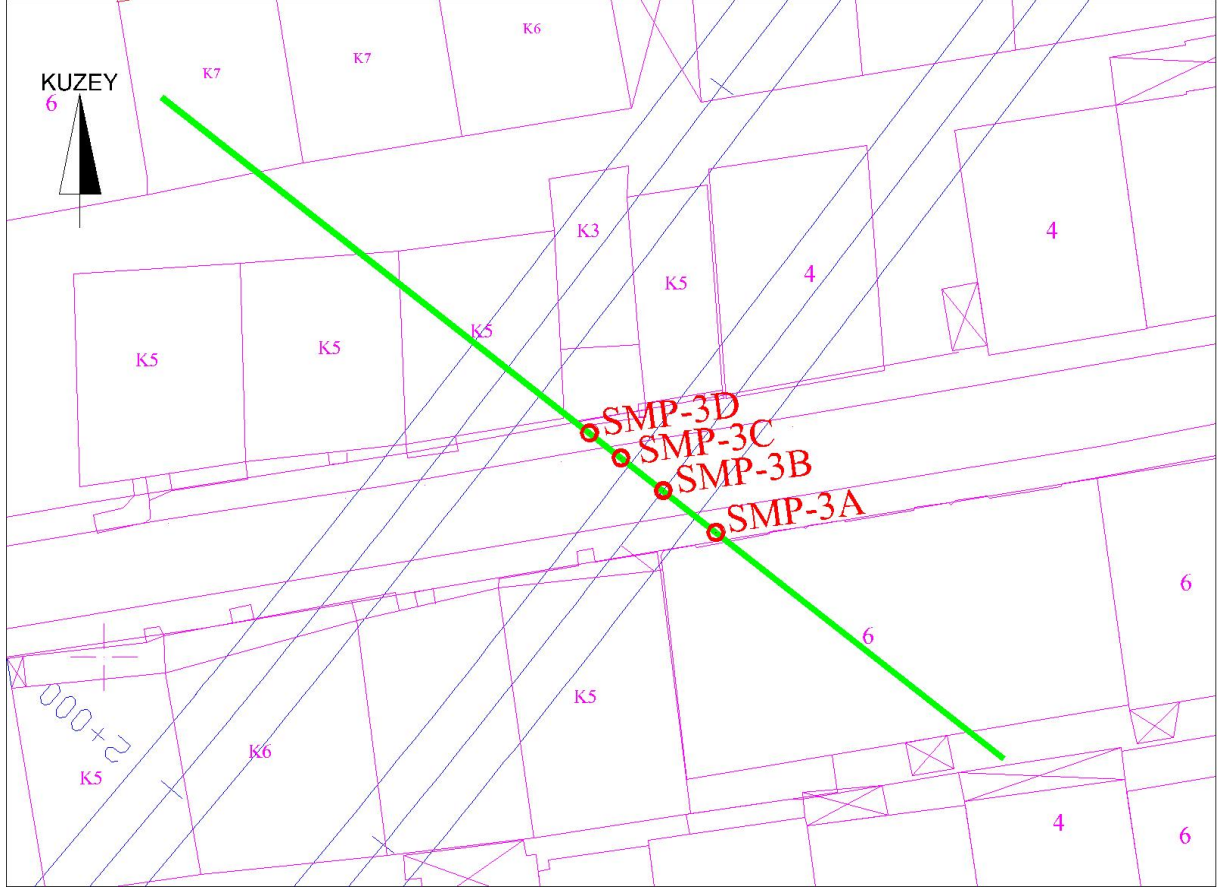


Şekil 7.25 Kesit 2'de gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar

Gauss yaklaşımına göre hacim kaybı oranları olarak 1.tünel için $V_L = \% 0,8$, 2.tünel için $V_L = \%0,75$ değerleri, Plaxis modelinde ise; 1.tünel için $V_L = \% 0,9$, 2. tünel için ise $V_L = \% 0,80$ değerleri ile arazi ölçümleri en uyumlu sonuçları vermektedir.

7.4.3 Kesit 3

Kesit 3 sağ hattaki tünele göre Km: 1+970'te yer almaktadır. Bu noktada örtü kalınlığı yaklaşık 16,75 metredir. Yer altı su seviyesi yüzeyden 15 metre derindedir. Kesitin yer aldığı bölgenin vaziyet planı Şekil 7.26'da, düşey kesiti ise Şekil 7.27'de gösterilmiştir

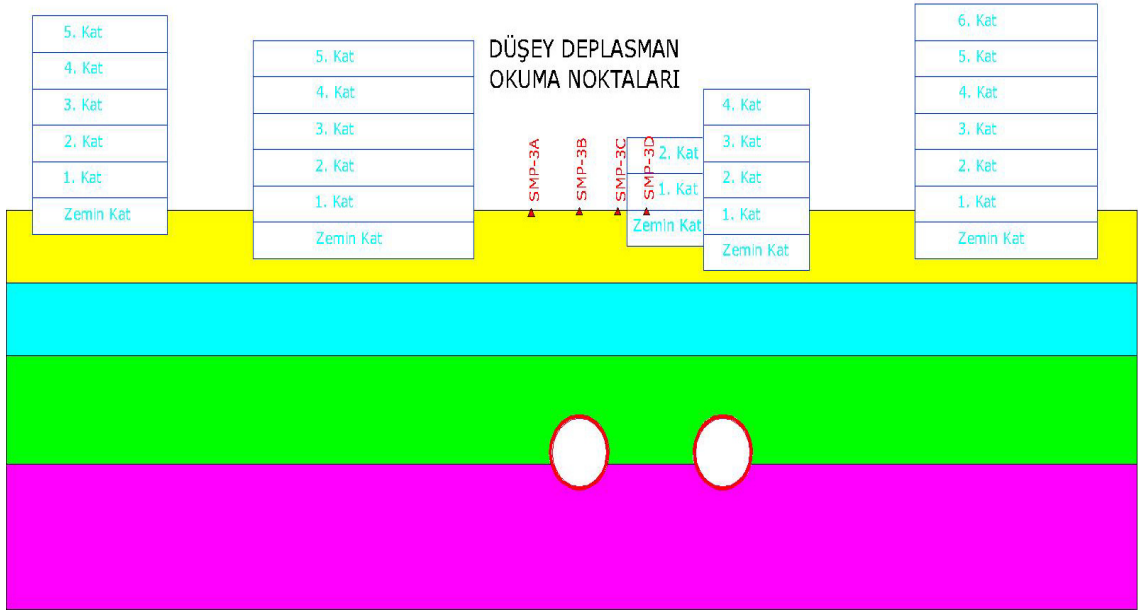


Şekil 7.26 Kesit-3 planı

Bölgeye en yakın sondaj BH7-DT sondajıdır. Bu sondaja ait laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları Çizelge 7.14'te özetlenmiştir.

KESİT-3												
BH7-DT SONDAJI												
LİTOLOJİ	Derinlik	LL (%)	PL (%)	PI	SPT		PRESİYOMETRE	E (kg/cm ²)	PL (kg/cm ²)	TORVANE C (Kg/cm ³)	CEP PENETROMETRESİ	YASS
0 - 6 m Kil-1	1,5	58	21	37	0 - 6 m	Nort: 15	1.20 m	47	6	0,70	1,60	15 m
	3						5.20 m	65	7	1,00	2,20	
	4,5	53	21	32			6.20 m	128	13,5	0,76	1,80	
	6						8.20 m	360	30			
6 - 12 m Kil-2	7,5	32	24	8	6 - 12 m	Nort: 32	11.00 m	395	30			
	9						13.20 m	430	30			
	12						16.20 m	290	27,5			
12 - 21 m Kum-1	15				12-21 m	Nort: >50	19.20 m	260	22,2			
	18											
21 - 33 m Kum-2					12-33 m	Nort: >50						

Çizelge 7.14 BH7-DT sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları



Şekil 7.27 Kesit 3 'ün olduğu kısmın düşey kesiti

7.4.3.1 1. Tünel Kazısını Tamamladıktan Sonraki Deplasman Tahminleri

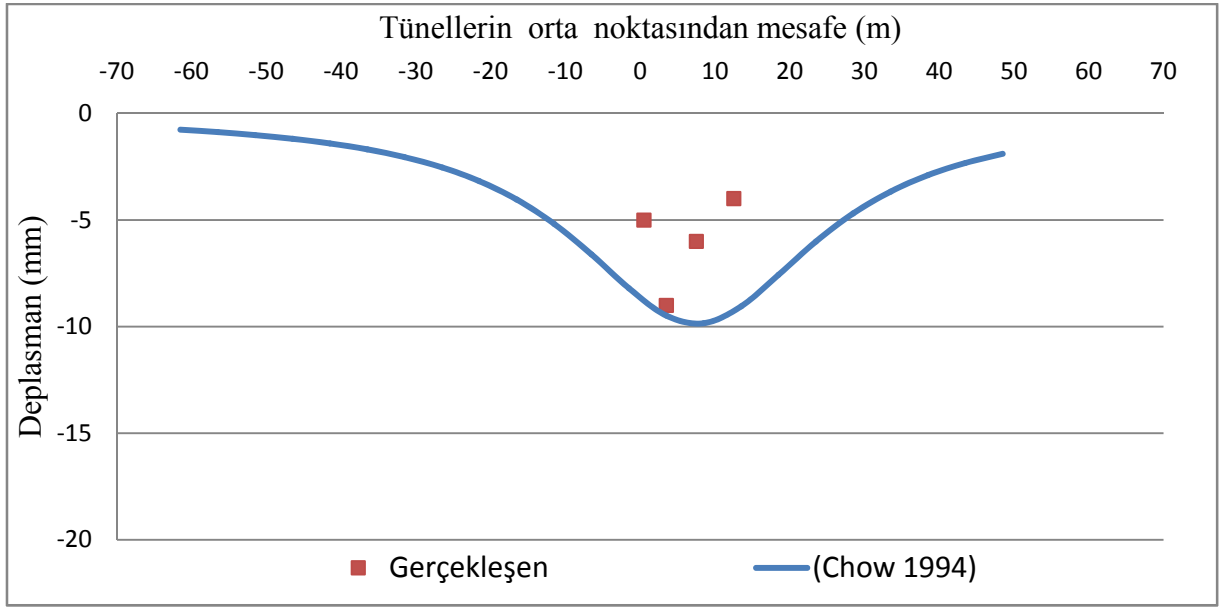
Kesit-3'ün olduğu kısımda 1. tünel kazısını tamamladıktan sonra gerçekleşen deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Chow (1994) 'ün nümerik yaklaşımları ile deplasmanlar hesaplanmıştır. Kesit-3 için seçilen parametreler Çizelge 7.15'deki gibidir.

KM: 1+859	ÖRTÜ KALINLIĞI (m)	TÜNEL ÇAPI (m)	BİRİM HACİM AĞIRLIK kN/m ³	G kayma Modülü kN/m ²
TÜNELLER	15,75	6,5	17	9100

Çizelge 7.15 Nümerik hesap parametreleri

Hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlar ile karşılaştırılması Şekil 7.28 'de gösterilmiştir.



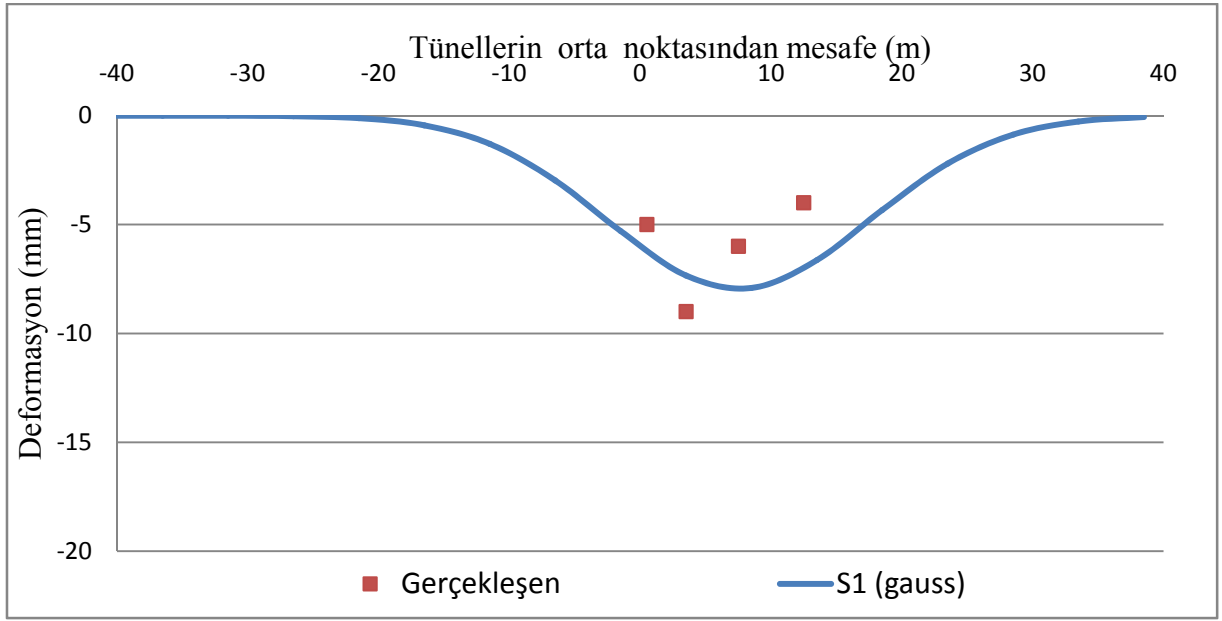
Şekil 7.28 Kesit 3'de 1. tünel kazısından sonra Chow (1994)'a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Smax'a bağlı Gauss Eğrisi tahmininde gözönüne alınan hacim kaybı oranına göre hesaplanan deplasmanlar Çizelge 7.16'daki gibidir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)				
Nokta no:	0,50%	0,60%	0,70%	S gerçekleşen
SMP-3A	-1	-1	-1	-2
SMP-3B	-2	-3	-3	-5
SMP-3C	-4	-4	-5	-4
SMP-3D	-5	-6	-7	0

Çizelge 7.16 Kesit 3'de 1. Tünelden sonra Chow (1994)'a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Gauss eğrisi ile yapılan çözümde V_L değerinin % 0,6 olarak kabul edilmesi durumunda hesaplanan deplasmanlarla gerçekleşen deplasmanların karşılaştırılması Şekil 7.29'da görülmektedir.

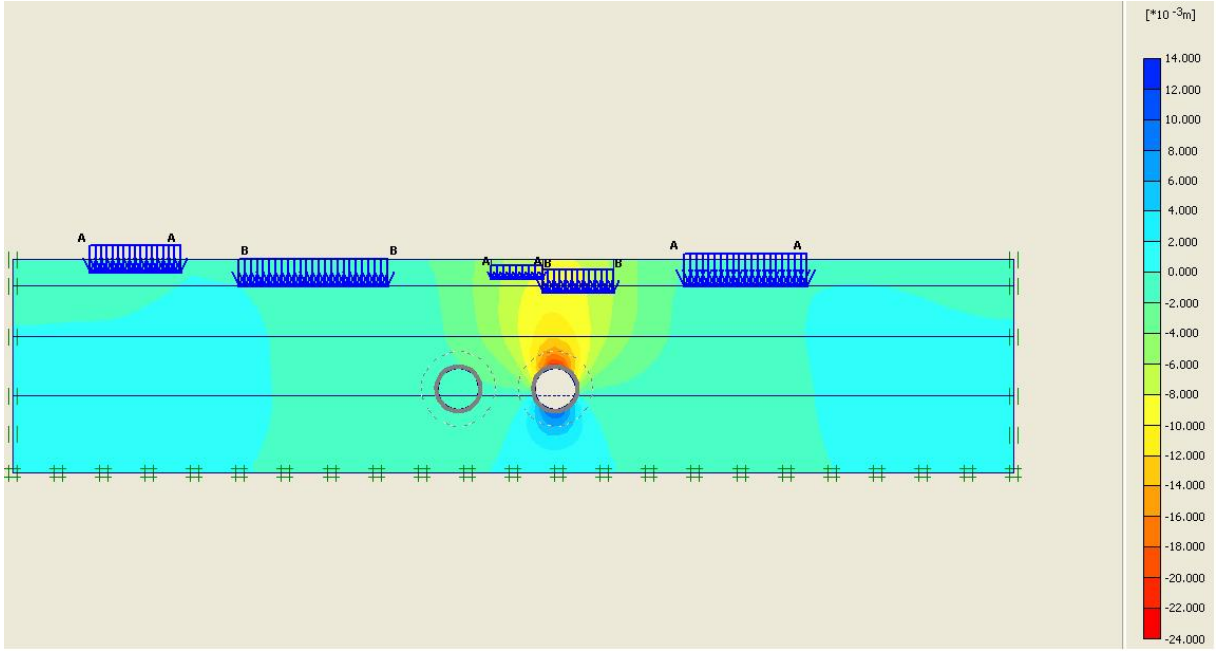


Şekil 7.29 Kesit 3'de Gauss eğrisi ile hesaplanan Tünel kazısından kaynaklanan deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Kesit 3'ün olduğu kısım Plaxis programı ile nümerik olarak modellenmiştir. Modelleme yapılırken Çizelge 7.17'teki parametreler kullanılmıştır.

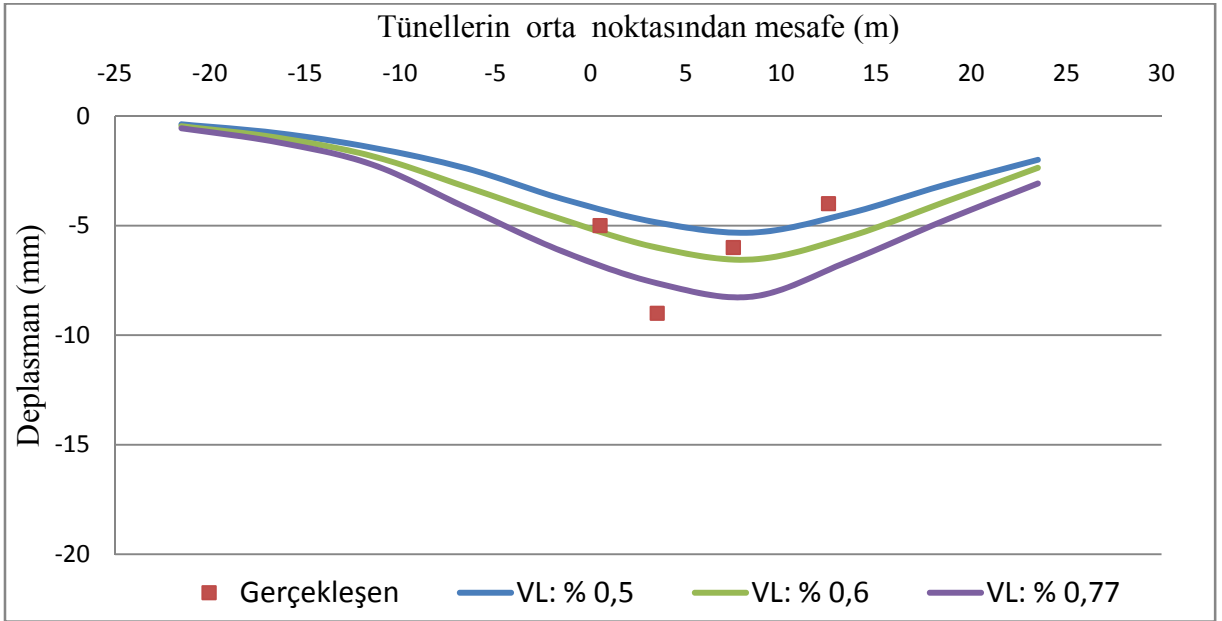
Kesit-3		γ_n	γ_s	$k_x = k_y$	E'	ν	c'	ϕ	YASS
Tabaka Sınırları	Litoloji	kN/m^3	kN/m^3	m/gün	kN/m^2	-	kN/m^2	$^\circ$	m
0-6 m	Kil-1	18	20	0,0001	10000	0,4	2	28	15
6-12 m	Kil-2	19	21	0,0001	40000	0,4	8	28	
12-21 m	Kum-1	18,5	20,5	1	25000	0,3	0,1	35	
21-33 m	Kum-2	19	21	1	63000	0,35	0,1	40	

Çizelge 7.17 Plaxis programında Kesit 3 için kullanılan parametreler



Şekil 7.30 Kesit 3'de 1. tünel kazısından sonra Plaxis'te hesaplanan deplasmanlar

Şekil 7.31'de değişik hacim kaybı oranları için hesaplanan düşey deplasman dağılımları gösterilmiştir.



