

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BÜYÜK KESİTLİ TÜNEL KAZISI SIRASINDA
ÇEVRE YAPILARDA MEYDANA GELEN OTURMALARIN
SAYISAL MODELLEME İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Herman NURNUR

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BÜYÜK KESİTLİ TÜNEL KAZISI SIRASINDA
ÇEVRE YAPILARDA MEYDANA GELEN OTURMALARIN
SAYISAL MODELLEME İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Herman NURNUR
(505101005)**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cengiz KUZU

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505101005 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Herman NURNUR ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BÜYÜK KESİTLİ TÜNEL KAZISI SIRASINDA ÇEVRE YAPILARDA MEYDANA GELEN OTURMALARIN SAYISAL MODELLEME İLE ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Cengiz KUZU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ümit ÖZER
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 25 Kasım 2016
Savunma Tarihi : 21 Aralık 2016





Aileme,



ÖNSÖZ

Tüm dünya genelinde hızla artan insan nüfusu, büyük şehirlere başlayan yoğun göç ve yıllar içinde artarak büyüyen hızlı ve düzensiz yapılaşma nedeniyle yeraltı yapıları daha çok önem kazanarak hem miktarca artmakta hem de alışıldık boyutlarının üzerine çıkmaktadır. Geleneksel iki veya üç şeritli karayolları toplumun ihtiyaçlarına yetersiz kalmakta olup gelişen teknoloji ile ihtiyaç duyulan dört şeritli geniş açıklıklı tünellerin daha hızlı ve ekonomik olarak imal edilmeleri mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile imal edilecek olan, Türkiye’de ilk kez projelendirilen büyük kesitli bir tünelin tasarımında rol oynayan özellikler açıklanarak çevresinde bulunan bir yapı ile olan etkileşimi incelenmiştir.

Bu tezin yazımı sırasında bilgi ve tecrübesiyle beni her zaman destekleyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Cengiz KUZU’ya teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana her zaman destek olan, sözleri ve davranışlarıyla beni cesaretlendiren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR’e çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim sırasında ekibine katıldığım, fikirleri ve eylemleriyle bana her zaman yol gösteren, beni kaya mekaniği bilimi ile tanıştıran bir tünel mühendisinin nasıl olması gerektiğini gösteren sevgili hocam Sayın Prof. Dr. Mahir VARDAR’a teşekkürlerimi sunarım.

Bana her türlü desteği sağlayan EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. yönetici ve çalışanlarına çok teşekkür ederim. Bana her zaman destek veren, benim için bir yöneticiden daha fazlası bir ağabey olan Sayın Macit KÜÇÜKOĞLU’na ve tez çalışmama olan değerli katkılarından dolayı Sayın Emin Alper TEKYILDIZ’a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca kendisini tanıdığım ilk günden beri örnek aldığım Sayın Dr. Bülent KOÇAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, beni bugünlere getiren annem Sara NURNUR, babam Abraham NURNUR ve her anımda yanımda olan sevgili ablam Karolin NURNUR ile desteğe ihtiyacım olan her an bana elini uzatan ve hiçbir zaman vazgeçmememi sağlayan çok değerli arkadaşım Senem ŞEREN’e minnettarım.

Kasım 2016

Herman Nurnur
(Maden Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2 Çalışma Yöntemi.....	2
2. TÜNELLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER	5
2.1 Tünelciliğin Tarihsel Gelişimi.....	5
2.2 Tünel Yapımını Gerektiren Nedenler	7
2.3 Tünellerin Sınıflandırılması	8
3. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ.....	11
3.1 Kazı Türüne Göre Tünel Açma Yöntemleri.....	11
3.2 İlerleme Türüne Göre Tünel Açma Yöntemleri	12
3.2.1 Aç-Kapa yöntemi	12
3.2.2 Pilot tünelli yöntem	12
3.2.3 Tam kesitli yöntemler	13
3.2.4 Parçalı kesitli yöntemler.....	14
3.2.4.1 Belçika yöntemi	14
3.2.4.2 Alman yöntemi.....	15
3.2.4.3 Eski Avusturya yöntemi.....	16
3.2.4.4 İngiliz yöntemi	16
3.2.4.5 İtalyan yöntemi.....	16
3.2.4.6 İsviçre yöntemi.....	17
3.3 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)	17
3.3.1 Yeni Avusturya tünel açma yönteminin kısa tarihçesi.....	17
3.3.2 Yeni Avusturya tünel açma yönteminin tanımı	18
3.3.3 Yeni Avusturya tünel açma yönteminin temel prensipleri.....	18
3.3.4 Yeni Avusturya tünel açma yönteminin avantajları ve dezavantajları.....	20
4. TÜNELLERDE SAĞLAMLAŞTIRMA VE DESTEKLEME	23
4.1 Püskürtme Beton	23
4.2 Hasır Çelik.....	24
4.3 Çelik İksa.....	25
4.4 Kaya Bulonları	25
4.5 Ayna Çivisi.....	27
4.6 Ön Süren.....	27

4.7 Şemsiye Kemer (Umbrella Arch).....	27
5. TÜNELLERDE SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI	31
5.1 Sayısal Yöntemler	32
5.1.1 Süreklilik modeli.....	33
5.1.1.1 Sonlu elemanlar yöntemi.....	33
5.1.1.2 Sonlu farklar yöntemi.....	33
5.1.1.3 Sınır elemanlar yöntemi	33
5.1.2 Süreksizlik modeli.....	34
5.1.2.1 Ayrık (Bölgesel) elemanlar yöntemi	34
5.1.2.2 Ayrık çatlak ağı yöntemi	34
5.1.3 Yatak katsayısı modeli	34
5.1.4 Melez (Hibrit) modeller	35
5.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi	35
5.3 PLAXIS Sonlu Elemanlar Programı	36
6. TÜNELLERDE JEOTEKNİK ÖLÇÜMLER.....	41
6.1 Konverjans Ölçümleri	43
6.2 İnklinometreler	43
6.3 Ekstansometreler	43
6.4 Gerilme Ölçerler.....	44
6.5 BMP (Bina İzleme Noktası) Ölçümleri.....	44
7. ÖRNEK UYGULAMA PROJESİ: KMO ÇAMLIK TÜNELİ - İSKİ SU	
DEPOSU ETKİLEŞİMİ	45
7.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı	45
7.2 Bölgenin Genel Jeolojisi.....	47
7.2.1 Giriş.....	47
7.2.2 Stratigrafi.....	48
7.2.3 İnceleme alanının jeolojisi	53
7.2.3.1 Kurtköy Formasyonu (Opk)	53
7.2.3.2 Aydos Formasyonu (Oa)	54
7.2.3.3 Yayalar Formasyonu (Osy)	54
7.2.4 Yapısal jeoloji ve tektonizma.....	57
7.2.5 Depremsellik	58
7.3 Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri.....	59
7.3.1 Yeraltı su kaynakları	60
7.3.2 Jeohidrolik ortamlar	60
7.4 Mühendislik Jeolojisi Değerlendirmesi.....	62
7.4.1 Yüzey araştırmaları	62
7.4.2 Yeraltı araştırmaları.....	71
7.4.2.1 Sondaj çalışmaları	71
7.4.2.2 Jeofizik çalışmalar	72
7.4.3 Laboratuvar araştırmaları	76
7.4.3.1 Fiziksel özellikler	76
7.4.3.2 Mekanik özellikler.....	77
7.4.4 Kaya kütlesi sınıflama sistemleri	79
7.4.4.1 RQD – Deere kaya kalite göstergesi	80
7.4.4.2 RMR – Bieniawski kaya kalite sınıflaması	81
7.5 Jeomekanik Değerlendirme	83
7.5.1 Hoek - Brown yöntemi ile yerinde (in-situ) kaya dayanımı tespiti.....	83
7.5.2 RocLab programı ile parametre hesabı	89
7.5.2.1 Hoek-Brown sınıflandırması	89

7.5.2.2 Hoek-Brown kriterleri	90
7.5.2.3 Yenilme zarfı aralığı	90
7.5.2.4 Mohr-Coulomb dayanım parametreleri.....	90
7.5.2.5 Kaya kütlesi parametreleri	90
7.6 Jeoteknik Değerlendirme.....	93
7.6.1 NATM kaya destek sınıfının belirlenmesi	93
7.6.2 Tünel tip kesitinin tasarımı	95
7.6.3 Tünel kazı aşamalarının tasarımı	95
7.6.4 Tünel destekleme tip kesitinin tasarımı	96
7.7 PLAXIS Programı ile Stabilité Analizi	98
7.7.1 Sonlu elemanlar yöntemi ile sistemin modellenmesi.....	98
7.7.2 Analiz sonuçları	103
7.8 Tünel Çevresinde Yapılan Jeoteknik Ölçümler	110
8. SONUÇLAR	113
KAYNAKLAR	117
EKLER.....	123
ÖZGEÇMİŞ.....	141



KISALTMALAR

NATM	: New Austrian Tunneling Method (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi)
KMO	: Kuzey Marmara Otoyolu
İSKİ	: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
M.Ö.	: Milattan Önce
M.S.	: Milattan Sonra
TBM	: Tunnel Boring Machine (Tünel Açma Makinası)
BMP	: Building Monitoring Point (Bina İzleme Noktası)
K	: Kuzey
G	: Güney
D	: Doğu
B	: Batı
KB	: Kuzeybatı
GD	: Güneydoğu
KD	: Kuzeydoğu
GB	: Güneybatı
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
Opk	: Kurtköy Formasyonu
Oa	: Aydos Formasyonu
Osy	: Yayalar Formasyonu
Osyg	: Gözdağ Üyesi
Osyu	: Umurdere Üyesi
Osyş	: Şeyhli Üyesi
Gz	: Geçirimsiz
gz	: Yarı Geçirimsiz
gç	: Yarı Geçirimli
Gç	: Geçirimli
RQD	: Rock Quality Designation (Kaya Kalite Göstergesi)
ISRM	: International Society for Rock Mechanics (Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği)
YASS	: Yeraltı Su Seviyesi
LL	: Likid Limit
PI	: Plastisite İndeksi
SPT	: Standard Penetration Test (Standart Penetrasyon Testi)
TCR	: Total Core Recovery (Toplam Karot Verimi)
MASW	: Multichanel Analysis of Surface Waves (Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi)
UBC	: Uniform Building Code
RMR	: Rock Mass Rating (Kaya Kütle İndeksi)
GSİ	: Geological Strength Index (Jeolojik Dayanım İndisi)
MR	: Modulus Ratio (Modül Oranı)
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi

ÖNORM : Österreichische Normen (Avusturya Standartları)
N : Normal kuvvet
M : Eğilme momenti
Q : Kesme kuvveti



SEMBOLLER

σ_{kri}	: Kritik gerilme değeri
σ	: Gerilme
u	: Deformasyon
t	: Zaman
P	: Basınç
A_0	: Etkin yer ivmesi katsayısı
N_{30}	: Son 30 cm ilerlemedeki toplam SPT darbe sayısı
$I_{s(50)}$	: Düzeltilmiş nokta yükü dayanım indeksi
q_u	: Serbest basınç mukavemeti
V_s	: Kesme dalga hızı
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
γ_d	: Doygun birim hacim ağırlık
n_{ef}	: Efektif porozitesi
W_a	: Ağırlıkça su emme
D_e	: Eşdeğer çap
k_{PLT}	: Boyut düzeltme katsayısı
σ_c, σ_{ci}	: Basınç mukavemeti
σ_1	: En büyük asal etkin gerilme
σ_3	: En küçük asal etkin gerilme
m_i	: Bozulmamış kaya parametresi sabiti
D	: Örselenme faktörü
E_i	: Sağlam kaya deformasyon modülü
h	: Derinlik
c	: Kohezyon
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
γ	: Birim hacim ağırlık
u_y	: Düşey deplasman
$ u $	: Toplam deplasman



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Tünel Sınıflandırmaları.	10
Çizelge 7.1 : Çamlık Tünelini oluşturan jeolojik birimler ve jeohidrolik ortamlar ...	62
Çizelge 7.2 : Süreksizlik türlerine ait simgeler.	65
Çizelge 7.3 : Süreksizlik aralığının tanımlanması.	65
Çizelge 7.4 : Süreksizlik aralığının tanımlanması.	66
Çizelge 7.5 : Pürüzlülük tanımının sınıflandırılması.	66
Çizelge 7.6 : Dalgalılık tanımının sınıflandırılması.	67
Çizelge 7.7 : Süreksizlik izinin tanımlanması.	67
Çizelge 7.8 : Sızma derecesinin tanımlanması.	68
Çizelge 7.9 : Süreksizlik izinin tanımlanması.	69
Çizelge 7.10 : Dayanım derecesine göre tanımlama ölçütleri.	69
Çizelge 7.11 : Kuvarsitlerin kaya kütlesi tanımlama ölçütleri.	70
Çizelge 7.12 : Kumtaşı-Silttaşının kaya kütlesi tanımlama ölçütleri.	70
Çizelge 7.13 : Sondajlara ait özet bilgiler.	71
Çizelge 7.14 : Kayma ve kesme dalga hızlarına göre kaya ve zeminlerin sınıflandırılması.	75
Çizelge 7.15 : Kayaçların nokta yük direncine göre sınıflandırılması.	78
Çizelge 7.16 : Sondajlarda kesilen kuvarsit biriminin nokta yük direncine göre sınıflandırılması.	78
Çizelge 7.17 : Sondajlarda kesilen kumtaşı-silttaşı biriminin nokta yük direncine göre sınıflandırılması.	78
Çizelge 7.18 : Kayaçların tek eksenli basınç direncine göre sınıflandırılması.	79
Çizelge 7.19 : Sondajlarda kesilen kumtaşı-silttaşı biriminin tek eksenli basınç direncine göre sınıflandırılması.	79
Çizelge 7.20 : RQD sınıflamasına göre kaya kalite sınıflaması.	80
Çizelge 7.21 : Çamlık Tüneli ilgili kesim için RQD değerleri.	80
Çizelge 7.22 : RMR sınıflamasına göre kaya kalite sınıflaması.	82
Çizelge 7.23 : Çamlık Tüneli ilgili kesim için nihai RMR sınıflaması sonuçları.	83
Çizelge 7.24 : Kayaç malzemesi için mi sabitinin değerleri, parantez içindeki değerler tahmini değerlerdir.	86
Çizelge 7.25 : Sönmez ve Ulusay tarafından önerilen modifiye edilmiş GSI sistemi.	87
Çizelge 7.26 : Örselenme faktörü D'nin tahmini için kılavuz.	88
Çizelge 7.27 : Hoek – Brown Yöntemine göre süreksizlikler.	91
Çizelge 7.28 : Hoek – Brown Yöntemine göre yerinde jeomekanik büyüklükler.	91
Çizelge 7.29 : NATM ile Q ve RMR ilişkisi.	93
Çizelge 7.30 : Çamlık Tüneli NATM C3 kaya destek sınıfı için önerilen destekleme elemanları	96

Çizelge 7.31 : Zemin malzemeleri için analizde kullanılan jeomekanik parametreler.	99
Çizelge 7.32 : Kaplama malzemeleri için analizde kullanılan parametreler.	100
Çizelge 7.33 : Bulon malzemesi için analizde kullanılan parametreler.	100
Çizelge 7.34 : Çamlık Tüneli su deposu (Km 3+810) kesiti stabilite analizi sonuçları.	103



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Titus Tüneli.	6
Şekil 2.2 : Enkesit şekillerine göre tüneller.	9
Şekil 3.1 : Riva Tüneli portalinde imal edilen aç-kapa tüneller.	13
Şekil 3.2 : Hasdal Tünelinde açılan pilot tünel.	13
Şekil 3.3 : Belçika yöntemine göre tünel tip kesiti ve Hönebacher Tüneli örneği. ...	15
Şekil 3.4 : Alman yöntemine göre tünel tip kesiti ve Triebitzer Tüneli örneği.	15
Şekil 3.5 : Semmering Tünelinin Eski Avusturya yöntemine göre inşaatı.	16
Şekil 3.6 : İngiliz tünel açma yöntemi.	16
Şekil 3.7 : İtalyan tünel açma yöntemi ve Simplon Tüneli örneği.	17
Şekil 3.8 : NATM'ye göre açılan Çamlık Tüneli.	19
Şekil 4.1 : Hasır çelikler.	25
Şekil 4.2 : (a) I profil çelik iksa. (b) Kafes iksa.	26
Şekil 4.3 : Kaya bulonlamada kullanılan içi boş nervürlü demir çubuklar.	26
Şekil 4.4 : Fiberglas ayna çivileri.	27
Şekil 4.5 : Şemsiye Kemer uygulaması.	28
Şekil 4.6 : Uçları sivriltilmiş çelik borular.	28
Şekil 4.7 : Çamlık Tünelinde uygulanan Şemsiye Kemer yöntemine ait boykesit. ..	29
Şekil 5.1 : Sonlu Elemanlar Yönteminde düğüm noktaları ve gerilme noktaları.	36
Şekil 6.1 : Zamana bağlı deformasyonların değişimi.	42
Şekil 6.2 : Zamana bağlı deformasyonlar ile sağlamlaştırma süreleri ilişkisi.	42
Şekil 7.1 : Güzergâh yer bulduru haritası.	45
Şekil 7.2 : Çamlık Tüneli genel yerleşim planı.	46
Şekil 7.3 : İSKİ su deposunun Çamlık Tüneli üzerindeki konumu.	47
Şekil 7.4 : İstanbul Paleozoyiğine ait genelleştirilmiş dikme kesit.	49
Şekil 7.5 : İstanbul Asya Yakası yüzey jeolojisi haritası.	52
Şekil 7.6 : Armijo vd., 2005 modeline göre Marmara Denizi'nin tektonik yapısı. ...	58
Şekil 7.7 : Tarihsel depremlerin makrosismik verilere dayalı olarak bulunan tahmini kaynakları ve bölgenin 20. yüzyıl depremselliği.	58
Şekil 7.8 : Çamlık Tünelinin İstanbul ili deprem bölgeleri haritası üzerine işlenmiş durumu.	59
Şekil 7.9 : İstanbul İli Su Kaynakları Haritası.	60
Şekil 7.10 : İstanbul İli Hidrojeoloji Haritası.	61
Şekil 7.11 : İSKİ deposu yanındaki yarmada gözlemlenen kuvarsit-kuvarsitik kumtaşı.	64
Şekil 7.12 : Tünel çevresinde gözlemlenen kumtaşı-silttaşı.	64
Şekil 7.13 : Çamlık Tüneli sondaj lokasyon planı.	71
Şekil 7.14 : Çamlık Tüneli sismik etüt planı.	73
Şekil 7.15 : Çamlık Tüneli giriş portalinde yapılan jeofizik çalışmaları sonucunda elde edilen sismik model.	76
Şekil 7.16 : Hoek - Brown ampirik yenilme kriteri.	84
Şekil 7.17 : Kumtaşı-Silttaşı birimi için yerinde jeomekanik büyüklükler.	91

Şekil 7.18 : Bindirme Zonu birimi için yerinde jeomekanik büyüklükler.	92
Şekil 7.19 : Kuvarsit birimi için yerinde jeomekanik büyüklükler.	92
Şekil 7.20 : Çamlık Tüneli taban kemerli (invertli) tünel tip kesiti.	97
Şekil 7.21 : Çamlık Tüneli 6 aşamalı kazı tip kesiti.	97
Şekil 7.22 : Çamlık Tüneli NATM C3 kaya destekleme tip kesiti.	98
Şekil 7.23 : Çamlık Tüneli su deposu (Km 3+810) kesiti hesap modeli.	99
Şekil 7.24 : Tünel çevresinde oluşan gerilmeler.	104
Şekil 7.25 : Tünel çevresinde oluşan düşey deplasmanlar.	104
Şekil 7.26 : Tünel çevresinde oluşan toplam deplasmanlar.	105
Şekil 7.27 : Tünel kaplamasında oluşan toplam deplasmanlar.	105
Şekil 7.28 : Tünel kaplamasında oluşan normal kuvvetler.	106
Şekil 7.29 : Tünel kaplamasında oluşan eğilme momentleri.	106
Şekil 7.30 : Tünel kaplamasında oluşan kesme kuvvetleri.	107
Şekil 7.31 : Kaya bulonlarında oluşan aksenal kuvvetler.	107
Şekil 7.32 : Tünel çevresinde ve yüzeyde oluşan plastik noktalar.	108
Şekil 7.33 : Su deposu altında meydana gelen düşey deplasmanlar.	108
Şekil 7.34 : Yüzeyde meydana gelen tasman hareketlerinin kazı aşamalarına göre gelişimi.	109
Şekil 7.35 : Çamlık Tüneli giriş portalinden İSKİ su deposunun görünüşü.	110
Şekil 7.36 : Çamlık Tüneli su deposu jeoteknik ölçüm planı.	111

BÜYÜK KESİTLİ TÜNEL KAZISI SIRASINDA ÇEVRE YAPILARDA MEYDANA GELEN OTURMALARIN SAYISAL MODELLEME İLE ANALİZİ

ÖZET

İnsanlar, yerleşik yaşama geçmeden çok önceleri dahi, günümüz toplumunda gelişmişliğin göstergelerinden biri olan yeraltı yapılarını günlük hayatlarının rutin bir parçası haline getirmişlerdi. Doğal yeraltı yapıları olan ve dünyadaki ilk tünel örneği denilebilecek mağaralarla başlayan süreç, günümüzde büyük şehirlerin vazgeçilmez alt yapı ihtiyaçlarından biri olan tünellerle devam etmektedir.

Küresel ölçekte hızla artan insan nüfusu, kırsal kesimdeki iş ve eğitim olanaklarının azalması sonucu büyük şehirlere başlayan yoğun göç ile birleşince, kentlerin kullanım alanlarının daralmasına neden olmuştur. Son yıllarda trafik akışındaki olağanüstü artış ile birlikte geleneksel çift yönlü iki veya üç şeritli karayolları yetersiz kalmaktadır. Özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrası oldukça hızlanan teknolojik ve mekanik gelişmeler, karayollarında ihtiyaç duyulan dört şeritli büyük kesitli tünellerin, daha hızlı ve daha ekonomik olarak imal edilmelerini mümkün kılmıştır.

Bu çalışmada Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından ICA İÇTAŞ - ASTALDI adi ortaklığına inşa ettirilen ve EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. tarafından projelendirilen Çamlık Tüneli ile çevresinde bulunan bir su deposunun etkileşimi incelenmiştir. Öncelikle Çamlık Tüneli ve bulunduğu alan bir bütün olarak jeolojik ve hidrojeolojik açıdan araştırılmıştır. Tez çalışmasına konu olan kesimde yapılan sondajlar ve laboratuvar deneyleri sonuçlarına göre, tespit edilen jeolojik birimler için mühendislik jeolojisi çalışmaları yapılmıştır. Bu birimlere ait yerinde (in-situ) kaya dayanım parametreleri hesaplanmıştır. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) esaslarına göre inşa edilecek olan tünel için kazı ve destekleme tip kesitleri oluşturulmuştur. Ardından ilgili kesim için, sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan PLAXIS 2D programı kullanılarak stabilite analizleri yapılmıştır. Tünel imalatı sırasında arazide yapılan jeomekanik ölçümlere ait sonuçlar gösterilerek elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

Su deposu altında oluşan tasman miktarları incelendiğinde en kötü durumda yüzeyde 6,91 cm oturma olacağı hesaplanmıştır. Arazide yapılan jeoteknik ölçümler neticesinde okunan en yüksek değerler ortalama 6,96 cm mertebesindedir. Hesap sonuçları ile arazi ölçümlerinin birbirini desteklemesi, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan sayısal modellemenin başarılı olduğunu göstermiştir.

Su deposu ve çevresinde jeolojik, topografik ve diğer sebeplerle olabilecek hareketlerin kontrolü ve bu hareketlere karşı önlemlerin alınarak gerekli müdahalelerin yapılabilmesi için, yapıda ve yapı etrafında ölçüm ve gözlemler düzenli olarak devam ettirilmelidir.



THE NUMERICAL MODELLING ANALYSIS OF SETTLEMENTS AT THE SURROUNDING STRUCTURES DURING LARGE SECTION TUNNEL EXCAVATION

SUMMARY

Humankind has made underground structures, which are one of the signs of development in today's society, a routine part of their lives even prior to settled life. The process that started with caves as natural underground structures which can be called the first tunnel example in the world, continued with the human made tunnels, which are one of the indispensable infrastructure needs of big cities nowadays.

The rapidly increasing human population on a global scale, coupled with the massive migration to large cities due to reduced business and educational opportunities at the countryside, has led to a contraction of usage areas of the cities. Along with the extraordinary increase in traffic flow in recent years, traditional two-way two or three lane highways become inadequate. The technological and mechanical developments, which have accelerated particularly after the Second World War, made it possible to build four-lane large-section tunnels for highways in a faster and more economical way.

Scientists and engineers have done various researches on how to make tunnels in the most suitable way and how to take precautions against the problems encountered during construction. Over the years, many different excavation methods and supporting systems have been applied and new methods have been proposed depending on technological developments.

It is obvious that more attention should be paid to the tunnels to be constructed as larger openings than the classical dimensioned ones in every aspect; starting from the design of the tunnel type section to the selection of the route to be traveled. The most appropriate excavation and support systems should be identified and applied in a careful manner.

In order to determine the suitability of the tunnel construction method with the terrain, various numerical modeling methods, which can be easily implemented and controlled, are utilized. The desired results can be reached faster and more accurately by using computer programs that are run by the Finite Element Method which is one of the most used numerical modeling methods.

As in all engineering fields, it is essential for tunnel engineering that the prepared project should be both safe and economical. It is necessary to pay attention to the condition of the environment and land variables during finding the design that optimize these conditions and application of that design. Particularly in urban tunneling, besides the deformations that occur in the tunnel cover, such issues as surface seals should also be controlled. It is necessary to perform surveying and monitoring regularly during the construction.

In this study, the interaction between Çamlık Tunnel and a water reservoir in the vicinity has been studied. Çamlık Tunnel Project is contracted by General Directorate of Highways of Turkish Government to ICA İÇTAŞ - ASTALDI Joint Venture and designed by EMAY International Engineering and Consultancy Inc. Primarily, Çamlık Tunnel and its area have been researched geologically and hydrogeologically as a whole. Engineering geology studies have been carried out for the geological units determined according to the results of drillings and laboratory tests conducted in the subjected section of this study. The in-situ rock strength parameters of these units have been calculated. Excavation and support type sections have been established for the tunnel to be constructed according to New Austrian Tunneling Method (NATM) principles. Then stability analyzes have been carried out for the relevant section by using the PLAXIS 2D program which is running with the finite element method. The results of the geomechanical measurements performed during the tunnel construction have been shown and the obtained data have been evaluated.

On the Asian side of the Northern Marmara Motorway route is located Çamlık-Alemdağ connection road. The Çamlık Tunnel to be examined is the second tunnel on the Anatolian side and it is located on the Çamlık-Alemdağ connection road. The structure has the characteristics of moderate depth tunnels, which is located in a regularly increasing-decreasing topography, and consists of two non-equal length tubes. The north tube is 552 m long and the south tube is 651 m long.

Near to the entrance portal of Çamlık Tunnel, there is İSKİ's water reservoir of 15.000 tons capacity. Tunnel construction proceed in the weakly resistant sandstone-siltstone unit goes under this water reservoir. In addition to the challenging geological conditions of the region where a thrust zone is located, 220 tons of daily water leak was detected during the tests carried out in the water reservoir before excavation. It was not possible to move the water reservoir before the excavation started. For this reason, it has been tried to prevent the increase of the water leakage amount during the tunnel construction which is about 22 meters deep from the water reservoir. At the same time, it has been taken into consideration that the settlings that may form on the surface can damage the tunnel.

At the entrance section of the Çamlık Tunnel, sandstone-siltstone and quartzite units were found during surface and underground works carried out especially close to water storage. Moreover, it was observed that the anomalies, which are found at the seismic model of the geophysical studies, were originated from the faults shown in the geological model. The existence of a thrust zone that intersects these two units has been identified.

Laboratory tests were carried out on the taken samples for the assessment of the geomechanical behavior of the material. As per the results of the tests, it was found that the materials have very low resistance.

Rock quality classifications were made by using RQD and RMR methods for the units in the field of investigation by obtained data from field observations, drills and laboratory experiments. As a result of these classification it is determined that all of the units have very poor rock quality.

After the rock mass classifications, in-situ rock strength determination was carried out by using Hoek - Brown method and the rock parameters have been determined for the relevant section. After making the evaluations required by the method, the geomechanical parameters needed for the numerical modeling analysis were determined by using the software called RocLab developed by the researchers.

Based on the RMR classification for determining the quality of the rock mass, the rock support classes have been decided in comply with the Technical Specification of Highways and the ÖNORM B2203 standard. By taking into consideration the values determined by the researchers, the NATM class of the part that Çamlık Tunnel passed through the water reservoir has been determined as C3.

The Çamlık Tunnel, planned as a four-lane double-tube, is the first in Turkey in terms of its cross-section area. For this reason, in the design phase of the Çamlık Tunnel within the scope of Northern Marmara Motorway, an unique study has been carried out by taking into account the criterias specified by the Technical Specifications of Highways. The tunnel is constructed as two tubes, each tube has four lanes and the gauge of the tunnel is $3.75\text{m} \times 4 \text{ lanes} + 0.25\text{m} \times 2 \text{ banquets} = 15.50\text{m} \times 5.00\text{m}$.

Çamlık Tunnel, which is first in Turkey and one of few tunnels in the world with an excavation area of 232 m^2 , has an excavation width of 21.5 meters and an excavation height of 13 meters. Çamlık Tunnel, designed as per the New Austrian Tunneling Method (NATM) principles with 6 steps excavation system in low strength rock unit in terms of geological and geotechnical characteristics, has designed as inverted in order to control the deformations occur during and after the construction.

Numerical analyzes were carried out on the most critical section in the region, in order to be able to see the mutual interaction between the water reservoir and the tunnel and to design a suitable support system by taking necessary precautions during the construction at the entrance part of the Çamlık Tunnel of Northern Marmara Motorway. Tunnel stability and surface settlement analyzes in the Çamlık Tunnel water reservoir section have been carried out using the PLAXIS 2D program running with the finite element method. After the calculation model of the system is established, the geomechanical parameters of the existing units are defined by using the Mohr-Coulomb material model. Where the water reservoir corresponds to the calculated cross-section, a spread load of 50 kN/m/m is defined. As a result of the analysis, it was observed that the settlements formed under the water reservoir started from the first excavation and increased to reach to the maximum value of 69 mm in the final state. As a result of the calculations, it is predicted that there could be serious damages when the tunnel is constructed with a full water reservoir, therefore circa 75% of the water reservoir has been discharged before the construction.

In tunnel engineering, in order to control the works carried out and to determine the quality of the construction during the project period, it is necessary to monitor and measure the stresses and deformations. From the measurements taken at regular intervals in the working field, it has been observed that the surface settlement values continue to increase at every excavation stage. As a result of the numerical analyzes, the maximum value determined in the water reservoir during the excavation was 69.6 mm after decision of drain the water as much as possible.

When the amounts of the settlements were formed under the water reservoir are examined, it is estimated that there will be 6.91 cm settlement on the surface will occur in worst case. As a result of the geotechnical measurements made in the field, the highest value is 6.96 cm. The compliance of results of the calculations and the field measurements showed that the numerical modeling with the finite element method was performed successfully.

The measurements and observations in and around of the structure should be carried out regularly, in order to control and take precautions against the movements which may be caused due to geological, topographical and other factors around the reservoir.



1. GİRİŞ

İnsanlar, yerleşik yaşama geçmeden çok önceleri dahi, günümüz toplumunda gelişmişliğin göstergelerinden biri olan yeraltı yapılarını günlük hayatlarının rutin bir parçası haline getirmişlerdi. Doğal yeraltı yapıları olan ve dünyadaki ilk tünel örneği denilebilecek mağaralarla başlayan süreç, günümüzde büyük şehirlerin vazgeçilmez alt yapı ihtiyaçlarından biri olan tünellerle devam etmektedir.

Küresel ölçekte hızla artan insan nüfusu, kırsal kesimdeki iş ve eğitim olanaklarının azalması sonucu büyük şehirlere başlayan yoğun göç ile birleşince, kentlerin kullanım alanlarının daralmasına neden olmuştur. Yıllar içinde artarak büyüyen hızlı ve düzensiz yapılaşma, kamulaştırma maliyetlerinin büyük şehirlerde çok yüksek olması ve doğaya mümkün olan en az zararın verilerek şehirlerin güzelliğinin bozulmamasına çalışılması gibi nedenler, yer üstünün olduğu kadar, gözlerden uzak olan yeraltının da daha yüksek oranda kullanılmasını zorunlu kılmıştır.

Ulaşım, toplu taşımacılık, depolama, enerji hatları, su ve atık nakliyatı benzeri konularda sıklıkla kullanılan yeraltı yapıları, insanların günlük ihtiyaçlarının karşılanmasını sağlamaktadır. Artan nüfusla beraber şehirlerin mevcut altyapıları da ihtiyacı karşılayamamaya başlamıştır.

Bu şartlar altında yeraltı yapıları daha çok önem kazanarak, hem miktarca artmakta hem de alışılmış boyutlarının dışına çıkarak daha uzun veya daha geniş olmaktadır. Son yıllarda trafik akışındaki olağanüstü artış ile birlikte geleneksel çift yönlü iki veya üç şeritli karayolları yetersiz kalmaktadır. Özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrası oldukça hızlanan teknolojik ve mekanik gelişmeler, karayollarında ihtiyaç duyulan dört şeritli geniş açıklıklı tünellerin, daha hızlı ve daha ekonomik olarak imal edilmelerini mümkün kılmıştır.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Tünel imalatının en uygun şekilde nasıl yapılacağı ve imalat sırasında karşılaşılabilecek problemlere karşı nasıl önlemler alınacağı konusunda bilim insanları ve mühendisler

çeşitli araştırmalar yapmışlardır. Yıllar içinde birçok farklı kazı yöntemi ve destekleme sistemi uygulanmış ve teknolojik ilerlemelere bağlı olarak yeni metotlar önerilmiştir.

Tünel açma işlemleri çalışılan ortamın değişken yapıda olması sebebiyle en çok zorlanan temel mühendisliği uygulaması olarak görülmektedir [1]. Üzerinde çalışılan kaynağın doğa olması sebebiyle, ne kadar ayrıntılı araştırmalar yapılmış olsa dahi her zaman beklenmedik problemlerle karşılaşılabilir.

Klasik boyutlardan daha geniş açıklıkta inşa edilecek olan tünellerin projelendirilmesinde, güzergâhın geçirileceği mevkiden, tünel tip kesitinin tasarlanmasına kadar her noktada, olağandan daha fazla dikkat gösterilmesi gerekliliği aşikârdır. En uygun kazı ve destekleme sistemlerinin tespit edilip özenli bir şekilde uygulanması gerekmektedir.

Tünel imalatı için belirlenen sistemin, araziyle uygunluğunun tespit edilebilmesi amacıyla, kolaylıkla uygulanıp denetlenebilen çeşitli sayısal modelleme yöntemlerinden faydalanılmaktadır. En çok kullanılan sayısal modelleme yöntemlerinden biri olan Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çalışan bilgisayar programları sayesinde, istenilen sonuçlara daha hızlı ve daha doğru bir şekilde ulaşılabilmektedir.

Tüm mühendislik alanlarında olduğu gibi, tünel mühendisliğinde de hazırlanan projenin hem güvenli hem de ekonomik olması şarttır. Bu koşulları en iyi şekilde sağlayan tasarımın bulunması ve o tasarımın uygulanması sırasında çevre ve arazi değişkenlerinin durumuna çok dikkat edilmesi gerekmektedir. Özellikle şehir içi tünelciliğinde, tünel kaplamasında oluşacak deformasyonların yanında, yüzey oturumları gibi konular da kontrol altına alınmalıdır. İmalat sırasında düzenli olarak ölçüm ve gözlem yapılması zorunludur.

Tezin amacı, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile imal edilecek olan büyük kesitli bir tünel ile üzerinde bulunan bir yapının etkileşiminin incelenmesidir. Tez çalışması kapsamında, örnek uygulama projesi olarak; Kuzey Marmara Otoyolu (KMO) Projesi kapsamında inşa edilen Çamlık Tüneli ile üzerinde yer alan İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresine (İSKİ) ait su deposu belirlenmiştir.

1.2 Çalışma Yöntemi

Bu tez çalışmasında, Çamlık Tüneli ve İSKİ su deposuna ait analizler gösterilmeden önce, incelenen konu hakkında literatür araştırmaları yapılmıştır. Bulunan bilgiler ana

başlıklara ayrılarak farklı bölümlerde irdelenmiş ve son olarak örnek uygulama projesi anlatılmıştır. Tez bölümlerinin kapsamı aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Tez çalışmasının ikinci bölümünde tüneller hakkında genel bilgiler verilmiş olup tünelciliğin tarihsel gelişimi ve tünel yapımını gerektiren nedenler açıklanmıştır. Ayrıca tünellerin sınıflandırılması yapılarak farklı kategorilere göre tünel çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir.
- Üçüncü bölümde tünel açma yöntemleri özetlenmiş ve örnek uygulama projesinde kullanılan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi detaylı olarak incelenmiştir.
- Dördüncü bölümde tünellerde kullanılan sağlamlaştırma ve destekleme elemanları hakkında genel bilgiler verilmiştir.
- Beşinci bölümde sayısal modelleme çalışmaları kapsamında kullanılan farklı yöntemler açıklanarak Sonlu Elemanlar Yöntemi özel olarak incelenmiştir. Örnek tünel analizi sırasında kullanılmış olan PLAXIS 2D paket programı hakkında detaylı kullanım bilgileri verilmiştir.
- Altıncı bölümde tünel projelerinde kullanılan jeoteknik ölçümler açıklanmıştır.
- Yedinci bölümde örnek uygulama projesi kapsamında yapılan işler özetlenerek PLAXIS 2D programı ile yapılan tünel stabilite analizlerine ve arazide yapılan jeoteknik ölçümlere ait sonuçlar verilmiştir.
- Tezin son bölümünde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



2. TÜNELLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

“Yeraltı kaya yapıları yerkabuğu içinde herhangi bir boşluğun açılmasından sonra bu boşluğu çevreleyen ana kayadan oluşan, mühendislik açısından yeterli ve güvenli taşıyıcı sistemlerdir” [2].

Doğal güçlükler veya fazla maliyet sebebiyle yer üstünde yapılamayan insan ulaşımı veya malzeme nakliyatının yeraltından sağlanabilmesi için tünel adı verilen kaya yapıları oluşturulur [3]. İki ucu açık, boyu eninden fazla, eğimi 30° den az, kalınlığı boşluk duvarından etkilenme sınırına kadar ulaşan ve ana malzemesi kaya olan çok kalın cidarlı silindirik yeraltı yapılarına tünel denir [4].

‘Tünel’ kelimesi Birleşik Krallık’ın Galler bölgesinde konuşulan Gal dilinden gelmektedir. Bu yöre insanları, sıvı maddelerin taşınmasında ‘Tonne’ adı verilen iki tarafı kapak ya da tıpa ile kapatılabilen tahtadan yapılmış ince uzun kaplar kullanırlardı. Daha sonraları ise yeraltı mahzenlerine ve bodrum gibi yerleşim yerlerine bu ad verilmiş ve 19. yüzyılın ikinci yarısından sonra yaygınlaşarak tünel kelimesi bugünkü anlamıyla kullanılmaya başlanmıştır [5, 6].

2.1 Tünelciliğin Tarihsel Gelişimi

İnsanlar hayati ihtiyaçlarını karşılamak için yapay olarak yaratmaya başlamadan önce, tüneller ve geniş yeraltı açıklıkları doğada hâlihazırda bulunmaktaydılar. İlk insanlar tarafından barınak olarak kullanılan mağara ve dehlizler genellikle deniz suyu veya akarsuların, arazinin yüksekte kalan kısımlarını delmesi sonucu oluşmuşlardır. Bu şekilde oluşan mağaralara verilebilecek en iyi örneklerden biri, yüksekliği 20 m uzunluğu ise 69 m olup İskoçya’daki Staffa Adası’nda bulunan Fingal Mağarasıdır. Ürünlü-Düdensuyu Mağarası, Alanya’daki Damлатаş Mağarası, Burdur’daki İnsuyu Mağarası ve Silifke’deki Cennet Cehennem Mağaraları ise Türkiye’deki önemli mağaralardandır [7].

İnsanlar tarafından birçok farklı sebeple açılmaya başlanan tünellerin ilki olarak Svaziland’daki Bomvu Tepesinde bulunan, M.Ö. 40.000’li yıllarda Neandertaller

tarafından kazılan Ngwenya Madeni gösterilebilir [8]. Daha sonraları insanlar, basit aletler kullanarak ihtiyaçları gereğince mevcut yeraltı açıklıklarını genişletmeye ve daha büyük yaşam alanları yaratmaya başlamışlardır. Odun yakılarak ısıtılan kayaların çatlayarak dağılması sağlanmıştır. Bilinen gerçek anlamdaki ilk tünelin, M.Ö. 2200’lerde Babil’de sarayla tapınak arasında bir geçiş oluşturabilmek amacıyla aç-kapa metoduyla yapıldığı tahmin edilmektedir [9].

Mühendisi bilinen ilk tünel ise M.Ö. 6. yüzyılda Samos Adasında açılan 1.036 m uzunluğundaki Eupalinos Tünelidir. Tünel, mühendis Megaralı Eupalinos tarafından şehre su sağlamak amacıyla yapılmıştır [10].

Türkiye’de bulunan en önemli antik tünellerden biri, Roma imparatoru Vespasian tarafından şehri sel ve taşkınlardan korumak amacıyla yaptırılan Titus Tünelidir (Şekil 2.1). 1.380 metre uzunluğunda, 7 metre yüksekliğinde ve 6 metre genişliğinde olan tünelin inşaatına M.S. 69 yılında başlanıp M.S. 81 yılında oğlu Titus tarafından bitirilmiştir.



Şekil 2.1 : Titus Tüneli.

Endüstri devriminin sonucunda ortaya çıkan ulaşım ve kaynak ihtiyacı tünellere verilen önemi arttırmıştır. 17. yüzyılda İngiltere ve Fransa’da birçok yeraltı su kanalları açılmıştır [3]. Nehir ve kanal taşımacılığı ile birlikte modern tünelcilik

teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. 1679-1681 yılları arasında Fransa'da kanal taşımacılığı için inşa edilen Malpas Tüneli 160 m uzunluğa, 7 m genişliğe ve 8 m yüksekliğe sahiptir [6].

Tünelcilikteki en önemli gelişmelerden biri ise, Fransız Marc Brunel tarafından 1825-1841 yılları arasında Thames nehrinin altından geçen sualtı tünelinin inşaatında, bugünün Tünel Açma Makinalarının (TBM) atası denilebilecek olan bir tünel kazma aracının kullanılmış olmasıdır [11].

Buharlı makinaların icadıyla büyük ilerlemeler gösteren demiryollarının, fazla eğimli yapılamamasının yanında dik ve engebeli arazilerden geçişin mümkün olmaması nedeniyle çok sayıda tünel imalatı yapılması zorunlu hale gelmiştir [5]. Bu demiryolu çalışmaları sayesinde tünelcilik tekniği ile ilgili büyük gelişmeler sağlanarak 1871 yılında Fransa-İtalya arasında 12,7 km uzunluğundaki Mont Cenis Tüneli açılmıştır [6].

Birinci Dünya Savaşı sonrası başlayan durgunluk İkinci Dünya Savaşına kadar sürmüştür, ancak 1950'li yıllardan sonra yeni tünel açma yöntemleri ve teknolojilerinin gelişiminde hızlı bir artış olmuştur.

İlerleyen yıllarda özellikle TBM gibi tam cephe kazı makinalarının icadı ve daha ekonomik, daha hızlı ve daha güvenli tünel açma yöntemlerinin geliştirilmesiyle tünel inşaatında çok önemli başarılar elde edilmiştir.

2.2 Tünel Yapımını Gerektiren Nedenler

Günümüzde farklı yöntemler ve teknolojiler kullanılarak tünel yapımını gerektiren nedenler aşağıdaki şekilde sıralanabilir [5, 12].

- Eğimi sınırlı olan güzergahlarda, dağlık, sarp ve engebeli arazilerin geçilmesi amacı ile,
- Tünel inşası sayesinde güzergâhta önemli bir kısalma olacak ve bu kısalma genel maliyeti azaltacak ise veya tünelden geçilmesi halinde genel maliyet artsa bile bu artış tünelin işletilmesi ile elde edilecek maddi kazanç ile karşılanabilecek ise,
- Güzergâhta büyük yarma ve dolgular çıkması veya köprü ve viyadüklerin yapılmasının gerekli olduğu durumda,

- Güzergâhın bir kısmının önemli toprak kaymaları, kaya yuvarlanmaları ve çığlardan korunması amacı ile,
- Çeşitli sebeplerle akarsuların ya da boğaz teşkil eden deniz sularının altından geçilmek istendiği zaman,
- Temiz su ve atık nakliyatı ya da mevcut bir su kaynağının akış yönünün değiştirilmesi gerektiğinde,
- Özellikle büyük şehirlerde, birbirlerinden tepe, akarsu, boğaz gibi doğal engellerle ayrılmış yerleşim yerlerinin birbirlerine bağlanması amacı ile,
- Nüfus yoğunluğu olan büyük şehirlerde daha hızlı ve kolay bir ulaşım sağlanabilmesi halinde,
- Kamulaştırma bedellerinin çok pahalı olduğu yerlerdeki yolların genişletilmesi veya yeni yolların açılması olanağının bulunmadığı durumlarda,
- Herhangi bir yol kesişiminin istenmediği durumlarda.

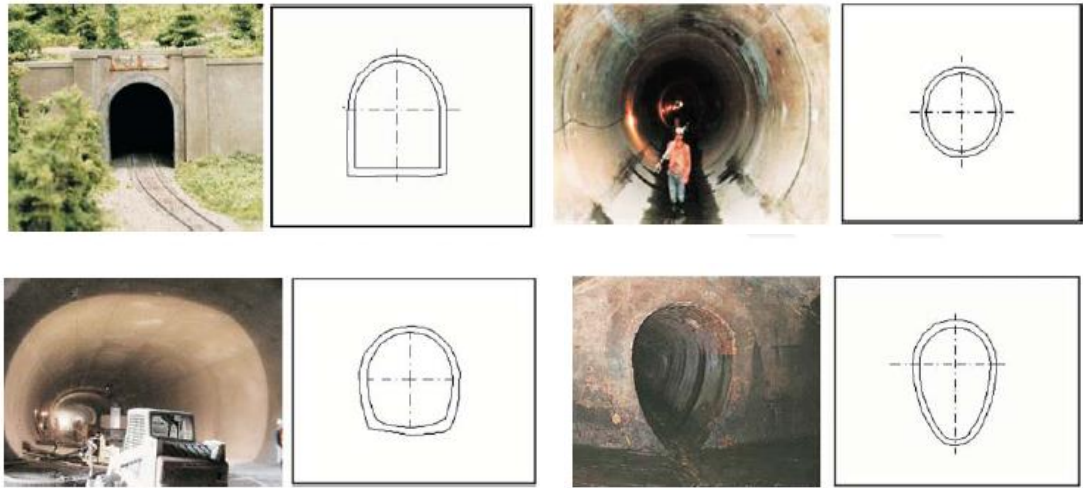
2.3 Tünellerin Sınıflandırılması

Tünelciliğin tarihsel gelişimi neticesinde; zemin ve kaya mekaniği konularında gerçekleştirilen bilimsel ilerlemelerle birlikte kazı, sağlamlaştırma ve destekleme yöntemlerindeki teknolojik gelişmeler sayesinde, her tür zeminde yüksek güvenlik içerisinde tünel yapımı mümkün olmuştur [13].

