

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YERALTI RAYLI SİSTEM İNŞAATLARINDAKİ GEOTEKNİK
UYGULAMALAR: HALKALI-YENİ HAVALİMANI METRO
HATTI ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rabia KELEŞ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. İsa VURAL

Ekim 2022

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YERALTI RAYLI SİSTEM İNŞAATLARINDAKİ GEOTEKNİK
UYGULAMALAR: HALKALI-YENİ HAVALİMANI METRO
HATTI ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rabia KELEŞ

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 07/10/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Günay BEYHAN	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. İsa VURAL	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Abdulkadir ÖZDEN	BAŞARILI

BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yeraltı Raylı Sistem İnşaatlarındaki Geoteknik Uygulamalar: Halkalı-Yeni Havalimanı Metro Hattı Örneği” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. İsa VURAL ‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, örnek proje verilerini kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Rabia KELEŞ

03/06/2022

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez yazım sürecinde bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocam Doç. Dr. İsa VURAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Halkalı-Yeni Havalimanı Metro Projesi'nde inceleme yapmak üzere vermiş olduğum dilekçeye kısa sürede olumlu dönüş yapan Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü DLH Marmaray (İstanbul) Bölge Müdürlüğü'ne bana bu fırsatı verdikleri için teşekkürlerimi sunarım.

Halkalı-Yeni Havalimanı Metro Projesi'nin müşaviri Apco-Altınok İş Ortaklığı çalışanlarından İnşaat Kontrol Amiri Yük. İnş. Müh. Gökçen ALTINOK ve Tünel Kontrol Şefi Maden Müh. Ferhat KARS başta olmak üzere tüm çalışanlara proje hattında birebir gözlem yapmamı sağladıkları, proje verilerinin yanında bilgi ve deneyimlerini de benimle paylaştıkları için teşekkürlerimi sunarım.

Arş. Gör. Dr. Ali SİLAHTAR'a tezime bulunduğu katkılardan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Aileme ve dostlarıma bu süreçte gösterdikleri sabır ve anlayışlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	i
TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
SİMGELER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Tezin Amacı	2
BÖLÜM 2. LİTETATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Yeraltının Kullanım Alanları	4
2.2. Tüneller	5
2.2.1. Tünelciliğin tarihçesi.....	5
2.2.2. Tünelcilikte kazı metodları	8
2.2.2.1. Aç-kapa kazı metodu.....	8
2.2.2.2. Delme-patlatma metodu	9
2.2.2.3. Yeni Avusturya tünel açma metodu (NATM)	10
2.2.2.4. Makine ile tünel açma metodu	12
2.2.3. Dünya’da ve Türkiye’de yeraltı raylı sistem örnekleri	15
2.2.3.1. Londra metrosu	15
2.2.3.2. New York metrosu	16
2.2.3.3. İstanbul metrosu	16
2.3. Kaya Sınıflandırma Sistemleri	17
2.4. Elektrik Özdirenç Yöntemi	22
BÖLÜM 3. HALKALI-YENİ HAVALİMANI METRO HATTI JEOTEKNİK	
İNCELEMELER.....	25
3.1. Proje Hattının Jeolojisi	25
3.2. Proje Hattının Yapısal Jeolojisi.....	29
3.3. Proje Hattında Depremsellik	30
3.4. Proje Hattının Hidrojeolojisi	32
3.5. Proje Hattında Yapılan Arazi ve Laboratuvar Çalışmaları	34
3.6. Proje Hattında Karşılaşılması Olası Jeolojik Problemler	35
3.6.1. Yeraltı suyu	35
3.6.2. Kazılabilirlik ve aşındırma.....	39
3.6.3. Yapışkanlık problemi	40
3.6.4. Karstik boşluklar	40
3.6.5. Akıcı zeminler.....	40
3.6.6. Blok oluşma potansiyeli.....	41

3.6.7. Fay zonları.....	41
3.6.8. Gaz tehlikesi.....	42
BÖLÜM 4. HALKALI-YENİ HAVALİMANI METRO HATTI GEOTEKNİK UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRMELERİ.....	44
4.1. Projenin Tanıtımı.....	45
4.2. Proje Hattındaki Geoteknik Uygulamalar	49
4.2.1. Proje hattındaki NATM uygulamaları	55
4.2.2. Proje hattındaki TBM uygulamaları	64
4.2.3. Proje hattındaki aç-kapa uygulamaları.....	75
4.2.4. Proje hattında meydana gelen geoteknik problemler ve çözümleri	86
BÖLÜM 5. PROJE HATTINDA OLUŞTURULAN JEOLJİK KESİTLER İLE JEOFİZİK KESİTLERİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	90
5.1. Proje Hattındaki Jeofizik Araştırmalar.....	90
5.2. Proje Hattında Oluşturulan Jeolojik Kesitler ile Jeofizik Kesitlerin Karşılaştırılması	95
BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	102
KAYNAKLAR	105

KISALTMALAR

BST	: Basıncılı Su Deneyi
EPB-TBM	: Pasa Basıncılı Tünel Açma Makinesi (Earth-Pressure-Balance Tunnel Boring Machine)
ERT	: Elektrik Rezistivite Tomografi
GİS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
GSI	: Jeolojik Dayanım İndeksi
MSV	: Çok Amaçlı Tünel Servis Aracı (Multi Service Vehicle)
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu
NFPA	: Sabit Kılavuz Yollu Transit ve Yolcu Raylı Sistemleri Standardı
OG	: Orta Gerilim
PVC	: Poly Vinil Klorür
RMR	: Kaya Kütle Oranı (Rock Mass Rating)
RSR	: Kaya Yapısı Oranı (Rock Structure Rating)
RQD	: Kaya Kütle Kalitesi
SK	: Sondaj Kuyusu
TBM	: Tünel Açma Makinesi (Tunnel Boring Machine)
TCR	: Toplam Karot Verimi
TVF	: Tünel Havalandırma Fanı (Tunnel Ventilation Fan)
UD	: Örselenmemiş Numune
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (Unified Soil Classification System)
YASS	: Yeraltı Su Seviyesi
YYH	: Yeni Havalimanı-Halkalı
Q	: Kaya Kütle Sınıflaması

SİMGELER

c	: Kohezyon
ν	: Poisson oranı
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
Ct	: Trakya formasyonu
Is(50)	: Nokta yükü dayanım indeksi
Ksgb	: Garipçe formasyonu-Boğazköy andezit üyesi
LL	: Likit limit
PI	: Plastisite indisi
PL	: Plastik limit
Tc	: Ceylan Formasyonu
Tçb	: Çekmece formasyonu-Bakırköy üyesi
Tçç	: Çekmece formasyonu-Çukurçeşme üyesi
Tçğ	: Çekmece formasyonu-Güngören üyesi
Tda	: Danişmen formasyonu-Ağaçlı Üyesi
Tdg	: Danişmen formasyonu-Güngören Üyesi
Tik	: İstanbul formasyonu-Kıraç üyesi
Tk	: Koyunbaba formasyonu
Tsğ	: Soğucak kireçtaşı
Yd	: Yapay dolgu
Wn	: Su içeriği
Qal	: Alüvyon

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1 : Kaya kütlesi türleri ve tanımları.	18
Tablo 2.2 : Kaya kütlesi sınıflarına göre kaya kütlesi özellikleri.	19
Tablo 2.3 : Q indeksine göre kaya kütleleri sınıfları.....	20
Tablo 2.4 : Bazı materyallerin özdirençleri.....	24
Tablo 3.1 : HYH Metro hattında ölçülen süreksizlikler.....	29
Tablo 3.2 : HYH Metro Hattı sismik tasarım parametreleri.	31
Tablo 3.3 : İstanbul iline ait uzun yıllar (1929 – 2017) içinde gerçekleşen meteorolojik veriler.	33
Tablo 4.1 : Halkalı-Yeni Havalimanı ve Gayrettepe-Yeni Havalimanı sürücüsüz yeraltı raylı sistem hattı demiryolu tasarım kriterleri.....	44
Tablo 4.2 : HYH Metro Hattı güzergâh bilgileri.....	46
Tablo 4.3 : HYH Metro Hattı tünel tipleri boyutları.....	49
Tablo 4.4 : HYH Metro Hattı tünel tipleri kesit alanları.....	50
Tablo 4.5 : TBM imalat detayları.....	65
Tablo 4.6 : Projede kullanılan TBM çeşitleri ve özellikleri.....	66
Tablo A 1 : Dolgu tabakasına ait indeks, fiziksel ve mühendislik özellikler.....	109
Tablo A 2 : Orta sıkı – sıkı killi kum tabakasına ait indeks, fiziksel ve mühendislik veriler.	109
Tablo A 3 : Çok Katı Kumlu Kil (Tda) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik özellikler.....	110
Tablo A 4 : Çok Katı – Sert Kil (Tamamen Ayrışmış Kaya) tabakasına ait indeks, fiziksel ve mühendislik veriler.	110
Tablo A 5 : Sert Kil - Kıltaşı tabakasına ait fiziksel ve mühendislik veriler.	110
Tablo A 6 : Çok Ayrışmış Marn-Kıltaşı tabakasına ait fiziksel ve mühendislik veriler.	111
Tablo A 7 : Orta – az ayrışmış veya ayrışmamış Marn-Kıltaşı ar dalanmasına ait fiziksel, indeks ve mekanik veriler.....	111
Tablo A 8 : Orta – az ayrışmış veya ayrışmamış Kireçtaşı-Marn ar dalanması tabakasına ait fiziksel, indeks ve mekanik veriler.....	111
Tablo A 9 : Km 41+550 – 42+340 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks ve mekanik veriler.....	112
Tablo A 10 : Hat-1; Km: 44+700 – Km: 45+900 arası için mühendislik veriler.....	112
Tablo A 11 : Hat-1; Km: 46+820 – Km: 47+100 arası için mühendislik veriler.....	112
Tablo A 12 : Hat-1; Km: 45+900 – Km: 46+820 arası için mühendislik veriler.....	113
Tablo A 13 : Hat-1; Km: 47+100 – Km: 47+220 arasında Koyunbaba Formasyonu (sert kil) ve tamamen ayrışmış andezit seviyesine ait mühendislik veriler.	113
Tablo A 14 : Hat-1; Km: 47+100 – Km: 47+220 arasında Boğazköy Andezit üyesinin tünel etki zonu içinde kalan kesimine ait mühendislik veriler.	113

Tablo A 15 : Hat-1; Km: 47+100 – Km: 47+220 arasında Boğazköy Andezit üyesinin tünel etki zonu içinde kalan kesimine ait mühendislik veriler.	114
Tablo A 16 : Hat-1; Km: 47+220 – Km: 47+296 ve Km: 47+476 – Km: 47+800 arası için mühendislik veriler.	114
Tablo A 17 : Hat-1; Km: 47+800 – Km: 48+700 arası için mühendislik veriler.	114
Tablo A 18 : Hat-1; Km: 48+760 – Km:49+450 arası için mühendislik veriler.	115
Tablo A 19 : Hat-1; Km: 49+450 – Km: 50+200 aralığı mühendislik veriler.	115
Tablo A 20 : Hat-1; Km: 50+200 – Km: 50+600 arası için mühendislik veriler.	115
Tablo A 21 : Hat-1; Km: 50+600 – Km: 54+000 arası için mühendislik veriler.	116
Tablo A 22 : Hat-1; Km: 54+180 – Km: 54+400 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks vemekanik veriler.	116
Tablo A 23 : Hat-1; Km: 54+600 – Km: 55+500 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks vemekanik veriler.	116
Tablo A 24 : Hat-1 Km: 55+500 – Km: 55+800 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks vemekanik veriler.	117
Tablo A 25 : Hat-1 Km: 55+800 – Km: 57+300 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks vemekanik veriler.	117
Tablo A 26 : Hat-1 Km: 57+300 – Km: 57+700 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks vemekanik veriler.	117
Tablo A 27 : Fay zonlarına ait kısıtlı veriler.	118
Tablo A 28 : Dolgu tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.	118
Tablo A 29 : Çok Katı Kumlu Kil (Alüvyon) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.	118
Tablo A 30 : Çakıllı Kumlu Sert Kil- Çakıllı Killi Sıkı Kum (Tik) Tabakasına ait mühendislik veriler.	119
Tablo A 31 : Sert kumlu kil (Tamamen Ayrışmış Kaya) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mekanik veriler.	119
Tablo A 32 : Karstik dolgulara (Kd) ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.	119
Tablo A 33 : Fay zonları için beklenen veriler.	120
Tablo A 34 : Soğucak kireçtaşı kaya biriminin çok – orta derecede ayrıışmış kesimlerine ait veriler.	120
Tablo A 35 : Soğucak kireçtaşı kaya biriminin az ayrıışmış, orta – sıkı kırıklı kesimlerine ait veriler.	120
Tablo A 36 : Kumtaşı-kiltaşı ardalaşmasına (Tk) ait mühendislik veriler.	121
Tablo A 37 : Çok – Orta derecede ayrıışmış kumtaşı-şeyl kaya seviyesine ait mühendislik veriler.	121
Tablo A 38 : Az ayrıışmış- taze (W2-W1) kaya seviyesine ait mühendislik veriler.	121
Tablo A 39 : Dolgu tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.	122
Tablo A 40 : Çok Katı Kumlu Kil (Alüvyon) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.	122
Tablo A 41 : Çok katı kumlu kil (Örtü) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.	123
Tablo A 42 : Çok katı – sert kumlu kil (Tdg-1) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.	123
Tablo A 43 : Sert kil – kiltaşı (Tdg-2) tabakasına ait mühendislik veriler.	124
Tablo A 44 : Çok ayrıışmış marn-kiltaşı-kalkarenit (Tc-1) kaya seviyesine ait mühendislik veriler.	124
Tablo A 45 : Az-orta ayrıışmış veya ayrıışmamış marn-kiltaşı-kalkarenit (Tc-2) kaya seviyesine ait mühendislik veriler.	124
Tablo A 46 : Kireçtaşı (Tsğ-1) kaya birimine ait mühendislik veriler.	125

Tablo A 47 : Kireçtaşı-Kalkarenit Ardalaşmasına (Tsğ-2) ait mühendislik veriler.	125
Tablo A 48 : Ezik Zon için derlenen mühendislik veriler.....	125



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 : H.J. Maus tarafından geliştirilen tünel açma makinesi, Mont Cenis tüneli.	7
Şekil 2.2 : Tünel açma yönteminde kullanılan terimler.	8
Şekil 2.3 : NATM tünel kesiti.	10
Şekil 2.4 : TBM kesici kafası.	12
Şekil 2.5 : Açık mod da EPB TBM.	13
Şekil 2.6 : Kapalı mod da EPB TBM.	14
Şekil 2.7 : Londra metro haritası.	15
Şekil 2.8 : İstanbul raylı sistemler ağ haritası.	17
Şekil 2.9 : İstanbul inşa halindeki raylı sistemler ağ haritası.	17
Şekil 2.10 : Jeolojik dayanım indeksi (GSI) sınıflandırması.	21
Şekil 2.11 : Q ve RMR kaya kütle sınıflamaları ile ONORM 2203 kaya sınıfı karşılıkları ile İBB İstanbul metroları kazı-destek sınıfları için korelasyon abağı.	22
Şekil 2.12 : Çok elektrotlu öz direnç görüntüleme yönteminin bazı kullanım alanları.	23
Şekil 3.1 : Kırmızı noktalar ile sınırları belirtilen Km: 38+077 – 44+700 arası için genel jeoloji haritası.	26
Şekil 3.2 : Km: 44+700 – 57+700 arası için genel jeoloji haritası.	26
Şekil 3.3 : Mavi çizgi ile belirtilen Km: 57+700 – 62+500 arası için genel jeoloji haritası.	27
Şekil 3.4 : Kırmızı noktalar ile sınırları belirtilen Km: 62+500 – 69+359 arası için genel jeoloji haritası.	27
Şekil 3.5 : HYH Metro hattı jeolojik formasyonları.	28
Şekil 3.6 : Değerlendirmede esas alınan düşeydeki tünel etki zonunun şematik görünümü.	35
Şekil 3.7 : Değerlendirmede esas alınan yataydaki tünel etki zonunun şematik görünümü.	35
Şekil 3.8 : Km 38+077 – 44+700 aralığında yeraltı su seviyesinin tünel kırmızı kotuna göre değişimi.	36
Şekil 3.9 : Km: 44+700 – 57+700 aralığında yeraltı suyunun tünel kırmızı kotuna göre değişimi.	37
Şekil 3.10 : Km: 57+700 – 62+500 aralığında yeraltı suyunun tünel kırmızı kotuna göre değişimi.	38
Şekil 3.11 : Km: 62+500 – Km: 69+359 aralığında yeraltı suyunun tünel kırmızı kotuna göre değişimi.	39
Şekil 4.1 : HYH Metro Hattı uydu görüntüsü ve entegrasyon noktaları.	45
Şekil 4.2 : Fenertepe istasyonu peron kat planı.	47
Şekil 4.3 : Fenertepe istasyonu teknik kat planı.	47
Şekil 4.4 : Fenertepe istasyonu bilet holü kat planı.	47
Şekil 4.5 : Fenertepe istasyonu kesiti.	48

Şekil 4.6 : Fenertepe istasyonu kuzey konkors kesiti.	48
Şekil 4.7 : Fenertepe istasyonu üç boyutlu görüntüsü.	49
Şekil 4.8 : Hat tüneli en kesiti.	50
Şekil 4.9 : Makas tüneli en kesiti.	51
Şekil 4.10 : B7 bağlantı tüneli en kesiti.	51
Şekil 4.11 : B4 merdiven tüneli en kesiti.	52
Şekil 4.12 : Merdiven tünelleri boy kesiti.	52
Şekil 4.13 : B6 merdiven tüneli en kesiti.	53
Şekil 4.14 : Peron tüneli en kesiti.	53
Şekil 4.15 : B2 bağlantı tüneli.	54
Şekil 4.16 : TBM tüneli.	54
Şekil 4.17 : Aşamalı NATM kazısı.	55
Şekil 4.18 : Üst yarı geçici tahkimat donatısı imalatı.	56
Şekil 4.19 : Süren ve tünel tahkimat donatıları.	57
Şekil 4.20 : Kaya bulonları.	58
Şekil 4.21 : NATM tüneline reflektör yerleşimi.	58
Şekil 4.22 : Reflektör.	59
Şekil 4.23 : İnvert izolasyon imalatı.	59
Şekil 4.24 : İnvert donatı imalatı.	60
Şekil 4.25 : İzolasyon, donatı imalatı tamamlanan makas tüneline kalıcı kaplama için kemer kalıbın yerleştirilmesi.	61
Şekil 4.26 : NATM tünelleri için kalıcı kaplama kemer kalıbı.	61
Şekil 4.27 : Ahşap kalıp imalatı.	62
Şekil 4.28 : Kemer donatı imalatı.	62
Şekil 4.29 : Su tutucu bantlar.	63
Şekil 4.30 : A tüneli (sağdaki) ve ana hat tüneli (soldaki) kesitleri.	63
Şekil 4.31 : Geçici tahkimat imalatı (sağdaki) ve kalıcı kaplama imalatı (soldaki) tamamlanmış tünel kesitleri.	64
Şekil 4.32 : TBM güzergahları.	64
Şekil 4.33 : TBM kesici kafa ve kalkanı.	66
Şekil 4.34 : TBM çalışma prensibi şematik gösterimi.	67
Şekil 4.35 : Segmentlerin diziliş şeması.	68
Şekil 4.36 : Segment donatıları.	69
Şekil 4.37 : Segmentin kalıbından çıkarılması.	69
Şekil 4.38 : Kilit segment (A) kalıbı.	70
Şekil 4.39 : Segmentlerin yerine yerleştirilmesi.	70
Şekil 4.40 : Segmentlerin akış şeması.	71
Şekil 4.41 : Herrenknecht segment pozisyonları.	71
Şekil 4.42 : İmalat sahasında istiflenen segmentler.	72
Şekil 4.43 : Konveyör bant sistemi.	73
Şekil 4.44 : TBM bileşenleri.	73
Şekil 4.45 : Segment döşemesi ve faz beton imatları tamamlanmış tünel.	74
Şekil 4.46 : Yürüme yolu, ray altı betonu imatları tamamlanmış tünel.	75
Şekil 4.47 : Kazık üst kotuna göre harfiyat alınan bekleme makası sahası.	76
Şekil 4.48 : Gidaj beton uygulaması T17 servis istasyonu sahası.	76
Şekil 4.49 : Kazık donatıları.	77
Şekil 4.50 : Tremi boruları.	77
Şekil 4.51 : Strut.	78
Şekil 4.52 : Kayaşehir istasyonu güney konkors sahasında çapraz strut imalatı.	79
Şekil 4.53 : Olimpiyaköy istasyonu kuzey konkors aç-kapa yapısı.	79

Şekil 4.54 : Arnavutköy 1 istasyonu kuzey konkors aç-kapa yapısı.....	80
Şekil 4.55 : Fenertepe istasyonu güney konkors aplikasyon planı.....	80
Şekil 4.56 : Arnavutköy 1 istasyonu güney konkors temel altı şaft saha görünümü.	81
Şekil 4.57 : Arnavutköy 1 istasyonu güney konkors aplikasyon planı.	82
Şekil 4.58 : Yeni nesil temel su yalıtım numunesi.....	82
Şekil 4.59 : Arnavutköy 1 istasyonu kuzey konkors aç-kapa yapısı yalıtım uygulaması.....	83
Şekil 4.60 :TK14 servis istasyonu şaftı kesiti.	84
Şekil 4.61 : Fore kazık ve başlık kirişi imalatı tamamlanmış TK14 servis istasyonu şaftı kesiti.....	85
Şekil 4.62 : Portal vinç.	85
Şekil 4.63 : Tünel havalandırma fanı (TVF).	86
Şekil 4.64 : Arnavutköy 1 istasyonunda meydana gelen göçme.....	87
Şekil 4.65 : T14 servis istasyonunda meydana gelen sökülme	87
Şekil 4.66 : Bekleme makasında meydana gelen sökülme.	88
Şekil 4.67 : M14 makasında meydana gelen akma.	89
Şekil 4.68 : M14 makasında akma sonrası püskürtme beton-hasır çelik imalatı.	89
Şekil 5.1 : ERT-1 (Hat-1 61+440 – 61+660 / Hat-2 61+400 – 61+620) jeofizik çalışma bölgesi vaziyet planı.....	91
Şekil 5.2 : ERT-1 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde iki boyutlu (2D) ölçülen görünür özdirenç (üstte), hesaplanan görünür özdirenç (altta).	91
Şekil 5.3 : ERT-1 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde hesaplanan iki boyutlu (2D) özdirenç ters çözüm kesiti.....	92
Şekil 5.4 : ERT-2 / ERT-3 (Olimpiyatköy Stadı istasyonunda) jeofizik çalışma bölgesi vaziyet planı.	92
Şekil 5.5 : ERT-2 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde iki boyutlu (2D) ölçülen görünür özdirenç (üstte), hesaplanan görünür özdirenç (altta).	93
Şekil 5.6 : ERT-2 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde hesaplanan iki boyutlu (2D) özdirenç ters çözüm kesiti.....	93
Şekil 5.7 : ERT-3 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde iki boyutlu (2D) ölçülen görünür özdirenç (üstte), hesaplanan görünür özdirenç (altta).	93
Şekil 5.8 : ERT-3 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde hesaplanan iki boyutlu (2D) özdirenç ters çözüm kesiti.....	93
Şekil 5.9 : ERT- 4 (Hat-2 62+835 – 63+050) çalışma bölgesi vaziyet planı.	94
Şekil 5.10 : ERT-4 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde iki boyutlu (2D) ölçülen görünür özdirenç (üstte), hesaplanan görünür özdirenç (altta).	94
Şekil 5.11 : ERT-4 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde hesaplanan iki boyutlu (2D) özdirenç ters çözüm kesiti.....	94
Şekil 5.12 : ERT-1 ters çözüm kesiti ve aynı lokasyondaki sondajlardan elde edilen jeolojik kesit.	96
Şekil 5.13 : YHH-81C sondajı 24.30 m – 30.40 m arası sandık görseli.	97
Şekil 5.14 : ERT-2/ERT-3 ters çözüm kesitleri ve aynı lokasyondaki sondajlardan elde edilen jeolojik kesit.	98
Şekil 5.15 : ERT-4 ters çözüm kesiti ve aynı lokasyondaki sondajlardan elde edilen jeolojik kesit.	99
Şekil 5.16 : YHH-102 sondajı 6.10 m – 14.00 m arası sandık görseli.....	100

YERALTI RAYLI SİSTEM İNŞAATLARINDAKİ GEOTEKNİK UYGULAMALAR: HALKALI-YENİ HAVALİMANI METRO HATTI ÖRNEĞİ

ÖZET

Bu tez kapsamında örnek olarak Halkalı – Yeni Havalimanı hattının imalatı öncesinde yapılan jeolojik çalışmalar ve imalatı sırasındaki geoteknik uygulamalara ait detaylar paylaşılarak yeraltı raylı sistem imalatlarında karşılaşılan problem verileri incelenecektir.

Jeolojik incelemesi dört kısımda yapılan yaklaşık 30 km uzunluğundaki metro hattında toplam 9588,5 m uzunluğunda 198 adet karotlu araştırma sondaj yapılmıştır. Bu sondajlardan 1006 adet zemin, 1230 adet kaya numunesi elde edilerek üzerlerinde yapılan laboratuvar deneyleri ve sondajlar sırasında gerçekleştirilen arazin deneyleri sonuçlardan hareketle hattın jeolojik kesiti oluşturulmuştur. Oluşturulan jeolojik kesitin yeterli gelmediği fay zonlarının, karstik boşlukların bulunduğu problemlili bölgelerde doğru veriler elde edebilmek amacıyla üç farklı konumda Çoklu Elektrotlu Elektrik Rezistivite Tomografi yöntemi kullanılarak yapılan jeofizik çalışmalar ile 2 boyutlu yeraltı öz direnç ters çözüm kesitleri elde edilmiştir. Bu kesitler ile sondaj logları ile elde edilen kesitler karşılaştırılmıştır.