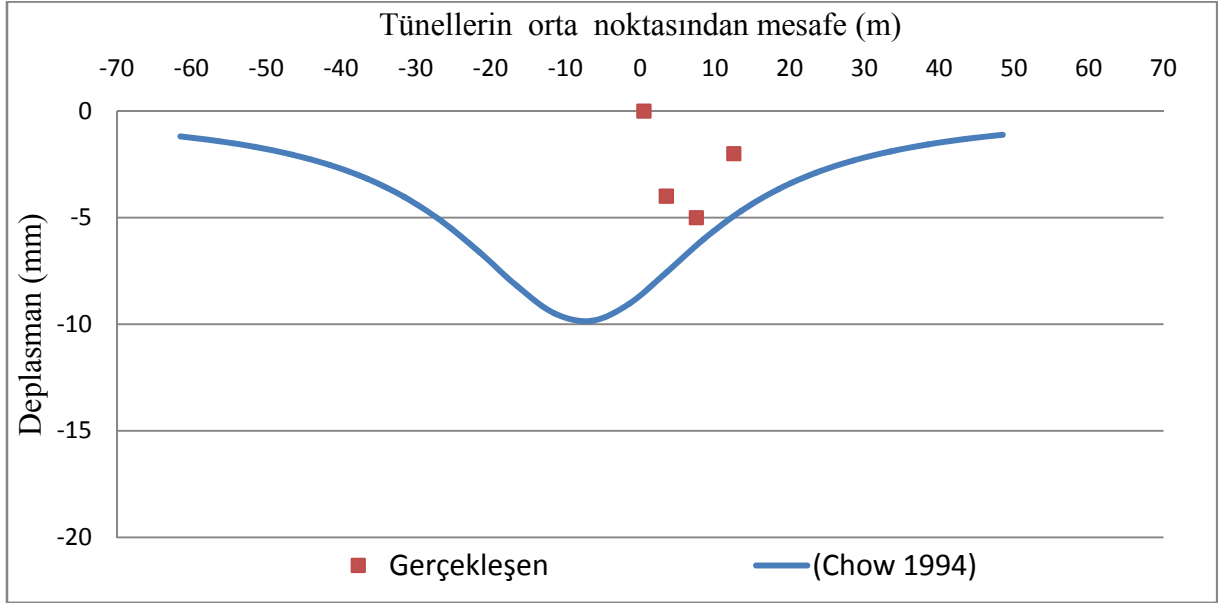
Şekil 7.31 Kesit 3'de 1. tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan yüzey deplasmanları

Modelden hesaplanan deplasmanların gerçekleşen deplasmanlara en yakın bulunduğu hacim kaybı oranı değerinin Kesit 3 deki 1. tünel için $V_L = \% 0,60$ olduğu gözlemlenmiştir.

7.4.3.2 2. Tünel Kazısından Kaynaklanan Deplasmanların Tahminleri

Kesit 3 ün olduğu kısımda 2. Tünel kazısı tamamlandıktan sonra sadece 2. Tünelden kaynaklanan deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Kesit 3 için parametreler Çizelge 7.14 deki gibi seçilmiştir. Chow (1994) 'ün numerik yaklaşımı ile hesaplanan değerlerin gerçekleşen deformasyonlara göre değişimi Şekil 7.32 da verilmiştir.



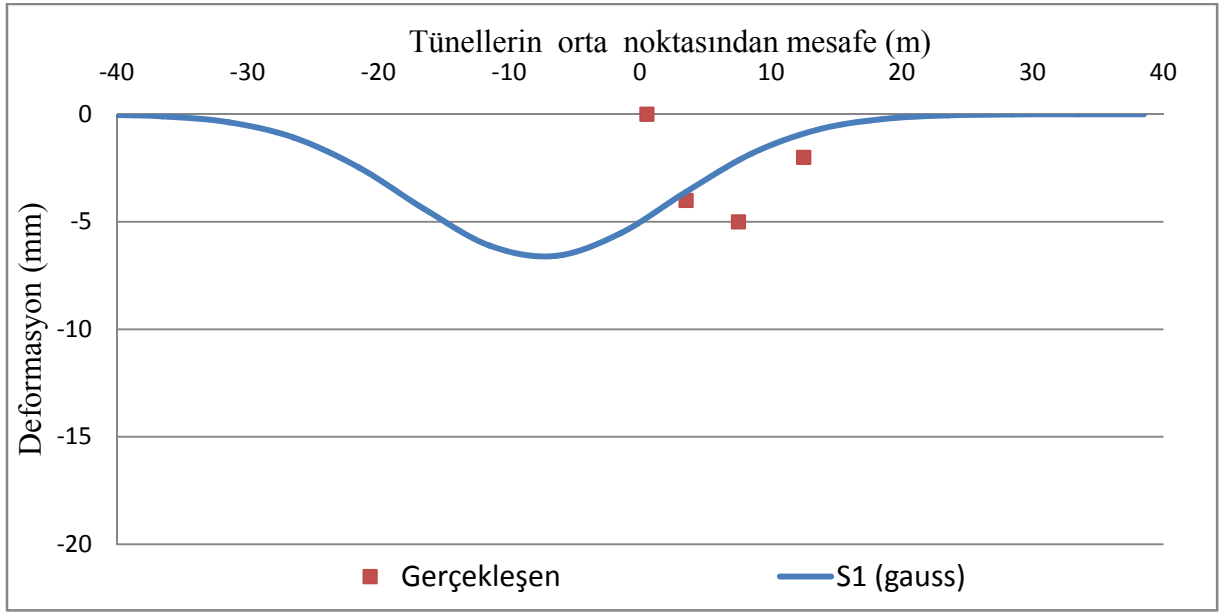
Şekil 7.32 Kesit-3'de 2. tünel kazısından kaynaklı deplasmanların Chow (1994)'a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerin karşılaştırılması

Smax'a bağlı Gauss eğrisi tahmininde varsayılan hacim kaybı oranlarına göre hesaplanan deplasmanlar Çizelge 7.18'deki verilmiştir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)				
Nokta no:	0,40%	0,50%	0,60%	S gerçekleşen
SMP-3A	-5	-6	-7	-4
SMP-3B	-5	-7	-8	-6
SMP-3C	-5	-6	-7	-9
SMP-3D	-4	-5	-6	-5

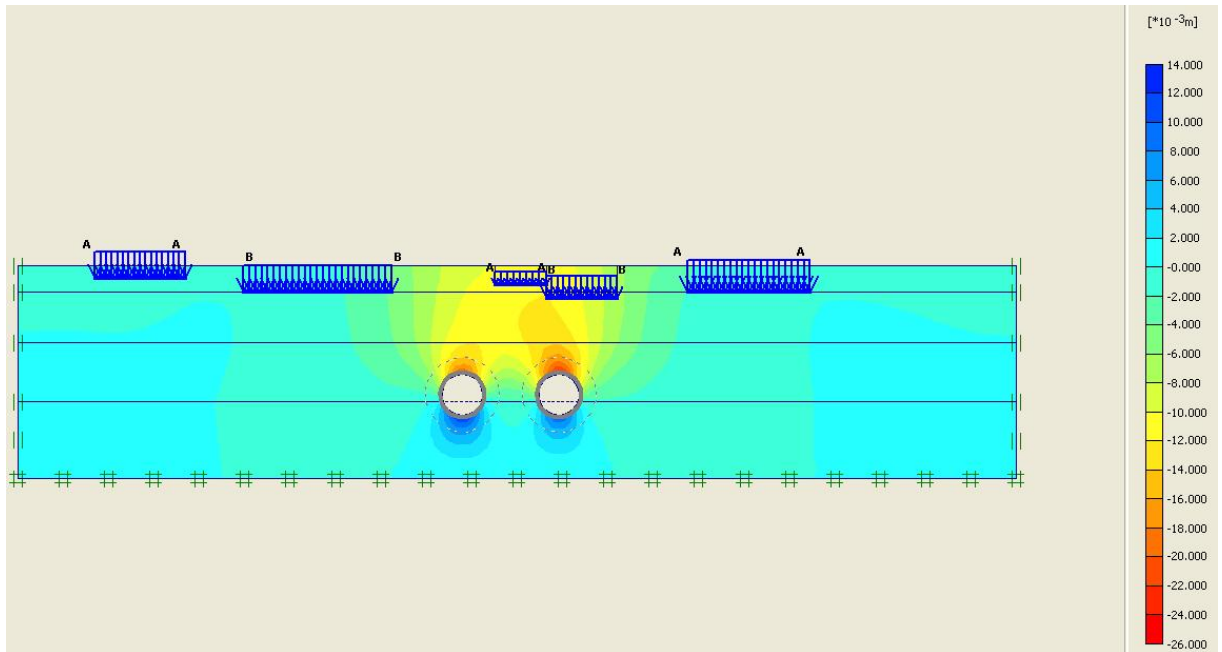
Çizelge 7.18 Kesit 3'de 2. Tünel kazısından sonra hacim kaybına bağlı deplasmanlar

Gauss eğrisi ile yapılan çözümde " V_L " değerinin % 0,50 olarak kabul edilmesi durumunda deplasmanlarla gerçekleşen deplasmanların karşılaştırılması Şekil 7.33'de verilmektedir.



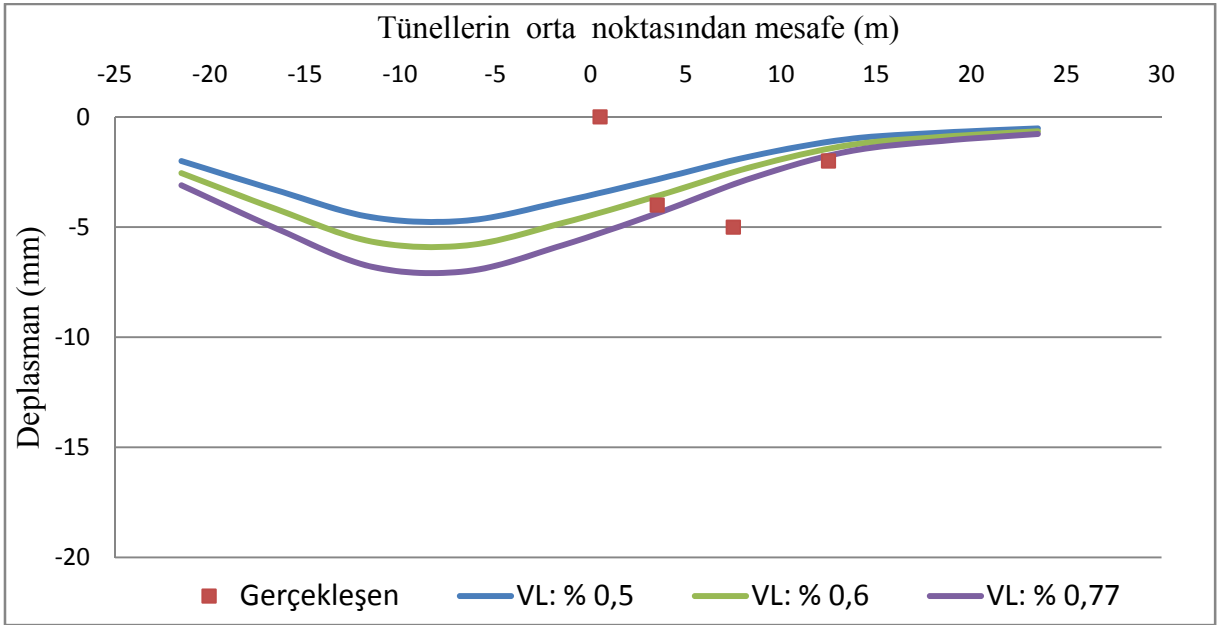
Şekil 7.33 Kesit-3'de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. tünel kazısından kaynaklanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Kesit 3'ün Plaxis programı ile modellenmesi sonucu 2. Tünel kazısından sonra hesaplanan deplasmanlar Şekil 7.34'te gösterilmiştir. Modellemede Çizelge 7.16'deki parametreler kullanılmıştır.



Şekil 7.34 Kesit-3'de 2. tünel kazısından sonra Plaxis'te hesaplanan deplasmanlar

Şekil 7.35'de değişik hacim kaybı oranları için hesaplanan düşey deplasman dağılımları gösterilmiştir.

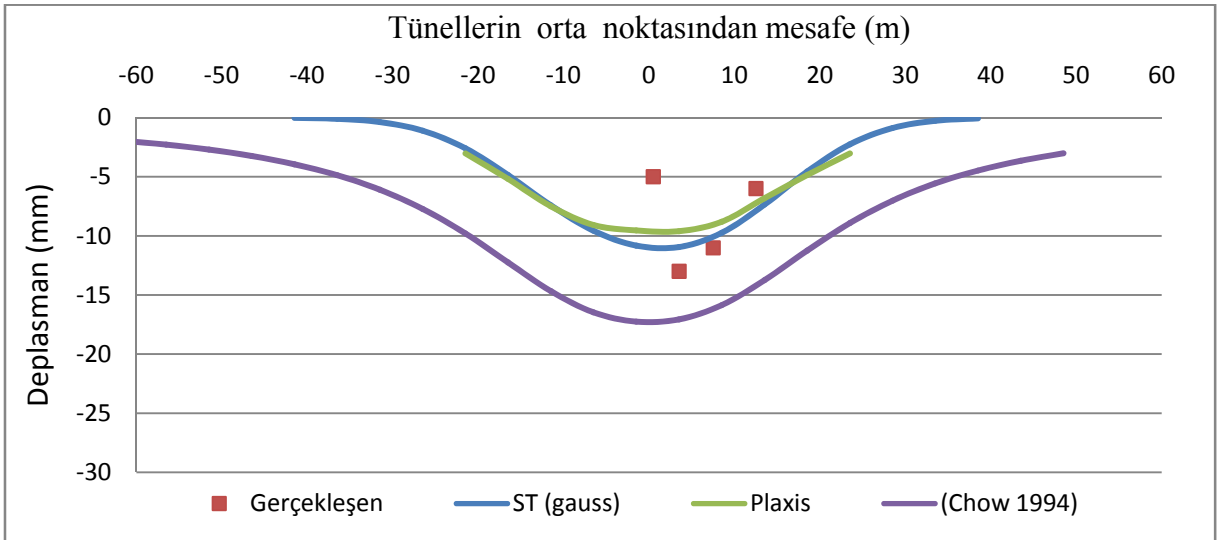


Şekil 7.35 Kesit 3'de 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar

Modelden hesaplanan deplasmanların gerçekleşen deplasmanlara en yakın elde edildiği hacim kaybı oranının Kesit-3 deki 2. tünel için $V_L = \% 0,60$ olduğu gözlenmiştir.

7.4.3.3 2 Tünel Kazısı da Tamamlandıktan Sonraki Toplam Deformasyon Tahminleri

Tüneller kazısını tamamlayıp bölgeden uzaklaştıktan sonra bölgede gerçekleşen ve hesaplanan nihai deplasmanlar Şekil 7.36'da gösterilmiştir.

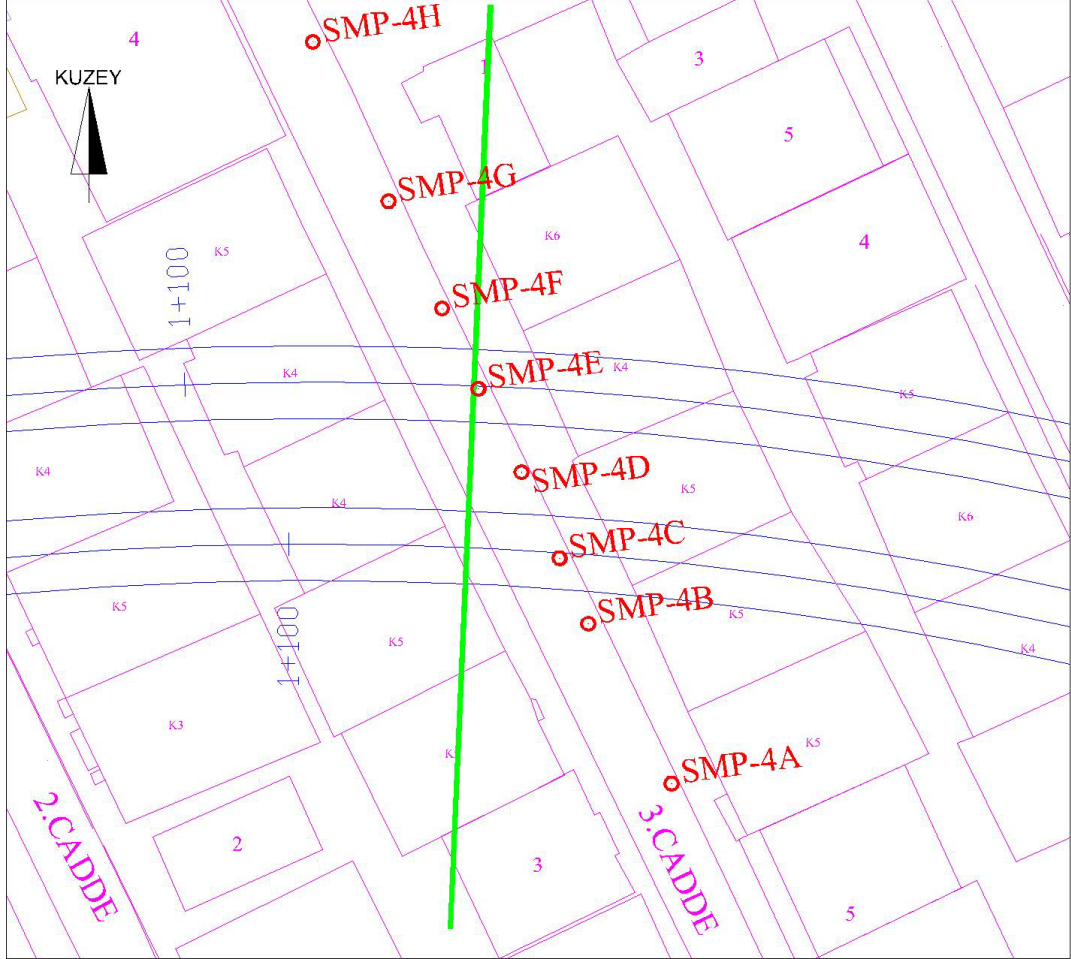


Şekil 7.36 Kesit 3'te gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar

Gauss yaklaşımına göre hacim kaybı oranları olarak 1. tünel için $V_L = \% 0,60$, 2.tünel için $V_L = \% 0,50$ olarak değerleri, Plaxis modelinde ise; 1. tünel ve 2. tünel için $V_L = \% 0,60$ değerleri arazi gözlemleri ile en iyi uyumlu sonuçları vermektedir.

7.4.4 Kesit 4

Kesit 4 sağ hattaki tünele göre Km:1+075'te yer almaktadır. Bu noktada örtü kalınlığı yaklaşık 30,75 metredir. Yer altı su seviyesi yüzeyden 22 metre derindedir. Kesitin yeraldığı bölgenin vaziyet planı Şekil 7.37'de, düşey kesiti ise Şekil 7.38'de gösterilmiştir.

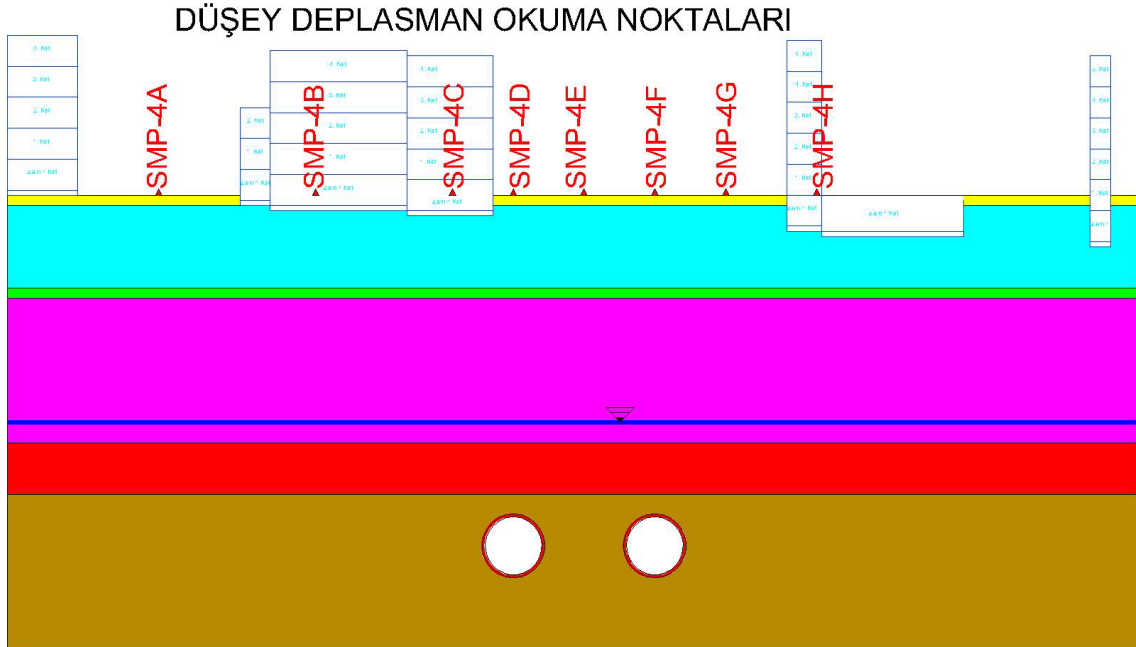


Şekil 7.37 Kesit 4 planı

Bölgeye en yakın sondaj BCP-02 sondajıdır. Bu sondaja ait laboratuar ve arazi deneyleri sonuçları Çizelge 7.19'de özetlenmiştir.