Tünelleri ana olarak; kullanım alanlarına, derinliklerine, bulundukları zemin koşuluna, inşa metotlarına, destekleme türlerine göre sınıflamak mümkündür [3]. Tüneller kullanım alanlarına göre birçok farklı türde çeşitlenebilir. Ulaştırma amacıyla demiryolu tünelleri, karayolu tünelleri, yaya tünelleri ve metro tünelleri olarak ayrılabilirler. Su ve atık nakliyatı, enerji iletimi, sığınaklar vb. gibi daha farklı kullanım alanları da görülebilmektedir. Açıldıkları derinliğe göre sığ tüneller ve derin tüneller olarak ayrılabilir. Bulundukları zemin koşuluna göre sert, yumuşak ve karışık zeminlerde inşa edilebilirler. Tünel iç ve dış kaplamalarında kullanılan beton ve çelik türleri dikkate alınarak da bir sınıflama yapmak mümkündür. Çizelge 2.1’de Sinha tarafından derlenen tünel sınıflandırılması verilmiştir.

Bu sınıflandırmanın dışında tüneller enkesit şekillerine göre de çeşitlendirilebilir. Enkesit tipleri, ulaşım yolunun ve açılacağı zeminin türüne göre değişmektedir. Kaya

ortamda bulunan tüneller genellikle iki dikey yan duvar ve bir dairesel kemerden oluşan bir enkesitle inşa edilmektedir. Yumuşak ve zayıf zeminde açılan tünellerin ise, kaplamalarına gelen yatay basınçları en iyi şekilde karşılayıp dağıtan enkesitlere sahip olması gerekmektedir. Bu şartları sağlayan en uygun enkesitler tam daire veya at nalı şeklinde olmaktadır. Keskin köşeleri olmayan bu tipler gelen yükleri en iyi karşılayan şekiller olsalar da tabanlarında ulaşım yolu için fazlaca dolgu gerektirmeleri ve iç beton kaplamanın yapım zorluğu gibi sakıncaları da vardır. Yumurta şeklindeki tünellerin ise, tabanları oldukça dar olduğundan ulaşım amacıyla kullanımları uygun olmamakta, ancak şehir altyapısında atık suların ve taşkın debilerinin taşındığı tünellerde kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de enkesit şekillerine göre sınıflandırılan tünellere ait örnekler gösterilmiştir. Dikdörtgen enkesitli tüneller ise, kaplama imalatının zorluğu ve dik köşelerinde meydana gelen gerilme yığılmalarından ötürü yalnızca aç-kapa tüneller ile sualtı tünellerinde kullanılmaktadır [13].



Şekil 2.2 : Enkesit şekillerine göre tüneller.

Çizelge 2.1 : Tünel Sınıflandırmaları [3, 14].

Sınıflandırma Türü	Derinlik	Kullanım Alanı	Zemin Durumu	Yapım Yöntemi	İç Kaplama	Dış Kaplama	Akış Durumu	Uzunluk	Eğim	Güzergâh
Tünel Tipi	1-Sığ	A.Ulaştırma 1-Yaya	1-Sert	1-Klasik yöntemler	1-Dökme beton	1-Püskürtme beton	1-Serbest	1-Uzun	1-Düz	1-Düz
	2-Derin	2-Karayolu 3-Demiryolu 4-Metro	2-Yumuşak	2-Del-Patlat	2-Prekast	2-Kaya bulonu	2-Basınçlı	2-Orta uzunlukta	2-Dik	2-Kurpta
			3-Karışık	3-Köstebek	3-Püskürtme beton	3-Çelik iksa		3-Kısa	3-Az Eğimli	
		B.Taşıma 1-Su temini 2-Kanalizasyon 3-Su tahliye 4-Su alma ağızları		4-Roadheader	4-Çelik					
				5-Aç-Kapa	5-Desteksiz					
				6-Batırma Tüp						
		C.İletim 1-Telefon hatları 2-Kablo hatları 3-Elektrik hatları 4-Boru hatları								
		D.Rekreasyon 1-Yüzme havuzları 2-Oyun merkezleri 3-Yeraltı kültür merkezleri 4-Spor salonları								
		E.Madencilik 1-Ulaşma 2-Taşıma								
		F.Savunma 1-Sığınaklar 2-Komuta merkezleri								

3. TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

Tünel açma yöntemleri, kazının türüne ve ilerleme türüne göre iki başlık altında toplanabilir. Kazı türüne göre delme-patlatma ve mekanize kazı olarak, ilerleme türüne göre ise aç-kapa, pilot tünelli, tam kesitli ve parçalı kesitli olarak sınıflandırılabilir.

Tünel inşaatı ihtiyacının artmaya başlamasıyla çeşitli tünel açma yöntemleri geliştirilmiştir. Uzun bir tecrübe evresi sonucunda geliştirilen bu yöntemler kazı aşaması, iksa sistemleri ve kaplama tiplerinin seçimleri konularında farklılık göstermektedir.

3.1 Kazı Türüne Göre Tünel Açma Yöntemleri

Tünel kazıları günümüzde delme-patlatma ya da mekanize olarak yapılmaktadır. Delme-patlatma ile yapılan kazılarda öncelikle patlayıcı maddelerin yerleştirileceği delikler delinerek delikler doldurulur. Ardından patlatma işlemi gerçekleştirilir. Patlatma işleminden sonra ortaya çıkan gazlar tahliye edilerek, elde edilen pasa nakledilir. Sökülememiş kaya parçaları sökülerek geçici tahkimatlar kurulur [9]. Mekanize kazıda ise kollu tünel açma makineleri hidrolik kırıcılar, ekskavatör, tam cephe tünel açma makinaları (TBM), kalkanlı makinalar ve mikro tünel makinaları kullanılmaktadır [11].

Delme-patlatma yönteminde en az patlayıcı madde ve en az delikle en fazla verimin yanı sıra;

- Kayacın kolay taşınabilir büyüklükte parçalara ayrılması
- Yer sarsıntısı, hava şoku ve gürültünün minimum olması
- Tünelin tamamlanan kısmına ve tünel çevresine minimum zarar verilmesi
- Tünel çevresindeki patlatılmayan kayacın mümkün olan en az miktarda örselenmesiyle gerekebilecek desteklemelerin minimum seviyede tutulması
- Tünel yüzeyinin olabildiğince pürüzsüz olması istenir [15].

Patlatma işleminin göz önünde bulundurulması gereken, son yıllarda özellikle daha çok ön plana çıkan önemli bir yanı, enerjinin bir kısmının herhangi bir işte kullanılamayıp sismik, ısı, ışık ve ses enerjisi olarak harcanmasıdır. Bunun sonucunda yer sarsıntısı, hava şoku, taş savrulması, gaz emisyonu gibi çevresel olumsuzluklar ortaya çıkmakta ve bu olumsuz çevresel etkilerin minimize edilmesi zorunluluğu doğmaktadır [16].

Mekanize kazı makinaları tam kesit ve yarım kesit tünel açma makinaları olmak üzere ikiye ayrılır. Tam kesit tünel açma makinalarına en iyi örnek TBM'dir. Bir tünel açma fabrikası olarak da değerlendirilebilecek bu makinalar, açılması istenen boyutta tam daire şeklinde bir ring içerisinde tünel yapımı için kullanılacak olan ekipmanları barındırmaktadır.

Yarım kesit tünel açma makinaları ise kollu makinalar olup, tüneli çevreleyen kayada minimum gevşeme ve nispeten düzgün yüzeyler elde edilir. Bu sayede kullanılacak olan destekleme elemanlarını da azaltabilir. Tam cephe kazı makinalarına göre daha düşük enerjiye ve maliyete ihtiyaç duyar [15].

3.2 İlerleme Türüne Göre Tünel Açma Yöntemleri

İlerleme türüne göre tünel açma yöntemleri Aç-Kapa Yöntemi, Pilot Tünelli Yöntem, Tam Kesitli Yöntem ve Parçalı Kesitli Yöntem olarak dört grupta incelenebilir.

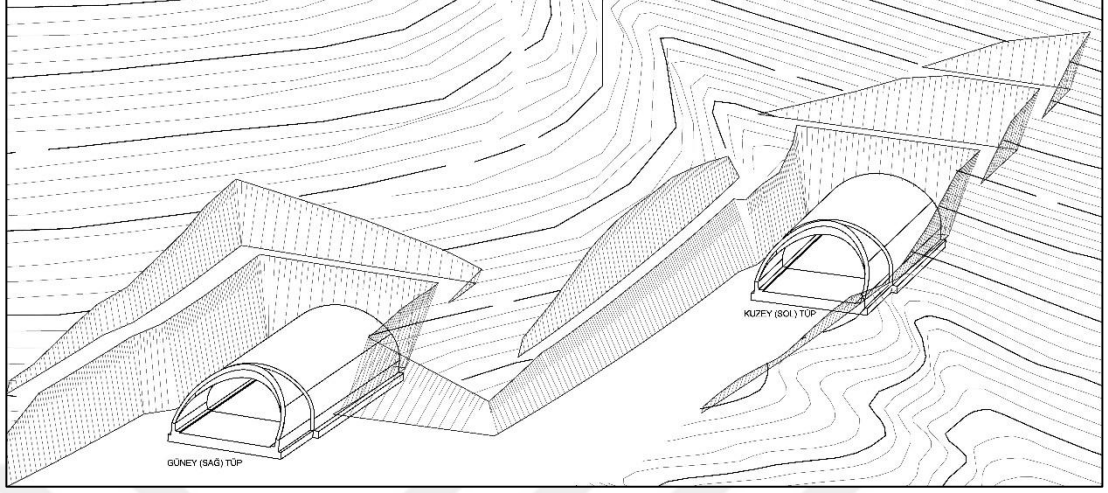
3.2.1 Aç-Kapa yöntemi

Aç-kapa tünel açma yöntemi sığ tüneller için kullanılabilecek bir yöntem olup genellikle tünel giriş-çıkışlarında ve istasyon kazılarında kullanılmaktadır. Bu yöntemde önce mevcut yarma, tünel alt kotuna kadar kazılır, ardından tünel kaplaması inşa edilerek elde edilen yapının üzeri dolgu malzemesiyle örtülür. Şekil 3.1'de Riva Tüneline ait örnek bir aç-kapa tünelli perspektif çizimi gösterilmektedir.

3.2.2 Pilot tünelli yöntem

Pilot tünelli yöntemdeki amaçlanan hedeflerden birincisi, açılması istenen kesit içinde bir boşluk oluşturarak genişletme kazısı sırasında patlatmanın bu boşluğa doğru yapılmasını sağlamak böylece nihai kazı yüzeyinin zedelenmesinin önüne geçmektir [12]. İkinci hedef ise, tam kesit tünel kazısı tamamlanmadan, önden bir galeri sürülerek mevcut kaya yapısının özelliklerini daha iyi anlamaya çalışmaktır. Hasdal Tünelinde

bu amaçla açılan pilot tünel Şekil 3.2’de görülmektedir. Pilot tünelli yöntem özellikle karmaşık jeolojiye sahip veya geniş açıklıklı tünellerde başarılı bir şekilde uygulanır.



Şekil 3.1 : Riva Tüneli portalinde imal edilen aç-kapa tüneller.



Şekil 3.2 : Hasdal Tünelinde açılan pilot tünel.

3.2.3 Tam kesitli yöntemler

Tam kesitli yöntemler, tünel kesitinin parçalara ayrılmadan tek seferde kazıldığı yöntemlerdir. Genellikle küçük çaplı kazılarda uygulanırlar. Ancak gerekli ekipman sağlanıp tasarım doğru bir şekilde uygulanabilirse daha büyük çaplı tünellerde de kullanılabilir. Tam kesit tünel açma makinaları (TBM), delme-patlatma veya kazıcı makinalarla yapılabilir.

TBM ile yapılan kazılarda; kazı, pasa nakliyatı ve destekleme imalatı dâhil tüm işlemler tek bir makinada birbirini takip eden süreçlerle yapılmaktadır. Bu sayede ilerleme çok hızlı bir şekilde olmaktadır. Yalnızca tam dairesel tünel tipleri için kazı yapılabilmesi ve ilk yatırımın yüksek olmasına rağmen, sürekli bir ilerleme sağlaması ve işçilik, kaplama gibi maliyetlerin düşük olması nedeniyle uzun mesafelerde avantajlı olmaktadır.

Delme-patlatma ile tam kesit kazı yapılması ancak sağlam ve kendini tutabilen kayalarda verimli ve başarılı olmaktadır. Ayrıca bu yöntem kayanın kendi kendini tutabildiği sürenin, patlatma sonrası havalandırma ve pasa nakliyatı işlemlerine yettiği koşullarda kullanılabilir [17].

Kazıcı makinalar ile tam kesit kazı yapılması çok fazla emek gerektiren bir yöntemdir. Görece sağlam olan kayalarda, tünel aynasının tüm yüzeylerinin zemin çivisi, enjeksiyon vb. sağlamlaştırma elemanlarıyla güçlendirilmesi ve ardından elde edilen bu yeni yüzeyin tam cephe olarak kazılmasıyla gerçekleştirilir.

3.2.4 Parçalı kesitli yöntemler

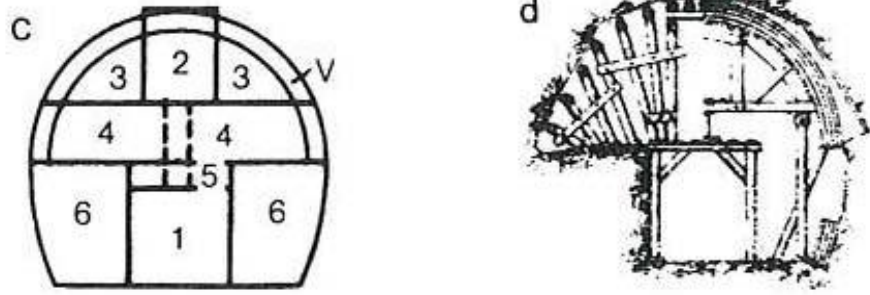
Parçalı kesit tünel açma yöntemleri ayna kesitinin tasarlanan parçalara ayrılıp, belirli bir sırayla kazıldığı yöntemlerdir. Özellikle büyük boyutlu, geniş açıklıklı tünel kesitlerinde ve zayıf dayanımlı malzemenin bulunduğu tünellerde tercih edilmektedir. Kademeli kazıda, kayacın örselenme miktarını azaltabilmek için, her bir kazı aşaması belirli bir takip mesafesine göre açılmalıdır.

Parçalı kesitli yöntemler uzun yıllardır en çok tercih edilen tünel açma yöntemleri olmuştur. Birçok ülke tarafından yıllar içinde farklı sistemler geliştirilmiş ve başarıyla uygulanmıştır. Fakat bu yöntemlerden çoğu günümüzde yaygın olarak kullanılmamaktadır. İlerleyen bölümlerde açıklanacak olan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) en çok kullanılan parçalı kazı yöntemidir.

3.2.4.1 Belçika yöntemi

Belçika yönteminde, ilk olarak tavan galerisi sürülmekte ve ardından hızlı bir şekilde tavan kaplaması yapılmaktadır. Bu sayede tavan basıncının dengesi korunmaktadır [6]. Tünelin yan duvarları topuk olarak bırakılır. Bu sebeple tavan galerisinin imalatının ardından orta kısmın kazısı yapılır. Daha sonra kalan parçalar kazılarak tüm tünelin kaplaması bitirilir. Şekil 3.3'te Belçika yöntemi gösterilmiştir.

Tünel tavanının kazı ve desteklemesinin kısa sürede bitirilmesiyle tavan basıncının dengelenmesi neticesinde kaya duraylılığını arttırması bu yöntemin en önemli avantajı olmaktadır. Kazının ardından desteklemelerin hızlı bir şekilde yapılması gerekirken alan darlığı sebebiyle çalışmanın yavaş ilerlemesi sistemin dezavantajlarıdır [7].

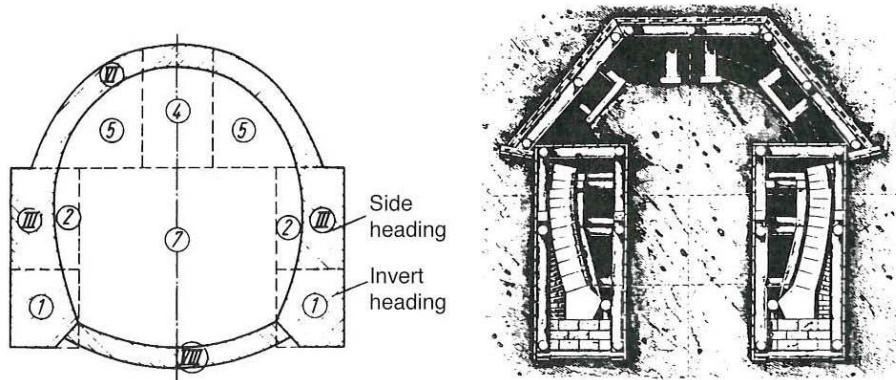


Şekil 3.3 : Belçika yöntemine göre tünel tip kesiti ve Hönebacher Tüneli örneği [18].

3.2.4.2 Alman yöntemi

Çekirdek yöntemi olarak da bilinen bu yöntemde önce iki adet yan ayak galerisi kazılır. Daha sonra bu galerilerden tavan galerisine doğru genişletilerek tavan galerisi sürülür. Her bir aşamadan sonra açılan boşlukların beton desteklemeleri tamamlanır. Bu kazı ve destekleme işlemleri bittiğinde tavan ve yan duvarların kaplamaları tamamlanmış olur. En son ortada kalan çekirdek denilen kısım kazılarak tünel imalatı bitirilmiş olur. Şekil 3.4'te Alman yöntemi gösterilmiştir.

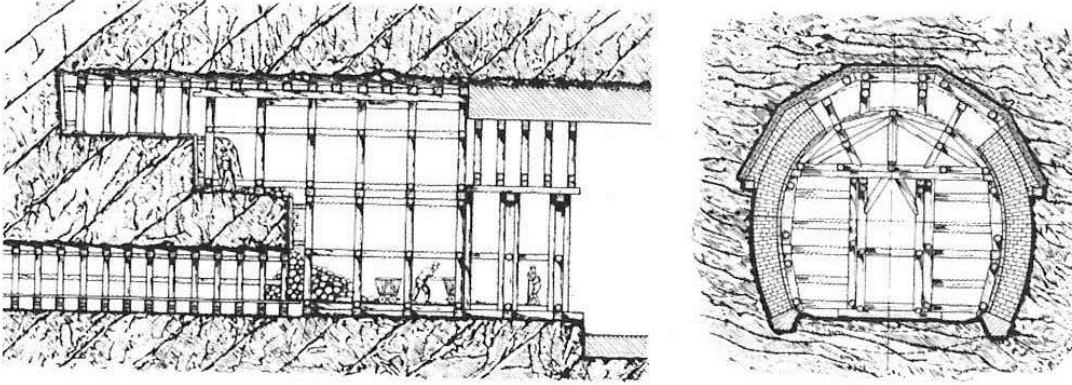
Bu yöntemin, ilk açılan yan galeriler neticesinde formasyonun özelliklerinin bilinmesi ve tavan kemerlerinin sağlam destekler üzerinde bulunması avantajları vardır. Dezavantajları olarak ise çalışma alanının darlığı, zaman kaybının fazlalığı ve değişik yön ve şiddette galeri gerilmeleri ortaya çıkması sayılabilir [6].



Şekil 3.4 : Alman yöntemine göre tünel tip kesiti ve Triebitzer Tüneli örneği [18].

3.2.4.3 Eski Avusturya yöntemi

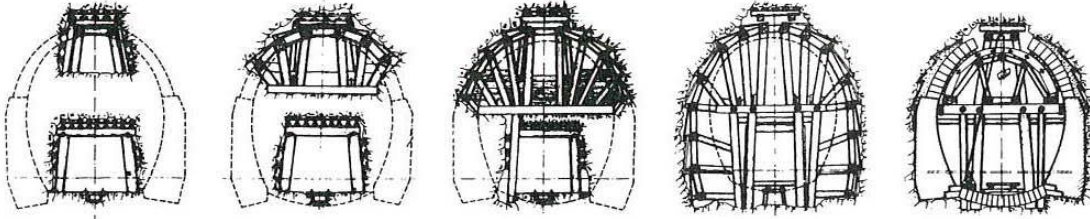
Geniş kesitli kısa tünellerde tercih edilen bir yöntemdir. İlk olarak nakliye amaçlı kullanılacak olan tavan ve taban galerileri kazılır. Kazı yönü yukarıdan aşağıya doğru, kaplama yönü ise aşağıdan yukarıya doğrudur. Tüm aşamaların kazısı bitmeden kaplama imalatı yapılmamaktadır. Şekil 3.5'te Eski Avusturya yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Semmering Tünelinin Eski Avusturya yöntemine göre inşaatı [18].

3.2.4.4 İngiliz yöntemi

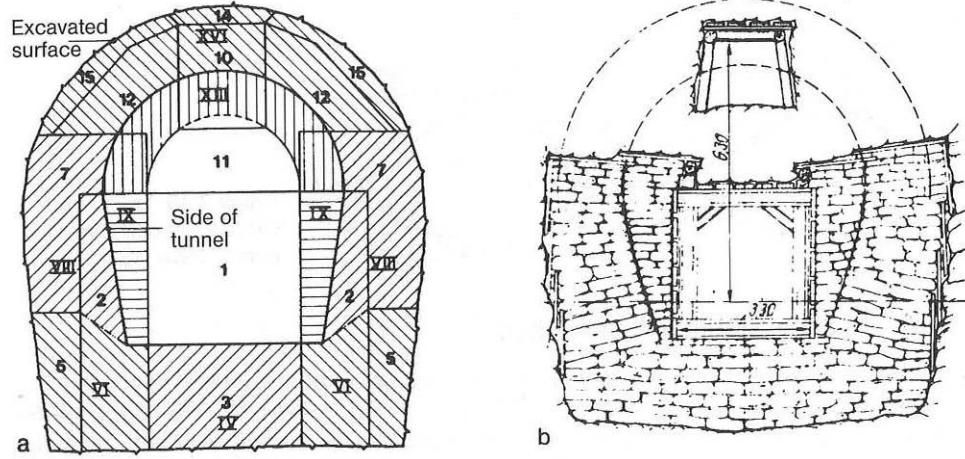
Eski Avusturya yöntemine çok benzeyen İngiliz yöntemi, daha az parçalı olması sebebiyle daha sağlam ve az baskılı kayalarda uygulanmaktadır [6]. Şekil 3.6'da İngiliz yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : İngiliz tünel açma yöntemi [18].

3.2.4.5 İtalyan yöntemi

Bu yöntemde ilk olarak tünel çevresi rijit plakalarla kaplanır. Kazı sırasında bu plakaların kaldırılıp kazı sonrasında tekrar kaplanmaları sebebiyle ilerleme çok yavaştır. Ancak çok plastik ve akışkan kayalarda tercih edilmektedir [9]. Şekil 3.7'de İtalyan yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : İtalyan tünel açma yöntemi ve Simplon Tüneli örneği [18].

3.2.4.6 İsviçre yöntemi

İsviçre yönteminde ilk olarak, nakliyat amacıyla kullanılmak üzere, taban galerisi açılır. Ardından bu galeri yukarı doğru tavana kadar genişletilir ve yan parçaların kazısına geçilir. En son olarak aşağıdan yukarıya doğru kaplama yapılır [9].

3.3 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)

Parçalı kazı yöntemlerinden biri olan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) yerinde elde edilen tecrübeler sonucu ortaya çıkmış bir yöntemdir. Günümüzde çok yaygın olarak kullanılan bu yöntem tünelciliğe yeni bir anlayış getirmiştir.

Belirli bir ekipman kullanılmadan açılan, sabit ve değişmez bir yöntem olmayan NATM’de ana amaç, tüneli çevreleyen ortamın, ilk kazı ve sağlamlaştırma işlemlerinin ardından oluşacak olan ikincil gerilme ve deformasyonların denetlenmesi ve yönlendirilmesiyle, kendi kendini tutan statik bir sisteme dönüştürülmesidir [6]. NATM her türlü geometriye ve formasyona kolaylıkla uyum sağlayan bir tünelcilik felsefesidir.

3.3.1 Yeni Avusturya tünel açma yönteminin kısa tarihçesi

NATM, geleneksel tünelcilikte Avusturya Tünel Açma Yöntemi olarak adlandırılan ve genellikle hidroelektrik santrallerin inşasında kullanılan kazı yönteminden elde edilen tecrübelerden yararlanılarak geliştirilmiştir [19, 20]. Patenti 1958’de Anton Brunner tarafından alınmıştır. Temelleri 1963 yılında Ladislaus von Rabcewicz tarafından atılan ve 1978 yılında Leopold Müller tarafından geliştirilen bu yöntem

1979'da Mahir Vardar tarafından Türkiye literatürüne kazandırılmıştır [1]. NATM metodu kullanılarak yapılan ilk büyük ölçekli tünel Rabcewicz tarafından Venezuela'da yapılmıştır [13].

3.3.2 Yeni Avusturya tünel açma yönteminin tanımı

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin tanımı yapılırken ilk olarak bilinmesi gereken, NATM'nin ne bir kazı ne de bir sağlamlaştırma yöntemi olmasıdır. NATM, tünel imalatı sırasında devam eden kazıların performansını gözleyen ve imalatın her aşamasında göz önünde bulundurulması gereken bir anlayış ve felsefedir [21].

Patent başvurusunda yapılan NATM tanımlaması şöyledir: “İnce geçici bir destekleme yerleştirmek ve deformasyonlara izin vermek yoluyla kaya basıncının düşürülmesi ve bu basıncın çevreleyen kayaya dağıtılmasıdır. Böylece son destekleme daha az yüklenecek ve daha sonra daha da ince bir yapı halinde son destekleme yerleştirilebilecektir. Deformasyonlar ölçümler ile gözlenmeli ve sonuçlar yapısal analiz ve tasarım ile birlikte değerlendirilmelidir” [22].

Rabcewicz ise bu yöntemi sade bir dille şu şekilde tanımlamıştır: “İnce ve geçici bir destekleme uygulayarak, deformasyonlara izin vererek, tünel içine doğru gelişen kaya basıncını azaltmak ve yükleri kazı çevresindeki kayaya dağıtmak. Böylelikle son destekleme (kaplama) daha az yüklenecek, daha sonra yapılabilecek ve daha ince bir yapı olabilecektir. Deformasyonlar kazı sırasında ölçülecek ve projedeki hesaplamalarla karşılaştırılacaktır” [21].

3.3.3 Yeni Avusturya tünel açma yönteminin temel prensipleri

Bu yöntemin ilk ve en önemli ilkesi; kayanın mukavemetini korumak ve harekete geçirmek, tünel çevresindeki kayada kendisini destekleyen bir halka oluşturmaktır. Ön sağlamlaştırma, kayanın kendini desteklemesine yardımcı olması için oluşturulur. Bunun için ön sağlamlaştırmanın uygun bir yük-deformasyon özelliğinin olması ve tam zamanında yerleştirilmesi gerekir. NATM'nin ikinci ilkesi, tüneldeki deformasyonların ve kaplamada biriken gerilimlerin aletlerle ölçülmesidir. NATM'nin üçüncü ilkesi; karar verip, anlaşmazlıkları çözerken de, tünel işi ile ilgili bütün tarafların tam bir işbirliği içinde bulunmaları gereğidir. NATM'nin dördüncü ilkesi; her türlü tünel şartına uygun olması ve tünelde, mevcut şartlara göre kolaylıkla uygulanabilmesidir. Bu özelliği NATM'nin bir kazı veya sağlamlaştırma yöntemi

değil de bir felsefe olmasının gereğidir [21]. Şekil 3.8’de NATM ile kazılan ve desteklenen bir tünel gösterilmektedir.



Şekil 3.8 : NATM’ye göre açılan Çamlık Tüneli.

NATM sisteminin temel prensipleri 22 maddede toplanarak Müller tarafından 1977 yılında yayınlanmıştır. Bu yayının çevirisi 1979 yılında Vardar tarafından yapılmıştır. Bu prensipler aşağıda listelenmiştir [21, 23, 24].

1. Tünelde, esas yükü taşıyan kısım, tüneli çevreleyen kayanın kendisidir.
2. Kayanın ilksel sağlamlığı tünel kazısından sonra korunmalıdır.
3. Gevşemelerin olabildiğince önüne geçilmelidir. Çünkü gevşemeler kayanın taşıma direncini azaltır.
4. Kayayı deformasyonlardan korumak için, tek ve iki eksenli gerilme ortamı oluşturmaktan kaçınmak gerekir.
5. Koruyucu zon, kayacın taşıma direnci azaltılmaksızın oluşturulmalıdır.
6. Sağlamlaştırma işlemleri tam zamanında ve gerekli esneklikte yapılmalıdır.
7. Kayacın desteksiz olarak kendini tutma süresi (stand up time) doğru olarak tahmin edilmelidir.
8. Kayacın kazı sonrasındaki deformasyon davranışının önceden belirlenebilmesi için laboratuvar ve arazide deneylerin yapılması ve deneme galerisinde konverjans ve deformasyonların ölçülmesi zorunludur.
9. Sağlamlaştırma önlemi boşluk yüzeyini bağlayacak biçimde olmalıdır.
10. Sağlamlaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde olmalıdır.

11. Sağlamlaştırma elemanları olarak; tel kafes ankraj ve kafes donanımı kullanılmalıdır.
12. Sağlamlaştırma zamanı ve araçları ölçümlerle saptanmalıdır.
13. Tünel, statik bakımdan taşıyıcı zon ile sağlamlaştırma kabuğunun oluşturduğu bir halkadır.
14. Sağlamlaştırma kabuğu kapalı bir halka şeklinde olmalıdır.
15. Halka (ring) en kısa zamanda oluşturulmalıdır.
16. Boşluğun açılması; ilkel gerilme durumunu bozarak yeni bir gerilme dağılımı oluşturur. Bu durumu en az değiştiren kazı ilkesi ise sekonder gerilme durumunun bir defada oluşturulmasıdır.
17. Tünel açma yönteminin uygulanış biçimi yapının güvenliği açısından önemlidir.
18. Tünel enkesiti daire veya elips şeklinde olmalı, çıkıntılı, çentikli ve köşeli olmamalıdır.
19. Kalıcı sağlamlaştırma kabuğu ince olmalı ve dış kabuk (ön sağlamlaştırma kabuğu) ile sürtünmesiz fakat sıkı bağlı olmalıdır.
20. Ön (geçici) sağlamlaştırma işlemleriyle yapının stabilitesi sağlanmış olmalıdır.
21. Yapım süreci içinde yönlendirme ve denetleme ölçümleri yapılmalıdır.
22. Çatlak suyu basıncının sistemin taşıma direncini düşürmemesi için suyun drene edilmesi gerekir.

3.3.4 Yeni Avusturya tünel açma yönteminin avantajları ve dezavantajları

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin günümüzde kullanılan diğer yöntemlere göre birçok üstünlükleri vardır [3]:

- Her tür zemin koşulunda uygulanabilir olması yöntemin en önemli özelliğidir. Bu özelliğinden dolayı karmaşık jeolojik koşullarda açılan veya kazı enkesitinin değiştiği tünellerde rahatlıkla uygulanabilir.
- Zayıf zeminlerde açılan büyük kesitli tünellerde Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemiyle açılan tüneller daha ekonomik olmaktadır.
- Tüneller yüksek boşluk suyu basınçlarının bulunduğu ortamlarda membranların kullanılmasıyla kuru ortamlarda açılabilir.
- Optimum tasarım yapıldığı için kullanılan tünel desteklemeleri daha ekonomik olmaktadır.

- Sadece bir adet ana makineye baēlı olarak çalışılmaz.

Yöntemin bazı dezavantajları da vardır [25]:

- İlerleme oranı diēer yöntemlere göre daha düşük olabilir.
- Personel eğitimi ve pratik kazandırılması zordur.
- Kalifiye işçilikle beraber yüksek kaliteli malzeme gerektirir.
- Projeyi yaptıran ve yapan açısından anlaşma ve risk dağılımı zordur.





4. TÜNELLERDE SAĞLAMLAŞTIRMA VE DESTEKLEME

Tünel kazısı sırasında kazıya başlanılmadan önce zeminin sahip olduğu ilk gerilme değişerek ikinci gerilme durumuna dönüşür. Tünelin etrafında oluşan bu ikincil gerilme durumu tünelin stabilitesini belirleyen ana etmendir [4]. Oluşan yeni gerilmeler, deformasyona neden olacaktır. Tünelin çevresindeki kayanın, doğal kemerlenme ile kendi kendini tutabilme süresi içindeki en uygun zamanda uygulanacak sağlamlaştırma ve destekleme elemanlarıyla, direncinin artırılması gerekmektedir.

Kaya sağlamlaştırma; yeraltında kazılan bir açıklığın çevresindeki kayanın sahip olduğu yük taşıma özelliğini koruyarak stabilitenin artırılması için kaya bulonları gibi bir kaya sağlamlaştırma elemanının yerleştirilmesidir. Sağlamlaştırma ekipmanları kayaç malzemesinin içine yerleştirildiğinden kaya kütlelerinin bir parçası olur. Bu sayede kayanın mevcut direnci harekete geçirilerek kendi kendini destekler hale getirilir [13].

Kaya desteklemesi ise; sağlamlaştırma ekipmanlarının aksine kaya kütlelerinin dışına yerleştirilen çelik hasır, çelik iksa veya beton kaplama kullanılarak kaya kütlelerinin hareketlerinin kontrol edilmesidir [13].

NATM’de birincil destekler olarak kullanılan püskürtme beton, hasır çelik ve kaya bulonları kaya kütleleriyle birlikte kompozit bir yapı oluşturmaktadır. Kaya ve destek elemanlarından oluşan bu kompozit sistem tünel çevresinde oluşan basınçların yeniden dağılımını sağlayarak kayanın gevşeme sonucu azalmakta olan dayanımının artmasını sağlamaktadır. Deformasyonlar, kontrollü bir şekilde tünel içinde göçüğe meydan vermeden veya emniyetsiz bir ortam oluşmadan gerçekleşmektedir [21, 26].

Tünellerde sıklıkla kullanılan ana destekleme elemanları aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

4.1 Püskürtme Beton

Püskürtme beton; agrega, çimento, su ve priz hızlandırıcı katkı karışımının basınçlı hava ile boru içerisinde taşınıp püskürtülerek yerleştirilen beton olarak

tanımlanmaktadır. Kalıp gerektirmeden yerleştirilerek özel katkılar yardımıyla hemen dayanım kazanmaya başlaması nedeniyle yeraltı mühendisliği ve maden mühendisliği uygulamalarında yaygın kullanım alanı bulmaktadır [27].

İlk püskürtme beton uygulamalarına 20. yüzyılın başlarında başlanmış, ancak ekipmanlardaki birtakım sorunlar nedeniyle yaygınlaşamamıştır. 1950'li yıllardan sonra gelişen teknolojiyle birlikte daha çok kullanım alanı bulmaya başlamıştır. 1960'lardan sonra Rabcewicz ve arkadaşları tarafından ortaya konulan Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin destekleme sisteminin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir [27].

Püskürtme beton; kırık ve çatlakların arasına girerek kayacın yerindeki kayma dayanımını arttırmak, köşeleri ve boşlukları doldurarak köşe noktalarında oluşan gerilme konsantrasyonunu azaltmak, sağladığı adezyon ve kayma direnci ile kırık ve çatlaklarla sınırlanmış kaya bloklarının oluşturduğu yükü çevre kayalara aktararak kayanın kendi kendini taşımasını sağlamak, statik bakımdan bir kabuk gibi çalışarak taşıyıcılık sağlamak, gevşeyen arazi tabakalarına karşı erken direnç göstererek iyi bir kemerleşme sağlamak ve kazılan yüzeylerin hava ve su ile temasını keserek yüzey bozunmasını ve gevşemeleri önlemek gibi işlevleri yerine getirmektedir [27, 28, 29].

4.2 Hasır Çelik

Hasır çelikler kaya ve zemin destekleme uygulamalarında püskürtme beton ile birlikte başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle birbirine kaynaklanarak tutturulan çelik tellerden imal edilirler. Kullanılacağı kaya veya zeminin dayanımına göre tercih edilebilecek farklı tipleri vardır. Çelik tellerin kalınlığı değişebileceği gibi bu tellerin arasındaki açıklıklar da farklılık gösterebilmektedir. Şekil 4.1'de hasır çelik örneği gösterilmiştir. Tünel desteklemelerinde kullanım amaçlarını basit olarak şöyle sıralayabiliriz:

- Püskürtme beton priz alana kadar ihtiyaç duyulan stabiliteyi sağlar.
- Kesme kuvvetlerine karşı dayanımı artırır.
- Olası çatlama sonucunda meydana gelen kopmaları önler.
- Rijit bir diyafram oluşturarak bulonların sağlamlaştırma etkisini geniş bir alana yayar.



Şekil 4.1 : Hasır çelikler.

4.3 Çelik İksa

Çelik iksa, püskürtme beton priz alarak yeterli dayanıma ulaşınca kadar geçen sürede inşa emniyetini sağlamak ve kazı kesitinde yük dağılımına yardımcı olmak amacıyla uygulanır [13]. Kullanılan çelik iksa tipleri kaya ortamına göre I, H, TH veya U hadde profiller ve kafes iksa olarak belirlenebilir. Şekil 4.2’de I profil çelik iksa ve kafes iksaya ait örnekler görülmektedir.

Çelik iksaların püskürtme betona tam olarak gömülmesi sayesinde gerilmeler tam olarak aktarılmış ve iksanın yanıl burkulması önlenmiş olur [9].

4.4 Kaya Bulonları

Kaya bulonları, kayacın çekme gerilmelerini taşıyabilmek ve ana kayaya iletmek, süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmak ve kayada üç eksenli gerilme durumu oluşturmak için kaya kütlesinin içine yerleştirilen demir çubuklardır (Şekil 4.3). Tünel açımı sırasında duvar ve tavandaki kopmak üzere olan kayaların yerlerinde kalmalarını sağlayan, iş güvenliğini arttıran elemanlardır [21].

Bulonlar tünel tavan ve duvarlarına delinen delikler içine yerleştirildikten sonra genellikle çimento enjeksiyonu ile kayaya bağlanırlar. Plaka ve somun yardımı ile kayaya doğru itilip sıkıştırılırlar. Bulonlar gerilmemiş, mekanik gerilmeli, uçtan yapışan olarak üç ana tipe ayrılabilir [11].



Şekil 4.2 : (a) I profil çelik iksa. (b) Kafes iksa.



Şekil 4.3 : Kaya bulonlamada kullanılan içi boş nervürlü demir çubuklar.

4.5 Ayna Çivisi

Tünel imalatlarında genelde açıkta kalan tek kısım tünel aynalarıdır. Yumuşak ve zayıf ortamda açılan tünellerde, tünel aynasının stabilitesinin sağlanması amacıyla ayna çivisi uygulaması geliştirilmiştir. Bu destek elemanının uygulamasında; kazı aynasına delinen deliklere, uygun donatı yerleştirilir ve delik enjeksiyon ile doldurulur. Burada donatı olarak nervürlü çelik ya da yüksek mukavemetli fiberglaslar kullanılmaktadır. Fiberglas ayna çivilerine ait örnekler Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Ayna çivisi uygulaması ilk defa 1980'li yıllarda İtalya'da geniş kesitli tünellerde kullanılmıştır [30].



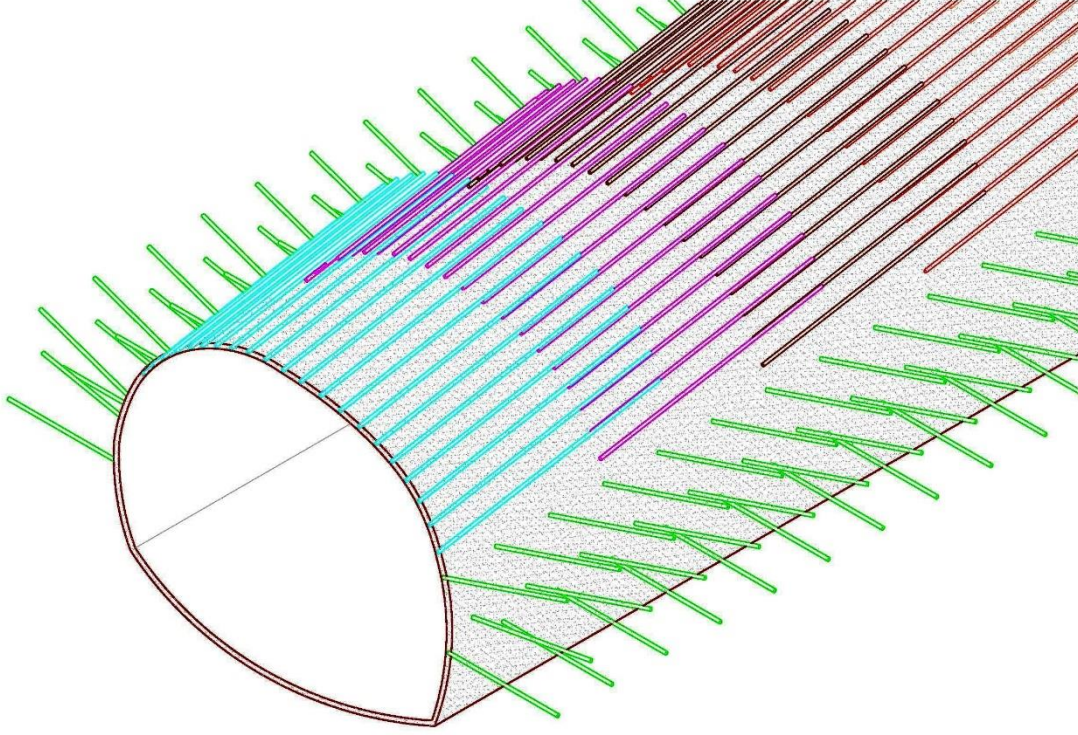
Şekil 4.4 : Fiberglas ayna çivileri.

4.6 Ön Süren

Ön süren uygulaması, özellikle tünel kazısı esnasında veya kazı sonrasında dökülme, çökme ya da kopmalara meyilli kazı ortamlarında, kazı başlamadan önce, kazı çevresini ve aynasını düzensizliklerden korumak için yapılır. Tünel tavan ve omuz bölgelerine gelecek şekilde açılan deliklerden çelik borular sokulur ve bu delikli borulara enjeksiyon yapılarak boşluk kalmaması sağlanmış olur.

4.7 Şemsiye Kemer (Umbrella Arch)

Şemsiye Kemer (Umbrella Arch) yöntemi, özellikle yüzey oturmalarının minimum seviyede olması istenilen sığ tünel imalatlarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Kazılacak tünel üzerinde bir yapı olması durumunda, diğer tünel imalatlarından farklı olarak yalnızca tünel kaplamasının dayanımını değil, tünel çevresindeki yapıların da olumsuz etkilenmemesini sağlamak gerekmektedir. Şekil 4.5'te Şemsiye Kemer uygulaması gösterilmiştir.

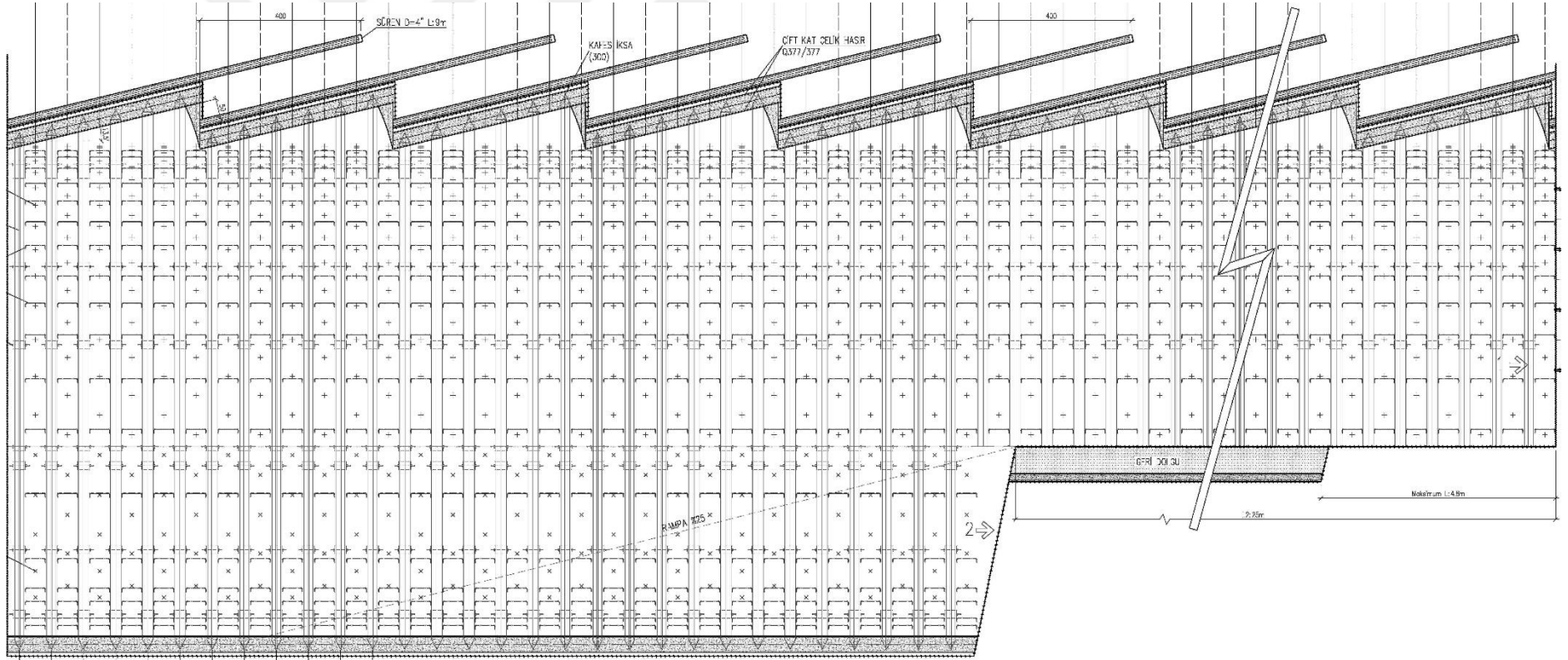


Şekil 4.5 : Şemsiye Kemer uygulaması.

Bu yöntemde, genellikle 4" (101,6 mm) çapında, uçları sivriltilmiş borular kullanılmaktadır (Şekil 4.6). İlk olarak bu boruların sığabileceği ölçüdeki delikler özel delme makinasıyla delinir. Ardından borular bu deliklere sokularak ağızları enjeksiyon manşonuyla kapatılıp etrafı yalıtılır. Enjeksiyon deliklerinden borunun içine doğru enjeksiyon yapılır. Oluşturulan bu kemer sayesinde tünel aynasının stabilitesi artmakta ve zemin oturmaları sınırlanmaktadır. Şekil 4.7'de Şemsiye Kemer uygulamasına ait örnek bir boykesit gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Uçları sivriltilmiş çelik borular.



Şekil 4.7 : Çamlık Tünelinde uygulanan Şemsiye Kemer yöntemine ait boykesit.



5. TÜNELLERDE SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI

Kaya mühendisliği problemlerinin çözümünde karşılaşılan en büyük zorluklar, bir üretim süreci yoluyla tanımlanamayan, doğal bir malzeme olan kayanın, fiziksel ve mühendislik özelliklerinin tahmin edilmek zorunda olunmasıdır [9]. Farklı zamanlarda oluşmuş farklı mekanik dayanıma veya jeolojik özelliğe sahip birçok benzersiz bileşenden oluşan kaya kütlesi, problemin çözümünde bir data olarak tanıtılmaya çalışıldığında güçlüklerle karşılaşmaktadır.

Tünel mühendisliğinde tünel tasarımının tamamlanabilmesi için, belirlenen kazı yöntemi ve destekleme sistemlerinin yeterliliğinin bir hesapla gösterilmesi zorunludur. Bu hesapların yapımında hem tüneli çevreleyen kayaç ve tünel kaplamasının mühendislik özelliklerinin hem de kazı öncesi var olan birincil gerilmeler ile kazı sonrası oluşacak olan ikincil gerilmelerin doğru şekilde tanımlanması gerekmektedir.