Halkalı-Yeni Havalimanı metro hattı 31,3×2 km ana hat, 1,8×2 km depo bağlantı hattı olmak üzere toplam 66,2 km uzunluğundaki yeraltı tünellerinden oluşmaktadır. Hatta 7 adet metro istasyonu, 1 adet YHT (Yüksek Hızlı Tren) istasyonu, 11 adet makas yapısı, 8 adet servis istasyonu, 2 adet acil kaçış shaftı, 12 adet inşaat shaftı ve 106 adet ara geçiş (Cross-Passage) tüneli bulunmaktadır. Projedeki Tünel Açma Makinesi (TBM) kullanılan tünellerinin uzunluğu yaklaşık 55,7 km, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) uygulanan tünellerin toplam uzunluğu ise yaklaşık 15,8 km'dir. Kazısı TBM ile açılacak tünellerin kesitleri tam dairesel, istasyon, makas, bağlantı ve ara geçiş gibi tüneller ile kazısı NATM ile planlanan diğer tünel kısımları ise genellikle at nalı şeklinde ancak değişik tip, çap ve kesitlere sahip olacaktır.

Anahtar Kelimeler: TBM, NATM, Aç-kapa, Yeraltı tünelleri

GEOTECHNICAL APPLICATIONS IN UNDERGROUND RAIL SYSTEM CONSTRUCTION: THE CASE OF HALKALI- İSTANBUL AIRPORT SUBWAY LINE

SUMMARY

This thesis aims to provide a template for underground rail system manufacturing by sharing details of the geological work done prior to the construction of the Halkalı-İstanbul Airport and the geotechnical implications during its construction.

A total of 198 core research drillings with a total length of 9588.5 m were made on the approximately 30 km long metro line, whose geological investigation was carried out in four parts. The geological section of the line was formed based on the laboratory tests performed on 1006 soil and 1230 rock samples obtained from these drillings and the results obtained from the field tests carried out during the drillings. Two-dimensional subsurface resistivity inversion sections were obtained by geophysical studies using the Multiple Electrode Electrical Resistivity Tomography method in three different locations in order to obtain accurate data in problem areas where the fault zones and karst voids are not sufficient. These sections were compared with the sections obtained by drilling logs.

Halkalı-Yeni Havalimanı metro line consists of underground tunnels with a total length of 66.2 km, of which 31.3×2 km is the main line and 1.8×2 km is the warehouse connection line. In the line, there are 1 YHT (High Speed Train) station and 7 metro stations, 11 truss structures, 8 service stations, 2 emergency escape shafts, 12 construction shafts and 106 Cross-Passage tunnels. The length of the tunnels using the Tunnel Boring Machine (TBM) in the project is approximately 55.7 km, and the total length of the tunnels using the New Austrian Tunneling Method (NATM) is approximately 15.8 km. The sections of the tunnels to be excavated with TBM are fully circular and the cross-section of the station and switch and connection and intermediate tunnels, whose excavation is planned with NATM, will generally be horseshoe-shaped and will have different types and dimensions.

In the project, NATM is applied in many locations and sections with different usage purposes, such as truss tunnels, connection tunnels, stair tunnels, mezzanine tunnels, elevator tunnels, platform tunnels, approach tunnels, intermediate transition tunnels and electric-machine shaft tunnels.

In this project, the areas formed by the 7 stations (Arnavutköy 1, Arnavutköy 2, Fenertepe, Kayaşehir, Olympicköy, Halkalı Stadium, Halkalı) form the platform tunnels. At the stations, there are connection tunnels to provide the transition between the lines, elevator and stair tunnels to bring the passengers to the surface, intermediate tunnels that serve as a landing at the stations consisting of two floors, and electrical-machine shaft tunnels. Electric-machine shaft tunnels are located at stations outside the passenger area. Transition from shaft to line tunnels is provided by approach tunnels. Temporary fortifications in NATM tunnels consist of approximately 1 m long shoring. Shotcrete (C20 or C25), steel mesh (B500C), lattice

beam (Reinforcement: B420C), 4 meters or 6 meters long rock bolts, the number of which differs according to the soil type, are used in the shoring. After the temporary support fabrication is completed in the tunnel, reflectors are placed on the shoring, 3 (The number increases in large sections such as platform and truss tunnels) in ring wool, at 10 meters intervals. The purpose of the reflectors is to follow the deformations in the tunnel at varying time intervals depending on the deformations until the permanent coating is done. Before the reinforced concrete permanent coating is applied, insulation is applied inside the tunnel. NATM tunnels are inverted anodes, curves and truss tunnels as 6-metre lanes and on the alignment, it is produced as 12-meter anodes. The concreting process of the slabs, where the piers are built and the reinforcements are placed, is carried out by means of 6 m or 12 m long steel molds specially manufactured for tunnel sections. In order to provide watertightness, waterstop tapes are used in the belt invert junction areas and the junction areas of the anodes.

The production of approximately 60 km long TBM tunnels will be carried out with 6 different TBMs, and the process is managed by dividing the line into four phases. TBM produces one ring and one excavation per hour in stable conditions. This means that the machine is fed hourly with the injection mortar required for a minimum of 6 segment stones and a ring. The length of this route, which feeds the TBM, where various productions continue on the line and a single vehicle can move forward or backward without any maneuvering space, is determined as a result of the optimization of the time and cost calculation of the disassembly and installation process of the TBM. The suitability of the location and areas of the TBM entrance-exit structures, the total length of the line, and the number of machines to be used can be counted among other factors. TBM carries out the excavation by means of cutting blades and cutting discs located in the cutter head. The excavated ground is transferred to the excavation area with the help of the cavities in the cutter head. The power of the advancement rollers is transferred to the excavated material (waste) through the pressure chamber, preventing uncontrolled leakage of the ground from the mirror to the excavation area EPB TBM (Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine) keeps the ground collapses and swellings under pressure by converting the space into a closed volume in order to control the water pressure. The purpose is for the rust to fill the cutter head chamber (excavation area) and support the entire surface. The lining of the tunnel consists of prefabricated concrete segments. In the shield area, under atmospheric pressure, behind the pressure wall, the segment erector is lifted by the vacuum system that can rotate 360°, and the segment is brought to the position where it will be mounted, and the assembly is carried out. The outer diameter of the segments used in the project is 6.3 m and the inner diameter is 5.7 m. The segments are 1.5 m long and 30 cm thick. A ring is composed of 6 segments in 5+1 shape. These segments are named A, B, C, D, E, and F. 'D' is the segment with the largest dimension and 'A' is the key segment. Thanks to the millimeter differences between the segments and the various combinations created with the segments, the TBM is guided using push rollers with a horizontal movement area of 1.80 m on the machine. The creation of a ring starts with the 'D' segment and the 'A' lock segment is placed last. The union of the two rings is provided with the help of pins, which have a total of 16 in the segments. With the TBM, there are support elements that progress from the entrance structure to the exit structure. These can be listed as 34 500 volt MV (Medium Voltage) cable, conveyor belt system that provides the transfer of rust from inside the tunnel, drainage line, machine cooling water and tunnel ventilation fan.

The cut-cover method was used in some of the switch structures, service stations, construction shafts and concourse areas forming the passenger entry-exit zones at the stations. This method has the principle of taking timbering measures before excavation in the area to be excavated. First, excavation is taken from the land surface to the top of the pile. The reinforcements prepared in the field are placed in the drilling well with the help of a tower crane, paying attention to the concrete cover. This can be done in one or several stages, depending on the pile size. Concreting of the piles is done by using pile-length tremie pipes in order to minimize manufacturing errors and to pour the concrete without free fall. After the production of the remaining piles is completed, it is ensured that the piles at the same level work together with the help of cap beams. Waler beams are produced with gradual excavation. Before proceeding to the next stage excavation, one of the strut or anchor applications is preferred in order to meet the lateral loads.

Key words: TBM, NATM, Cut-cover, Underground tunnels.



BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Genel

Artan nüfus ve yapılaşmanın da etkisiyle şehrin kırsal kesimlerinde oluşan yeni şehir merkezleri, havalimanları, turistik mekanlar gibi sirkülasyonun yoğunlaştığı bölgelerde mevcut şehirleşmenin de etkisiyle ulaşım problemleri oluşmaktadır. Bu sebeple kurumlar metropollerde ulaşım problemlerini çözmek için hızlı, kalıcı ve ekolojik olan raylı sistem toplu taşımacılığına yönelmektedir.

Asansörün icadı ile yüksek katlı yapı imalatlarında görülene benzer bir sıçrama yeraltı raylı sistemlerinde TBM'in icadı ve NATM'in imalatlarda kullanımı ile görülmüştür. Bu iki metodun yardımıyla birçok zemin türünde çeşitli kesitlerde birbirinden farklı kullanım amaçlarına sahip yeraltı tünelleri görece hızlı ve düşük maliyetlerde imal edilebilir duruma gelmiştir.

İstanbul'da imalatı tamamlanan ve açılışı 2018 yılında yapılan İstanbul Havalimanı şehirde yeni bir merkez oluşturmuş kullanıcılarının havalimanına ve havalimanından şehir diğer noktalarına ulaşımının sağlanma gerekliliği doğmuştur. Bu amaçla Halkalı-Yeni Havalimanı ve Gayrettepe-Yeni Havalimanı olmak üzere iki ayrı metro hattı projesi T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü tarafından ihale edilmiştir. Metro hatları, kabaca çift tüp halinde yaklaşık toplam 70 km tünel ve 16 adet istasyondan oluşmaktadır. Bu çalışmada Halkalı-Yeni Havalimanı hattındaki jeoteknik incelemeler ve geoteknik çalışmalar incelenmiştir.

Hat tünellerinin genel olarak TBM, sınırlı olarak da NATM ile açılması, istasyon, makas ve bağlantı tünellerinin ise ağırlıklı olarak NATM ile delme tünel şeklinde, kısmen de aç-kapa şeklinde inşa edilmeleri planlanmıştır. Projedeki TBM tünellerinin uzunluğu yaklaşık 55,7 km, NATM tünellerin toplam uzunluğu ise yaklaşık 15,8 km'dir. Kazısı TBM ile açılacak tünellerin kesitleri tam dairesel,

istasyon, makas, bağlantı ve ara geçiş gibi tüneller ile kazısı NATM ile gerçekleştirilecek diğer tünel kısımları ise genellikle at nalı şeklinde ancak değişik tip, çap ve kesitlere sahip olmaktadır.

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında Halkalı-Yeni Havalimanı Metro Tüneli imalatı öncesinde yapılan jeoteknik incelemeler ve imalatı sırasında kullanılan geoteknik uygulamalar incelenerek yeraltı raylı sistem inşaatları başlığı altında karşılaşılan problemlerin incelenmesi amaçlanmaktadır.

Yaklaşık 30 km uzunluğundaki metro hattının jeolojik incelemesi dört kısımda gerçekleştirilmiştir. Toplam 9588,5 m uzunluğunda 198 adet karotlu araştırma sondajından elde edilen 1006 adet zemin, 1230 adet kaya numunesi üzerinde yapılan deneyler ile hattın jeolojik kesiti Artson Geoteknik Mühendislik ve Müşavirlik (2018) tarafından hazırlanan jeolojik-jeoteknik etüt raporlarında oluşturulmuştur. Yapılan laboratuvar deneylerinin ve kuyu içinde yapılan standart penetrasyon testleri, presiyometre testleri, permeabilite testleri ve basınçlı su teslerinin sonucunda mühendislik özellikleri değerlendirilerek hattı oluşturan kaya ve zemin sınıfları belirlenip hat jeolojik formasyonlara ayrılmıştır. Belirlenen her bir kaya ve zemin formasyonu bir başlık altında laboratuvar ve kuyu içi deneyleri ışığında incelenip yeraltı suyu, kazı güçlükleri, fay zonları, karstik boşluk, karışık zeminler, akıcı zeminler, şişme – kabarma, yapışkanlık, gaz ve TBM kazılarda blok oluşması gibi sorunlar ve yaklaşık konumları göz önünde bulundurularak tünel kazısı sırasında yaşabilecek problemlere karşı öngörü kazanılmaktadır. Sondajlar sonucu çıkartılan jeolojik kesitin hattın birebir temsiliyetini vermesi mümkün olmadığından karstik boşluk rastlanan bölgelerde daha doğru veriler elde edebilmek amacıyla üç farklı konumda Çoklu Elektrotlu Elektrik Rezistivite Tomografi yöntemi kullanılarak yapılan jeofizik çalışmalar ile 2 boyutlu yeraltı öz direnç ters çözüm kesitleri elde edilmiştir. Elde edilen bu kesitler ile aynı lokasyondaki sondaj loglarından elde edilen kesitler karşılaştırılarak yeraltı raylı sistem imalatlarında jeofizik çalışmalardan elde edilebilecek verilerin incelenmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmanın devamında kazı yöntemleri TBM, NATM, aç-kapa, delme-patlatma başlıklarına ayrılarak yeraltı raylı sistem inşaatlarına bir örnek oluşturan Halkalı-

Yeni Havalimanı projesi kapsamında birer başlık altında incelerak birbirini takip eden imalat sürecini şematize etmek amaçlanmaktadır.



BÖLÜM 2. LİTETATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Yeraltının Kullanım Alanları

Her yerde mevcut olan yeraltı alanı yumuşak katmanlarda ya da toprakta açık kazı ile geliştirilip üstü daha sonra alttaki alanı elde etmek için kaplanırken, sert katmanlarda ya da kayalarda ise kazı yapılarak oluşturulabilir. Yer üstüne kurulması zor veya mümkün olmayan, yer üstünde varlığı kabul edilemez veya istenmeyen altyapı faaliyetleri için yeraltı gereksinimimiz olan alanı sağlayabilmektedir. Yeraltı alanının bir diğer temel özelliği, yeraltına yerleştirilen her şeye sunduğu doğal korumada yatmaktadır. Bu koruma aynı anda mekanik, termal, akustik ve hidroliktir. Böylece yeraltı, tüm doğal afetlere ve nükleer savaşıara, ozon tabakasındaki deliklerden gelen ultraviyole ışınlarına, küresel ısınmaya, elektromanyetik kirliliğe ve büyük güneş fırtınalarına karşı büyük bir güvenlik sunmaktadır (Goel, Singh, & Zhao, 2012).

Eşi görülmemiş bir hızla artan Dünya nüfusunun kentleşmesinde etkisiyle büyük bir çoğunluğunun yaşadığı metropollerde, insanoğlunun yaşam ortamına yönelik gelişen ihtiyaçları ve istekleri doğrultusunda her türlü mekânın kullanımının artması gerekmektedir. Mevcut neslin gereksinimlerini, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama becerisinden ödün vermeden karşılayan sürdürülebilir çözümlerde sorunun başka bir yönünü yansıtmaktadır (Goel et al., 2012).

Dünyada, yeraltına inşa edilen çeşitli oluşumlar şu şekilde sıralanabilir: Yeraltı park alanları, demiryolu ve karayolu tünelleri, kanalizasyon arıtma tesisleri, çöp yakma tesisleri, halk arasında “yeraltı metrosu” olarak bilinen yeraltı raylı sistemleri, yeraltı petrol depolama ve tedarik sistemleri (tünellerdeki boru hatları aracılığıyla), yeraltı soğuk hava depoları, yeraltı mağaraları ve yeraltı mağaralarının yoğun olarak kullanıldığı hidroelektrik projeleri (Goel et al., 2012).

2.2. Tüneller

Metro, yaya yolu, demiryolu, karayolu, kanal gibi taşıma yolunun bir kısmının veya tamamının yeryüzünden geçirilmesinin teknik bakımdan mümkün olmadığı veya ekonomik bakımdan uygun bulunmadığı yerlerde yeraltından geçirilmesi nedeniyle faydalanılan sanat yapılarına tünel denir (Emiroğlu, 2010).

2.2.1. Tünelciliğin tarihçesi

Eski çağlarda yaşayan insanların ahşap, boynuz, kemik, taş, gibi malzemeler ile kazı yaptıklarına dair deliller mevcuttur. Bu dönemlerde kazı alanındaki en büyük sıçrama insanların metaller ile tanışmasıyla gerçekleşmiştir. Metal alaşımların yıllar içerisinde gelişmesi sonucunda daha sert kayaların da kazılmasına olanak bulunmuştur. M.Ö. 3500 yılında Kafkasya bölgesinde Dünyada ilk metal cevherleri üzerine kazı yapıldığına yönelik delillere rastlanmıştır (Wahlstorm, 1973). İlk maden kazısına yönelik deliller ise M.Ö. 40000 senesine dayanmakta olup, kazının Svaziland'da gerçekleştirildiğine işaret etmektedir. Pers, Roma, Mısır, Aztek, İnka, Babil gibi tarihteki önemli uygarlıkların tüneller kazdıkları bilinmektedir. Dünya tarihinde bilinen ilk tünel, M.Ö. 2200'lü yılında tamamlandığı düşünülen aç-kapa yöntemi ile kazılmış olan Babil uygarlığına ait tapınağı ve sarayı birbirine bağlayan bir tüneldir ("Url-8,").

İnsan gücü ile basit aletler kullanılarak yapılan kazılarda ateşin kullanıldığına dair deliller vardır. Bu delillerden anlaşıyor ki ayna önünde ateş yakılarak kayanın ısınması ve ardından ateşin suyla söndürülmesi sonucunda meydana gelen ani sıcaklık farkından dolayı kayaların çatlatılması, kırılması ve kazılabilirlik direncinin azaltılması sağlanmaktaydı (Wahlstorm, 1973).

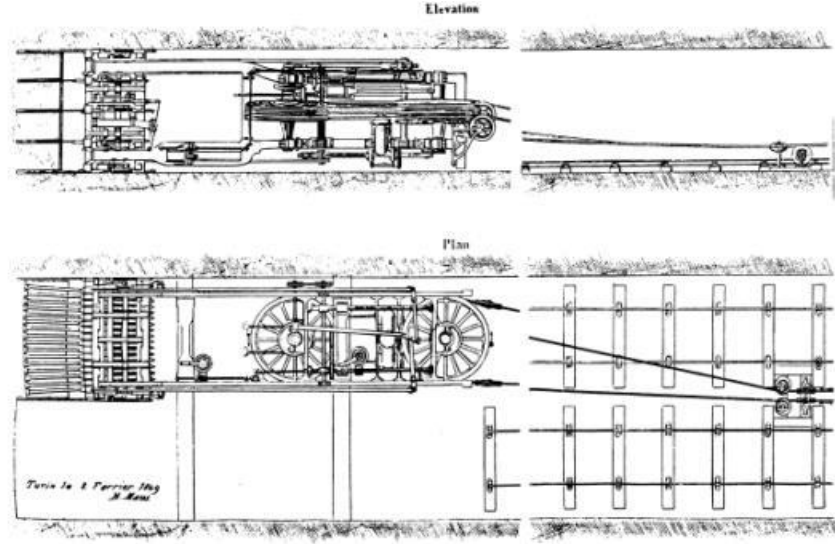
Mısır uygarlığında birçok örneği bulunan su taşımak amaçlı gerçekleştirilen tünel kazılarının en eskisi M.Ö. 10. yüzyıla kadar dayanmaktadır. Dünya tarihinde su taşıma amaçlı gerçekleştirilen en çok bilinen kazılardan biri ise M.Ö. 530 senesinde yapımı tamamlanan Samos adasında bulunan bir kilometre uzunluğundaki tüneldir. Dünya tarihinde mühendis ünvanı ile anılan bir kişi tarafından inşa edilen ilk tünel özelliğini göstermekte olan bu tünel mühendis Eupalinos öncülüğünde kazılmıştır (Kemp, 2005).

1679-1681 yılları arasında Fransa'da Langedog kanalını geçirmek amacıyla inşa edilen Malpas tüneli 157 m uzunluğunda, 7 m genişliğinde ve 8 m yüksekliğindedir.

Geçmişten günümüze yaygın uygulama alanlarına sahip patlatmalı kazı yönteminin kullanıldığı ilk tünel olma özelliğindeki bu yapı tüflü zemine inşa edilmiştir (Cingöz, 2013; Roland, 1997).

Orijinal Almanca açılımı ‘Neue Österreichische Tunnelbauweise’ olan NATM’nun isimlendirmesi bir yapım türünden çok tünelcilik kavramı olup kullanılan ‘tünel açma yöntemi’ tabiri Almacadan İngilizce’ye çevirisi sırasında ortaya çıkmıştır. İlk kez Prof. L.v. Rabcewicz tarafından ortaya atılan bu yöntem için kendisi patent başvuru sırasında şu tanımlamayı yapmıştır: *‘İnce geçici bir destekleme yerleştirmek ve deformasyonlara izin vermek yoluyla kaya basıncının düşürülmesi ve bu basıncın çevreleyen kayaya dağıtılmasıdır. Böylece son destekleme daha az yüklenek 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.’* G. Sauer ise L.v. Rabcewicz tarafından bulunduğu savlanan çifli destekleme sisteminin (ön ve son destekleme) aslında Schmid tarafından 1926 yılında uygulanan, Engesser’in 1881 yılındaki teorik çalışmalarına dayandığını belirterek NATM için şu tanımlamayı yapmıştır. *‘Yeraltında bir boşluk yaratılması ve bu boşluğun duyarlılığının sağlanması için kaya veya zeminin kendi kendini taşıyabilme kapasitesini maksimuma ulaştırmak amacı ile eldeki tüm olanakların kullanılması.’* Ayrıca Sauer Rabcewicz, Leopold Müller ve diğer Avusturyalı’ların bu yönteme asıl katkılarının sistematik bulonlama ve yerinde ölçüm olduğunu belirtmiştir ("Url-9," ; Rabcewicz, 1965; Sauer, 1990, 1997).

1846’da İtalya’da Belçikalı mühendis Henri Josep Maus tarafından Mount Cenis tüneli için kazı yapmak üzere tam cephe ilk kazı makinesi geliştirildi (Şekil 2.1). Amerika’da ise Hoosac Tünelinde 1856 yılında kullanılan ilk tünel açma makinesi döner bir kesme kafasına sahip daire şeklindeydi. Keskileri konsantrik daireler çizerek kazı yapacak şekilde tasarlanmış olan makinenin pasa uzaklaştırma düzenekleri, tutunma mekanizması ve itme (baskı) mekanizması bulunmaktaydı. Ancak makinenin metalürjisi ve yapısal tasarım şekli sert kayalarda başarılı olarak çalışabileceği seviyede değildi. Yine de Herman Haupt isimli inşaat mühendisi, bu makine ile 3 metrelik bir ilerleme gerçekleştirmeyi başarmıştı.



Şekil 2.1 : H.J. Maus tarafından geliştirilen tünel açma makinesi, Mont Cenis tüneli (Maidl, 2008).

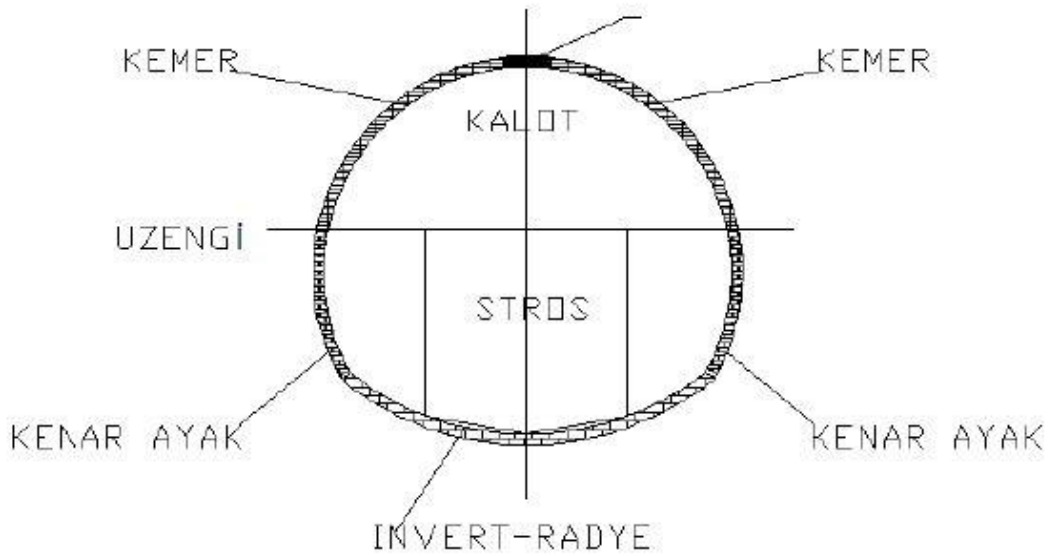
1875 yılında Beaumont tarafından tasarlanan, patenti alınan ve tamamıyla döner bir sistemi bulunan TBM sert zeminlerde üstün bir performans sergileyerek 1880 yılında bir kanal tüneli olan 38 km uzunluğundaki Manş tüneli kazısında kullanılmıştır. Mühendis James Robbins 1956 yılında, kalem kesikler yerine döner disklerin kullanılma fikrini ortaya atarak Toronto'daki bir uygulamada günde 38 metrelik ilerleme gerçekleşmiştir. Bu durum, TBM'lerin yumuşak ve orta sert kayalarda ekonomik olarak kullanılabilceğinin ilk göstergesi olmuştur. 1970-1980 yılları arasında araştırma kurumları ve dünyada birçok üniversite kayada kazı verimliliğine engel teşkil eden disk kesicilerin sert kayalardaki performansı üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Yıl 2006'ya geldiğinde yapımına başlanan Niagara tünel projesinde 14,4 metrelik kazı çapıyla kayada çalışan dünyanın en büyük kazı çapı ünvanına sahip TBM kullanılmıştır (Cingöz, 2013; "Url-10,"; B. Maidl, Schmid, Ritz, & Herrenknecht, 2008; Osmanoğlu, 2018).

Benzer şekilde, yumuşak arazideki tünel teknolojisi de, Times nehrini 1824 - 1840 yılları arasında geçtiği Brunei şildinden başlayarak, gelişim göstermiştir. Brunei'in tasarımları 1864'de dairevi şilt patenti alan Peter Parlow tarafından geliştirilmiştir. Bu şilt içine yerleştirilen astar segmentlerin itilmesi suretiyle baskı oluşturulması ve ön tarafında pasa akışını ve uzaklaştırılışını temin edecek açıklığa sahipti. 1869 yılında bu şildin bir benzeri ile Times nehri bir yılda geçilmiştir. Bu makine, Pasa Basınçlı Tünel Açma Makinesinin (EPB-TBM) ilk tipini meydana getirmektedir. EPB ve biraz daha

karmaşık yapılı çamur basınçlı makineler kavram olarak gerçekte Avrupa'dan çıkmışsa da, asıl gelişmesini Japonya'da yapmıştır ("Url-10,").