KESİT-4						
BCP-02 SONDAJI						
LİTOLOJİ	Derinlik	LL (%)	PL (%)	PI	SPT	YASS
0-1 m Dolgu						22 m
1-9 m Kil-1	3	102	41	61	1-9 m	Nort: 27
	6	91	43	48		
9-10 m Kum-1					9-10 m	Nort: 47
10-24 m Silt	10,5	82	39	43	10-24 m	Nort: >50
	13,5	89	42	47		
	19,5	49	28	21		
	22,5	56	30	26		
24-29 m Kil-2	28,5	62	31	31	24-29 m	Nort: >50
29-44 m Kum-2	31,5	79	42	37	29-44 m	Nort: >50
	34,5	76	44	32		

Çizelge 7.19 BCP-02 Sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları



Şekil 7.38 Kesit 4 'ün olduğu kısmın dikine kesiti

7.4.4.1 1. Tünel Kazısı Tamamlandıktan Sonraki Deformasyon Tahminleri

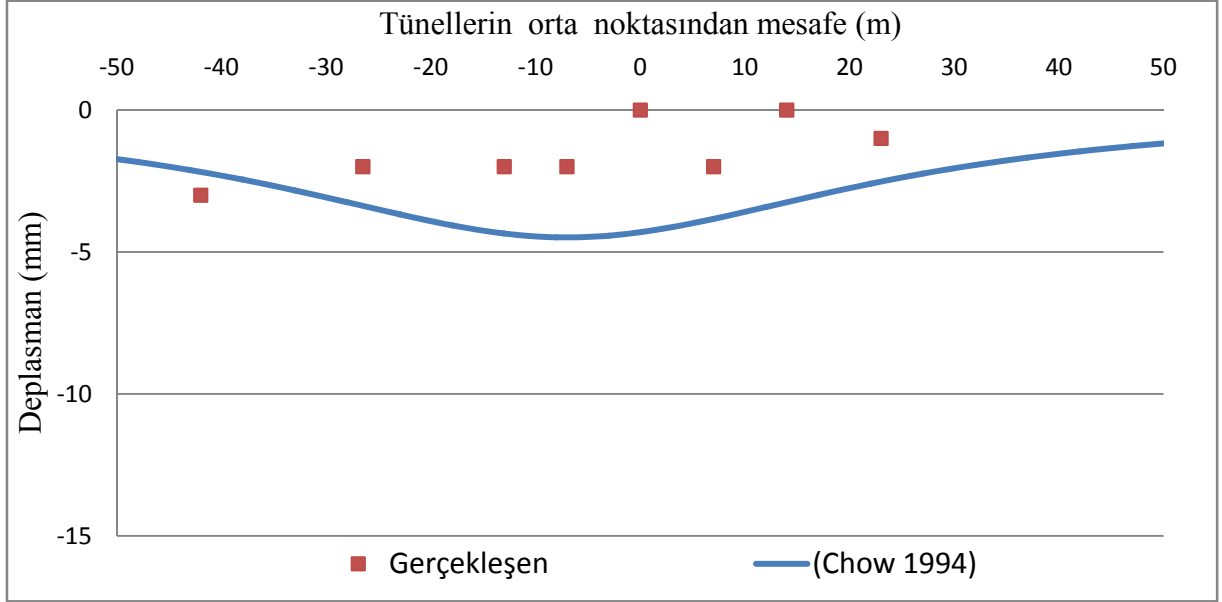
Kesit 4'ün olduğu kısımda 1. tünel kazısı tamamlandıktan sonra gerçekleşen deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Chow (1994)'ün nümerik yaklaşımı ile deformasyonlar hesaplanmıştır. Kesit-4 için seçilen parametreler Çizelge 7.20'deki gibidir.

KM: 1+859	ÖRTÜ KALINLIĞI (m)	TÜNEL ÇAPI (m)	BİRİM HACİM AĞIRLIK kN/m ³	G kayma Modülü kN/m ²
TÜNELLER	30,75	6,5	17	20000

Çizelge 7.20 Nümerik hesap parametreleri

Hesaplanan ve gerçekleşen deplasman değerlerinin değişimi Şekil 7.39’da gösterilmiştir.



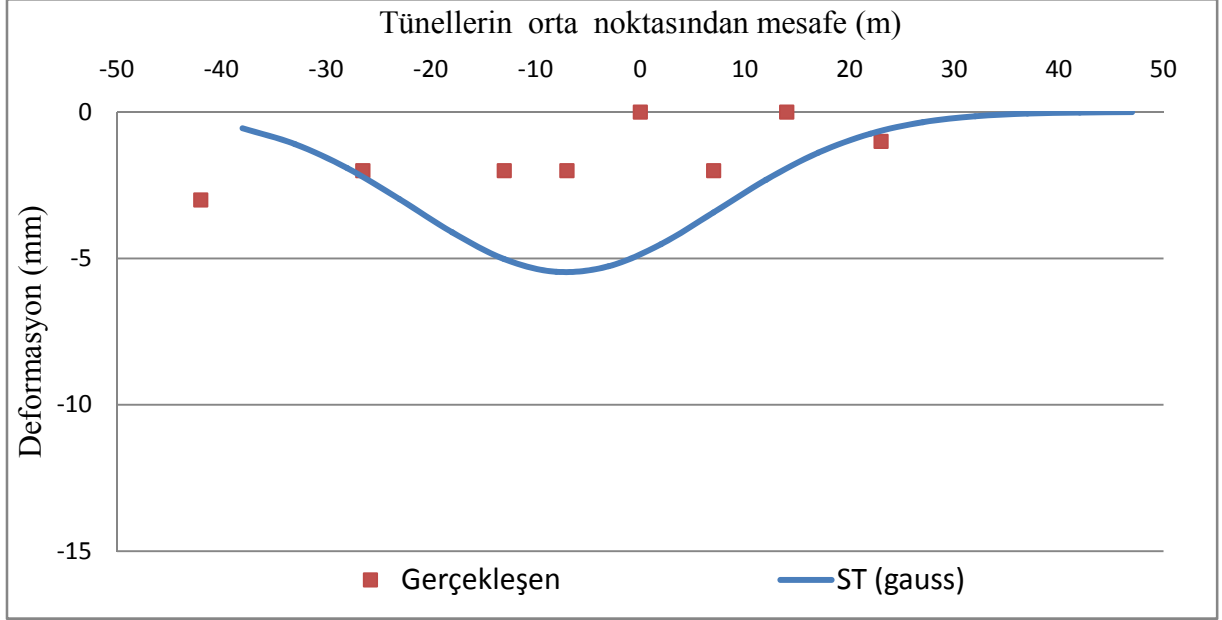
Şekil 7.39 Kesit 4 ‘de 1. Tünel kazısından sonra Chow (1994)’a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Smax’a bağlı Gauss Eğrisi fonksiyonunda gözönüne alınan hacim kaybı oranlarına göre hesaplanan deplasmanlar Çizelge 7.21’deki gibidir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)				
Nokta no:	0,40%	0,50%	0,60%	S gerçekleşen
SMP-4A	0	0	0	-3
SMP-4B	0	0	0	-2
SMP-4C	-1	-2	-2	-2
SMP-4D	-2	-3	-3	-2
SMP-4E	-3	-4	-5	0
SMP-4F	-4	-5	-5	-2
SMP-4G	-3	-4	-5	0
SMP-4H	-2	-2	-3	-1

Çizelge 7.21 Kesit 4’de 1. Tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar

Gauss eğrisi ile yapılan çözümde “ V_L ” değerinin % 0,50 kabul edilmesi durumunda hesaplanan deplasmanlarla gerçekleşen deplasmanların karşılaştırılması Şekil 7.40’da görülmektedir.

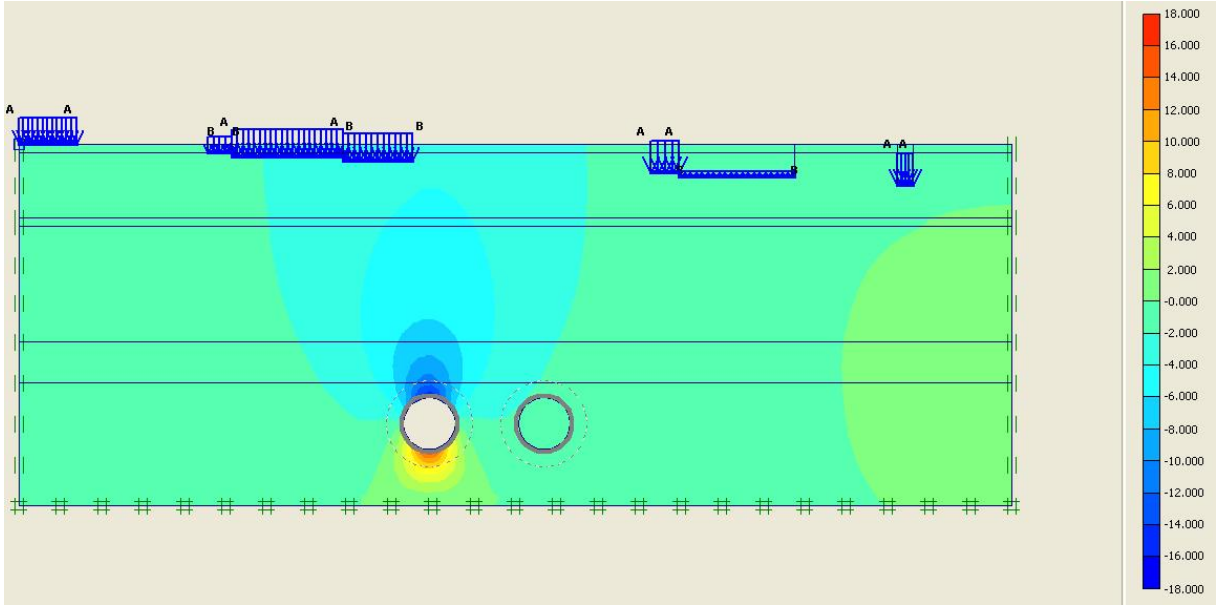


Şekil 7.40 Kesit 4 ‘de 1. tünel kazısından sonra Gauss eğrisi ile hesaplanan deplasman değerlerinin gerçekleşenlerle karşılaştırılması

Kesit 4’ün olduğu kısım Plaxis programı ile nümerik olarak modellenmiştir. Modelleme yapılırken Çizelge 7.22’deki parametreler kullanılmıştır.

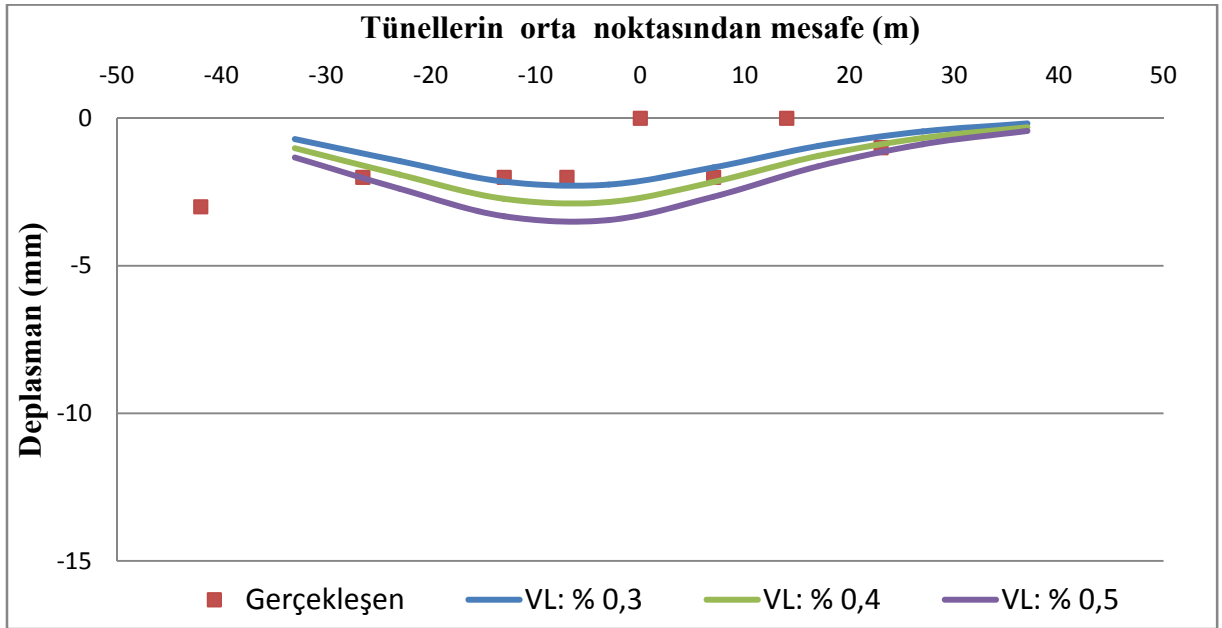
Kesit-4		γ_n	γ_s	$k_x = k_y$	E'	ν	c'	ϕ	YASS
Tabaka Sınırları	Litoloji	kN/m ³	kN/m ³	m/gün	kN/m ²	-	kN/m ²	°	m
0-1 m	Dolgu	17,5	19,5	0,1	4500	0,3	1	20	22
1-9 m	Kil-1	18	20	0,0001	38000	0,4	5	26	
9-10 m	Kum-1	18	20	1	31000	0,3	0,1	34	
10-24 m	Silt	18	20	0,0001	65000	0,4	10	28	
24-29 m	Kil-2	19	21	0,0001	70000	0,45	10	28	
29-44 m	Kum-2	19	21	1	63000	0,35	0,1	40	

Çizelge 7.22 Plaxis programında Kesit 4 için kullanılan parametreler



Şekil 7.41 Kesit 4'de 1. tünel kazısından sonra Plaxis ile hesaplanan deformasyonlar

Şekil 7.42'de değişik hacim kaybı oranı kabulleri için hesaplanan düşey deplasman dağılımlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması gösterilmiştir.



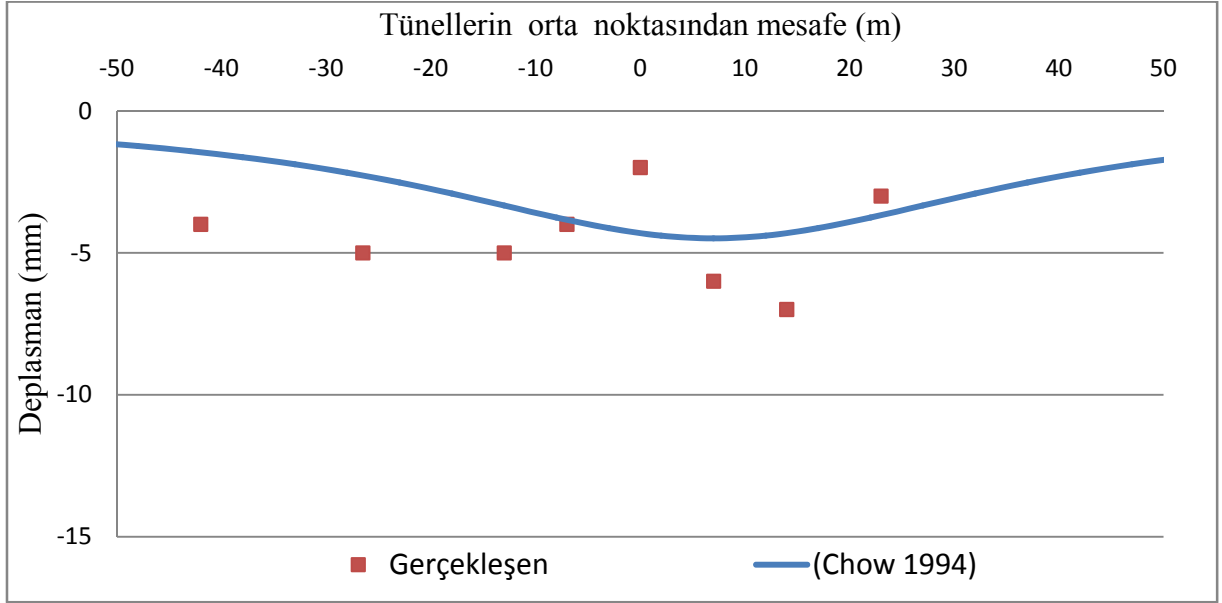
Şekil 7.42 Kesit 4'de 1. tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanları

Modelden hesaplanan deplasmanların gerçekleşen deplasmana en yakın bulunduğu hacim kaybı oranı değeri Kesit 4 deki 1. tünel için $V_L = \% 0,5$ olduğu gözlenmiştir.

7.4.4.2 Sadece 2. Tünel Kazısından Kaynaklanan Deplasmanların Tahminleri

Kesit 4'ün olduğu kısımda 2. tünelde kazısını tamamladıktan sonra sadece 2. Tünelden kaynaklanan deplasmanlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Kesit 4 için parametreler Çizelge 7.19'daki gibi seçilmiştir. Chow (1994)'ün yaklaşımı ile hesaplanan değerlerin, gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması Şekil 7.43 da verilmiştir.



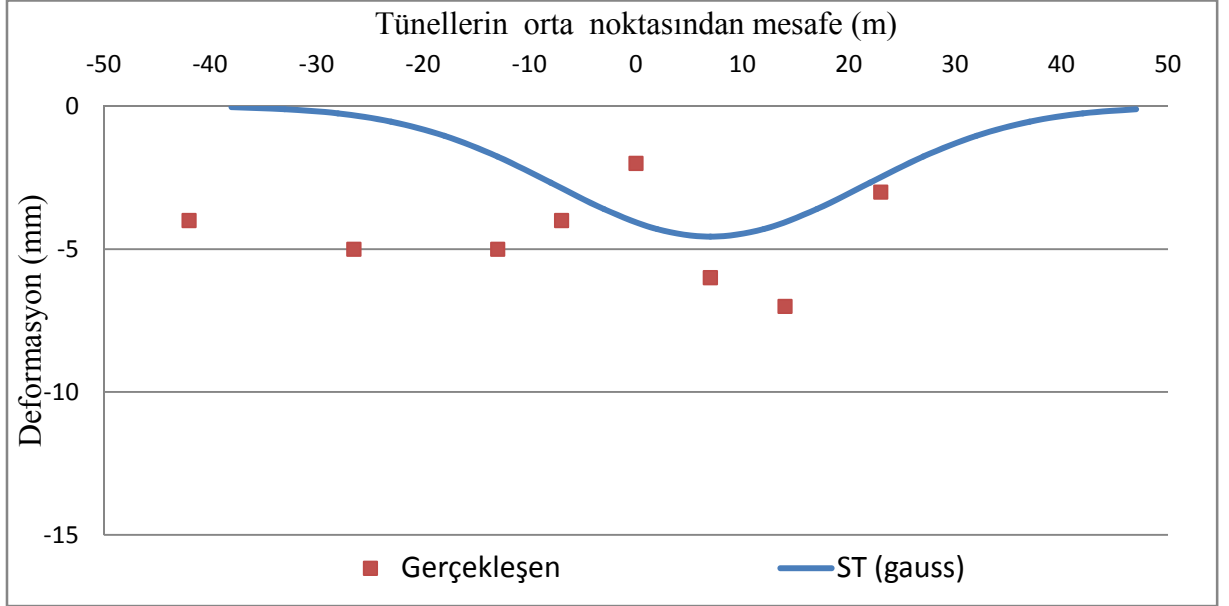
Şekil 7.43 Kesit-4'de 2. tünel kazısından kaynaklı deplasman Chow (1994)'a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerin karşılaştırılması

Sm_{ax}'a bağlı Gauss eğrisi tahmininde varsayılan hacim kaybı oranlarına göre hesaplanan deplasmanlar Çizelge 7.23'te gösterilmiştir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)				
Nokta no:	0,40%	0,50%	0,60%	S gerçekleşen
SMP-4A	0	0	0	-4
SMP-4B	-1	-2	-2	-5
SMP-4C	-3	-4	-5	-5
SMP-4D	-4	-5	-5	-4
SMP-4E	-3	-4	-5	-2
SMP-4F	-2	-3	-3	-6
SMP-4G	-1	-2	-2	-7
SMP-4H	0	-1	-1	-3

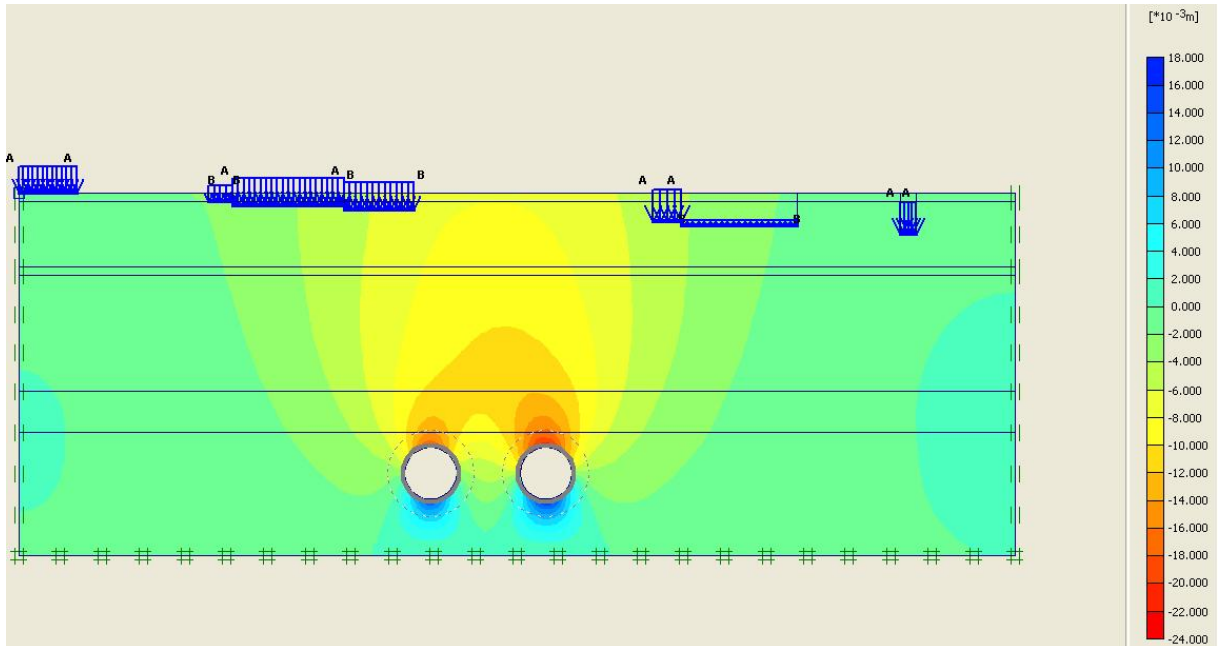
Çizelge 7.23 Kesit 4'de Gauss Eğrisi ile hesaplanan sadece 2. tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar

Gauss eğrisi ile yapılan çözümde “ V_L ” değerinin % 0,50 kabul edilmesi durumunda hesaplanan deplasmanlarla gerçekleşen deplasmanların karşılaştırılması Şekil 7.44’da görülmektedir.