Kaya mekaniği problemleri ve tünel kaplamalarının tasarımında, tünelin kazılmasından sonra oluşacak gerilme ve deformasyonlar ile tünel kaplamalarına gelecek yüklerin belirlenebilmesi için üç yaklaşım kullanılmaktadır [13]:

- Ampirik Yöntemler
- Analitik Yöntemler
- Sayısal Yöntemler

Ampirik yöntemler, araştırmacıların, daha önceki projelerde zemin ve kaya üzerinde yaptıkları ölçümlere ve arazi gözlemlerine dayanan pratik tecrübeleri sonucunda ortaya sürdükleri yaklaşımların kullanılmasıyla ilişkilidir. Yöntemin temelini kaya kalite sınıflandırmaları oluşturmaktadır. Bu sınıflandırmalar sonucunda, bazı destek tipleri tavsiye edilerek kayaçlar için duraylılık süreleri tahmininde bulunmaktadır. Bu tür analizler genelde yaklaşık sonuçlar verdiklerinden tünel tasarımında nihai hesap yöntemi olarak değil, kullanılan esas yöntemde faydalanılan bir parametre olarak kullanılmaktadır.

Kaya kütlesi homojen olmayan özellikte yapılardır. Bunun yanında tünel desteklemesinde kullanılan elemanların da matematiksel olarak modellenmesi çok

karmaşık olmaktadır. Bu nedenle mühendislik mekaniğinde problem, bazı kabuller ve basitleştirmeler yapılarak, kolay çözülebilen eşitliklerle ifade edilen basit elemanlara ayrılır. Bu tür çözümler üreten tasarım yöntemlerine analitik yöntemler denir. “Karmaşık şekilli kazılarda, kaya kırık zonları olan bölgelerde, simetrik olmayan problemlerde ve izostatik gerilme durumuna uymayan arazi gerilme durumlarında, çözülmesi gereken eşitlik sayısı büyük oranda arttığından analitik yöntemler başarıyla uygulanamamaktadır” [13].

Çözülmesi istenen problemde uğraşılan sistemin karmaşık geometrik ve jeolojik özelliklere sahip olması durumunda, gerilme ve şekil değiştirme analizlerinin yapılabilmesi için bu yapıların bölgelendirilmeleri gerekmektedir. Bölgelendirme işlemi, sistemdeki elemanları ve elemanlar arasındaki etkileşimi tanımlamak için çok sayıda denklem takımına gerek duymaktadır. Çok karışık olan bu işlemler elle hesaplanamadığından ampirik ve analitik yöntemler kullanılamamaktadır. Bu tür bir çözüm ancak, bilgisayarların teknolojik ilerlemesine bağlı olarak geliştirilen sayısal (nümerik) yöntemler ile mümkün olmuştur.

5.1 Sayısal Yöntemler

Kaya mekaniğinde en çok kullanılan sayısal yöntemler şunlardır [31]:

- Süreklilik Modeli
 - Sonlu Elemanlar Yöntemi
 - Sonlu Farklar Yöntemi
 - Sınır Elemanlar Yöntemi
- Süreksizlik Modeli
 - Ayrık (Bölgesel) Elemanlar Yöntemi
 - Ayrık Çatlak Ağı Yöntemi
- Yatak Katsayısı Modeli
 - Elastik Mesnetli Kiriş Elemanlar Yöntemi
- Melez (Hibrit) Yöntemler

5.1.1 Süreklilik modeli

5.1.1.1 Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminin temelinde, yeraltı yapısı gibi karmaşık bir problemin, kabul edilebilir yaklaşımlarla basite indirgenerek sayısal bir çözüm aranması yatmaktadır [32]. Bunun için sistemin çözümü bilinen sonlu sayıda elemana bölünmesi yani sistemin modellenmesi gerekmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi tezin ilerleyen bölümlerinde detaylı olarak incelenecektir.

5.1.1.2 Sonlu farklar yöntemi

Klasik sonlu farklar yöntemi, sınır değer problemlerindeki diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözümü için kullanılmıştır [5, 33]. Bu yöntemdeki temel teknik, komşu grid noktalarında tanımlanan farklar ile kısmi türevlerin yerlerini değiştirerek ana kısmi diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılmasıdır [9].

Sonlu farklar yöntemi zaman ve uzayın her ikisinin de ayrıklaştırılmasında kullanılabilmesinin yanında kolay hata tahmin teknikleri sağlamaktadır. Özellikle göçük ya da artan çökmeyi içeren büyük ve doğrusal olmayan problemler için uygunken düzensiz şekilli alanlarda ya da tekillik içeren problemlerde kullanmak zordur [34]. Bu yöntem, sadece kavramsal basitliği sebebiyle değil aynı zamanda malzeme doğrusalsızlıklarını ele almadaki esnekliği ile en çok kullanılan yöntemlerden biri olmaya devam etmektedir [9].

5.1.1.3 Sınır elemanlar yöntemi

Sınır elemanlar yöntemi ilk zamanlarda makine ve inşaat bilim dallarında geliştirilmiş fakat jeoteknik ile ilgili araştırmacılar tarafından daha fazla rağbet görmüştür [35]. Bu yöntemde, bir problemi tanımlamak için gereken girilen verinin miktarı büyük oranda azaltılır ve sonsuz kaya kütlelerinin etkisi otomatik olarak kaya kütlelerinde incelenir [9]. Sonsuzdaki sınır şartlarının, yöntemin yapısı gereği otomatik olarak bulunması, süreksizliklerin yerdeğiştirme süreksizliği yöntemiyle ele alınabilmesi sistemi avantajlı hale getirmektedir. Fakat lineer olmayan gerilmelerin, zamana bağlı deformasyonların, aşamalı kazıların ve de destekleme elemanlarının modellemeye dâhil edilmesi oldukça zor olmaktadır [36].

5.1.2 Süreksizlik modeli

5.1.2.1 Ayrık (Bölgesel) elemanlar yöntemi

Ayrık elemanlar yöntemi süreksizlik içeren kaya ortamların modellenmesi için geliştirilmiştir [37]. Süreksizliklerle komşu bloklardan ayrılmış kaya parçası tek bir eleman olarak kabul edilmektedir. Çözüm küçük bir zaman parçası için yapılır. Her parçanın yerdeğiştirmesinden sadece komşu parçalar etkilenir. Problem ardışık iterasyonlar ile çözülür. Modelci problemin çözüm zamanını deneyimleri ile saptar [35].

Bu yöntemde süreksizlikler, kazı aşamaları, destekleme elemanları, yerçekiminin etkisi ya da dolgu kolaylıkla ele alınabilmektedir. Bunun yanında kurulacak olan modellerin çözümü için gerekli olan zaman ve bilgisayar hafızası ile süreksizliklerde belirlenemeyen ya da göz ardı edilen küçük bir değişimin etkilerinin tüm sonucu değiştirdiği gerçeği yöntemin dezavantajları arasında gösterilmektedir [5].

5.1.2.2 Ayrık çatlak ağı yöntemi

Çatlaklı kaya yapılarındaki sıvı akışı süreçlerini dikkate alan özel bir ayrık modeldir. Ayrık Çatlak Ağı Yöntemi yaklaşımlarının, çatlaklı kayaların geçirgenliğinin tanımlanması ve suyun kaya şevleri ve yeraltı kazılarındaki etkileri gibi konularda uygulamaları olmasına rağmen kaya çatlaklarının geometrisi hakkındaki yetersizliği daha geniş kullanım alanları olmasını engellemektedir [9].

5.1.3 Yatak katsayısı modeli

Yatak katsayısı modeli dâhilinde kullanılan yöntem Elastik Mesnetli Kiriş Elemanlar Yöntemidir. Bu yöntemde tünel kaplaması bir bütün halinde kiriş olarak modellenirken etrafındaki zemin yay olarak modellenmektedir. Yayların kaplamaya dik olanları normal gerilmeleri, teğet olanları ise kayma gerilmelerini modellemektedir [31]. Birçok yapı programı bu yöntemi kullanarak hızlı ve basit hesap yapabilmektedir. Zeminler yayların yatak katsayısı ile modellenmektedirler. Zemine uygun yatak katsayısının verilmesi gerçekten zor olduğundan bu yöntemin ön projelendirmede kullanılması daha uygun olmaktadır [3].

5.1.4 Melez (Hibrit) modeller

Melez yöntemler genellikle sınır elemanlar yönteminin, sonlu elemanlar ya da ayrık elemanlar yöntemiyle matematiksel olarak birleştirilmesinden oluşmaktadır [35]. Hem sonsuzdaki sınır şartlarının otomatik olarak saptanması hem de bütün kaya kütlelerinin sonlu elemanlara ayrılması önlenerek zamandan ve de gerekli olan bilgisayar hafızasından elde edilen kazanç yöntemin en önemli avantajlarından biridir. Yöntemde kazı alanı etrafında sonlu elemanlar yönteminden faydalanılırken, sonsuzda sınır değer şartları otomatik olarak hesaplanmaktadır. Melez yöntemler bu nedenle günümüzde de hem sonlu elemanlar hem de sınır eleman yönteminin avantajlı yanlarına sahip olduğu için tercih edilen yöntemler arasındadır [5].

5.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi, günümüzde en yaygın olarak kullanılan sayısal modelleme yöntemlerinden biridir. Önceleri yalnızca yapısal analizler için geliştirilmiş olan yöntem, daha sonraları dayandığı prensiplerin genelliği ve bilgisayar programlamasındaki uygunluğu sebebiyle tüm mühendislik alanlarında kullanılmaya başlamıştır.

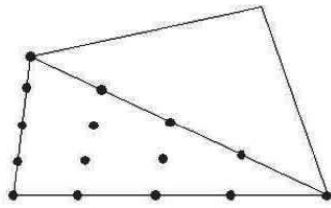
Karmaşık sınır koşulları ve nonlinear malzeme davranışı, homojen olmayan malzemeler gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir programlamaya müsaade etmesi nedeniyle sayısal yöntemler arasında bilgisayar yazılımı için en uygun formülasyona sahip yöntemdir [38].

Sonlu Elemanlar Yönteminin temelinde, analizi yapılacak olan sürekli bir sistemin çok sayıda sonlu (geometrik olarak tanımlı ve boyut olarak sınırlı) elemana bölünmesi yatmaktadır [39]. Bu elemanlar birbirlerine düğüm noktası denilen köşe noktalarından bağlanmaktadır (Şekil 5.1). Her bir sonlu elemanın içindeki herhangi bir noktadaki yerdeğiştirme miktarı, elemanın şekline göre düğümlerdeki yerdeğiştirme cinsinden ifade edilmektedir [35].

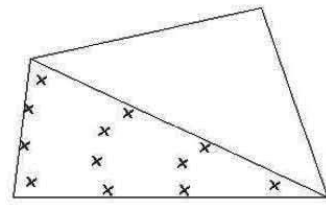
Bu yöntemde ilk olarak bir sonlu elemanın davranış denklemleri kullanılarak, düğüm noktalarının deplasman değerleri hesaplanır. Tüm yapının davranış denklemleri ise, yapıyı oluşturan elemanların denge denklemlerinin elemanlar arasındaki deplasman sürekliliğini sağlayacak şekilde toplanmasıyla saptanır. Elde edilen bu denklemler bilinen deplasman sınır şartlarını sağlayacak şekilde değiştirildikten sonra, ortaya

genellikle bilinmeyen değişkenleri deplasmanlar olan bir lineer cebirsel denklem takımı çıkar. Denklem takımının çözülmesi ile de düğüm noktalarındaki deplasmanlar hesaplanmış olur. Yapıda oluşan şekil değiştirme ve gerilme bileşenleri ise, hesaplanan deplasman değerlerinden, daha sonra türev alınmak suretiyle elde edilir [21].

Tünel mühendisliğinde, yapım aşamaları, değişken zemin tabakaları, zeminin elasto-plastik özellikleri, zemin ile destekleme arasındaki ilişki ve benzeri özellikler göz önüne alındığında sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasının büyük faydalar sağladığı görülebilmektedir.

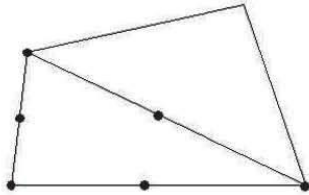


Düğüm Noktaları

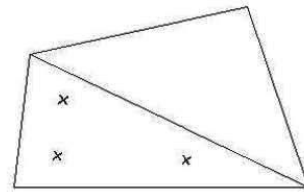


Gerilme Noktaları

15 Düğüm Noktalı Üçgen



Düğüm Noktaları



Gerilme Noktaları

6 Düğüm Noktalı Üçgen

Şekil 5.1 : Sonlu Elemanlar Yönteminde düğüm noktaları ve gerilme noktaları [40].

5.3 PLAXIS Sonlu Elemanlar Programı

PLAXIS, 1987 yılında Hollanda'nın Delft Teknoloji Üniversitesi tarafından, geoteknik mühendisliğinde deformasyon, stabilite ve yeraltı suyu akışı analizleri için geliştirilen bir sonlu elemanlar programıdır [40].

PLAXIS 2D programı, geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımında deformasyon ve stabilite analizleri, zemin-yapı etkileşimi, gerilme-şekil değiştirme, yükleme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzeme

çeşitliliği olan durumlarda kullanılmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir [41]. Basitleştirilmiş veri girişi sayesinde karışık sonlu eleman modellerinin kolayca oluşturulabilmesi, hesaplanabilmesi ve sonuçların ayrıntılı biçimde grafikler halinde ve sayısal olarak sunulabilmesi programa kullanıcı dostu olma özelliğini kazandırmaktadır [42].

PLAXIS 2D programında, 'mesh' denilen sonlu elemanlar ağının oluşturulması sırasında hücreler üçgen elemanlara bölünürler. Bu elemanlar düğüm noktası denilen köşe noktalarından birbirlerine bağlanırlar. Bir üçgen elemandaki düğüm noktası sayısı 6 veya 15 adet olabilir. Aynı zamanda 6-noktalı üçgende 3 adet, 15-noktalı üçgende ise 12 adet Gauss noktası (gerilme noktası) bulunmaktadır. Düğüm noktası ne kadar fazlaysa analiz de o kadar detaylı olacaktır. Sonlu elemanlar analizinde, sistemdeki yerdeğişirmeler düğüm noktalarında, gerilmeler ise gerilme noktalarında hesaplanmaktadır.

PLAXIS 2D programı, zemin stratigrafisinin tanımlandığı 'Soil', yapısal elemanların eklendiği 'Structures', sonlu elemanlar ağının oluşturulduğu 'Mesh', yeraltı suyu seviyesinin belirlendiği 'Flow conditions' ve hesap ayarları ile aşamaların tanımlandığı 'Staged construction' olmak üzere beş modül içermektedir. Bunlardan ilk ikisi Geometri Modülü, geri kalan üçü ise Hesap Modülü olarak anılmaktadır [40].

Analizlerin yapılabilmesi için öncelikle üzerinde çalışılan sistemin programa tanıtılması yani modellenmesi gerekmektedir. Bunun için ilk olarak proje özellikleri başlığı altından sistemin dış hat sınırlarının belirlenmesi gerekir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanması istenen sistemdeki tüm malzemelere ait özelliklerin programa tanıtılması gerekmektedir. Bunun için Malzeme Seti penceresi açılarak, beş ana başlık altında toplanmış olan malzeme tipleri (Zemin ve Arayüzler, Kaplamalar, Jeogridler, Gömülü giriş dizileri ve Ankrajlar), farklı özellikteki her bir eleman için ayrı ayrı tanımlanır.

Zemin malzemesinin tanıtılması sırasında karar verilmesi gereken en önemli veri malzeme modelidir. PLAXIS 2D programında; geoteknik problemlerde en çok tercih edilenleri Mohr-Coulomb, Linear Elastic (Lineer Elastik), Hardening Soil (Pekleşen Zemin), Soft Soil (Yumuşak Zemin) ve Hoek-Brown modelleri olmak üzere birçok değişik malzeme modeli seçilebilir. Her malzeme modeline özel olarak gereken

parametreler ile sistemde kullanılması istenen diğer yapısal elemanlara ilişkin parametrelere ait değerler programa işlenir.

Sınır ölçüleri ve malzeme özellikleri belirlendikten sonra ‘Soil’ modülünde, analizi yapılacak alanın stratigrafisi tanımlanır. Derinlikleri, malzeme cinsi, malzeme sayısı vb. farklı olan birçok sayıda sondaj tanımlanabilir. Zemin geometrisinin tanımlandığı ilk aşama olan bu modülde, sondajları elle tek tek girerek arazi modeli oluşturmak yerine özellikle son yıllarda PLAXIS 2D programcıları tarafından geliştirilerek daha iyi ve daha kullanışlı bir hale getirilen ‘Import Geometry’ komutuyla, bir teknik çizim ve tasarım programında temel hatlarıyla önceden hazırlanan kesit geometrisi PLAXIS 2D içine aktarılabilir. Bu tasarım programı, PLAXIS 2D tarafından tanınan dosya uzantıları ile çizim yapabiliyor olmalıdır.

Zemin geometrisi oluşturulduktan sonra ‘Structures’ modülüne geçilerek hesabı yapılmak istenen tüm yapısal elemanlar tanımlanmalıdır. Burada nokta ve çizgi komutları ile modelin ana hatları oluşturulabilir. Kaplama, jeogrid, ankraj vb. yapısal elemanlar oluşturulabilmesi için de ayrı çizgisel komutlar bulunmaktadır. Tünel dizaynı için özel bir komut bulunmaktadır. Bu komutun içinde, tünel kaplamasını oluşturan her bir parça için yarıçap ve yay açısı değerleri girilerek tünel geometrisi oluşturulup tünel kaplamasında kullanılan malzemeler tanımlanabilir. ‘Structures’ modülünde ayrıca mesnetler, noktasal veya yayılı yükler ve deplasmanlar vb. diğer veriler de analize eklenebilir. Hesap Modülündeki işlemlere geçmeden önce son olarak, oluşturulan her bir elemana ait malzeme parametresinin ilgili ortama atanması gerekir.

Geometri Modülündeki işlemler bittikten sonra Hesap Modüllerinden ilki olan ‘Mesh’ modülüne geçilir. Burada hesabı yapılacak sistemin sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken, elemanların dağılımı istenilen sıklıkta ayarlanabilir. Oluşturulacak olan elemanların yoğunluğu ister tüm model için ister sadece belli bölgeler veya yapılar için ayrı ayrı belirlenebilir.

Sonlu elemanlar ağı istenilen şekilde oluşturulduktan sonra ‘Flow conditions’ modülüne geçilir. Burada sistemin yeraltı suyu seviyesi, hem arazinin mevcut durumundaki hem de ilerleyen inşaat aşamalarına göre değişebilecek olan derinliklerine göre ayrı ayrı belirtilir.

En son adımda ‘Staged construction’ modülüne geçilerek başlangıç aşamasından başlamak üzere, imalat aşamaları adım adım tanımlanır. Tüm sistem olması istendiği şekilde tanımlandıktan sonra ‘Calculate’ düğmesine basılarak PLAXIS 2D programının analize başlaması sağlanır.

Tüm aşamaların analizi başarıyla bittikten sonra hesap çıktıları penceresi açılarak analiz sonuçları görülebilir. Oluşan deformasyon ve gerilme değerlerinden yola çıkarak program tarafından hesaplanan birçok özelliğe ait değerlere, şekillere ve grafiklere buradan ulaşılabilir.





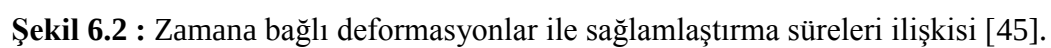
6. TÜNELLERDE JEOTEKNİK ÖLÇÜMLER

Tünel projelerinde çalışmaların denetlenebilmesi ve yapılan imalatın kalitesi ile yeterliliğinin kanıtlanabilmesi için temel kural gerilme ve deformasyonların gözlem ve ölçmelerle izlenmesidir [43]. Kazı sırasında ilerlenen her birim mesafe için kaya biriminin stabil, desteklemelerin yeterli ve çalışma ortamının güvenli olup olmadığı yapılan bu ölçümler ile görülebilmektedir.

Tünelcilikte karşılaşılan en büyük sorunlardan birisi, kazı yapılan arazide oluşan yüzey oturmalarıdır. Önlem alınmadığı takdirde tünelin inşasıyla oluşan yüzey oturmaları üst yapılarda çok ciddi boyutlarda yapısal hasara yol açabilir [1].

Tüm jeolojik birimler yük altında şekil değiştirmeye başlar. Bu deformasyonların hızı ve sonucu birimin özelliklerine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Kimi kayaçlar artan deformasyonlar sonucunda yenilir ve kazı göçükle sonuçlanır, kimi kayaçlarda ise enerji sönmelenir ve deformasyonlar zamanla azalır, nihayetinde durur. Her kayacın kritik gerilme değeri (σ_{kri}) vardır, bu değere ulaşıldığında malzeme sabit gerilme altında sabit hızla akmaya başlar. Kayaçlar zamana bağlı olarak iki farklı şekilde davranabilir. Eğer kayaca etkiyen gerilme kritik gerilmeden küçükse, deplasmanlar zamanla duracaktır. Aksi durumda, kayaca etkiyen gerilmeler kritik gerilme sınırından büyükse göçük oluncaya kadar deformasyon hızı artmaya devam edecektir. Kayaya etkiyen gerilmelerin zamana bağlı olarak artması durumunda önce azalan, sonra sabit hızlı hareket eden ve en sonunda artan bir ivmeli hareketin olduğu durum meydana gelecektir [44]. Şekil 6.1’de bu ilişki gösterilmiştir.

Deplasman artışlarının sürekli olarak izlenmesi için tünel içerisinde optik yöntemler ile konverjans okumaları yapılmalıdır. Okumalar sık aralıklarla yapılmalı ve her okuma sonrasında deplasman-zaman eğrileri oluşturulmalıdır. Yeraltı kaya yapısında güvenli olarak destekleme Şekil 6.1’de ‘I’ ile gösterilen bölge içerisinde yapılmalıdır. Bu sınırın aşılması durumunda deplasmanların kontrolü çok zorlaşacaktır [44]. Şekil 6.2’de zamana bağlı deformasyonlar ile sağlamlaştırma süreleri arasındaki ilişki gösterilmiştir.



6.1 Konverjans Ölçümleri

Konverjans ölçümü ile, tünel içinde oluşan deformasyon miktarları göreceli olarak ölçülerek tünel stabilitesi kontrol edilmiş olur. Konverjans ölçüm cihazı, bir gösterge, ölçüm bandı ile standart bir kalibrasyon ve kalibrasyon rayından meydana gelir. Tünelin iç duvarlarına kazının hemen ardından konverjans bulonları yerleştirilerek ilk okumalar alınır. Tünel kazısının ilerlemesi ile düzenli aralıklarla, iki referans noktası arasına şerit metre gerilerek sabitlenen ölçüm cihazı ile bu noktalar arasındaki mesafe ölçülür. Yeni elde edilen her sonuç ilk ölçümlerle karşılaştırılarak göreceli yer değiştirme miktarı tespit edilir [12].

6.2 İnklinometreler

İnklinometre aleti, arazide açılmış deliklerin eksenlerinden düşey sapmalarını ölçmek için kullanılır. Ölçülen sapmalar, trigonometrik fonksiyonlarla ifade edilebilecek hale dönüştürülebilirler [46]. Bu alet, bir kontrol kutusu ve bir kabloya bağlı olarak esnek bir boru içerisinde deliğe indirilen probedan oluşur. Probeler genellikle içerisine 90°'lik arayla yerleştirilmiş 4 adet yiv bulunduran esnek dairesel borular gerektirirler. Probedaki elektriksel çıkış kontrol kutusuna bağlı bulunmaktadır ve yapılan ölçümleri görsel verilere, grafik formlara dönüştürürler [47].

İnklinometre borusu, hareket beklenen bölge ile kesişen dike yakın bir deliğe kurulur. Açılan delik, hareket beklenmeyen bölge içerisinde (zemin veya kaya ortamı olabilir) hareket beklenen bölgenin 4,5 m ilerisine kadar uzatılmalıdır. İnklinometre boruları, 3,0 m uzunluğunda, plastik olarak kullanılırlar. İnklinometre borusunun kurulduğu andaki pozisyonuna göre, bütün deplasmanların hesaplanmasına kadar, en az iki ayrı set halinde yapılacak olan ölçümlere göre borunun ilk konumunun doğruluğu kanıtlanmalıdır. İlk ölçümler yapıldığında borunun tepesi, zemin yüzeyinde, hareket beklenen bölgenin dışında bir noktaya yönlendirilmiş olmalıdır [47].

6.3 Ekstansometreler

Ekstansometreler, yüzey veya yer altı kazılarında, temel yükü veya şev hareketleri sonucunda oluşabilecek zemin hareketlerini ölçmek için kullanılır. Bir ekstansometre bir sondaj deliğinin farklı derinliklerinde yer alan, bir veya birden çok ankrajla, bir başlıktan meydana gelir. Ekstansometrelerin çoğu başlıkla ankrajlar arasında gerilen

ubuk veya kablolardan oluşur. Mekanik veya elektronik yollarla, zemindeki negatif deplasmanlar, ankraj veya sondaj deliği içindeki rperle başlık arasındaki mesafe değişimi şeklinde ölçülür [12].

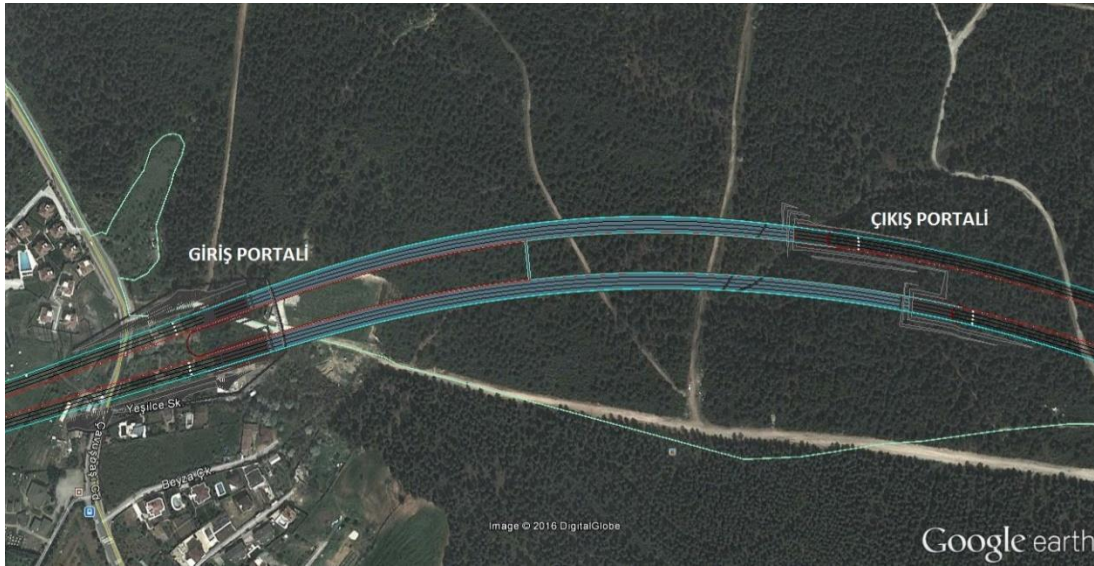
6.4 Gerilme lerler

Gerilme lerler tünel kaplamalarındaki beton deformasyonunun değerlendirilmesi amacı ile kullanılırlar. Gömme tip gerilme ölçerler, cihazın iki ucundaki flanşları arasına gerilmiş olan, yüksek gerilme mukavemetine sahip tel ile paslanmaz koruyucu bir elik tüpten meydana gelmektedir. Gerilme ler beton içine gömüldüğünde, beton içinde etkiyen kuvvetler cihazın flanşları arasında rölatif hareketler oluşturur, bunun sonucunda da telde bir gerilme değişimi oluşur. Betondaki bu gerilmelerin oluşturduğu deformasyonlar, telin doğal titreşim frekansını değerştirir. Oluşan sinyal, esnek bir tel vasıtasıyla lme cihazına gönderilir. Eğer bu gerilme ölçerler, beton dökümü esnasında dikkatli bir şekilde yerleştirilirse, tek bir uzaktan okuma ünitesiyle yapının deformasyon davranışı hakkında komple bilgi elde etmek mümkün olur [12].

6.5 BMP (Bina İzleme Noktası) lmleri

Bina izleme noktaları, binalara yerleştirilen prizmalar aracılığıyla binaların eğilme ve bükülmelerinin belirlenmesini takip eden izleme elemanlarıdır. Bina inceleme prizmaları bina cephelerine, yapısal olarak temel nitelikteki noktalara ve bina yüksekliğine göre farklı seviyelere sıkıca sabitlenir. İki katlı binalar için bir seviyede prizma, beş kata kadar binalarda iki seviyede prizma, beş kattan yüksek binalarda en st kata bir ek prizma seviyesi monte edilerek uygulanır [48].

Kuzey Marmara Otoyolu güzergâhının Asya yakasında 4. kesim olarak belirtilen Km: 0+000.000 - 12+733.595 arasında Çamlık-Alemdağ bağlantı yolu yer almaktadır. İncelenecek olan Çamlık Tüneli Anadolu yakasındaki ikinci tünel olup Çamlık-Alemdağ bağlantı yolu üzerinde yer almaktadır. Orta derinlikte tünel niteliğinde olup düzenli olarak artan-azalan bir topografya içerisinde kalan yapı eşit uzunlukta olmayan 2 tüpten oluşmaktadır. Kuzey tüp Km: 3+715.200 - 4+267.104 aralığında 552 m uzunluğunda; güney tüp ise Km: 3+728.000 - 4+379.106 aralığında 651 m uzunluğundadır (Şekil 7.2). Her bir tüpü dört şeritli olmak üzere iki tüplü olarak inşa edilecek olan tünelin gabarisi 3,75m x 4 şerit + 0,25m x 2 banket = 15,50 m x 5,00 m'dir [49].

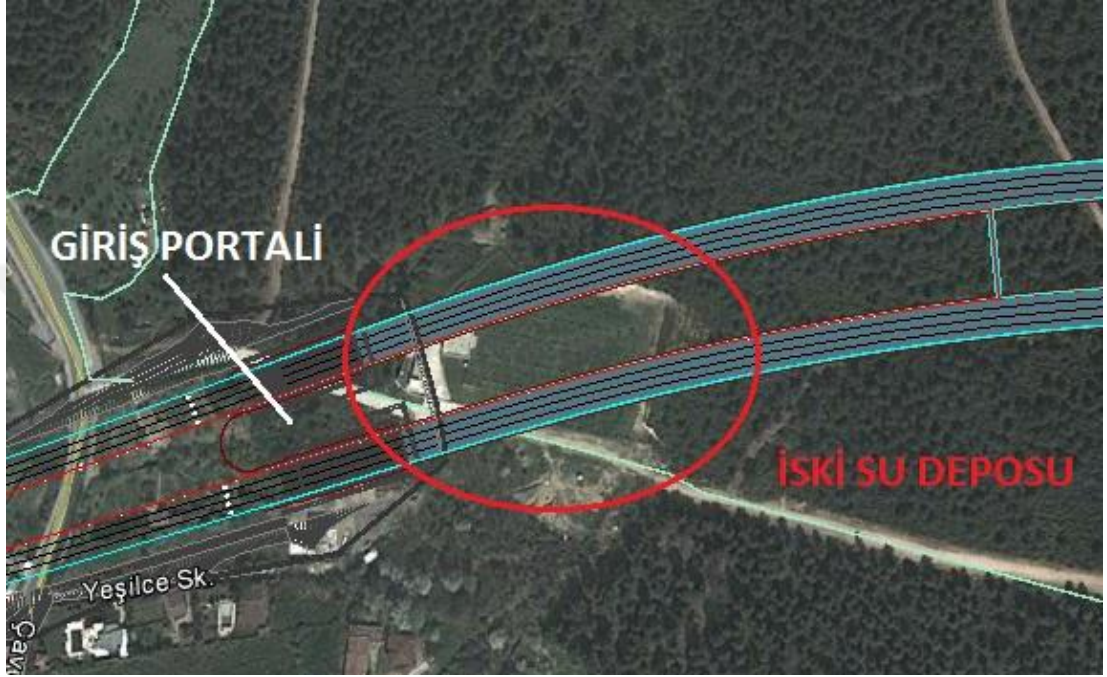


Şekil 7.2 : Çamlık Tüneli genel yerleşim planı.

232 m²'lik kazı alanı ile Türkiye'de bir ilk, dünyada da birkaç tünelden biri olma özelliğine sahip olan Çamlık Tünelinin kazı genişliği 21,5 metre ve kazı yüksekliği ise 13 metredir. Jeolojik ve jeoteknik özellikleri bakımından zayıf dayanımlı kaya biriminde 6 aşamalı kazı sistemi ile Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) prensiplerine göre açılmakta olan Çamlık Tüneli, imalat sırasında ve sonrasında oluşacak deformasyonların kontrolünün sağlanabilmesi amacıyla taban kemerli (invertli) olarak tasarlanmıştır.

Çamlık Tüneli giriş portalı yakınında, Şekil 7.3'te görülebilen, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresine (İSKİ) ait 15.000 ton kapasiteli bir su deposu bulunmaktadır. Zayıf dayanımlı kumtaşı-silttaşı birimi içerisinde yapılan tünel imalatı bu su deposunun altından geçerek ilerlemektedir. Bir bindirme zonunun da bulunduğu

bölgenin zorlu jeolojik şartları yanında, kazı öncesinde su deposunda yapılan testlerde günlük 220 tonluk su kaçağı tespit edilmiştir. Kazıya başlanmadan önce su deposunun taşınması mümkün olmamıştır. Bu sebeple yüzeydeki su deposundan yaklaşık 22 metre derinde devam eden tünel imalatının su deposuna ciddi zararlar vermesini önleyerek mevcut su kaçağı miktarının artırılmamasına çalışılmıştır. Aynı zamanda yüzeyde oluşabilecek tasmanların tünele de zarar verebileceği göz önüne alınmıştır.



Şekil 7.3 : İSKİ su deposunun Çamlık Tüneli üzerindeki konumu.

Bu çalışmada, inceleme bölgesinin genel jeolojisi ve hidrojeolojisi hakkında bilgiler verilmiştir. Tünelin bulunduğu alanda arazi çalışmaları yapılarak mühendislik jeolojisi ve jeomekanik değerlendirmeler yapılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde tünelin NATM kaya destek sınıfı belirlenerek kullanılacak olan kazı ve destek sistemlerine karar verilmiştir. Son olarak Çamlık Tüneli giriş portalı kesiminde yer alan su deposu ve tünel için sayısal analizler yapılarak elde edilen yüzey oturma değerleri arazide yapılan jeoteknik ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

7.2 Bölgenin Genel Jeolojisi

7.2.1 Giriş

İstanbul ili ve yakın dolayını kapsayan inceleme alanı, Erken Paleozoyikten günümüze değin süren geniş bir zaman aralığında oluşmuş çok sayıda kaya birimlerini ve oldukça

karmaşık yapısal hareketlerin izlerini taşıması ile güncel tektonik hareketlerin etkin olduğu bir bölgede yer almaktadır [50].

Batıda Karaburun-Büyük Çekmece hattı, doğuda Şile-Hereke hattı ile sınırlanan alan içinde Paleozoyik yaşlı çökel ve magmatik kayalar, Mesozoyik yaşlı çökel ve volkanik kayalar ve Senozoyik yaşlı çökel kayalar yer alır. Paleozoyik çökellerin dağılımına bakıldığında Avrupa yakasında ve Anadolu yakasının batı kesiminde Devoniyen ve Karbonifer yaşlı kayaların, Anadolu yakasının önemli bir kesiminde ise Ordovisiyen ve Silüriyen yaşlı kayaların hakim olduğu görülür [51].

İstanbul il sınırları içinde metamorfik olan ve metamorfizma göstermeyen iki büyük kaya stratigrafi birimi topluluğu yer alır. Niteliği henüz açıklığa kavuşturulamamış olan önemli bir tektonik hatla birbirinden ayrılan bu iki topluluktan metamorfizma gösteren istif, Istranca dağları ve dolayında geniş alan kapladığı için “İstranca Birliği”, metamorfizma göstermeyen istif ise “İstanbul Birliği” adlarıyla adlandırılmıştır [50].

İstanbul bölgesinde altta yer alan birimler Paleozoik yaşlıdır. Bu birimler Silüriyenden Alt Karbonifere kadar uyumlu bir istif oluştururlar. Genellikle kırıntılı ve karbonatça zengin bu birimler, tektonizmayla karışık bir yapı kazanmışlardır. Paleozoyik yaşlı birimler Dolayoba, Kartal, Tuzla, Baltalıman ve Trakya Formasyonu’dur.

İstanbul bölgesi, Erken Paleozoyik (Ordovisiyen)-Kuvaterner aralığını kapsayan geniş bir jeolojik zaman diliminin önemli bölümünü temsil eden kaya stratigrafi birimlerini içermektedir ve bu süreçte etkin olmuş önemli tektonik olayların derin izlerini taşıyan bir morfoloji üzerinde yer alır.

7.2.2 Stratigrafi

İstanbul Birliği, Boğazın her iki yakasında ve Kocaeli yarımadasında geniş alanlar kaplayan Paleozoyik ve Mesozoyik yaşta metamorfizma göstermeyen kaya birimlerini içerir. Akarsu ve lagün ortamlarını temsil eden Alt Ordovisiyen yaşta karasal çökeller (Kocatöngel Formasyonu ve Kurtköy Formasyonu) metropolitan alanı ve yakın dolayında, İstanbul Birliğinin yüzeye çıkan en yaşlı kaya birimlerini oluştururlar [50].

İstanbul Paleozoyiğine ait genelleştirilmiş dikme kesit Şekil 7.4’te görülmektedir. Erken Ordovisiyen’de kara halinde bulunan bölge, Ordovisiyen yaşlı Aydos Formasyonunun kuvarsitleriyle temsil edilen bir transgresyonla başlayan, Silüriyen ve Devoniyen’de giderek derinleşen, tektonik bakımdan duraylı bir denizle kaplanır [50].

Y A Ş		L İ T O L O J İ	A Ç I K L A M A L A R	F O S İ L İ Ç E R İ Ğ İ
S E N O Z O Y İ K	Eosen sonrası		Eosen ve sonrası çökeller	
	Paleosen A. Eosen			
M E S O Z O Y İ K	Üst Kretase		Kretase çökelleri ve volkanikleri	
	Triyas		Triyas çökelleri	
P A L E O Z O Y İ K	Karbonifer		Trakya Fm. Kumtaşı-şeyl ardalanması üst kesimler kçt, çörtlü kçt seviyeli	Kireçtaşlarında bazı foraminiferler
			Baltalimanı Fm. Radyolaryalı çört	Radyolarya
	Devoniyen		Tuzla Fm. Yumrulu kireçtaşı	Konodont Ostrakod
			Kartal Fm. Fosilli şeyl	Brakyapod (Spirifer, Strophodonta, Strophomena, Atrypa, Orthis, Leptaena) Mercan (Pleurodictium, Halysites, Zaphrentis) Trilobit Notiloidler (Ortoseras, Cyrtoceras, Gyroceras)
	Silüriyen	magmatik sokulum kayaları	Dolayoba Fm. Fosilli kireçtaşı	Brakyapod, Mercan (Halysites, Favosites, Syringopora) Bryozoa (Fenestella) Krinoid sapları
	Ordovisiyen	Permiyen Graniti	Gözdağ Fm. Laminalı şeyl, üst kesimlerde kuvarsit merccekleri	Brakyapod, Conularia, Graptolit
			Aydos Fm. Kuvars arenitler	
Prekambriyen			Kurtköy Fm. Kumtaşı, konglomera, şeyl	
			Metamorfik kayalar	

H.S. Akyüz

Şekil 7.4 : İstanbul Paleozoyiğine ait genelleştirilmiş dikme kesit [51].

Bu süreçte yaşlıdan gence doğru, silttaşı-kumtaşı ile temsil edilen Yayalar Formasyonu (Alt Ordovisiyen), şelf tipi karbonat çökelimini yansıtan Pelitli Formasyonu (Alt Ordovisiyen-Siluruyen), düşük enerjili açık şelf ortamını temsil eden, bol makrofosilli, seyrek kireçtaşı arakatkılı mikalı şeylleri kapsayan Kartal

Formasyonu (Alt-Orta Devoniyen) ve açık şelf-yamaç ortamını temsil eden yumrulu kireçtaşlarının yoğun olduğu Denizli Köyü Formasyonu (Üst Devoniyen-Alt Karbonifer) çökelir [50].

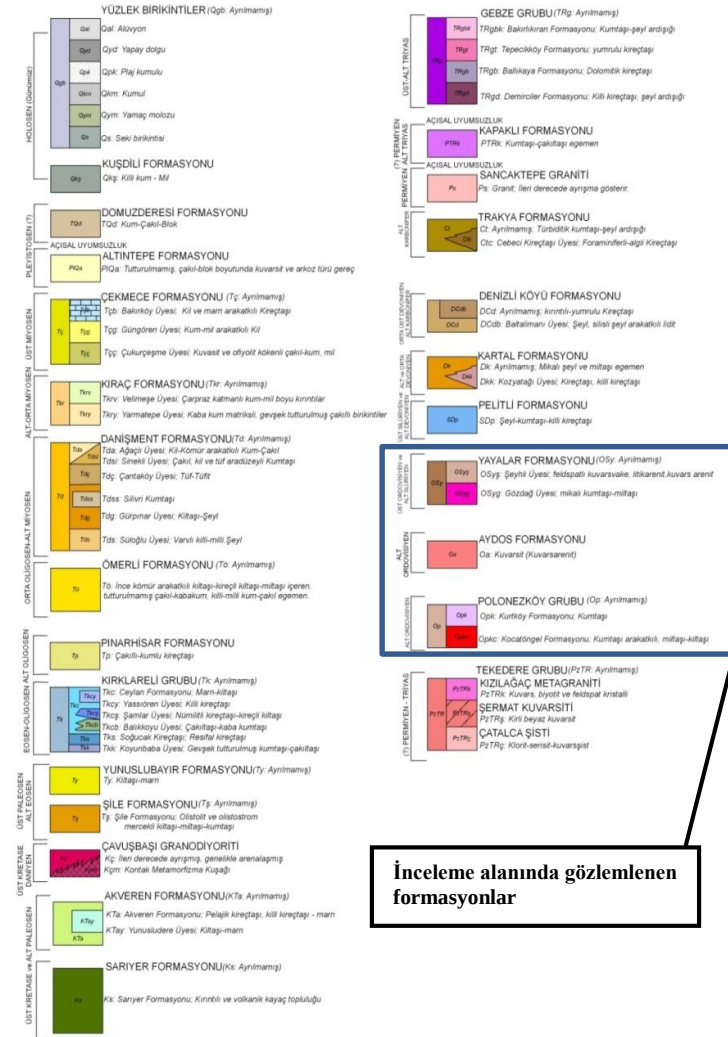
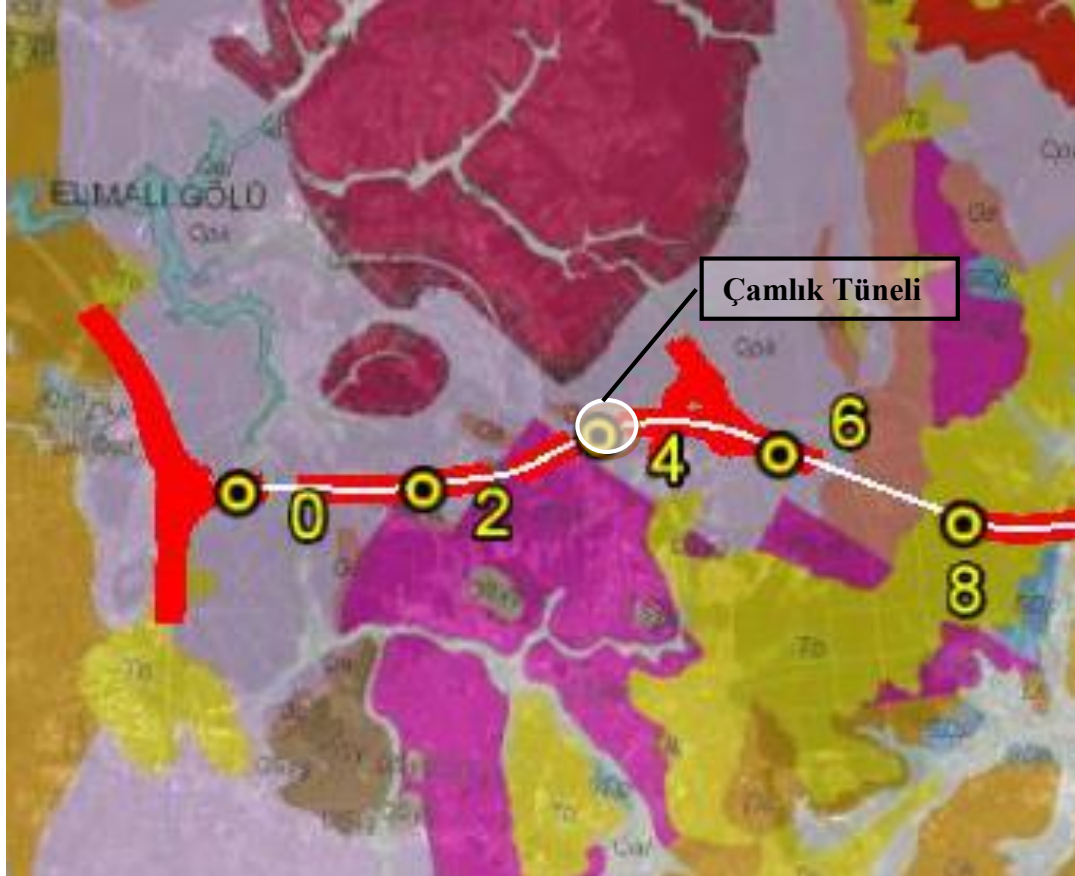
Denizli Köyü Formasyonu içinde ara düzeyler halinde yer alan ve en üst kesiminde kılavuz bir düzey olarak izlenebilen Alt Karbonifer yaşta silisli (lilit) çökeller (Baltalimanı Üyesi), söz konusu denizel havzanın yakınlarında, yoğun silis getirimine neden olan bir volkanik etkinliği düşündürür. Erken Karboniferde filiş türü kumtaşı-şeyl ardışığı (Trakya Formasyonu) ile temsil edilen türbiditik akıntıların geliştiği duraysız ortam koşulları egemen olur. Geç Kretase, andezitik volkanit ve filiş türü kırıntılılardan oluşan volkanotortul istifleri kapsayan Sarıyer Formasyonu ve Yemişliçay Formasyonu ile temsil edilmektedir. Karbonifer-Permiyen aralığında etkin olan tektonik hareketlere bağlı olarak, Sancaktepe Graniti (Permiyen) ile temsil edilen magmatik sokulumlar gelişir ve bölge su dışına çıkarak yeniden kara halini alır, buna bağlı olarak Permiyen - Erken Triyas yaşlı karasal istifler (Kapaklı Formasyonu) çökelir [50].

Orta Eosende (Lutesiyen) bölge yeni bir transgresyona uğramış ve Orta Eosen-Erken Oligosen aralığında Çatalca ve Şile bölgeleri, kıyılarında kumsal ve resiflerin (Hatipler Formasyonu, Koyunbaba Formasyonu, Yunuslubayır Formasyonu, Soğucak Kireçtaşı), iç kısımlarına killi çamurların (Ceylan Formasyonu) çökeldiği bir denizle kaplanır. Orta-Geç Triyas aralığında bölge, sırasıyla gelgit arası çökelleri (Demirciler Formasyonu), self karbonatları (Ballıkaya Formasyonu) ve yamaç çökelleri (Tepeköy Formasyonu ve Bakırlıkıran Formasyonu) ile temsil edilen ve giderek derinleşen transgressif bir denizle yeniden kaplanır. Bölgede Jurasik-Erken Kretase aralığında oluşmuş kaya birimine rastlanmamıştır. Üst Kretase yaşlı Çavuşbaşı Granodiyoriti'nin Tetis Okyanusu'nun kapanması sürecinde etkin olmuş adayayı volkanizması ile ilişkili derinlik kayası olduğu düşünülmektedir. Eosen'de Asya'nın büyük bölümünü etkisi altına alan kompresif hareketler, İstanbul yöresini de kapsayan Marmara havzasında yoğun kıvrımlanma ve faylanmalara neden olur [50].