2.2.2. Tünelcilikte kazı metodları

Tünelcilikte kazı yöntemleri aç-kapa, delme-patlatma ve makine ile kazı olmak üzere üç ana başlık altında değerlendirilebilir. Tünel açma yönteminde kullanılan terimler Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Tünel açma yönteminde kullanılan terimler (Bozkurt, 1987).

2.2.2.1. Aç-kapa kazı metodu

‘Aç-kapat’ yöntemi, hem kentsel hem de kırsal tünel açma projelerinde sıklıkla uygulanan basit bir kazı yöntemidir. Yöntemin uygulanması için temel ön koşullar, yumuşak veya zayıf zemin koşullarının ve/veya düşük örtü yükünün olmasıdır. ‘Aç-kapat’ yöntemi, geleneksel kazı işlemine benzer teknik araçları pratik olarak uygulayarak ve normal inşaat mühendisliği koşulları altında tek veya çift tünel kaplaması inşa ederek açık bir kazı kazmaktan, kazı derinliğine bağlı kademeli olarak, oluşmaktadır. İnşaat süreci, hafriyat işlemleri de dahil olmak üzere kazıkların delinmesi ve dökümü, döşeme inşaatı, toprak kaldırma ve dolgu şeklinde aşamalandırılabilir. Yatay bir başlık kirişi ile bağlanabilmesi için kazık başlarının aynı seviyede olması gerektiği durumlarda, düzgün bir yatay zemin yüzeyi sağlamak için yerel olarak toprak dolgusu gerekebilir. Birinci aşamada tünel bölümünün her iki tarafına, kazıklar delinir

ve dökülür. Kazık sayısı ve çapları, kazıklar arası mesafe projeye göre zemin cinsine, kazı derinliğine, kazılacak açıklığa, YASS'ne, inşaat süresine vb. bağlı olarak değişimler göstermektedir. Sonraki aşamada kuşak kirişleri imal edilir ve kazı derinliğine ulaşıldığında temel oluşturulur. Tünel içi kaplaması inşa edilene kadar kazık yüzeylerine püskürtme beton uygulaması gerçekleştirilebilir. Son olarak tünel içi kaplamasıyla birlikte gerekli dolgu işlemleri yapılarak çevresel ve altyapı restorasyonları tamamlanmaktadır (Mouratidis, 2008).

2.2.2.2. Delme-patlatma metodu

Delme ve patlatma yöntemi dünya çapında madencilik, taş ocakçılığı ve tünelcilikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Delme ve patlatma yöntemi, özellikle değişen jeolojik koşullarda tünel kazısı ile ilgili olarak, kaya kırıcılar, tünel açma makineleri vb. kullanan diğer mekanik yöntemlere kıyasla daha ekonomiktir. Düşük başlangıç yatırımı, ucuz patlayıcı enerji, patlatma mühendisleri arasında kolay kabul edilebilirlik, farklı şekil ve boyutlardaki açıklıklarla başa çıkma imkanı ve uygun bir jeoteknik madencilik koşulunda makul ölçüde daha hızlı ilerleme oranı topluca delme-patlatma yöntemini kaya kazısı için tercih edilir bir yöntem haline getirmektedir. Fakat teknolojik ilerlemelere rağmen, delme-patlatma yöntemi, çevreleyen kaya kütlelerine zarar verme gibi doğal bir dezavantaja sahiptir ve bu da çevredeki kaya kütlelerinde güvenlik ve stabilite sorunlarına yol açan patlama kaynaklı çatlaklar ağının büyümesine neden olmaktadır. Mühendisler, sondaj jumbolarını kullanarak tünel ve yeraltı kazılarında daha hızlı ilerleme sağlamaya çalışmaktadırlar. Bu tür delme makineleri, geliştirilmiş doğrulukla delme süresini kayda değer ölçüde azaltır. Daha yüksek miktarda patlayıcı kullanarak daha hızlı ilerleme hızı, daha büyük ölçüde patlama kaynaklı kaya kütlesi hasarına yol açmaktadır. Düzgün patlatma gibi çevresel patlatma teknikleri, tasarlanan tünel profilinin ötesinde çevreleyen kaya kütlelerine verilen zararı minimize etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ama patlatma tekniklerindeki gelişmelere rağmen, kaya kütlesi hasarı hala kaçınılmazdır ve yöntemin dezavantajları artan destek maliyeti, yavaş tünel ilerlemesi, kararsız kaya kütlesi, projelerin uzun kuluçka süresi ve inşaat sonrası tünel bakımının artması şeklinde sıralanabilir (Dey & Murthy, 2011; Verma, Samadhiya, Singh, Goel, & Singh, 2018).

2.2.2.3. Yeni Avusturya tünel açma metodu (NATM)

NATM delme-patlatma ve mekanize kazı yöntemlerinin ortak olarak kullanıldığı klasik metotla tünel açma tekniklerinin esnek ve en deneysel olanıdır. Tünellerin proje aşamasında belirlenen parametreleri, inşaat aşamasında yapı güvenliğine karşı sorun teşkil eden bir problemle karılaılması durumunda değiştirilebilir olduğundan, en optimum destek ve kazı yöntemlerinin uygulanabildiği tünelcilik anlayışıdır. Şekil 2.3'te görseli verilen NATM yönteminde kazı aşamasında yapılan jeodezik ölçümler ve jeoteknik ölçümler tünelde meydana gelen deformasyonların takibini sağlayarak uygulamanın herhangi bir aşamasında kullanılacak iksa tipi ve iksa aralığı, kullanılacak donatı veya daha başka parametrelerde değişikliğe gidilebilmektedir (Polat, 2010; Soycan & Faslak, 2019).

İki tür destek sistemi içeren NATM'da ilk sistem, yapıyı dengelemek için tasarlanmış esnek bir dış kemer ve/veya koruyucu destekler içerir. Geçici tahkimat sağlayan bu sistem, ilave elik nervürler, cıvatalar ve püskürtme beton ile güçlendirilmiştir. Halka daha sonra beton kullanılarak nihai olarak kapatılır. Kuvvetlerin yeniden düzenlenmesi sırasında geçici tahkimat sağlayan sisteminin ve tüneli çevreleyen zeminin davranışları oldukça gelimi bir ölçüm sistemi ile kontrol edilmektedir (Vardar, 1979, 1985).



Şekil 2.3 : NATM tünel kesiti.

(Müller, 1978) tarafından önerilen NATM'nin temel ilkeleri aşağıda sıralanmıştır:

1. Tünel desteğinin temel unsuru tüneli çevreleyen kayadır. Yapay desteklerin işlevi, tünelin etrafındaki kayanın kendini desteklemesine yardımcı olmaktır.
2. Kayanın ilk sağlamlığı korunmalıdır. Ana ilke, kaya kütlesinin orijinal mukavemetini mümkün olduğu ölçüde korumak olmalıdır.
3. Çevredeki kayanın gevşemesi mümkün olduğu ölçüde önlenmelidir. Bunun nedeni, kayanın gevşemesinin taşıma direncini düşürmesi ve ölü yükleri artırmasıdır.
4. Koruyucu bölge, kayanın taşıma direncini düşürmeden oluşturulmalıdır. Kazı sonrası oluşan deformasyonlar koruma bölgesini oluşturmak için yeterli olacaktır. Ancak, deformasyonlar, taşıma direncini azaltacak olan kayanın gevşemesine yol açmayacak şekilde kontrol edilmelidir.
5. Geçici tahkimat sağlayan yapının ne de çok zayıf ne çok rijit olmasını sağlamak için zamanında (ne de çok geç ne çok erken) ve gerekli esneklikte yapılmalıdır.
6. Takviye kuvvetleri bağlama tipini kullanıyor olmalıdır. Hafriyattan sonra önemli deformasyonlar ve gevşemeler olması muhtemel ise, donatı direnci yayılı yükler şeklinde olmalı, donatı ölçüsü ise boşluk yüzeyini kaplamalıdır. Bu, en etkili şekilde kısa sürede yapışan püskürtme beton kullanılarak elde edilir.
7. Hem kalıcı hem de geçici tahkimat kaplamaları 'ince kabuk' şeklinde, yani ince, kabuk şeklinde ve bükülebilir olmalıdır. Kabuktaki eğilme momentleri ve bunlardan kaynaklanan çekme ve kesme kırılmaları bu şekilde önlenabilir.
8. Güçlendirme hasır çelik, püskürtme beton, kaya bulonu, ve çelik nervürlerle yapılmalıdır. Tel kafesler ve nervürler, kabuğu kalınlaştırmak yerine gerekli esnekliği sağlayabilir. Kayanın kendi ağırlığını taşıyabilmesi için efektif gerilmeler ankrajlar vasıtasıyla kaya kütlesine iletilmelidir.

Tahkimat yapısı, kapalı bir halka biçiminde olmalıdır. Statik bir perspektiften bakıldığında, bir açıklığın tamamen yük taşıması için halkalar kapalı olmalıdır. Eklemleri, yayları veya çentikleri olan bir halka, bir daireye kıyasla kararsızdır. Bu düşünceyle, üst başlığın ve sağ/sol yanların kazı ve donatı kaplaması, boşluk duvarına dairesel bir şekilde yapışmalıdır. Halka bir an önce kurulmalıdır. İkincil gerilmelerin oluşumu sırasında kayanın davranışı, kaplamanın deformasyonlarına bağlıdır. Tamamen

Kaya kütlesi aracılığıyla kaplamaya iletilen su basıncı drenaj yoluyla tahliye edilmelidir. Bunun için mekanın etrafına drenaj boruları döşenmelidir (Aygar, 2020).

Klasik yöntemleriyle çalışamadığı ve ilerleme hızının yüksek olması gereken projelerde tercih edilen TBM'ler genel olarak üç ana kısımdan oluşmaktadırlar. Bunlar; geçilecek jeolojik formasyona göre tasarlanmış ve kazı işlemini gerçekleştirecek olan kesici kafa, bu kesici kafanın dönmesini ve aynı zamanda ilerlemesini sağlayan güç nakil üniteleri ve diğer yardımcı donanımların bulunduğu destek üniteleridir. TBM'ler proje bazlı olarak çeşitli tip ve özelliklerde üretilebilir oldukları için proje parametrelerine uygun olarak tasarlanabilirler. Açılacak yeraltı boşluğunda geçilen formasyon TBM seçiminde en önemli faktörlerdendir (Arioğlu, 2010; Uçar, 2019).

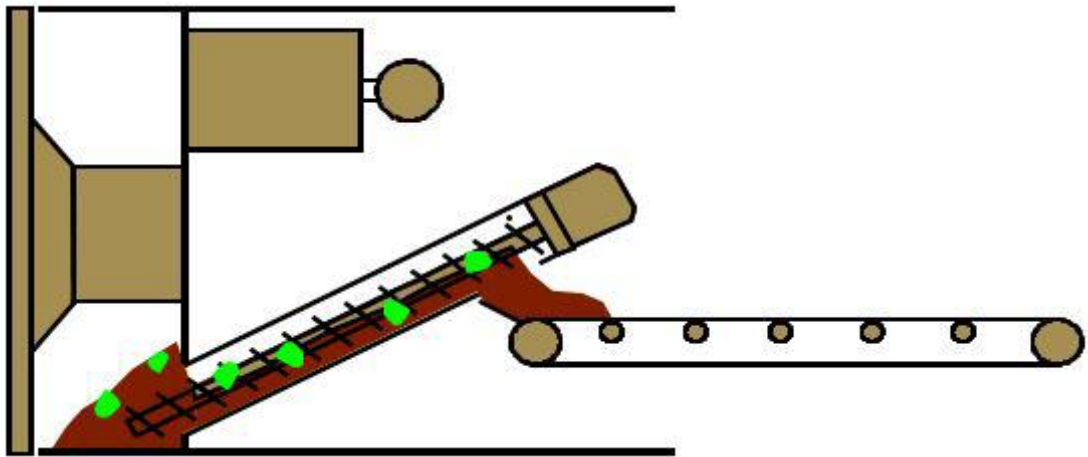


TBM ile kazma işleminin gerçekleşmesi için iki önemli kuvvet mevcut olmalıdır. Birincisi kesici kafanın aynaya doğru itilmesi ve ikinci olarak bu itilme sırasında kafanın dönmeye başlaması kazı olayını gerçekleştirir. Şekil 2.4’de de görüldüğü gibi kesici kafa üzerinde bulunan farklı tipte kesici uçlar, bıçaklar, ripperler ve dişler yumuşak

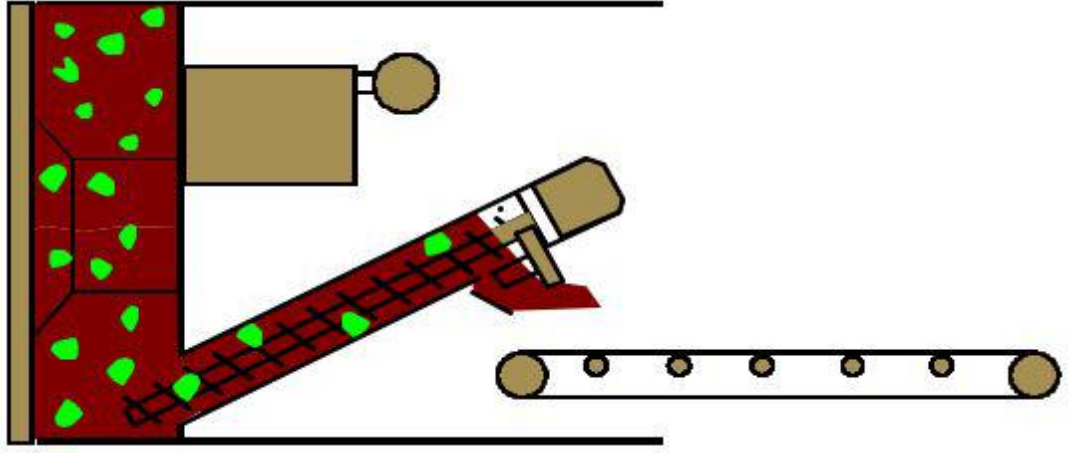
tip formasyonların kazılmasında, disk tipte keskiiler tüm kayaç türlerindeki kazılarda kullanılabilmektedir. Aynadan kazılan malzeme kesici kafa üzerinde bulunan çeşitli kazıcı araçlar yardımıyla kesici kafa arkasındaki hazneye aktarılır. Hazne içerisinde bulunan konveyör çıkan pasanın nakliyatını yapmaktadır. Aşınma, kırılma, bozulma gibi sebeplerle keskiilerin değiştirilmesi durumunda ayna kesici kafa tarafından tamamen kapatıldığı için bu durum iş güvenliği açısından büyük risk oluşturmaktadır. Fakat yeni geliştirilen modellerde keskiiler kesici kafanın içinden değiştirilebilmekte böylece aynaya geçmeye gerek kalmamaktadır (Cingöz, 2013; "Url-10,").

Pasa taşıma sistemi, TBM tiplerine göre farklılık göstermektedir. Çamur tipi (Slurry) hariç çoğu TBM’de, kesici kafadaki boşluklardan kafa arkasındaki hazneye toplanan kazı malzemesi helezon konveyör ile taşınır ve ardından ya bant konveyör ya da vagonlarla dışarı atılır. Fakat çamur makinelerinde TBM ilerledikçe, kazılan malzeme çalışma odasındaki çamur ile karışır ve pasa malzemesi, odanın altındaki bir boru/baca ile aynadan çıkarılır. Çamur TBM’in yüzeyindeki sabit basıncın muhafaza edilmesi, makinenin içine akan çamur basıncının ve pasanın uzaklaştırılmasının kontrol edilmesini sağlar (Babendererde, Hoek, Marinos, & Cardoso, 2005).

Bir TBM çeşidi olan Pasa basınçlı TBM’ler (EPB TBM) jeolojik koşullara bağlı olarak açık mod (Şekil 2.5), geçiş modu ve kapalı mod (Şekil 2.6) olmak üzere üç temel kazı modundan birinde kazı yaparlar (U. Maidl, 2005).



Şekil 2.5 : Açık mod da EPB TBM (Herrenknecht, 2017).



Şekil 2.6 : Kapalı mod da EPB TBM (Herrenknecht, 2017).

Açık mod ile kazı, aynanın kendini tutabildiği ve su gelirinin herhangi bir hidrojeolojik ve operasyonel probleme neden olmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Mod seçiminde öncelik, aynanın duraylılığının sağlanması ve yeryüzü oturmalarının engellenmesi olduğundan duraylı zeminlerde pasa basıncına ihtiyaç duyulmamaktadır. Aynada sert ve aşındırıcı kayaçlara rastlanıldığında açık moda geçilerek keskinin aşınmasına ve keskinin gelen aşırı yüklerle engel olunabilir (Aksu, 2010; U. Maidl, 2005).

Kapalı modun amacı ise YASS altındaki zeminlerden geçerken duraylılığı sağlayabilmek ve yeryüzü oturmalarını minimize etmektir. Bu durum, pasa odasında basınç oluşturarak aynada oluşan arazi ve su basınçları ile dengelenme sağlanır. Bunun için pasa odası tamamen pasa ile dolu olmalıdır. Pasa odasındaki malzeme hacminin artmasıyla yüksek tork gereksinimi oluşacaktır ve kesici kafada bulunan kesici araçlardaki aşınmalarda artış meydana gelecektir (Aksu, 2010; U. Maidl, 2005).

Geçiş modunda ise EPB TBM kapalı moddaymış gibi çalışmaktadır ancak pasa odasında basınç bulunmamaktadır. Aynanın kendini tutabildiği varsayımı geçiş modunu kapalı moddan farklı kılar. Geçiş modunda pasa odası kısmen ya da tamamen pasa ve/veya su ile doldurulurken 0,1 ve 0,2 bar arası gibi çok az miktarda destek basıncıyla su gelirini kontrol altına alabilmek amaçlanır (Aksu, 2010; U. Maidl, 2005).

EPB TBM ile kazı yapılan zeminin makine için ideal olmadığı durumlarda kimyasal katkıları kullanılarak zemin şartlandırılır. Zemin özelliklerinin kimyasal katkıları yoluyla değiştirilmesi prensibine dayanan zemin şartlandırma sistemi ile köpük ve polimer gibi katkıları kullanılarak kazılan zeminin EPB TBM için ideal hale getirilmesi

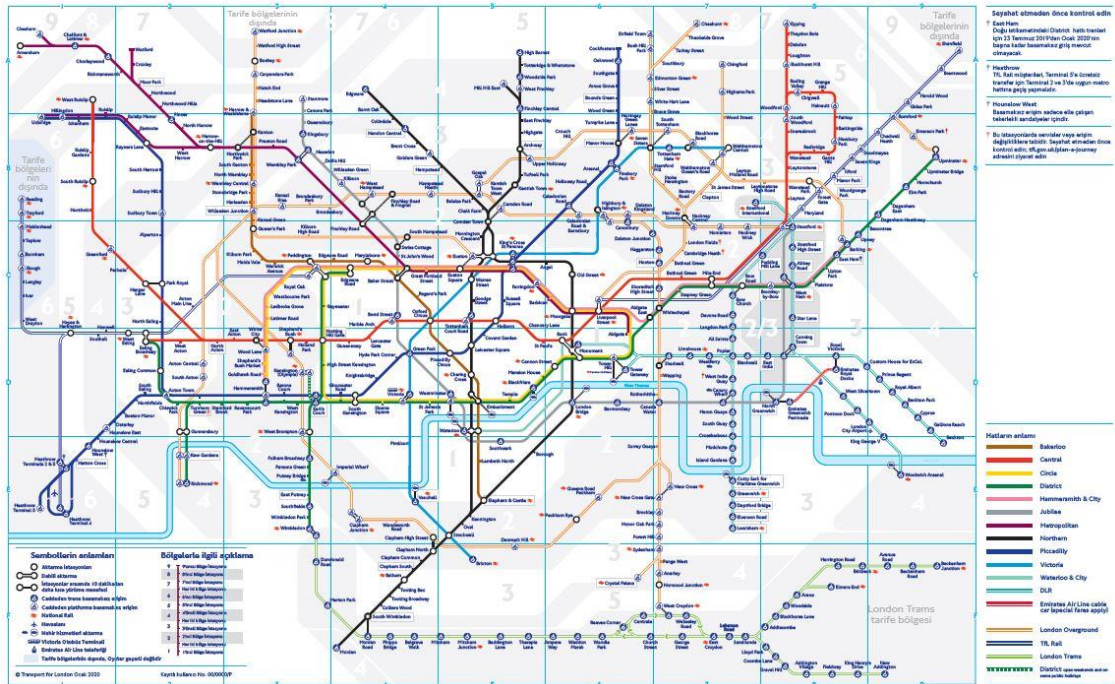
sağlanmaktadır. Bunun sonucunda makinenin daha rahat bir ortamda kazı yapması sağlanırken makinenin tork, güç sarfiyatı, günlük ilerleme hızı gibi performans değerlerinde iyileşmeler meydana gelmektedir (Aksu, 2010).

2.2.3. Dünya’da ve Türkiye’de yeraltı raylı sistem örnekleri

Sırasıyla kömür, buhar ve elektriğin kullanılarak hareket enerjisine dönüştürülmesi ile gelişim gösteren yeraltı raylı sistemler diğer toplu taşıma sistemlerine göre daha çevreci ulaşım sistemleridir.

2.2.3.1. Londra metrosu

Birbirini kesen tünellerden ve geçitlerden meydana gelen yeraltı raylı sistemlerinin ilk örneği 1863 yılında Londra’da yapılmaya başlanmıştır. Londra’daki ilk metroda kullanılan vagonlar buhar ile çalışan lokomotifler tarafından çekilmekteydi. 6 km uzunluğundaki bu hattın inşasında aç-kapa metodu kullanılmıştır. Günümüzde 402 km’lik ağ uzunluğu ile yılda 1,35 milyar yolcu taşıyan Londra metro ağının %45 bölümü yeraltında bulunmaktadır (Şekil 2.7). En uzun yürüyen merdiveni 60 metre iken en derin asansör şaşı 55,2 metredir. Ortama tren hızının 33 km/s olduğu hatlarda trenler yılda 83,6 milyon km yol katetmektedir (Çetinçelik, 1964; "Url-1,").



Şekil 2.7 : Londra metro haritası ("Url-2,").

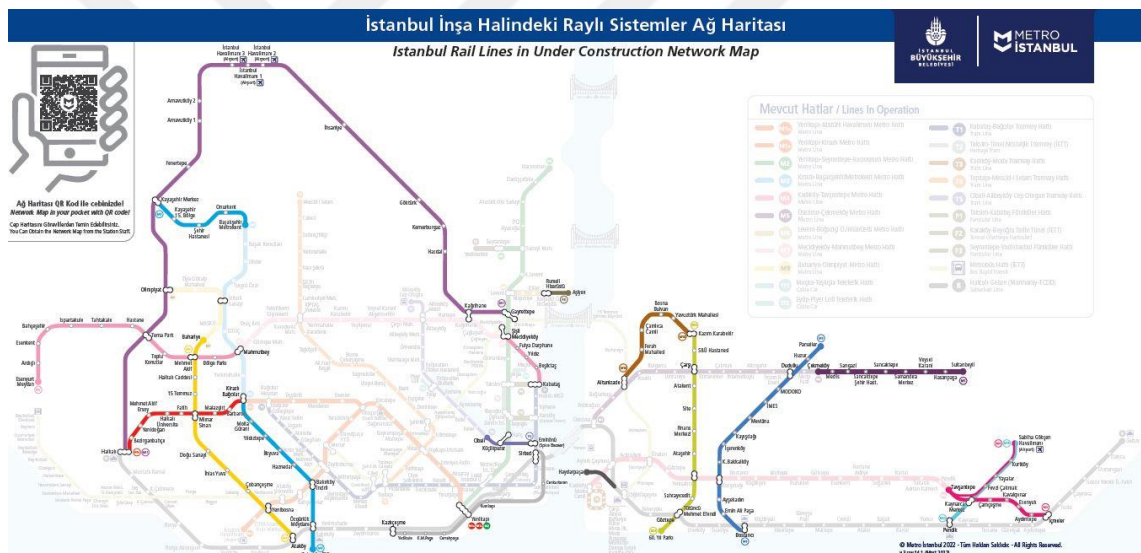
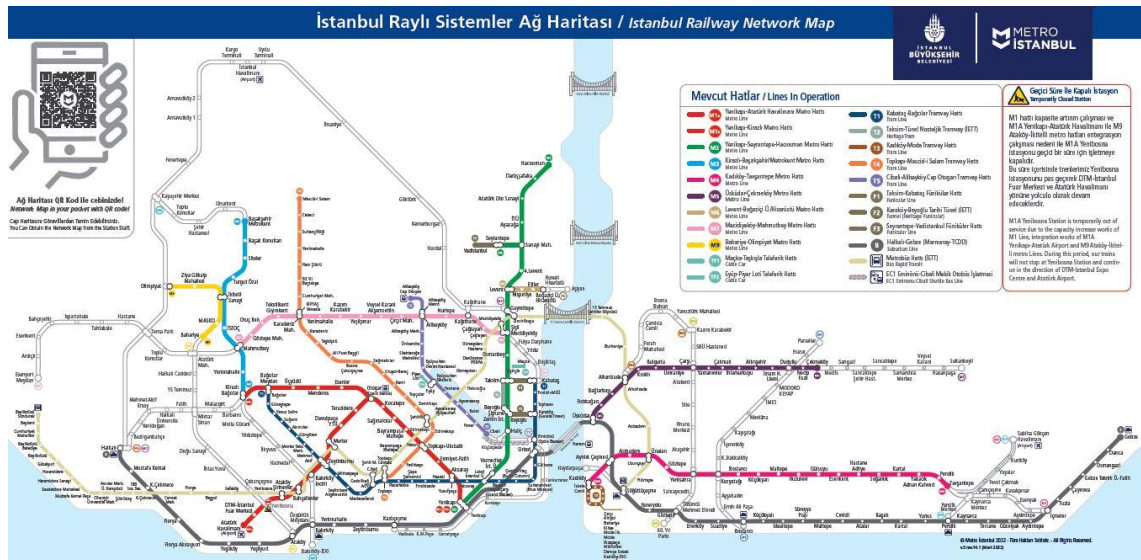
2.2.3.2. New York metrosu

Amerika kıtasının en eski metrosu unvanına sahip New York metrosu 1878 yılında işletilmeye başlanmıştır. Günümüzde 472 durağıyla dünyadaki herhangi bir sistemde en fazla yolcu taşıma metro istasyonu sayısına sahiptir. 2018 yılına ait verilere göre yılda ortalama 1,68 milyar yolcu taşıyan New York metrosu 27 hattan meydana gelmektedir (Çetinçelik, 1964; "Url-3,").