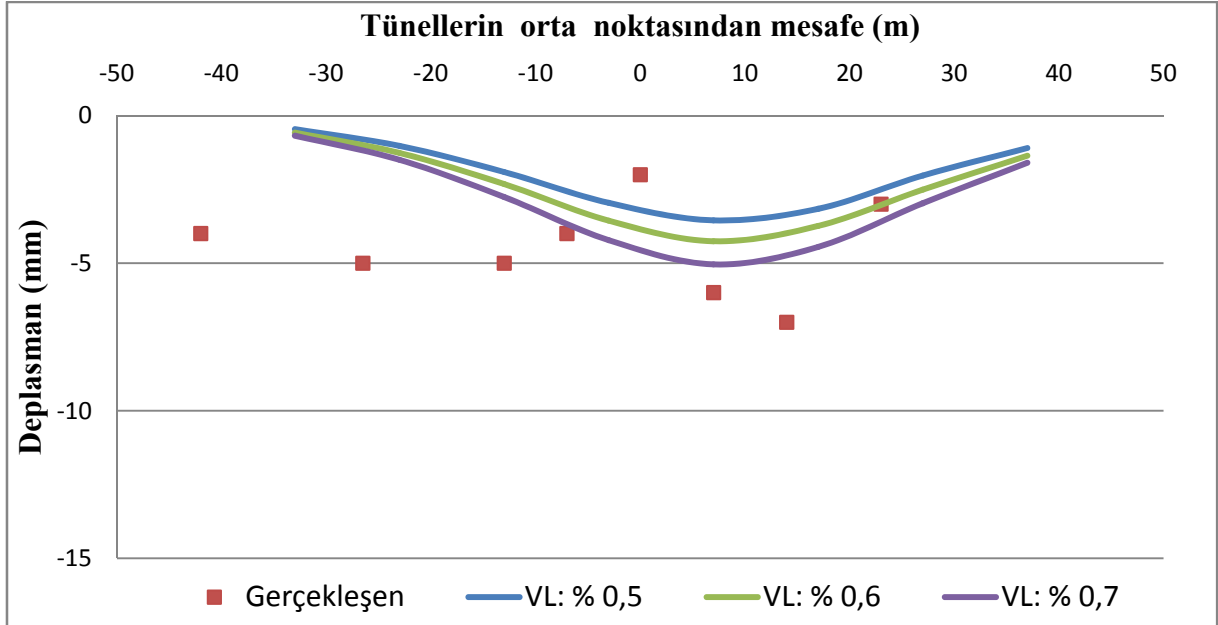
Şekil 7.44 Kesit-4’de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. tünel kazısından kaynaklanan deplasmanların gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Kesit 4’ün Plaxis programı ile nümerik modellenmesi sonucu hesaplanan 2. tünel kazısından sonraki deplasman dağılımı Şekil 7.45’de gösterilmiştir. Modelleme Çizelge 7.22’deki parametreler kullanılmıştır.



Şekil 7.45 Kesit-4’de 2. tünel kazısından sonra Plaxis’te hesaplanan deplasmanlar

Şekil 7.46'da değişik hacim kaybı oranları için hesaplanan düşey yüzey deplasmanları dağılımları gösterilmiştir.

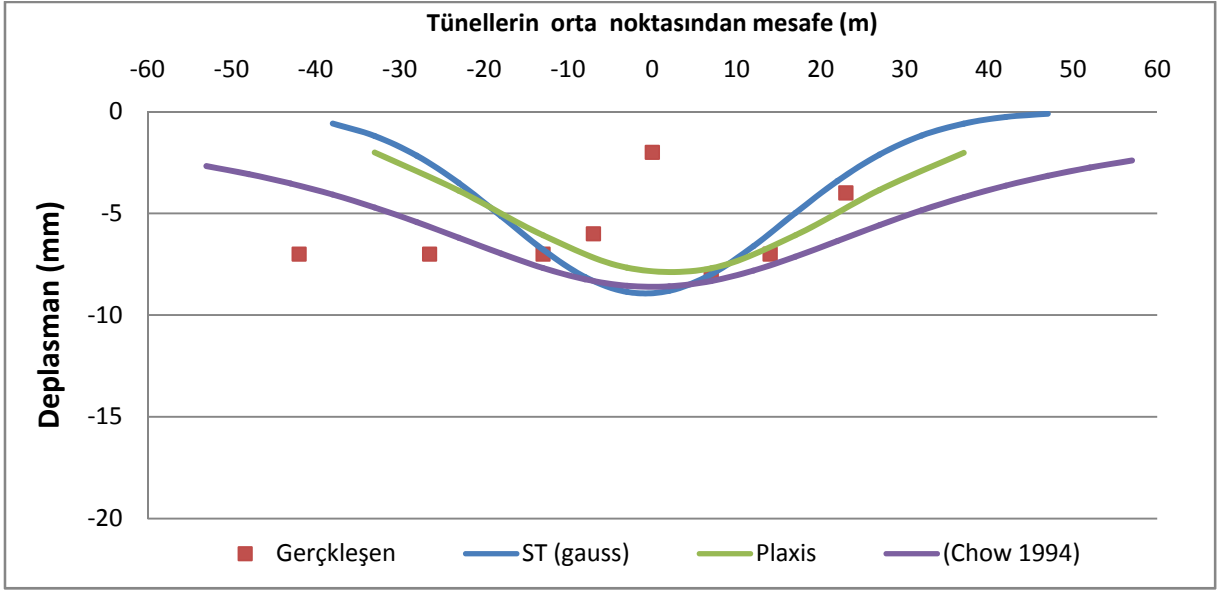


Şekil 7.46 Kesit 4'de 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar

Modelden hesaplanan ve gerçekleşen deplasmanların en yakın elde edildiği hacim kaybı oranı değerinin Kesit-4 deki 2. tünel için $V_L = \% 0,70$ olduğu gözlenmiştir.

7.4.4.3 2 Tünel Kazısı Tamamlandıktan Sonraki Toplam Deplasman Tahminleri

Tünellerin kazısını tamamlayıp kazı makinesi bölgeden uzaklaştıktan sonraki durum için hesaplanan ve ölçülen nihai deplasmanlar Şekil 7.47'de gösterilmiştir.

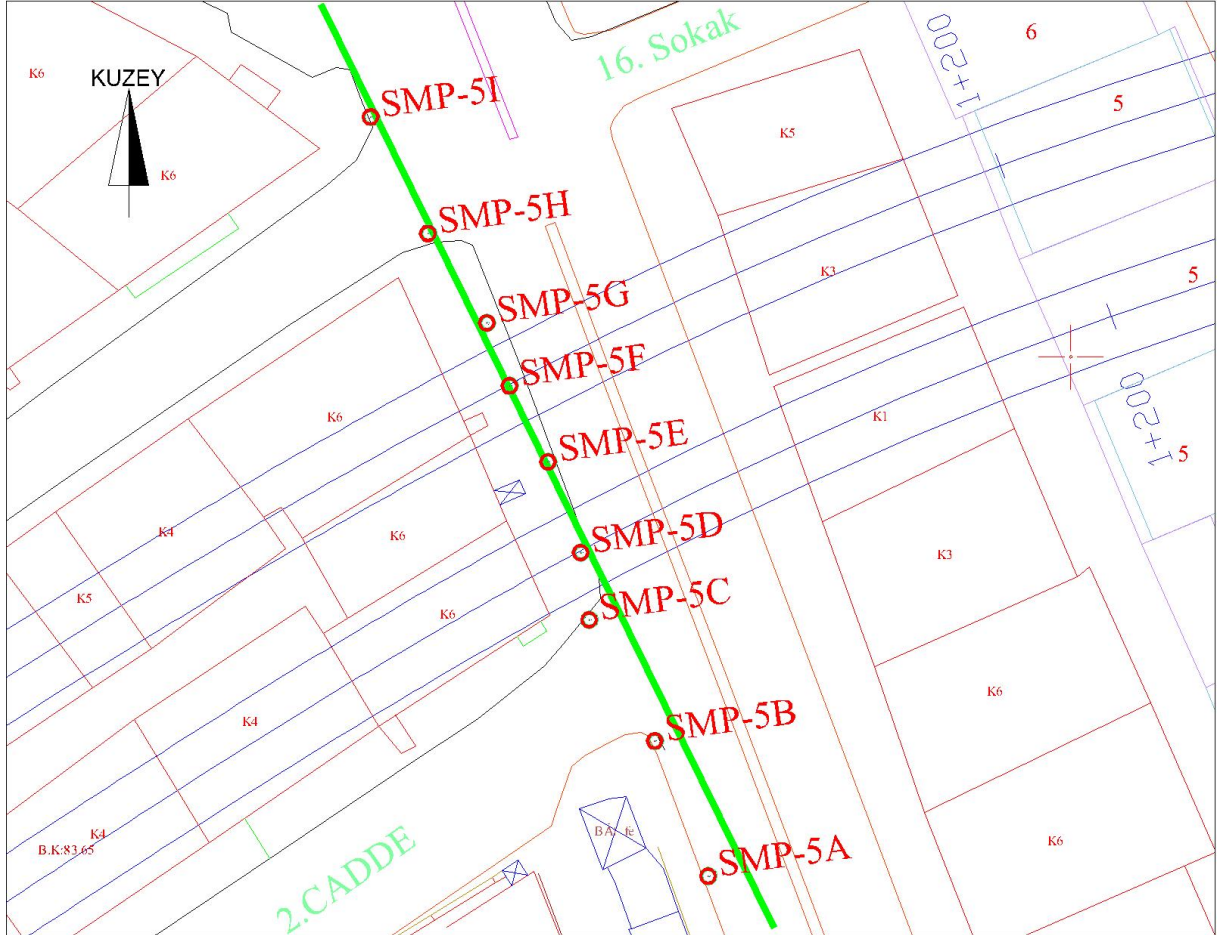


Şekil 7.47 Kesit 4’de gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar

Gauss yaklaşımına göre hacim kaybı oranları olarak 1.tünel için $V_L = \% 0,50$, 2.tünel için $V_L = \% 0,50$ değerleri, Plaxis modelinde ise; 1.tünel için $V_L = \% 0,50$, 2.tünel için $V_L = \% 0,70$ değerleri arazi ölçümleri ile en iyi uyumlu sonuçları vermektedir.

7.4.5 Kesit 5

Kesit-5 sağ hattaki tünele göre KM: 1+242 'de yer almaktadır. Bu noktada örtü kalınlığı yaklaşık 43,25 metredir. Yer altı su seviyesi yüzeyden 33 metre derindedir. Kesitin yer aldığı bölgenin vaziyet planı şekil 7.48'de, düşey kesiti ise Şekil 7.49'da gösterilmiştir.

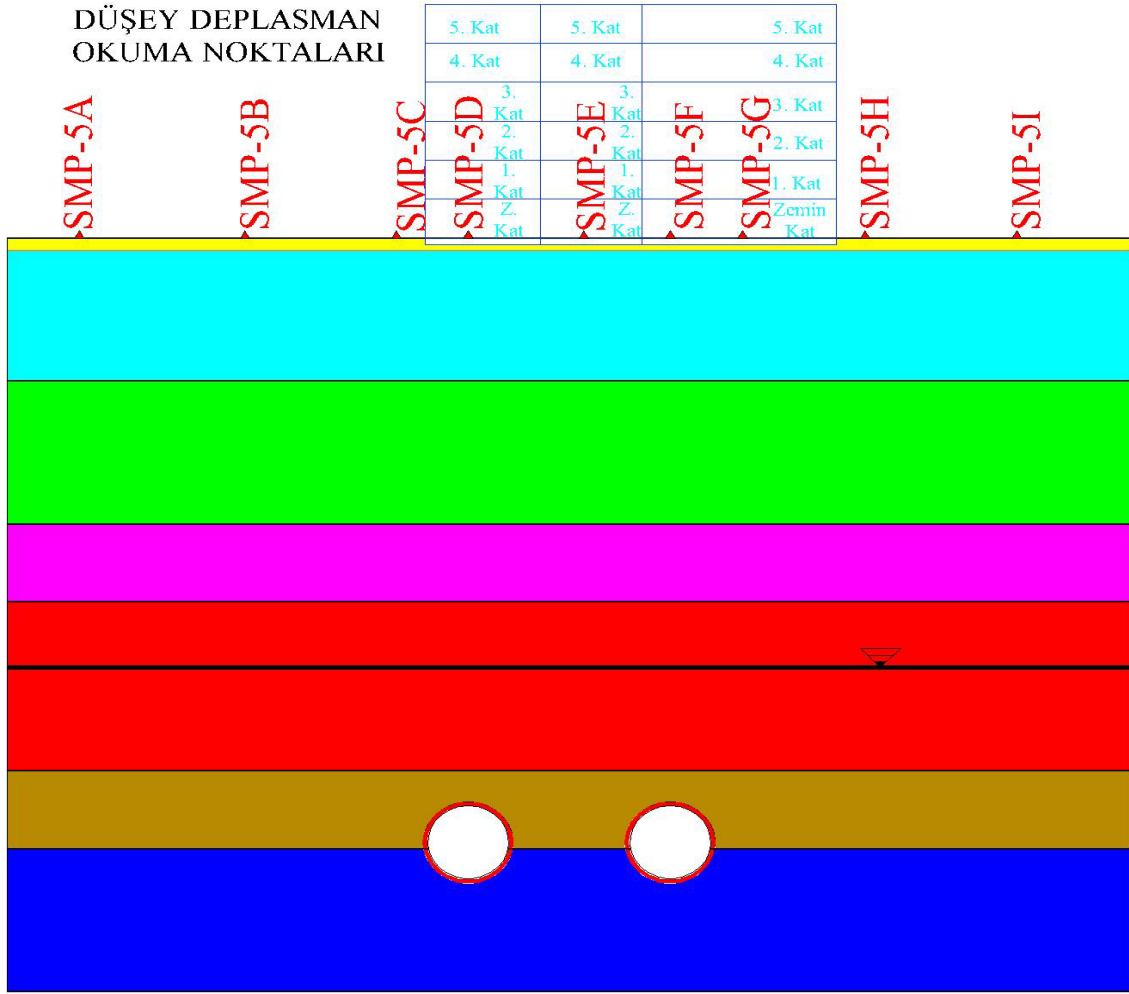


Şekil 7.48 Kesit 5 planı

Bölgeye en yakın olan sondaj YK-02 sondajıdır. Bu sondaja ait laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları Çizelge 7.24'de verilmiştir.

KESİT-5										
YK-02 SONDAJI										
LİTOLOJİ	Derinlik	LL (%)	PL (%)	PI	SPT		PRESİYOMETRE	E(kg/cm ²)	PL (kg/cm ²)	YASS
0-1 m Dolgu					0-1 m					-33 m
1-11 m Kil-1	7,5	56	25	31	1-11 m	Nort: 15				
11-22 m Kil-2					11-22 m	Nort:35				
22-28 m Kum-1					22-28 m	Nort: >50				
28-41 m Kil-3	30	66	26	40	28-41 m	Nort: >50				
41-47 m Kum-2					41-47 m	Nort: R	43,00 m	352	28	
							46,00 m	575	35	
47- 58 m Kil-4	52,5	58	22	36	47-58 m	Nort: R	49,00 m	326	14	

Çizelge 7.24 YK-02 Sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları



Şekil 7.49 Kesit 5 'in olduğu kısmın düşey kesiti

7.4.5.1 1. Tünel Kazısını Tamamladıktan Sonraki Deformasyon Tahminleri

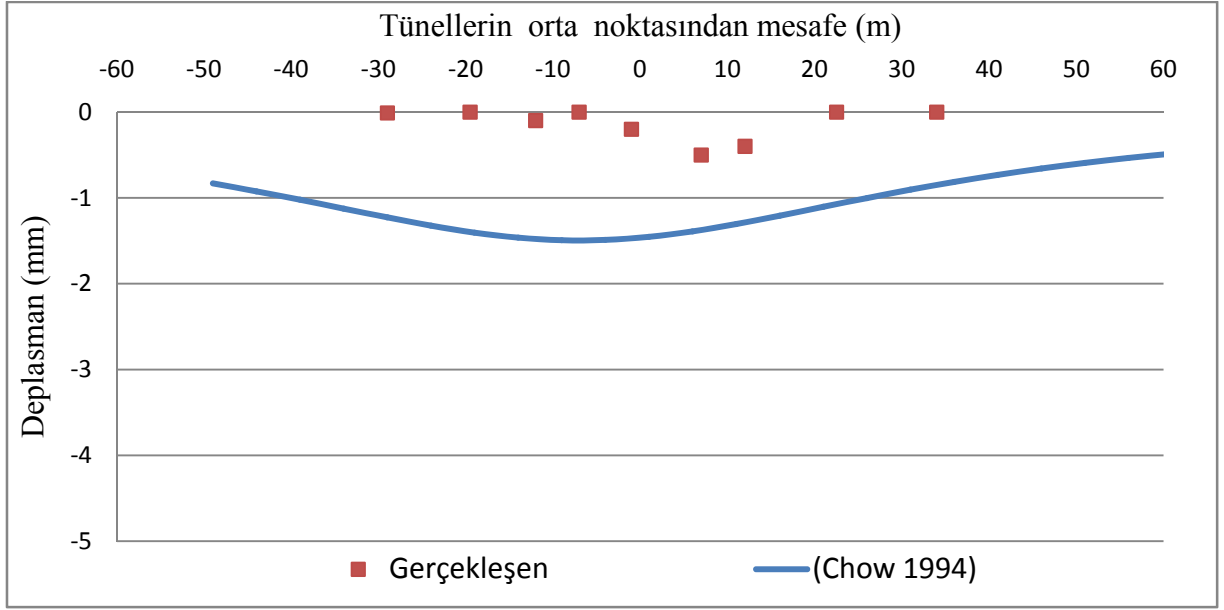
Kesit 5'in olduğu kısımda 1. tünel kazısı tamamlandıktan sonra gerçekleşen deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Chow (1994)'ün nümerik yaklaşımı ile deformasyonlar hesaplanmıştır. Zeminin homojen kabulü ile Kesit-5 için Çizelge 7.25'te verilen ortalama değerler seçilmiştir.

KM: 1+859	ÖRTÜ KALINLIĞI (m)	TÜNEL ÇAPI (m)	BİRİM HACİM AĞIRLIK kN/m ³	G kayma Modülü kN/m ²
TÜNELLER	43,25	6,5	17	60000

Çizelge 7.25 Nümerik hesap parametreleri

Hesaplanan değerlerin gerçekleşen yüzey deplasmanları ile karşılaştırılması Şekil 7.50'de gösterilmiştir.