Paleozoyik ve Mezozoyik yaşta kaya birimlerinin Üst Kretase-Erken Eosen yaşta istiflere bindirmesine neden olan ve bölgeyi kuzeyden kabaca D-B doğrultusunda kateden Sarıyer Şile Fayı'nın bu hareketlere bağlı olarak geliştiği düşünülmektedir. Şile bölgesinde görülen ve Alt-Orta Eosen yaşlı Şile Formasyonunun şeylleri içinde görülen olistostromların (Ağlayankaya Üyesi) bu hareketlerin doğurduğu duraysız

ortam koşullarına bağlı olarak geliştiği anlaşılmaktadır. Orta Eosende (Lütesiyen) bölge yeni bir transgresyona uğramış ve Orta Eosen-Erken Oligosen aralığında Çatalca ve Şile bölgeleri, kıyılarında kumsal ve resiflerin (Hatipler Formasyonu, Koyunbaba Formasyonu, Yunuslubayır Formasyonu, Soğucak Kireçtaşı, iç kısımlarına killi çamurların (Ceylan Formasyonu) çökeldiği bir denizle kaplanır. Orta-Geç Oligosende Trakya havzasının bütününe etkileyen tektonik hareketlere bağlı olarak, bölge yeniden yükselerek günümüze değin süren bir karalaşma sürecine girer ve özellikle Geç Oligosen-Geç Miyosen aralığını temsil eden akarsu birikintileri (Kıraç Formasyonu, Çukurçeşme Formasyonu) ile lagün ve göl çökelleri (Danışmen Formasyonu ve Çekmece Formasyonu) gelişir. Kabaca K-G doğrultulu sıkışmaya neden olan bu hareketlere bağlı olarak KB-GD ve KD-GB eksen gidişli makaslama fay ve eklem sistemleri yoğun olarak gelişmiştir. Bu makaslama kırıkları boyunca gelişen zayıflık zonları, İstanbul ve Çanakkale Boğazları ile bölgenin büyük akarsu vadilerinin ve Haliç'in morfolojik gelişimini denetlemiş ve KB-GD ve KD-GB doğrultularıyla uyumlu zikzaklı geometri kazanmalarına neden olmuştur. Oluşturdukları zayıflık zonlarıyla morfolojiye güzel yansımış olan bu makaslama kırıklarının, günümüzde aktif olabileceklerini gösteren öteleme, basınç sırtı herhangi bir saha verisi saptanamamış; aksine, en azından Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı karasal birikintiler tarafından örtülü bulundukları izlenmiştir. En altta yer alan Silüriyen yaşlı Dolayoba Formasyonu, sıkı tutturulmuş kireçtaşlarından, kuvars kırıntılı kumtaşlarından ve yumrulu-bantlı kireçtaşlarından oluşur. Kireçtaşları genellikle resifal özelliktedir. Dolayoba Formasyonu üzerine, Devoniyen yaşlı Kartal ve Tuzla formasyonları gelir. Kartal Formasyonu; iri taneli kireçtaşı merceklerinden, yer yer karbonatlı şeyllerden, grovaklardan ve bol fosilli killi kireçtaşlarından meydana gelmiştir. Tuzla Formasyonu ise; yumrulu kireçtaşı, kalkerli şeyl ve tabakalı çörtlerden oluşmuştur. Alt Karbonifer yaşlı Baltalimanı Formasyonu, Tuzla Formasyonu üzerine gelir. Çok sınırlı yüzlekler halindedir. Bu birim siyah renkli lamine çörtlerden ibarettir. Trakya Formasyonu ise; başlıca kahverenkli kumtaşı (grovak), şeyl ve kireçtaşı merceklerinden oluşur [50].

Tünel güzergahının geçtiği birimler ve formasyonlar Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nün (MTA) 2009 yılında hazırladığı 1/100.000 ölçekli yüzey jeolojisi haritasından (Şekil 7.5) alınmış olup formasyonlara ait detaylı açıklama sadece tünelde kesilen birimler ile bu birimlerin stratigrafik olarak yaşça altında ve üstünde yer alan birimler için verilmiştir.



Şekil 7.5 : İstanbul Asya Yakası yüzey jeolojisi haritası [52].

7.2.3 İnceleme alanının jeolojisi

İnceleme alanı çevresinde birbirinden farklı 3 formasyon yer almaktadır. Jeolojik olarak tabanda Alt-Orta Ordovisiyen yaşlı Kurtköy Formasyonu, üzerinde yine aynı yaşlı Aydos Formasyonu ve Üst Ordovisiyen-Alt Silüriyen yaşlı Yayalar Formasyonunun Gözdağ Üyesi bulunmaktadır.

7.2.3.1 Kurtköy Formasyonu (Opk)

Paleozoyik çökeller en altta kalın bir kırıntılı serisi ile başlar. Kurtköy Formasyonu olarak bilinen bu seri, şarabi kırmızı-mor kumtaşı, alacalı-gri çakıltası ve gri-açık mavipembe şeylden oluşmuştur [51].

İstanbul ili sınırları içinde Kurtköy Formasyonu Rumeli yakasında mostra vermez. Anadolu yakasında ise Çamlıca napı hariç Beykoz doğusundan Bostancı'ya yaklaşık K-G gidişli bir hattın doğusunda mostra verir. Doğuda Şile-Hereke hattı ile sınırlanır.

Kurtköy Formasyonu, adını aldığı Kurtköy'de, Beykoz doğusunda, Ümraniye batısında, Maltepe civarında E-5 karayolu üzerindeki yol yarmalarında, Tuzla kuzeyinde, Ömerli doğusunda açık mostralar sunar.

Kurtköy Formasyonu birbirleriyle girik ilişkili çakıltası-kumtaşı-şeyl ar dalanmasından oluşur. Bu litolojilerin kalınlıkları ve formasyon içindeki oranları bölgeden bölgeye değişkenlik gösterir. Bunun yanı sıra Paleozoyik istifin en az iki şiddetli deformasyon dönemi geçirmiş olması Kurtköy Formasyonu içindeki farklı litolojileri haritalamayı imkansız kılar.

Kurtköy Formasyonu içindeki çakıltası düzeyleri, kil-silt matriks içindeki kuvars, çört, sedimenter/metamorfik kaya parçalarından yapılmıştır. Taneler çoğunlukla 2-25 mm arasında, yer yer 50 mm boyunda, orta-iyi boylanmış ve iyi-yarı yuvarlanmıştır.

Formasyon içinde yaygın görülen kumtaşları, iyi boylanmış, yarı yuvarlanmış-yarı köşeli tanelerden oluşur. Taneler kuvars, feldispat, sedimenter/metamorfik kaya parçaları ve formasyon içi şeyllerden oluşur. Tabaka kalınlıkları 5-25 cm arasında değişir. Derecelenme, laminasyon, çapraz tabakalanma ve devresellik yaygınca görülebilen sedimanter yapılardır.

Şeyl/silttaşı gibi ince taneli seviyeler gri, mavimsi gri, açık/koyu mor renklidir. Bu düzeyler yer yer paralel ve çapraz laminalı ve belirgin klivajlıdır. Tabaka kalınlıkları 3-10 cm arasındadır [51].

Formasyonun kalınlığı 1000 metreden fazladır. Kurtköy Formasyonu rengi, bileşenleri ve petrografik ve sedimentolojik özellikleriyle alüvyal düzlük, alüvyal yelpaze, kanal, nokta seddi, taşkın ovası ve kıyı ovası çökellerini yansıtır. Birim içinde herhangi bir paleontolojik veri bildirilmemiştir. Birimin üzerine uyumlu gelen formasyonlara dayanarak Alt Ordovisiyen yaşı kabul edilmektedir.

7.2.3.2 Aydos Formasyonu (Oa)

Kurtköy Formasyonunun üzerine uyumlu olarak kuvars konglomeralarından ve kuvars arenitlerden oluşan Aydos Formasyonu gelir. Aydos Formasyonu da Kurtköy Formasyonu gibi İstanbul'un Rumeli yakasında mostra vermez. Birim yüksek dayanımlılığı nedeniyle İstanbul'un yüksek tepelerini oluşturur. Aydos Formasyonu, adını aldığı Pendik kuzeyindeki Aydos dağında açık yüzlekler sunar. Bunun dışında Çamlıca tepeleri, Beykoz doğusundaki Karlıdağ, Yakacık, Kayışdağı, Alemdağ, Başbüyük, Büyükada'daki İsa Tepe, Ömerli güneyi, Gebze kuzeyindeki Gaziler tepe Aydos Formasyonunun güzel mostra verdiği alanlardır.

Aydos Formasyonu, Kurtköy Formasyonu üzerine çoğunlukla kuvars konglomerası ile başlar. Alacalı renkli bu konglomeralar yer yer kuvars arenit araseviyeleri içerir ve üste doğru hakim olarak kuvars arenitlere geçer. Kuvars konglomeraları alacalı-mor renkte, iyi yuvarlanmış ve iyi boylanmış kuvars ve çört çakıllarından oluşur. Ortalama çakıl boyu 10-20 mm, maksimum çakıl boyu 50 mm'dir. Kuvars arenitler beyaz-krem, bazen pembe renklidir. Yüksek diyajenez çimentolanma nedeniyle tabakalanma çoğu zaman zor belirlenir. Tabakalanmanın görülebildiği yerlerde tabaka kalınlıkları 10-30 cm arasında değişir. Kumtaşlarında matriks hemen hemen yoktur ve birim tamamen iyi yuvarlanmış, çok iyi boylanmış kuvars ve seyrek çört tanelerinden oluşmuştur. Taneler silis çimento ile tutturulmuştur. Paralel laminasyon, çapraz tabakalanma, derecelenme sıkça karşılaşılan sedimanter yapılardır. Aydos Formasyonunun kalınlığı 100-250 m arasında değişir. Aydos Formasyonu tipik bir plaj/kıyı/gelgit düzlüğü çökelidir. Birim içinde fosil bulunamamıştır, ancak üzerine uyumlu olarak gelen Gözdağ formasyonu içindeki fosillere dayanarak birimin yaşı Orta Ordovisiyen olarak kabul edilir [51].

7.2.3.3 Yayalar Formasyonu (Osy)

Başlıca mikalı, feldispatlı kumtaşlarından oluşan formasyonun tip yeri olarak Değirmen deresinin Yayalar mahallesinin KD'sundan geçen Kınalı (ya da Kayalı)

Dere olarak değinilen vadinin yukarı kesimi önerilmiştir. Pendik kuzeyinde Gözdağ Tepesi ve güney yamacında, İstanbul-Şile karayolunun Çekmeköy batısından geçen kesiminde, Gümüşsuyu (Beykoz) - Zerzevatçı Mahallesi arasında ve İstanbul Boğazı'nın batı yakasında Büyükdere yöresinde yer alan Kocataş Tepesi'nin güney yamacıda, Soğanlık kuzeyinden geçen Tavşan Deresi dolayında Şile güneyinde Darlık Barajı'nın batı kıyılarında geniş alanlar kaplar. Yayalar Formasyonu başlıca ince-kaba kum boyu taneli kırıntılı kayalardan oluşur. Tane ve çimento türü kapsamına göre formasyon Gözdağ Üyesi, Cumaköy Üyesi (Umurdere Üyesi) ve Şeyhli Üyesi olmak üzere 3 üyeye ayrılabilir [50].

Gözdağ Üyesi (Osyg):

Yayalar Formasyonunun önemli bölümünü oluşturur. Yeşil, grimsi mavi, ayrıışmış açık kahverengi, boz, orta katmanlı, yer yer ince katmanlı ve koşut laminalıdır. Kimi yüzeylemelerinde katmanlanma belirsiz, som görünümlüdür. Başlıca ince-orta kum boyu, yarı yuvarlanmış, orta-iyi boylanmış kuvars, çakmaktaşı, feldispat, az oranda mafik kırıntılar ve bolca beyaz mika pulu kapsar. Genellikle killi hamur ve az oranda silis çimentoludur. Hamur oranı çoğunlukla % 10'u geçer. Kuvarsvake, feldispatik vake türü kumtaşı egemen kaya türüdür; silis çimentolu olanlar subfeldispatik arenit türündendir. Taze iken sert ve dayanımlı, ayrıışmış yumuşaktır. Özellikle tektonik hatlar boyunca gelişen ayrıışma zonlarında, örneğin Büyük ve Küçük Çamlıca tepelerini çevreleyen bindirme zonları boyunca, mika ve feldispat kapsamı ileri derecede ayrıışma gösterir ve kayaç ince kuvars gereçli sarımsı, boz, kızılımsı açık mavimsi külrengi kile dönüşür [50].

Umurdere Üyesi (Osyu):

Gözdağ Üyesinin üstünde yer alan kızılımsı bordo ve yeşilimsi renkli, şeyl düzeyi Umurdere Üyesi olarak adlandırılmıştır. Yumrukaya Deresi Vadisinde, Mollafenari Köyü ile Cumaköy arasında temiz yüzeylemeleri bulunur. Özellikle bordo renkli şeyller, içinde saçılmış halde seyrek kireçtaşı yumruları ve ince demirli (şamozit) oolitli ara düzeyler yer alır. İstifin üst düzeyleri bol brakyopod kapsar. Yerden yere değişen birim kalınlığı ortalama 30 m dolayındadır. Şeyhli Üyesi ile yanal ve düşey geçişlidir. Bu iki üyeden biri diğerinin aleyhine kalınlaşabildiği gibi lehine incelip yok olabilmektedir [50].

Şeyhli Üyesi (Osş):

Yayalar Formasyonunun üst düzeyinde yer yer büyük mercekler halinde görülen feldispatlı, kuvars kumtaşlarından (feldispatlı kuvarsıvake, litikarenit, kuvarsarenit) oluşur. Pembemsi bej, kirli beyaz, orta-kalın katmanlı, katman yüzeyleri kimi düzeylerde yeşilimsi kloritli ince kil sıvalı, yer yer kuvars çakıllı, silis çimentolu başlıca orta-kaba kum boyu kuvars ve daha az oranda feldispat ve mika kapsar. Feldispat oranının % 10'un üzerinde olduğu kesimlerde ayrıışmış feldispatların kayaca kazandırdığı beyazımsı noktalı görünümü ve kaba kum boyu kuvars taneli oluşuyla Aydos'un kuvarsitlerinden çıplak gözle de ayırtlanabilen birim, stratigrafi konumuyla da ayrıcalık gösterir; Aydos Kuvarsiti Yayalar Formasyonunun tabanında bulunmasına karşılık, Şeyhli Üyesi, formasyonun üst kesimlerinde yer alır.

Formasyonun genellikle en üst düzeyinde yer alan, mikalı kumtaşlarıyla yanal ve düşey giriklik gösteren ve yanal sürekliliği olmayan mercekler halinde görülen birim için, formasyon adının kullanılması sakıncalı olacağından, adlamada öncelik kuralı da gözetilerek, bu araştırmada "Şeyhli Üyesi" adı benimsenmiştir.

Şeyhli Üyesi'nin kalınlığı yanal yönde çabuk değişim gösterir, birim çoğu kez kamalanarak mikalı kumtaşı ve şeyllere geçer. Kalın yüzeylemelerden birinin bulunduğu, alt ve üst dokanağının belirgin olduğu Soğanlı kuzeyindeki Tavşan Deresi'nde, 200 m dolayında kalınlık hesaplanmıştır.

Şeyhli Üyesi ve Umurdere Üyesi formasyonun üst düzeyinde yer alır ve ayrı ayrı yüzeylemelerde Pelitli Kireçtaşı tarafından üstlenirler. Oldukça sık deniz koşullarını yansıtan bu iki üyenin yukarıda da belirtildiği gibi eşzamanlı olarak birbirleri aleyhine geliştiği düşünülmektedir.

Yayalar Formasyonu Aydos Kuvarsitini uyumlu olarak üstler. Pelitli Kireçtaşının Dolayoba Kireçtaşı Üyesi tarafından uyumlu olarak üstlenir. Formasyonun yaklaşık 500 m kalınlıkta olduğu düşünülmektedir.

Formasyonun değişik yüzeylemelerinde değişik araştırmacılar tarafından saptanan makrofosil belgelenmelerine göre, Yayalar Formasyonunun yaşı Ordovisiyen-Silüriyen geçişine yakın bir süreci temsil etmektedir [50].

7.2.4 Yapısal jeoloji ve tektonizma

İstanbul'da jeolojik olarak yapı oldukça karmaşıktır. Bunun başlıca sebebi stratigrafik istifte birbirine çok benzeyen birimlerin tekrarlanması, kılavuz düzeylerinin seyrek ve kolay tanınır olmaması, üstlenen orojenik hareketler, interferans kıvrımları, çok sayıda faylar ile andezit veya diyabaz dayklarının sokulması olarak sıralanabilir. Ayrıca yerleşim bölgelerindeki örtü veya dolgular da yapısal unsurların izlenmesini güçleştirir.

Farklı doğrultulardaki kıvrımlar veya interferans kıvrımlarıyla yatay ve düşey kesitte oluşan geometri oldukça karmaşıktır. Konkordan bir istif oluşturan İstanbul Paleozoik Çökelleri Hersiniyen orojenez ile birlikte kıvrımlanmıştır. Hersiniyen kıvrımları esas itibarıyla sıkışık, kapalı, asimetrik ve konsantrik tipte görülürler.

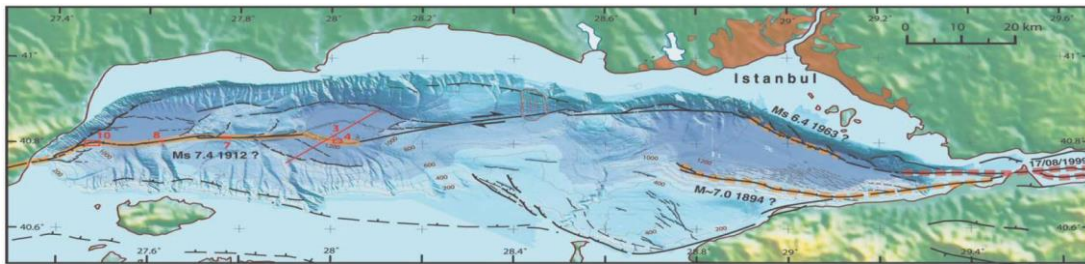
Yerel olarak diapirik olanları da vardır. İstanbul Paleozoik istifleri içerisinde relatif olarak daha dayanımlı birimlerin bulunduğu yerlerdeki kıvrımlar ise daha geniş ve konsantrik olarak görülmektedir. Tersine daha az dayanımlı düzeylerinde ise sıkışık kıvrımlar görülmektedir.

Bölge üzerinde etkili olan Alpin orojenezinde tüm yaşlı birimler Üst Kretase-Paleosen ve Alt Eosen yaşlı birimler üzerine itilmişlerdir. Bu hareketlerle Paleozoyik yaşlı birimler yeniden, Mesozoyik-Alt Tersiyer yaşlı birimler ise ilk kez kıvrımlanmışlardır. Alt Eosen sonrasında günümüze kadar gelişen sedimentler alttaki temelin kırılmalarına bağlı olarak açık kıvrımlar oluşturmuşlardır.

Paleozoik birimlerini aşıl diskordansla örten Eosen, Oligosen ve Miyosen çökelleri, çoğu yerde az eğik veya yataya yakındır. Soğucak, Ceylan, Karaburun, Gürpınar, Çukurçeşme, Güngören ve Bakırköy Formasyonları olarak ayırtlanan bu istiflerde genellikle epirojenik hareketler etkili olmuştur. Eosen, Oligosen ve Miyosen çökelleri önemli ölçüde tabandaki Trakya Formasyonunun paleojeolojik konumundan etkilenmiştir. Paleo yükselimden dolayı havza yönünde, 10-15 derecelik ilksel eğimler ve çökel istifinde kalınlaşma görülmektedir. Pliyosenden itibaren bölgede izlenen sıyrılma tektoniğine bağlı olarak gelişen Kuzey Asya Fay Zonunun neden olduğu deformasyonlarla İstanbul Yarımadası güneyindeki Neojen istifinde açık kıvrımlanmalar ve faylanmalar meydana gelmiştir [50].

7.2.5 Depremsellik

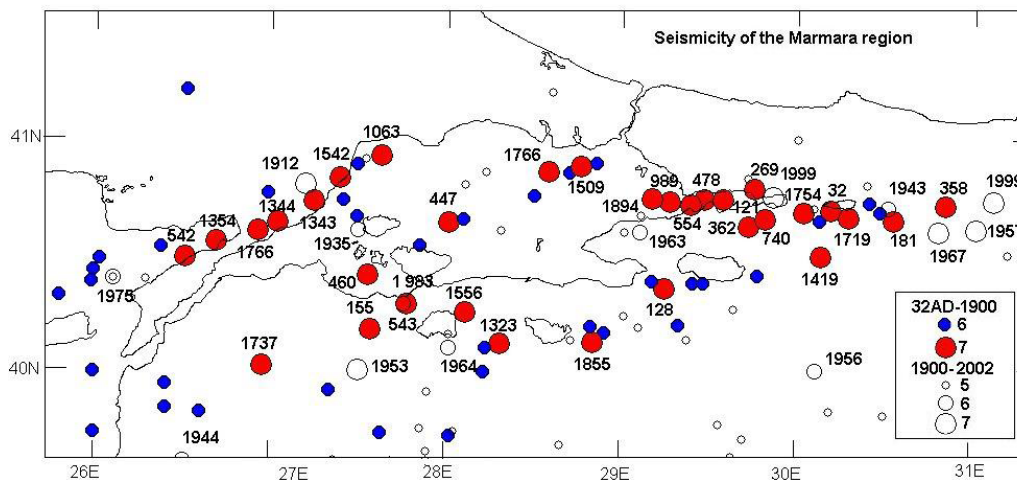
İstanbul ilinde yıkıcı etki yaratacak büyüklükte depremlerin Marmara Denizi'nde bulunan aktif fay sisteminden kaynaklanması beklenmektedir [53]. Bu aktif fay sistemi ile ilgili olarak iki önemli model geliştirilmiştir. Le Pichon vd. (2000, 2003) tarafından yapılan inceleme sonucunda Kuzey Asya Fayı Marmara Denizi'nin kuzeyine doğru boydan boya uzanan sağ yanal atımlı bir fay olarak tanımlanır [54]. Diğer taraftan da Armijo vd. (2002, 2005)'e göre çek-ayır sistemini de içeren Ganos ve İzmit yanal atımlı, Çınarcık çukurundaki normal faylanma ile karmaşık bir yapı gözükmektedir (Şekil 7.6) [55].



Şekil 7.6 : Armijo vd., 2005 modeline göre Marmara Denizi'nin tektonik yapısı [55].

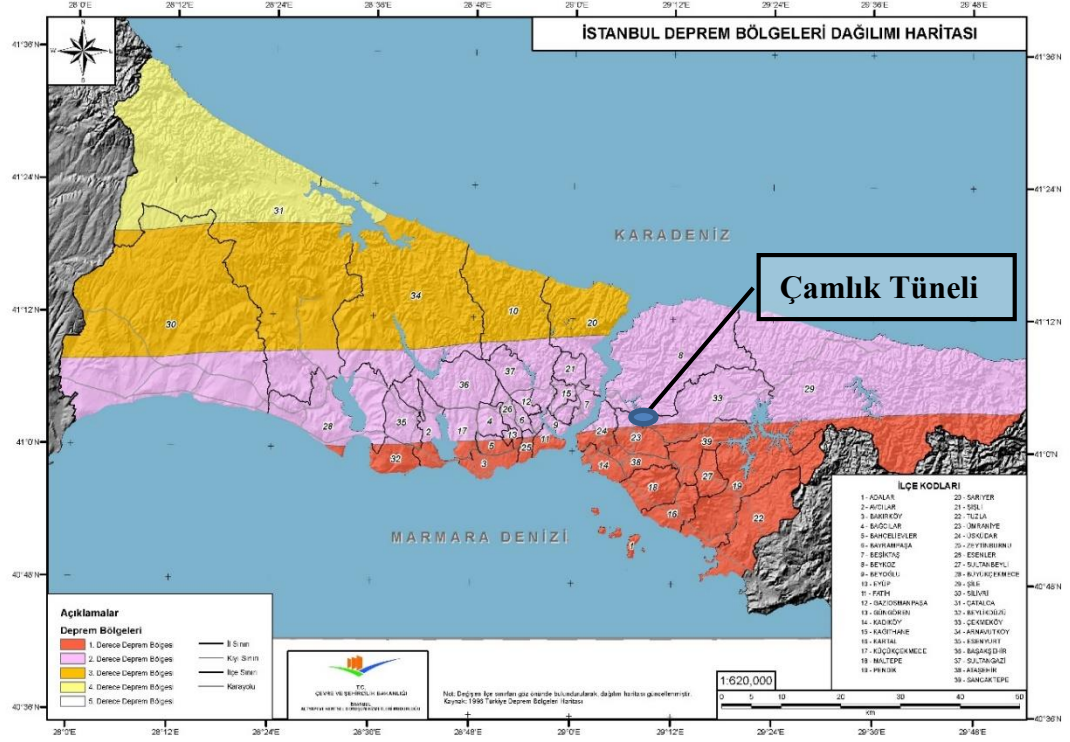
İstanbul tarihi boyunca birçok yıkıcı depreme maruz kalmıştır [56]. İstanbul’u 4. ve 19. yüzyıllar arasında 32 adet deprem etkilemiştir. Bu durum ortalama her 50 yılda bir orta şiddetli depreme tekabül etmektedir. Yaklaşık her 300 yılda bir ise İstanbul çok şiddetli depremlere maruz kalmaktadır.

Marmara Bölgesi’ni etkilemiş olan önemli tarihsel depremlerin makro-sismik verilere dayalı olarak bulunan tahmini kaynakları Şekil 7.7’de gösterilmiştir. Marmara Bölgesi’nin 20. yüzyıldaki deprem aktivitesi de aynı şekil üzerinde yer almaktadır.



Şekil 7.7 : Tarihsel depremlerin makrosismik verilere dayalı olarak bulunan tahmini kaynakları ve bölgenin 20. yüzyıl depremselliği [56].

Türkiye deprem bölgeleri haritasına göre Çamlık Tüneli 2. derece deprem bölgesinde bulunmaktadır. 2. derece deprem bölgesinin beklenen ivme değeri 0,40 g ile 0,30 g arasında ve $A_0 = 0,3$ g'dir. İstanbul ili deprem bölgeleri haritası, üzerine Çamlık Tünelinin işlenmiş hali ile Şekil 7.8'de görülmektedir.

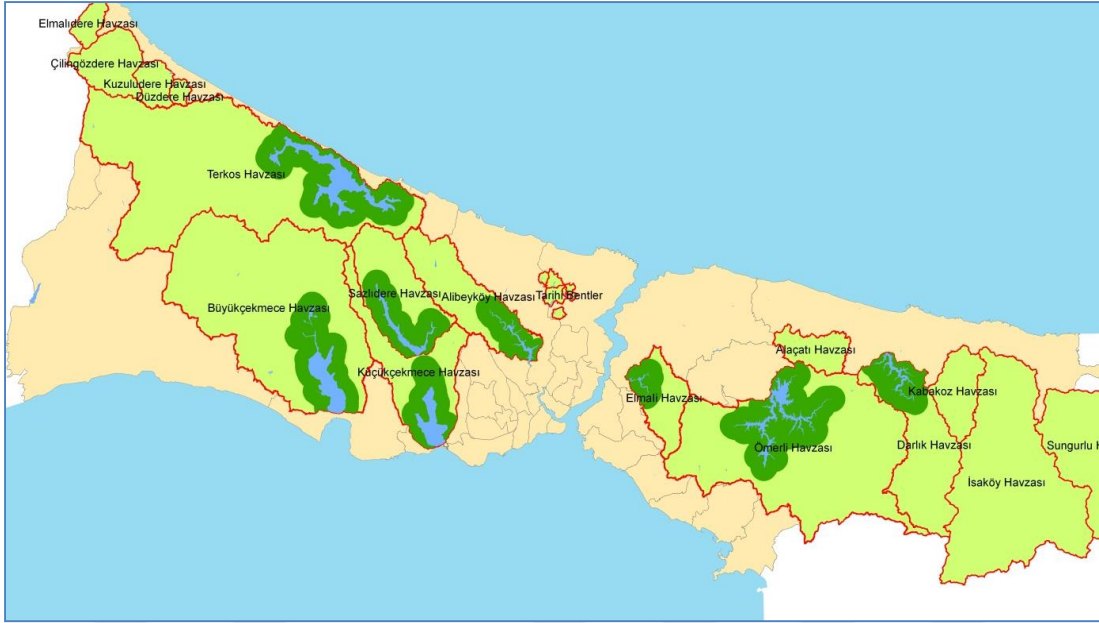


Şekil 7.8 : Çamlık Tünelinin İstanbul ili deprem bölgeleri haritası üzerine işlenmiş durumu [57].

7.3 Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri

İstanbul il sınırları içinde bulunan ve il bütününün % 46'sı kadar bir alanı kaplayan su havzaları çok sayıdaki akarsu ve dereler vasıtası ile içme ve kullanma suyu amaçlı olarak yararlanılan belli başlı 7 adet rezervuarı beslemektedir. Asya yakasında Ömerli, Darlık ve Elmalı Barajları bulunmaktadır.

İstanbul'a sağlanan içme ve kullanma suyunun % 22,7'si Ömerli, % 15,6'sı Terkos, % 11,6'sı Büyükçekmece ve % 50'si de diğer havzalardan geçmektedir (Şekil 7.9). İnceleme alanının yakınında bulunan Ömerli Baraj Havzası'ndan İstanbul'a yılda 180 hm³ içme-kullanma suyu sağlanmaktadır. Riva, Türknil, Kabakoz, Göksu ve Yeşilçay (Ağva Deresi) önemli akarsulardır.



Şekil 7.9 : İstanbul İli Su Kaynakları Haritası [58].

7.3.1 Yeraltı su kaynakları

İstanbul ili sınırları içerisinde on binlerce su sondajı ve kuyu bulunmaktadır. İstanbul ili su ihtiyacının % 5 kadarı yeraltı sularından karşılanmaktadır. Yeraltı suları zenginliği açısından Avrupa yakasında Silivri ve Çatalca yöreleri ile Bakırköy çevresi önemli bölgelerdir. Asya yakası bu bakımdan daha sınırlı olanaklara sahiptir.

İstanbul memba suları Asya yakasında, Aydos, Alemdağ ve Kayışdağ içerdikleri jeolojik birimlere bağlı olarak debileri çok fazla olmayan ancak kaliteleri açısından üstün nitelikli membaların yoğunlaştığı yerlerdir.

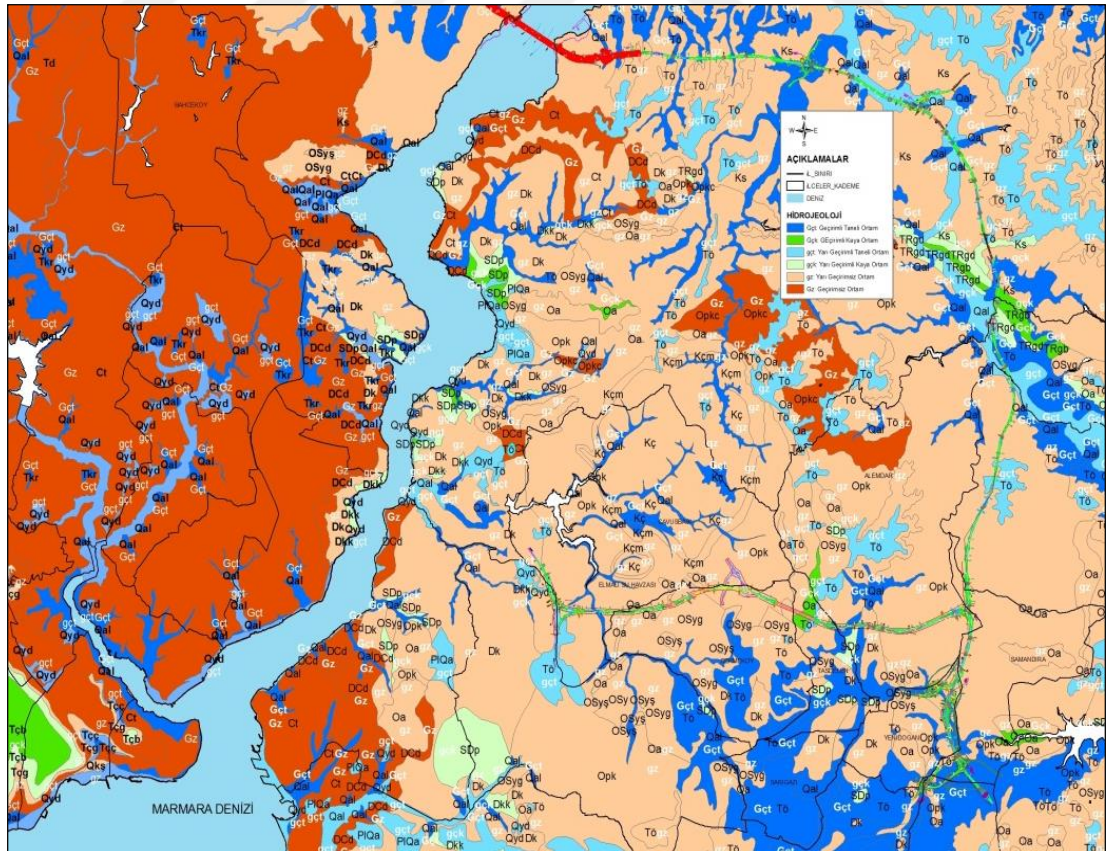
7.3.2 Jeohidrolik ortamlar

İstanbul Asya yakasını oluşturan formasyonlar ve bunları meydana getiren litolojik birimler, jeohidrolik ortam niteliklerine göre, yani yeraltı suyu geçirebilme ve iletebilme özellikleri (boşluk varlığı, boşluk boyutları, boşluklar arası ilişki varlığı ve derecesi) göz önünde bulundurularak 1 ana jeohidrolik ortam türüne ayrılmıştır. Jeohidrolik ortam türlerinin belirlenmesinde ve tanımlanmasında; özellikle kayalarındaki birincil ve ayrışmaya bağlı killeşme gibi ikincil kökenli olgular ile ortamda kil ve killi ara seviyeler bulunması, kalın-masif jeolojik yapı varlığı ve mevcut süreksizliklerin dolgu-tıkalı veya ilişkisiz olması gibi ortamsal yeraltı suyu geçirimsizliğini ve iletilimsizliğini olumsuz yönde etkileyen parametreler ile tane serbestleşmesi, tane iriliği ve derecelenmesi, taneler arası doğal çimento bulunmaması

veya suyla dağılabilir gevşek çimentolanmış olma, dolgusuz-açık süreksizlik açıklıklarının, gözenek hacimlerinin ve karst boşluklarının varlığı ve ilişkili olmaları gibi ortamsal yeraltı suyu geçirimliliğini ve iletimliliğini olumlu yönde etkileyen jeolojik ve hidrojeolojik parametrelerin bir bütün halinde değerlendirilmesi belirleyici olmuştur.

İstanbul genelinde ayırtılan ve hidrojeoloji hazırlanmasına temel oluşturan ana jeohidrolik ortam türleri; geçirimsiz ortam (Gz), yarıgeçirimsiz ortam (gz), yarıgeçirimli ortam (gç) ve geçirimli ortam (Gç) olarak adlandırılmıştır. Geçirimli ve yarıgeçirimli ortamlar ise jeolojik ortamı şekillendiren kayaç türlerinin “kaya” veya “zemin” nitelikli oluşları göz önünde bulundurularak kendi içlerinde ayrıca “geçirimli / yarıgeçirimli taneli ortam” ve “geçirimli / yarıgeçirimli kaya ortam” şeklinde ikişer alt gruba ayrılmıştır (Şekil 7.10, Çizelge 7.1).

Arazi gözlemlerinde tünel ve çevresinde herhangi bir su gelirine rastlanmamış olup, yağış sırasında bazı süreksizlik düzlemlerinden su geliri olduğu ve süreksizlik yüzeylerinin yer yer nemli olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7.10 : İstanbul İli Hidrojeoloji Haritası [59].

Çizelge 7.1 : Çamlık Tünelini oluşturan jeolojik birimler ve jeohidrolik ortamlar.

JEOLOJİK ORTAMLAR			JEOHİDROLİK ORTAMLAR	
Simge		Tanım	Simge	Tanım
Osy	Yayalar Fm.	Osyg – Gözdağ Üyesi	gz	Yarı geçirimsiz
Oa	Aydos Fm. (ayrılmamış)	Oa – Aydos Fm. (ayrılmamış)	gz	Yarı geçirimsiz
Opk	Polonezköy Gr.	Opk – Kurtköy Fm. (ayrılmamış)	gz	Yarı geçirimsiz

Yarı Geçirimsiz Ortamlar (gz)

Kurtköy Formasyonu (Kumtaşı), Aydos Formasyonu (Kuvarsit), Yayalar Formasyonu Gözdağ Üyesi (Mikalı Kumtaşı-Silttaşı), jeohidrolik özellikleri nedeniyle “Yarıgeçirimsiz Ortam (gz)” özelliğindedir. Yarıgeçirimsiz ortamlar ve onları oluşturan litolojik birimler, petrografik niteliklerine bağlı olarak morfolojisinde engebeli ve yüksek kotlu alanlar gelişmesine neden olmuştur.

Yarıgeçirimsiz ortamlar, üzerlerinde bir geçirimli veya yarıgeçirimli jeohidrolik ortam bulunduğunda, pratik anlamda aynen geçirimsiz ortamlar gibi düşünülürler. Bu nedenle de daha çok yeraltı suyu akışını sınırlayan ve konumsal özelliklerine bağlı olarak geçirimli ve yarıgeçirimli ortamlarla ilişkileri çerçevesinde ortamdaki yeraltı suyunun depolanmasına hizmet eden bir görev üstlenir.

Yarıgeçirimli ortamlar, tabanlarından geçirimsiz veya yarı geçirimsiz bir ortamla sınırlandıkları zaman, yararlanabilecek yeraltı suyu miktarının fazla olmamasına rağmen yine de içlerinde yeraltı suyu depolayabilen düşük verimli hidrojeolojik ortamlar (yarısutaşırlar / akitardlar) şekillendirirler. Bazı yerel yeraltı suyu olanakları düşünüldüğünde, miktar açısından belki büyük bir önem taşımasa bile yine de düşük verimli yeraltı suyu sağlama potansiyeli taşıdıkları göz önünde bulundurulmalıdır.

7.4 Mühendislik Jeolojisi Değerlendirmesi

7.4.1 Yüzey araştırmaları

Bu bölümde proje kapsamında yer alan Çamlık Tüneli giriş portalinin mühendislik özelliklerini, yeraltı suyu durumunu ve ortamın kaya kalitesini saptamak amacıyla yapılan mühendislik jeolojisi çalışmaları değerlendirilmiştir.

Çamlık Tüneli ve dolayında 3 farklı jeolojik formasyon bulunmaktadır. Bu formasyonlar yaşlıdan gence doğru sırası ile Alt Ordovisiyen yaşlı Kurtköy Formasyonu (Opk), Alt Ordovisiyen Aydos Formasyonu (Oa) ve Üst Ordovisiyen-Alt Silüriyen yaşlı Yayalar Formasyonunun Gözdağ Üyesidir. Su deposunun altında ise Yayalar Formasyonu ile Aydos Formasyonları yer almaktadır.

Çalışma alanındaki Paleozoyik birimler, temelden başlayarak yer yer kıvrımlanmış, faylanmış ve bindirmeler kazanmıştır. Tabakalı kayalar tektonik kuvvetlerin etkisine bağlı olarak dalga şeklinde kıvrımlı yapı kazanmışlardır. Kıvrım eksenleri ve düşey kırıklar arasında uyumluluk bulunup birbirlerine az çok paraleldirler. Bu nedenle kıvrımların ve kırıkların beraber geliştikleri düşünülmektedir. Bindirme, kıvrım ve kırıklar nedeni ile oldukça kalın ezik zonlar gelişmiştir. Kuvarsit ve arkoz birimlerinin kıvrımlı, kırıklı, sık çatlaklı yapıları ve özellikle ezik zonları sondaj çalışmaları sırasında olumsuzluklara neden olmakta ve ayrıca RQD (Kaya Kalite Değeri) değerlerini oldukça düşürmektedir (Şekil 7.11 ve 7.12).

Arazi çalışmalarından, tünel giriş portalı yakınında bulunan su deposundaki yarmadan yapılan ölçümlerden tabakaların konumları, doğrultuları genellikle D-B, KD-GB ve eğim yönleri G-GD 33-60° olduğu anlaşılmıştır. Bindirmenin olduğu kesimlerde kıvrım kanatlarının eğiminin 80-90° olduğu saptanmıştır.

Tünelin su deposu kesiminde ince-kaba kum boyu taneli, mikalı, feldispatlı kumtaşlarının tümüyle ayrılmış kesimlerinden oluşan kumlu-killi zemin yer almaktadır. Gözdağ Üyesinin kumtaşları; yeşil, grimsi mavi, ayrılmış açık kahverengi, boz, orta katmanlı, yer yer ince katmanlı ve koşut laminalıdır. İnce-orta kum boyu, yarı yuvarlanmış, orta-iyi boylanmış kuvars, çakmaktaşı, feldispat, az oranda mafik kırıntılar ve bolca beyaz mika pulu kapsar. Genellikle killi hamur ve az oranda silis çimentoludur. Hamur oranı çoğunlukla %10'u geçer. Taze iken sert ve dayanımlı, ayrılmış yumuşaktır. Özellikle tektonik hat boyunca gelişen ayrışma zonunda ve bindirme zonu boyunca, mika ve feldispat kapsamı ileri derecede ayrışma gösterir ve kayaç ince kuvars gereçli sarımsı, boz, kızılımsı açık mavimsi külrengi kile dönüşür. Bu tür zeminler, tünel açma işlemi başlayınca tavan ve yan duvarlar kendi kendilerini tutamayabilir. Ayrıca zeminlerde karşılaşılabilecek en büyük engel yeraltı suyudur. Tünel açımı sırasında yeraltı suyu ile karşılaşılması durumunda yapılması gereken işlemlere dikkat edilmelidir.



Şekil 7.11 : İSKİ deposu yanındaki yarmada gözlemlenen kuvarsit-kuvarsitik kumtaşı.



Şekil 7.12 : Tünel çevresinde gözlemlenen kumtaşı-silttaşı.

Süreksizlikler, kaya kütlelerindeki eklem, tabaka düzlemi, fay, dilinim, foliasyon, çatlak gibi mekanik süreksizlik yüzeyleri veya kırıklardır. Özellikle kaya kütlelerinin tanımlanması açısından, süreksizliklere ilişkin özelliklerin kaydedilmesi gerekir. Süreksizlik türleri kaydedilirken her süreksizlik türü için verilen uluslararası standartlara uygun simgeler kullanılır (Çizelge 7.2) [60].

Çizelge 7.2 : Süreksizlik türlerine ait simgeler [60].

Süreksizliğin Türü	Simgesi
Ekleme	J
Tabakalanma	B
Fay zonu	FZ
Fay	F
Dilinim (Klivaj)	C
Şistozite	S
Yapraklanma (foliasyon)	Fo
Laminasyon	L
Makaslanma yüzeyi	SP
Gerilim çatlağı	TC
Fisür	F
Damar	V

Süreksizliğin durumunu tanımlamak için açık, kapalı, çimentolu veya dolgulu kohezyonsuz malzeme (kum veya silt), kil veya kil matriks, şişen kil veya kil matriks, klorit, talk veya jips ve diğerleri (kuvars, kalsit, vb.) tanımlar kullanılır [60].

Süreksizlik aralığı, kaya kütlelerinde komşu konumlu iki süreksizlik veya birbirine paralel eklemlerden oluşan bir süreksizlik takımındaki iki süreksizliğin arasındaki uzaklıktır. Süreksizlik aralığının düşük olması, özellikle yeraltı açıklıklarının duraylılığının sağlanmasını güçleştiren bir faktör olarak bilinir (Çizelge 7.3) [60].

Çizelge 7.3 : Süreksizlik aralığının tanımlanması [61].

Aralık (mm)	Özellikler
<20	Çok dar aralıklı
20-60	Dar aralıklı
60-200	Yakın aralıklı
200-600	Orta aralıklı
600-2000	Geniş aralıklı
2000-6000	Çok geniş aralıklı
>6000	Çok fazla geniş aralıklı

Süreksizlik aralığı bir süreksizliğin birbirine komşu iki yüzeyi arasındaki dik mesafe açıklık olarak tanımlanır (Çizelge 7.4). Eğer süreksizlik yüzeyi temiz ve kapalı (sıkı) ise, diğer süreksizlik parametreleri tanımlama amacıyla yeterli olabilmektedir. Ancak süreksizlik yüzeyi açık ise, açıklığın ölçülmesi gerekir. Süreksizlik yüzeyleri arasındaki açıklıklar, genellikle erozyona veya kazıya bağlı gerilme azalmasıyla veya süreksizlik yüzeyindeki dolgu malzemesinin yıkanmasıyla yakından ilgilidir [60].

Çizelge 7.4 : Süreksizlik aralığının tanımlanması [62].

Süreksizlik aralığı (dolgu, damar ve fay kalınlığı)	Tanım
>200 mm	Geniş açıklıklı
60-200 mm	Orta derecede geniş açıklıklı
20-60 mm	Orta derecede dar açıklıklı
6-20 mm	Dar açıklıklı
2-6 mm	Çok dar açıklıklı
0-2 mm	İleri derecede dar aralıklı
0	Sıkı

Dolgu malzemesi bir süreksizliğin komşu iki yüzeyi arasında yer alan ve genel olarak ana kayadan daha zayıf özellikteki malzeme olarak adlandırılır. Tipik dolgu malzemeleri; kum, silt, kil, breş ve milonit olup, bunların yanı sıra kuvars, kalsit vb. gibi minerallerden oluşan damarlar da dolgu malzemesidir. Jeoteknik araştırmalarda süreksizlikler boyunca kaymaya karşı direnç; dolgu malzemesinin kalınlığına, türüne ve dayanımına bağlı olup, dolgu malzemesi önem kazanır [60].

Pürüzlülük ve dalgalılık, bir süreksizlik yüzeyinin sırasıyla küçük ve büyük ölçekte düzlemsellikten sapmasının ölçüsüdür (Çizelge 7.5 ve 7.6). Her iki özellik de kayanın makaslanma dayanımı üzerinde etkin rol oynar. Özellikle büyük ölçekli bir dalgalılık, yerel olarak eğimin değişmesine neden olabilir [60].

Çizelge 7.5 : Pürüzlülük tanımının sınıflandırılması [63].

Pürüzlülük Tanım	Sınıf
Kaygan-parlak	1
Düz	2
Pürüzlü	3
Çıkıntılı	4
Basamaklı	5

Çizelge 7.6 : Dalgallık tanımının sınıflandırılması [63].

Dalgallık Tanım	Sınıf
Düzlemsel	1
Az dalgallı (düz olmayan)	2
Dalgallı	3
Kavisli	4
Kıvrımlı	5

Süreksizlik yönelimi, bir süreksizliğin eğim ve eğim yönü değerleri ile tanımlanır. Eğim, bir süreksizlik düzleminin yatayla yaptığı açıdır. Kuzeyden itibaren saat yönünde ölçülen ve kuzey yönü ile eğim çizgisinin yatay düzlemdeki izdüşümü arasındaki açı ise, eğim yönü olarak tanımlanır. Arazide süreksizlik ölçümleri alınırken önce eğim daha sonra eğim yönünün değeri kaydedilir [64].