2.2.3.3. İstanbul metrosu

İstanbul'da bulunan Türkiye'nin ilk yeraltı metrosu Karaköy ile Beyoğlu arasında yapılmıştır. 626 metre uzunluğundaki yeraltı tünelinin açılması fikri Fransız turisti Henri Gavon tarafından 1867 yılında ortaya atılmıştır. Aynı mühendis tarafından sermayesi bulunan tünel 1875 yılının başında bitmiş 17 Ocak günü işletmeye açılmıştır. İlk seferlerin sadece hayvan taşıdığı ilk tünel arabalarının yanları açık olmakla birlikte elektrik tesisatı da olmadığından tünel gaz lambaları ile aydınlatılmaktaydı. Halen kullanılan tünel 1939 yılından beri İ.E.T.T (İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri) tarafından işletilmektedir (Çetinçelik, 1964).

Günümüzde 262,15 km'den oluşan İstanbul'daki raylı sistem ağı günde ortalama 2 milyon yolcuya hizmet vermektedir (Şekil 2.8). Şekil 2.9' da gösterilen 197,5 km uzunluğundaki inşaat halindeki metro projelerinin tamamlanmasıyla bu sayının 8 milyona ulaşması hedeflenmektedir ("Url-6,"). Bu tezde incelenecek olan 32 km uzunluğundaki HYH metro hattı tek yönde saatte 36 000 yolcu taşıma kapasitesine sahip olacaktır ("Url-5,").



Tablo 2.1 : Kaya kütlesi türleri ve tanımları (Aktaş, 2009).

Kaya türü	Tanımı
Sağlam kaya	İçerisinde herhangi bir çatlak bulunmayan kaya bloğudur.
Nispeten çatlaklı kaya	Üç sürekli eklem sisteminden daha az eklem sistemine sahip olup bir kazı yapıldığında kazı boşluğu çevresinde genellikle serbest blok oluşmayan kaya kütlesidir.
Az bloklu kaya	Sürekli eklem sistemi sayısı üçten az fakat eklemleri açık ya da yumuşak olan kayadır. Oluşacak bir deformasyon sonucu eklem sistemlerinden herhangi birinin zayıflaması serbest blokların oluşmasına yol açar.
Bloklu kaya	Üç veya daha fazla eklem sistemi içeren kaya kütlesidir. Eklemler belirgin olup açık veya yumuşak dolgulu olabilir. Çekme mukavemeti ölçülemeyecek kadar küçüktür.
Çok gözenekli kaya	Bu tür kayalarda gözenekler kayanın mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Gözeneklerde su bulunması ve su basıncında meydana gelen artış kayanın mukavemetinin olumsuz etkilenmesine sebep olur.
Çok çatlaklı kaya	Sık ve kısa çatlaklara sahiptir. Bu çatlaklar çok kırılğan kayalarda ortaya çıkar ve kayanın mekanik özelliklerini etkiler.
Sıkışan ve şişen kaya	Su etkisiyle reaksiyon sonucu genişleyen aktif kil mineralleri içeren kayalardır
Sıkışmış kaya molozu	Farklı özelliklere sahip ardalanmış kayalardır.
Çözünebilir kaya	Kireçtaşı, dolomit, jips ve kaya tuzu ile çözünebilen çimentolarla bağlanmış kalstik sedimanter kayalardır.

Kayalar minerolojik bileşim, boşluk indeksi, kırılma/eklem yoğunluğu, suyun akış hızı, ayrışma, renk ve boyut gibi özelliklere bağlı olarak sınıflandırılır. Jeoteknik amaçlarla kayaların sınıflandırılması ise stabilite ve deforme edilebilirliklerini saptamak için dayanım ve modül bazında sınıflandırılır. Kaya kütlesinin sınıflandırılmasında tek eksenli basınç dayanımı ve modülünü tahmin etmek için kullanılan dört yaklaşım bulunmaktadır: Kaya kütlesi derecelendirmesi (RMR), kaya kütlesi kalitesi (Q), Eklem faktörü (Jf) ve jeolojik dayanım endeksi (GSI). Tüm yaklaşımlar farklı sonuçlar verebilir. Modül oranları dikkate alınarak güvenilirlikleri test edilebilir. Sağlam ya da eklemlili bir kaya serbest durumda sınıflandırılmalıdır (Ramamurthy, 2004).

Tek bir parametre ile yapılan kaya sınıflandırması ile güvenilir sonuçlar elde etmek mümkün değildir. Terzaghi tarafından önerilen kaya sınıflandırma sistemi, tüneller ve inşaat için uygun olmuş fakat temeller ve şevler için yeni yöntemler araştırma gereği ortaya koymuştur. Kaya kütlesini davranışını etkileyen derz aralığı, derz yüzeyi ve derz

dolgusu gibi birçok faktör daha sonraki yaklaşımlar için kullanılan terimler olmuştur. Tünellerin stabilitesi için geliştirilen kaya sınıflandırma sistemleri ise RMR ve Q sistemidir. Kaya kütlelerinin kalitesine bağlı olarak destekler seçilir (Ramamurthy, 2004).

Jeomekanik sınıflandırma veya kaya kütlesi derecelendirmesi (RMR) sisteminde kullanılan altı parametre bulunmaktadır: Sağlam kayanın tek eksenli basınç dayanımı, derz aralığı, kaya kalitesi tanımı (RQD), eklemlerin durumu, yeraltı suyu durumu ve eklem yönü. RQD, kaya çekirdeklerinden veya hacimsel eklem sayısından belirlenir: bir metrelik sondaj çalışmasındaki kaya karotlarının yüzdesidir. RMR sisteminde kaya kütlesi beş sınıfa ayrılır (Ramamurthy, 2004; Singh & Goel, 2011c). Kaya kütlesi sınıflarına göre kaya kütlesi özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2.2 : Kaya kütlesi sınıflarına göre kaya kütlesi özellikleri (Singh & Goel, 2011c).

Kaya kütlesinin parametresi/özellikleri	100-81 (I)	80-61 (II)	60-41 (III)	40-21 (IV)	<20 (V)
Kaya kütlesinin sınıflandırılması	Çok iyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok zayıf
Ortalama bekleme 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 kütlesinin kohezyonu (MPa)	>0.4	0.3–0.4	0.2–0.3	0.1–0.2	<0.1
Kaya kütlesinin içsel sürtünme açısı	>45°	35–45°	25–35°	15–25°	<15°

Kaya kütlesi kalitesi (Q) sınıflandırma sistemi ile kaya kütlesi ve tüneller ve mağaralar için destek sistemi tasarımı karakterize edilebilir. Tünel destekleri için en uygun sınıflandırma sistemidir. İlk olarak Barton, Lien ve Lunde tarafından önerilen bu sınıflandırma sistemi altı parametreden oluşmaktadır: RQD, eklem sayısı (J_n), eklem pürüzlülük katsayısı (J_r), eklem suyu azaltma faktörü (J_w), gerilme azaltma faktörü (SRF) ve hacimsel eklem sayısı (J_v). Bu parametreler kullanılarak Q değerleriyle ilişkilendirilen 1260 örnek uygulama bulunmaktadır (Singh & Goel, 2011b).

Kaya kütlesi kalitesi (Q) değeri 0,001 ile 1000 arasında değişen hassas bir indekstir. Q indeksine göre kaya kütleleri dokuz sınıfa ayrılmaktadır (Tablo 2.3).

Tablo 2.3 : Q indeksine göre kaya kütleleri sınıfları (Singh & Goel, 2011b).

Q	Grup	Sınıflandırma
0.001–0.01		Son derece zayıf
0.01–0.1	3	Son derece zayıf
0.1–1		Çok zayıf
1–4	2	Zayıf
4–10		Orta
10–40		İyi
40–100	1	Çok iyi
100–400		Son derece iyi
400–1000		Son derece iyi

Kazı yüzeyleri düzeltmelerinde tünel açma makinesi (TBM) kullanıldığında Q değeri yüksek olurken, tünel patlatma yönteminde bu değer, yüksek kırılmalar ve yeni kırıkların oluşması sebebiyle düşecektir. Q değeri 1-30 arasında olan kaya kütlelerinde patlatma etkileri daha iyidir (Singh & Goel, 2011b).

Jeolojik dayanım indeksi (GSI), jeolojik koşulların görsel olarak incelenmesi esasına dayanır. Jeolojik dayanım indeksi hem sert hem de zayıf kaya kütlelerine uygulanabilir. Dayanım, ayrışma ile hızla bozulduğundan, zayıf kayalar için sonuçlar doğrusal değildir. Jeolojik dayanım indeksi RMR ve Q değeri ile ilişkilidir. Jeolojik dayanım indeksi için Hoek ve Marinos tarafından bir çizelge önerilmiştir. Bu kaya kütlesi sınıflandırmasında Terzaghi'nin sınıflandırmasından uyarlanan altı tane ana niteliksel kaya sınıfı vardır: Bozulmamış veya büyük, bloklu, çok bloklu, bloklu/katlanmış, ezilmiş ve lamine/kesilmiş (Singh & Goel, 2011a).

JEOLOJİK DAYANIM İNDEKSİ		SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULLARI	
Kaya kütlelerinin yapısını ve yüzey koşullarını tanımlayan harf kodları belirlenerek uygun kutu seçilir ve ortalama Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'nin değeri abaktaki konturlardan tayin edilir.		ÇOK İYİ Çok pürüzlü, taze ayrışmamış yüzeyler İYİ Düz, çok az ayrışmış, deniz okat laminar yüzeyler ORTA Düz, orta derecede ayrışmış yüzeyler ZAYIF Kaygan, sert veya köşeli parçalar içeren, düğüne sahip, çok ayrışmış yüzeyler ÇOK ZAYIF Kaygan, yumuşak kıl dokulu, çok ayrışmış yüzeyler	
YAPI		AZALAN YÜZEY KALİTESİ	
 SAĞLAM VEYA MASİF - Kaya malzemesi veya geniş aralıklı birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütlesi		90	UYGULANMAZ
 BLOKLU - 3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütlesi		80	
 ÇOK BLOKLU - Dört veya daha fazla sayıda süreksizlik takımlarının keşilmesiyle oluşmuş çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren, kısmen örselenmiş kaya kütlesi		70	
 BLOKLU/ÖRSELENMİŞ -Birbirini kesen çok sayıda süreksizliğin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrılmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütlesi		60	
 PARÇALANMIŞ -Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birikeliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütlesi		50	
 FOLİYASYONLU-LAMİNALİ-MAKASLANMIŞ İnce laminar veya foliyasyonlu ve makaslanmış zayıf kayalar. Diğer süreksizlik takımlarına oranla daha egemen olan sık aralıklı şistozite yüzeyleri kayada bloklaşmanın gelişmesini önlemiştir.		40	
		30	
		20	
		10	
		UYGULANMAZ	

Şekil 2.10 : Jeolojik dayanım indeksi (GSI) sınıflandırması (Hoek, 1999).

Jeolojik yapı ve süreksizlik yüzey durumuna göre GSI değerleri belirlenir (Şekil 2.10). Yamaç tasarımı ve kayalardaki kazılar için tek bir GSI değeri belirlenmelidir. GSI, RMR ve Q değerlerinde, sıkıştırma ve kaya patlamalarından sonraki açıklıklarda ciddi bozulma meydana geldiği bulunmuştur. Bu aynı zamanda açıklıklarda da görülür, bu nedenle örselenmemiş durumdaki ($D = 0$) kaya kütlelerinin GSI'si değerlendirilir (Singh & Goel, 2011a).

N. Ayaydın'dan modifiye edilerek hazırlanan Q ve RMR kaya kütle sınıflamaları ile ONORM 2203 kaya sınıfı karşılıkları ile İBB İstanbul metroları kazı-destek sınıfları için korelasyon abacı (Şekil 2.11) yeraltı raylı sistemlerinde kaya sınıflandırması için güncel olarak kullanılmaktadır.

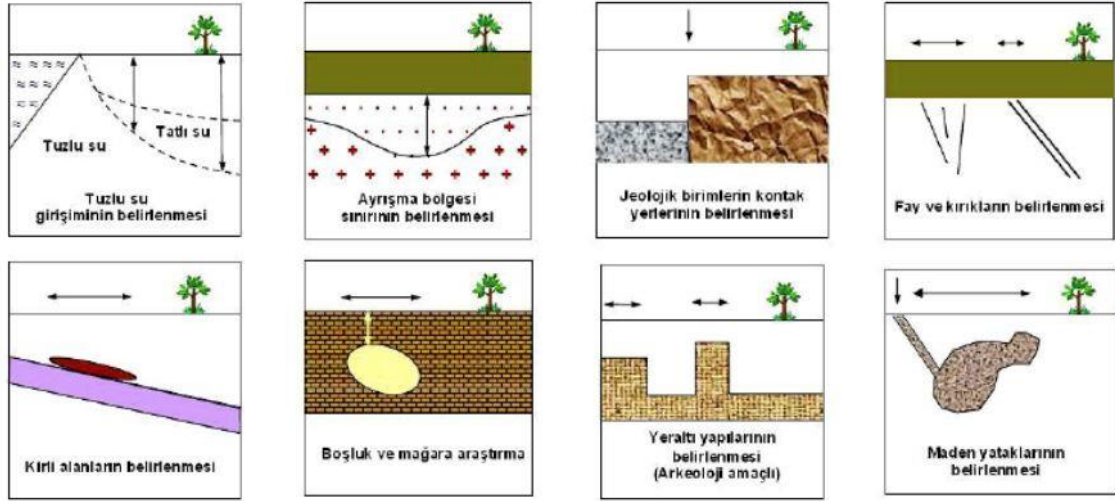
	BARTON KAYA KÜTLESİ NİTELİĞİ (Q)	BIENIAWSKI KAYA KÜTLESİ DEĞERİ (RMR)	ÖNORM B 2203 Ekim 1994 Öncesi	ÖNORM B 2203 Ekim 1994 Sonrası	İstanbul Büyükşehir Belediyesi Metro Kaya Destek Sınıfı
1000	SON DERECE İYİ	101			
400	PEK ÇOK İYİ	94	A1 STABİL	A1 SAĞLAM	
100	ÇOK İYİ	82.7			A1
40	İYİ	76	A2 AŞIRI SÖKÜLEN	A2 SONRADAN AZ DÖKÜLEN	
10	ORTA	60		B1 GEVREK	
4	ZAYIF	58	B1 GEVREK	B2 ÇOK GEVREK	A2
1	ÇOK ZAYIF	47	B2 ÇOK GEVREK	B3 TANELİ	A3
0.1	ÇOK FAZLA ZAYIF	20	C1 BASKILI	C1 DAĞ ATMA	A3 ÖZEL TİP
0.01	SON DERECE ZAYIF	2.5	L1 GEVŞEK ZEMİN YÜKSEK KOHEZYON	C4 AKICI	A5
0.001			L2 GEVŞEK ZEMİN DÜŞÜK KOHEZYON	C5 ŞİŞEN	

Şekil 2.11 : Q ve RMR kaya kütle sınıflamaları ile ONORM 2203 kaya sınıfı karşılıkları ile İBB İstanbul metroları kazı-destek sınıfları için korelasyon abağı (N. Ayaydın'dan modifiye edilmiştir).

2.4. Elektrik Özdirenç Yöntemi

Jeofizik araştırma yöntemlerinden biri olan elektrik özdirenç (rezistivite) yöntemi yeraltına ait parametrelerin belirlenmesinde uzun yıllardır kullanılmaktadır. 1915'de ilk kez Wenner tarafından kullanılan özdirenç yöntemi, Schlumberger tarafından 1920'de geliştirilerek olumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Yazılım ve jeofizik cihaz teknolojisinin gelişmesiyle elektrik özdirenç yöntemi, yeraltının özdirenç değişimlerinin üç boyutta dahi incelenmesine imkan sağlamaktadır. (Berge, 2005; Drahor, 2004)

Kayaçların düşey ya da yatay yöndeki elektriksel iletkenlik farklarından faydalanarak jeolojik yapının oluşturulması elektrik özdirenç yöntemlerin gerçekleştirilmesinin temel unsurudur. Elektrik özdirenç yöntemi, iki akım elektrotu (A,B) ile yeraltına elektriğin gönderilmesi ve iki potansiyel elektrot (M,N) ile bu akımın ortaya çıkardığı potansiyel dağılımının yüzeyden yapılan ölçümler yoluyla belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır (Şahinoğlu, 2018). Bu istinaden bazı kullanım alanları Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12 : Çok elektrotlu özdirenç görüntüleme yönteminin bazı kullanım alanları (Bernard, 2004).

Elektriksel özelliklerin yeraltında hangi durumlarda ve nelere bağlı olarak değişim göstereceği ölçülen ortamın özdirenci, kayacın değişik fiziksel özelliklerine (mineral veya sıvı içeriği, gözenekliliği ve suya doygunluk derecesi gibi) bağlıdır ve bu özellikler yer içine verilen akımın yeraltındaki iletiminde önem taşıyan parametrelerdir (Berge, 2005).

Elektriksel yükün taşınması elektronik ve elektrolitik iletim olarak iki temel iletim şekline göre gerçekleşir. Elektronik iletimde, akım akışı bir metalde olduğu gibi serbest elektronlar yoluyla gerçekleşirken elektrolitik iletimde ise akım akışı iyonlar yoluyla gerçekleşir. Bu iletim türleri, her ortama ait bir öz-iletkenlik kavramını oluşturmaktadır. Elektriksel yükün taşınma hareketi her madde de farklı fiziksel parametrelerin bulunmasından kaynaklı, öz-iletkenlik maddeler için ayırt edici bir özelliktir ve yeraltındaki ortamların birbirinden ayırt edilmesinde kullanılır. Tablo 2.4’de genel olarak bazı materyallerin özdirençleri verilmektedir (Berge, 2005).

Tablo 2.4 : Bazı materyallerin özdirençleri (Reynolds, 1997).

Materyal	Özdirenç(Ωm)	Materyal	Özdirenç(Ωm)
Kalkopirit	$1,5 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-1}$	Toprak (üst)	250-1700
Pirit	$2,9 \times 10^{-5} - 1,5$	Kuru kumlu toprak	80-1050
Pirotit	$7,5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-2}$	Kum kil/killi kum	30-215
Galen	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$	Kum ve çakıl	30-225
Sfalerit	$1,5 \times 10^7$	Çakıl (kuru)	1400
Hematit	$3,5 \times 10^{-3} - 10^7$	Çakıl (doymuş)	100
Limonit	$10^3 - 10^7$	Şist(kalker ve mika)	20-104
Manyetit	$5 \times 10^{-5} - 5,7 \times 10^3$	Şist (grafit)	$10 - 10^2$
İlmenit	$10^{-3} - 5 \times 10$	Mermer	$10^2 - 2,5 \times 10^8$
Kuvars	$3 \times 10^2 - 106$	Konglomera	$2 \times 10^3 - 104$
Kaya tuzu	$3 \times 10^2 - 10^{13}$	Kumtaşı	$1 - 7,4 \times 10^8$
Antrasit	$10^{-3} - 2 \times 10^5$	Kireçtaşı	$5 \times 10 - 10^7$
Linyit	$9 - 2 \times 10^2$	Dolomit	$3,5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Granit	$3 \times 10^2 - 10^6$	Kil	$1 - 10^2$
Toprak (%40 killi)	8	Alüvyon ve kum	$10 - 8 \times 10^2$
Gabro	$10^3 - 10^6$	Bazalt	$10 - 1,3 \times 10^7$
Deniz suyu	3×10^{-1}	Temiz yeraltı suyu	10-100

Aşınmaya karşı direnç gösteremeyen ve kolay eriyebilen kayalardan oluşan araziler karstik araziler olarak tanımlanır. Karstik bölgeler jips, tuz ve kalker gibi eriyebilen kayaçların dış etkenler ile (örneğin topraktaki CO_2 ile zenginleşen ve asidik özellik kazanan akarsu, havadaki CO_2 ile zenginleşen ve asidik özellik kazanan yağmur suyu gibi) çözünmeleri sonucunda oluşurlar. Bu boşlukların oluşumu ve genişlemesi, yeraltı suyu ve yüzey sularının akışına bağlı olduğundan ve genellikle düzensiz bir yayılım gösterdiğinden yapılaşma ve altyapı çalışmaları açısından büyük tehlike arz etmektedirler. Karstik boşluklar çözünme işlemi süresince birbirleri ile bağlantılı hale gelirler ve yüzey sularının akifere ulaşımını sağlarlar. Bu sebeple erime süreci sürekli devam eder ve karstik boşluklar zamanla genişler (Uçar, 2014).

Elektronik ve elektrolitik iletim boşlukta saplanamayacağından karstik boşluklar çevresini oluşturan zemin ve/veya kaya ortamına göre sahip oldukları çok yüksek özdirenç değerleri nedeniyle elektrik özdirenç yöntemi ile yeraltındaki tespitleri mümkün olmaktadır.

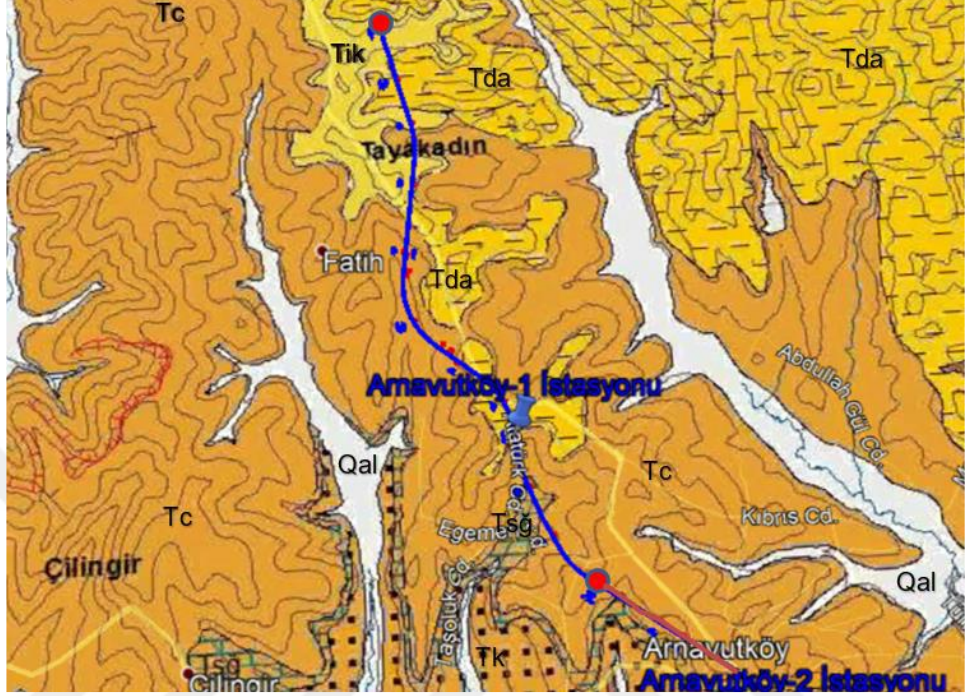
BÖLÜM 3. HALKALI-YENİ HAVALİMANI METRO HATTI JEOTEKNİK İNCELEMELER

Yeraltı raylı sistem projeleri genel olarak istasyonlar, güzergâh hattı, depo sahası, makaslar, acil kaçış şaftları vb. olmak üzere her biri birbirinden ayrı amaçlara hizmet eden birbirlerinden çok farklı boyutlardaki yapıları içerisinde barındırır. Oldukça geniş bir alana yayılan bu yapıların her biri için zaman, maliyet, dayanıklılık başlıkları altında en optimum imalat yöntemini belirlemek elimizde bulunan verilerin çeşidine, sayısına ve gerçeğe yakınlığına bağlıdır. Bu verileri elde etmek adına proje tasarım, çizim ve uygulama aşamalarında jeolojik-jeoteknik incelemeler yapılmaktadır. Bu bölüm ve altbaşlıklarında Km: 38+077 – 44+700, 44+700 – 57+700, 57+700 – 62+500, 62+500 – 69+359 olmak üzere hattı dört kısımda inceleyen Artson Geoteknik Mühendislik ve Müşavirlik (2018) tarafından hazırlanan jeolojik-jeoteknik etüt raporlar ve Geometrik Mühendislik Müşavirlik Yeraltı Araştırmaları (2020) tarafından hazırlanan jeofizik raporlar özetlenerek gerekli bilgiler paylaşılacaktır. Kolay anlaşılması adına tezin bu bölümde Km: 38+077 – 44+700 arası birinci etap, Km: 44+700 – 57+700 arası ikinci etap, Km: 57+700 – 62+500 arası üçüncü etap ve Km: 62+500 – 69+359 arası dördüncü etap şeklinde isimlendirilecektir.