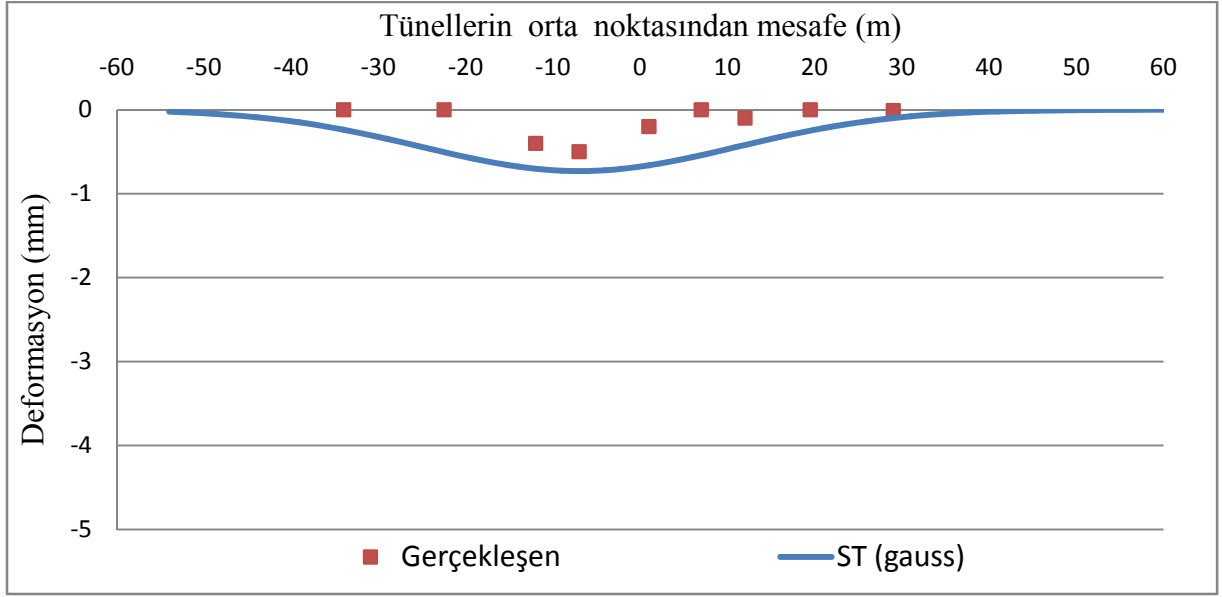
Şekil 7.50 Kesit 5'de 1. Tünel kazısından sonra Chow (1994)'a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

S_{max}'a bağlı Gauss Eğrisi fonksiyonunda gözönüne alınan hacim kaybı oranlarına göre hesaplanan deplasmanlar Çizelge 7.26'de gösterilmiştir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)				
Nokta no:	0,10%	0,20%	0,30%	S gerçekleşen
SMP-5A	0	0	-1	0
SMP-5B	-1	-1	-2	0
SMP-5C	-1	-1	-2	0
SMP-5D	-1	-1	-2	-1
SMP-5E	-1	-1	-2	0
SMP-5F	-1	-1	-2	0
SMP-5G	0	-1	-1	0
SMP-5H	0	0	-1	0
SMP-5I	0	0	0	0

Çizelge 7.26 Kesit 5'de 1. Tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar

Burada S_{max} değerine göre hacim kaybı oranı için hesaplarda minimum değer olarak $V_L = \% 0,10$ seçilmiştir. Bu hacim kaybı oranına göre Gauss eğrisinden hesaplanan deplasmanlarla gerçekleşen deplasmanlar Şekil 6.43'te gösterilmiştir.

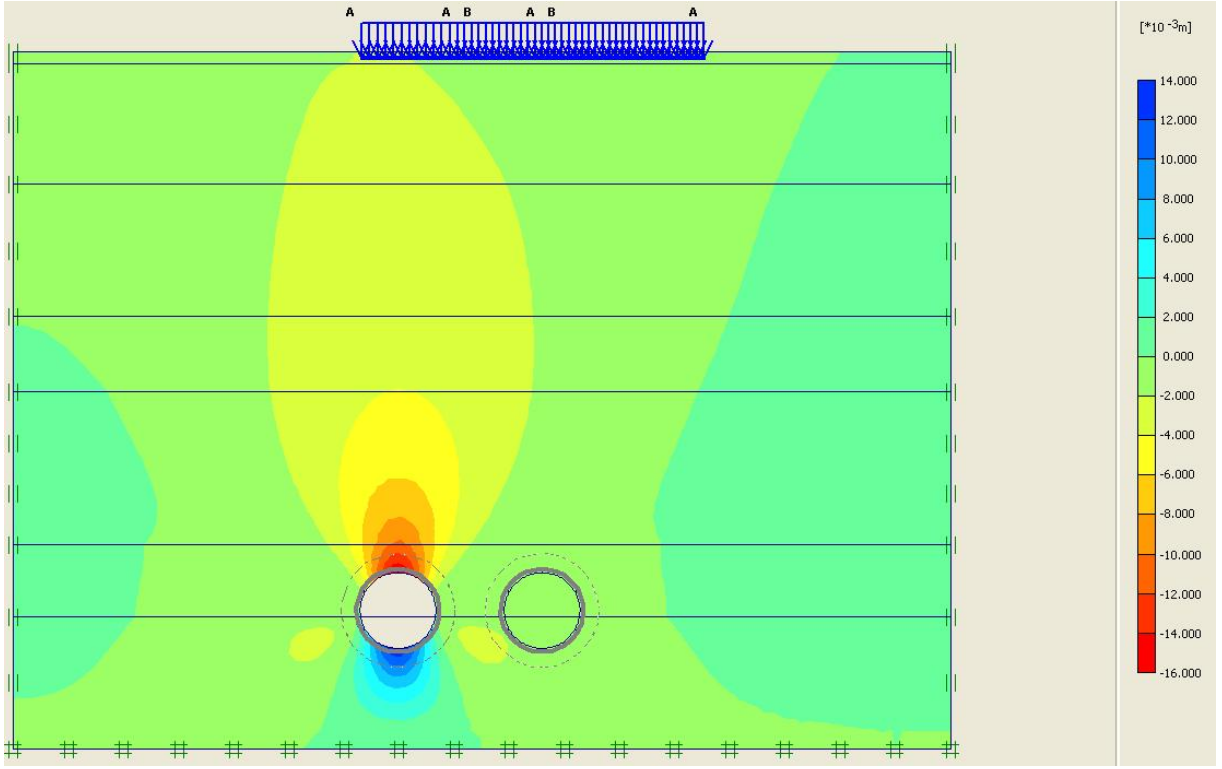


Şekil 7.51 Kesit 5'de 1. tünel kazısından sonra Gauss eğrisi ile hesaplanan deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Kesit 5'in olduğu kısım Plaxis programı ile nümerik olarak modellenmiş ve hesaplanan deplasman dağılımı Şekil 7.52'de gösterilmiştir. Modelleme yapılırken Çizelge 7.27'deki parametreler kullanılmıştır.

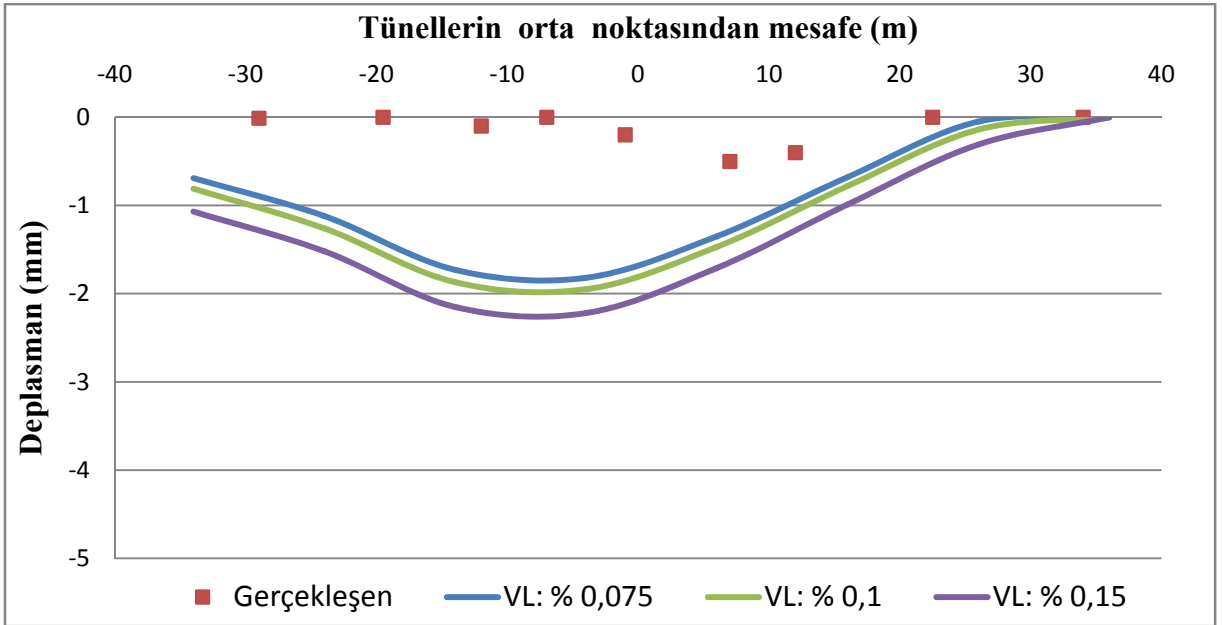
Kesit-5		γ_n	γ_s	$k_x = k_y$	E'	ν	c'	ϕ	YASS
Tabaka Sınırları	Litoloji	kN/m^3	kN/m^3	m/gün	kN/m^2	-	kN/m^2	$^\circ$	m
0-1 m	Dolgu	16	18	0,1	4500	0,3	1	20	33
1-11 m	Kil-1	18	20	0,0001	21000	0,4	2	29	
11-22 m	Kil-2	18	20	0,0001	49000	0,4	8	26	
22-28 m	Kum-1	18	20	1	60000	0,3	0,1	40	
28-41 m	Kil-3	19	21	0,0001	65000	0,45	10	28	
41-47 m	Kum-2	19	21	1	63000	0,35	0,1	40	
47-58 m	Kil-4	19	21	0,0001	70000	0,45	10	28	

Çizelge 7.27 Plaxis programında Kesit 5 için kullanılan parametreler



Şekil 7.52 Kesit 5’de 1. tünel kazısından sonra Plaxis’le hesaplanan deplasmanlar

Şekil 7.53’te değişik hacim kaybı oranı kabulleri için hesaplanan düşey yüzey deplasmanı dağılımlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması gösterilmiştir.



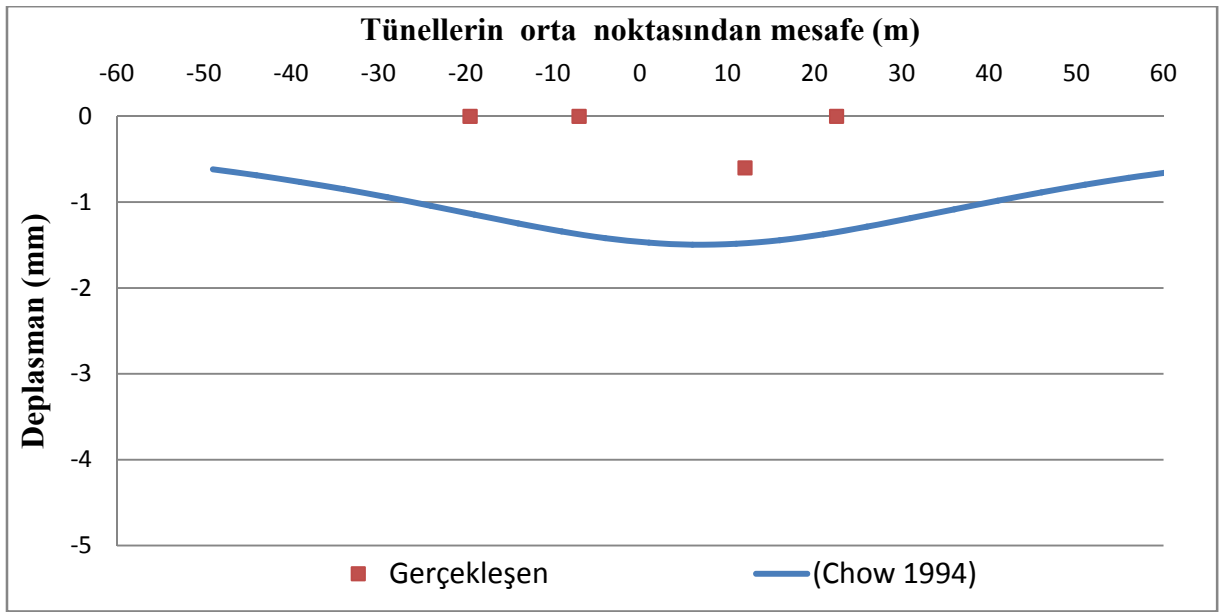
Şekil 7.53 Kesit 5’de 1. tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanları

Nümerik modelden hesaplanan ve gerçekleşen deplasmanların en yakın elde edildiği hacim kaybı oranı değerinin Kesit 5 deki 1. tünel için $V_L = \% 0,10$ olduğu gözlenmiştir..

7.4.5.2 Sadece 2. Tünel Kazısından Kaynaklanan Deplasmanların Tahmini

Kesit 5'in olduğu kısımda 2. tünel kazısı tamamlandıktan sonra sadece 2. Tünelden kaynaklanan deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Kesit 5 için parametreler Çizelge 7.24'deki gibi seçilmiştir. Chow (1994)'ün nümerik yaklaşımı ile hesaplanan deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlara göre değişimi Şekil 7.54 da verilmiştir.



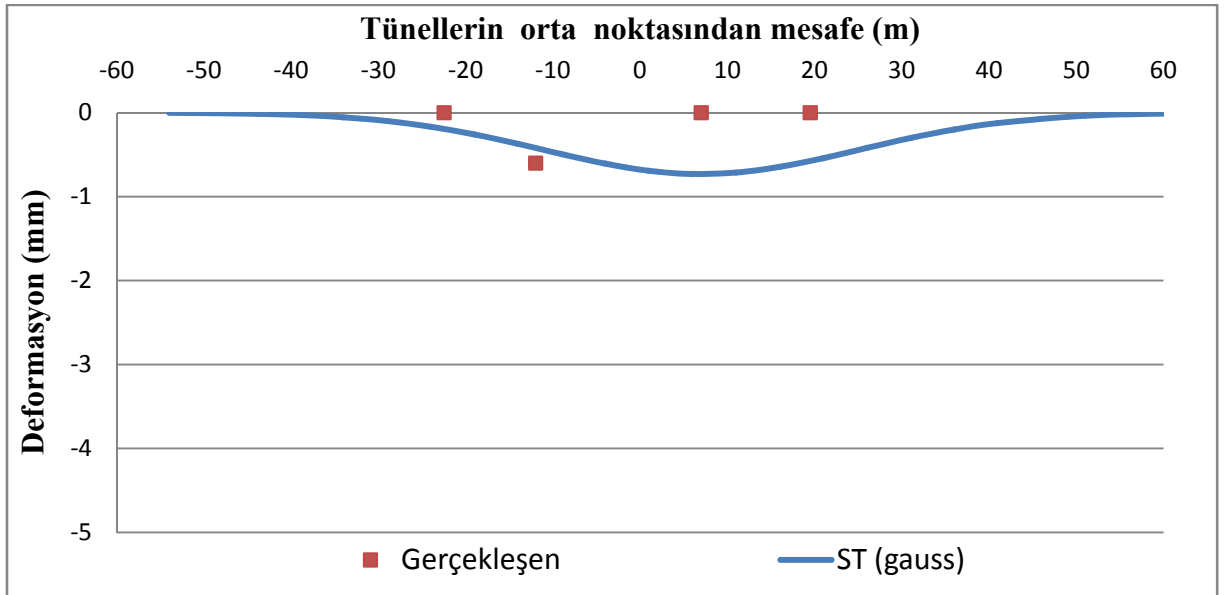
Şekil 7.54 Kesit-5'de sadece 2. tünel kazısından kaynaklı deplasmanların Chow (1994)'a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerin karşılaştırılması

Smax'a bağlı Gauss eğrisi fonksiyonunda gözönüne alınan hacim kaybı oranlarına göre hesaplanan yüzey deplasmanları Çizelge 7.28'te gösterilmiştir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)				
Nokta no:	0,10%	0,20%	0,30%	S gerçekleşen
SMP-5A	0	0	0	1
SMP-5B	0	0	-1	0
SMP-5C	0	-1	-1	-1
SMP-5D	-1	-1	-2	1
SMP-5E	-1	-1	-2	0
SMP-5F	-1	-1	-2	0
SMP-5G	-1	-1	-2	-7
SMP-5H	-1	-1	-2	0
SMP-5I	0	-1	-1	1

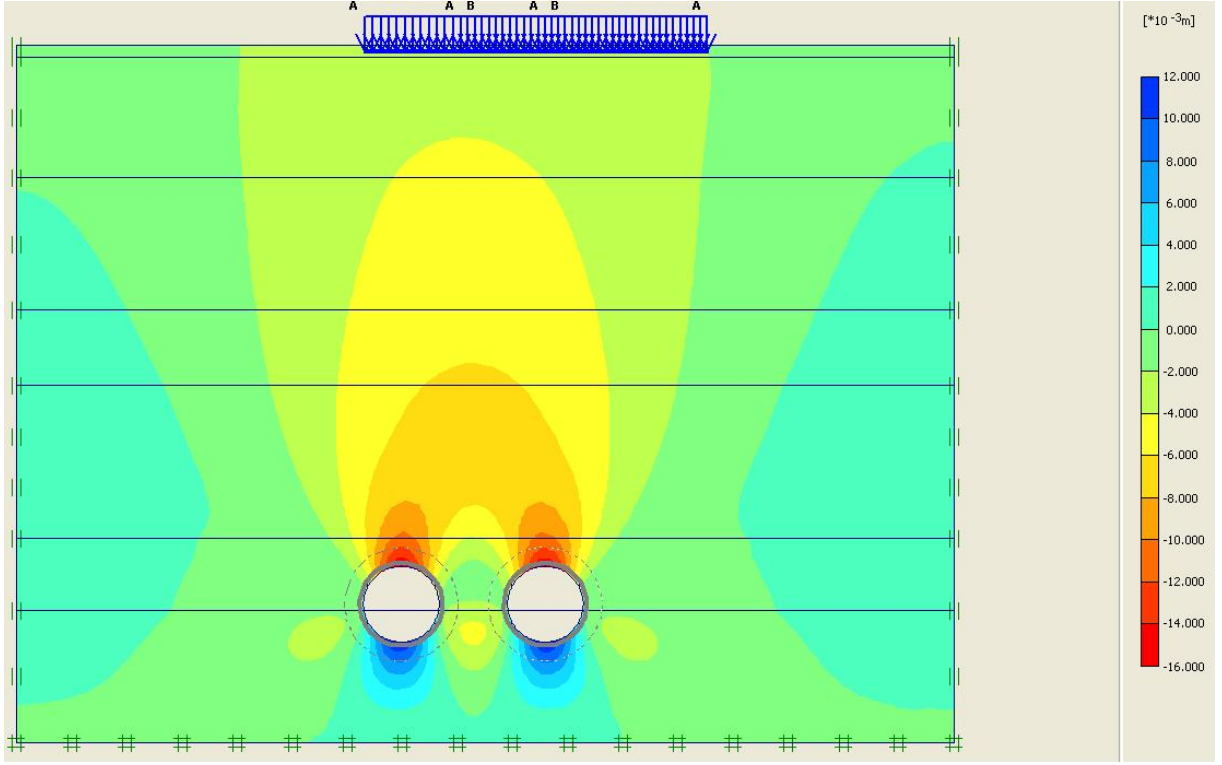
Çizelge 7.28 Kesit 5’de Gauss Eğrisi ile hesaplanan sadece 2. tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar

Gauss eğrisi ile yapılan çözümde V_L değerinin % 0,10 kabul edilmesi durumunda hesaplanan deplasmanlarla gerçekleşen deplasmanların karşılaştırılması Şekil 7.55’de görülmektedir.