Süreksizlik devamlılığı, bir kaya yüzleğinde süreksizlik izinin gözlenen uzunluğu olarak tanımlanır. Devamlılık, bir düzlem içerisinde bir süreksizliğin boyutunun veya alansal yayılımının kaba bir ölçüsüdür. Bir süreksizliğin kaya malzemesi içerisinde son bulması veya diğer süreksizlikler tarafından kesilmesi, devamlılığı azaltan faktörlerdir. Bu özellik, yüzleklerde alınan ölçümlerle belirlenir ve her süreksizlik setinin devamlılığı Çizelge 7.7’de verilen ölçütlere göre tanımlanır [60].

Çizelge 7.7 : Süreksizlik izinin tanımlanması [61].

Süreksizlik izinin ölçülen uzunluğu	Tanımlama
>1 m	Çok düşük devamlılık
1-3 m	Düşük devamlılık
3-10 m	Orta devamlılık
10-20 m	Yüksek devamlılık
>20 m	Çok yüksek devamlılık

Yönelimleri hemen hemen birbirleriyle aynı olan münferit süreksizliklerin oluşturduğu topluluğa süreksizlik takımı adı verilir. Kaya kütleleri çoğu kez birden fazla süreksizlik takımı tarafından bölünmüştür. Süreksizlik takımlarının en çok gözlemlendiği yönelim ile mühendislik yapılarının veya kazılarının yönelimi arasındaki ilişki, duraysızlık modelinin ve potansiyelinin değerlendirilmesinde büyük önem taşımaktadır [60].

Kaya kütlelerindeki su sızıntıları birbirleriyle ilişkili süreksizlikler boyunca gelişir. Sızma hızı, kabaca yerel hidrolik eğime ve yönsel geçirgenliğe bağlıdır. Kaya yüzleklerinde dolgunuz süreksizliklerdeki sızmanın derecesi için Çizelge 7.8’de verilen tanımlama ölçütlerinden yararlanılır [60].

Çizelge 7.8 : Sızma derecesinin tanımlanması [61].

Sızmanın derecesi	Tanımlama
I	Süreksizlik yüzeyi çok sıkı (kapalı) ve kuru, suyun yüzey boyunca akması mümkün değil
II	Su akışını gösteren bir belirti yok ve süreksizlik yüzeyi kuru
III	Süreksizlik yüzeyi kuru, ancak suyun aktığını gösteren bazı belirtiler var (örneğin paslanma-demir-oksit izleri vb.)
IV	Süreksizlik yüzeyi nemli, ancak serbest su akışı yok
V	Süreksizlik yüzeyinde sürekli su akışı gözlenmemekle birlikte, yer yer su damlaları ve sızıntı var
VI	Süreksizlik yüzeylerinde su akışı var (akış lt/dk olarak ölçülebilir veya basınç düşük, orta, yüksek şeklinde tanımlanabilir)

Blok boyutu kaya kütlelerinin davranışının önemli bir göstergesi olup, süreksizlik aralığı, takım sayısı ve yönelimi gibi faktörler oluşan blokların şeklini tayin eder. Blok büyüklüğüne ve şekline göre ISRM (1981) tarafından kaya kütleleri için önerilen gruplandırma ve tanımlamalar aşağıda verilmiştir [61].

- (a) Masif: Birkaç süreksizlik veya çok geniş aralıklı süreksizlikler içeren kaya kütleleri,
- (b) Bloklı: Yaklaşık eş boyutlu bloklardan oluşan kaya kütleleri,
- (c) Yassı/plaka: Bir boyutu diğerlerine göre daha küçük olan blokları içeren kaya kütleleri,
- (d) Kolonsal: Bir boyutu diğer iki boyutundan daha büyük bloklardan oluşan kaya kütleleri,
- (e) Düzensiz: Blok boyutunda ve şeklinde belirgin farklılıklar gözlenen kaya kütleleri,
- (f) Parçalanmış: Çok sık eklemli (şeker kübü şeklinde) kaya kütleleri.

Çalışma alanındaki kaya kütleleri Çizelge 7.9’da verilen ayrışma derecesi ve Çizelge 7.10’da verilen dayanım derecesi tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmiştir.

Çizelge 7.9 : Süreksizlik izinin tanımlanması [60].

Ayrışma Derecesi	Tanım
I	Taze
II	Az Ayrışmış
III	Orta Derecede Ayrışmış
IV	Çok Ayrışmış
V	Tümüyle Ayrışmış

Çizelge 7.10 : Dayanım derecesine göre tanımlama ölçütleri [60].

Dayanım Derecesi	Tanım
I	Çok Dayanımlı
II	Dayanımlı
III	Orta
IV	Zayıf
V	Çok Zayıf

İnceleme alanında kayaç türü olarak kuvarsit ve mikalı kumtaşı-silttaşı birimi ile bu birimin tamamen ayrılmış kesimleri (zemin) ile birlikte bu iki birimin arasında bindirme zonu gözlemlenmiştir. Kuvarsit birimleri genel olarak orta sağlam-sağlam dayanımlı, çok sık çatlaklı, taze-az ayrılmış niteliktedir. Süreksizlik yüzeyi dalgalı-pürüzlü olmakla birlikte, 1 m’ye düşen süreksizlik sayısı 1 adettir. Süreksizlik devamlılığı 1-10 m’dir. Süreksizlik aralığı 20-600 mm aralığındadır. Süreksizlik açıklığı 20-60 mm’dir. Dolgu malzemesi kum-silt yer yer kil malzemelerdir. Birimlere ait kaya kütlelerinin tanımlama ölçütleri Çizelge 7.11’de verilmiştir.

Kumtaşı-Silttaşı birimi genel olarak zayıf-orta sağlam, çok sık çatlaklı, derinlik seviyesine göre değişen az-orta-çok ayrılmış niteliktedir. Süreksizlik yüzeyi düz-pürüzlü olmakla birlikte, 1 m’ye düşen süreksizlik sayısı 3 adettir. Süreksizlik devamlılığı 1-10 m’dir. Süreksizlik aralığı 20-600 mm aralığındadır. Süreksizlik açıklığı 20-60 mm’dir. Dolgu malzemesi kum-silt yer yer kil malzemelerdir. Birimlere ait kaya kütlelerinin tanımlama ölçütleri Çizelge 7.12’de verilmiştir.

Çizelge 7.11 : Kuvarsitlerin kaya kütlesi tanımlama ölçütleri.

<u>Kaya Kütlesinin Tanımlama Ölçütleri</u>		<u>Özellikler</u>
Jeolojik Tanımlama		Kuvarsit-Kuvarsitik Kumtaşı
Renk		Morumsu, sarımsı kahverengi renkli
Tane Boyu		İnce-orta taneli
Doku ve Yapı		Masif yapılı
Süreksizlikler	Süreksizlik Türleri	Tabaka, Eklem
	Süreksizlik Durumu	Genellikle kapalı, yer yer açık
	Süreksizlik Aralığı	Dar (20-60 mm), orta aralıklı (200-600 mm)
	Süreksizlik Açıklığı	Dar (20-60 mm)
	Dolgu Malzemesi	Kum-silt boyu malzeme
	Pürüzlülük ve Dalgallık	Genellikle dalgallı pürüzlü
	Süreksizlik Yönelimi	Tabaka 217/32, Ana süreksizlik 127/34, İkincil süreksizlik 34/45
	Süreksizlik Devamlılığı	Düşük-orta devamlılık
	Süreksizlik Takım Sayısı	3
	Su Sızıntıları	Süreksizlik yüzeyi nemli, ancak serbest su akışı yok
	Blok Boyutu	Orta boyutlu bloklar
Ayrışma		Genellikle taze-az ayrıışmış, yüzeye yakın kesimler az-orta ayrıışmış
Dayanım		Orta sağlam-sağlam dayanımlı

Çizelge 7.12 : Kumtaşı-Silttaşının kaya kütlesi tanımlama ölçütleri.

<u>Kaya Kütlesinin Tanımlama Ölçütleri</u>		<u>Özellikler</u>
Jeolojik Tanımlama		Kumtaşı-Silttaşı
Renk		Sarımsı kahverengi
Tane Boyu		İnce-Orta taneli
Doku ve Yapı		Tabakalı
Süreksizlikler	Süreksizlik Türleri	Tabaka-Eklem
	Süreksizlik Durumu	Genellikle kapalı, yer yer açık
	Süreksizlik Aralığı	Dar (20-60 mm)
	Süreksizlik Açıklığı	Dar (20-60 mm)
	Dolgu Malzemesi	Kum-kil boyu malzeme
	Pürüzlülük ve Dalgallık	Genellikle düz-pürüzlü
	Süreksizlik Yönelimi	Tabaka 245/41, Ana süreksizlik 086/25, İkincil süreksizlik 355/41
	Süreksizlik Devamlılığı	Orta devamlılık
	Süreksizlik Takım Sayısı	3
	Su Sızıntıları	Süreksizlik yüzeyi kuru, ancak suyun aktığını gösteren bazı belirtiler var
	Blok Boyutu	Küçük bloklar yer yer parçalı-kırıklı seviyeler
Ayrışma		Genellikle orta derecede ayrıışmış, yüzeye yakın kesimler çok ayrıışmış
Dayanım		Zayıf-Orta sağlam dayanımlı

7.4.2 Yeraltı araştırmaları

7.4.2.1 Sondaj alışmaları

amlık Tüneli giriş portal kesiminde özellikle su deposuna yakın kesimde depo yerinin ve evre kesimlerinin jeoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kotları ve lokasyonları aşağıda verilen 2 adet sondaj yapılmıştır [44]. Bu sondajlara ait jeoteknik loglar, karot sandık fotoğrafları EK-A ve EK-B’de, sondajlara ait lokasyon planı şekil 7.13’te genel bilgiler izelge 7.13’te gösterilmiştir.

Çizelge 7.13 : Sondajlara ait zet bilgiler.

Sondaj No	Kilometre	Koordinat (m)		Derinlik (m)	YASS Derinliği	Sondaj Kotu
		X	Y			
ASE-27b	3+700	4 546 949	430 433	42	4,80	240,00
ASE-28a	3+830	4 546 940	430 580	65	16,50	259,00



şekil 7.13 : amlık Tüneli sondaj lokasyon planı.

ASE-27b Sondajı

Toplam derinliği 42,00 metre olan ASE-27b sondajının ağız kotu 240,00 metre olarak ölçülmüştür. Tünel amacıyla yapılan ASE-27b sondajının yeraltı suyu seviyesi 4,80 metredir. ASE-27b nolu sondajın ilk 10,50 metresinde kahverengi, sarımsı kahverengi renkli, çok katı-sert az kumlu düşük plastisiteli KİL (%73 ince malzeme (LL=35 PI=17), %27 ince-orta daneli kum), tümüyle ayrışmış KUMTAşI birimi kesilmiştir.

1,50 ile 9,00 metreler arasındaki SPT-N₃₀ değerleri 53 ile refü arasında değişmektedir. 10,50 ile 24,00 metreler arasında zayıf-çok zayıf dayanımlı, kahverengi, sarımsı kahverengi renkli, parçalı-kırıklı, çok ayrılmış çamurtaşı araseviyeli KUMTAŞI birimi geçilmiştir (Dayanım IV-V, Ayrışma IV). Is50=0,36 MPa, 0,33MPa, 3,23 MPa ve 0,59 MPa. Bu birimde ortalama TCR değeri 49,6, ortalama RQD değeri 7,87 olarak belirlenmiştir. 24,00 ile 42,00 metreler arasında ise orta sağlam dayanımlı, yer yer zayıf dayanımlı, kahverengi, gri renkli, parçalı-kırıklı, 31,00-37,00 m arası ezik zonlu, orta derecede ayrılmış, yer yer çok ayrılmış SİLT TAŞI birimi kesilmiştir (Dayanım III, Ayrışma III). qu=13,14 MPa Is50=5,14 MPa, 4,54 MPa ve 4,18 MPa. Bu birimde ortalama TCR değeri 47,30, ortalama RQD değeri 2,5 olarak belirlenmiştir.

ASE-28a Sondajı

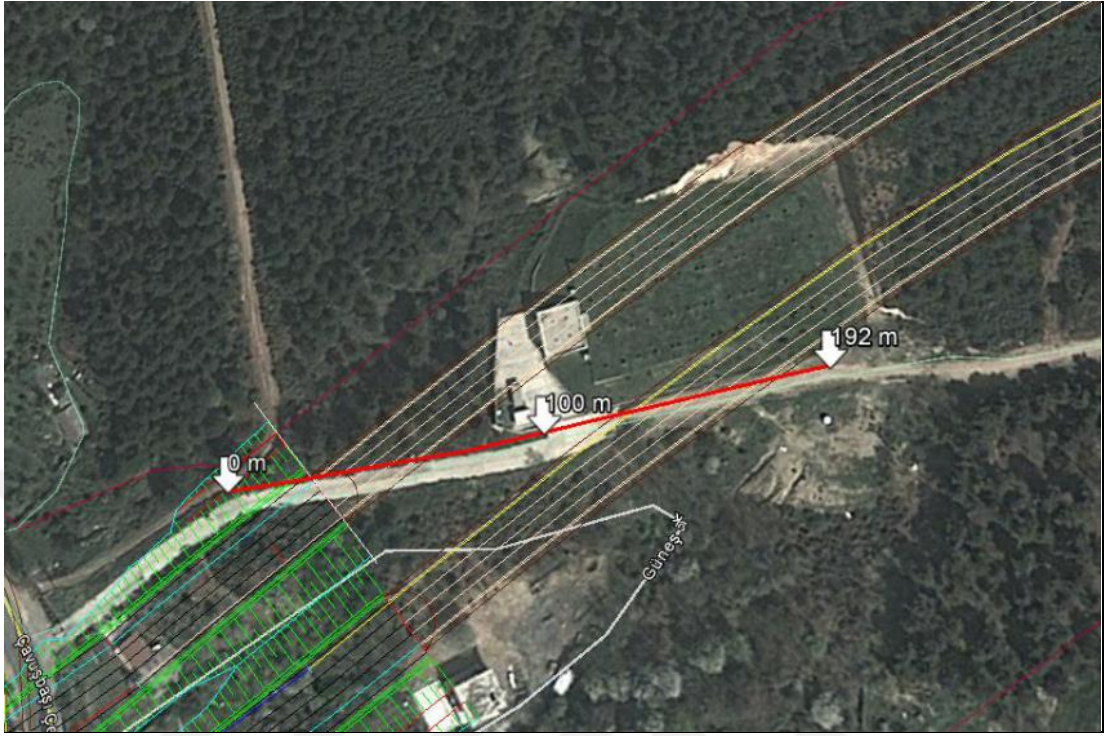
Toplam derinliği 65,00 metre olan ASE-28a sondajının ağız kotu 259,00 metre olarak ölçülmüştür. Sondajın ilk 16,00 metresinde zayıf-çok zayıf dayanımlı, sarı, koyu kahve, kırmızımsı kahve renkli, parçalı-kırıklı, çok ayrılmış, yer yer tümüyle ayrılmış KUVARSİT birimi geçilmiştir (Dayanım IV-V, ayrışma IV). Yeraltı suyu seviyesi ölçülmemiştir. Birimin ortalama TCR değeri 26 olarak hesaplanmıştır. 10 cm'den büyük çapını korumuş numune olmadığından RQD değeri hesaplanamamıştır. 16,00 ile 65,00 metreler arası orta dayanımlı, gri-koyu gri renkli, parçalı-kırıklı, orta derecede ayrılmış, yer yer çok ayrılmış SİLT TAŞI birimi kesilmiştir (Dayanım III, ayrışma III). Bu birimin ortalama TCR değeri 28 olarak hesaplanmıştır. 10 cm'den büyük çapını korumuş numune olmadığından RQD değeri hesaplanamamıştır.

7.4.2.2 Jeofizik çalışmalar

İnceleme alanında açılan temel sondaj kuyularının yanı sıra, temel zemini oluşturan birimlerin sismik hızlarını (P ve S) ve kalınlıklarını belirleyebilmek amacıyla 1 profil boyunca sismik etüt (kırılma (P dalgası) - aktif kaynak yüzey dalgası) yapılmıştır (Şekil 7.14).

Çalışmada sismik kaynak olarak 8 kg ağırlığında balyoz, alıcı olarak 4.5 Hz'lik OYO-Geospace jeofonlar kullanılmıştır. Kayıtcı, bir arazi bilgisayarıyla birlikte çalışmaktadır. Çalışmada Toshiba NB550D taşınabilir bilgisayar kullanılmış, arazi verileri SEG-2 formatında dijital ortama kaydedilmiş ve izleyen aşamalarda büro çalışmaları yapılmıştır. Veri arazide gerçek anlamda ham (raw) olarak toplanmış, kayıt

sırasında herhangi bir alt ve üst filtre ile notch kullanılmamıştır. Saha sismik anlamda orta-az gürültülüdür.



Şekil 7.14 : Çamlık Tüneli sismik etüt planı.

Çalışmada 4.5 Hz doğal frekanslı jeofonlar kullanılmıştır ve jeofon aralığı 2,0 m'dir. Bu tip jeofonlar gerek kırılma analizi ve gerekse MASW (Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi) analizi için en iyi veri kalitesini sağlamaktadır, zira toplanan bu veriler daha sonra MASW analizinde de kullanılacaktır. Atış ilk alıcı uzaklığı her iki uçta da 2,0 m'dir.

Mühendislik jeolojisi harita alımında hem yüzeyde, hem de sondajlarda yaygın olarak kullanılan başlıca jeofizik yöntemler, rezistivite ve sismik yöntemlerdir. Bu yöntemlerin kullanımı iki tür bilgi sağlar [65].

(a) Kaya ve zeminlerin başlıca fiziksel özelliklerinin tayini ve bunların çalışılan sahanın sınırları içinde derinlikle değişiminin belirlenmesi. Bu özellikler, kayaların bozunma derecesi ve süreksizlik sıklığı gibi kütsel özellikleriyle de karşılaştırılabilir.

(b) Farklı fiziksel özellikteki kaya ve zeminler arasındaki sınırların, yeraltı suyu seviyesi derinliğinin ve fayların konumunun belirlenmesinde kullanılır.

Tabakaların fiziksel özellikleri (makaslama modülü, elastisite modülü, sıkışmazlık modülü, doğal salınım periyodu, sismik büyütmesi, poisson oranı vb.) makaslama (S)

hızı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, yeraltı tabakalarının S-hızı değişimlerinin belirlenmesi jeoteknik mühendisliği açısından oldukça önemlidir. Son yıllarda yüzey dalgalarının çok-kanallı analiz yöntemi S-hızı değişimlerinin belirlenmesinde sismik kırılma yöntemi yanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle sismik kırılma yönteminin uygulanamadığı durumlarda MASW yöntemi tek alternatif yöntem olarak görülmektedir. Sismik kırılma yöntemi ile ölçü alınırken kullanılan dizilim geometrisi korunarak MASW kayıtları toplanabilmekte ve daha büyük araştırma derinliği elde edilebilmektedir. Yöntemin diğer üstünlükleri arasında hızlı veri toplama, kolay veri-işleme ve düşük hız problemini çözmesi gösterilebilir.

Yüzey dalgası analiz yöntemlerinden MASW tekniği ile Vs30 değeri sağlıklı bir şekilde hesaplanabilmektedir. Vs30, UBC ve Eurocode-8 uluslararası standartlarında kullanılan temel parametrelerin başında gelmektedir. Yüzey dalgası analiz yöntemlerinde, yer altındaki tabakalı yapıların kesme dalgası hızının (Vs) derinlikle değişiminin hesaplanması amacıyla Rayleigh dalgasının dispersif özelliğinden faydalanır. Yüzey dalgası yöntemleri aktif kaynaklı ve pasif kaynaklı yöntemler olmak üzere iki ana grup altında toplanabilir. Pasif kaynaklı yöntemler daha derin nüfus gücüne sahiptir. Özellikle ana kaya derinliğine ulaşılması gereken sahalarda etkin olarak kullanılabilir. Arazide ilk bakıldığında kolay uygulanabilir olması yöntemin avantajları olarak görülmesinin yanında, veri eldesi sırasında geometriden kaynaklanan problemler ve yüzeye yakın tabakaların tespitinde yanlış payının olması dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bunun yanında, MASW yöntemi daha sınırlı nüfuz derinliğine sahip olmasının yanında, etkin kaynak olarak kullanılması ile daha başarılı sonuçlar alınmaktadır. Özellikle Vs30 çalışmalarında ilk 30 metrenin önemi ve ince tabakaların tespitinde oldukça sağlıklı sonuçlar vermesi nedeniyle etkin kullanıma sahiptir. Diğer yöntemlere göre en büyük avantajı kaynağın kontrollü olmasıdır [66].

Sismik S dalgası (kayma dalgası) hızları, zeminin mekanik özelliklerini tanımak amacıyla belirlenmiştir. Bu dalgalar malzemenin şekil bozunumuna veya burulmaya karşı direnci olduğu durumlarda meydana gelir. Tespit edilen Vs değerlerine göre kaya ve zeminlerin değerlendirilmesi Çizelge 7.14'te verilen sınıflamaya göre yapılmıştır. S dalga hızları 2000 m/sn'den küçük olan kayalar buldozer ile sökülebilirken büyük olan kayalarda ise patlatıcıların kullanılması gereklidir [67].

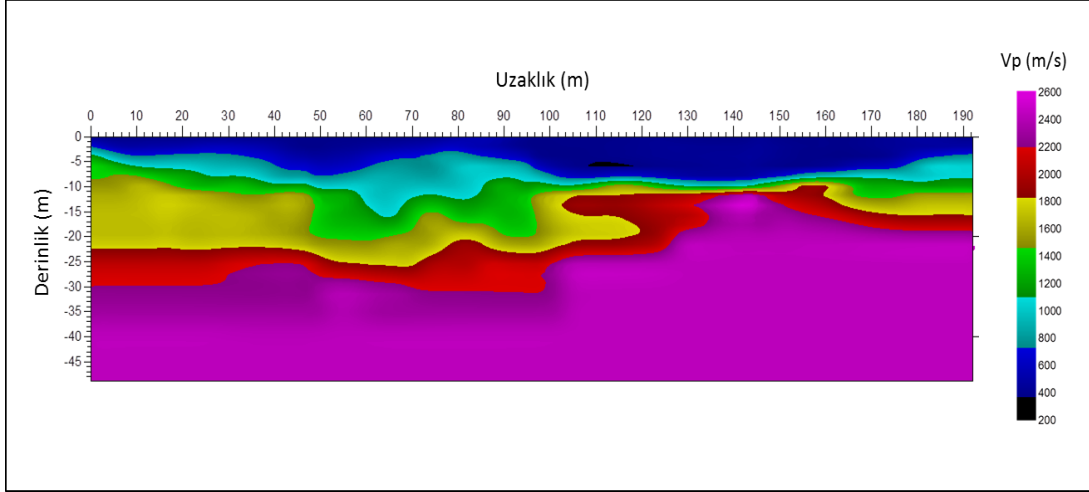
Çizelge 7.14 : Kayma ve kesme dalga hızlarına göre kaya ve zeminlerin sınıflandırılması [68].

Kayma Dalgası Hızı (m/sn)	Yerel Birim Türü
<200	Yumuşak Kil, siltli kil
<200	Gevşek Kum
<200	Yeraltısı düzeyinin yüksek olduğu yumuşak-suya doymuş kalın alüvyonlu katmanlar
200-300	Katı kil-siltli kil
200-400	Orta Sıkı Kum, çakıl
400-700	Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrılmış metamorfik kayalar ve çimentolu tortul kayalar
300-700	Çok katı kil, siltli kil
400-700	Çok katı kum, çakıl
700-1000	Tüf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayalar süreksizlik düzlemleri bulunan ayrılmış çimentolu tortul kayalar
>700	Sert kil siltli kil
>700	Çok sıkı kum, çakıl
>1000	Masif volkanik kayalar ve ayrılmamış sağlam metamorfik kayalar sert ve çimentolu tortul kayalar

Sismik tomografi analizi için veri-işlem aşamaları şunlardır:

1. Saha kayıt formatından (Seg-2), veri işlem formatına dönüştürme
2. İlk varış zamanı belirlemesi
3. Geometri bilgilerinin eklenmesi
4. Yol zaman grafiği üzerinde başlangıç hız modelinin belirlenmesi
5. 4'te belirlenen modelin non-linear-travel-time-tomografi yöntemi ile iteratif olarak analizi.

İnceleme alanında yapılan jeofizik çalışmalar sonucunda elde edilen sismik modelde 2 farklı anomali bulunmaktadır. Bu anomalilerin jeolojik modelde gösterilen faylardan kaynaklandığı gözlenmiştir (Şekil 7.15). Sonuçta arazi, sondaj ve jeofizik çalışmalar birlikte değerlendirilmiş jeolojik model son halini almıştır.



Şekil 7.15 : Çamlık Tüneli giriş portalinde yapılan jeofizik çalışmaları sonucunda elde edilen sismik model.

7.4.3 Laboratuvar araştırmaları

İnceleme alanında Çamlık Tüneli inşası sırasında oluşacak stabilite problemlerine ilişkin analizler ile bu alandaki malzemenin jeomekanik davranışının değerlendirilmesinde kullanılmak üzere malzemenin indeks özelliklerinin belirlenmesi amacıyla alınmış olan numuneler üzerinde kayada aşağıdaki laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

- Fiziksel Özellikler
 - Kuru Birim Hacim Ağırlığı
- Mekanik Özellikler
 - Nokta Yükleme Deneyleri
 - Tek Eksenli Basınç Deneyleri

7.4.3.1 Fiziksel özellikler

Fiziksel deneyler araştırma sondajlarından alınan farklı boyuttaki karot parçacıkları üzerinde yapılmıştır. Deneyler sondaj kuyularının farklı derinliklerinden alınan onar örnek üzerinde yapılmıştır. Deney numunelerinin kuru birim hacim ağırlığı (γ_k), doymun birim hacim ağırlığı (γ_d), efektif porozitesi (n_{ef}) ve ağırlıkça su emme (W_a) değerleri saptanmıştır. Fiziksel deneyler sırasında deney numunelerinin hiç biri suda dağılmamıştır. ASE-28a numaralı araştırma sondajından alınan numuneler için elde edilen değerler ekte sunulmuştur [69].

7.4.3.2 Mekanik özellikler

Çamlık Tünel Portal girişi kesimi araştırma sondajlarından alınan bazı karot örnekleri üzerinde nokta yükleme deneyleri yapılmıştır. Nokta yükleme deneylerinden hareketle nokta yükleme indeksi tanımlanmıştır [70]. Deneyde örnek sertleştirilmiş koniler arasında sıkıştırılarak kırılma anında uygulanan yük (P) ölçülmektedir. Deney şekilsiz örnekler üzerinde de uygulanabilmekte ve boyut düzeltmesi yapılarak indeks bir direnç değeri elde edilmektedir.

Nokta yükleme indeksi denklem 7.1 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (7.1)$$

Burada;

Çapsal yükleme hali için $D_e^2 = D^2$, karot örneklerinin aksel yüklenmesi veya deneyin şekilsiz örnekler üzerinde yapılması halinde ise bu değer $4A/\pi$ 'ye karşılık gelmektedir. A alanı örnek genişliği (W) ve yükleme çenetleri arasındaki mesafenin (D) çarpımından elde edilir ($A = W \times D$).

D : Örnek çapı veya yükleme aygıtı çenetleri arasındaki mesafe

P : Kırılma anına karşılık gelen yük

D_e eşdeğer çap olarak tanımlanmaktadır. Deneyde kullanılan örneğin çapının 50 mm'den farklı olması durumunda boyut düzeltmesi gerekmektedir.

Standart nokta yükleme indeksi ($I_{s(50)}$) ve boyut düzeltme için kullanılan katsayısı (k_{PLT});

$$I_{s(50)} = k_{PLT} \times I_s \quad (7.2)$$

$$k_{PLT} = \sqrt{\frac{D_e}{50}} \quad (7.3)$$

denklem 7.2 ve 7.3 ile tanımlanmıştır.

Yapılan araştırmalar nokta yükleme indeksi ile basınç direncinin (σ_c) ilişkilendirilebileceğini göstermektedir. Çok sayıdaki deney verisinden elde edilen değerlerin karşılaştırılması sonucunda denklem 7.4 önerilmiştir.

$$\sigma_c = k \times I_{s(50)} \quad (7.4)$$

Bu eşitlikteki k dönüştürme faktörünün 18-24 arasında değiştiği birçok araştırmacı tarafından belirlenmiştir. Bu değerler uluslararası birçok bilimsel kuruluşlar tarafından uygun bulunmuş olmasına rağmen, güncel çalışmalar bu katsayının kayaç türlerine göre değişebileceğini göstermektedir. Deney örneklerinin çapı 6,2 cm olup örneklerin tümü çapsal olarak yüklenmiştir. Yukarıdaki eşitlikte k katsayısı 18 alınarak basınç direnci değerlerine dönüştürülmüştür. Kayaçların nokta yük direncine göre sınıflandırılması Çizelge 7.15’te gösterilmiştir [70].

Çizelge 7.15 : Kayaçların nokta yük direncine göre sınıflandırılması [71].

Kaya Sınıfı	Nokta Yük Direnci (MPa)
Çok düşük dirençli	<1
Düşük dirençli	1-2
Orta dirençli	2-4
Yüksek dirençli	4-8
Çok yüksek dirençli	>8

Kuvarsit birimine ait belirlenen nokta yük dayanım indeks değerleri 14,1 ile 84,35 MPa aralığında olup, Bieniawski (1975) kaya sınıflamasına göre “çok yüksek dirençli” (Çizelge 7.16), kumtaşı-silttaşı birimine ait nokta yükü dayanım indeks değerleri 0,33 MPa ile 5,15 MPa arasında olup Bieniawski (1975) kaya sınıflamasına göre “çok düşük-yüksek dirençli”dir (Çizelge 7.17).

Çizelge 7.16 : Sondajlarda kesilen kuvarsit biriminin nokta yük direncine göre sınıflandırılması [71].

Sondaj Numarası	Nokta Yük Direnci (MPa)	Kaya Sınıfı
ASE-28a	min 14,1	Çok Yüksek Dirençli
ASE-28a	maks 84,8	Çok Yüksek Dirençli

Çizelge 7.17 : Sondajlarda kesilen kumtaşı-silttaşı biriminin nokta yük direncine göre sınıflandırılması [71].

Sondaj Numarası	Nokta Yük Direnci (MPa)	Kaya Sınıfı
ASE-27b	0,36	Çok Düşük Dirençli
ASE-27b	0,33	Çok Düşük Dirençli
ASE-27b	3,23	Orta Dirençli
ASE-27b	0,59	Çok Düşük Dirençli
ASE-27b	5,14	Yüksek Dirençli
ASE-27b	4,54	Yüksek Dirençli
ASE-27b	4,18	Yüksek Dirençli

Kaya mekaniği deneyleri 1600 kN yükleme kapasiteli MTS marka elektro-hidrolik pres yardımıyla kontrollü olarak yapılmıştır. Araştırma sondajlarının farklı derinliklerinden alınan karot örnekleri kesilip kafa düzeltmeleri yapılarak deneye hazır hale getirilmiştir. Deneyde kullanılan tüm örneklerin boy/çap oranı 2'ye yakındır. ISRM 1981'de öngörülen koşullarda gerçekleştirilen deneylerde deformasyon hızı $1 \times 10^{-4} \text{sn}^{-1}$ olarak alınmıştır (Çizelge 7.18).

Çizelge 7.18 : Kayaçların tek eksenli basınç direncine göre sınıflandırılması [72].

Kaya Sınıfı	Tek Eksenli Basınç Direnci (MPa)
Çok düşük dirençli	<25
Düşük dirençli	25-50
Orta dirençli	50-100
Yüksek dirençli	100-200
Çok yüksek dirençli	>200

ASE-27b sondajından elde edilen tek eksenli basınç direnci indeks değeri 13,14 MPa olup, Bieniawski (1975) kaya sınıflamasına göre "çok düşük" dirençlidir (Çizelge 7.19).

Çizelge 7.19 : Sondajlarda kesilen kumtaşı-silttaşı biriminin tek eksenli basınç direncine göre sınıflandırılması [71].

Sondaj Numarası	Tek Eksenli Basınç Direnci (MPa)	Kaya Sınıfı
ASE-27b	13,14	Çok Düşük Dirençli

7.4.4 Kaya kütlesi sınıflama sistemleri

Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, görgül tasarım yaklaşımlarının temel harcıdır ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler mühendislik tasarımını tek başına sağlayabilecek bir araç olarak değerlendirilmemeli, nihai tasarımın formülüle edilebilmesi için tasarım hedefleri ve sahanın jeolojisi de dikkate alınarak, gözleme dayanan ve analitik çözüm yöntemleriyle birlikte kullanılmalıdır. Genellikle kayanın sahip olduğu süreksizlik özelliklerini, kaya dayanımını, su durumunu, ayrışma durumunu ve yeraltı açıklığı çevresinde yer alan gerilme durumunu kullanarak kaya kalitesini belirlemeye çalışan bu yöntemler arasında ülkemizde en çok RQD - Deere, Q - Barton ve RMR - Bieniawski

sınıflamaları tünel inşaatları sırasında tercih edilmektedir. Çamlık Tüneli giriş portalı için kaya kalite sınıflamaları RQD ve RMR yöntemleri kullanılarak yapılmıştır [44].

7.4.4.1 RQD – Deere kaya kalite göstergesi

RQD kavramı Deere vd. (1967) tarafından önerilmiş ve aşağıdaki formülde gösterildiği gibi, silindirik şeklini koruyan, sağlam ve doğal süreksizlikler tarafından bölünmüş kayaç karot parçaları arasında boyu 10 cm ve 10 cm’den büyük olanların toplam uzunluğunun ilerleme uzunluğuna oranı şeklinde (yüzde olarak) denklem 7.5’te ifade edilmiştir [60].

$$RQD = \frac{\sum 10cm'den\ uzun\ karot\ parçalarının\ uzunluğu}{Toplam\ Karot\ Uzunluğu} \times 100 \quad (7.5)$$

RQD parametresi, ölçümü pratik ve pahalı olmayan bir indeks olmasına karşın, bu parametrenin bir tünelcilik destekleme ölçütü olarak tek başına kullanılması kaya kütlelerinin yeterli ve uygun bir şekilde tanımlanmasını sağlayamamaktadır. Çünkü bu parametre süreksizliklerin sıklığı, yönelimi, sıklığı ve dolgunun özellikleri, ayrıca yüzeye yakın kayaçlarda bozunmanın derecesi gibi kaya kütlelerinin önemli karakteristiklerini içermemektedir. Bu nedenle RQD günümüzde, daha geliştirilmiş sınıflama sistemlerindeki parametrelerden biri olarak kullanılmaktadır [64]. Çizelge 7.20’de RQD büyüklüklerine göre kaya kalitesi gösterilmiştir.

Çizelge 7.20 : RQD sınıflamasına göre kaya kalite sınıflaması [60].

RQD (%)	Kaya Kalitesi
< 25	Çok Zayıf
25 - 50	Zayıf
50 - 75	Orta
75 - 90	İyi
90 - 100	Mükemmel

Sondajlardan alınan karot örneklerine göre belirlenen RQD değerleri mühendislik jeolojisi değerlendirmesinde verilmiştir. Bu değerler Çizelge 7.21’de özetlenmiştir.

Çizelge 7.21 : Çamlık Tüneli ilgili kesim için RQD değerleri.

Litoloji	%	Kalite
Kumtaşı-Silttaşı	5	Çok Zayıf
Bindirme Zonu	5	Çok Zayıf
Kuvarsit	5	Çok Zayıf

7.4.4.2 RMR – Bieniawski kaya kalite sınıflaması

Jeomekanik sınıflama sistemi veya kaya kütle sınıfı (Rock Mass Rating) Bieniawski tarafından 1972-1973 arasında geliştirilmiştir. Yöntem yeni verilerle desteklenerek tekrar ele alınmış ve bazı değişiklikler yapılarak son şekli verilmiştir. RMR sistemi, kaya kütlelerinin mühendislik verilerini saptamaya yarayan bir yöntemdir. Bu yöntem tüneller, büyük yapı temelleri, şev yamaçları ve yeraltı inşaatında uygun kaya destek önlemlerinin seçiminde kullanılmaktadır [44].

RMR sistemine göre kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında aşağıda belirtilen 6 parametre esas alınmaktadır:

1. Kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı
2. RQD
3. Süreksizliklerin arasındaki mesafe (aralık)
4. Süreksizliklerin durumu
5. Yeraltı suyu koşulları
6. Süreksizliklerin yönelimleri

Bu sınıflama, Çizelge 7.22’de görülmektedir. Uygulama alanında kullanılan jeomekanik sınıflamada dikkat edilecek husus, tasarlanan mühendislik projesine bakılmaksızın önce kaya kütlelerinin niteliği hakkında genel bir değerlendirmeye gidilmesidir. Bu da sınıflama parametrelerinin ilk beşini kullanmak suretiyle elde edilir.

İlk beş parametre tek tek değerlendirilerek her biri için optimum puan belirlenir. Özellikle ‘Süreksizliklerin Durumu’ parametresi değerlendirilirken, kullanıcının daha detaylı ve daha doğru bir tahminde bulunabilmesi için tablonun E bölümünü kullanması önerilmektedir. İlk beş parametre için belirlenen puanlar toplanarak ilk RMR değeri hesaplanır. Hesaplanan RMR değerleri için süreksizlik yönelimlerine göre düzeltme yapılarak nihai RMR değerleri bulunur. RMR büyüklüklerinden yola çıkarak kayaçların yerinde mekanik özellikleri de belirlenebilmektedir [60].

İlgili kesim için RMR sınıflama parametreleri kullanılarak “Esas RMR” hesaplanmıştır. Ardından her birim için süreksizliklere bağlı düzeltmeler belirlenmiş ve nihai durum için RMR değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.23).

Çizelge 7.22 : RMR sınıflamasına göre kaya kalite sınıflaması [60].

PARAMETRE			DEĞİŞİM ARALIĞI				Bu düşük aralık için tek eksenli basma deneyi tercih edilir		
1	Kayanın Dayanımı	Nokta yükü dayanım indisi	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Tek eksenli basma dayanımı	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Sayısal Değer		15	12	7	4	2	1	0
2	Kaya Kalite Belirteci (RQD)		% 90-100	% 75-90	% 50-75	% 25-50	< % 25		
	Sayısal Değer		20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik Uzunluğu		> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Sayısal Değer		20	15	10	8	5		
4	Süreksizlik Durumu		Çok pürüzlü yüzeyler, süreksiz bitişik sert eklem yüzeyi	Az pürüzlü yüzeyler Açıklık < 1 mm Sert eklem yüzeyi	Az pürüzlü yüzeyler Açıklık < 1 mm Yumuşak eklem yüzeyi	Parlak yüzeyler veya 5 mm'den az kalınlıkta dolgu malzemesi veya açıklık 1-5 mm sürekli	5 mm'den daha kalın yumuşak dolgu maddesi veya açıklık > 5 mm sürekli		
	Sayısal Değer		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu	Tünelin her 10 m'sindeki akış	YOK	< 10 L/dak	10-25 L/dak	25-125 L/dak	> 125 L/dak		
		Eklem suyu basıncı / Büyük asal gerilme oranı	0	0	0-0,2	0,2-0,5	0,5		
		Genel durum	Kuru	Nemli	Islak	Orta miktarda su basıncı	Çok aşırı su problemleri		
	Sayısal Değer		15	10	7	4	0		
B. SÜREKSİZLİK YÖNELİMİNE GÖRE DÜZELTME									
Süreksizliklerin Doğrultu ve eğimi			Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç Uygun değil		
Puanlar	Tüneller		0	-2	-5	-10	-12		
	Temeller		0	-2	-7	-15	-25		
	Şevler		0	-5	-25	-50	-60		
C. KAYA SINIFI VE PUANLARI									
Puan			100-81	80-61	60-41	40-21	<21		
Sınıf No.			I	II	III	IV	V		
Tanımlama			Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya		
D. KAYA SINIFLARININ BAZI ÖZELLİKLERİ									
Sınıf No.			I	II	III	IV	V		
Ortalama desteksiz kalabilme süresi			15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	2,5 m açıklık için 10 saat	1 m açıklık için 30 dakika		
Kaya kütlelerinin kohezyonu (kPa)			>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı			>45	35-45	25-35	15-25	<15		
E. SÜREKSİZLİKLERİN DURUMUNUN PUANLANDIRILMASI İÇİN ÖNERİLEN REHBER									
Süreksizliğin uzunluğu			<1 m 6	1-3m 4	3-10m 2	10-20m 1	>20m 0		
Süreksizlik açıklığı puanı			Yok 6	<0,1mm 5	0,1-1mm 4	1-5mm 1	>5mm 0		
Pürüzlülük puanı			Çok pürüzlü 6	Pürüzlü 5	Az pürüzlü 3	Düz 1	Kaygan 0		
Dolgu puanı			Yok 6	Sert Dolgu<5mm 4	Sert Dolgu>5mm 4	Yumuşak Dolgu<5mm 2	Yumuşak Dolgu>5mm 0		
Ayrışma puanı			Ayrışmamış 0	Az ayrılmış 5	Orta derecede ayrılmış 3	Çok ayrılmış 1	Tümüyle ayrılmış 0		
F. TÜNELDE SÜREKSİZLİK EĞİM VE DOĞRULTUNUN ETKİSİ									
Doğrultu tünel eksenine dik					Doğrultu tünel eksenine paralel				
Eğim yönünde ilerleme 45°-90°			Eğim yönünde ilerleme 20°-45°		Eğim 45°-90°		Eğim 20°-45°		
Çok uygun			Uygun		Hiç uygun değil		Orta		
Eğime karşı yönde ilerleme 45°-90°			Eğime karşı yönde ilerleme 20°-45°		Doğrultuya bakılmaksızın eğim 0°-20°				
Orta			Uygun değil		Orta				

Çizelge 7.23 : Çamlık Tüneli ilgili kesim için nihai RMR sınıflaması sonuçları [44].

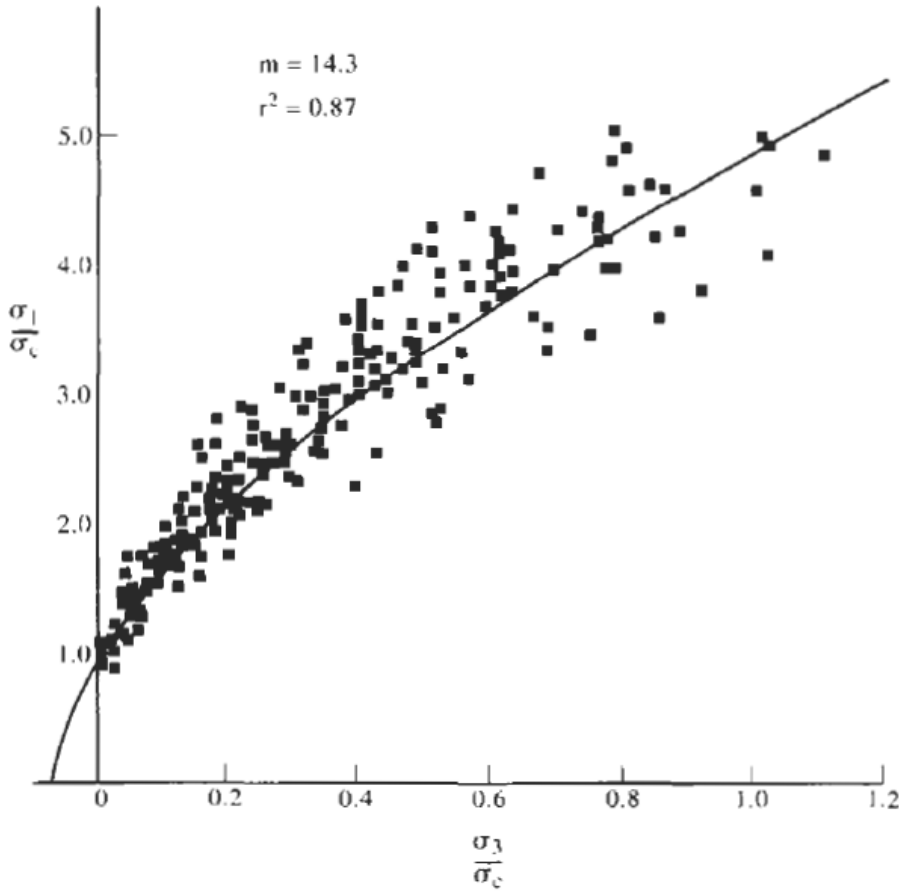
Litoloji	Kumtaşı-Silttaşı	Bindirme Zonu	Kuvarsit
Kayanın Dayanımı	4 (25 MPa)	2 (14 MPa)	2 (21 MPa)
RQD	3 (% 5)	3 (% 5)	3 (% 5)
Süreksizlik Uzunluğu	5	5	8
Süreksizlik Durumu	0	0	0
Yeraltı Suyu	7	7	7
Esas RMR	19	17	20
Düzeltilme	-5	-5	-2
Nihai RMR	14	12	18
Kaya Kalitesi	Çok Zayıf Kaya	Çok Zayıf Kaya	Çok Zayıf Kaya

7.5 Jeomekanik Değerlendirme

Aşağıdaki bölümde Çamlık Tüneli ilgili kesim için kaya parametrelerinin ampirik hesabı anlatılmıştır.

7.5.1 Hoek - Brown yöntemi ile yerinde (in-situ) kaya dayanımı tespiti

Kaya kütlelerinde dayanım özelliklerinin tayini konusunda yapılan çalışmalar sonucunda çeşitli görgül yenilme ölçütlerinin en yaygın kullanılabilecek olanı Hoek - Brown yenilme ölçütüdür. Bu yenilme ölçütü ile kaya kütlelerinin doruk (pik) dayanım parametreleri belirlenmektedir. Cai vd. (2006) kaya kütlelerinin artık dayanım parametrelerinin Hoek - Brown yenilme ölçütü ile belirlenebilmesi için yenilme yüzeyi boyunca gelişecek yeni süreksizlikler nedeniyle GSI (Jeolojik Dayanım İndisi) puanının azalacağını belirtip, artık dayanım parametrelerinin belirlenmesi için farklı bir grafik önermiştir [73]. Şekil 7.16'da görülen grafik, yapılan deneylerin sonuçlarına en iyi uyan eğrinin belirlenmesi ve buradan ampirik bir ifadenin ortaya çıkarılması için kullanılmıştır. ' $\sigma_1 - \sigma_3$ 'ü ifade eden en iyi ampirik ifade bu deney sonuçlarından yola çıkılarak belirlenmiştir [74].



Şekil 7.16 : Hoek - Brown ampirik yenilme kriteri [73].

Hoek - Brown yenilme ölçütü ampirik bir yenilme ölçütü olup, kaya ile ilgili çatlak mekaniğinin deneysel ve kuramsal etkileşimi temel alınarak Griffith (1924) teorisinin de irdelenmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Özellikle ölçütün oluşumunda ilgilenilen, basınç gerilmeleri altında gevrek (kırılgan) kayalarda izlenen yenilme koşullarına uyan bir ilişki olmasıdır. Ölçütün oluşmaya başlamasında deneme yanılma yöntemi de önemli bir yer tutmaktadır [74].

Hoek - Brown yenilme ölçütünün oluştuğu ilk şekli denklem 7.6'da ifade edilmiştir.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{0,5} \quad (7.6)$$

σ_1 : Yenilme anında uygulanan en büyük asal etkin gerilme,

σ_3 : Yenilme anında uygulanan en küçük asal etkin gerilme,

σ_c : Sağlam ve çatlaksız kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı,

m ve s : Kayanın türüne, özelliklerine ve asal gerilmeler uygulanmadan önceki çatlaklık derecesine bağlı istatistiksel değişkenlerdir.

Ayrıca ‘m’ ve ‘s’ değişkenlerinden; ‘s’ değişkeni, kaya kütlelerinin içerdiği bloklarla taneler arasındaki çekme dayanımına ve süreksizlikler tarafından sınırlanan kaya malzemesi parçalarının birbirine kenetlenme derecesine bağlı bir sabittir [75].