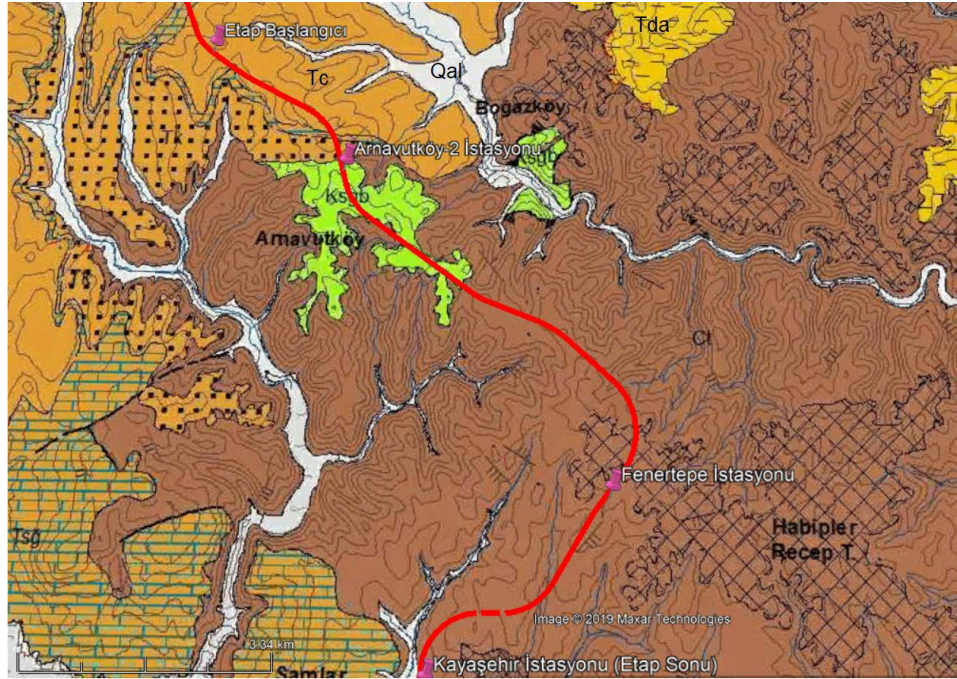
3.1. Proje Hattının Jeolojisi

Güzergâh boyunca, tünel hatlarının iki yanında kabaca 150 metre (toplamda 300 m genişlik) mesafeye kadar olan kuşakta jeolojik haritalama yapılmıştır. Jeolojik haritalama çalışmalarında 1/2.000 ölçekli orto-topografik haritalar ve GİS (Coğrafi Bilgi Sistemi) yazılımı desteği ile uydu görüntüleri kullanılmıştır. Haritalama kapsamında dolgu, alüvyon ve diğer genç çökeller ile kaya birimlerine ait sınırlar belirlenerek halihazır haritaya işlenmiştir. Yapılaşma veya diğer başka sebeplerle birim sınırlarının çok iyi tespit edilemediği yerlerde, sınırlar morfoloji, eski çalışmalar, inşaat kazıları ve

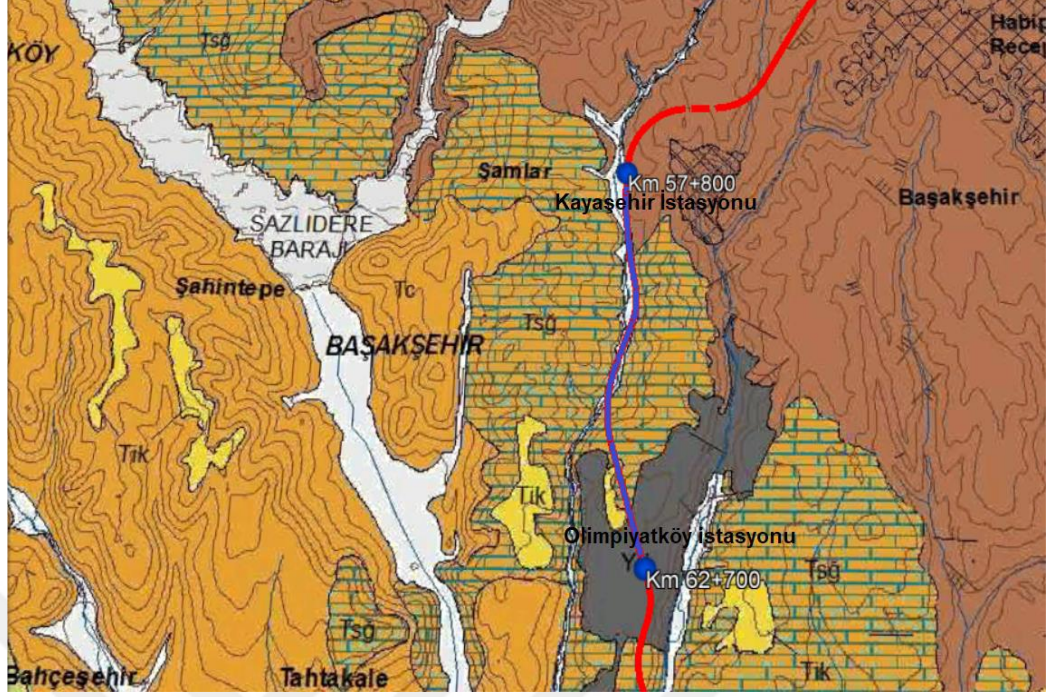
sondaj verilerinden yararlanılarak yaklaşık olarak belirlenmiştir. Jeolojik haritalama kapsamında ayrıca kaya birimlerinde süreksizlik (tabakalanma, eklem, çatlak, fay, volkanik dayk, makaslama vb.) ölçümleri yapılmış ve bu ölçümler haritaya işlenmiştir.



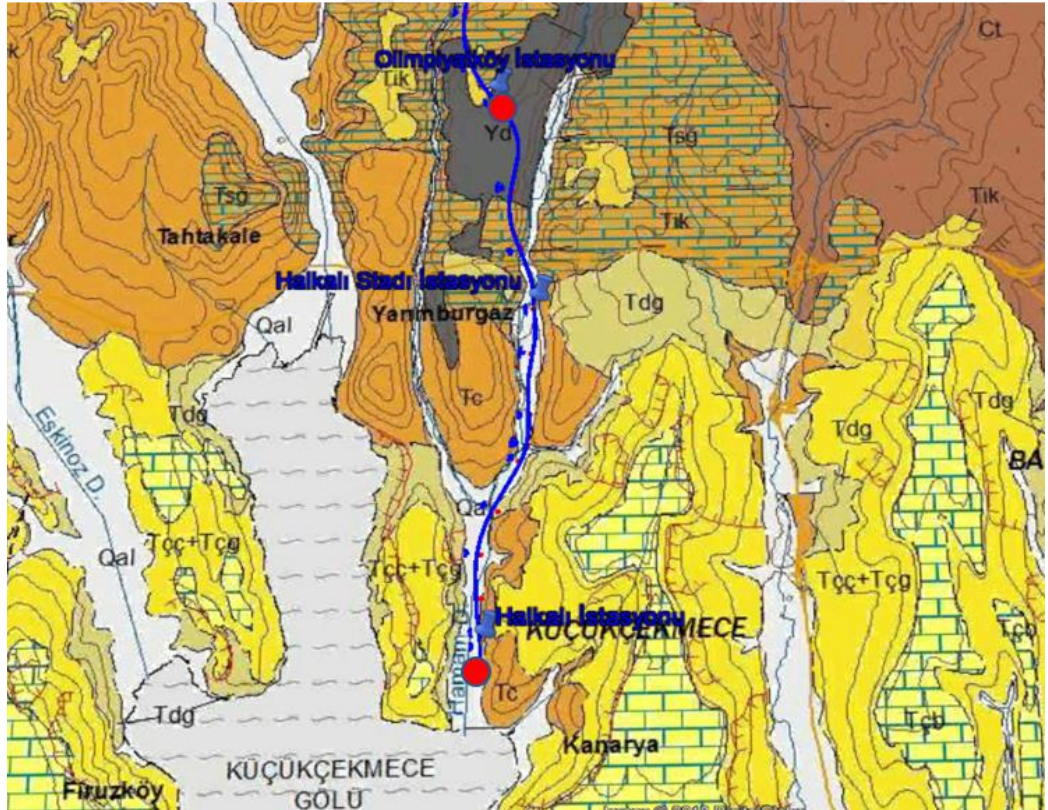
Şekil 3.1 : Kırmızı noktalar ile sınırları belirtilen Km: 38+077 – 44+700 arası için genel jeoloji haritası (Artson Geoteknik, 2018).



Şekil 3.2 : Km: 44+700 – 57+700 arası için genel jeoloji haritası (Artson Geoteknik, 2018).

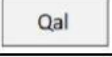
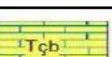


Şekil 3.3 : Mavi çizgi ile belirtilen Km: 57+700 – 62+500 arası için genel jeoloji haritası (Artson Geoteknik, 2018).



Şekil 3.4 : Kırmızı noktalar ile sınırları belirtilen Km: 62+500 – 69+359 arası için genel jeoloji haritası (Artson Geoteknik, 2018).

Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te görülen jeolojik haritalardaki formasyonlara ait özet bilgiler jeoteknik-jeolojik etüt raporlarından modifiye edilerek Şekil 3.5’te verilmiştir. Km 38+077 – 44+700 arası arazi kotları +90 ile +154, Km: 44+700 – 57+700 arası arazi kotları +110 ile +230, Km 57+700 – 62+500 arası arazi kotları +64 ile +118, Km 62+500 – 64+100 arası arazi kotları +27 ile +94 arasında değişmekle birlikte, ağırlıklı olarak +90 ile +94 kotları arasında seyrederken Km: 64+100 – 69+359 aralığında ise arazi kotları +7 m ile +27 m arası değişim göstermektedir. Hat sonundaki göle yakın kısımlar +7 m ile +15 m arasında değişen yükselti değerlerine sahiptir.

Lejant	Formasyon	Üye	Tanımlama
	Yapay Dolgu		Kirli beyaz, bej renkli, kayaparça ve blokları ile çakıl, kum, kil boyu ara malzeme.
	Alüvyon		Çakıl,kum,mil, kil.
	İstanbul	Kıraç	Kızılımsı, açık kahve, gri, boz, büyük bölümüyle çakıl ve daha az oranda kum-ki boyu tutturulmamış gereç.
	Danişmen	Güngören	Yeşilimsi, koyu gri, mor alacalı, kilaşı-seyl, kumtaşı, tuf, tüffit ve ince linyit ara seviyeli.
	Danişmen	Ağaçlı	Çakıl,kum, kil, kömür ara seviyeli.
	Ceylan		Ayrılmamış; marn, kilaşı egemen, killi kireş taşı, kireçli kilaşı arakatkılı; kalkarenit ve seyrek tuf ara düzeyli.
	Soğucak Kireçtaşı		Beyaz, krem, kül gri renkli resifal kireçtaşı, bol algli, mercanlı, nummulitli, mikrit-biyomikrit.
	Koyunbaba		Kumtaşı; çakıltaşı, killi-kumlu-çakıllı kireçtaşı, kireçli kilaşı,marn; kömür ara düzeyli.
	Garipçe	Boğazköy	Boz, morumsu kül rengi. Mika ve feldspat fenokristalli, porfirik dokulu andezitik.
	Trakya		Kara, koyu gri, bozunmuş halde açık kahve, zeytin yeşili renkli; ince orta katmanlı, kilaşı-silttaşı-kum taşı ardalanması.
	Çekmece	Bakırköy	Beyaz, bej, ince-orta katmanlı kireçtaşı egemen, killi kireçtaşı, kilaşı ve marn ara katkılı, bol maktrali.
	Çekmece	Güngören Çukurçeşme	Tcc: Sarımsı boz, gri bol mika pullu, orta boylanmış, çapraz tabakalı, tutturulmamış kaba kum ve çakıl. Tcg: Kum, mil ara katkılı, yeşil gri kil; üst düzeylerde ara katmanlı.

Şekil 3.5 : HYH Metro hattı jeolojik formasyonları.

3.2. Proje Hattının Yapısal Jeolojisi

Kaya kütlelerinde çekilme dayanımına sahip olmayan veya çok düşük çekilme dayanımına sahip tabakalanma düzlemi, eklem, fay, makaslama zonu, dilinim, şistozite vb. gibi jeolojik anlamda zayıflık düzlemlerinin tümüne süreksizlik adı verilmektedir (Ulusay & Sönmez, 2007). Tünel açma makinelerinin performansı eklem, tabakalanma düzlemleri ve kayadaki diğer süreksizliklerden de fazlaca etkilenmektedir. Bu etki tünel açımı sırasında iki şekilde gözlenmektedir. Birincisi, tünelde stabilite, aşırı sökülme, su sızması ve pasa temizleme gibi sorunlara neden olan tünel aynası veya tavanından blokların göçmesi ikincisi ise tünel açma makinesinin kazı işlemi sırasında blokları yerlerinden oynatması şeklinde sayılabilir (Young & Howel, 1978).

Tablo 3.1 : HYH Metro hattında ölçülen süreksizlikler (Artson Geoteknik, 2018).

Gözlem Noktası	Süreksizlik Türü	Eğim Yönü	Eğim Miktarı	Formasyon
G-4	Tabaka	185	4	Tc
G-4	Eklem	185	65	Tc
G-4	Çatlak	90	45	Tc
G-5	Tabaka	195	6	Tc
G-5	Eklem	160	55	Tc
G-5	Eklem	80	45	Tc
G-17	Tabaka	190	3	Tc
G-17	Eklem	200	60	Tc
G-17	Eklem	80	45	Tc
G-25	Tabaka	165	5	Tc
G-25	Tabaka	170	6	Tc
G-25	Eklem	220	75	Tc
G-27	Tabaka	160	5	Tc
G-27	Eklem	30	87	Tc
G-28	Tabaka	190	6	Tc
G-28	Eklem	180	50	Tc
G-65	Tabaka	130	10	Tc
G-65	Eklem	25	80	Tc
G-65	Eklem	285	89	Tc

Tablo 3.1 'de kayıt altına alınan süreksizliklerin Trakya Formasyonu'nda yer aldığı görülmektedir. Trakya Formasyonu, Tersiyer formasyonlarının aksine, çok faylı, eklemlili ve kıvrımlıdır. Genel olarak tabakalanma yanı sıra 2 – 3 sistematik eklem takımı ve gelişigüzel çatlaklar bulundurmaktadır. Yoğun şekilde, çok değişik doğrultu ve eğimlerde faylara rastlamak da olasıdır. Tersiyer yaşlı kaya birimleri genellikle yataya yakın veya güney-güneybatı ve güneydoğu yönde 3° ile 5°'yi geçmeyen düşük

katman eğimlidir. Yersel olarak, faylanmaların neden olduğu 30° ile 40°'yi bulan eğimli katmanlarla da karşılaşılabilir. Bu kaya birimlerinde eklem-çatlak türü süreksizlikler nadiren gelişmiş olup, arazide özellikle Ceylan Formasyonu, Soğucak Formasyonu olmak üzere seyrek halde 3 – 6 m aralıklı düşey gerilme çatlaklarına rastlanılabilir. Karotlarda ise yaygın olarak yatay veya yataya yakın, nadiren de 25° ile 45° arasında değişen eğimlere sahip süreksizlikler gözlenir. Hattın ikinci etabında Trakya Formasyonu ile volkanik kaya birimleri arasında bindirme zonu yer almaktadır. Söz konusu zon boyunca Trakya Formasyonu ters bir fay (bindirme fayı) ile kendisinden daha genç olan volkanik kaya birimleri üzerine bindirmiştir. Kabaca güneye eğimli ve doğu batı doğrultulu olan dokanak esas olarak çok dalgalanma göstermektedir. Zon boyunca kaya birimi çok kırıklı, parçalı olup, breş ve milonit içermektedir. Hattın dördüncü etabında ise kabaca Hat 1 Km 64+000'da yer aldığı ve güneye eğimli olduğu düşünülen fay hattı bulunmaktadır.

3.3. Proje Hattında Depremsellik

İstanbul ili yerleşim yüzeyinin tamamı, İzmit Körfezinden itibaren Marmara Denizi tabanında, doğu batı doğrultuda Saroz Körfezine kadar uzanan büyük bir kırık sisteminin (Kuzey Anadolu Fayı) etkisi altında olup yüksek depremselliğe sahiptir. İstanbul ve civarında, tarihsel ve aletsel dönemde söz konusu kırık sisteminde çok sayıda orta ve büyük ölçekte deprem meydana gelmiştir. Deprem kaynağı Kuzey Anadolu Fayı'nın hatta olan mesafesi 37 km (kuzey uç) ile 15 km (güney uç) arasında değişim göstermektedir.

Son araştırmalar, Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Denizi içindeki kısmının 70 km (Doğu Marmara Fayı) ve 130 km (Batı Marmara Fayı) olmak üzere iki parçadan oluştuğunu (Parsons ve diğerleri 2000, LPichon ve diğerleri 2001), doğu Marmara kısmının kırılması halinde meydana gelecek deprem büyüklüğünün $M = 7.2$, Batı Marmara kısmının kırılması halinde meydana gelecek deprem büyüklüğünün $M = 7.5$ ve iki parçanın birlikte kırılması halinde ise meydana gelecek deprem büyüklüğünün en az $M = 7.6$ olabileceği tahmin edilmektedir. (Parsons ve diğerleri 2000, O. Tüysüz 2003)

Kuzey Anadolu Fayı üzerinde İstanbul ve civarında 1500 yıldan beri meydana gelen 12 tane yıkıcı depremin zamansal dağılımı ve 1999 yılında meydana gelen İzmit ve Düzce depremlerinin Marmara denizi içindeki faylara aktardığı stres birikimi de göz önünde bulundurularak, İstanbul için yapılan deprem olasılığı hesaplarında (Mayıs 2000). 2000 yılı itibari ile İstanbul’da meydana gelebilecek büyük bir depremin 30 yıl içinde olma olasılığı % 62 ± 15 , on yıl içinde olma olasılığı ise % 32 ± 12 hesaplanmıştır. (Parsons 2000). Meydana gelecek deprem büyüklüğünün ise Richter ölçeğine göre 7.2 ile 7.5 arasında olacağı öngörülmektedir.

Tablo 3.2 : HYH Metro Hattı sismik tasarım parametreleri (Artson Geoteknik, 2018).

Parametre	Sembol	Değerler	Değerler	Değerler	Değerler	Değerler
KM		38+077	44+700	57+800	62+359	62+700
Enlem	X	41.256479	41.188574	41.120253	41.014862	41.072172
Boylam	Y	28.702385	28.726142	28.768759	28.766184	28.770497
Deprem Yer Hareketi Düzeyi		DD-2	DD-2	DD-2	DD-2	DD-2
Yerel zemin sınıfı		ZC	ZC	ZB	ZC	ZC
En büyük yer ivmesi (g)	PGA	0.243	0.271	0.307	0.440	0.346
En büyük yer hızı (cm/s)	PGV	15.363	16.882	19.153	26.830	21.712
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)	SDS	0.736	0.804	0.661	1.285	1.001
1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)	SD1	0.261	0.287	0.170	0.441	0.356
Yatay elastik tasarım spektrumu (s)	TA	0.071	0.071	0.052	0.069	0.050
	TB	0.354	0.356	0.258	0.343	0.252
	TL	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Düşey elastik tasarım spektrumu (s)	TAD	0.024	0.024	0.017	0.023	0.017
	TBD	0.118	0.119	0.086	0.114	0.084
	TLD	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000

Tünel kazısı sırasında değişik büyüklükte fay zonları ile karşılaşılması olasıdır. Ancak bunların aktif ve deprem üretme kapasitesine sahip oldukları yönünde bir bilgi mevcut değildir. Türkiye diri fay haritasına göre de güzergâh üzerinde veya güzergâha çok yakın mesafede herhangi bir aktif fay yer almamaktadır. Bununla birlikte genellikle, derine inildikçe zemin koşullarının iyileşmesi nedeni ile deprem ivmesinin ve sarsıntı etkisinin azaldığı, dolayısı ile tünellerin yer üstü yapılarına göre çok daha güvenli oldukları, ancak tünellerin sığ kesimlerinin, derin kesimlerine oranla, yumuşak zemin içinde kalan kesimlerinin ise sert kaya içinde kalan kesimlerine oranla depremden daha fazla etkilendikleri bilinmektedir. Bu durum, yumuşak zeminlerin deprem etkisini büyütmesi veya sıvılaşma gibi lineer olmayan zemin davranışlarından kaynaklanmaktadır. Tablo 3.2’de hat güzergâhına ait sismik tasarım parametreleri yer almaktadır.

3.4. Proje Hattının Hidrojeolojisi

İstanbul ili, Akdeniz, Karadeniz ve karasal iklim tiplerinin birbirine geçişi şeklinde karakterize edilebilen Marmara iklim tipinin etkisindedir. Kışın Akdeniz’den gelen ılık lodosları, Karadeniz’den gelen yağışlı havalar ya da Balkanlar üzerinden gelen soğuk takip eder. İstanbul iline ait ortalama meteorolojik veriler aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Tablo 3.3’de görüldüğü üzere proje alanı için en yoğun yağış dönemi Ekim - Mart arası iken en kurak dönem ise Mayıs – Eylül arasındır. Fakat son zamanlarda küresel ısınmanın da etkisiyle bu genel tablonu bir miktar değiştiği yağışlı dönemlerin geçmişe oranla daha düzensiz seyrettiği zaman zaman ani ve şiddetli yağışların yaşandığı bilinmektedir. Güzergâhın yoğun yapılaşmanın bulunduğu bölgelerinde yağışların büyük bir yüzdesi akışa geçmekte ve şehrin alt yapı hatları vasıtası ile derelere veya denize ulaşmakta iken yağışın çok az bir miktarı yer altına sızabilmekte, sızan miktarın ise yeraltı suyu beslenmesi için yeterli olamadığı düşünülmektedir. İstanbul ili oldukça rüzgarlıdır. Ortalama yıllık rüzgar hızı saatte 17 kilometredir. Hâkim rüzgârlar birinci derecede kuzeyden esen Poyraz, ikinci derecede güneybatıdan esen Lodos, üçüncü derecede ise kuzeydoğudan esen Karayeldir. Hâkim yağış yönü de kuzey– kuzeybatı ve güneybatıdır.

Tablo 3.3 : İstanbul iline ait uzun yıllar (1929 – 2017) içinde gerçekleşen meteorolojik veriler
(Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Resmî Web Sayfası).

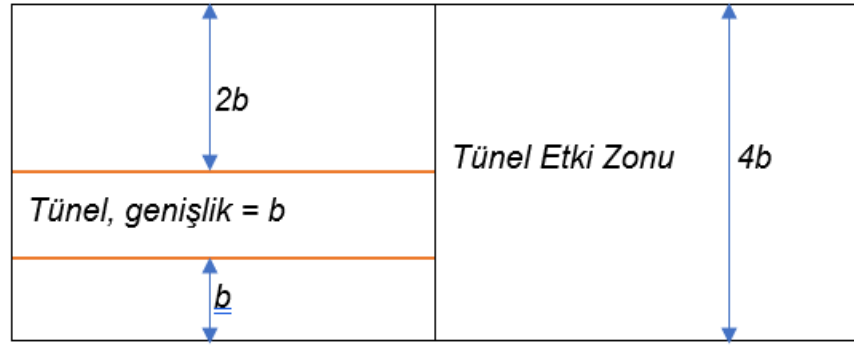
Parametre		Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Ortalama Sıcaklık (°C)		6	6.1	7.7	12.0	16.7	21.4	23.8	23.8	23.1	15.7	11.7	8.3
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)		8.4	9	10.9	15.4	20.2	24.6	26.6	26.8	23.7	19.1	14.8	10.8
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)		3.1	3.1	4.2	7.6	12.1	16.5	19.4	20.1	18.8	12.9	8.9	5.5
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı		17.3	15.2	13.8	10.3	8.0	6.2	4.3	5.0	7.6	11.2	13.0	17.1
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (kg/cm2)		106	77.7	71.4	45.9	34.4	36.0	33.3	39.9	61.7	88.0	100.9	122.2
En Yüksek Sıcaklık (°C)		22.0	22.7	29.3	33.6	34.5	40.2	41.5	40.5	39.5	34.2	27.8	25.5
En Düşük Sıcaklık (°C)		-13.9	-16.1	-11.1	-2	1.4	7.1	10.5	12.6	6.0	0.6	-7.2	-11.5

İstanbul Yeni Havalimanı – Halkalı Metro hattı güzergâhının Halkalı bölgesi Menekşe Deresi ile kabaca paralel konumda Küçükçekmece Gölü kıyısına yakın mesafeye kadar iner. Metro hattı ile Menekşe Deresi yaklaşık Km: 64+100 de (Tem Otoyolu civarında) kesişirler. Etabın kuzey kesiminde (Burada derenin adı Hamamderesi olarak geçmektedir.) dere hattın doğusunda, hattın güney kesiminde ise hattın batısında yer alır. Menekşe Deresi ve kuzey yöndeki devamı olan Hamamdere yaz kış akar haldedir. Yaz döneminde bu derelerdeki akış miktarı kabaca 3 – 5 lt/s civarında olduğu tahmin edilmektedir. Yağışlı dönemlerde ise akış miktarının hayli arttığı gözlemlenmiştir. Güzergâhın Arnavutköy bölgesinde ise yer alan küçük dere kolları zayıf da olsa genel olarak akışlıdır. Km: 38+500 – 38+800 aralığındaki dere kolları, bu bölgedeki havalimanı ve karayolu inşaatları nedeniyle, yer yer bloke olup, küçük gölcükler oluşturmuşlardır.

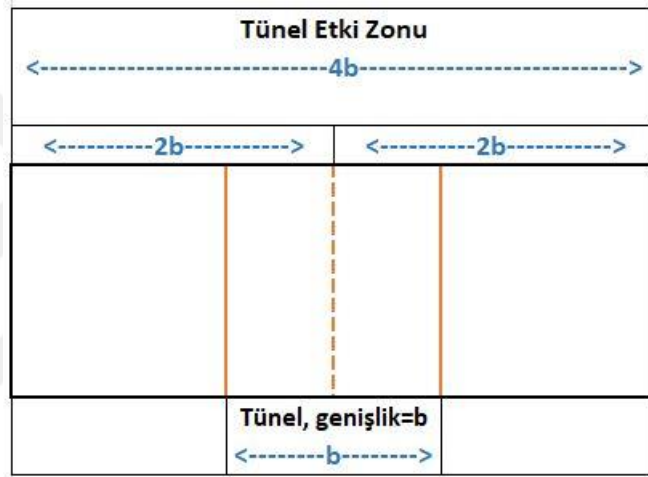
3.5. Proje Hattında Yapılan Arazi ve Laboratuvar Çalışmaları

Toplam 9588,5 m uzunluğunda 198 adet karotlu araştırma sondajından elde edilen 1006 adet zemin, 1230 adet kaya numunesi üzerinde yapılan deneyler ile hattın jeolojik kesiti oluşturulmaktadır. Sondaj delgileri tünel kazı tabanı altında 5 - 6 m derinliğe kadar bilgi alınacak şekilde Crealius ve Diamec tipi sondaj makineleri ile rotari yöntemle klasik veya wire-line ekipman ile yapılmıştır. Tüm delgiler sürekli karot örnek alınarak gerçekleştirilmiştir. Kaya delgilerinde örnek alımı klasik yöntemde T tipi (T76) ince cidarlı çift tüplü karotiyerler ile, wire-line sistemde ise HQ ve NQ karotiyerler ile gerçekleştirilmiştir. Zemin niteliğindeki ortamlarda delgiler tek tüplü karotiyerler ile gerçekleştirilmiş ve karot şeklinde örselenmiş zemin örnekleri alınmıştır. Tamamen ayrılmış kaya dâhil zemin niteliğindeki kısımlarda 1.5 m aralıkla SPT (Standart Penetrasyon Testi) yapılmış ve testler sırasında örselenmiş zemin numuneleri alınmıştır. Kıvamı uygun killi seviyelerde ayrıca örselenmemiş numune (UD) örnekleri alınmıştır. Delgi işlemleri tamamlandıktan sonra, yeraltı su rasatları yapılması amacı ile kuyulara, kuyu derinliği boyunca perfore hale getirilmiş PVC (Poly Vinil Klorür) borular yerleştirilmiştir. Daha sonra, statik seviyeye ulaşınca kadar, kuyularda gün aşırı ölçümler yapılarak yeraltı su seviyeleri tespit edilmiştir. Zemin numunelerinin önemli bir kısmında yalnızca elek, hidrometre, özgül ağırlık, kıvam (Aterberg) limitleri, su muhtevası, birim hacim ağırlık gibi fiziksel ve indeks deneyler yapılırken, bir kısmında bu deneylerin yanı sıra serbest basınç ve kesme kutusu gibi mekanik deneylerde yapılmıştır. Kaya numuneler üzerinde ise birim hacim ağırlık gibi fiziksel ve nokta yükleme indeksi, poisson oranı, tek eksenli basınç, elastisite modülü gibi mekanik – elastik deneyler yapılmıştır.