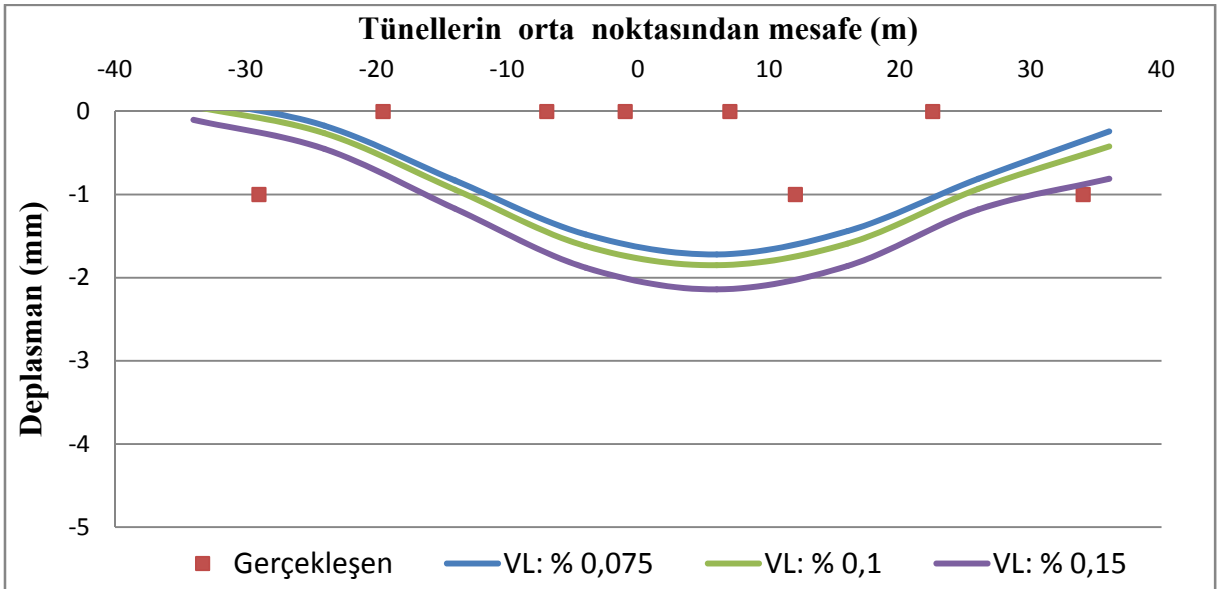
Şekil 7.55 Kesit-5’de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. tünel kazısından kaynaklanan deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Kesit 5’in Plaxis programı ile nümerik modellenmesi sonucunda 2.tünel kazısından sonra hesaplanan deplasman dağılımı Şekil 7.56’de gösterilmiştir. Modelleme Çizelge 7.27’deki parametreler kullanılmıştır.



Şekil 7.56 Kesit-5’de 2. tünel kazısından sonra Plaxis’te hesaplanan deplasmanlar

Şekil 7.57 de değişik hacim kaybı oranları için hesaplanan düşey yüzey deplasman dağılımları gösterilmiştir.

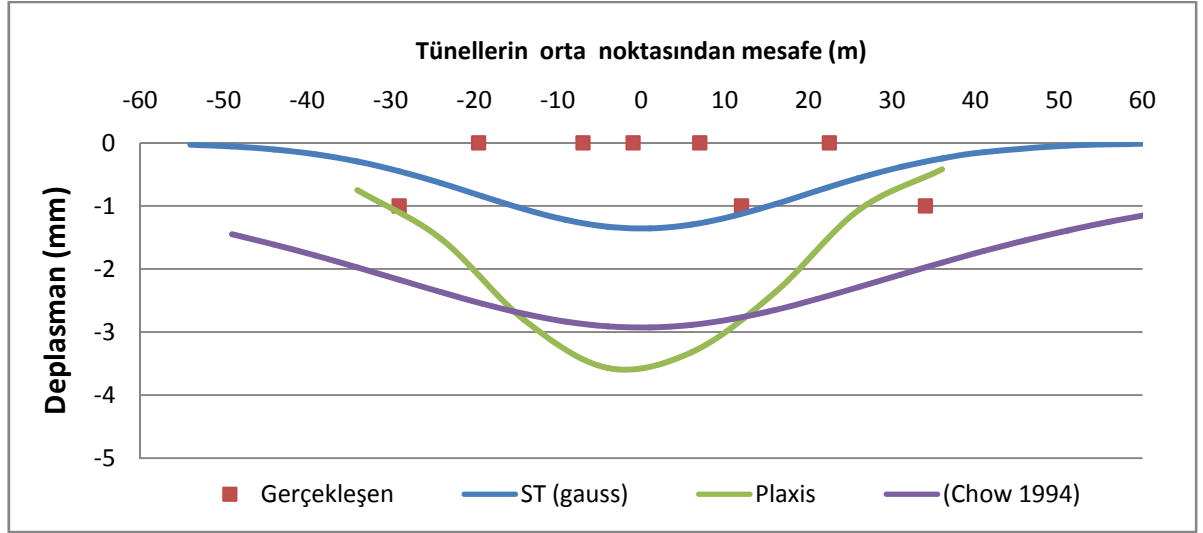


Şekil 7.57 Kesit 5’de 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar

Numerik modelden hesaplanan deplasmanların gerçekleşen deplasmanlara en yakın elde edildiği hacim kaybı oranı değerinin Kesit-5 deki 2. tünel için $V_L = \% 0,1$ olduğu gözlenmiştir.

7.4.5.3 2 Tünel Kazısı Tamamlandıktan Sonraki Toplam Deplasman Tahminleri

Tünellerin kazısı tamamlandıktan sonraki durumda hesaplanan ve ölçülen bölgedeki nihai yüzey deplasmanları Şekil 6.50'da gösterilmiştir.

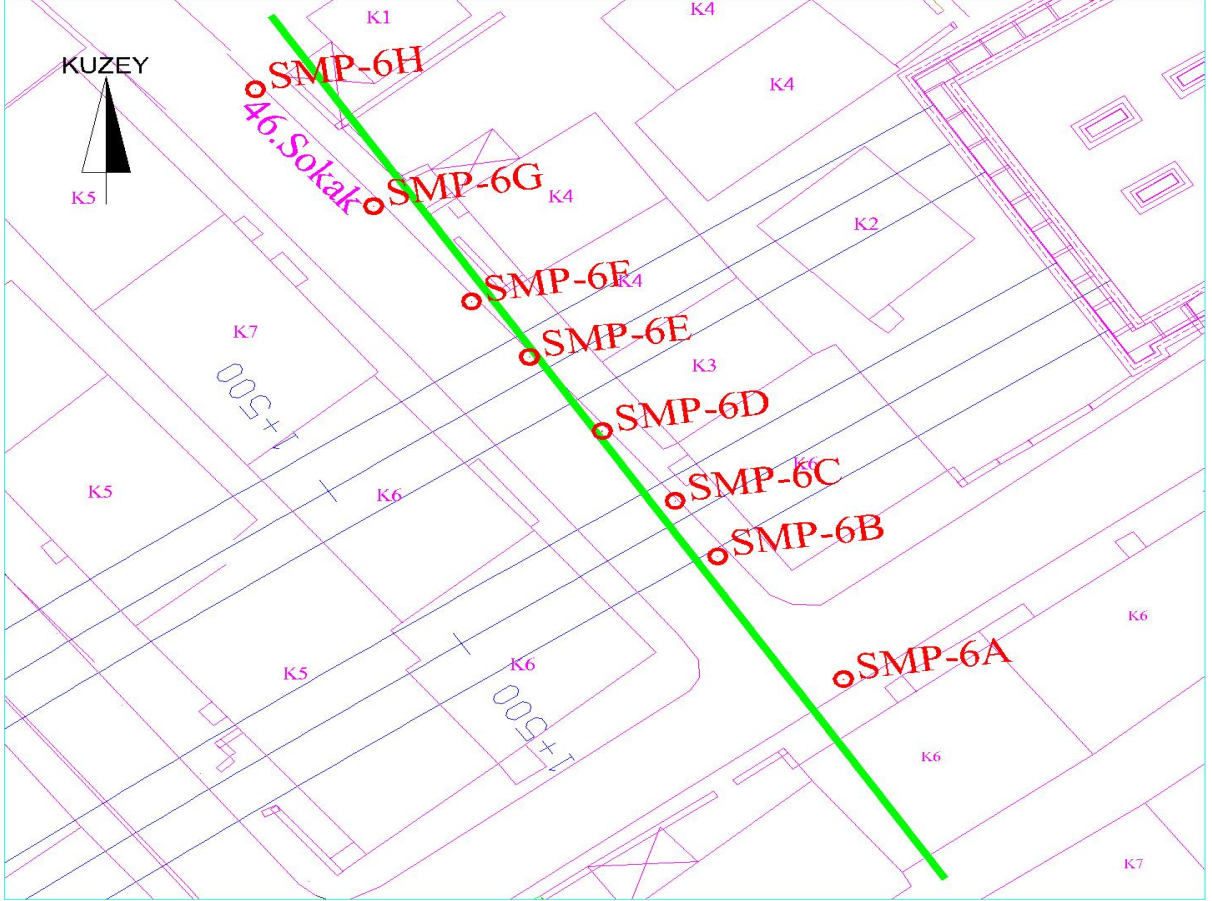


Şekil 7.58 Kesit 5'de gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar

Gauss yaklaşımına ve Plaxis modeline göre hacim kaybı oranı değerinin 1. tünel ve 2. tünel için $V_L < \% 0,10$ olduğu görülmüş, fakat hesaplarda minimum değer olarak $V_L = \% 0,10$ seçilmiştir.

7.4.6 Kesit 6

Kesit-6 sağ hattaki tünele göre Km: 1+482'ta yer almaktadır. Bu noktada örtü kalınlığı yaklaşık 19,75 metredir. Yer altı su seviyesi çok derindedir. Kesitin yer aldığı bölgenin vaziyet planı Şekil 7.59'da, düşey kesiti ise Şekil 7.60'ta gösterilmiştir.

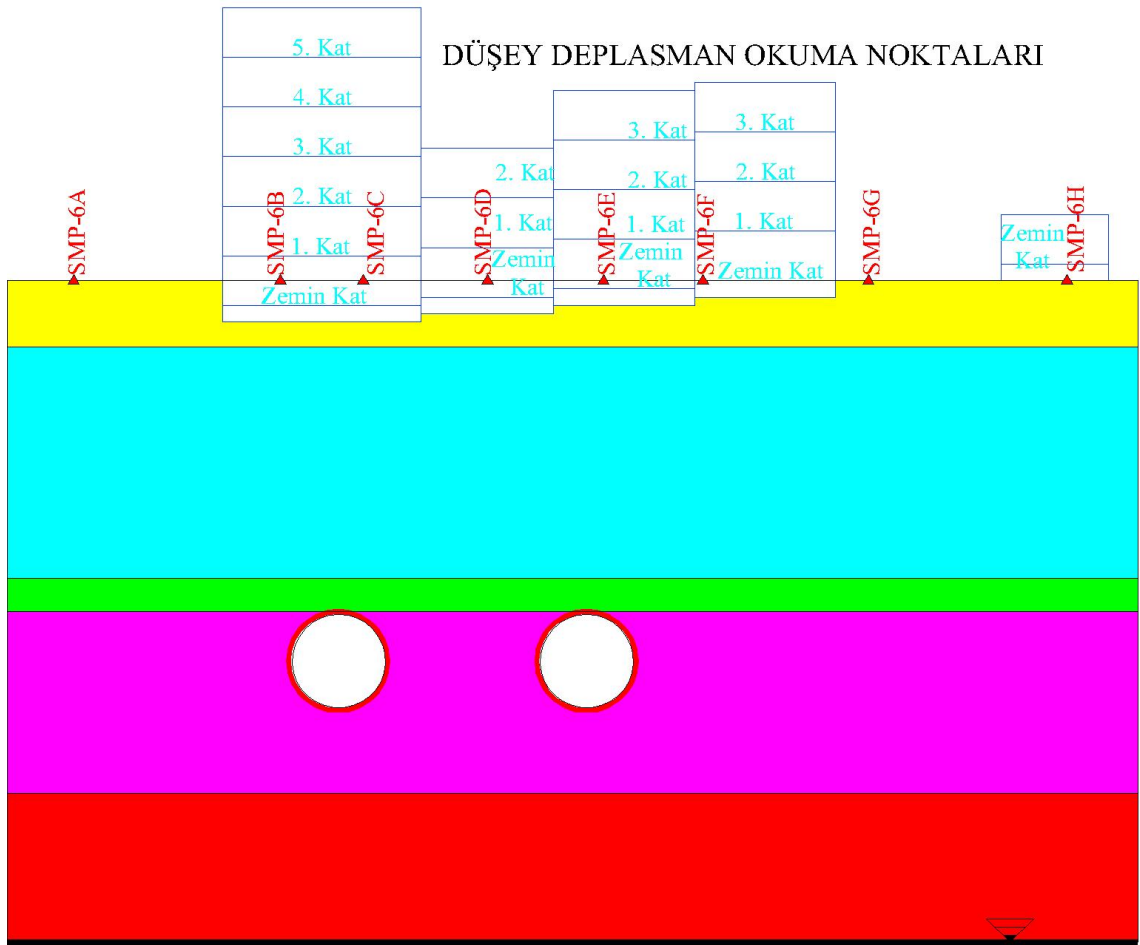


Şekil 7.59 Kesit 6 planı

Bölgeye en yakın sondaj BH5-DT sondajıdır. Bu sondaja ait laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları Çizelge 7.29 'de verilmiştir.

KESİT-6										
BH5-DT SONDAJI										
LİTOLOJİ	Derinlik	DBHA (g/cm ³)	LL (%)	PL (%)	PI	PRESİYOMETRE	E(kg/cm ²)	PL (kg/cm ²)	TORVANE C (Kg/cm ³)	CEP PENETROMETRESİ
1-4 m Kil	1,5		82	30	52				0,81	1,71
	3								1,95	3,20
4-18 m Kum-1	4,5		32	14	18					3,60
	6									3,4
	7,5		30	17	13					2
	9									3,2
	10,5		34	19	15					4,4
13,5		48	29	19						
18-20 m Kumtaşı						19	210	23,7		
20-31 Kumlu Kil	22		55	24	31					
	22,5		59	23	36	22,5	248	24,7		
	24	1,89	60	23	37					
	25,5		42	21	21					
31-40 m Siltli Kum	28,5		48	21	27	31,5	225	22		
						34,5	215	23		
						37,5	275	25		

Çizelge 7.29 BH5-DT Sondajı laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları



Şekil 7.60 Kesit 6 'nın olduğu kısmın dikine kesiti

7.4.6.1 1. Tünel Kazısını Tamamladıktan Sonraki Deformasyon Tahminleri

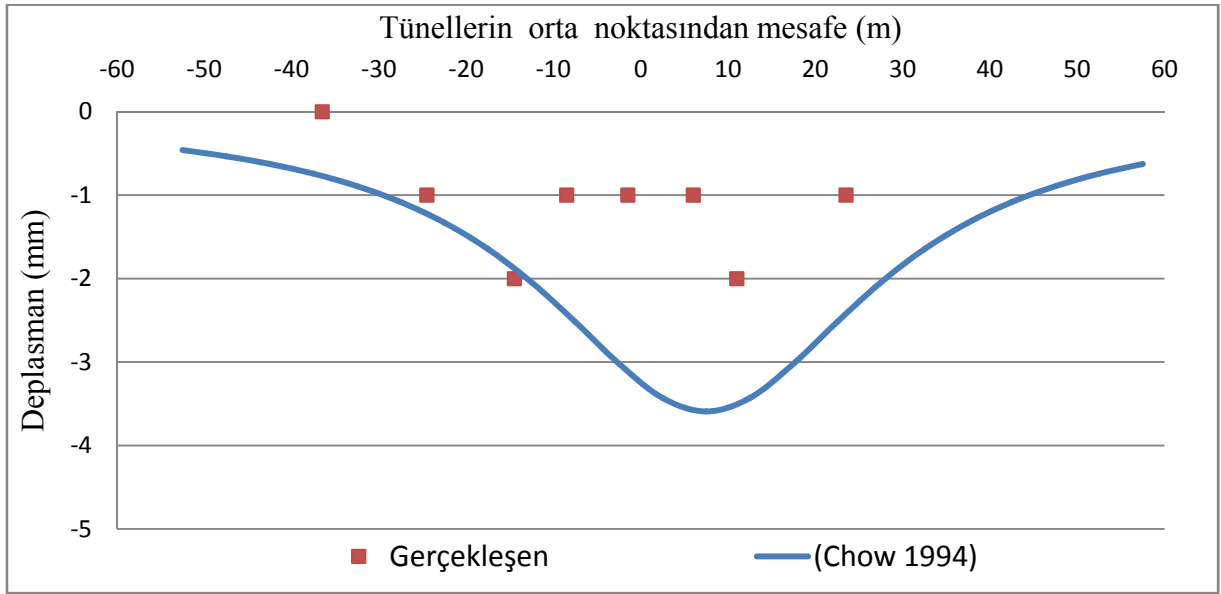
Kesit 6'nın olduğu kısımda 1. tünel kazısı tamamlandıktan sonra gerçekleşen deformasyonlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Chow (1994)'ün nümerik yaklaşımı ile deformasyonlar hesaplanmıştır. Kesit-6 için parametreler Çizelge 7.30'deki gibidir.

KM: 1+859	ÖRTÜ KALINLIĞI (m)	TÜNEL ÇAPı (m)	BİRİM HACİM AĞIRLIK kN/m ³	G kayma Modülü kN/m ²
TÜNELLER	19,75	6,5	17	25000

Çizelge 7.30 Nümerik hesap parametreleri

Hesaplanan yüzey düşey deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlar ile karşılaştırılması Şekil 7.61'de gösterilmiştir.



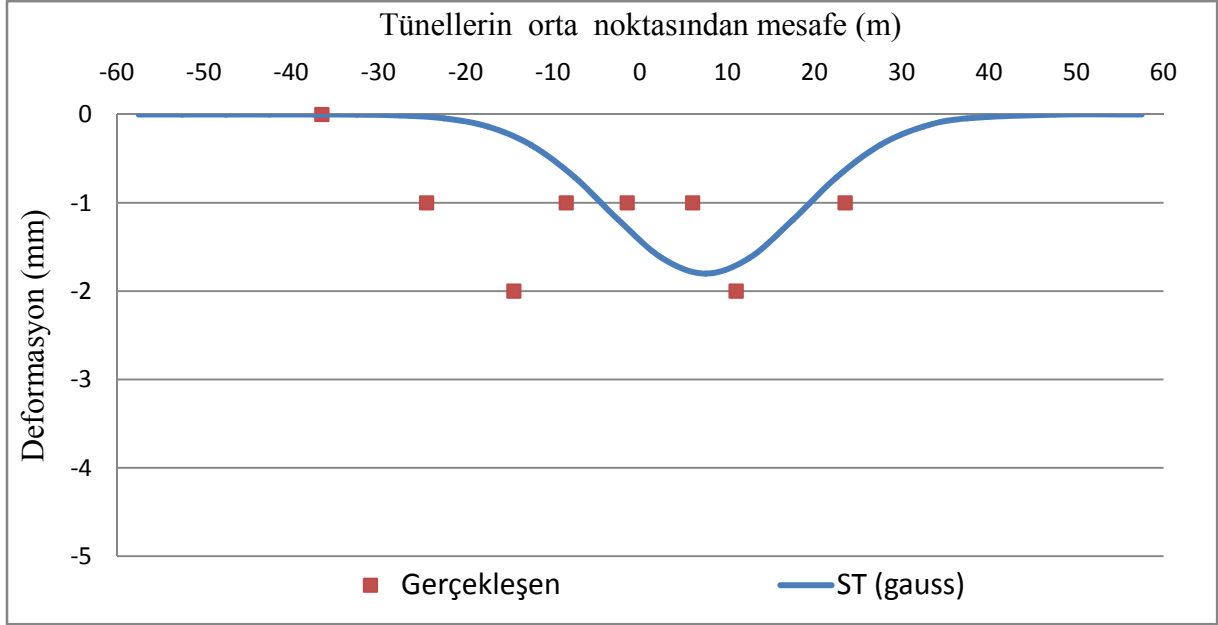
Şekil 7.61 Kesit 6'da 1. Tünel kazısından sonra Chow (1994)'a göre hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

S_{max}'a bağlı Gauss Eğrisi tahmininde varsayılan hacim kaybı oranlarına göre hesaplanan deplasmanlar Çizelge 7.31'de verilmiştir.

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)				
Nokta no:	0,10%	0,15%	0,20%	S gerçekleşen
SMP-6A	0	-1	-1	-1
SMP-6B	-1	-2	-2	-2
SMP-6C	-1	-2	-2	-1
SMP-6D	-1	-1	-2	-1
SMP-6E	0	-1	-1	-1
SMP-6F	0	0	0	-2
SMP-6G	0	0	0	-1
SMP-6H	0	0	0	0

Çizelge 7.31 Kesit 6'da 1. Tünel kazısından sonra Gauss Eğrisi ile hesaplanan hacim kaybına bağlı deplasmanlar

Gauss eğrisi ile yapılan çözümde “ V_L ” değerinin % 0,1 kabul edilmesi durumunda hesaplanan deplasmanlarla gerçekleşen deplasmanların karşılaştırılması Şekil 7.62’de görülmektedir.