Kaya malzemesi (sağlam ve çatlaksız kaya kütlesi) için $s = 1$ iken, kaya kütlelerinin kalitesine göre 1’den 0’a doğru azalmaktadır. Kaya malzemesi için (sağlam ve çatlaksız kaya kütlesi) s değeri ‘ s_i ’ olarak yazılırken kırılmış/yenilmiş kaya kütlesi için ‘ s_r ’ şeklinde ifade edilir. Tamamen kırılmış kaya içinse $s = 0$ kabul edilir [75].

‘m’ danelerin doğrudan birbirine bağlanma derecesine bağlıdır. Ana masif kayada bu değer çok yüksek iken parçalanma ve ayrışma arttıkça bu değer düşer. Kaya tipine ve mekanik kalitesine bağlı olan bu parametreyle ilgili sınır değerler verilememektedir [75].

GSI (Jeolojik Dayanım İndisi) Hoek tarafından ilk olarak 1994 yılında kullanılmıştır. Kullanılmasındaki amaç farklı jeolojik durumlardaki kaya kütle dayanımını azaltmaktır. Kaya kütlelerinde Hoek - Brown mukavemet kriteri parametrelerinin belirlenmesi için GSI değerine ihtiyaç vardır. GSI değerleri tam olarak kaya kütlesi sınıflandırması yapmayı amaçlamaz, daha çok kalitesini verir [74].

Tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) ve malzeme sabiti (m_i) nin en güvenilir değerleri üç eksenli basma dayanımı deneylerinden sağlanmaktadır. Ancak zaman ve bütçe kısıtlamaları söz konusu olması durumunda bu değerler Çizelge 7.24’ten alınabilir [74].

Bu değerler, foliasyona dik yönde deneye tabi tutulmuş kaya malzemeleri için olup, yenilmenin foliasyon düzlemi boyunca gerçekleşmesi halinde ‘ m_i ’ önemli ölçüde farklı olacaktır [76].

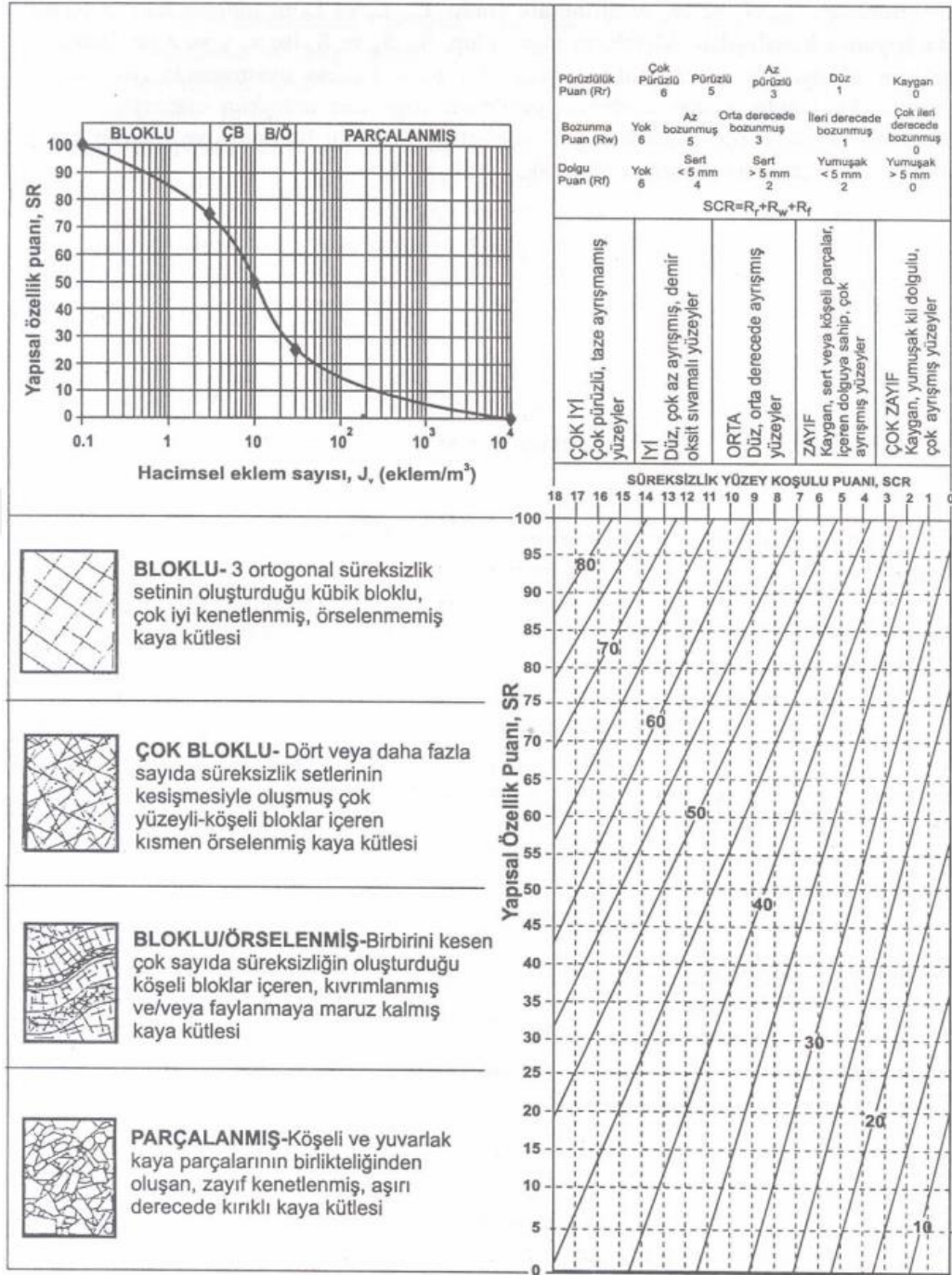
Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından önerilen sayısal GSI abağı orijinal GSI abağına Hoek (1999) tarafından eklenen “sağlam veya masif kaya” sınıfı dikkate alınarak modifiye edilmiştir [77, 78]. Hoek - Brown yenilme ölçütü en az üç eklem takımına sahip, homojen ve izotrop kaya kütleleri ile kaya malzemelerinin dayanımlarının belirlenmesi amacıyla önerilmiştir. Laminalı, foliasyonlu kaya kütlelerinde dayanım yönserliliğinin daha da önem kazanması, ölçütün bu tür kaya kütlelerinde uygulanmasına olanak sağlamamaktadır. Bu nedenle, sayısal GSI abağıyla ilgili değişiklikleri yaparlarken laminasyonlu-foliasyonlu kaya kütlelerini dikkate almamışlardır (Çizelge 7.25) [77].

Çizelge 7.24 : Kayaç malzemesi için mi sabitinin değerleri, parantez içindeki değerler tahmini değerlerdir [79].

Kayaç Tipi	Sınıf	Grup	Doku			
			İri	Orta	İnce	Çok ince
SEDİMANTER	Klastik		Konglomera (22)	Kumtaşı 19 Grovak (18)	Silttaşı 9	Kiltaşı 4
	Klastik-Olmayan	Organik	Tebeşir 7 Kömür (8-21)			
		Karbonatlı	Breş (20)	Sparitik Kireçtaşı (10)	Mikritik Kireçtaşı 8	
		Kimyasal		Jips 16	Anhidrit 13	
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer 9	Hornfels (19)	Kuvarsit (24)	
	Düşük Foliasyonlu		Migmatit (30)	Amfibolit 31	Milonit (6)	
	Foliasyonlu		Gnays 33	Şist (10)	Fillit (10)	Sleyt 9
MAGMATİK	Açık	Granit 33 Granodiyorit (30) Diyorit (28) Gabro 27 Norit 22		Riyolit (16) Dasit (17) Andezit 19 Bazalt (17)	Obsidiyen (19)	
	Koyu		Dolerit (19)			
	Püskürük Piroklastik		Aglomera (20)	Breş (18)	Tüf (15)	

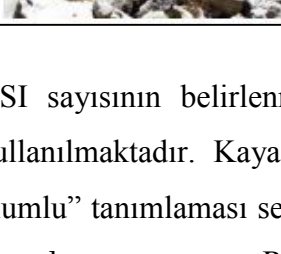
Şev duraysızlıklarının geriye dönük analiz sonuçlarından da yararlanan ve örselenme faktörünü de dikkate alan araştırmacılar ‘a’ ve ‘s’ parametreleriyle ilgili değişiklikler de yapmışlardır [75].

Çizelge 7.25 : Sönmez ve Ulusay tarafından önerilen modifiye edilmiş GSI sistemi [75].



Ölçütü geliştirenler tarafından daha önce dikkate alınmayan örselenme faktörü, ölçütün son versiyonuna dâhil edilmiş ve 'D' simgesiyle gösterilmiştir. 'D', patlatma hasarı ve kazı sırasında gelişen gerilme boşalmasına maruz kalan kaya kütlesinin örselenme derecesine bağlı bir faktördür. Bu faktör, örselenmemiş kaya kütlesi için sıfırdan örselenmiş kaya kütlesi için 1'e kadar değişen değerler almakta olup, D'nin seçimi için önerilmiş kılavuz Çizelge 7.26'da verilmiştir [64].

Çizelge 7.26 : Örselenme faktörü D'nin tahmini için kılavuz [80].

Kaya Kütlesi Görünümü	Kaya Kütlesi Tanımı	Önerilen Örselenme Faktörü (D) değeri
	Çok iyi kalitede denetimli patlatma veya TBM kazısı sonucunda tüneli çevreleyen kaya kütlesinde minimum örselenme.	D=0
	Zayıf kaya koşullarında mekanik veya elle yapılan kazılar (patlatmasız) sonucunda çevre kayalarda minimum örselenme.	D=0 D=0.5 (invert yok)
	Sıkışma problemlerinin ciddi taban kabarmasına neden olduğu tünellerde fotoğrafta görülen geçici invert yerleştirilmediği sürece, şiddetli örselenme olabilir.	D=0.8
	Sert kaya tünellerindeki zayıf kalitede patlama, çevre kaya kütlesinde 2 veya 3 m uzanan yersel hasarlara neden olabilir.	D=0.7 İyi patlatma D=1.0 Kötü patlatma
	Kazı şevlerinde küçük ölçekli patlatmalar, özellikle denetimli patlatmalar, fotoğrafın solunda görüldüğü üzere kaya kütlesinde orta derecede hasar oluşturur. Ancak gerilme ferahlaması bir miktar örselenmeye neden olabilir.	D=1.0 Üretim patlatması D=0.7 Mekanik kazı
	Çok geniş açık maden işletmeleri şevleri ağır üretim patlatmaları ve örtü yükünün kaldırılması ile oluşan ferahlama nedeniyle önemli derecede örselenmeye uğrar.	
	Bazı daha yumuşak kayalarda kazının ripperleme veya dozerle açılması durumunda şevlerdeki hasar derecesi daha az olmaktadır.	

GSI sayısının belirlenmesinde esas olarak RMR (Kaya Kütle İndeksi) sistemi kullanılmaktadır. Kaya kütlesi tamamen kuru, süreksizliklerin konumu ise “çok olumlu” tanımlaması seçilmekte ve 0 puan verilmektedir. Bu nedenle, GSI sayısının hesaplanmasına esas RMR değerinin tespit edilmesinde süreksizlik düzlemlerinin konumuna bağlı düzelme “sıfır” alınırken; yeraltı suyu puanı RMR76 versiyonu için 10, RMR89 versiyonu için 15 kabul edilmektedir.

GSI tayini için RMR sisteminin 1976 versiyonunun kullanılması durumunda kaya sınıflamasından elde edilebilecek en düşük puan 18'dir. Bu bağlamda; $RMR_{76} > 18$ olması koşulu ile,

$$GSI = RMR_{76} \quad (7.7)$$

denklem 7.7'deki gibi alınabilir.

Diğer taraftan, GSI tayini için RMR sisteminin 1989 versiyonunun kullanılması durumunda kaya sınıflamasından elde edilebilecek en düşük puan 23'tür. Bu değer 1976 versiyonundaki minimum değerden biraz fazladır. Bu bağlamda; $RMR_{89} > 23$ olması koşulu ile,

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (7.8)$$

denklem 7.8'deki gibi alınabilir [60, 74].

7.5.2 RocLab programı ile parametre hesabı

Araştırmacılar tarafından hazırlanan ve RocLab adı verilen yazılım yardımı ile ilgili jeomekanik büyüklükler belirlenebilmektedir. RocLab, Hoek-Brown yenilme kriterlerini esas alan kaya kütlesi mukavemet parametrelerini belirlemek için geliştirilmiş bir yazılım programıdır. Kaya mekaniğinde sayısal modelleme alanında karşılaşılan en önemli engellerden biri kaya kütlesi özelliklerinin veri girişi kısmıdır. Kaya kütlesi özelliklerinin veri girişi güvenilir değilse analiz programları ve yapılan modellemeler büyük ölçüde sınırlı kalmaktadır [64].

RocLab yazılımı Hoek-Brown yenilme kriterlerinin uygulanması için kolay ve basit bir uygulama sağlar, kaya kütlesi özelliklerinin belirlenmesinde güvenilir tahminlerin elde edilmesine olanak sağlar ve yenilme zarfı üzerinde kaya parametrelerini değiştirmenin yarattığı etkileri görselleştirir [81].

7.5.2.1 Hoek-Brown sınıflandırması

Mukavemet parametreleri belirleme;

Kaya kütlesinin genelleştirilmiş Hoek-Brown mukavemet parametrelerinin belirlenmesi aşağıdaki veri girişlerine dayanır [81].

- Kayada serbest basınç dayanımı **sigci**
- Bozulmamış kaya parametresi sabiti **mi**
- Jeolojik dayanım indeksi **GSI**
- Bozulma faktörü **D**

Kaya kütlesi deformasyon modülü belirleme;

Kaya kütlesi deformasyon modülünün belirlenmesi aşağıdaki verilere dayanır.

- Sağlam kaya deformasyon modülü **E_i**
- E_i değeri **MR** modül oranı kullanılarak tahmin edilebilir.

$E_i = MR \times \text{sigci}$ bağıntısı kullanılabilir [81].

7.5.2.2 Hoek-Brown kriterleri

Sigci, GSI, m_i ve D parametreleri RocLab programına girildiğinde Hoek-Brown yenilme kriterleri olan m_b, s ve a değerlerini hesaplar [81].

m_b, s, a : Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'ne bağlı kaya kütle karakteristiği sabitleri

7.5.2.3 Yenilme zarfı aralığı

Yenilme zarfı aralığının Mohr-Coulomb parametreleri üzerinde direkt bir etkisi vardır [81].

- Uygulanacak alan; genel, tünel, yamaç vb.
- $\sigma_{3max} = \text{sigci} / 4$.
- Birim ağırlık
- Yarma veya şev yüksekliği

7.5.2.4 Mohr-Coulomb dayanım parametreleri

Mohr-Coulomb dayanım parametreleri kohezyon ve içsel sürtünme değerleri elde edilir. En uygun Mohr-Coulomb dayanım zarfı tünel veya şev stabilitesi gibi bir gerilim alanında belirlenir [80].

7.5.2.5 Kaya kütlesi parametreleri

RocLab programı aşağıdaki kaya kütlesi parametrelerini hesaplar:

- Sigt (kaya kütlesi çekme dayanımı)
- Sigc (tek eksenli kaya kütlesi basınç dayanımı)
- Sigma (küresel kaya kütlesi basınç dayanımı)
- Erm (kaya kütlesi deformasyon modülü)

Bulunan GSI ve RMR değerleri ile RocLab'de kullanılacak diğer parametreler Çizelge 7.27'de gösterilmektedir. Çizelgede verilen süreksizlik özellikleri kullanılarak Çamlık Tüneli ilgili kesim için yerinde kaya dayanımları hesaplanmıştır. Hesaplarda

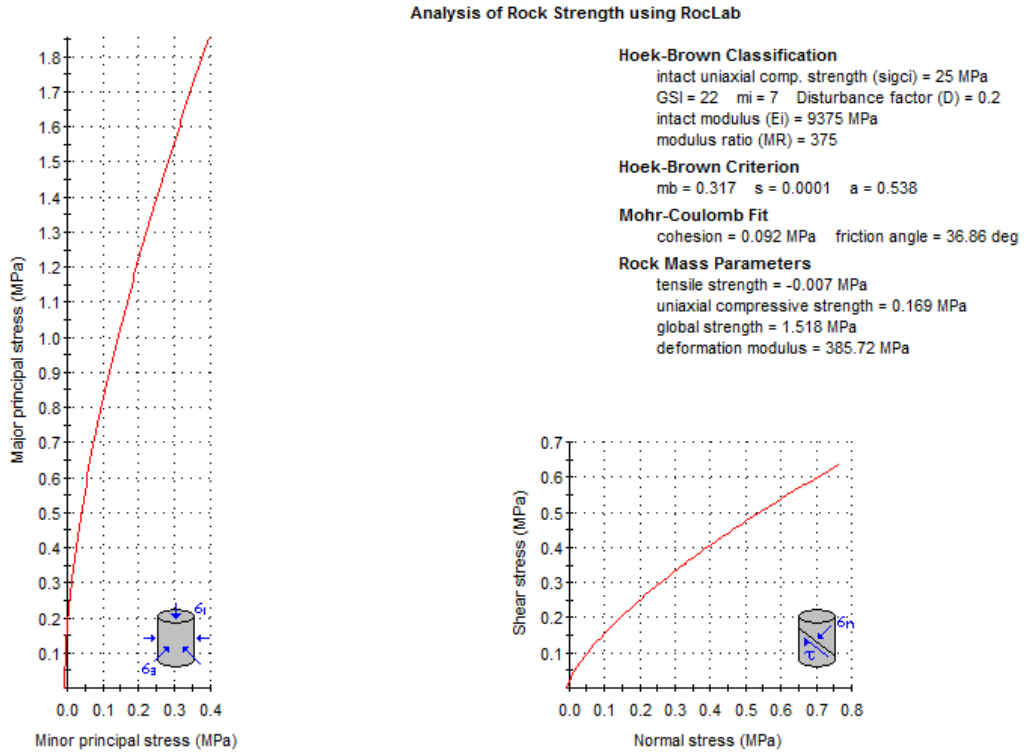
kullanılacak olan Mohr-Coulomb dayanım parametrelerine ait sonuçlar Çizelge 7.28’de verilmiş olup RocLab programına ait çıktılar sırasıyla Şekil 7.17, 18 ve 19’da gösterilmiştir.

Çizelge 7.27 : Hoek – Brown Yöntemine göre süreksizlikler.

Litoloji	σ_{ci} (MPa)	RMR	GSI	m_i	D	MR	γ (MN/m ³)	h (m)
Kumtaşı-Silttaşı	25	27	22	7	0,2	375	0,027	30
Bindirme Zonu	14	25	20	7	0,2	350	0,025	30
Kuvarsit	21	28	23	20	0,2	375	0,026	25

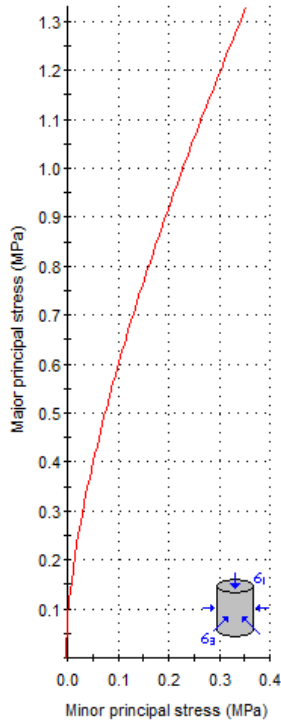
Çizelge 7.28 : Hoek – Brown Yöntemine göre yerinde jeomekanik büyüklükler.

Litoloji	c (MPa)	ϕ (°)	E (MPa)
Kumtaşı-Silttaşı	0,092	36,86	385,72
Bindirme Zonu	0,065	32,13	184,72
Kuvarsit	0,106	47,11	339,45



Şekil 7.17 : Kumtaşı-Silttaşı birimi için yerinde jeomekanik büyüklükler.

Analysis of Rock Strength using RocLab



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 14 MPa
 GSI = 20 m_i = 7 Disturbance factor (D) = 0.2
 intact modulus (E_i) = 4900 MPa
 modulus ratio (MR) = 350

Hoek-Brown Criterion

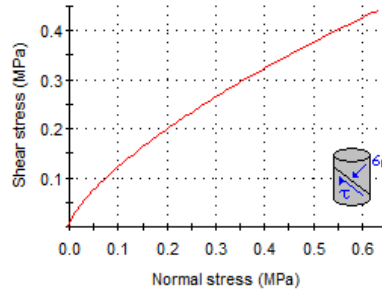
m_b = 0.293 s = 0.0001 a = 0.544

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.065 MPa friction angle = 32.13 deg

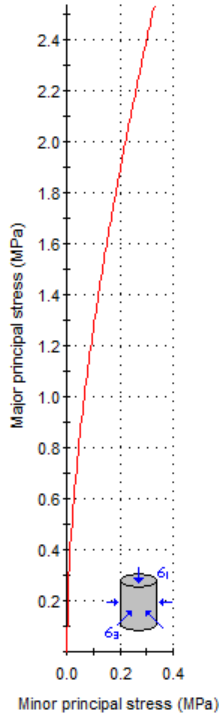
Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.003 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.079 MPa
 global strength = 0.788 MPa
 deformation modulus = 184.72 MPa



Şekil 7.18 : Bindirme Zonu birimi için yerinde jeomekanik büyüklükler.

Analysis of Rock Strength using RocLab



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 21 MPa
 GSI = 23 m_i = 20 Disturbance factor (D) = 0.2
 intact modulus (E_i) = 7875 MPa
 modulus ratio (MR) = 375

Hoek-Brown Criterion

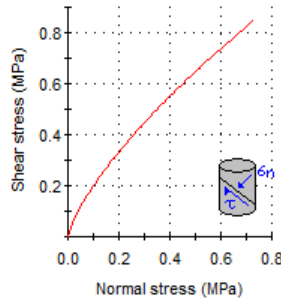
m_b = 0.942 s = 0.0001 a = 0.536

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.106 MPa friction angle = 47.11 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.002 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.155 MPa
 global strength = 2.311 MPa
 deformation modulus = 339.45 MPa



Şekil 7.19 : Kuvarsit birimi için yerinde jeomekanik büyüklükler.

7.6 Jeoteknik Değerlendirme

7.6.1 NATM kaya destek sınıfının belirlenmesi

Kuzey Marmara Otoyolu projesi kapsamında yapılmakta olan Riva ve Çamlık Tünelleri için mevcut birimlerin mühendislik jeolojisi özelliklerine dayanılarak, laboratuvar deneyleri ve ampirik hesaplar sonucunda homojen bölgelendirme yapılmıştır. Homojen bölgelendirme çalışmaları sırasında portal bölgeleri, zayıf zemin/kaya koşullarının olduğu sığ örtü kalınlığının bulunduğu kesimler, derin kırılma, sık eklem ve ayrışma potansiyeli olan kaya/zemin birimleri, su taşıyıcı zonlar, akifer özelliği olan litolojiler, fay zonları ve özellikleri, uyumsuzluk yüzeyleri ve şişme potansiyeli olan düzeyler, derin kesimler göz önünde bulundurulmuştur.

Belirlenen homojen bölgelerin her biri için ayrı ayrı RMR (Kaya Kütle İndeksi) kaya kütle sınıflaması yapılmıştır. Kaya kütle sınıfını belirlemeye yönelik yapılan bu sınıflamalardan yola çıkılarak, Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) ve ÖNORM B2203 standardına uygun kaya destek sınıflarına karar verilmiştir [82, 83]. Çizelge 7.29’da kaya kalite sınıflamaları ile NATM sınıfları arasındaki ilişki gösterilmektedir.

Çizelge 7.29 : NATM ile Q ve RMR ilişkisi.

Q	RMR	NATM/KTŞ
1000-70	100-80	A1
70-10	80-64,9	A2
10-4	64,9-57,8	B1
4-1	57,8-47	B2
1-0,1	47-29,1	B3
0,1-0,031	29,1-20	C1
0,031-0,016	20-15	C2
0,016-0,008	15-10	C3
0,008-0,002	10-5	C4
0,002-0,001	5-2,5	C5

Yukarıdaki değerler göz önüne alınarak Çamlık Tünelinin su deposu altından geçtiği kesime ait NATM sınıfı C3 olarak belirlenmiştir. Belirlenen NATM C3 destek sınıfı hakkında genel bilgiler aşağıda verilmiştir [82].

C3 Kaya Destek Sınıfı

- *Kaya Kütlesinin Davranışı:* “Çok baskılı” kaya kütlesi olarak adlandırılır. C3, derin zayıflık zonlarının oluşması, başlangıçta yüksek ve hızlı deformasyonlar ile karakterize edilir. Deformasyonlar uzun sürer ve yavaş son bulur. Derine inen kırılma ve plastik bölgeler gözlenir.
- *Su Etkisi:* Su sızıntıları ve konsantre su akışının kaya kütlesinin davranışı üzerinde önemli etkisi olmaktadır.
- *Kazı:* Tünel kazısının üst yarı kazısı, alt yarı ve taban kazısı olarak bölünmesi zorunludur. Genellikle üst yarı kazısı aynasında bir destekleme gövdesi gerekecektir. Aynada sistematik destekleme gerekebilecektir. İlerleme adımı uzunluğu, üst yarı kazısında 1,2 m’den, alt yarıda ise 2,0 m’den fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlatma veya mekanik kazı metotlarıyla yapılacaktır. Tıraşlamadan hemen sonra püskürtme beton kaplaması gerekmektedir. Yoğun bir destekleme paterni tüm kazı aynalarında gerekecektir. Deformasyon mertebeleri, deformasyon boşlukları ve/veya büyük deformasyonlara cevap verebilecek destek elemanlarının kullanımı gibi özel bir tertibat gerektirecektir. Destekleme elemanları, kaya kütlesinin üç eksenli gerilme durumunu idame ettireceklerdir. İlerleme adımı uzunluğunun kısaltılması, süren boyunun uzatılması ve üst yarı kazısı aynasında büyük bir merkez destekleme gövdesinin bırakılmasının yeterli olmaması halinde ayna kazısının ayrıca alt kısımlara bölünmesi gerekebilir. Muhtemel çözümler, üst yarı kazısının yarı taraf kazılar veya yan galeriler halinde yapılması olabilir. Komple kazı bölümünün aşırı düşey hareketleri olması halinde, kaplama temelini genişletilmesi, püskürtme beton kabuğunun temel bölgesinin bulonlanması ve enjeksiyonlanması veya geçici taban kemerleri gerekli olabilir.
- *Destekleme ve Zamanlaması:* Tüm tünel desteklemesi sistematik olarak, üst yarı ve alt yarı kazı aynasının daha fazla ilerletilmesinden önce tatbik edilir. Tüm tavan kesimi üzerinde süren boru kullanımı gerekecektir. Süren için delme veya benzeri işlemlerin aynadaki veya tavandaki kaya kütlesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenecektir. Üst yarı kazısında alt bölümlere ayrılmış enkesit ve geçici ring yapıları gerekli olabilir. Üst yarı kazısı aynasından 25-50 m geride taban kemerinin ring kapaması gerekebilecektir.

7.6.2 Tünel tip kesitinin tasarımı

Dört şeritli çift tüplü olarak planlanan Çamlık Otoyolu Tüneli açıldığı kesit alanı bakımından Türkiye’de bir ilk olma özelliği taşımaktadır. Otoyol veya karayolu tünelleri kapsamında Türkiye’de en fazla 3 şeritli tüneller inşa edildiğinden Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü’nün karayolu ve otoyollarda projelendirilecek tüneller için belirtmiş olduğu teknik şartname içerisinde 4 şeritli tünel tip kesitleri bulunmamaktadır [83]. Bu sebeple Kuzey Marmara Otoyolu kapsamındaki Çamlık Tünelinin tasarım aşamasında tip kesitlerin belirlenmesinde, Karayolları Teknik Şartnamesinin belirtmiş olduğu kriterler de göz önünde bulundurularak, özgün bir çalışma yapılmıştır.

Tasarım aşamasında tip kesitler oluşturulurken birçok etken göz önüne alınmıştır. Geniş açıklıklı tünel tasarımı için dikkate alınan ilk etken minimum kazı alanı içerisinde kalınarak stabil bir yapı oluşturmaktır. Bu aşamada, minimum kazı alanını belirleyen en önemli faktör olan, Karayolları Teknik Şartnamesinin önerdiği gabari kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Çamlık Tünelinin gabarisi 15,5 m x 5,0 m’dir (3,75 m x 4 şerit + 0,25 m x 2 banket = 15,5 m). Çamlık Otoyolu Tüneli jeolojik ve jeoteknik özellikler bakımından zayıf birimler içerisinde kalmaktadır. Bu sebeple Çamlık Tüneli için Şekil 7.20’de gösterilen taban kemerli (invertli) tünel tip kesiti tasarlanmıştır.

7.6.3 Tünel kazı aşamalarının tasarımı

Birçok ülkede geniş açıklıklı, büyük kazı kesitine sahip tüneller NATM tekniğine göre açılmaktadır. Farklı zemin/kaya koşullarında yapılacak olan kazılar için NATM, ortam gerilmeleri ve esnekliği açısından uyumluluk göstermektedir. NATM ile yapılan kazı esnasında başlayan deplasmanlar; kazının hızı, tünel aynası ve destekleme arasındaki mesafe, parçalı kazı ve taban kemeri kazısının kapatılması ile kontrol edilebilmektedir [84].

Kuzey Marmara Otoyolu projesi kapsamında yer alan 4 şeritli geniş açıklıklı Çamlık Tünelinde çok parçalı kazı tipi tasarlanırken birçok etken göz önünde bulundurulmuştur. Bunlardan en önemlisi aynada görülebilecek jeolojik koşulları (çatlak, zayıf dayanımlı dolgu vs.) kontrol edebilmektir. Ayrıca bu tür çok parçalı, kırıklı, ayrılmış kesimlerde büyük boşluklar açmak tünel üzerinde oluşacak olan

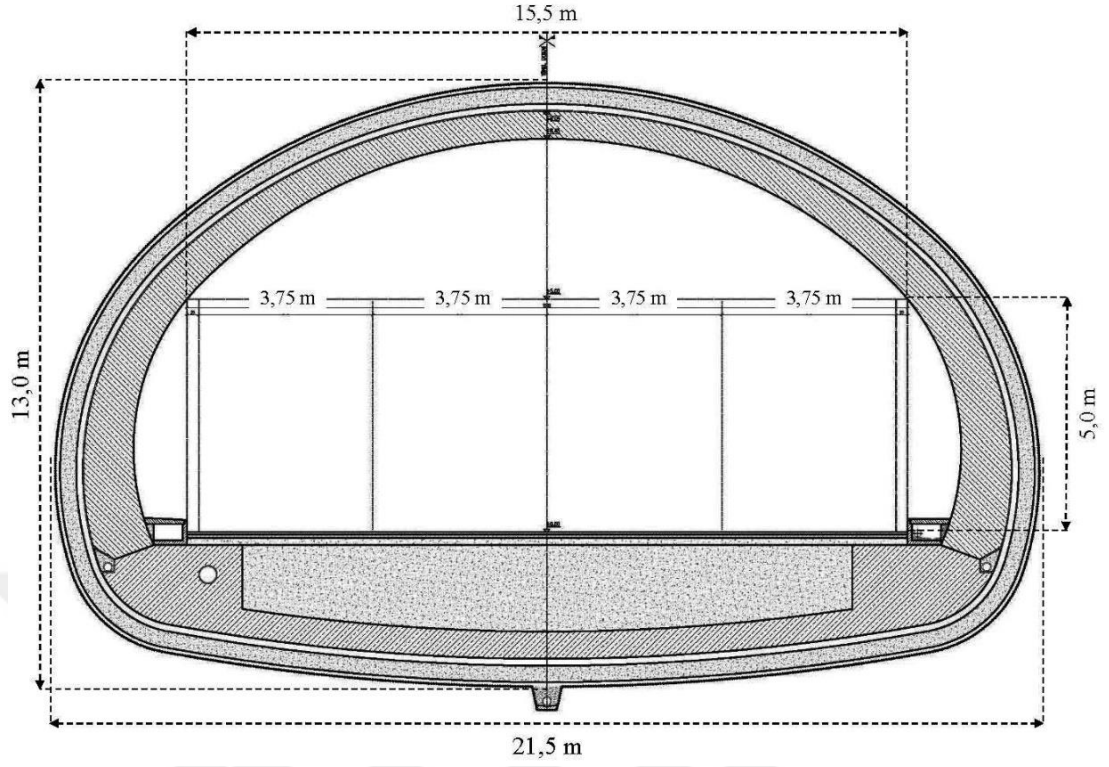
plastikleşme bölgelerini arttırır. Açılan boşlukların desteklemeler yerleştirilene kadar kendini tutabilme süreleri de tek seferde yapılan kazının büyüklüğüne bağlıdır. Bu büyüklük aynı zamanda kullanılacak desteklemelerin tek parçada konulamayacak kadar büyük olmalarına da neden olur [85]. Bu sebeplerle zayıf dayanımlı kaya biriminde açılan Çamlık Tüneli için 6 aşamalı kazı tipi oluşturulmuştur (Şekil 7.21).

7.6.4 Tünel destekleme tip kesitinin tasarımı

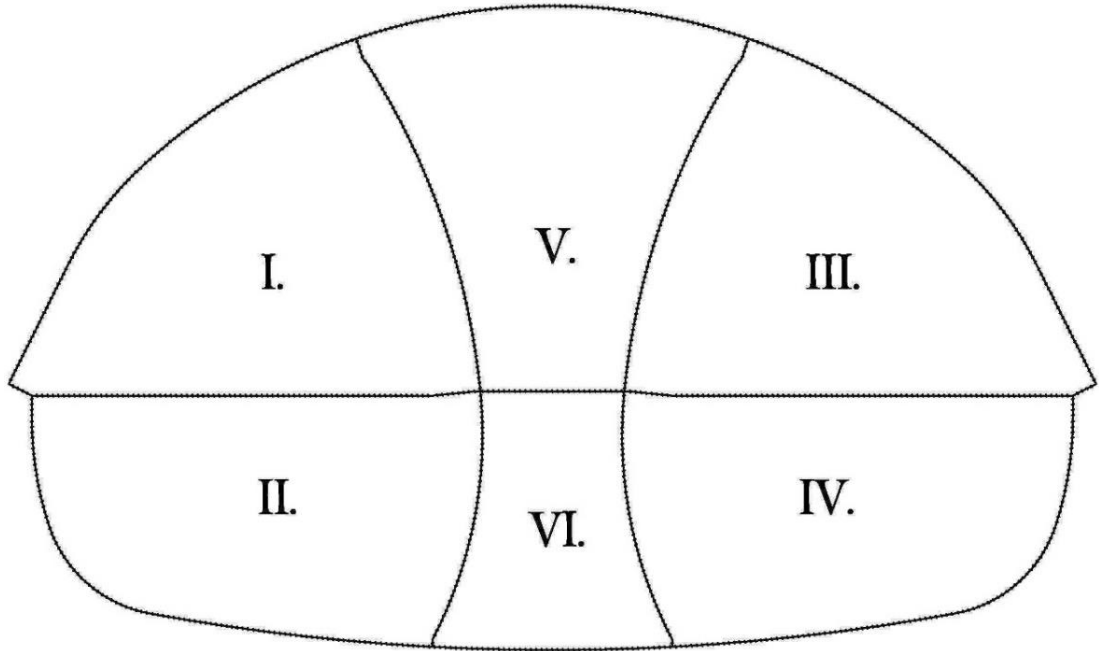
Arazi ve laboratuvar deneylerine dayalı jeoteknik hesaplamalar ile belirlenen NATM C3 kaya destek sınıfı için Karayolları Teknik Şartnamesine uygun destekleme tip kesiti oluşturulmuştur (Şekil 7.22). Çamlık Tünelinin ilgili kesiminde kullanılan desteklemelere ait özellikler Çizelge 7.30’da verilmiştir.

Çizelge 7.30 : Çamlık Tüneli NATM C3 kaya destek sınıfı için önerilen destekleme elemanları

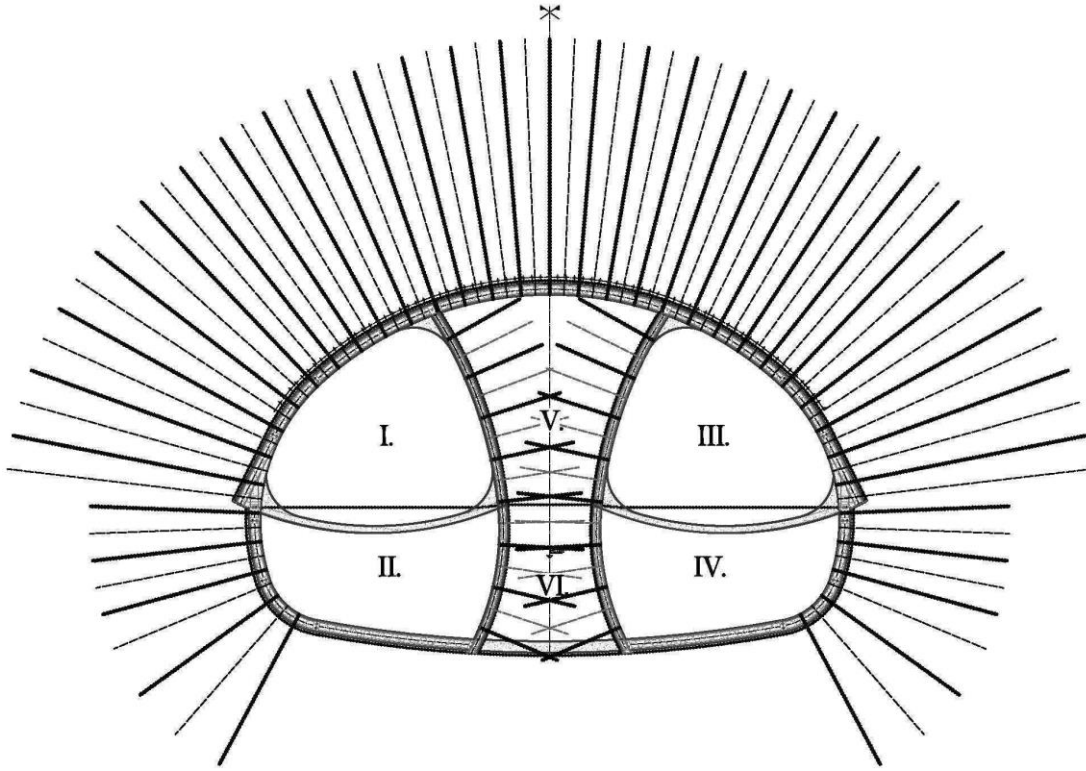
Destekleme Tipi \ NATM			C3		
			Geçici	Kalıcı	
Süren	Çap		–	4”	
	Kesim		–	Üst Yarı-Omuz	
	Miktar		–	Tek sıra	
	Aralık		–	30 cm	
	Uzunluk		–	9 m	
	Bindirme Boyu		–	4 m	
Püskürtme Beton	Tip		C25/30	C25/30	
	Kalınlık		30 cm	40 cm	
Çelik Hasır	Tip		Q221/221	Q377/377	
	Adet		2 kat	2 kat	
Kafes İksa	Tip		φ32x1 / φ26x2	φ32x1 / φ26x2	
Kaya Bulonu	Tip		PG	PG	
	Çap		32 mm	32 mm	
	Adet	Üst yarı	14-16	27-28	
		Alt Yarı		4-5	
		İnvert		–	
	Boy	Üst yarı	3 m	9 m	
		Alt Yarı		6 m	
		İnvert		–	
	Radyal Aralık	Üst yarı	1,5 m	1 m	
		Alt Yarı		1 m	
		İnvert		–	
	Round Boyu	Üst Yarı		0,8 m	0,8 m
		Alt Yarı		1,6 m	1,6 m
İnvert			İnvert	İnvert	
Deformasyon Toleransı			–	20 cm	
Yapım Toleransı			–	10 cm	



Şekil 7.20 : Çamlık Tüneli taban kemerli (invertli) tünel tip kesiti.



Şekil 7.21 : Çamlık Tüneli 6 aşamalı kazı tip kesiti.



Şekil 7.22 : Çamlık Tüneli NATM C3 kaya destekleme tip kesiti.

7.7 PLAXIS Programı ile Stabilité Analizi

Kuzey Marmara Otoyolu kapsamındaki Çamlık Tüneli giriş kesiminde yapılan imalat sırasında, su deposu ile tünel arasındaki karşılıklı etkileşimi görebilmek, gerekli önlemleri alarak uygun bir destekleme sistemi tasarlayabilmek amacıyla, bölgedeki en kritik kesit üzerinde nümerik analizler yapılmıştır.

7.7.1 Sonlu elemanlar yöntemi ile sistemin modellenmesi

Çamlık Tüneli su deposu kesiminde yapılan tünel stabilite ve yüzey oturma analizleri, sonlu elemanlar metodu ile çözümleme yapan PLAXIS 2D programı ile gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin temelini oluşturan, sistemin çözümü bilinen sonlu sayıda elemana bölünmesi esası, sistemin modellenmesinin ilk adımını oluşturmaktadır. Modelleme işleminde program tarafından oluşturulan elemanların, daha hassas bir analiz için özellikle tünel çevresinde daha sık bulunmalarına dikkat edilmiştir [40].

Çamlık Tüneli su deposu-tünel stabilite ve tasman analizleri için Km 3+810 kesiti seçilmiştir. Bu kesit tünelin NATM C3 sınıfı kayada, su deposunun altında kalan ve

Sistemin hesap modeli oluşturulduktan sonra Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılarak mevcut birimlere ait jeomekanik parametreler tanımlanmıştır. Mohr-Coulomb malzeme modelinde, zemine ait geomekanik özellikleri tanımlamak amacıyla programa zeminin deformasyon modülü (E), kohezyonu (c), içsel sürtünme açısı (ϕ), poisson oranı (ν) ve birim hacim ağırlığı (γ) verileri girilmektedir. Her birim için ayrı olarak belirlenmiş olan Mohr-Coulomb malzeme modeline ait veriler Çizelge 7.31’de görülebilmektedir.

Litoloji	E (kN/m ²)	c (kN/m ²)	φ (°)	ν	γ (kN/m ³)
Kumtaşı-Silttaşı	385.000	90	36	0,30	27
Bindirme Zonu	70.000	65	32	0,35	25
Kuvarsit	340.000	105	47	0,30	26
Dolgu	50.000	5	30	0,39	19

99

Çizelge 7.32 : Kaplama malzemeleri için analizde kullanılan parametreler.

	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)	w (kN/m/m)	ν
25 cm (taze)	1.250.000	6.510	6,0	0,2
25 cm (katı)	3.750.000	19.530	6,0	0,2
30cm (taze)	1.500.000	11.250	7,2	0,2
30 cm (katı)	4.500.000	33.750	7,2	0,2
40 cm (taze)	2.000.000	26.670	9,6	0,2
40 cm (katı)	6.000.000	80.000	9,6	0,2

Çizelge 7.33 : Bulon malzemesi için analizde kullanılan parametreler.

	E (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	D (m)
ϕ 32 Bulon	53.680.000	24	0,032

Su deposunun hesap enkesiti üzerinde denk geldiği yere 50 kN/m/m’lik yayılı yük tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde tüm kazı aşamaları modellenmekte olup, kazı sırasında ilgili zemin birimi inaktif hale getirilirken; destekleme sırasında ise destekler uygulama sırasına göre (püskürtme beton, bulon vb.) aktif hale getirilmektedir. PLAXIS 2D ile gerçekleştirilen analizlerde tünel için kazı-destek aşamaları aşağıdaki sıra ile tanımlanmıştır.

1. Başlangıç gerilmelerinin modellenmesi amacıyla yerçekimi yüklemesinin yapılması.
2. Sağ tüp 1 numaralı galeri kazısının yapılması.
3. Sağ tüp 1 numaralı galerinin kalıcı ve geçici yan duvarlarına, taze püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
4. Sağ tüp 1 numaralı galerinin kalıcı ve geçici yan duvarlarına, priz almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve bulonların (L=3,0-9,0 m) imal edilmesi.
5. Sağ tüp 1 numaralı galerinin geçici invertine ait kazının tamamlanması.
6. Sağ tüp 1 numaralı galerinin geçici invertine taze püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
7. Sağ tüp 1 numaralı galerinin geçici invertine prizini almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve geçici invert üzerine geri dolgunun yapılması.

8. Sağ t p 2 numaralı galeri kazısının yapılması.
9. Sağ t p 2 numaralı galerinin kalıcı ve geçici yan duvarlarına, taze p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
10. Sağ t p 2 numaralı galerinin kalıcı ve geçici yan duvarlarına, priz almış p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve bulonların (L=3,0-9,0 m) imal edilmesi.
11. Sağ t p 2 numaralı galerinin geçici invertine ait kazının tamamlanması.
12. Sağ t p 2 numaralı galerinin geçici invertine taze p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
13. Sağ t p 2 numaralı galerinin geçici invertine prizini almış p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve geçici invert üzerine geri dolgunun yapılması.
14. Sağ t p 3 numaralı kazının yapılması.
15. Sağ t p 3 numaralı kazının kalıcı ve geçici yan duvarlarına, taze p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
16. Sağ t p 3 numaralı kazının kalıcı ve geçici yan duvarlarına, priz almış p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve bulonların (L=3,0-6,0 m) imal edilmesi.
17. Sağ t p 4 numaralı kazının yapılması.
18. Sağ t p 4 numaralı kazının kalıcı ve geçici yan duvarlarına, taze p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
19. Sağ t p 4 numaralı kazının kalıcı ve geçici yan duvarlarına, priz almış p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve bulonların (L=3,0-6,0 m) imal edilmesi.
20. Sağ t p 5 numaralı kazının yapılması.
21. Sağ t p 5 numaralı kazının kalıcı desteklerine, taze p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
22. Sağ t p 5 numaralı kazının kalıcı desteklerine, priz almış p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve bulonların (L=9,0 m) imal edilmesi.
23. Sağ t p 6 numaralı kazının yapılması.
24. Sağ t p 6 numaralı kazının kalıcı desteklerine, taze p şk rtme beton parametresine sahip p şk rtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.

25. Sağ t p 6 numaralı kazının kalıcı desteklerine, priz almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
26. Sağ tüpte tünel ortasında bulunan geçici desteklerin kaldırılması.
27. Sol t p 1 numaralı galeri kazısının yapılması.
28. Sol t p 1 numaralı galerinin kalıcı ve geçici yan duvarlarına, taze püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
29. Sol t p 1 numaralı galerinin kalıcı ve geçici yan duvarlarına, priz almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve bulonların (L=3,0-9,0 m) imal edilmesi.
30. Sol t p 1 numaralı galerinin geçici invertine ait kazının tamamlanması.
31. Sol t p 1 numaralı galerinin geçici invertine taze püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
32. Sol t p 1 numaralı galerinin geçici invertine prizini almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve geçici invert üzerine geri dolgunun yapılması.
33. Sol t p 2 numaralı galeri kazısının yapılması.
34. Sol t p 2 numaralı galerinin kalıcı ve geçici yan duvarlarına, taze püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
35. Sol t p 2 numaralı galerinin kalıcı ve geçici yan duvarlarına, priz almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve bulonların (L=3,0-9,0 m) imal edilmesi.
36. Sol t p 2 numaralı galerinin geçici invertine ait kazının tamamlanması.
37. Sol t p 2 numaralı galerinin geçici invertine taze püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
38. Sol t p 2 numaralı galerinin geçici invertine prizini almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve geçici invert üzerine geri dolgunun yapılması.
39. Sol t p 3 numaralı kazının yapılması.
40. Sol t p 3 numaralı kazının kalıcı ve geçici yan duvarlarına, taze püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
41. Sol t p 3 numaralı kazının kalıcı ve geçici yan duvarlarına, priz almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve bulonların (L=3,0-6,0 m) imal edilmesi.
42. Sol t p 4 numaralı kazının yapılması.