İmalat sırasında Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de yer alan tünel etki zonları dikkate alınarak imalat yapılan bölgenin jeolojisi ışığında ilerleme sağlanmasının yanında kazı aynasında görülen zemin mühendisler tarafından değerlendirilerek imalatta gerekli revizeler yapılabilmektedir.



Şekil 3.6 : Değerlendirmede esas alınan düşeydeki tünel etki zonunun şematik görünümü (Artson Geoteknik, 2018).



Şekil 3.7 : Değerlendirmede esas alınan yataydaki tünel etki zonunun şematik görünümü (F.Kars görüşme)

3.6. Proje Hattında Karşılaşılması Olası Jeolojik Problemler

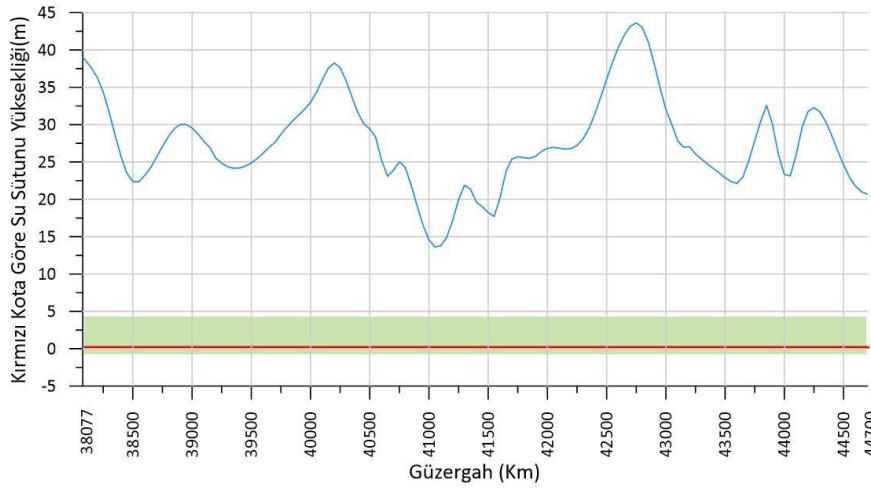
Fay zonları, karstik boşluk, karışık zeminler, yeraltı suyu, akıcı zeminler, şişme – kabarma, kazı güçlükleri, aşındırma, yapışkanlık, gaz ve TBM kazılarında blok oluşumu gibi sorunlar, tünel kazıları sırasında karşılaşılan başlıca jeolojik problemlerdir.

3.6.1. Yeraltı suyu

Ceylan Formasyonu genellikle az geçirimli- geçirimsiz olup, yeraltı suyu depolama ve iletme potansiyeli düşüktür. Dolayısı ile birinci etabının yaklaşık olarak tamamında kayda değer bir yer altı suyu problemi beklenmez. Ancak güzergâhın Km: 44+200 -

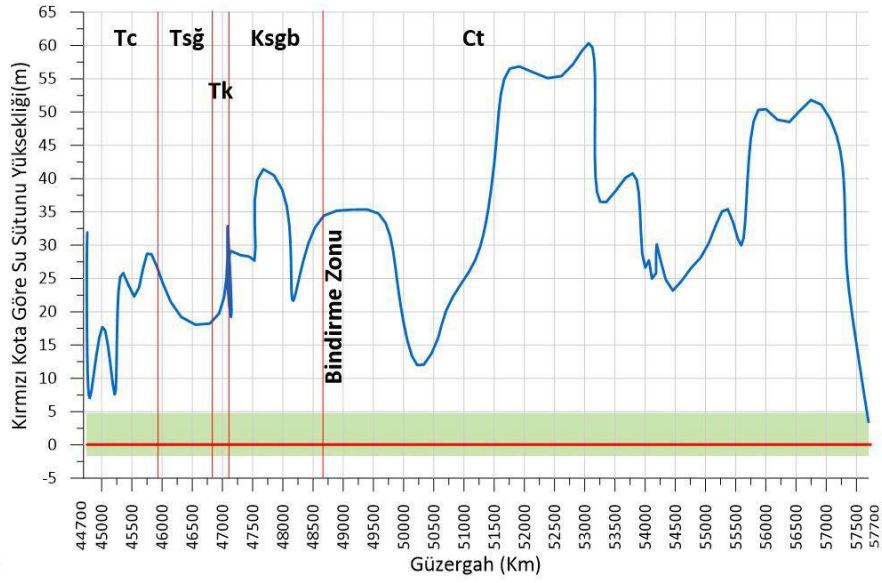
44+700 aralığında Ceylan Formasyonu içinde yer alan resifal kireçtaşı baskın merccek nispeten geçirimli olup, bu kesimde tünel kazısı sırasında bir miktar yeraltı suyu ile karşılaşılabilir.

Genelde tünel tavanı üstünde, sınırlı olarak da tünel tavanında yer alan Ağaçlı Üyesi, ağırlıklı olarak killerden kurulu olup, genel olarak az geçirimli – geçirimsizdir. Ağaçlı Üyesi ile Ceylan Formasyonu sınırı nispeten geçirimli olup bu kesimde su hareketi olabilir. Km: 41+750 – 42+200 aralığında söz konusu bu sınırın tünel tavan çizgisini izlemesi beklenmektedir. Bu kesimde tünel tavanı veya üst yarıda beklenenden farklı olarak daha fazla yeraltı suyu ve su ile birlikte stabilite sorunları ile karşılaşılabilir. Ölçüm sonuçlarına göre, güzergâhın birinci etabında yeraltı su seviyesi, ray üstü kotuna (kırmızı kot) göre ağırlıklı olarak 25 -35 m arasında, nispeten daha az bir kesimde ise 15 ile 25 m arasında değişen yüksekliklerde yer almaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Km 38+077 – 44+700 aralığında yeraltı su seviyesinin tünel kırmızı kotuna göre değişimi (Artson Geoteknik, 2018).

Şekil 3.9 'de görüleceği üzere, ikinci etapta yeraltı su seviyesi ray üstü kotuna göre 10 ile 60 m arasında değişen yükseklikte yer almaktadır. Yeraltı su seviyesindeki bu farklılığın sebeplerinin öncelikle topoğrafik koşullar kısmende olsa mevsimsel değişimler ve bazı sondaj noktalarına yakın derin yer altı su kuyularının varlığı ile ilişkili olduğu düşünölmektedir.



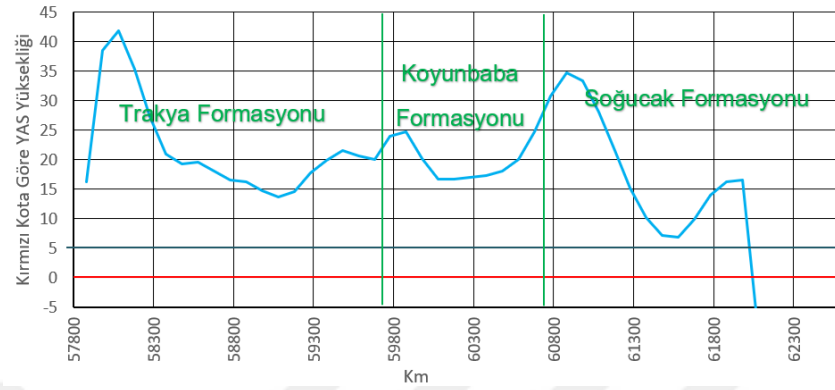
Şekil 3.9 : Km: 44+700 – 57+700 aralığında yeraltı suyunun tünel kırmızı kotuna göre değişimi (Artson Geoteknik, 2018).

Soğucak Formasyonu (Tsğ) ara seviyeler halinde marn ve kiltaşları bulundurmakla birlikte, genel olarak resifal kireçtaşı, kalkarenit ve karbonatlı kumtaşlarından kurulu, çoğunlukla gözenekli, kovuklu, erime ve karstik boşluklu olup orta- yüksek gözeneklilik ve geçirimliliğe sahiptir. Tünel kazıları sırasında Soğucak Formasyonu içinde belirgin, bazen güçlü akışlar şeklinde yeraltı suyu ile karşılaşılması beklenir. Bazen su dolu küçük çaplı karstik boşluklar geçilebilir.

Koyunbaba Formasyonu (Tk), kumlu, kömürlü seviyeler bulundurmakla birlikte, güzergâhın ikinci etabında daha ziyade kil baskın seviyelerden kurulu olup az geçirimli olması beklenmektedir. Tünel kazıları sırasında Koyunbaba Formasyonu içinde zayıf şekilde yeraltı suyu ile karşılaşılabilir. Ancak birimin Soğucak Formasyonu ve Boğazköy Andezit Üyesi ile olan sınırlarında nispeten daha belirgin akışlar şeklinde yeraltı suyu ile karşılaşılabilir. Özellikle Koyunbaba Formasyonu ile Boğazköy andezit üyesi sınırında su sızıntıları ile birlikte stabilite sorunları yaşanabilir.

Sondaj kuyularında yapılan ölçümlere göre güzergahın üçüncü etabında, yeraltı su seviyesinin Km: 57+700 – 61+200 arasında tünel tavanına göre 10 – 20 m arasında, Km:61+200 – 61+900 arasında 0 – 10 m arasında değişen yükseltilerde yer alması, Km: 61+900 – 62+500 aralığında ise tünel tabanı altında kalması beklenmektedir (Şekil 3.10).

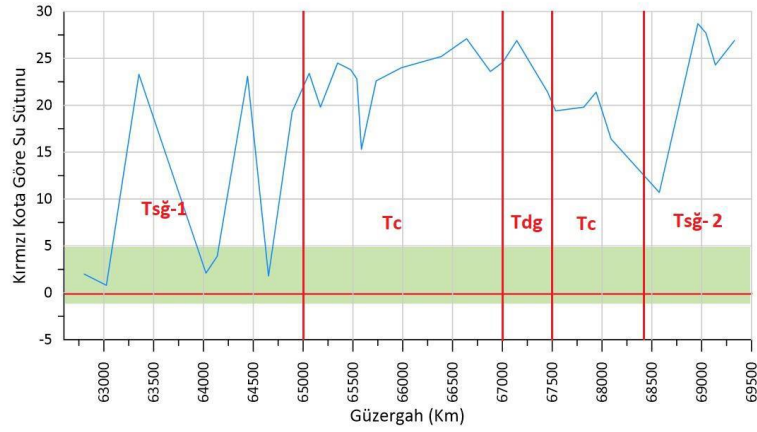
Yeraltı su seviyesindeki bu değişkenliğin, topoğrafya ve litolojik değişimler yanı sıra, Atatürk Olimpiyat Stadı civarında olması muhtemel derin yeraltı su üretim kuyularıyla da ilişkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.10 : Km: 57+700 – 62+500 aralığında yeraltı suyunun tünel kırmızı kotuna göre değişimi (Artson Geoteknik, 2018).

Trakya Formasyonu genellikle az geçirimli olup, yeraltı suyu depolama ve iletmepotansiyeli düşüktür. Ancak formasyon içindeki kumtaşı seviyeleri sınırlı da olsa yeraltı suyu taşır. Birim içinde yer alan fay zonları ise yüksek miktarlarda olmasa da su taşıyan kanallar şeklinde görev görmektedir. Tünellerin Trakya Formasyonu içinde kalan kesimlerinde genel olarak damlama, kumtaşı seviyelerinde ve kesilmesi kuvvetle muhtemel fay zonlarında ise sızıntı – zayıf akışlar şeklinde yeraltı suyu beklenmektedir.

Elde edilen verilere göre güzergâhın dördüncü etabı boyunca yer altı su seviyesi tünel kırmızı (ray üstü) kotuna göre kabaca 0 m ile 30 m arasında değişen yükseklik aralığında dalgalanma göstermektedir. (Şekil 3.11). Soğucak Kireçtaşının yer aldığı Km 62+500 – 64+700 aralığında tünel üstündeki yeraltı su sütunu 2 m ile 25 m arasında, Ceylan Formasyonunun yer aldığı Km: 64+700 – 68+500 aralığında ağırlıklı olarak 20 m ile 25 m arasında, Ceylan Formasyonu ile Soğucak Kireçtaşının birlikte yer aldığı Km: 68+500 – 69+359 aralığında ise 10 m ile 30 m arasında seyrederek. Su seviyesi genel olarak tünel tavanı üstünde, kısmen kazı kotlarında yer almaktadır.



Şekil 3.11 : Km: 62+500 – Km: 69+359 aralığında yeraltı suyunun tünel kırmızı kotuna göre değişimi (Artson Geoteknik, 2018).

3.6.2. Kazılabilirlik ve aşındırma

Jeolojik verilere göre tünel kazılarının çok önemli bir kısmı, orta sert kaya niteliğindeki Trakya Formasyonu ve Boğazköy Andezit Üyesi içinde, çok az bir bölümü ise aşırı konsolide, yarı taşlaşmış (sert zemin – yumuşak kaya) niteliğindeki Ceylan ve Koyunbaba formasyonları ile, yumuşak – orta sert kaya niteliğindeki Soğucak Kireçtaşı içinde gerçekleşmesi beklenmektedir.

Tünellerin çok az bir bölümünün içinde yer alacağı Ceylan, Soğucak ve Koyunbaba formasyonları kolay kazılabilir olup, kazılabilirlik ve aşındırma problemi beklenmemektedir. Soğucak Formasyonunda TBM kazıları yönünden bir güçlük ve kayda değer aşındırma beklenmezken, konvansiyonel kazılarda yer yer hidrolik pönomatik kırıcılara ihtiyaç olabilmektedir.

Tünellerin Trakya Formasyonu ile Boğazköy Andezit Üyesi içinde kalan kesimlerinde ise yer yer kazı güçlükleri, yer yer de aşındırıcılık sorunları ile karşılaşılabilir. Trakya formasyonu içinde yer alan kumtaşı (bazen çakıllı kumtaşı) seviyeleri silis çimentolu olup hem zor kazılabilir hem de orta düzeyde aşındırıcı etkiye sahiptir. Benzer şekilde Boğazköy Andezit Üyesi de belli bir düzeyde kuvars minerali bulundurmakta olup, ayrışmamış kısımlarda zor kazılabilir ve aşındırıcı olabilmektedir. Öte yandan Trakya Formasyonu içinde yer alan dasit ve diyabaz daykaları da ayrışmamış halde sert ve yüksek dayanıma sahip olup zor kazılabilirlik ve aşındırma sorunları yaratabilmektedir.

3.6.3. Yapışkanlık problemi

Tünel kazılarında karşılaşılması beklenen Ceylan ve Koyunbaba Formasyonları sert kil - kilitaşı ve marnlardan kurulu olup zayıf bir yapışkanlık gösterebilmektedir. Soğucak, Boğazköy Andezit Üyesi ve Trakya Formasyonu kazılarında ise yapışkanlık beklenmemektedir. Ceylan Formasyonu sert kil- kilitaşı ve marnlardan kurulu olup zayıf bir yapışkanlık özelliğı gösterebilmektedir. Güzergahın Km: 41+750 – 42+200 aralığında tünel tavanında kesilmesi muhtemel Ağıaçlı Üyesi (Tda) ise orta-yüksek plastisiteye sahip olup, orta düzeyde bir yapışkanlık sergileyebilmektedir. Ayrıca çok sınırlı olarak karşılaşılması beklenen Gürpınar Killeri (Tdg) de orta- yüksek plastisiteye sahip olup, orta – yüksek düzeyde yapışkanlık sergileyebilmektedir.

3.6.4. Karstik boşluklar

Trakya ve Ceylan Formasyonu karstik boşluk oluşturma özelliğine sahip değildir. Koyunbaba Formasyonu kısmen killi kısımlardan, kısmen de killi kireçtaşı ve kireçtaşlarından kuruludur. Killi kısımlar karstik boşluk oluşturma özelliğine değilken kireçtaşı baskın kısımlarda çok zayıf şekilde boşluk oluşturma potansiyeli olabilmektedir.

Soğucak Formasyonu karstik boşluk oluşturma potansiyeline sahiptir. Soğucak Formasyonu geçişinde yapılmış olan sondajlarda karstik boşluk ile karşılaşılmağı olsa, tünel kazıları sırasında karşılaşılması ihtimal dahilindedir.

Olası karstik boşluklar, tamamen boş, gevşek yerleşmiş, suya doymun kahvemsı kırmızı renkli killi malzemeye ya da yer altı suyu ile dolu olabilmektedir. Karstik boşluk ve dolgular beklenmeyen yeraltı suyu ve stabilite problemleri yanı sıra, TBM sapmalarına neden olabilmektedir. Olası bir karst kökenli sorunla karşılaşılmağı için, tünel kazıları sırasında bu aralıkta sürekli olarak, kazı kesitinin altından ve üstünden de bilgi alacak şekilde ayna gerisine yatay ve eğimli sondajlar yapılmalıdır.

3.6.5. Akıcı zeminler

Bu etapta yer alan birimler genel olarak kaya niteliğinde olup akıcı zemin özelliğı taşımamaktadır. Ancak Km: 48+700 – 48+760 aralığında yer alan bindirme zonu başta

olmak üzere, yer yer karşılaşılması beklenen fay ve diğer ezik zonlarda akıcı zemin problemleri ile karşılaşılabilir. Bu etapta dar bir aralıkta yer alan Koyunbaba Formasyonu içinde kömürlü kil veya killi kömür seviyeleri mevcuttur. Söz konusu bu birim içindeki kazılarda zayıf bir ihtimal de olsa metan gazı ile karşılaşılabilir. Etabın geri kalanında böyle bir sorun beklenmemektedir.

Ceylan Formasyonu ve Soğucak Formasyonu kaya niteliğinde olup akıcı zemin özelliği taşımamaktadır. Ağaçlı Üyesi ise genel olarak kiltaşlarından kurulu olup, genel olarak akıcı zemin özelliği göstermez, ancak ara seviye veya mercek halinde bulundurulması olası suya doymuş kumlar akıcı zemin özelliği gösterebilirler. Ağaçlı Üyesi genel olarak tünel tavanı üstünde yer almaktadır. Ancak Km: 41+750 – 42+200 aralığında tünel tavan çizgisine kadar inmektedir. Bu kesimde sondajlarda görülmemiş olmakla birlikte kum mercek veya seviyeleri olması halinde akıcı zemin problemi ile karşılaşılabilir.

Km: 48+700 – 48+760 aralığında yer alan Bindirme zonunda olmak üzere, yer yer karşılaşılması beklenen fay ve diğer ezik zonlarda akıcı zemin problemleri ile karşılaşılabilir.

3.6.6. Blok oluşma potansiyeli

Ceylan ve Koyunbaba formasyonlarında blok oluşması beklenmemektedir. Soğucak Formasyonu ise orta sert kaya niteliğinde olup bazı kesimlerde kalın tabakalı veya som, bazı kesimlerde ise ince-orta tabakalı veya değişik boyutlara sahip, yer yer dağılılabilen bloklar halindedir. Bu kesimde zayıf da olsa blok oluşması ihtimali vardır. Trakya Formasyonu ve Boğazköy Andezit Üyesi ise yer yer orta sık yer yer sık kırıklı – parçalı olması yanı sıra orta sert kaya özelliğinde olup TBM kazıları sırasında blok oluşması problemleri ile karşılaşılabilir. TBM delgilerinde blok oluşma potansiyeli göz önünde bulundurulması önerilmiştir.

3.6.7. Fay zonları

Ceylan Formasyonu, Soğucak Formasyonu ve Koyunbaba Formasyonu içinde belirlenmiş bir fay zonu yer almamaktadır. Ancak birimlerin yaşı ve bölgenin tektonik geçmişi irdelendiğinde, tünel kazıları sırasında bu formasyonlar içinde genellikle

normal atımlı birkaç fay zone kesilmesi kuvvetle muhtemeldir. Boğazköy Andezit Üyesi içinde yapılacak kazılarda, özellikle birimin güney kesiminde sıkça ters faylar ile karşılaşılabilir. Kabaca Hat 1 Km: 48+700 – 48+760 aralığında, Boğazköy Andezit Üyesi ile Trakya Formasyonu geniş bir ezilme zonuna sahip ters bir fay (bindirme zone) ile yan yana gelmiştir.

Trakya Formasyonu içindeki kazılarda çok farklı doğrultu ve eğimde olmak üzere farklı türde (doğrultu atımlı, ters fay, eğim atımlı veya normal fay) çok sayıda fay ile karşılaşılabilir. Söz konusu fayların kimisi 30 – 40 cm, kimisi ise 5 – 10 m kalınlıkta ezilme zonlarına sahip olabilir. Fay zonlarının bazılarında ise sonradan andezit daykaları yerleşmiştir. Hat-1 Km: 54+600 – 54+700 aralığında yüzey jeolojik gözlemlere göre güney-güneybatı yönde eğimli ters bir fay veya faylar geçilmesi, söz konusu fay veya faylara kıvrımların da eşlik etmesi beklenmektedir. Hat-1 Km: 55+720 – 55+780 aralığında geçilen dere hattı, morfolojik yapısı itibarı ile bir faya karşılık gelmesi ihtimali mevcuttur. YHH 72 (Yeni Havalimanı-Halkalı) sondaj verisine göre Fenertepe istasyonu girişinde kalın bir fay zone geçilmesi beklenmektedir.

Tünel kazıları sırasında Trakya Formasyonu içinde burada anlatılan ve jeolojik kesit üzerinde gösterilen fay zonları dışında da çok sayıda fay zone ile karşılaşılabilir. Fay zonlarında, kaya birimlerinin çok kırıklı, parçalı veya ezik olması yanı sıra, geçirimsiz de olması nedeniyle yer altı suyu ve stabilite sorunları ile karşılaşılabilir.

Km: 64+000 – 64+080 aralığında önemli sayılabilecek bir fay zone kesilmesi beklenmektedir. Söz konusu fay zonunda, kaya biriminin çok kırıklı parçalı olması yanı sıra, ayrışma ürünü kil dolgular içermesi de beklenir. Söz konusu bu zonda, formasyondan beklenenden daha fazla su girişi ve stabilite sorunları ile karşılaşılabilir.

3.6.8. Gaz tehlikesi

Ağaçlı Üyesinin tabanında (Ceylan Formasyonu ile olan sınırında) bir kömür seviyesi olduğu gözlem ve sondajlar vasıtası ile tespit edilmiştir. Tünel tavan çizgisinin bu iki birimin sınırını izlemesi beklenen Km: 41+750 – 42+200 aralığında kömür kesilmesi ihtimal dahilindedir. Bu aralıkta, kazı sırasında, başta metan olmak üzere, tünel içine gaz sızıntıları olması olasıdır.

İkinci etapta dar bir aralıkta yer alan Koyunbaba Formasyonu içinde kömürlü kil veya killi kömür seviyeleri mevcuttur. Söz konusu bu birim içindeki kazılarda zayıf bir ihtimal de olsa metan gazı ile karşılaşılabilme olasılığı belirtilmiştir..

Üçüncü etabın kuzey ve güney kesimlerini oluşturan Trakya Formasyonu ile Soğucak Formasyonunda herhangi bir gaz tehlikesi beklenmemektedir. Ancak etabın orta kesiminde yer alan Koyunbaba Formasyonu içinde ağırlıklı olarak tünel tavanı üstünde, kısmen de tünel kazı kotlarında kömür seviyesi varlığı sondajlar vasıtası ile tespit edilmiştir.

Güzergâhın dördüncü etabında, sondajlarda karşılaşılacakla birlikte, güzergâhın sınırlı bir kısmında (kabaca Km: 67+000 – 67+400 arasında) yer alan Gürpınar Üyesi killlerinde ince kömür veya killi kömür ara seviyeleri olduğu bilinmektedir. Yalnızca bu kesimde, zayıf bir ihtimal de olsa, kazı sırasında başta metan olmak üzere, tünel içine gaz sızıntıları olması olasılığı belirtilmiştir.

BÖLÜM 4. HALKALI-YENİ HAVALİMANI METRO HATTI GEOTEKNİK UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRMELERİ

Yeni Havalimanı-Halkalı metro hattı, esas olarak İstanbul Havalimanına ulaşımın sağlanması amacıyla planlanmakta olup Gayrettepe-Yeni Havalimanı metro hattının devamlılığını oluşturmaktadır. Bu hat sayesinde havalimanı ile şehir diğer merkezleri arasındaki bağlantı toplu taşıma ile sağlanacak olup şehir içi mevcut raylı sistemlerle belirli notlarda entegrasyon gerçekleştirilecektir.

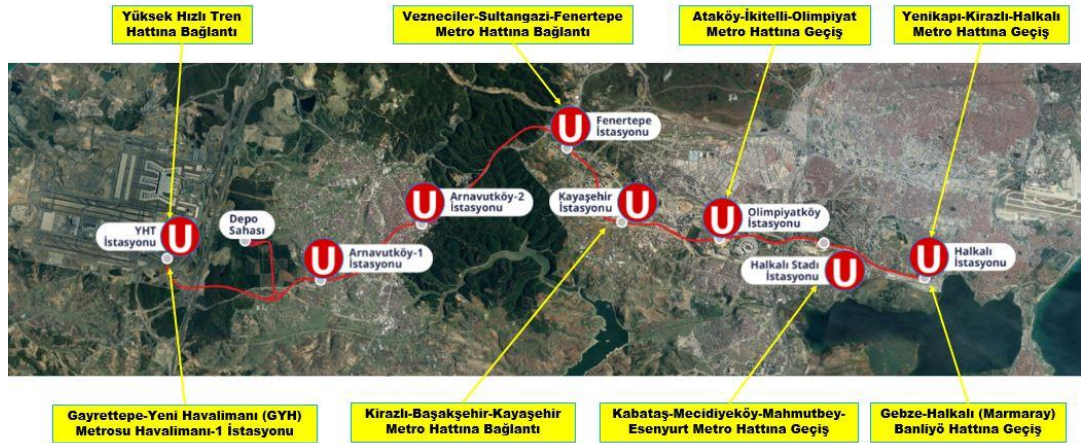
Tablo 4.1 : Halkalı-Yeni Havalimanı ve Gayrettepe-Yeni Havalimanı sürücüsüz yeraltı raylı sistem hattı demiryolu tasarım kriterleri.