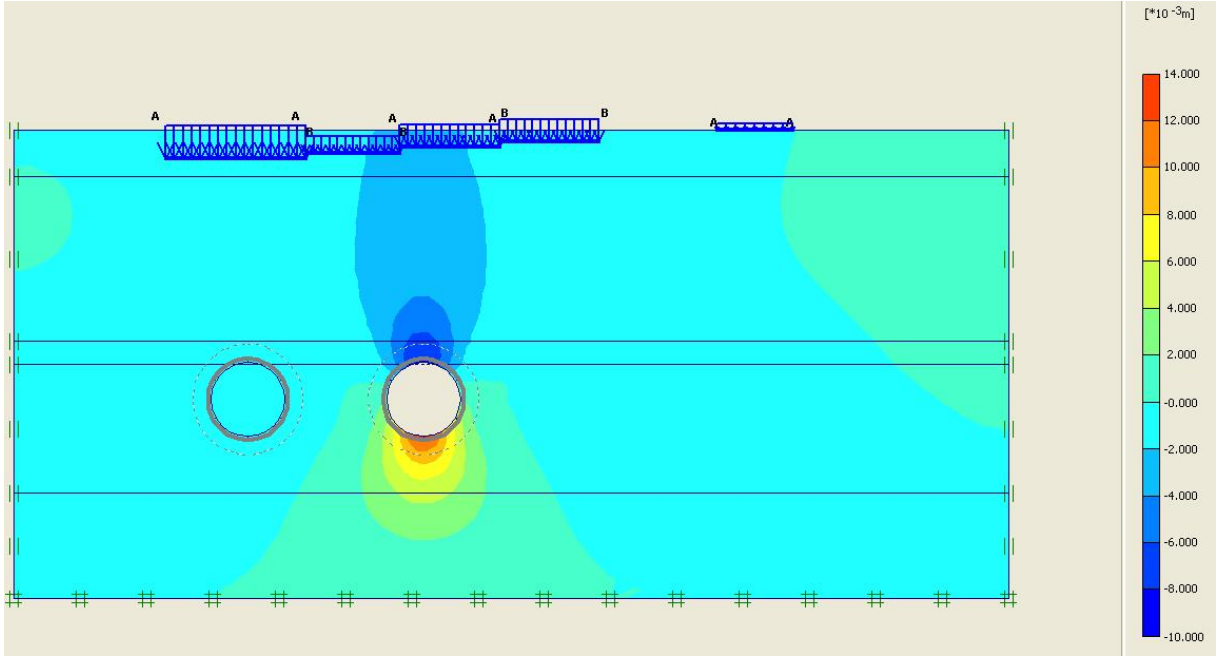


Şekil 7.62 Kesit 6’de 1. tünel kazısından sonra Gauss eğrisi ile hesaplanan deplasman değerlerinin gerçekleşenlerle karşılaştırılması

Kesit 6’in olduğu kısım Plaxis programı ile modellenmiştir. Modelleme yapılırken Çizelge 7.32’deki parametreler kullanılmıştır. Elde edilen deplasman dağılımı Şekil 7.63’de gösterilmiştir.

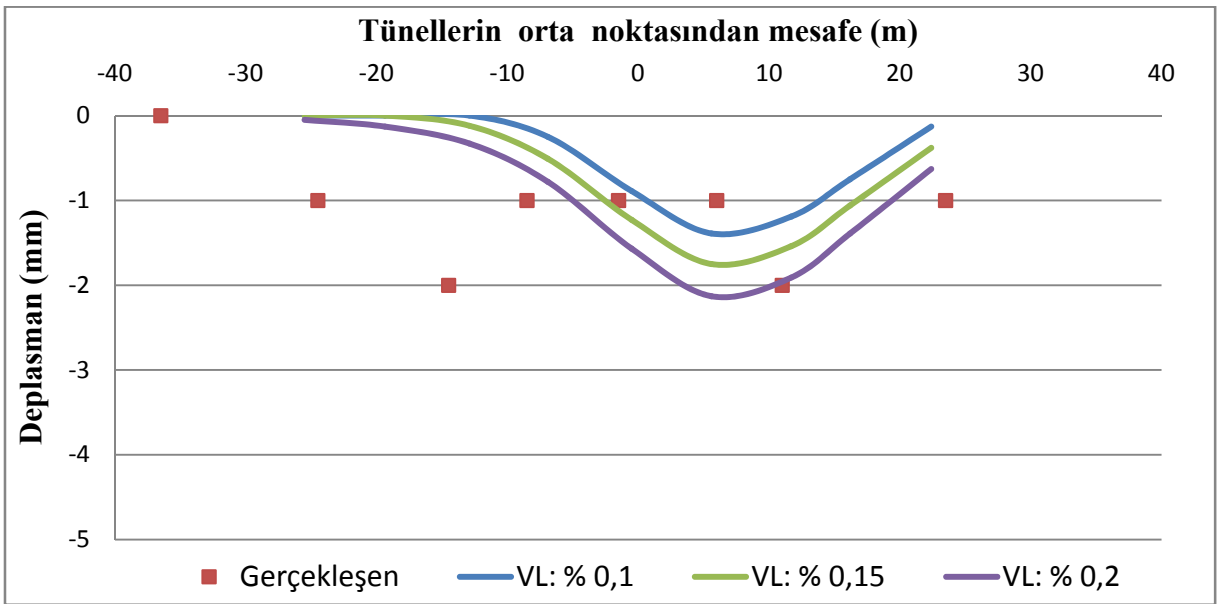
Kesit-6		γ_n	γ_s	$k_x = k_y$	E'	ν	c'	ϕ	YASS
Tabaka Sınırları	Litoloji	kN/m ³	kN/m ³	m/gün	kN/m ²	-	kN/m ²	°	m
0-4 m	Kil	18	20	0,0001	38000	0,4	2	26	-
4-18 m	Kum-1	18	20	1	60000	0,3	0,1	40	
18-20 m	Kumtaşı	20	22	0,01	175000	0,3	5	40	
20-31 m	Kumlu Kil	18,5	20,5	0,0001	70000	0,35	5	30	
31-40 m	Siltli Kum	19	21	1	80000	0,35	0,1	40	

Çizelge 7.32 Plaxis programında Kesit 6 için kullanılan parametreler



Şekil 7.63 Kesit 6'de 1. tünel kazısından sonra Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar

Şekil 7.64'de değişik hacim kaybı oranı kabulleri için hesaplanan düşey yüzey deplasmanları dağılımlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması gösterilmiştir.



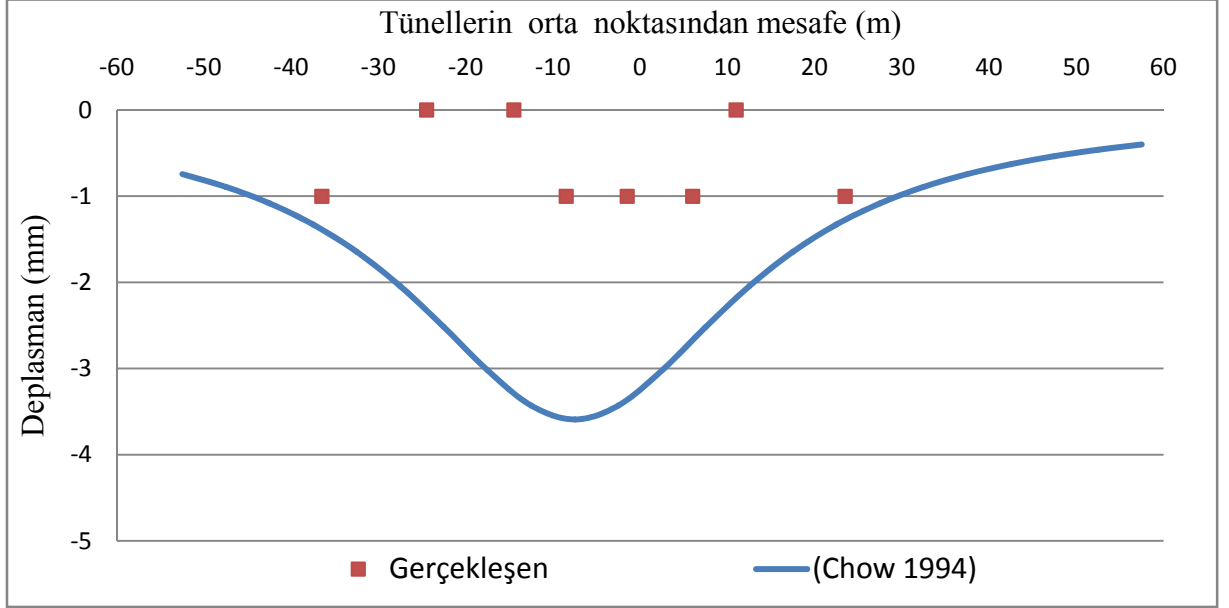
Şekil 7.64 Kesit-6'de 1. tünel kazısından kaynaklanan Plaxis ile hesaplanan düşey yüzey deplasmanları

Modelden hesaplanan ve gerçekleşen deplasmanlara en yakın elde edildiği hacim kaybı oranı değerinin Kesit 6 deki 1. tünel için $V_L = \% 0,2$ olduğu gözlenmiştir.

7.4.6.2 Sadece 2. Tünel Kazısından Kaynaklanan Deplasmanların Tahminleri

Kesit 6'nın olduğu kısımda 2 tünel kazısı tamamladıktan sonra sadece 2. Tünelden kaynaklanan deplasmanlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Kesit 6 için parametreler Çizelge 7.30'daki gibi seçilmiştir. Chow (1994)'ün nümerik yaklaşımı ile hesaplanan değerlerin gerçekleşen deplasmanlara göre değişimi Şekil 6.65'te verilmiştir.



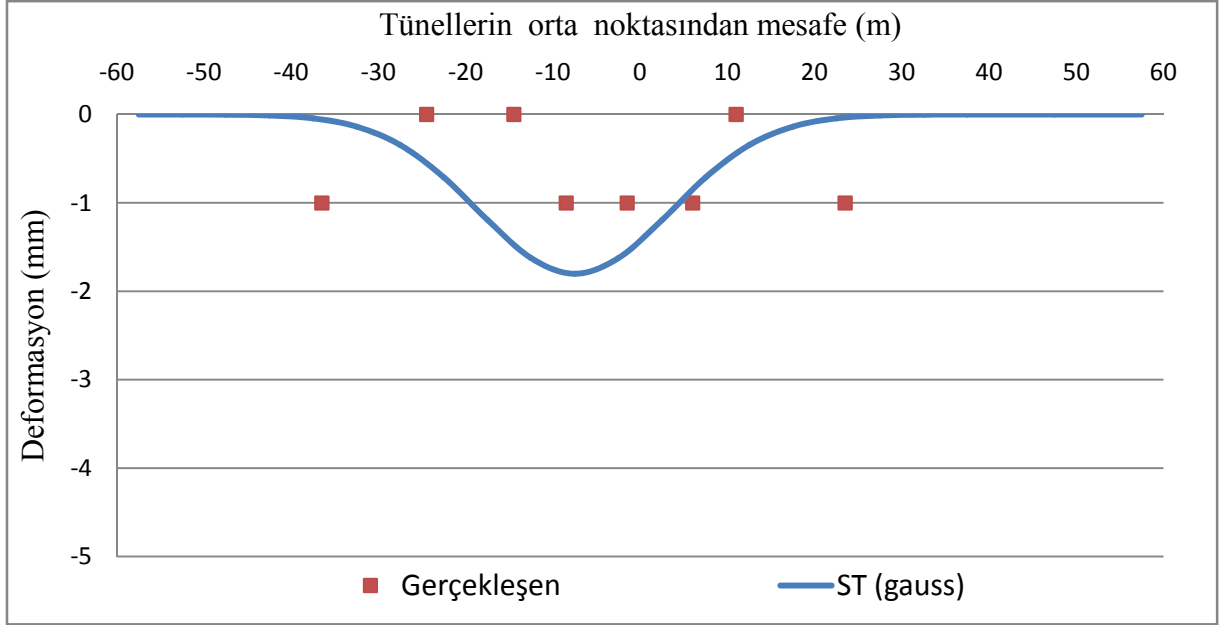
Şekil 7.65 Kesit-6'da 2. tünel kazısından kaynaklı deplasmanların Chow (1994)'a göre hesaplananlarla gerçekleşen değerlerinin karşılaştırılması

S_{max}'a bağlı Gauss eğrisi fonksiyonunda gözönüne alınan hacim kaybı oranlarına göre hesaplanan düşey yüzey deplasmanları Çizelge 7.33'de gösterilmiştir..

Hacim Kaybı Oranlarına göre deplasmanlar (mm)				
Nokta no:	0,10%	0,15%	0,20%	S gerçekleşen
SMP-6A	0	0	0	-1
SMP-6B	0	0	-1	0
SMP-6C	-1	-1	-1	-1
SMP-6D	-1	-2	-2	-1
SMP-6E	-1	-2	-2	-1
SMP-6F	-1	-1	-2	0
SMP-6G	0	-1	-1	0
SMP-6H	0	0	0	-1

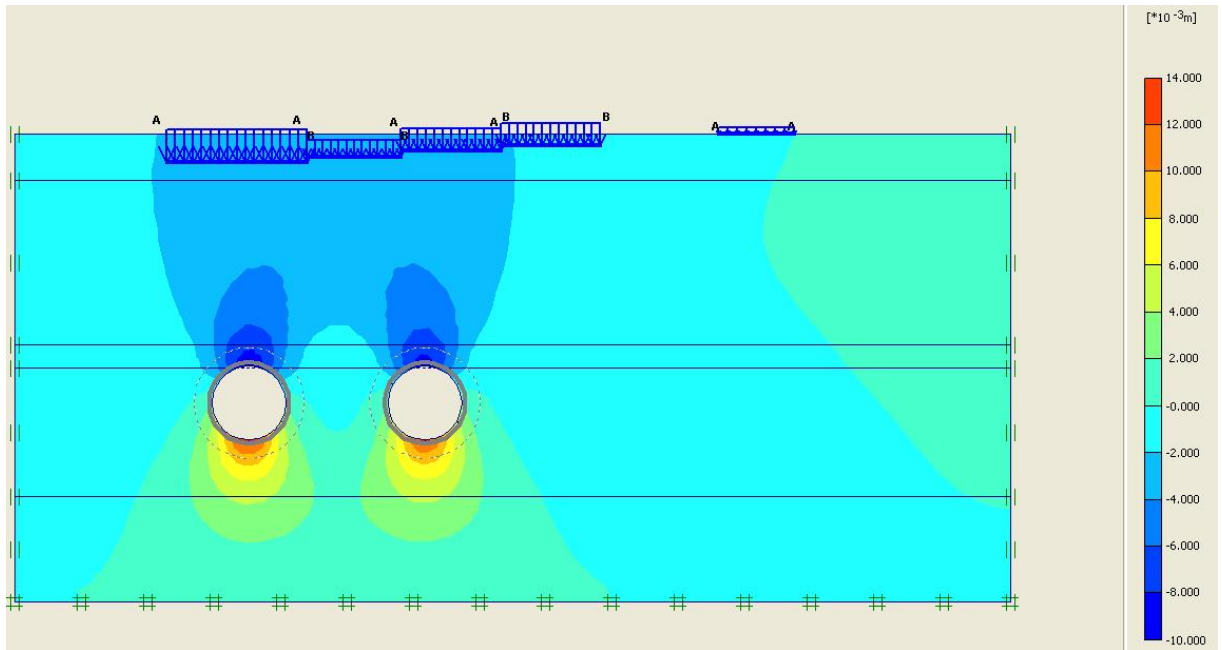
Çizelge 7.33 Kesit 6'de 2. tünel kazısından sonra hacim kaybına bağlı deformasyonlar

Gauss eğrisi ile yapılan çözümde “ V_L ” değerinin % 0,1 kabul edilmesi durumunda hesaplanan deplasmanlarla gerçekleşen deplasmanların karşılaştırılması Şekil 6.57’de görülebilmektedir.



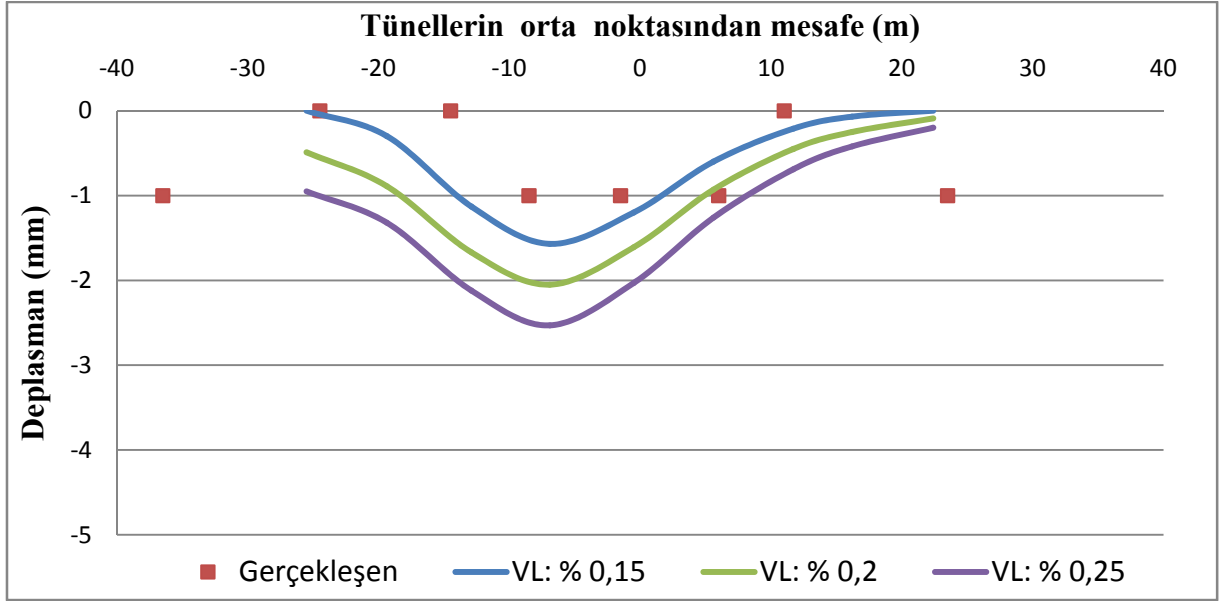
Şekil 7.66 Kesit-6’de Gauss Eğrisi ile hesaplanan 2. Tünel kazısından kaynaklanan deplasman değerlerinin gerçekleşen deplasmanlarla karşılaştırılması

Kesit 6’in Plaxis programı ile modellenmesi sonucunda 2. tünel kazısından sonraki durum için hesaplanan deplasman dağılımı Şekil 6.67’de gösterilmiştir. Modelleme Çizelge 7.32’deki parametreler kullanılmıştır.



Şekil 7.67 Kesit-6’de 2. tünel kazısından sonra Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar

Numerik model çözümünde kullanılan farklı hacim kaybı oranı değerleri ile Kesit-6'daki 2. tünel için hesaplanan düşey yüzey deplasmanları Şekil 7.68' de gösterilmiştir.

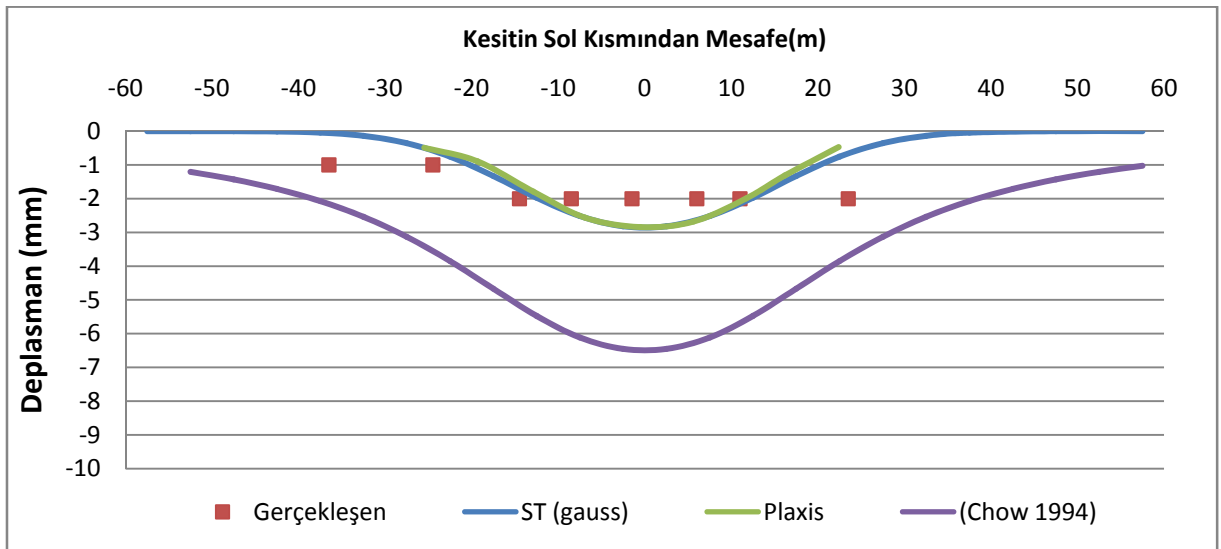


Şekil 7.68 Kesit 6'de 2. Tünel kazısından kaynaklanan hacim kaybı oranına göre Plaxis ile hesaplanan deplasmanlar

Modelden hesaplanan deplasmanların gerçekleşen deplasmanlara en yakın elde edildiği hacim kaybı oranı değerinin Kesit-6' daki 2. tünel için $V_L = \% 0,15$ olduğu gözlenmiştir.

7.4.6.3 2 Tünel Kazısı Tamamlandıktan Sonraki Toplam Deplasman Tahminleri

Tünellerin kazısı tamamlandıktan sonraki durum için hesaplanan ve ölçülen nihai yüzey deplasmanları Şekil 7.69'da gösterilmiştir.