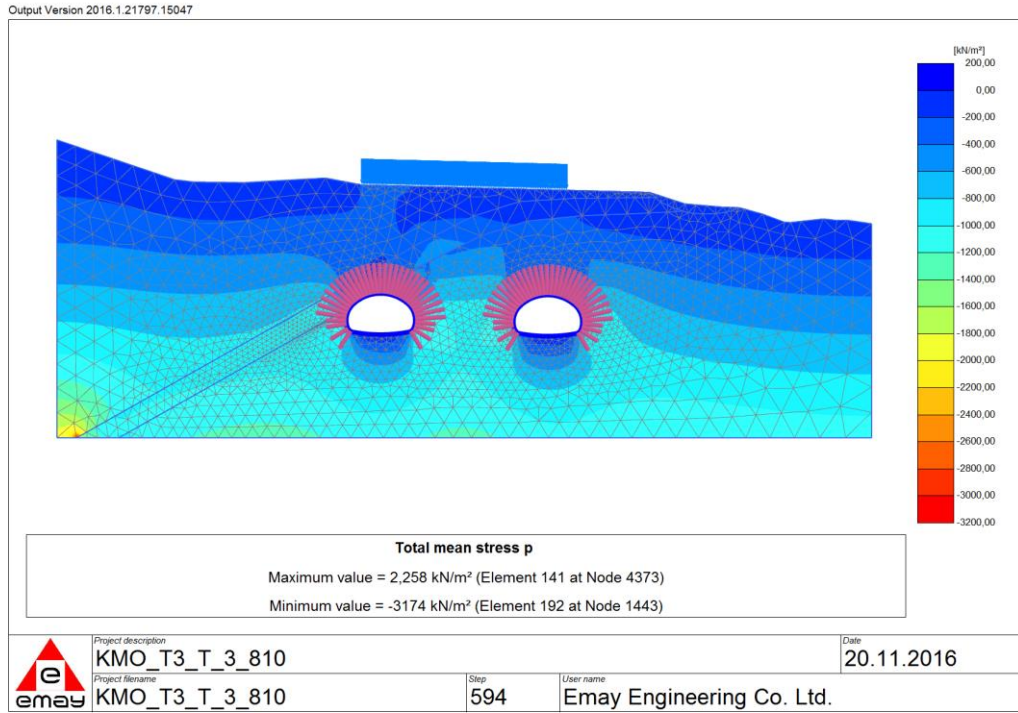
43. Sol tüp 4 numaralı kazının kalıcı ve geçici yan duvarlarına, taze püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
44. Sol tüp 4 numaralı kazının kalıcı ve geçici yan duvarlarına, priz almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve bulonların (L=3,0-6,0 m) imal edilmesi.
45. Sol tüp 5 numaralı kazının yapılması.
46. Sol tüp 5 numaralı kazının kalıcı desteklerine, taze püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
47. Sol tüp 5 numaralı kazının kalıcı desteklerine, priz almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi ve bulonların (L=9,0 m) imal edilmesi.
48. Sol tüp 6 numaralı kazının yapılması.
49. Sol tüp 6 numaralı kazının kalıcı desteklerine, taze püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
50. Sol tüp 6 numaralı kazının kalıcı desteklerine, priz almış püskürtme beton parametresine sahip püskürtme beton elemanlarının yerleştirilmesi.
51. Sol tüpte tünel ortasında bulunan geçici desteklerin kaldırılması.

7.7.2 Analiz sonuçları

Yukarıdaki sıra ile iki tünele ait kazı ve destekleme aşamaları tamamlanmış olup analizi sonuçları Çizelge 7.34'te gösterilmiştir. Analiz sonucunda tüm kazı aşamaları için zeminde ve destek sisteminde oluşan deplasmanlar, destek sistemine etki eden kuvvetler, zeminde oluşan gerilmeler ve yenilme zonları elde edilebilmektedir.

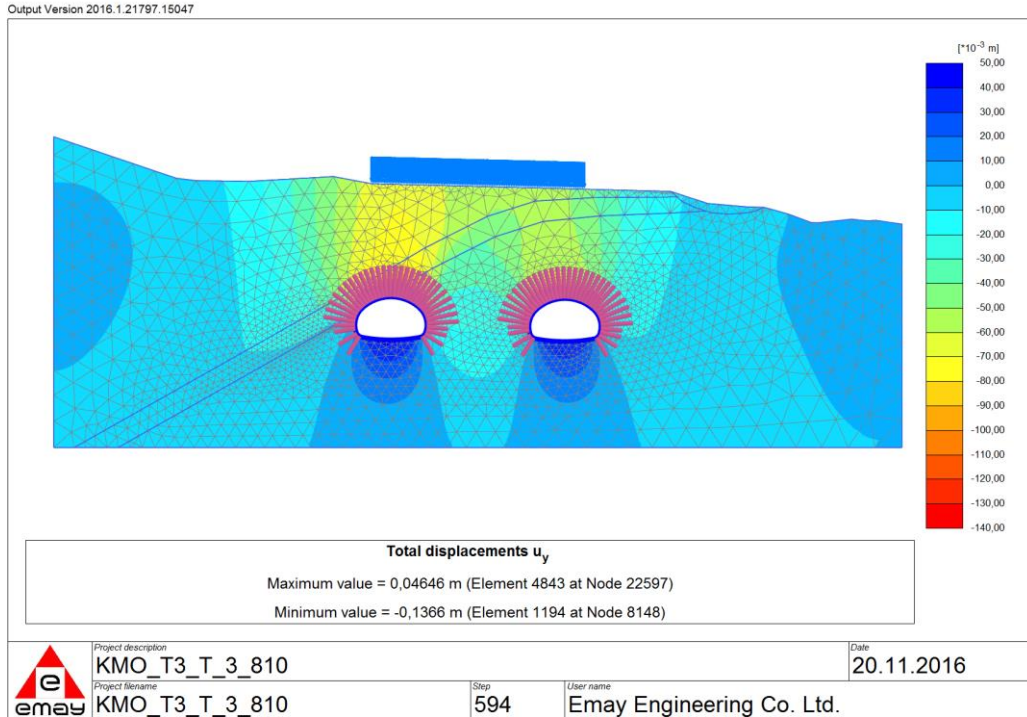
Çizelge 7.34 : Çamlık Tüneli su deposu (Km 3+810) kesiti stabilite analizi sonuçları.

Tünel Çevresinde Oluşan	Deplasmanlar (cm)		13,71
	Gerilmeler (kN/m ²)	maks.	2,258
Tünel Kaplamasında Oluşan		min.	-3174
	Deplasmanlar (cm)		13,71
	Normal Kuvvetler (kN/m)	maks.	-139,1
		min.	-3631
	Eğilme Momentleri (kNm/m)	maks.	476,5
		min.	-336,5
Bulonlara Etki Eden	Kesme Kuvvetleri (kN/m)	maks.	322,2
		min.	-348,0
	Normal Kuvvetler (kN/m)	maks.	107,30
		min.	-32,32

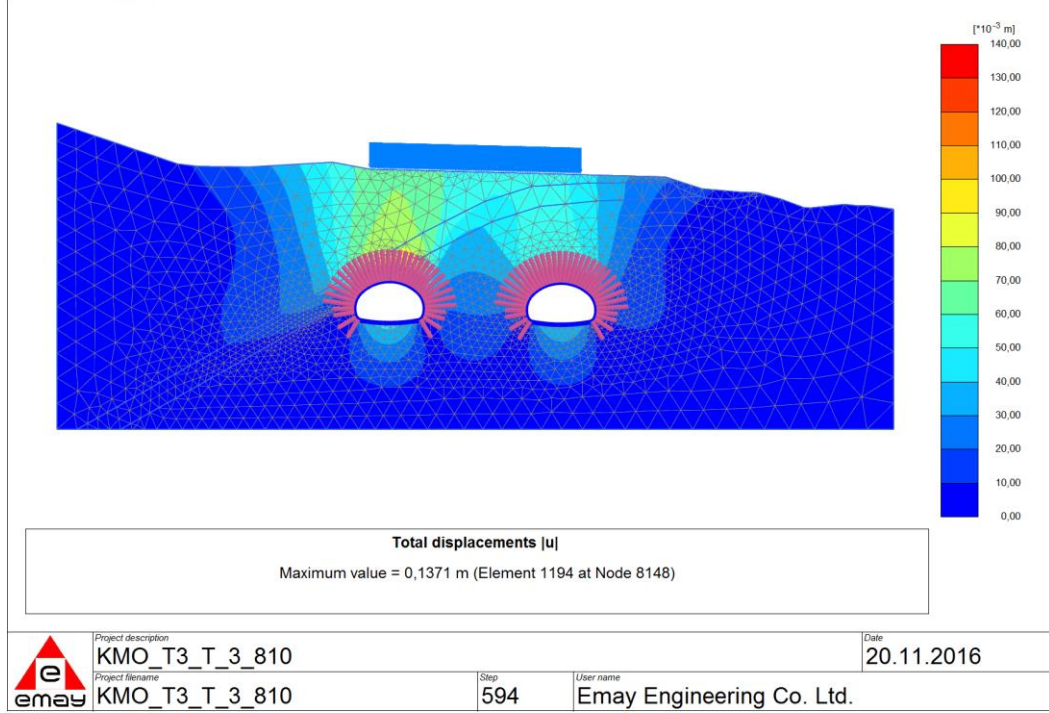


Şekil 7.24 : Tünel çevresinde oluşan gerilmeler.

Tünel çevresinde oluşan gerilmeler Şekil 7.24’te görülebilmektedir. Final aşamasında tünel çevresinde oluşan düşey deplasmanlar (u_y) ve toplam deplasmanlar ($|u|$) Şekil 7.25 ve Şekil 7.26’da gösterilmiştir. Maksimum deplasman değerleri sol tüp kaplamasının üzerinde ölçülmüştür.

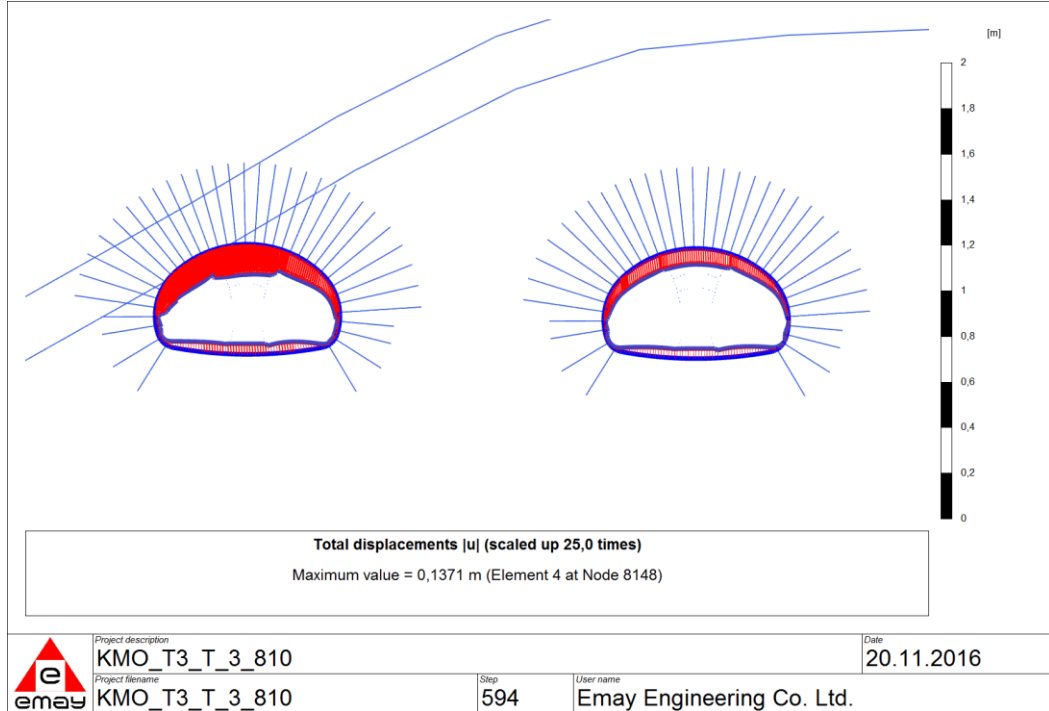


Şekil 7.25 : Tünel çevresinde oluşan düşey deplasmanlar.

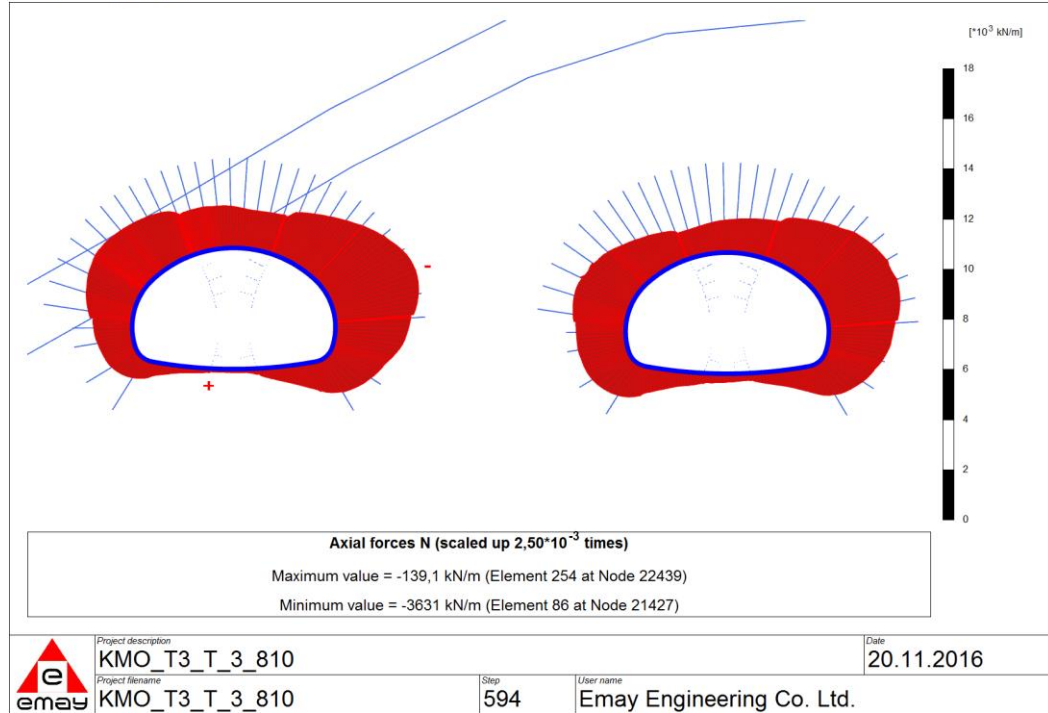


Şekil 7.26 : Tünel çevresinde oluşan toplam deplasmanlar.

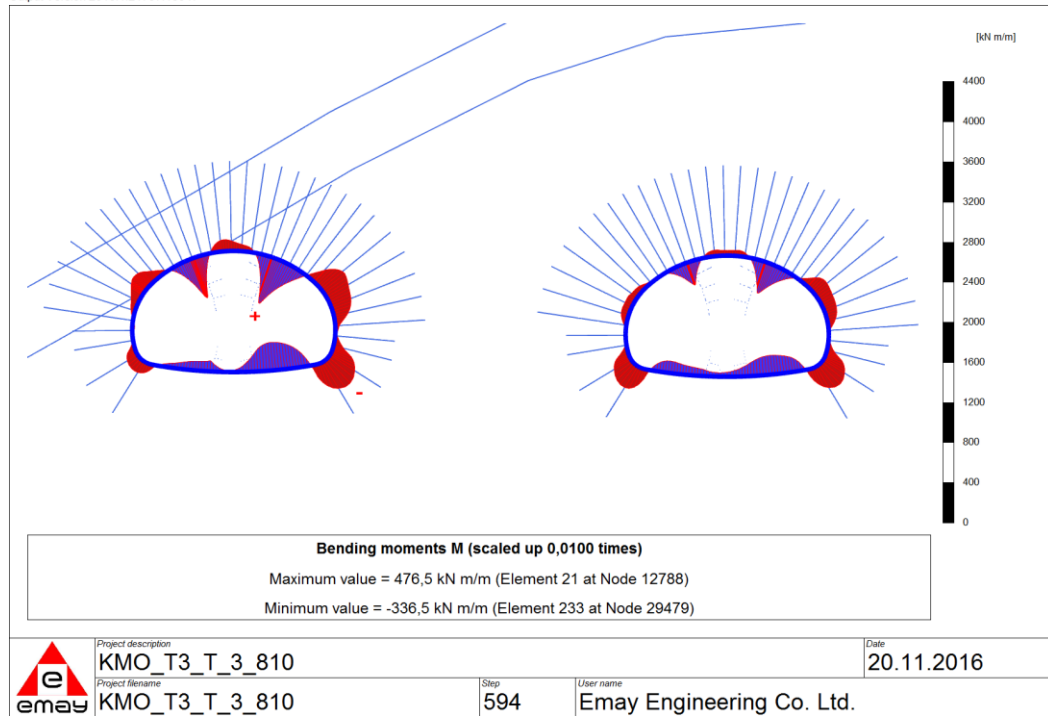
Tünel kaplamasında oluşan deplasmanlar ($|u|$) ile normal kuvvetler (N), eğilme momentleri (M) ve kesme kuvvetleri (Q) hesaplanmıştır. Sırasıyla Şekil 7.27, 28, 29 ve 30'da bu sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 7.27 : Tünel kaplamasında oluşan toplam deplasmanlar.

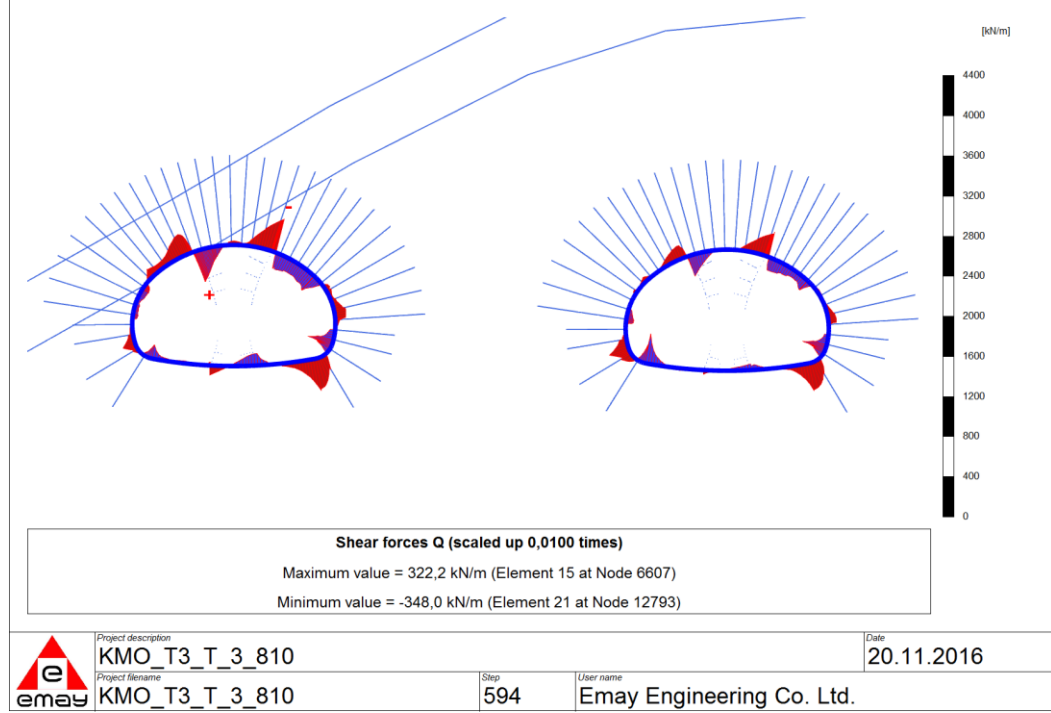


Şekil 7.28 : Tünel kaplamasında oluşan normal kuvvetler.

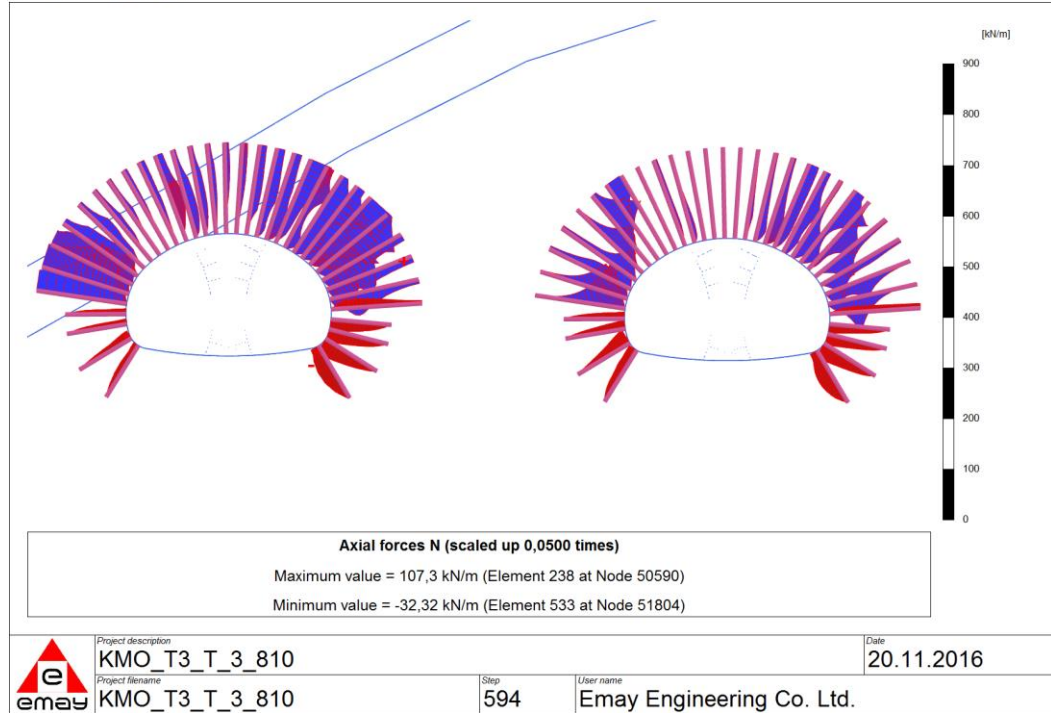


Şekil 7.29 : Tünel kaplamasında oluşan eğilme momentleri.

Final aşaması kazı ve destekleme işlemlerinden sonra bulonlara etkiyen normal kuvvetler Şekil 7.31’de verilmiştir.

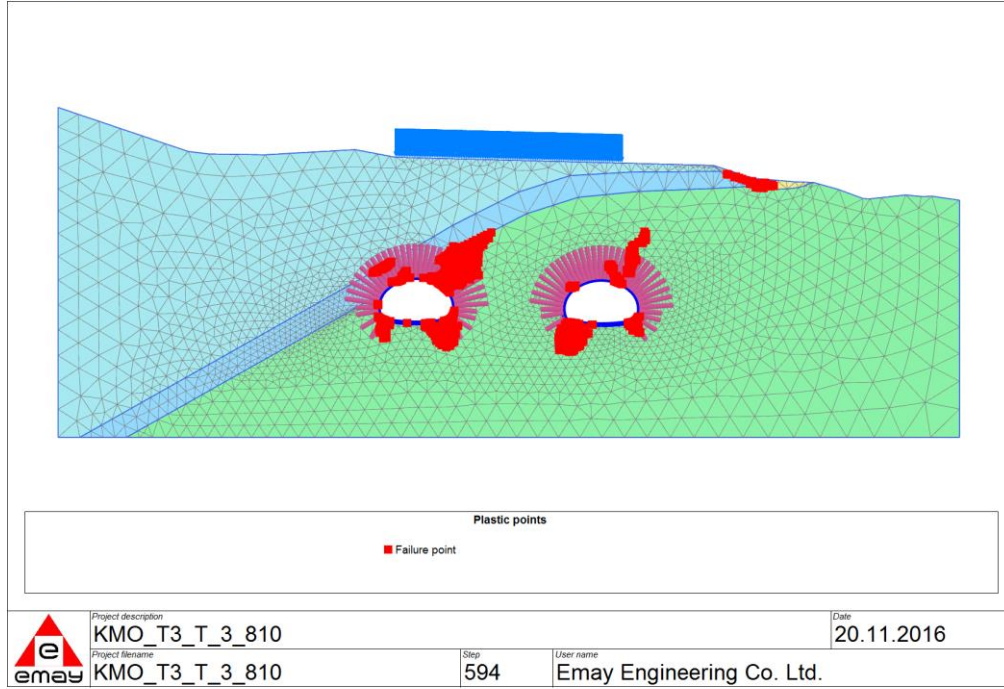


Şekil 7.30 : Tünel kaplamasında oluşan kesme kuvvetleri.



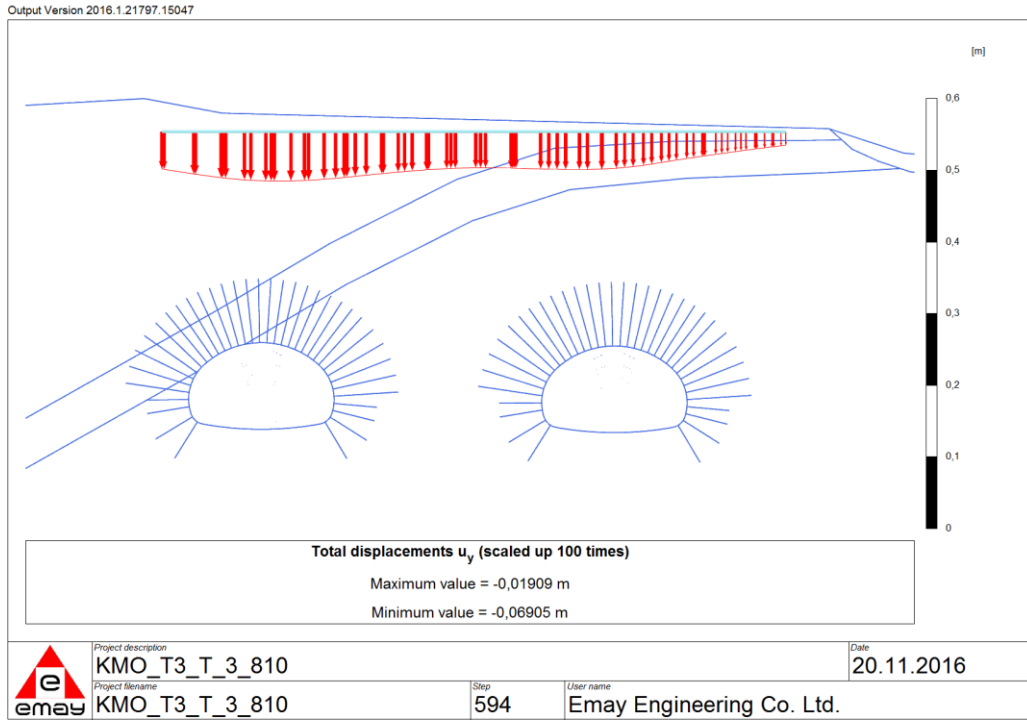
Şekil 7.31 : Kaya bulonlarında oluşan aksenal kuvvetler.

Analiz neticesinde tünel çevresinde ve yüzeyde oluşan plastik noktalar Şekil 7.32’de gösterilmiştir.

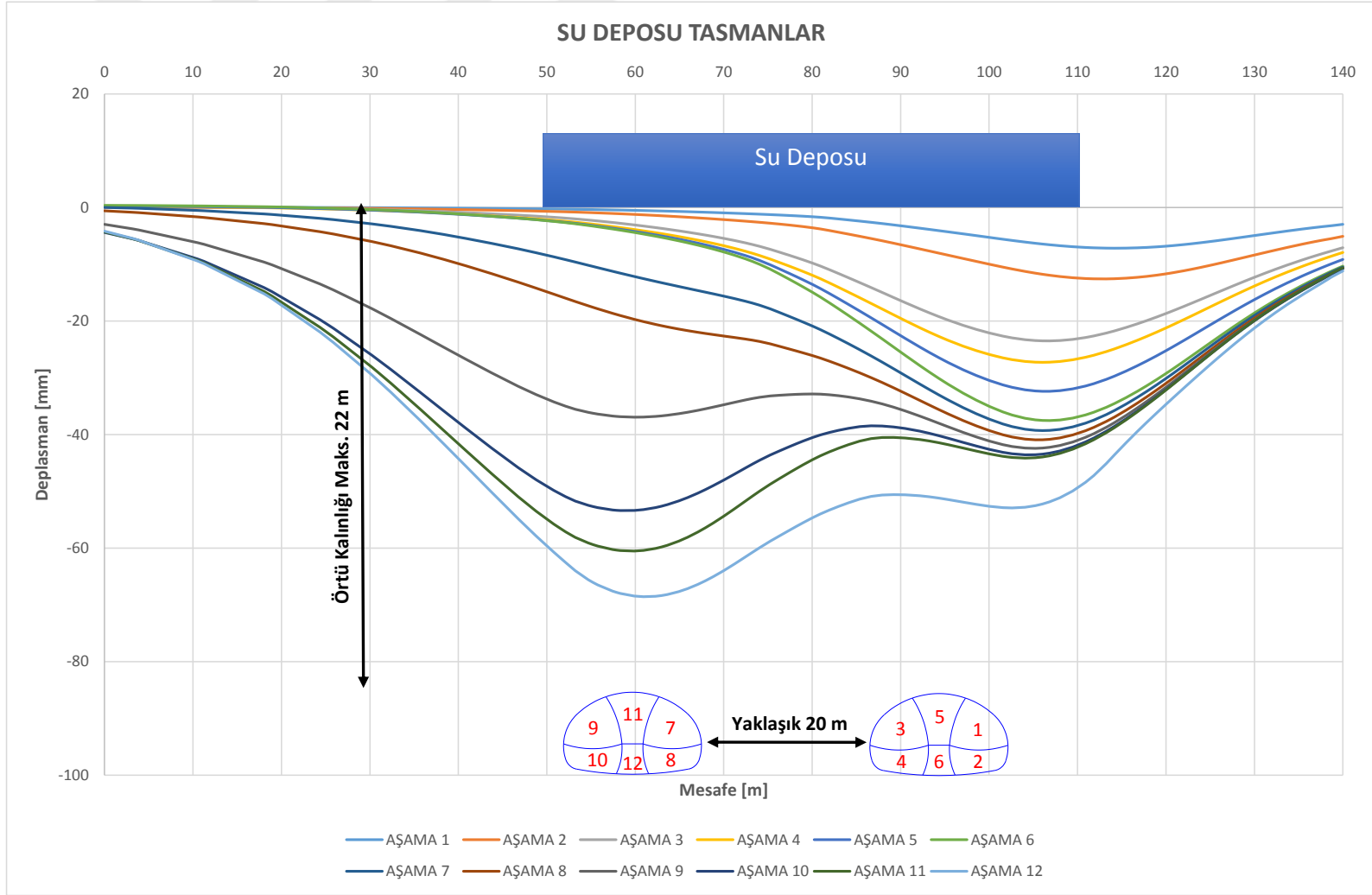


Şekil 7.32 : Tünel çevresinde ve yüzeyde oluşan plastik noktalar.

İlgili bölgede özellikle dikkat edilmesi gereken unsur su deposu olduğundan arazi yüzeyinde meydana gelen oturmalara dikkat edilmiştir. Şekil 7.33'te final durumunda yüzeyde meydana gelen tasmanlar gösterilmiştir.



Şekil 7.33 : Su deposu altında meydana gelen düşey deplasmanlar.



Şekil 7.34 : Yüzeyde meydana gelen tasan hareketlerinin kazı aşamalarına göre gelişimi.

Su deposu altında oluşan tasmanlar ilk kazıdan itibaren oluşmaya başlamış ve artarak ilerlemiştir. Özellikle bindirme zonuna daha yakın olan ikinci tüp kazısına geçildiğinde yüzey oturma miktarları daha büyük bir ivmeyle artarak final durumunda maksimum değer olan 69 mm'ye ulaşmıştır. Tüm kazı aşamalarına ait tasman hareketleri Şekil 7.34'te ayrı ayrı verilmiştir.

Yapılan hesaplar neticesinde su deposu dolu olarak tünel imalatı yapıldığında ciddi hasarlarla karşılaşabileceği öngörüldüğünden Çamlık Tüneli imalatına başlanmadan önce su deposunun yaklaşık % 75'i boşaltılmıştır.

7.8 Tünel Çevresinde Yapılan Jeoteknik Ölçümler

Tünel mühendisliğinde proje süresince yapılan çalışmaların denetlenebilmesi ve imalatın kalitesinin belirlenebilmesi için yapılması zorunlu olan işlemler gerilme ve deformasyonların gözlem ve ölçmelerle takip edilmesidir. Yapılan bu ölçümler sayesinde, tünel açma işlemleri sırasında ilerlenen her birim mesafe için kaya malzemesinin stabil olup olmadığı, desteklemelerin istenen yeterliliği sağlayıp sağlamadığı ve güvenli bir çalışma ortamı sunulup sunulmadığı görülebilmektedir.

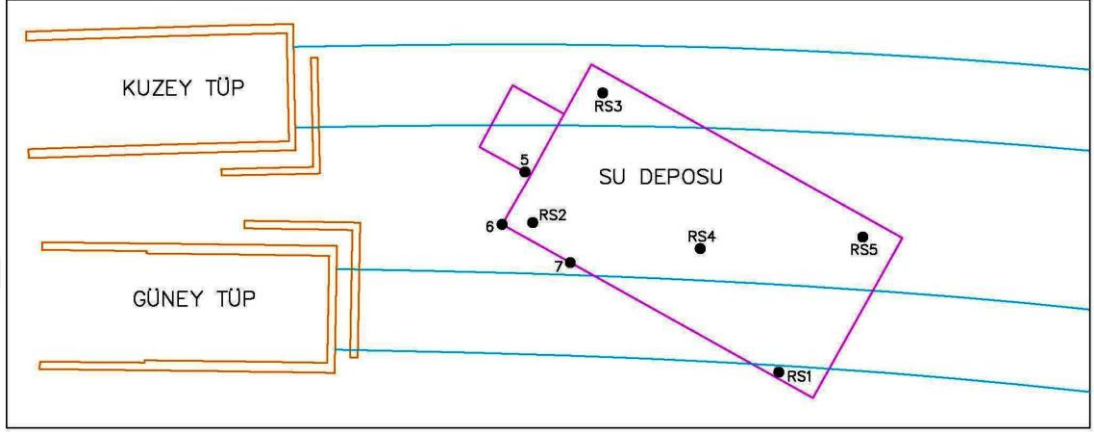
Su deposunun ve tünellerin stabilitesini kontrol edebilmek için detaylı bir ölçüm planı gerekmektedir. Çamlık Tüneli su deposu kesiminde gerekli noktalara optik okuyucular, manyetik oturma ölçüm cihazları ve inklinometreler yerleştirilmiştir.

Birbirlerine çok yakın konumda bulunan su deposu ve tünel tüplerinin etkileşimini hassas bir şekilde gözlemlemek gerekmektedir. İSKİ su deposu ile tünelin konumları Şekil 7.35'te çok daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 7.35 : Çamlık Tüneli giriş portalinden İSKİ su deposunun görünüşü.

Jeoteknik ölçüm planı Şekil 7.36’da görülebilen çalışma sahasında düzenli aralıklarla alınan ölçümlerden yüzey oturma değerlerinin her kazı aşamasında artarak devam ettiği görülmüştür. Yapılan nümerik analizler sonucunda mümkün olan en fazla miktarda suyun boşaltılması kararının alınması ile kazı esnasında su deposunda tespit edilen maksimum değer 69,6 mm olmuştur. Arazide yapılan jeoteknik ölçümlere ait sonuçlar EK-C’de verilmiştir.



Şekil 7.36 : Çamlık Tüneli su deposu jeoteknik ölçüm planı.



8. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) kullanılarak açılacak olan oldukça büyük kesitli Çamlık Tünelinin tasarım aşamaları hakkında bilgi verilmiştir. Kazı işlemleri sırasında üzerinde bulunan su deposunun mümkün olan en az şekilde etkilenmesi için yapılması planlanan kazı ve destekleme işlemleri irdelenmiştir. Tünel açma işlemleri devam ederken arazide yapılan jeoteknik ölçümler sonucunda elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

İnceleme konusu olan Çamlık Tüneli, Kuzey Marmara Otoyolu (KMO) Projesi kapsamında inşa edilmiş olup her bir tüpü dört şeritli yan yana çift tüpten meydana gelmektedir. 232 m²'lik kazı alanı ile Türkiye'de bir ilk, dünyada da birkaç tünelden biri olma özelliğine sahip olan Çamlık Tünelinin kazı genişliği 21,5 metre ve kazı yüksekliği ise 13 metredir. Taban kemerli (invertli) olarak tasarlanmış olup, 6 aşamalı parçalı kazı sistemi ile NATM prensiplerine göre açılmıştır.

Tünel güzergâhının üzerinde 15.000 ton kapasiteli bir su deposu bulunmaktadır. Zayıf dayanımlı kumtaşı-silttaşı birimi içerisinde yer alan tünel aynı zamanda bir bindirme zonunun da yanından geçmektedir. Bölgenin bu zorlu jeolojik şartları yanında, kazı öncesinde su deposunda yapılan testlerde günlük 220 tonluk su kaçağı tespit edilmiştir. Bu kesimde yapılan tünel imalatlarında, su deposuna oturma kaynaklı geri döndürülemez zararlar verilmesini önleyerek mevcut su kaçağı miktarının artırılmamasına çalışılmıştır.

Çalışmalara ilk olarak bölgenin genel jeolojisinin ve hidrojeolojisinin araştırılmasıyla başlanmıştır. Elde edilen bu bilgiler yapılan arazi çalışmalarına yol göstermiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde Çamlık Tüneli ve dolayında Kurtköy Formasyonu, Aydos Formasyonu ve Yayalar Formasyonu olmak üzere üç formasyonun bulunduğu belirlenmiştir. Su deposunun altında ise Yayalar Formasyonu ile Aydos Formasyonları yer almaktadır.

Su deposu bölgesinde 2 adet mekanik sondaj yapılmıştır. Bu sondajlar, Çamlık Tünelinin Kumtaşı-Silttaşı ve Kuvarsit birimleri içerisinde açılacağını göstermiştir.

Araştırmaların niteliğini arttırmak ve yeraltını daha iyi kavrayabilmek için jeofizik çalışmaları yapılmasına karar verilmiştir. Bu alışma sonucunda elde edilen sismik modelde 2 farklı anomali bulunmaktadır. Bu anomalilerin jeolojik modelde gösterilen faylardan kaynaklandığı gözlenmiştir.

Sondajlardan alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılarak kazı yapılacak alandaki malzemenin jeomekanik davranışları elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmalar neticesinde elde edilen malzeme parametreleri yerinde (in-situ) kaya dayanım parametrelerine çevrilmiştir.

Su deposu çevresindeki kayaçlar için kaya kalite sınıflaması yapılarak tünel kazısında kullanılacak olan NATM kaya destek sınıfı belirlenmiş ve bu sınıflamaya uygun destek sistemine karar verilmiştir.

Belirlenen kazı ve destek sistemlerinin uygunluğunu tespit edebilmek amacıyla sayısal modelleme analizi yapılmıştır. Yapılan tünel stabilite ve yüzey oturma analizleri, sonlu elemanlar metodu ile çözümlene yapan PLAXIS 2D programı ile gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda su deposu ve tünel çevresinde meydana gelen deplasmanlar ile yüzey oturma miktarları elde edilmiştir. Ayrıca destek sisteminde oluşan deplasmanlar ile tünel kaplamasına etki eden kuvvetler tespit edilmiştir.

Son olarak arazide yapılan jeoteknik ölçümlerle ilgili bilgiler verilmiştir. Ölçümler belirli aralıklarla düzenli olarak yapılmış, elde edilen anlık veriler tünel imalatının ilerleyişine yol göstermiştir.

Analiz sonuçları amlık Tünelinin incelenen bölgede yol açacağı yer değiştirmelerin izin verilebilir sınırlar içinde kaldığını, öngörülen tünel destek sisteminin yeterli olduğunu göstermiştir. Sayısal modelleme ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarının değerlendirilmesiyle varılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Tünel kaplamasına etki eden normal kuvvetler, eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri, kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır. Tünel tip kesiti ve destekleme elemanlarının niteliğinin, güvenli bir tünel imalatı için yeterli oldukları grlmştir.
- Tünel destek sistemi üzerinde yaklaşık 13,5 cm deplasman oluştuğu gözlenmiştir. Tünel tasarımında belirlenen 20 cm deformasyon toleransının, hesaplanan 13,5 cm deplasman için oldukça yeterli olduğu grlmştir.

- Su deposu altında oluşan tasman miktarları incelendiğinde en kötü durumda yüzeyde 6,91 cm oturma olacağı hesaplanmıştır. Arazide yapılan jeoteknik ölçümler neticesinde okunan en yüksek değerler ortalama 6,96 cm mertebesinde. Hesap sonuçları ile arazi ölçümlerinin birbirini desteklemesi, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan sayısal modellemenin başarılı olduğunu göstermiştir.
- Kazı esnasında su deposunda tespit edilen maksimum değer yaklaşık 7 cm olmasını sağlayan en önemli etkenin, yapılan sayısal analizler sonucunda mümkün olan en fazla miktarda suyun boşaltılması kararının alınması olduğundan da bahsedilmesi gerekir.
- Ancak yüzeyde oluşan oturma miktarları yok sayılabilecek kadar az değildir. Bu değerler su deposunun üst yapısında bozulmalara sebep olabilecektir. Tünel imalatından önce su deposunun taşınamamış olması nedeniyle, tünel kazıları esnasında su deposunda meydana gelebilecek olan hasarlar, zaman kaybedilmeden tespit edilmeli ve bu hasarlar onarıldıktan sonra su deposu tekrar devreye alınmalıdır.
- Su deposu ve çevresinde jeolojik, topografik ve diğer sebeplerle olabilecek hareketlerin kontrolü, zamanında tespit edilebilmesi ve bu hareketlere karşı önlemlerin alınarak gerekli müdahalelerin yapılabilmesi için, yapıda ve yapı etrafında ölçüm ve gözlemler düzenli olarak devam ettirilmelidir.
- Burada sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir yazılımla çözümleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yapılması gereken işlerden biri de diğer yaklaştırma ile tahmin yöntemlerini (sonlu farklar, sınır elemanlar vb.) kullanan yazılımlarla da benzer hesaplamalar yaparak bulunan sonuçlara yakın sonuçlar elde edilip edilemeyeceğinin irdelenmesidir. Böylece yöntem farklılıkları sonucu ortaya çıkabilecek belirsizlikler ortadan kaldırılabilir.
- Son olarak, tünel güzergâhları oluşturulurken, bu ve benzeri tip yapıların mevcudiyeti tespit edilmeli, mümkünse bu yapıları etkilemeyecek şekilde yol güzergâhı revize edilmelidir. Zaruri sebepler ile güzergâhın revize edilemeyeceği bir durum söz konusu ise, mevcut yapılar ya taşınmalı ya da faaliyetlerine ara verilmelidir.



KAYNAKLAR

- [1] **Çeçen, E. E., İncecik, M.** (2008). Metro tünellerinde uygulanan şemsiye-kemer yönteminin sayısal analizi. *İtüdergisi/d*, 7 (4), 72-82.
- [2] **Koçak, B.** (2006). *Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesinde uzman sistem oluşturulması*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Şeker, Ö.** (2008). *Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi prensiplerine göre tünel kaplama tasarımı*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Vardar, M.** (1985). Sürtünmeli çelik bağların Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde (NATM) kullanılabilme olanakları. *Kaya Mekaniği Bülteni*, 3, 35-44.
- [5] **Kun, M.** (2010). *Zayıf kayalarda ve faylı zonlarda tünel açma tasarım ve yapım gereksinmelerinin araştırılması ve çözümlenmesi*. (Doktora tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [6] **Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H., Aksoy, C. O.** (2007). *Tünel ve Kuyu Açma*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları No:256.
- [7] **Bozkurt, M.** (1987). *Tüneller Ders Notları*. İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.
- [8] **Matsebula, J. S. M.** (1988). *A History of Swaziland*. Longman.
- [9] **Özer, S. C.** (2011). *Tünel kazılarında optimum çelik boru kemer boyutunun nümerik modelleme ile tayini*. (Yüksek Lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [10] **Angelakis, A. N., Mays, L. W., Koutsoyiannis, D., Mamassis, N.** (2012). *Evolution of Water Supply Through the Millennia* (pp.85-87). IWA Publishing.
- [11] **Polat, D.** (2010). *NATM metodu kullanılarak tünel tasarımı ve modellenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] **Çeçen, Ö.** (2007). *İstanbul Metrosu Koska Tünelleri yüzey deformasyon analizi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] **Aktaş, S. Ş.** (2009). *Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntem ile inşa edilen bir tünelin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi ve değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [14] **Sinha, R. S.** (1989). *Underground Structures: Design and Instrumentation, Developments in Geotechnical Engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- [15] **Osmanoğlu, D.** (2007). *Tünellerde zemin iyileştirilmesi ve stabilitenin sonlu elemanlar yöntemi ile Plaxis programında analiz edilmesi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] **Hüdaverdi, T., Kuzu, C.** (2005). Madencilik faaliyetlerinde patlatma kaynaklı çevresel etkilerin ölçülmesi ve analizi, *Madencilik ve Çevre Sempozyumu*, Ankara.
- [17] **Şekercioğlu, E.** (1993). *Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi*. Ankara.
- [18] **Maidl, B., Thewes, M., Maidl, U.** (2013). *Handbook of Tunnel Engineering Volume I: Structures and Methods*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [19] **Schubert, W.** (2002). *Grundlagen der New Austrian Tunnelling Method* (pp.9-21). Technische Universität Graz Institute für Felsmechanik und Tunnelbau.
- [20] **IACES.** (1995). *NATM Summer Course, Lecture Notes*.
- [21] **Karaoğlu, H.** (2002). *Kaya zeminde tünel tasarımı*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] **Kahyaoğlu, H.** (2008). *TAG otoyolu özelinde tünel işleri ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi*. Ankara: İnşaat Mühendisleri Odası.
- [23] **Vardar, M.** (1979). Yeraltı kaya yapıları mekaniğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin ana ilkeleri, ankrajlar ve boyutlandırılması, 6. *Mühendislik Jeolojisi Konferansı*, (s.4-16). Yalova, 10-17 Haziran.
- [24] **Verbundplan Ges.m.b.H.** (1987). *The New Austrian Tunnelling Method (NATM)*. Vienna, Austria.
- [25] **Uğurel, Ş.** (2010). *Türkiye’de metro projeleri yatırımlarının geri dönüşüm süresinin belirlenmesi ve bu sürenin optimizasyonu için öneriler*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] **Vardar, M., Müller, L., Sauer, G.** (1978). Dreidimensionale Spannungsumlagerungs-prozesse im Bereich der Ortsbrust. *Rock Mech. Suppl.*, 9, 67-85.
- [27] **Arioğlu, E., Yüksel, A., Yılmaz, A. O.** (2008). *Püskürtme Beton Bilgi Föyleri - Çözümlü Problemler*. İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayın No: 142.
- [28] **Mahar, J. W., Parker, H. W., Wuellner, W. W.** (1975). *Shotcrete Practice in Underground Construction*. Final Report. Dept. Of Civ. Eng., University of Illinois.
- [29] **Cecil, O. S.** (1970). *Correlation of rock bolt - shotcrete support and rock quality parameters in Scandinavian Tunnels*. (Ph.D. thesis). University of Illinois, Urbana.