Tanım	Olması gereken limit değeri	Zorunlu durumlarda kullanılacak üst limit
Cari hatta asgari yatay kurp yarıçapı	700 m	350 m
İstasyonlarda asgari yatay kurp yarıçapı	Düz	1500 m
Depo hattında asgari yatay kurp yarıçapı	300 m	120 m
Peron başlarındaki asgari aliyman uzunluğu	20 m	10 m
Cari hatta makas başlarındaki asgari aliyman uzunluğu	10 m	5 m
Depo hattında makas başlarında asgari aliyman uzunluğu	6 m	4 m
Cari hatta azami dever	120 mm	150 mm
Cari hatta asgari dever	20 mm	
İstasyonda azami dever	0	110 mm
Yanal ivme	0,79 m/s ²	0,98 m/s ²
Cari hatta azami eğim	4%	
İstasyon, tali, depo hattında azami eğim	0	0,50%
Bakım atölyesinde azami eğim	0	0,30%
Asgari düşey kurp yarıçapı	0,5V ²	0,25V ² , 2000 m
Asgari düşey kurp boyu	30*D	60 m

Halkalı-Yeni Havalimanı sürücüsüz yeraltı raylı sistem hattı tren hızı 120 km/h ve sefer sıklığının 3 dakika olmak üzere, güzergâh ve istasyonlar araçların 4'lü ya da 8'li diziler halinde işletilmesine olanak tanıyacak şekilde tasarlanmıştır. Araçların duraklarda duruş mesafesi toleransı 40 cm 'dir. Tablo 4.1'de hat güzergâhına ait demiryolu tasarım kriterleri yer almaktadır.

4.1. Projenin Tanıtımı

Metro hattının bu kısmı, kabaca çift tüp halinde yaklaşık toplam 31 km tünel, 7 adet istasyon ve depo sahasından oluşmaktadır. Güzergâhın Arnavutköy ilçe merkezi ile Küçükçekmece ilçesi içinde kalan kısımları yoğun yapılaşmış alanda, geri kalan kısımları ise henüz yapılaşmamış veya seyrek olarak yapılaşmış alanlarda kalmaktadır. Arnavutköy, Başakşehir ve Küçükçekmece ilçelerini kabaca kuzey-güney doğrultuda kat eden hat, Küçükçekmece İlçesine bağlı Halkalı semtinde son bulur (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : HYH Metro Hattı uydu görüntüsü ve entegrasyon noktaları.

Yeraltı raylı sistemlerin minimum 2 saatlik dayanıma sahip yangın duvarlarına sahip olduğu durumlarda ya da raylı sistemlerin ikiz tünellerde bulunduğu durumlarda ara geçitlerin acil çıkış merdiveni yerine kullanımına izin veren Sabit Kılavuz Yollu Transit ve Yolcu Raylı Sistemleri Standartı uyarınca ara geçitler birbirinden ve en yakın tünel girişi, istasyon veya havalandırma girişinden maksimum 244 m mesafede tasarlanmalıdır (NFPA 130, 2017). Aynı standart uyarınca çıkışlar arası maksimum mesafe en fazla 762 m olabilir. Bu sebeplerle projemizde 104 adet ara geçit tüneli, 11 adet makas tüneli, 8 adet servis istasyonu ve 13 adet acil kaçış shaftı + inşaat shaftı

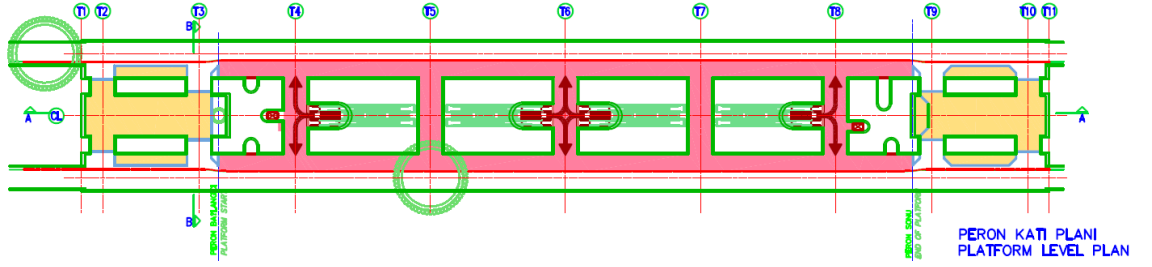
bulunmaktadır. Tablo 4.2’de bu yapıların hattaki konum bilgileri paylaşılmaktadır. İmalat faaliyetlerinin takibi adına projede Halkalı ileri yön Hat 1 (H1), Havalimanı geri yön Hat 2 (H2) şeklinde isimlendirilmiştir.

Tablo 4.2 : HYH Metro Hattı güzergâh bilgileri.

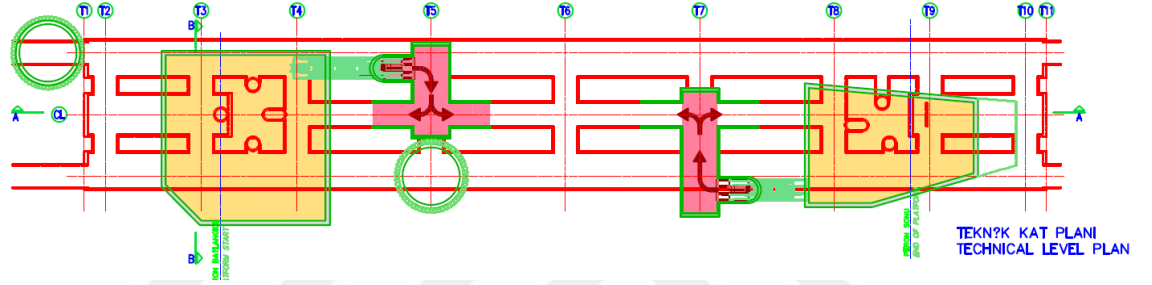
KM	MEVCUT YAPI	EK BİLGİ
38+077		Hat başlangıcı
38+683	T11 servis istasyonu / Acil kaçış 1	TBM çıkış yapısı h: 26,62m
40+536	S1 S2 S3 makasları	
41+326	T12 servis istasyonu / Acil kaçış 4	h: 27,65m
42+014	S4 S5 S6 makasları	
42+984	Arnavutköy 1 istasyonu	
44+762	T13 servis istasyonu / M11 Makası / Acil kaçış 7	TBM giriş yapısı h:27,70m
47+167	Arnavutköy 2 istasyonu	
44+762	T14 servis istasyonu / Acil kaçış 14	h: 48,64m
51+925	Bekleme makası / Acil kaçış 15	TBM lojistiği değişimi
54+050	Fenertepe istasyonu	TBM çıkış yapısı
57+231	T15 Servis istasyonu	
57+889	Kayaşehir istasyonu	
58+547	M12 Makası / Acil kaçış 17	TBM giriş yapısı h: 29,80m
60+642	T16 Servis istasyonu	
62+400	Olimpiyatköy istasyonu	Kuzey konkors TBM giriş-çıkış yapısı
63+387	T17 Servis istasyonu	
64+892	Halkalı Stadı istasyonu	
65+496	M13 Makası	
66+695	T18 Servis istasyonu	
68+553	M14 Makası	
69+092	Halkalı istasyonu	TBM çıkış yapısı

Peronlar (platformlar) yolcuların araca inip bindiği, aracı beklediği, uzunluğu ve ray üst kotundan yüksekliği kullanılan araç tipine göre belirlenen zorunlu haller dışında eğimli tasarlanması istenmeyen, aktarma noktalarında birden fazla katta bulunabilen mekanlardır (Şekil 4.2). Projede her istasyon orta peron tipinde tasarlanmıştır. Orta peron: Her iki taraftaki hatlara hizmet vermek amacıyla, ortada tek olarak tasarlanan peronlardır (DLH, 2007). Toplam uzunluğu 250 m olan istasyonlarda yolcu kullanım

alanı 180 m olarak tasarlanmış olup kalan bölge teknik ekipmanlar için ayrılmıştır (Şekil 4.3).

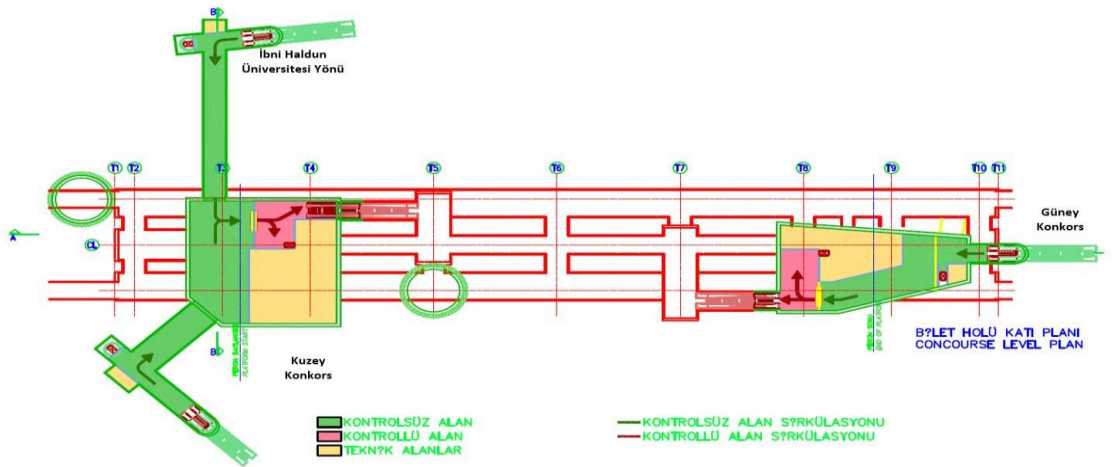


Şekil 4.2 : Fenertepe istasyonu peron kat planı.



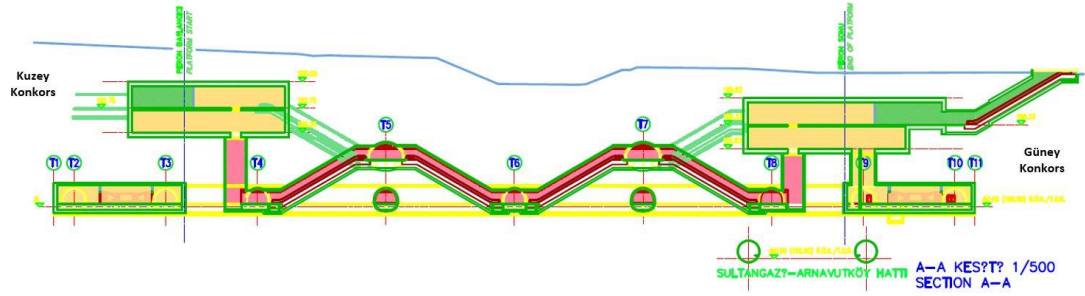
Şekil 4.3 : Fenertepe istasyonu teknik kat planı.

Bilet holleri (konkorslar) istasyonlarda yüzeye en yakın katta bulunmakta olup yolcunun turnikeler vasıtasıyla kontrolsüz (ücretsiz) alandan kontrollü (ücretli) alana geçişini, bilgi almasını, bilet makinelerine ulaşmasını ve telefonlarını kullanabilmesini sağlayarak istasyonun yolcu giriş-çıkış bölgelerini oluşturmaktadır (Şekil 4.4).

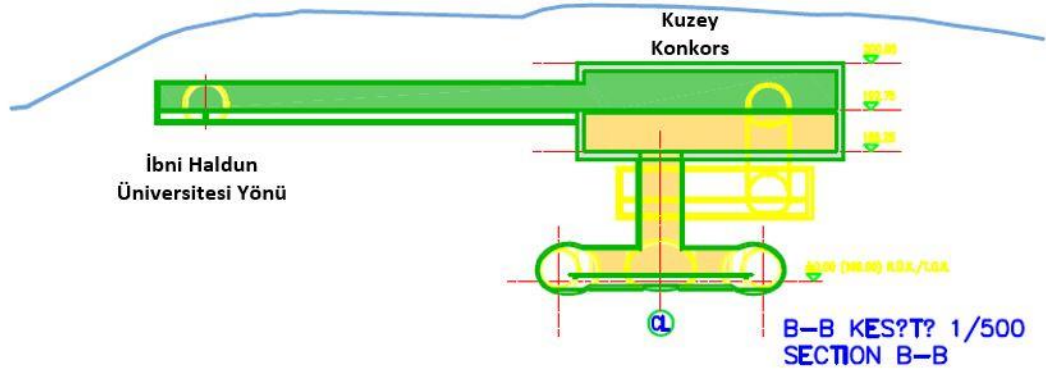


Şekil 4.4 : Fenertepe istasyonu bilet holü kat planı.

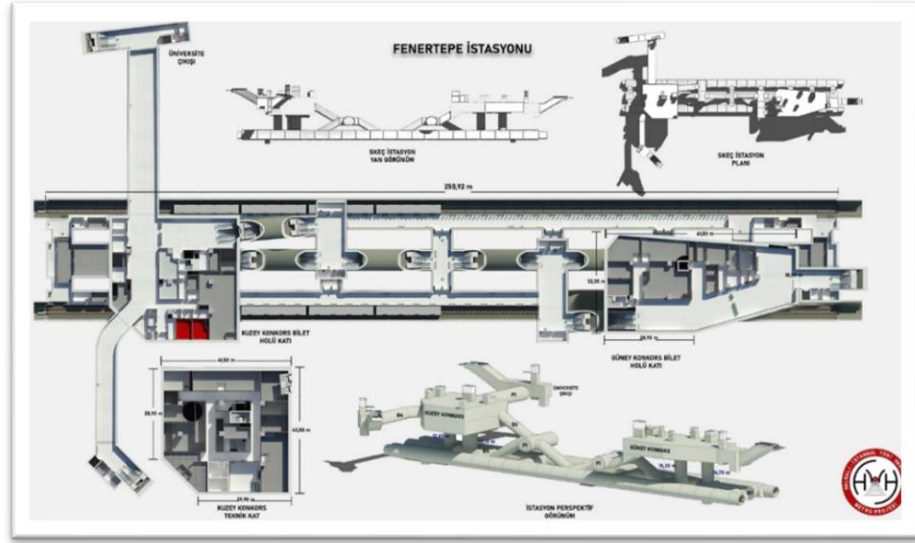
Yer altı metro istasyonlarına erişim için en az bir, tercihen iki adet giriş/çıkış ve bir adet de dışarı açılan acil çıkış kapısı bulunmalıdır (TS 12127, 1997). Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 projedeki istasyon tasarımlarına örnek oluşturması adına fenertepe istasyonuna ait kesit ve üç boyut görüntüleri paylaşılmıştır.



Şekil 4.5 : Fenertepe istasyon kesiti.



Şekil 4.6 : Fenertepe istasyonu kuzey konkors kesiti.



Şekil 4.7 : Fenertepe istasyonu üç boyutlu görüntüsü.

4.2. Proje Hattındaki Geoteknik Uygulamalar

Hatta boyunca ayrıca çok sayıda makas, servis istasyonu ve acil kaçış shaftı inşa edilmektedir. Hat tünellerinin genel olarak TBM, sınırlı olarak da NATM ile açılması, istasyon, makas ve bağlantı tünellerinin ise ağırlıklı olarak NATM ile delme tünel şeklinde, kısmen de aç-kapa şeklinde inşa edilmeleri planlanmıştır. Kazısı TBM ile açılacak tünellerin kesitleri tam dairesel, istasyon, makas, bağlantı ve ara geçiş gibi tüneller ile kazısı NATM ile planlanan diğer tünel kısımları ise genellikle at nalı şeklinde ancak değişik tip, çap ve kesitlere sahiptir.

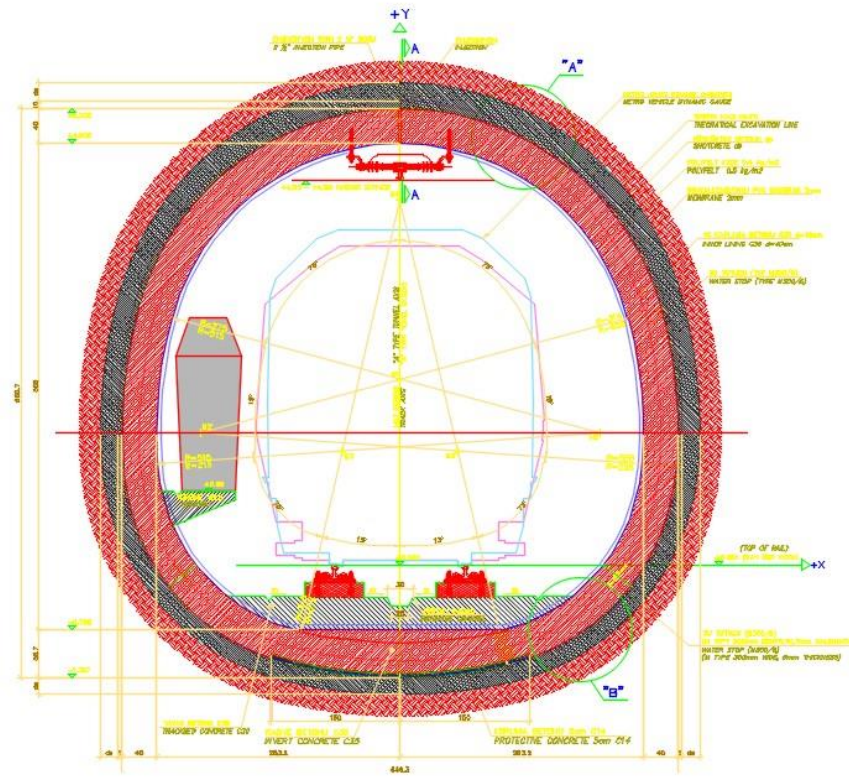
Tablo 4.3 ve Tablo 4.4 ‘de hattaki tünel kesitlerine ait alan ve boyut bilgileri verilmiştir. Tünel kesitlerine ait çizimler ise Şekil 4.8 ‘den Şekil 4.16 ‘a kadar sıralanmaktadır.

Tablo 4.3 : HYH Metro Hattı tünel tipleri boyutları.

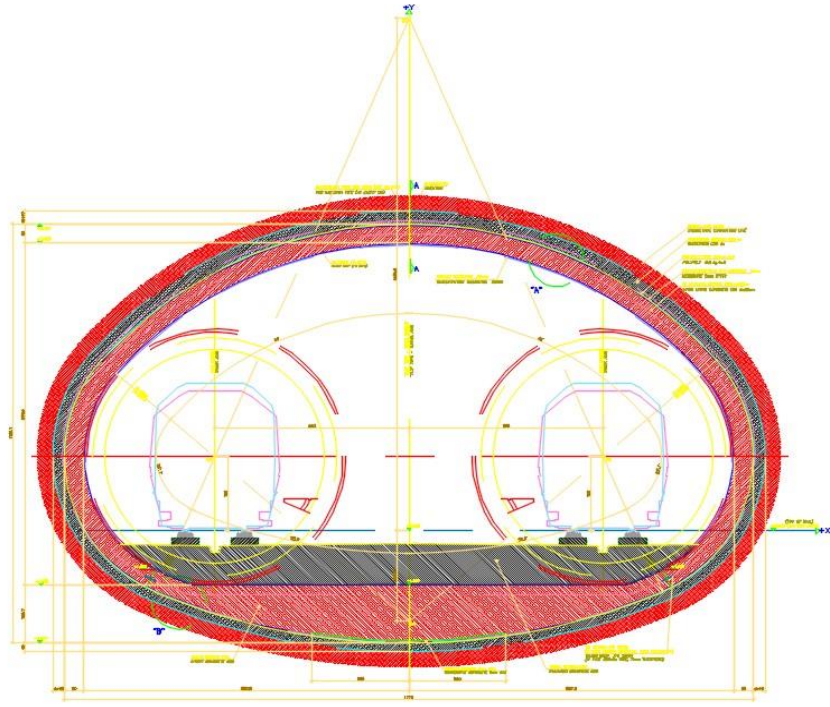
Tünel Tipi	Genişlik-m		Yükseklik-m	
		(Gabari)	(Gabari)	Tünel Kesiti
TBM Tüneli	TBM	6,30	6,30	Dairesel
NATM Tüneli	A	6,16	6,31	At nalı
Peron Tüneli	P	9,24	6,74	At nalı
Makas Tüneli	T	17,95	11,97	At nalı
Ara geçiş (Cross Passage) Tüneli	CP	6,00	4,73	At nalı

Tablo 4.4 : HYH Metro Hattı tünel tipleri kesit alanları.

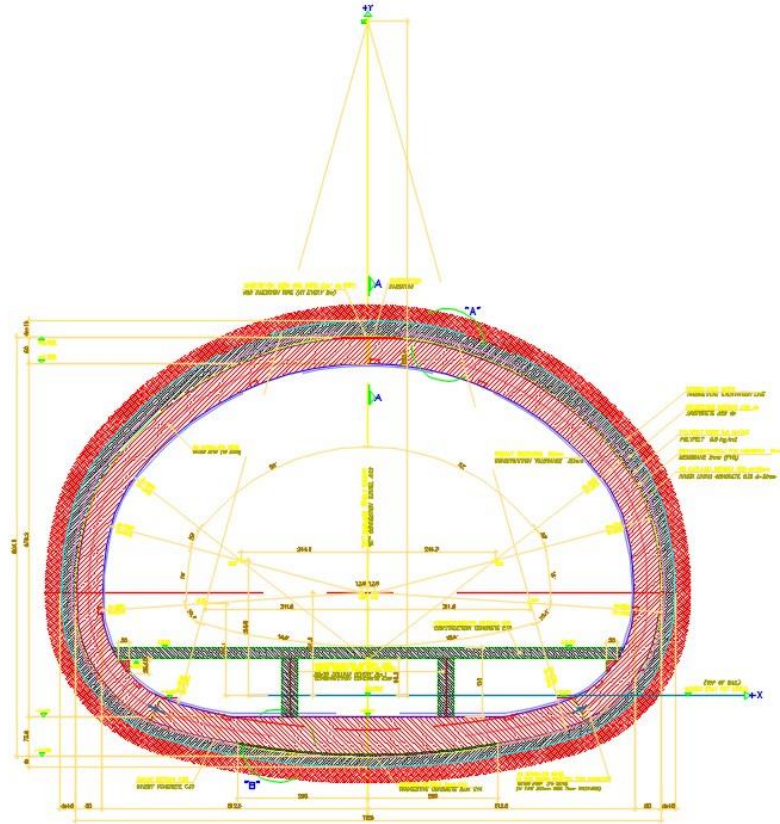
TÜNEL TİPLERİ	İÇ KESİT ALANI (m ²)	DIŞ KESİT ALANI (m ²)
TBM Tünel	25,52	31,17
Hat Tüneli (A)	26,58	34,72
Makas Tüneli (T 1.2)	153,67	123,92
Peron Tüneli (P)	52,51	64,47
Bağlantı Tüneli (B7)	73,32	57,61
Merdiven Tüneli (B6)	29,07	38,46
Merdiven Tüneli (B4)	29,07	37,62
Bağlantı Tüneli (B2)	12,66	18,41



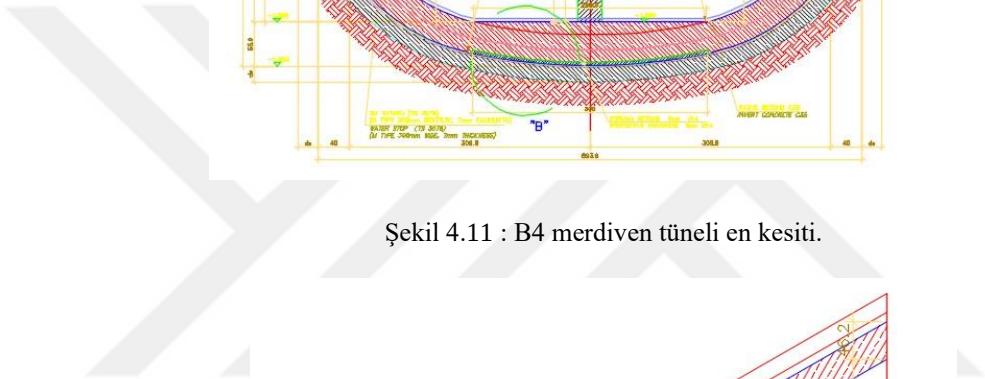
Şekil 4.8 : Hat tüneli en kesiti.



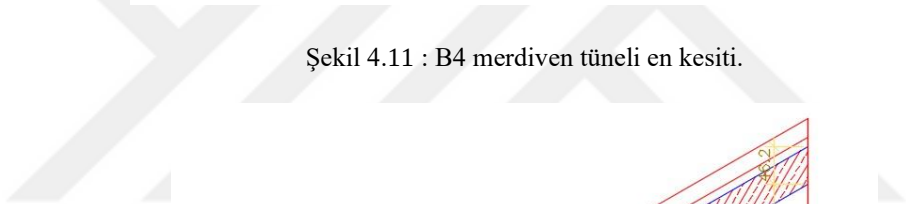
Şekil 4.9 : Makas tüneli en kesiti.