Şekil 7.69 Kesit 6'da gerçekleşen ve tahmin edilen toplam deplasmanlar

Gauss yaklaşımına göre hacim kaybı oranları olarak 1. tünel ve 2. tünel için $V_L = \% 0,1$ değerleri, Plaxis modelinde ise; 1. tünel için $V_L = \% 0,2$, 2. Tünel için ise $V_L = \% 0,15$ değerleri arazi gözlemleri ile en iyi uyumlu sonuçları vermektedir.

8. Sonuç ve Öneriler

İstanbul'daki trafik probleminin çözümüne yönelik İstanbul Metrosunun geliştirilmesi işleri ve yeni hatların yapımı devam etmektedir. Yapımı devam eden Otogar-Bağcılar metro hattı da bunlardan birisidir. Hat 6.30 metre çapında, toplam 46.7 km tek hat tünel uzunluğuna sahip, ikiz tünel olarak tasarlanmıştır. Hat üzerinde toplam 14 adet istasyon planlanmıştır.

Bu çalışmada, tünel açımından kaynaklanabilecek yüzey deplasmanlarını incelemek amacı ile hattın Otogar-Kirazlı arasındaki bölümünde 6 kısım seçilmiştir. Bu kesitlerin seçiminde örtü kalınlıklarının farklı olmasına ve seçilen bölgelerde deformasyon ölçüm noktalarının yoğun olmasına özen gösterilmiştir. Tünel kazısı zemin koşullarında bir adet Lovat marka, bir adette Herrenknecht marka EPB TBM 'ler ile tamamlanmıştır.

İlk olarak Chow (1994)'a göre; kazı nedeniyle oluşan zemin kaybını tünel doğrultusu boyunca çizgisel yük olarak kabul edip nokta yükten uzakta oluşan düşey deplasmanları veren (2.16) eşitliğinden faydalanılarak yüzey deplasman dağılımları elde edilmeye çalışılmıştır.

İkinci yöntem olarak Peck (1969), O'Reilly ve New (1982), New ve O'Reilly (1991) ve Fujita (1989)'un tüneller üzerinde ölçülen yüzey deplasmanlarını tanımlamak için kullanmış oldukları Gauss Oturma Eğrisi kullanılarak oturma dağılımları hesaplanmıştır. Gauss Oturma Eğrisi ile hesap aşamasında hacim kaybı oranı için farklı değerler kabul edilerek yüzeyde meydana gelecek deplasmanlar hesaplanmış ve gerçekleşen deplasmanlara en yakın deplasman değerlerini veren hacim kaybı oranları belirlenmiştir.

Üçüncü ve son yöntem olarak ise "Plaxis 2D V.8.2" sonlu elemanlar programı ile incelenen kesitler için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sondaj verileri kullanılarak arazi zemin modeli oluşturulmuş ve bina yükleri de dikkate alınarak zemin yüzündeki düşey deplasmanlar hesaplanmıştır. Plaxis modeli ile hesap aşamasında varsayılan farklı hacim kaybı oranı değerleri için yüzeyde meydana gelen deplasmanlar incelenmiştir. Elde edilen çözümler sonucunda gerçekleşen deplasmanlara en yakın deplasman değerlerini veren hacim kaybı oranları belirlenmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde zemin koşullarına uygun EPB basınçları uygulanmış;

- Zemin yüzünde oluşan deplasmanların TBM makinesinin titreşiminden etkilenmediği,
- Tünel kazısından sonra yer altı su seviyesinin önceki seviyesinde olduğu,
- Tünel içine kaplanan prekast segmentlerin rijit olduğu

kabulleri yapılmıştır.

Kesit No:	Tünel Merkezi Derinliği (m)	YASS (m)	Max Deplasman (mm)		Plaxis'e göre %V _L	Gauss'a göre %V _L
Kesit -1	16	13	-30	1. Tünel	1,1	1,1
				2. Tünel	1,1	1,1
Kesit-2	19	5,5	-17	1. Tünel	0,8	0,9
				2. Tünel	0,75	0,8
Kesit-3	20	15	-13	1. Tünel	0,6	0,6
				2. Tünel	0,5	0,6
Kesit-4	34	22	-8	1. Tünel	0,5	0,5
				2. Tünel	0,5	0,7
Kesit-5	46,5	33	-1	1. Tünel	0,1	0,1
				2. Tünel	0,1	0,1
Kesit-6	23	-	-2	1. Tünel	0,1	0,2
				2. Tünel	0,1	0,15

Çizelge 8.1 Kesitlerin toplu sonuçları

- Kesit-1 için Şekil 7.12'de görüldüğü üzere Chow (1994)'un yaklaşımına göre hesaplanan yüzey düşey deplasmanlarının gerçekleşen deplasmanlara çok yakın olduğu gözlenmiştir. Gauss oturma eğrisine göre hacim kaybı oranı iki tünel için de %1,10 olarak belirlenmiştir. Plaxis programı ile yapılan nümerik modellemede hacim kaybı oranı %1,10 olarak belirlenmiştir. Kesitin alındığı kısımda örtü kalınlığı yaklaşık tünel çapının iki katıdır ve tünel kazısını granüler zeminde yapmaktadır. Yer altı su seviyesini yüzeyden 13 metre derindedir. Zemin yüzeyinde ölçülen maksimum deplasman değeri 30mm dir.
- Kesit-2 için Şekil 7.25'te görüldüğü üzere Chow (1994)'un yaklaşımına göre hesaplanan yüzey deplasmanları gerçekleşen deplasman değerlerine çok yakındır. Gauss oturma eğrisine göre hacim kaybı oranı birinci tünel için % 0,80 ikinci tünel için ise % 0,75 olarak belirlenmiştir. Plaxis programı nümerik modellerinde hacim kaybı oranı birinci tünel için %0,90 ikinci tünel için %0,80 olarak belirlenmiştir. Kesitin alındığı kısımda örtü kalınlığı tünel çapının yaklaşık iki buçuk katıdır ve tünel aynası granüler zemindedir. Yer altı suyu seviyesi yüzeyden 5,5 metre derindedir. Zemin yüzeyinde ölçülen maksimum deplasman değeri 17mm dir.
- Kesit-3 için Şekil 7.36'da görüldüğü üzere Chow (1994)'un yaklaşımına göre hesaplanan düşey yüzey deplasmanları gerçekleşen deplasmanlardan daha büyüktür. Gauss oturma eğrisine göre hacim kaybı oranı iki tünel için de %0,60 olarak belirlenmiştir. Plaxis programı ile yapılan analizde hacim kaybı oranı birinci tünel için %0,60, ikinci tünel için ise %0,50 olarak belirlenmiştir. Kesitin alındığı kısımda örtü kalınlığı tünel çapının yaklaşık iki buçuk katıdır ve tünel aynası granüler zemindedir. Yer altı suyu seviyesi yüzeyden 16 metre derindedir. Zemin yüzeyinde ölçülen maksimum deplasman değeri 13mm dir.
- Kesit-4 için Şekil 7.47'de görüldüğü üzere Chow (1994)'un yaklaşımına göre

hesaplanan düşey yüzey deplasman değerleri gerçekleşen deplasmanlarına oldukça yakındır. Gauss oturma eğrisine göre hacim kaybı oranı iki tünel için de % 0,50 olarak belirlenmiştir. Plaxis programı ile yapılan analizde hacim kaybı oranı birinci tünel için %0,5, ikinci tünel için ise % 0,7 olarak belirlenmiştir. Kesitin alındığı kısımda örtü kalınlığı tünel çapının yaklaşık beş katıdır. Tünel aynası granüler zemin içindedir. Yer altı suyu seviyesi yüzeyden 22 metre derindedir. Ölçülen maksimum deplasman değeri 8mm dir.

- Kesit-5 için Şekil 7.58'de görüldüğü üzere Chow (1994)'un yaklaşımına göre hesaplanan düşey yüzey deplasmanları gerçekleşen deplasmanlara göre oldukça yüksektir. Gauss oturma eğrisine ve Plaxis modeline göre hacim kaybı oranı $< \%0,1$ olarak belirlenmiştir. Kesitin alındığı kısımda örtü kalınlığı tünel çapının yaklaşık yedi katıdır ve tünel aynası üst kısımlarda kum, alt kısımda ise kildir. Yeraltı suyu seviyesi yüzeyden 33 metre derindedir. Ölçülen maksimum deplasman değeri 1 mm dir.
- Kesit-6 için Şekil 7.69'da görüldüğü üzere Chow (1994)'un yaklaşımına göre hesaplanan düşey yüzey deplasmanlarının gerçekleşen deplasman değerlerinin yaklaşık üç katı olduğu belirlenmiştir. Gauss oturma eğrisine göre iki tünel içinde hacim kaybı oranı %0,10 olarak seçilmiştir. Plaxis modeline göre hacim kaybı oranı birinci tünelde %0,20, ikinci tünel için ise %0,15 olarak seçilmiştir. Kesitin alındığı kısımda örtü kalınlığı tünel çapının yaklaşık üç katıdır ve tünel aynası üst kısımda kumtaşı, alt kısımda ise kumlu kil dir. Yer altı suyu seviyesi çok derindedir. Ölçülen maksimum deplasman değeri 2mm'dir.

Bu sonuçlara göre;

1. Örtü kalınlığının daha az olduğu (16-20m) Kesit-1, Kesit-2 ve Kesit-3 te 13-30mm arasında düşey yüzey deplasmanları oluşmuştur. Örtü kalınlığının 34m olduğu Kesit 4'de maksimum 8mm düşey yüzey deplasman olduğu gözlenmiştir. Kesit 6'da örtü kalınlığı 23m olmasına karşın tünel tavanının hemen üzerinde yaklaşık 2m kalınlığında bir kumtaşı tabakası yer alması yüzey deplasmanlarının çok sınırlı kalmasını $\leq 2\text{mm}$ sağlamıştır. Örtü kalınlığının yaklaşık 7 tünel çapı (47m) olduğu Kesit 5'te ise deformasyonlar yüzeye yansımamıştır. Ölçülen maksimum deformasyon değeri 1 mm olup ölçüm hassasiyeti içinde değerlendirilirse bu kesitte yüzey deplasmanlarının oluşmadığı söylenebilir.
2. Tünellerde fazla kazı ve sökölme genellikle tünel tavanında oluşmaktadır. Kesit 6 da tünel tavanında bulunan kumtaşının fazla kazıyı engellediği ve zemin deplasmanlarının sınırlı düzeyde kalmasını sağladığı söylenebilir.

3. Chow (1994)'ün yaklaşımı örtü kalınlığının dört tünel çapına kadar olduğu kesitlerde genellikler gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Fakat örtü kalınlığının fazla olduğu kesitlerde gerçekleşen değerlerden daha yüksek düşey yüzey deplasmanları bulunmuştur. Bunun yanı sıra Kesit 6 da tünel tavanında bulunan kumtaşı ara katmanı yüzeye yansması beklenen deplasmanları minimuma indirmiştir. Bu nedenle Chow (1994)'un yaklaşımı Kesit 6 'da da beklenenden çok yüksek sonuçlar vermiştir.
4. Yer altı suyu seviyesi granüler zeminlerde fazla kazıyı tetiklemektedir. Yaklaşık aynı örtü kalınlıklarına sahip Kesit-2 ve Kesit-3 ele alınırsa; Kesit 2 deki yer altı suyu seviyesi Kesit 3'e nazaran 7 metre daha yüksektir. Hacim kaybı oranları Kesit 2 de yaklaşık %0,8 iken Kesit 3' bu oran %0,6 mertebelerindedir. Yüzeye yansıyan deplasman değerleride Kesit 2'de maksimum 17mm, Kesit-3 te ise yaklaşık 13mm dir.
5. Hacim kaybı oranının doğru tahmin edilmesi koşulu ile Gauss oturma eğrisi yüzeydeki düşey yüzey deplasmanlarının değişimini oldukça iyi tanımlamaktadır.
6. Zemin profili ve geoteknik büyüklüklerin doğru tanımlanması durumunda Plaxis sonlu elemanlar programı ile arazi zemin yerdeğiştirmeleri gerçeğe yakın olarak hesaplanabilmektedir.
7. Gauss oturma eğrisi ve Chow (1994) yaklaşımında yüzeydeki bina yükleri göz önüne alınmadığı için Plaxis modelindeki deplasmanlar gerçeğe daha yakın çıkmıştır.
8. EPB basınçları seçiminde zemin koşulları doğrudan etkili olup; yüksek basınçlar uygulanması durumunda yüzeyde kabarmalara, düşük olması durumunda ise fazla kazı yapılmasına neden olmaktadır. Bu yüzden EPB basınçları detaylı bir zemin araştırmasının sonunda çok dikkatli olarak hesaplanması ve uygulamada da aynı hassasiyetin gösterilmesi gerekmektedir.
9. Granüler zeminlerde EPB basınçlarını sağlamak oldukça güçtür Böyle zeminlerde kullanılacak kimyasalların seçimi, zeminin ve yer altı suyunun bu kimyasallara karşı vereceği reaksiyona bağlıdır. Performansı önceden yapılacak testler ile belirlenmelidir.
10. EPB TBM ile tünel açma metodunda her kazı adımından sonra uygulanan segment arkası kontak enjeksiyonu boşluk kalmadığı belirlenene kadar devam etmelidir.

9. Kaynaklar

Acar, Y.,(1980), Circular Openings Semi-Infinite Medium, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2003), “Standart Specification for Highway Brides”

Atkinson, J.H., Brown, E.T., Potts D.M., (1975), Collapse of Shallow Unlined Tunnels in Dense Sand, Tunnels and Tunnelling, Nr.3, 83-87.

Atkinson, J.H., Potts, D.M., Schofield, A.N., (1977), Centrifugal Model test on shallow Tunnels in Sand, Tunnels and tunneling Nr. 1, 59-64.

Attewell, P .B ,(1979a), “Ground movement caused by tunneling in soil”, Proc., Cnf. on Lorge Ground Movements and structures, Halstead Press, New York, N.Y., 812-948.

Aversin, S.G., (1954), Bergbauarbeiten Untertage und unter Grundwasser

Arıoğlu, E., Yüksel, A., (1985), Zonguldak Kömür Havzasında Tasman Yapı Hasarları ve Bunların Değerlendirilmesi, Madencilik Dergisi, Maden Mühendisleri Odası Yayın Organı, Cilt XXIV, No.4, Ankara.

Arıoğlu, E., Yüksel, A., (1984), Classification of House Damages due to Mining Subsidence, Housing Science, Vol. 8, No.4, pp 361-372, Miami.

Beyer, F., (1945), Über die Vorausbestimmung der beim abbau flachgerter Flöze auftretenden Bodenverformungen-Habilitationsschrift aus dem Markscheide Institut der TH Berlin; Berlin.

Birön, C., Arıoğlu, E., (1980), Madenlerde Tahkimat İşleri ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Briggs, H.,(1929), Mining Subsidence, London

Çınar, M. ve Feridunoğlu, C.,(199?), “Tünel Açma Makinaları (TBM)”, ???

Egger, P., (1987),”Räumliche Modellversuche für geankerte eichtliegende Tunnel”, VI. Conf. ISRM Montreal

Ertürk, E., (1996), “Şevlerde Hareketlerin İncelenmesi İçin İnklinometre Aletinin Kullanımı Ve Bir Örnek”, Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Müh. Böl., Ankara.

Hajebi, D., (2008), “Tbm ile Açılan İkiz Tüneller Çevresinde Gözlenen Oturma Ve Deformasyonlar”, Yıldız Teknik Üniversitesi F.B.E, İstanbul.

ITA-AITES-International Tunneling Association, c/o EPFL, CH-1015 Lausanne, 2007.
<http://www.ita-aites.org/cms/1399.html>

Jeffery, G.B., (1921), Plane Stres and plain Strain in Bipolar Co-ordinates; Philos. Transact.

Franklin, J.Ä., (1977),. Time monitoring of structures in rock. Rock Mechanics Review, Int. J. Rock Mech. Min.. Sei,& Geomech. Abstr., Vol. 1.4, Great Britain, p., 163 -192,

Fujita, K., (1989), "Special lecture B: Underground construction, tunnel, underground transportation," Proe. 12th Int. Conf. On SMFE Rio de Janeiro, Vol. 4, pp.2159-2176.

Graf, B., (1984), Teoretische und experimentell Ermittlung des verticaldrucks auf eingebettete Bauwerke. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und felsmechanik der universität Karlsruhe Heft 96.

Kimura, T.and Mair, R.J., (1981), Centrifugal Testing of model Tunnels in soft Clay. In Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechasnics and Foundational Engineering, Stockholm (Rotterda: Balkema) Vol. 1, 319-22.

Köksal, M.D., (2007), "Dünya'da ve Türkiye'de Ulaşım Amaçlı Yer altı Mühendislik Yapıları – Tarihsel Bir Bakış", 2. Ulaşımında Yeraltı Kazıları Sempozyumu Bildiriler Kitabı s.238-239, 15-17 Kasım, İstanbul

Kramer, J., (1974) , Einfluss von Tunnel bauten auf die Gelandoberfläche-Strasse-Brücke-Tunnel,26. Jg. H.9:225-331; Berlin.

Limanov, I. A. ,(1957), Oberflächensenkungen im kambrischem Ton infolge Tunnelbau

Loos , W. and Breth , H., (1949), Kritische Betrachtung des Tunnel-und Stollenbaus und der Berechnnung des Gebirgdruckes, der Bauingenieur, 24, H.5,s.

Melix, P., (1986), Modellversuche und Berechnungen zur Standsicherheit oberflächennäher Tunnel. Veröff. Inst.Boden-und Felsm. Univ. Karlsruhe, H.103.

Mortos, F., (1958), "Concerning an Approximate Equation of The Subsidence Trough and its Time Factors", In International Srata Control Congress, Leipzig (Berlin: Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin), Section Für Berkbau, 191-205.

Müller-Salzburg, L.,(1978), Der Felsbau 3. Band: Tunnelbau-Stuttgart.

O'Reilly, M. P. And New, B.M. (1982), "Settlement above tunnels in the united kingdom-their magnitude and prediction", tunnelling 82, london, IMM, pp. 173-181.

- Özaydın, İ. K., v.d. (2006), “ Evaluation of the movements of the dam embankments by means of geodetic and geotechnical methods”, Journal of Surveying Engineering,,ASCE, 132(1), 31-39
- Özhan, N. N., (1994), “Deformasyon Ölçü Yöntemleri Ve İstanbul Metro’sunda Yapılan Deformasyon Ölçmeleri”, Yıldız Teknik Üniversitesi F.B.E, İstanbul.
- Peck, R. B., (1969), “Deep excavation and tunnelling in soft ground”, Proc.of the 7th Int.Conf. on SMFE(mexico), State of the Art Volume, PP. 225-290.
- Potts, D. M., (1976), Behavior of Lined and Unlined Cylindrical Cavities in Sand, thesis presented to the University of Cambridge, at Cambridge, England, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- Sauer, G., (1976), Spannungsumlagerung und Oberflächensenkung beim Vortrieb Von Tunneln mit geringer Überdeckung. Veröff. Inst. Boden-und Felsm. Univ. Karlsruhe, H.67.
- Schmidt, B., (1969), “Settlements and Ground Movements Associated With Tunneling in soil”, Ph.D.Thesis, University of Illinois, Urbana.
- Steinfeld, K., (1962), Gutachten zur Bemessung des Tunnels, “U-Bahn-Neubau Innenstadt”.- Baubehörde Hamburg, unveröffentlicht.
- Stroud, M.A., (1974), “The Standart Penetration Test in Insensitive Clays and Soft-Rocks”, Proc.Eur.Symp.on Penetration Testing, Stockholm, Vol.2,367-375.
- Szechy, K., (1969) ,The art of Tunelling Akademi kiado, Budapest.
- Terzaghi, K.V.,(1936) , Stress Distribution in dry and in Saturated sand Above a Yielding Trape-door.-Proc. Int. Conf. Soil Mech., Cambridge, Mass, Vol.I,307-311 .
- Terzaghi, K., Peck,R.B. and Mesri,G., (1996), Soil Mechanics In Engineering Practice, UNPDID-United Nations Population Division Information Database, 2007, World Population Milestones, Pearson Education Inc.
- USCBID-US. Census Bureau International Database, Information Datbase 2007, Total Population of the wold by Decade, 1950-2050. Pearson Education, Inc
- Vardar, M.,(1977), Yer altı Kaya Yapıları Mekaniğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Ana İlkeleri, İ.T.Ü
- Wolf, T.F.,(1989),”Pile Capacity Prediction Using Parameter Functions”, ASCE Geotechnical Special Pub., No:23, pp.96-106.

Yamaguti, N., (1930), "One the Investigation of stres Distribution in a tunnel with the Agar-Agar Model Experiments", Proc.III. Congr. Applied Mech Stockholm Vol 2.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi: 19.09.1983

Doğum yeri: Nazilli

Lise: 1994-2001 Nazilli Anadolu Lisesi

Lisans: 2001-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak.
İnşaat Mühendisliği

Yüksek Lisans 2006-2009 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enst
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Geoteknik Programı

Çalıştığı kurumlar

2007-Devam ediyor Gülermak Doğuş Adi Ortaklığı

Otogar-Bağcılar Metro İnşaatı