- [30] **Denek, H.** (2003). *İstanbul metrosu tünellerinde uygulanan klasik Yeni Avusturya ve boru kemer yöntemlerinin tünel içi ve yüzey deformasyon sonuçlarına göre karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans tezi). Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **Gnisen, R.** (1989). *Numerical Methods, Underground Structures: Design and Instrumentation*. Sinha, R. S. (Eds.), Development in Geotechnical Engineering. Amsterdam: Elsevier.
- [32] **Arıkan, M. A. S.**, (1991). Sonlu elemanlar metodunun mühendislikte uygulamaları. *Bilgisayar Destekli Tasarım ve Üretim CAD/CAM Semineri*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- [33] **Sokolnikoff, I. S.** (1956). *Mathematical Theory of Elasticity* (475pp). NY: Mc Graw Hill Book Company.
- [34] **Jing, L.** (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 283.
- [35] **Yazıcı, S., Nasuf, E.** (1993). Arazi kontrolünde sayısal modelleme. *Madencilik dergisi*, 32 (3-4), 5-14.
- [36] **Hoek, E., Grabinsky, M., Diederichs, M.** (1989). *Numerical modelling in rock engineering* (18 pp.), Mining Research Directorate Laurentian University, Sudbury, Ontario.
- [37] **Cundall, P. A.** (1987). *Distinct Element Models of Rock and Soil Structure* (pp.129-163). London: Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics edited by E.T. Brown, Allen and Unwin.
- [38] **Berilgen, M. M.** (1996). *Ankrajlı perdelerde zemin yapı etkileşiminin incelenmesi*. (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [39] **Ergin, K.** (1992). *Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde sonlu elemanlar yöntemiyle tünel kaplaması hesabı*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [40] **Brinkgreve R. B. J., Kumarswamy S., Swolfs W. M.** (2016). *PLAXIS 2D Version 2016 Manuel*, Delft University of Technology & Plaxis B.V., The Netherlands.
- [41] **Töremiş, E. İ.** (2003). *Geotekstiller ve Plaxis sonlu elemanlar programı*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] **Sert, S.** (2008-2009). *Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Çözümler*. Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- [43] **Vardar, M., Koçak, C., Tokgözoğlu, F.** (1998). Bolu Tünelindeki zamana bağlı deformasyonların kökeni ve gelişimine ilişkin örneklemeler, 4. *Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, (s.173-185).
- [44] **EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.** (2016). *T3 (Çamlık) Tüneli Kesin Proje Jeolojik-Jeoteknik Raporu* (Rapor No: KMO3-K-4-T03-1F-T-001). İstanbul.

- [45] **Vardar, M.** (2010-2011). *Kaya Yapıları Mekaniği Yüksek Lisans Ders Notları*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi.
- [46] **Hill, C. D. ve Sippel, K. D.** (2002). *Modern Deformation Monitoring: A Multi Sensor Approach, Proc. of 12th FIG Int. Symp. Deformation Measurements*. Washington, DC, USA.
- [47] **Yalçinkaya, M., Satır, B.** (2005). Tünellerde oluşan hareketlerin farklı ölçüm yöntemleri ve sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi, *Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*. İstanbul, 23-25 Kasım.
- [48] **Güven, G.** (2009). *İstanbul Metrosu Otogar-Kirazlı 1 arasındaki mühendislik jeolojisi ve tünel kazılarına bağlı oluşan deformasyonların değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [49] **EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.** (2016). *T3 (Çamlık) Tüneli Kesin Proje Tünel Hesap Raporu* (Rapor No: KMO3-K-4-T03-1C-T-001). İstanbul.
- [50] **Özgül, N.** (2011). *İstanbul İl Alanının Genel Jeoloji Özellikleri*. İstanbul: İBB, Deprem Risk Yönetim ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- [51] **Akyüz, H. S.** (2010). İstanbul ve yakın civarının Paleozoyik istifi, *İstanbul'un Jeolojisi Sempozyumu*, 01/2010, (s. 49-62), ISSN: 978-9944-89-887-4
- [52] **Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA).** (2009). *1/100.000 ölçekli yüzey jeolojisi haritası*.
- [53] **İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB).** (2009). *İstanbul Olası Deprem Kayıp Tahminleri*. İstanbul: İBB, Deprem Risk Yönetim ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- [54] **Le Pichon, X., A. M. Sengor, C., Demirbag, E., Armijo, R., Gorur, N., Cagatay, N., Mercier de Lepinary, B., Meyer, B., Saatçılar, R., Tok, B.** (2000). *Marine Atlas of the Sea of Marmara (Turkey)*.
- [55] **Armijo, R., Pondard, N., Meyer, B., Uçakus, G., Mercier de Lepinary, B., Malavieille, J., Domingez, S., Gustcher, M-A., Schmidt, S., Beck, C., Cagatay, N., Cakir, Z., Imren, C., Eris, K., Natalin, B., Ozalaybey, S., Tolun, L., Lefevre, I., Seeber, L., Gasperine, L., Rangin, C., Emre, O., Sarikavak, K.** (2005). *Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in Istanbul*. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q06009, doi:10.1029/2004GC000896.
- [56] **Ambraseys, N. N., Finkel, C. F.** (1991). *Long-term seismicity of Istanbul and of the Marmara Sea region*. *Terra Nova*, 3, 527-539.
- [57] <http://www.csb.gov.tr/iller/istanbulakdm/index.php?Sayfa=sayfa&Tur=webmenu&Id=10462>, 2016.
- [58] **İSKİ.** (2011). *Su Kaynakları Haritası*.
- [59] **BİMTAŞ-IMP.** (2009). *İstanbul İli Hidrojeoloji Haritası*.

- [60] **Ulusay, R.** (2010). *Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler*. Ankara: TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 38.
- [61] **ISRM (International Society for Rock Mechanics).** (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, 628 p.
- [62] **Geological Society Engineering Group Working Party.** (1977). *The description of rock masses for engineering purposes*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 10, 355-388.
- [63] **Golder Hoek and Associates.** (1979). *Engineering Geological Maps: A Guide to Their Preparation*. The UNESCO Press, 79 p.
- [64] **Şenol, G.** (2015). *Kuzey Marmara Otoyolu Garipçe Yarmasının mühendislik jeolojisi ve kazı şevlerinin analizi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [65] **IAEG.** (1976) *Instruction Manual-I Geotechnical Data Collection*. UNDP Training Project, Contract No. Con. 97/78,56 p.
- [66] http://jeofizik.gumushane.edu.tr/user_files/files/JMES/MASWYontemi.pdf, 2015.
- [67] **Dursun, E., Ünver S., ve Acar, H.** (2012). *Orman Yolu Güzergahlarının Sismik Zemin Etüdü Metodu ile Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.
- [68] **Kurtuluş, C., Bozkurt, A.** (2008). Geological, Geophysical and Geotechnical Characteristics of Expansive Soils in Derince. Turkey, *Turkey, HAICTA 2008 Conference, Greece, Fourth International Conference on Information and Communication Technologies in Bio and Earth Sciences*, , 498.
- [69] **Mahmutoğlu, Y.** (2013). *Kuzey Marmara Otoyolu Projesi, Çamlık Tüneli Araştırma Sondajları*. İTÜ Maden Fakültesi Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı.
- [70] **Broch, E., Franklin, J. A.** (1972). *The point load strength test*. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, 9, 669-697pp.
- [71] **Bieniawski, Z. T.** (1975). *The Point Load Test in Geotechnical Practice*. Engineering Geology, 9, p.1-11.
- [72] **Deere, D. U., Miller, R. P.** (1966). *Classification and index Properties of Intact Rock*. Tech. Report AFWL-TR-65-116, AF Special Weapons Center, Kirtland Air Force Base, New Mexico.
- [73] **Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., Minami, M.** (2007). *Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 4 (2), 247-265.

- [74] **Ulusay, R., Sönmez H.** (2006). *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.
- [75] **Sönmez. H., Ulusay, R.** (2002). A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*. 26, 77-9.
- [76] **Hoek, E.** (1983) Strength of Jointed Rock Masses: The Rankine Lecture. *Geotechnique Thomas Telford, Ltd.* London, UK, Vol:33.No:3, pp. 187-223.
- [77] **Sönmez. H., Ulusay, R.** (1999). Modifications to the Geological Strength Index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36 (6), 743-760.
- [78] **Hoek, E.** (1999). Putting numbers to geology-an engineer's view point. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, 1-19.
- [79] **Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden.** (2000) *Support Of Underground Excavations in Hard Rock*. Taylor and Francis A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- [80] **Hoek, E., Carranza –Torres, C. T., and Corkum, B.** (2002). **Hoek-Brown failure criterion:2002 edition**. Proceedings of the North American Rock Mechanics Society Meeting, Toronto, Canada, 1-6.
- [81] **Rocklab.** (2007). *Rock Mass Strength Analysis Using the Hoek-Brown Failure Criterion*. User's Guide.
- [82] **Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi*.
- [83] **Karayolları Genel Müdürlüğü.** (1997). *Karayolu Tüneli Uygulama Projesi (Kesin Proje) Teknik Şartnamesi*.
- [84] **Müller, L.** (1990). *Removing the misconceptions on the New Austrian Tunnelling Method*. Tunnels & Tunnelling, Summer 1990, special issue, Vol.22, 15-18.
- [85] **Vardar, M.** (1994). *İstanbul Metrosu örneğinde kaya mekaniği parametrelerinin uygulama ve planlamadaki yeri*. Ulaşımda Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu Bildiri Kitabı, Maden Mühendisleri Odası, 13-24.

EKLER

EK A: SONDAJ LOGLARI

EK B: KAROT SANDIK FOTOĞRAFLARI

EK C: SU DEPOSU JEOTEKNİK ÖLÇÜM SONUÇLARI





EK A: SONDAJ LOGLARI

 		ASE-27b SONDAJ LOGU (KM: 3+701-SOL) (Sayfa 1 / 3)											
T.C.ULAŞTIRMA, DENİZCİLİK ve HABERLEŞME BAKANLIĞI Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolları 1.Bölge Müdürlüğü Kuzey Marmara (3.Bağaz Köprüsü Dahil) Otoyolu Projesi Odayeri-Papaköy (3.Bağaz Köprüsü Dahil) Kesimi YTD Modeli ile Yapılması, İşletilmesi ve Devri İş		SONDAJ YERİ : Çamlık Kavşağı Bağ.Yolu SONDAJ AMACI : Tünel SON.MAK & YÖNT.: D-900 & Rotari MUH.BOR.DER.(m): - SONDAJ ÇAPI(mm): 76.00											
SONDAJ DER.(m) : 42.00 BAŞ-BİTİŞ TARİHİ : 01.04.14-04.04.14 X-Y KOORD. : 4 546 949-430 433 KOT (m) : 240.00 YSS (m) : 4.80													
Sondaj Derinliği (m)	Numune Tipi	TCR %	SCR %	RQD %	DAYANIM	AYRIŞMA	EKLEM SIKLIĞI	YER. DENEYLER	YSS	KOT (m)	GRAFİK	USCS	TANIMLAMA
0 - 15 cm	15 - 30 cm	30 - 45 cm	N 30	0 10 20 30 40 50						240			
0										240			
1										239			
2										238			
3	SPT-1	13	21	36	57					237			
4										236			
5	SPT-2	12	21	32	53					235			
6										234			
7	SPT-3	13	22	33	55					233			
8										232			
9	SPT-4	21	40	50/3	R					231			
10										230			
11	SPT-5	12			R					229			
12										228			
13	K-1									227			
14										226			
15	K-2									225			
16										224			
17	K-3									223			
18										222			
19	K-4									221			
20										220			
21	K-5									219			
22										218			
23	K-6									217			
24										216			
25	K-7									215			
26										214			
27										213			
28										212			
29										211			
30										210			
31										209			
32										208			
33										207			
34										206			
35										205			
36										204			
37										203			
38										202			
39										201			
40										200			
41										199			
42										198			
43										197			
44										196			
45										195			
46										194			
47										193			
48										192			
49										191			
50										190			
51										189			
52										188			
53										187			
54										186			
55										185			
56										184			
57										183			
58										182			
59										181			
60										180			
61										179			
62										178			
63										177			
64										176			
65										175			
66										174			
67										173			
68										172			
69										171			
70										170			
71										169			
72										168			
73										167			
74										166			
75										165			
76										164			
77										163			
78										162			
79										161			
80										160			
81										159			
82										158			
83										157			
84										156			
85										155			
86										154			
87										153			
88										152			
89										151			
90										150			
91										149			
92										148			
93										147			
94										146			
95										145			
96										144			
97										143			
98										142			
99										141			
100										140			
101										139			
102										138			
103										137			
104										136			
105										135			
106										134			
107										133			
108										132			
109										131			
110										130			
111										129			
112										128			
113										127			
114										126			
115										125			
116										124			
117										123			
118										122			
119										121			
120										120			
121										119			
122										118			
123										117			
124										116			
125										115			
126										114			
127										113			
128										112			
129										111			
130										110			
131										109			
132										108			
133										107			
134										106			
135										105			
136										104			
137										103			
138										102			
139										101			
140										100			
141										99			
142										98			
143										97			
144										96			
145										95			
146										94			
147										93			
148										92			
149										91			
150										90			
151										89			
152										88			
153										87			
154										86			
155										85			
156										84			
157										83			
158										82			
159										81			
160										80			
161										79			
162										78			
163										77			
164													

				ASE-27b SONDAJ LOGU (KM: 3+701-SOL)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
														(Sayfa 2 / 3)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
T.C.ULAŞTIRMA, DENİZCİLİK ve HABERLEŞME BAKANLIĞI Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolları 1.Bölge Müdürlüğü Kuzey Marmara (3.Boğaz Köprüsü Dahil) Otoyolu Projesi Odayeri-Paşaköy (3.Boğaz Köprüsü Dahil) Kesimi YİD Modeli ile Yapılması, İşletilmesi ve Devri İş														SONDAJ YERİ : Çamlık Kavşağı Bağ.Yolu SONDAJ AMACI : Tünel SON.MAK & YÖNT.: D-900 & Rotari MUH.BOR.DER.(m): - SONDAJ ÇAPI(mm): 76.00										SONDAJ DER.(m) : 42.00 BAŞ-BİTİŞ TARİHİ : 01.04.14-04.04.14 X-Y K OORD. : 4 546 949-430 433 KOT (m) : 240.00 YSS (m) : 4.80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Sonda Derinliği (m)														Numune Tipi														0 - 15 cm														15 - 30 cm														30 - 45 cm														N 30														0 10 20 30 40 50														TCR %														SCR %														RQD %														DAYANIM														AYRIŞMA														EKLEM SIKLIĞI														YER. DENEYLER														YSS														KOT (m)														240														GRAFIK														USCS														TANIMLAMA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
20														K-7														60														20														20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

MÜHENDİS : Serdar AYDOĞAN

Şekil A.2 : ASE-27b sondaj logu (2/3)

 		ASE-27b SONDAJ LOGU (KM: 3+701-SOL) (Sayfa 3 / 3)	
T.C.ULAŞTIRMA, DENİZCİLİK ve HABERLEŞME BAKANLIĞI Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolları 1.Bölge Müdürlüğü Kuzey Marmara (3.Bağaz Köprüsü Dahil) Otoyolu Projesi Odayeri-Papagöy (3.Bağaz Köprüsü Dahil) Kesimi YID Modeli ile Yapılması, İşletilmesi ve Devri İş		SONDAJ YERİ : Çamlık Kavşağı Bağ.Yolu SONDAJ AMACI : Tünel SON.MAK & YÖNT.: D-900 & Rotari MUH.BOR.DER.(m): - SONDAJ ÇAPI(mm): 76.00	
SONDAJ DER.(m) : 42.00 BAŞ-BİTİŞ TARİHİ : 01.04.14-04.04.14 X-Y KOORD. : 4 546 949-430 433 KOT (m) : 240.00 YSS (m) : 4.80			
Sondaj Derinliği (m)	Numune Tipi	TCR %	TANIMLAMA
	0 - 15 cm	SCR %	
	15 - 30 cm	RQD %	
	30 - 45 cm	DAYANIM	
	N 30	AYRIŞMA	
	0 10 20 30 40 50	EKLEM SIKLIĞI	
		YER. DENEYLER	
		YSS	
		KOT (m)	
		240	
		GRAFİK	
		USCS	
40			
41	K-19	13	Açıklama sayfa 1/4'de
42		-	Kuyu Sonu: 42.00 m
43		-	
44		III	
45		III	
46		> 20	
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55			
56			
57			
58			
59			
60			
DAYANIM	AYRIŞMA	KAYA KALİTESİ RQD	Notlar:
I Çok Dayanımlı	I Taze	%0-25 Çok Zayıf	1 Seyrek
II Dayanımlı	II Az Ayrışmış	%25-50 Zayıf	1-2 Orta
III Orta	III Orta D. Ayr.	%50-75 Orta	3-16 Sık
IV Zayıf	IV Çok Ayr.	%75-90 İyi	16-20 Çok Sık
V Çok Zayıf	V Tümüyle Ayr.	%90-100 Çok İyi	>20 Parçali
			N: 0-2 Çok Yumuşak
			N: 3-4 Yumuşak
			N: 5-8 Orta Kati
			N: 9-15 Kati
			N: 16-30 Çok Kati
			N: > 30 Sert
			N: 0-4 Çok Gevşek
			N: 5-10 Gevşek
			N: 11-30 Orta Siki
			N: 31-50 Siki
			N: > 50 Çok Siki

MÜHENDİS : Serdar AYDOĞAN

Şekil A.3 : ASE-27b sondaj logu (3/3)

 		ASE-28a SONDAJ LOGU (KM: 3+830-SAĞ) (Sayfa 1 / 4)	
T.C.ULAŞTIRMA, DENİZCİLİK ve HABERLEŞME BAKANLIĞI Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolları 1.Bölge Müdürlüğü Kuzey Marmara (3.Bölge Köprüsü Dahil) Otoyolu Projesi Odayeri-Papaköy (3.Bölge Köprüsü Dahil) Kesimi YD Modeli ile Yapılması, İşletilmesi ve Devri İş		SONDAJ YERİ : Çamlık Kavşağı Baş.Yolu SONDAJ AMACI : Tünel SON.MAK & YÖNT. : D-900 & Rotari MUH.BOR.DER.(m) : - SONDAJ ÇAPİ(mm) : 76.00	SONDAJ DER.(m) : 65.00 BAŞ-BİTİŞ TARİHİ : 23.03.13-29.03.13 X-Y KOORD. : 4 546 937-430 574 KOT (m) : 260.00 YSS (m) : -
Sondaj Derinliği (m)	Numune Tipi	TCR %	TANIMLAMA
0 - 15 cm	15 - 30 cm	RQD %	
30 - 45 cm	N 30	DAYANIM	
0 10 20 30 40 50		AYRIŞMA	
		EKLEM SIKLIĞI	
		YER. DENEYLER	
		YSS	
		KOT (m)	
		260	
		GRAFİK	
		USCS	
0	K-1	16 - -	Zayıf-çok zayıf dayanımlı, sarı, koyu kahve, kırmızımsı kahve renkli, parçalı-kırıklı, çok ayrışmış, yer yer tümüyle ayrışmış KUVARSİT. Tümüyle Ayrışmış Kuvarsit; Az Kumlu Düşük Plastisiteli KİL(CL); 5.50-6.00 m, 10.50-12.00 m ve 13.50-14.50 m arası; Az Kumlu Düşük Plastisiteli KİL(CL); %79 ince malzeme (LL=87, pı=15), %21 ince-orta daneli kum, az çakıl içerikli.
1	K-2	16 - -	
2	K-3	31 - -	
3	K-4	34 - -	
4	K-5	33 - -	
5	K-6	26 - -	
6	K-7	24 - -	
7	K-8	20 - -	
8	K-9	27 - -	
9	K-10	28 - -	
10	K-11	34 - -	
11	K-12	55 - -	
12	K-13	20 - -	
13	K-14	14 - -	
14			Orta dayanımlı, gri, koyu gri renkli, parçalı-kırıklı, orta derecede ayrışmış, yer yer çok ayrışmış SİLT TAŞI.
15			
16			
17			
18			
19			
20			
DAYANIM		AYRIŞMA	KAYA KALİTESİ RQD
I Çok Dayanımlı		I Taze	%60-25 Çok Zayıf
II Dayanımlı		II Az Ayrışmış	%25-50 Zayıf
III Orta		III Orta D. Ayr.	%50-75 Orta
IV Zayıf		IV Çok Ayr.	%75-90 İy
V Çok Zayıf		V Tümüyle Ayr.	%90-100 Çok İy
KIRIKLAR:30 cm		İnce Daneli	İn Daneli
1 Seyrek		N 0-2 Çok Yumuşak	N 0-4 Çok Gevşek
1-2 Orta		N 3-4 Yumuşak	N 5-10 Gevşek
3-16 Sık		N 5-8 Orta Kati	N 11-30 Orta Siki
16-20 Çok Sık		N 9-15 Kati	N 31-50 Siki
>20 Parçalı		N 16-30 Çok Kati	N >50 Çok Siki
N : > 30 Sert			
SPT-Standard Penetrasyon Deneyi UD-Örselememeli Numune K-Karot Numunesi P-Presiyometre Deneyi VS-Veyn Deneyi USCS-Bir Zemin Sınıflaması			

MÜHENDİS : Serdar AYDOĞAN

Şekil A.4 : ASE-28a sondaj logu (1/4)

 		ASE-28a SONDAJ LOGU (KM: 3+830-SAĞ) (Sayfa 2 / 4)					
T.C.ULAŞTIRMA, DENİZCİLİK ve HABERLEŞME BAKANLIĞI Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolları 1.Bölge Müdürlüğü Kuzey Marmara (3.Bölge Köprüsü Dahil) Otoyolu Projesi Odayeri-Papazköy (3.Bölge Köprüsü Dahil) Kesimi YID Modeli ile Yapılması, İşletilmesi ve Devri İş		SONDAJ YERİ : Çamlık Kavşağı Bağ.Yolu SONDAJ AMACI : Tünel SON.MAK & YÖNT. : D-900 & Rotari MUH.BOR.DER.(m) : - SONDAJ ÇAPI(mm) : 76.00					
		SONDAJ DER.(m) : 65.00 BAŞ-BİTİŞ TARİHİ : 23.03.13-29.03.13 X-Y KOORD. : 4 546 937-430 574 KOT (m) : 260.00 YSS (m) : -					
Sondaj Derinliği (m)	Numune Tipi 0 - 15 cm 15 - 30 cm 30 - 45 cm N 30	TCR % SCR % RQD % DAYANIM AYRIŞMA EKLEM SIKLIĞI YER. DENEYLER YSS KOT (m) GRAFİK USCS	TANIMLAMA				
20	K-15	20 - -	Açıklama sayfa 1/4'de				
21		21 - -					
22	K-16	22 - -					
23		23 - -					
24	K-17	24 - -					
25		25 - -					
26	K-18	26 - -					
27		27 - -					
28	K-19	28 - -					
29		29 - -					
30	K-20	30 - -					
31		31 - -					
32	K-21	32 - -					
33		33 - -					
34	K-22	34 - -					
35		35 - -					
36	K-23	36 - -					
37		37 - -					
38	K-24	38 - -					
39		39 - -					
40	K-25	40 - -					
DAYANIM I. Çok Dayanımlı II. Dayanımlı III. Orta IV. Zayıf V. Çok Zayıf		AYRIŞMA I. Taze II. Az Ayrışmış III. Orta D. Ayr. IV. Çok Ayr. V. Tümüyle Ayr.	KAYA KALİTESİ RQD %0-25 Çok Zayıf %25-50 Zayıf %50-75 Orta %75-90 İyi %90-100 Çok İyi	KIRIKLAR-30 cm 1. Seyrek 1-2 Orta 3-16 Sık 16-20 Çok Sık >20 Parçali	İnce Daneli N. 0-2 Çok Yumuşak N. 3-4 Yumuşak N. 5-8 Orta-Kabı N. 9-15 Kabı N. 16-30 Çok Kabı N. > 30 Sert	İri Daneli N. 0-4 Çok Gevşek N. 5-10 Gevşek N. 11-30 Orta Siki N. 31-50 Siki N. >50 Çok Siki	Notlar:

Şekil A.5 : ASE-28a sondaj logu (2/4)

 		ASE-28a SONDAJ LOGU (KM: 3+830-SAĞ)																					
		(Sayfa 3 / 4)																					
T.C.ULAŞTIRMA, DENİZCİLİK ve HABERLEŞME BAKANLIĞI Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolları 1.Bölge Müdürlüğü Kuzey Marmara (3.Bölge Köprüsü Dahil) Otoyolu Projesi Odayeri-Papazköy (3.Bölge Köprüsü Dahil) Kesimi YİD Modeli ile Yapılması, İşletilmesi ve Devri İş		SONDAJ YERİ : Çamlık Kavşağı Baş.Yolu SONDAJ AMACI : Tünel SON. MAK. & YÖNT. : D-900 & Rotari MUH.BOR.DER.(m) : - SONDAJ ÇAPI(mm) : 76.00		SONDAJ DER.(m) : 65.00 BAŞ-BİTİŞ TARİHİ : 23.03.13-29.03.13 X-Y KOORD. : 4 546 937-430 574 KOT (m) : 260.00 YSS (m) : -																			
Sondaj Derinliği (m)	Numune Tipi	0 - 15 cm	15 - 30 cm	30 - 45 cm	N 30	0	10	20	30	40	50	TCR %	SCR %	RQD %	DAYANIM	AYRIŞMA	EKLEM SIKLIĞI	YER. DENEYLER	YSS	KOT (m) 260	GRAFIK	USCS	TANIMLAMA
40												28	-	-						220			
41	K-31											30	-	-						219			
42	K-32											32	-	-						218			
43	K-33											24	-	-						217			
44	K-34											27	-	-						216			
45	K-35											21	-	-						215			
46	K-36											18	-	-						214			
47	K-37											24	-	-						213			
48	K-38											30	-	-						212			
49	K-39											19	-	-						211			
50	K-40											28	-	-						210			
51	K-41											49	-	-						209			
52	K-42											26	-	-						208			
53	K-43											25	-	-						207			
54	K-44											20	-	-						206			
55	K-45											16	-	-						205			
56	K-46											16	-	-						204			
57	K-47											20	-	-						203			
58	K-48											16	-	-						202			
59	K-49											20	-	-						201			
60	K-49											16	-	-						200			
DAYANIM		AYRIŞMA		KAYA KALİTESİ RQD		KIRIKLAR-30 cm		İnce Deneli		İri Deneli		Notlar:											
I Çok Dayanımlı		I Taze		%60-25 Çok Zayıf		1 Seyrek		N 0-2 Çok Yumuşak		N 0-4 Çok Gevşek													
II Dayanımlı		II Az Ayrışmış		%25-50 Zayıf		1-2 Orta		N 3-4 Yumuşak		N 5-10 Gevşek													
III Orta		III Orta O. Ayr.		%50-75 Orta		3-16 Sık		N 5-8 Orta Kati		N 11-30 Orta Sık													
IV Zayıf		IV Çok Ayr.		%75-90 İyi		16-20 Çok Sık		N 9-15 Kati		N 31-50 Sık													
V Çok Zayıf		V Tümüyle Ayr.		%90-100 Çok İyi		>20 Parçali		N 16-30 Çok Kati		N >50 Çok Sık													
SPT-Standard Penetrasyon Deneyi		UD-Örselelenmemiş Numune K-Karot Numunesi		P-Presiyometre Deneyi		VS-Yerli Deneyi		USCS-Bir Zemin Sınıflaması															

MÜHENDİS : Serdar AYDOĞAN

Şekil A.6 : ASE-28a sondaj logu (3/4)



EK B: KAROT SANDIK FOTOĞRAFLARI



Şekil B.1 : ASE-27b sondajı karot sandık fotoğrafları (1/2)



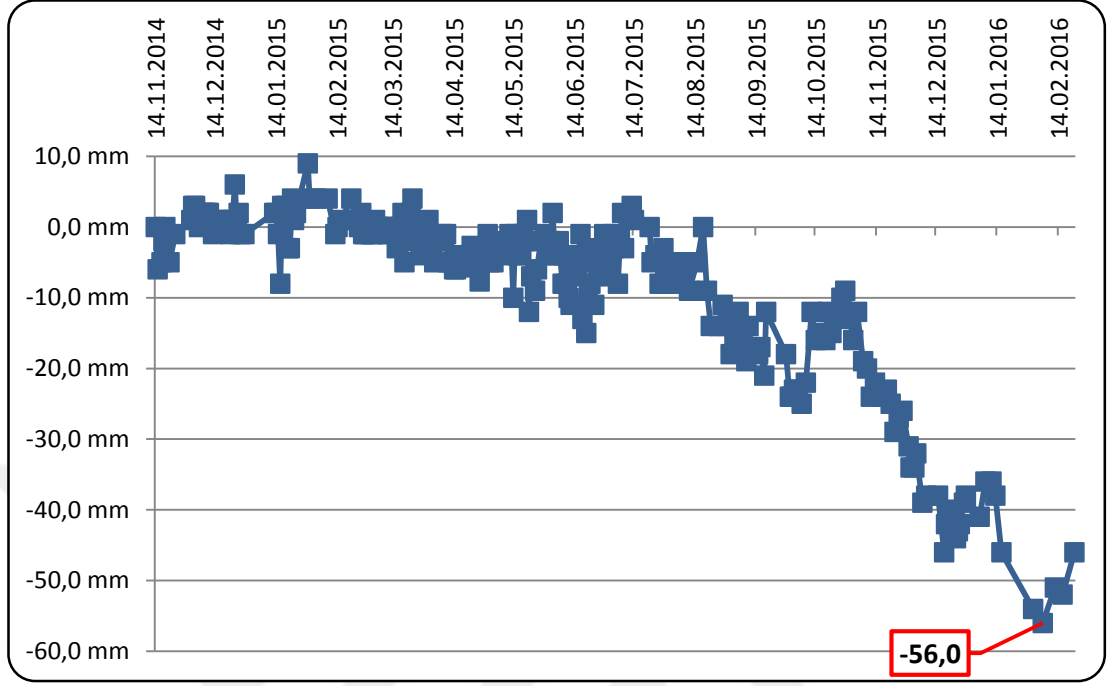
Şekil B.2 : ASE-27b sondajı karot sandık fotoğrafları (2/2)



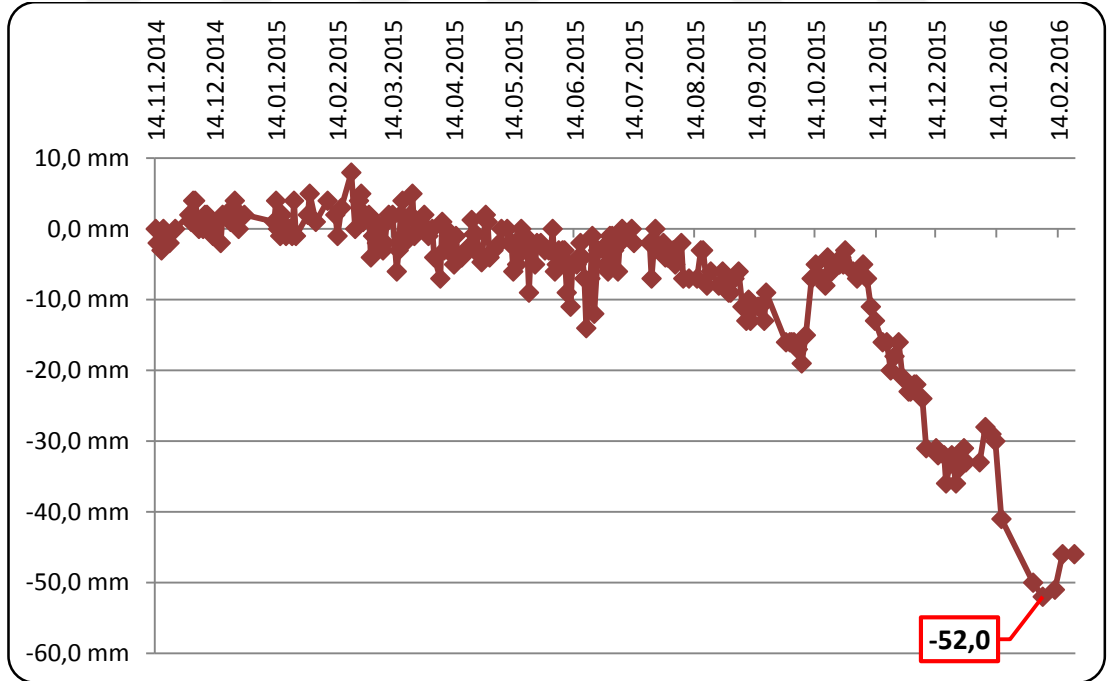
Şekil B.3 : ASE-28a sondajı karot sandık fotoğrafları



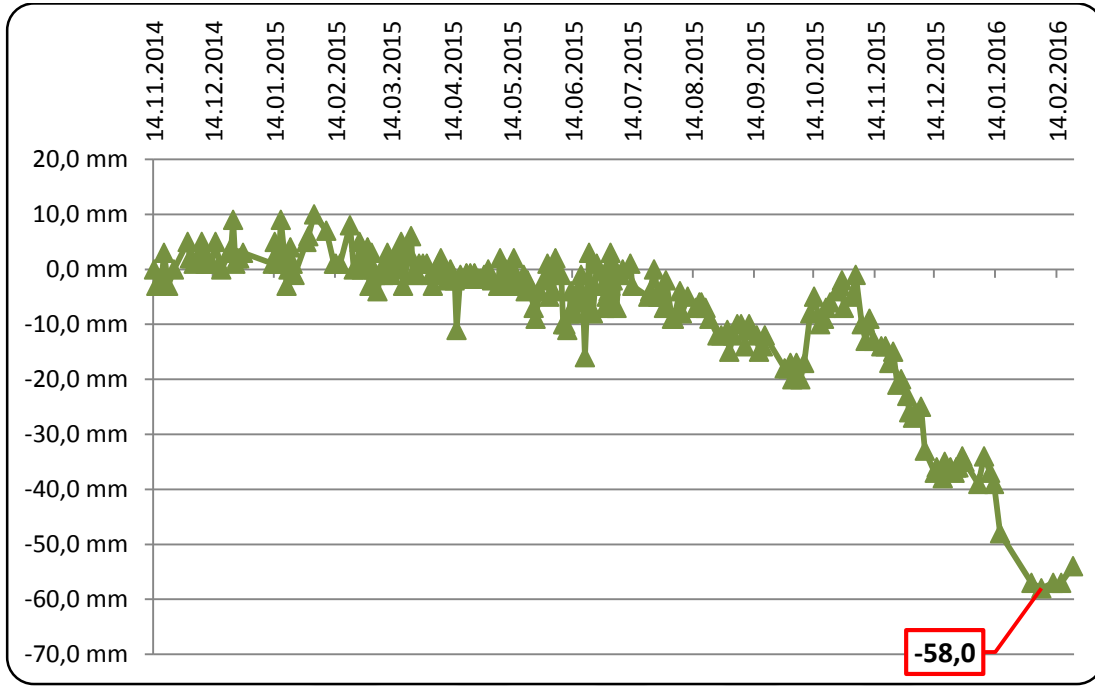
EK C: SU DEPOSU JEOTEKNİK ÖLÇÜM SONUÇLARI



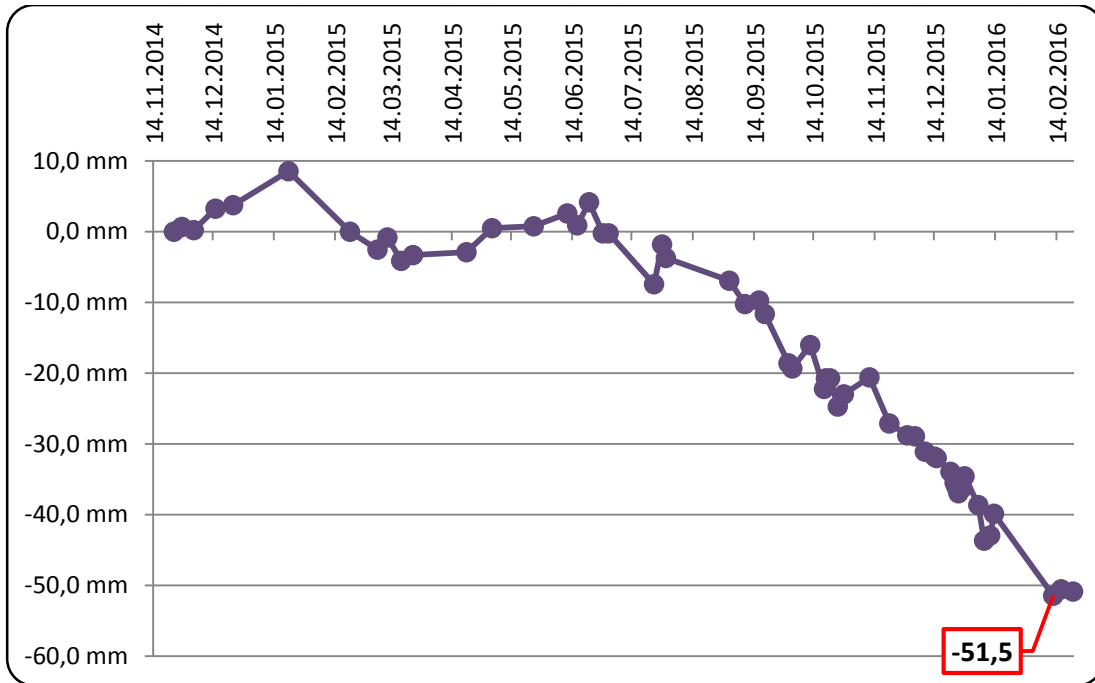
Şekil C.1 : 5 Nolu noktaya ait zamana bağlı 3D ölçüm sonuçları



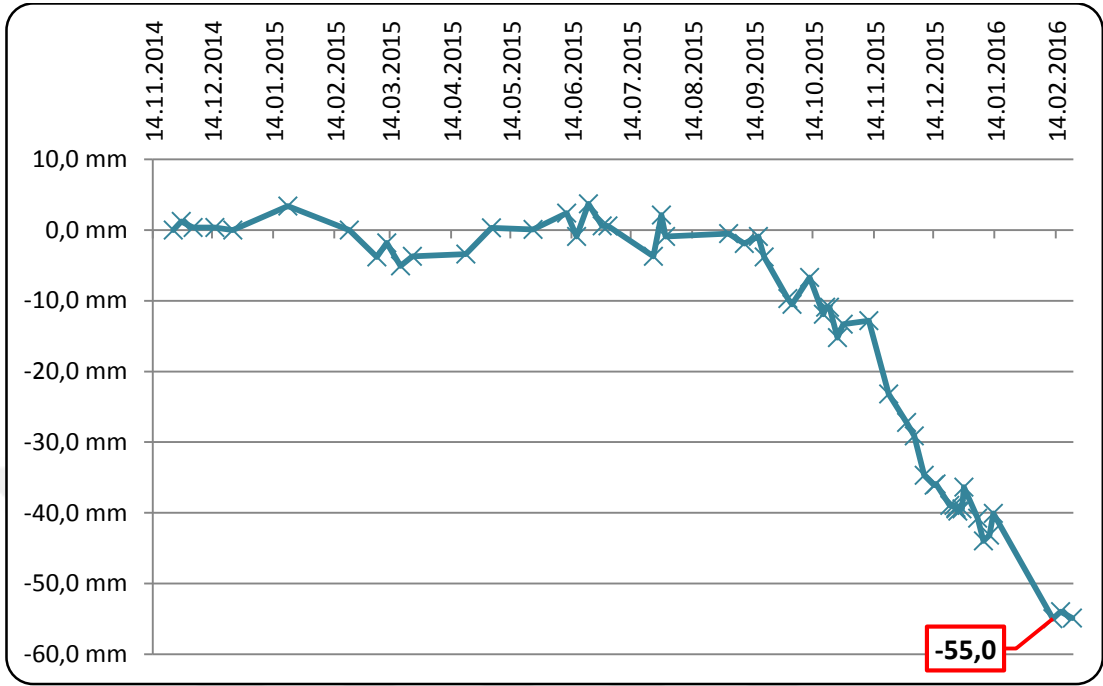
Şekil C.2 : 6 Nolu noktaya ait zamana bağlı 3D ölçüm sonuçları



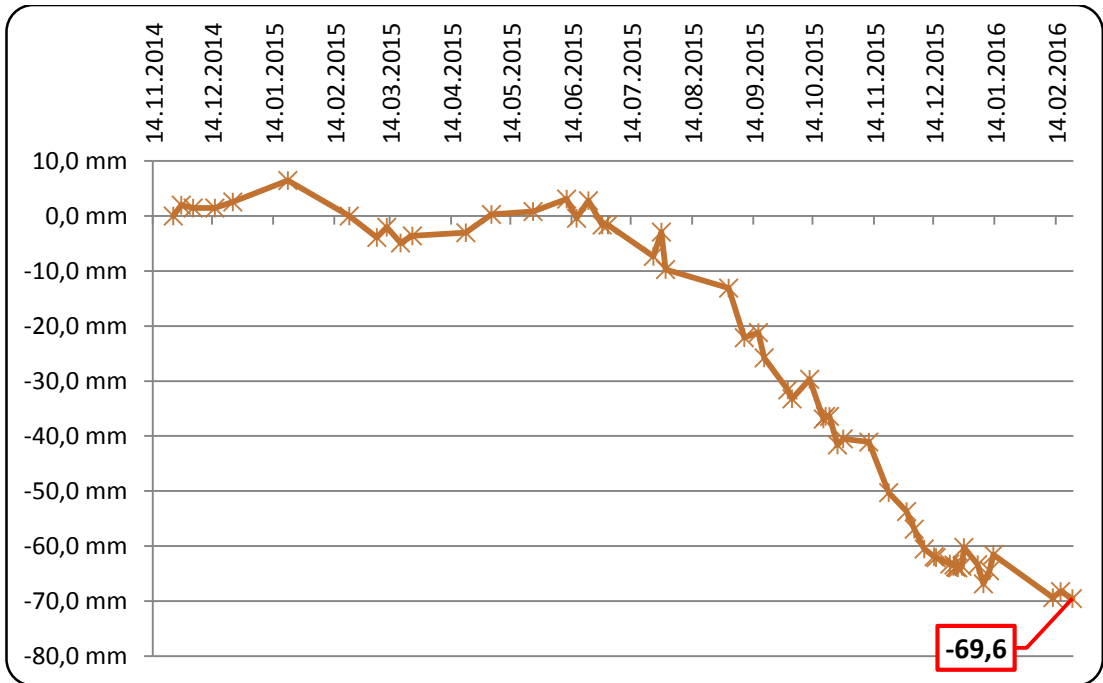
Şekil C.3 : 7 Nolu noktaya ait zamana bağlı 3D ölçüm sonuçları



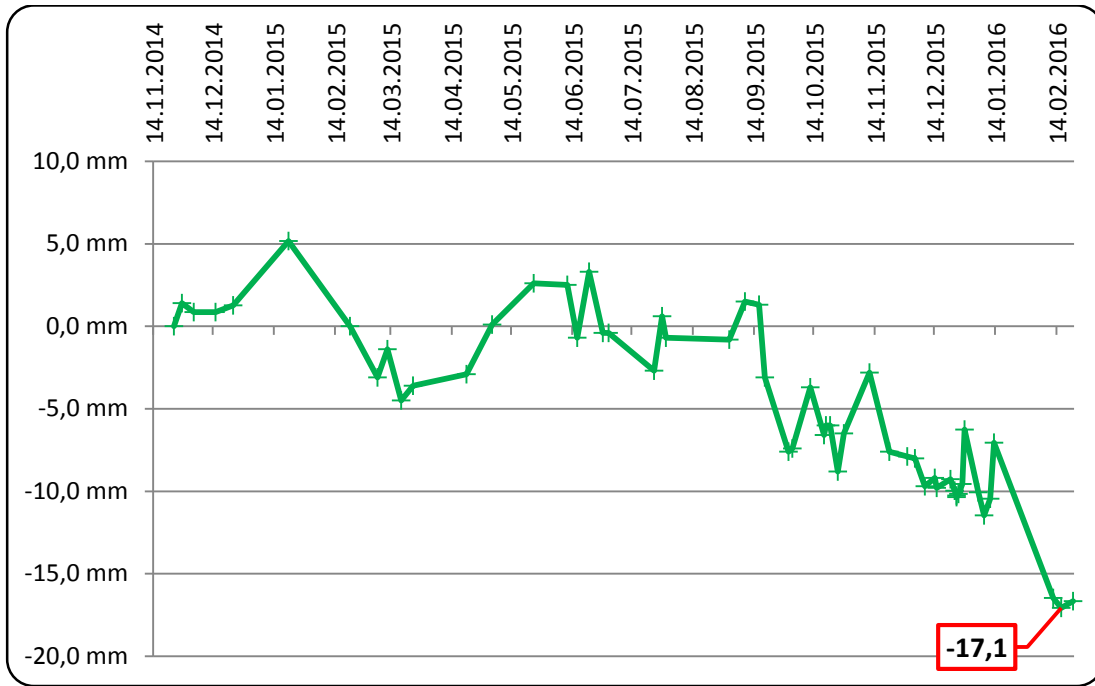
Şekil C.4 : RS1 noktasına ait zamana bağlı nivelman ölçüm sonuçları



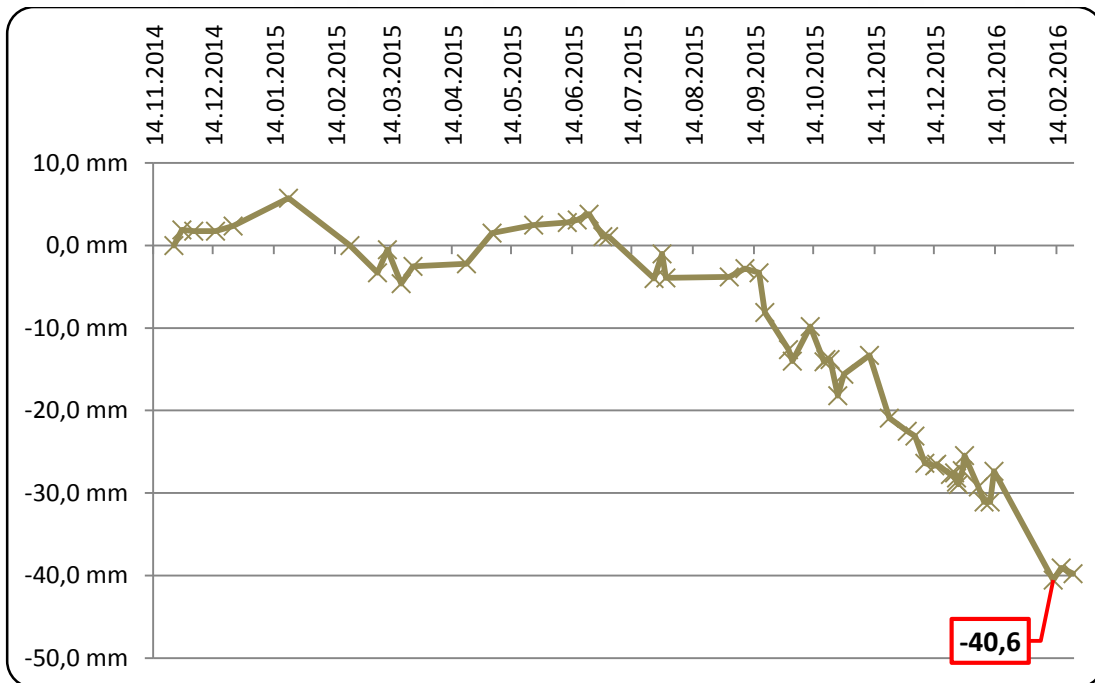
Şekil C.5 : RS2 noktasına ait zamana bağlı nivelman ölçüm sonuçları



Şekil C.6 : RS3 noktasına ait zamana bağlı nivelman ölçüm sonuçları



Şekil C.7 : RS4 noktasına ait zamana bağlı nivelman ölçüm sonuçları



Şekil C.8 : RS5 noktasına ait zamana bağlı nivelman ölçüm sonuçları

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Herman NURNUR

Doğum Tarihi ve Yeri: 01.01.1988 İstanbul

E-Posta: hermannurnur@gmail.com

Lisans : 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi
Maden Mühendisliği

Mesleki Deneyim :
2011 - Devam ediyor EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.