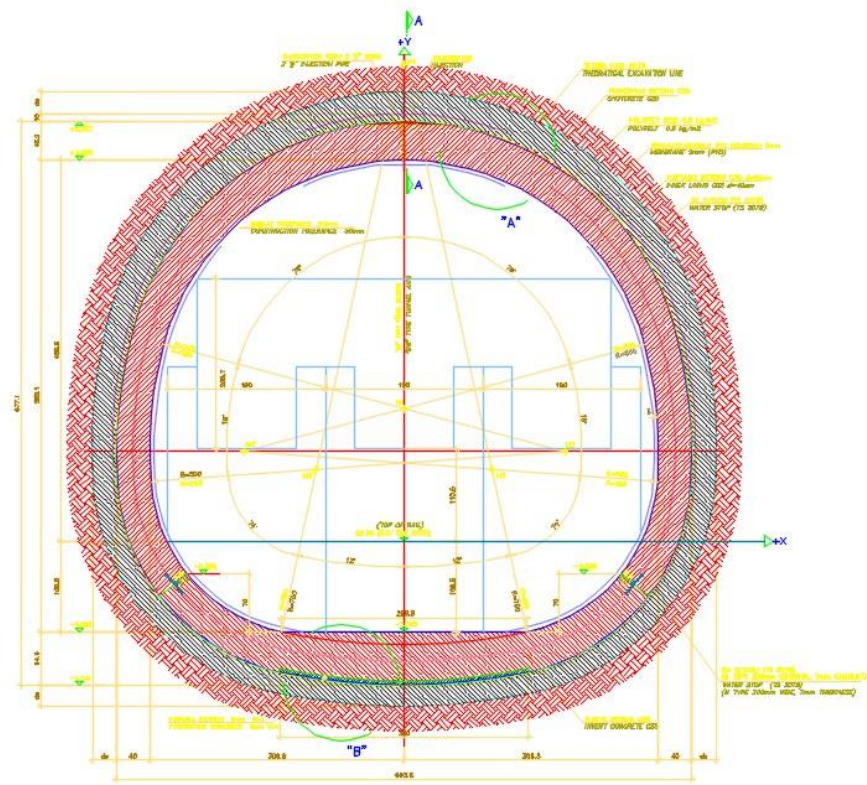
Şekil 4.10 : B7 bağlantı tüneli en kesiti.



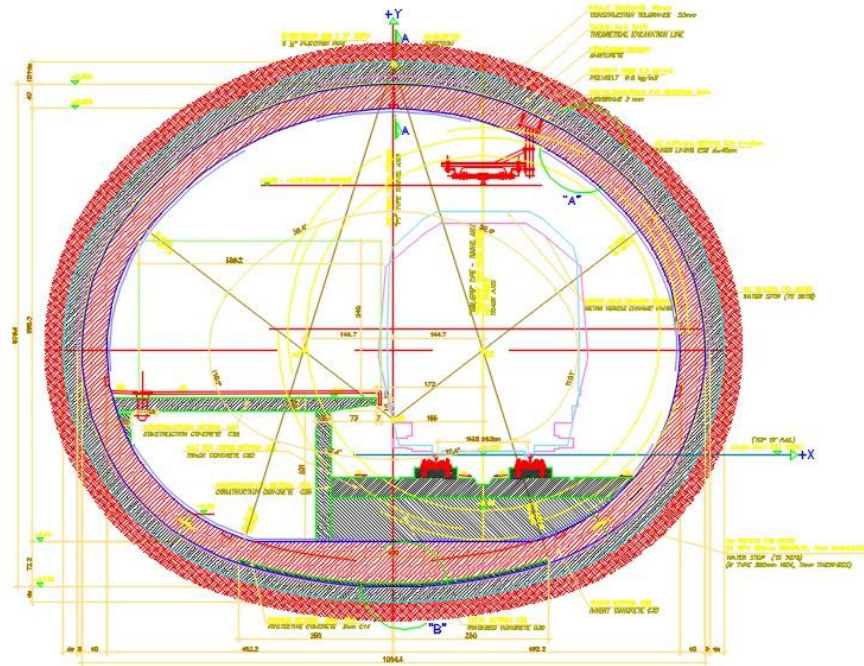
Şekil 4.11 : B4 merdiven tüneli e



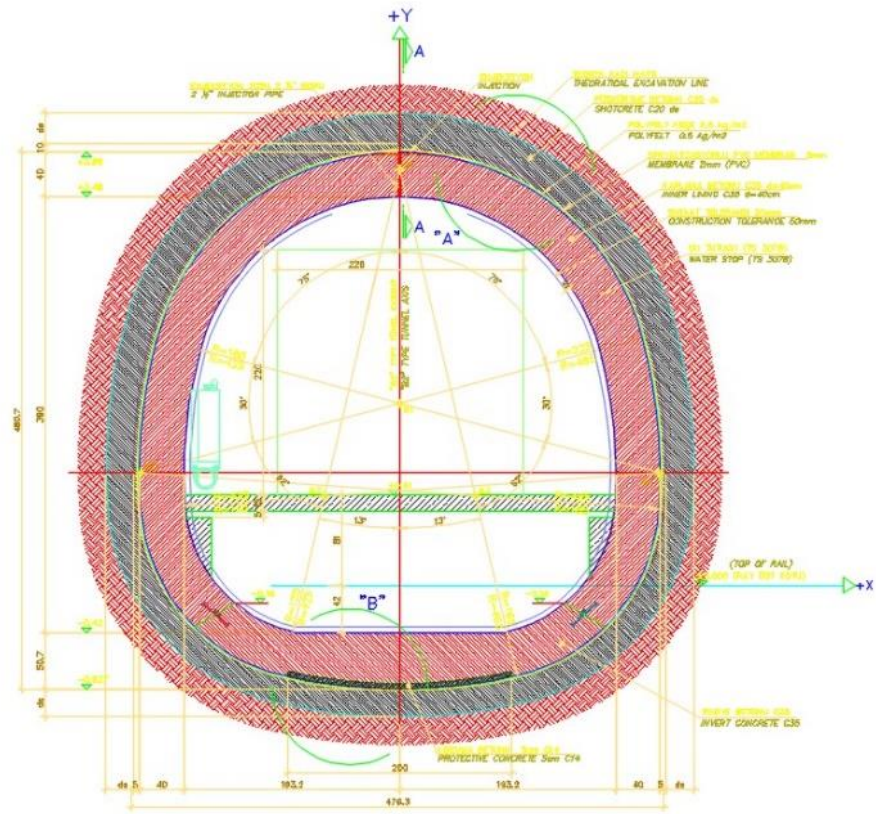
Şekil 4.12 : Merdiven tünelleri boy kesiti.



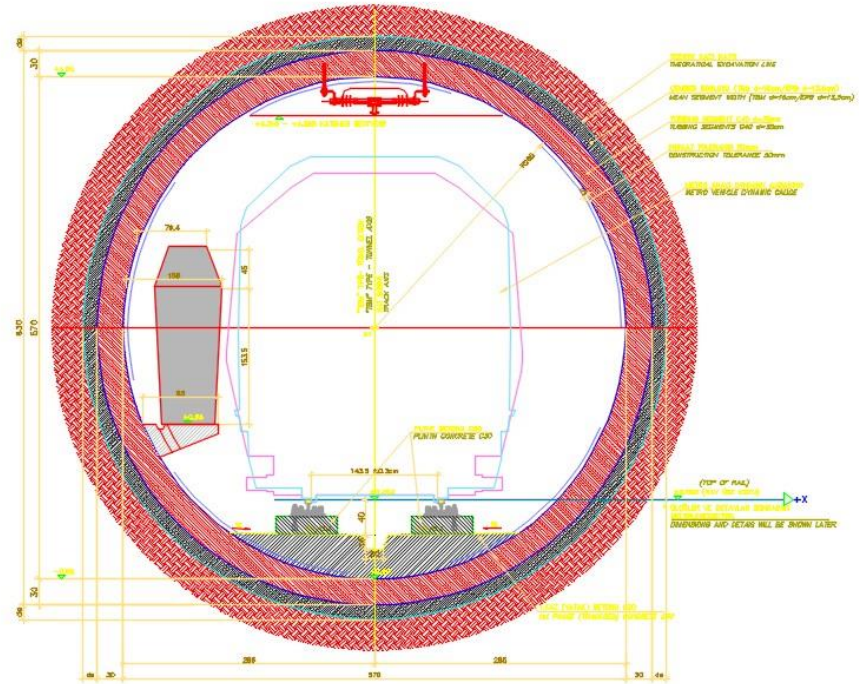
Şekil 4.13 : B6 merdiven tüneli en kesiti.



Şekil 4.14 : Peron tüneli en kesiti.



Şekil 4.15 : B2 bağlantı tüneli.



Şekil 4.16 : TBM tüneli.

4.2.1. Proje hattındaki NATM uygulamaları

Projede NATM makas tünelleri, bağlantı tünelleri, merdiven tünelleri, ara kat tünelleri, asansör tünelleri, peron tünelleri, yaklaşım tünelleri, ara geçiş tünelleri ve elektrik-makine şaft tünelleri olmak üzere değişik kullanım amaçlarına sahip birçok konumda ve çeşitli kesitlerde uygulanmaktadır.

Projede bulunan 7 adet istasyonun (Halkalı, Arnavutköy 1, Arnavutköy 2, Halkalı Stadı, Fenertepe, Kayaşehir, Olimpiyatköy) meydana getirdiği alanlar peron tünellerini oluşturmaktadır. İstasyonlarda hatlar arası geçişi sağlamak amacıyla bağlantı tünelleri, yolcuların yüzeye ulaştırılması için asansör ve merdiven tünelleri, iki kattan oluşan istasyonlarda sahanlık görevi gören ara kat tünelleri ve elektrik-makine şaft tünelleri bulunmaktadır. Elektrik-makine şaft tünelleri istasyonlarda yolcu kullanım alanı dışında kalan bölgelerdedir. Şafttan hat tünellerine geçiş yaklaşım tünelleri ile sağlanmaktadır.

NATM tünellerinde kazı işlemi hidrolik kırıcılar vasıtasıyla ve RMR değeri 80 'den fazla olan kayalarda ise patlayıcı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Üstyarıda patlayıcılar içten dışa, altyarıda ise önden arkaya doğru takip edilen sıra ile kullanılmaktadır. Makas tüneli, peron tüneli gibi büyük kesitli tünellerde RMR değeri düşük kayalarda ise kazı ayna düzleminde aşamalı olarak yapılmaktadır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 : Aşamalı NATM kazısı.

NATM tünellerinde geçici tahkimat yaklaşık 1 m uzunluğunda iksalardan oluşturulmaktadır. İksalarda püskürtme beton (C20 veya C25), elik hasır (B500C), kafes kiriş (donatıları B420C), 4 metre veya 6 metre uzunluğunda sayısı zemin tipine göre farklılık gösteren kaya bulonları kullanılmaktadır. İmalat aşamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Hidrolik kırıcı ile kazısı tamamlanan tünele püskürtme beton atılır.
2. Birinci sıra hasır elik ring yönünde minimum 50 cm, boyuna yönde minimum 30 cm bindirme boyunu sağlayak şekilde yerleştirilir (şekil 4.18).
3. Daha önce imal edilen kafes kirişler 1 m ara ile yerleştirilir.
4. Kafes kiriş yüzeyine kadar püskürtme beton uygulanır.
5. İkinci sıra hasır elik yerleştirilir.
6. Püskürtme beton kalınlığı projeye uygun kalınlığa tamamlanır.
7. Delgi makinesi ile yerleri hazırlanan kaya bulonlar bulon enjeksiyonu yardımıyla yerlerine sabitlenir.
8. Bir sonraki kademe için projede var ise 2 in kalınlığında 4 m uzunluğunda süren (şekil 4.19), 4 in kalınlığında 9 m uzunluğunda şemsiye boruları (umbrella) akılır.



şekil 4.18 : Üst yarı geçici tahkimat donatısı imalatı.

Enjeksiyonlama işlemi delgi içerisine biri kısa diğeri delgi uzunluğunda iki boru yardımıyla gerçekleştirilir. Yukarı eğimli delgilerde harç kısa boruyla doldurularak uzun borudan harcın geri gelmesiyle işlem tamamlanır. Aşağı eğimli delgilerde ise uzun borudan harç doldurularak kısa borudan harcın geri gelmesi durumunda işlem tamamlanır. Bu sistem sayesinde delgilerin enjeksiyon harcı ile tamamen dolduğu teyit edilmiş olur. Bulon enjeksiyonu %37 su oranına sahiptir. Somunlar bulonda 5 tonluk kuvvet oluşturacak şekilde kalibre edilmiş tork anahtarı ile sıkılmaktadır. Kaya bulonları (Şekil 4.20) torklama işlemi enjeksiyon priz aldıktan sonra (12 – 24 saat) yapılmaktadır. Tünel kazılarında en yüksek basınç aynanın 7 m gerisinde olduğundan bulonsuz 6 adetten fazla iksa uygulaması yapılmasına izin verilmemektedir.

Süren veya şemsiye borularının hangisinin kullanılacağı adetleri zemin durumuna göre belirlenen kaya destek sınıflarına (A3 , A5 vb.) göre farklılık göstermekle birlikte amaçları zeminde akma olmasını engelleyerek güvenli bir çalışma ortamı sağlamaktır. Bindirmelerinin çalışabilmesi için sürenler iki iksada bir uygulanmaktadır. Zeminin jeolojik şartlarına göre tünel aynasında da bulonlama işlemi veya püskürtme beton uygulaması yapılabilmektedir. Bulonlama işleminden sonra alt yarı kazısına başlamadan önce üst yarıda 10 m aralıklı 2 Bar basınç ile kontak enjeksiyonu uygulanmaktadır. Alt yarıda kontak enjeksiyonu imalatı yapılmamaktadır. %67 su oranına sahip olan kontak enjeksiyonu püskürtme beton arkasında kalan boşlukların doldurulmasını amaçlamaktadır.



Şekil 4.19 : Süren ve tünel tahkimat donatıları.



Şekil 4.20 : Kaya bulonları.

Tünelde geçici tahkimat imalatı tamamlandıktan sonra iksaya ring yönünde 3 adet olmak üzere (Peron, makas tünelleri gibi büyük kesitlerde sayı artmaktadır.) 10 m aralıkla reflektörler yerleştirilir (Şekil 4.21). Reflektörlerin (Şekil 4.22) amacı kalıcı kaplama yapılana kadar tünel içi deformasyonların takibini deformasyonlara bağlı olarak değişen zaman aralıklarında elde edilmesini sağlamaktır.



Şekil 4.21 : NATM tüneline reflektör yerleşimi.



Şekil 4.22 : Reflektör.

Betonarme kalıcı kaplama yapılmadan önce tünel içine izolasyon uygulaması yapılmaktadır (Şekil 4.23). Altyarıda (invert) izolasyon uygulaması sırasıyla keçe, sinyal tabaklı PVC membran, keçe ve koruma betonu şekilde iken üstyarıda (kemer) keçe ve sinyal tabakalı PVC (Poly Vinil Klorür) membran sıralamasındadır. Membran bindirme bölgelerinde monometrelerle hava kontrolü yapılarak izolasyon uygulaması denetlenmektedir.



Şekil 4.23 : İnvirt izolasyon imalatı.

Altyarıda koruma betonu üzerine donatı bağlanarak betonlama yapılmaktadır (Şekil 4.24). NATM tünelleri invert anoları kurplarda ve makas tünellerinde 6 metrelik anolar

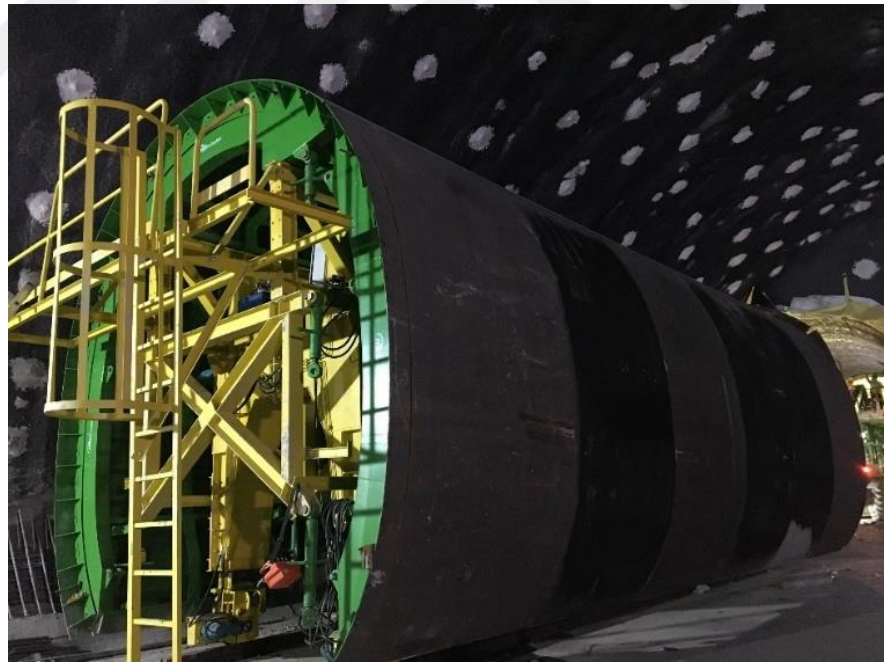
halinde (Şekil 4.25) alivmanlarda ise 12 metrelik anolar halinde (Şekil 4.26) imal edilmektedir. İskeleler kurularak donatıları yerleştirilen anoların betonlama işlemi tünel kesitlerine özel olarak imal edilen 6 m veya 12 m uzunluğundaki çelik kalıplar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. 12 metrelik anolara 84 m^3 , 6 metrelik anolara ise 46 m^3 beton dökülmektedir. Ano kalıpları betonlama işleminden ortalama 11 saat sonra sökülmeştir.



Şekil 4.24 : İnvirt donatı imalatı.



Şekil 4.25 : İzolasyon, donatı imalatı tamamlanan makas tüneline kalıcı kaplama için kemer kalıbın yerleştirilmesi.



Şekil 4.26 : NATM tünelleri için kalıcı kaplama kemer kalıbı.

İstasyonlarda peron tünellerini dik kesen Hat 1 ve Hat 2 arası bağlantı tünelleri bulunmaktadır. Peron seviyesindeki bu bağlantı tünelleri ile merdiven tünelleri arasında

sahanlık görevi gören alanda nihai beton kaplama imalatı ahşap kalıp ile yapılmaktadır (Şekil 4.27). Standart kesitlere uymayan bu bölge için kalıp üretimi yapılmamıştır.



Şekil 4.27 : Ahşap kalıp imalatı.

Şekil 4.28’de makas tüneli kemerinin nihai kaplama donatı imalatı için kurulan iskele ve sahada çimentodan üretilerek donatılara yerleştirilen pas payları görülmektedir. Kemer donatıları invert imalatı sırasında bırakılan donatı filizleri ile birleştirilerek tünelin oluşan ano boyunca birlikte çalışması sağlanmaktadır.



Şekil 4.28 : Kemer donatı imalatı.

Anolar arasında, kemer invert birleşim bölgelerinde ve invert, kemer, iki anonun birleşim bölgelerinde su sızdırmazlığı sağlamak amacıyla su tutucu bantlar kullanılmaktadır (Şekil 4.29).



Şekil 4.29 : Su tutucu bantlar.

Şekil 4.30’de nihai kaplaması tamamlanmış makas tüneli görülmektedir. İmalatı NATM ile gerçekleştirilen A tüneli depo portal yapısına ulaşımı sağlamaktadır. Hat-1 ve Hat-2’den araçların depo portal yapısına ulaşması için ileri ve geri yönde üçer adet olmak üzere S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 şeklinde isimlendirilen toplam altı adet makas tüneli oluşturulmuştur.



Şekil 4.30 : A tüneli (sağdaki) ve ana hat tüneli (soldaki) kesitleri.

Aç-kapa yapısına çıkışlarının Şekil 4.31’de görüldüğü tünel kesitleri NATM imalatının geçici tahkimat ve kalıcı kaplama olmak üzere iki farklı aşamasındadır.



Şekil 4.31 : Geçici tahkimat imalatı (sağdaki) ve kalıcı kaplama imalatı (soldaki) tamamlanmış tünel kesitleri.

4.2.2. Proje hattındaki TBM uygulamaları

Projede araç güzergâhını oluşturan ana hat tünelleri (Hat1 ve Hat2) TBM ile imal edilmektedir. Yaklaşık 60 km uzunluğundaki TBM tünellerinin imalatı fiili olarak 6 farklı TBM ile gerçekleştirilecek olup hat dört faza ayrılarak süreç yönetilmektedir (Şekil 4.32).



Şekil 4.32 : TBM güzergahları.

Tablo 4.5 : TBM imalat detayları.

TBM		Başlangıç Noktası	Bitiş Noktası	Mesafe	Hat Güzergâhı
		T13	Servis T11	Servis	Hat 1 Havalimanı
S50	Faz 1	İstasyonu	İstasyonu	6171 M	(Geri Yön)
		T13	Servis T11	Servis	Hat 2 Havalimanı
S51	Faz 1	İstasyonu	İstasyonu	6172 M	(Geri Yön)
		T13	Servis Fenertepe		Hat 1 Halkalı (İleri
S1081	Faz 2	İstasyonu	İstasyonu	8648 M	Yön)
		T13	Servis Fenertepe		Hat 2 Halkalı (İleri
S1083	Faz 2	İstasyonu	İstasyonu	8648 M	Yön)
			Fenertepe		Hat 1 Havalimanı
S1141	Faz 3	M12 Makası	İstasyonu	4497 M	(Geri Yön)
			Fenertepe		Hat 2 Havalimanı
S1034	Faz	M12 Makası	İstasyonu	4497 M	(Geri Yön)
			Olimpiyatköy		Hat 1 Halkalı (İleri
S1034	Faz 3	M12 Makası	İstasyonu	3853 M	Yön)
			Olimpiyatköy		Hat 2 Halkalı (İleri
S1141	Faz 3	M12 Makası	İstasyonu	3853 M	Yön)
		Olimpiyatköy	Halkalı		Hat 1 Halkalı (İleri
S50	Faz 4	İstasyonu	İstasyonu	5532 M	Yön)
		Olimpiyatköy	Halkalı		Hat 2 Halkalı (İleri
S51	Faz 4	İstasyonu	İstasyonu	5532 M	Yön)

Her faz için imalat detayları Tablo 4.5’de yer almaktadır. Ek olarak T13 servis istasyonundan girerek Fenertepe istasyonundan çıkacak olan S1081 ve S1141 TBM ‘lerinin kazı yapacakları uzunluk (yaklaşık 8.50 km) hem TBM hem de hat üzerinde yapılacak diğer imalatlar adına verimi düşüren bir mesafe olduğundan bu TBM’lerin destek elemanları hattın 51+925 km’sinde bulunan bekleme makasına taşınarak gerekli çözüm üretilmiştir. TBM stabil durumlarda yaklaşık olarak saate bir ring ve bir kazı imalatı gerçekleştirmektedir. Bu durum minimum 6 segment taşı ve bir ring için gerekli enjeksiyon harcı ile makinenin saat başı beslenmesi anlamına gelmektedir. Hat üzerinde çeşitli imalatların devam ettiği tek aracın manevra alanı bulunmadan ileri veya geri hareket edebildiği TBM’i besleyen bu güzergâhın uzunluğu TBM’nin sökölüp kurulması sürecinin zaman ve maliyet hesabının karşılaştırılmasının optimizasyonu sonucu belirlenmektedir. TBM giriş-çıkış yapılarının konum ve alanlarının uygunluğu,

hattın toplam uzunluğu, kullanılacak makine sayısı diğer etkenler arasında sayılabilir. Projede kullanılan TBM'lere ait genel bilgiler Tablo 4.6'de paylaşılmıştır.

Tablo 4.6 : Projede kullanılan TBM çeşitleri ve özellikleri.

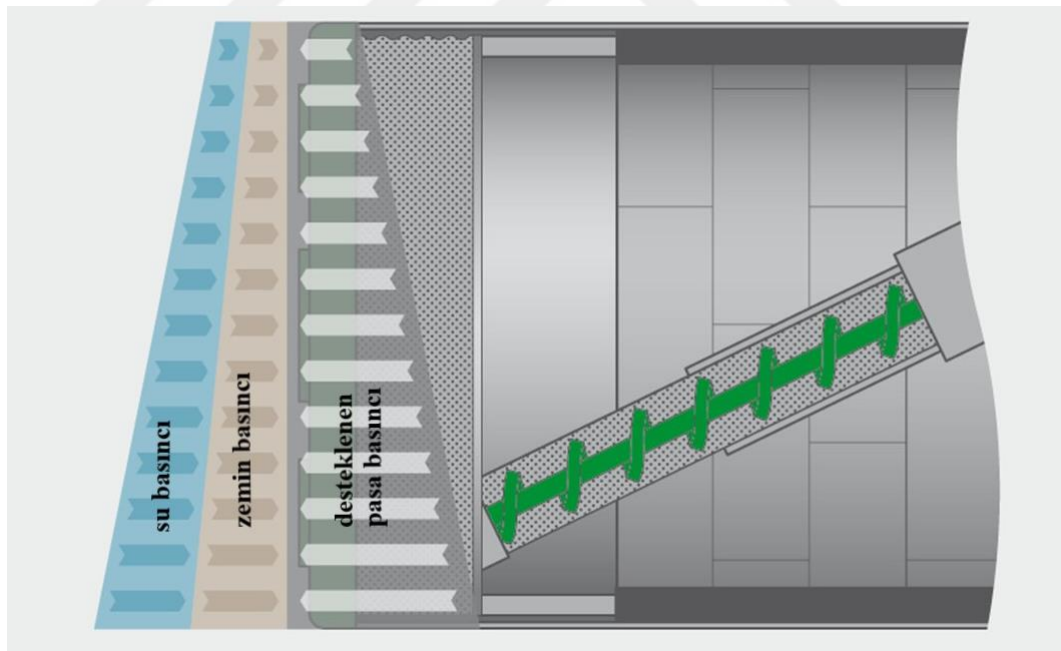
Açıklama	Herrenknecht	Terratec
Menşei	Almanya	Avustralya/Çin
Tipi	EPB	EPB
Zemin Destek Basınç (bar)	4	4
Kesici Kafa Kazı Çapı (mm)	6.570	6.560
Kesici Kafa Azami Devir Sayısı (RPM)	4.50	3.00
Kesici Disk Adedi	32	38
Kesici Kafa Maks. Tork (kNm)	5.537	5.440
Kesici Kafa Gücü (Kw)	1.200	960
Azami İtme Kuvveti (kN)	51.090	40.000



Şekil 4.33 : TBM kesici kafa ve kalkanı.

TBM'ler kazıyı kesici kafada yer alan kesme bıçakları ve kesici diskler vasıtasıyla gerçekleştirmektedir (Şekil 4.33). Kesici kafada bulunan boşluklar yardımıyla kazılan zemin kazı bölgesine aktarılmaktadır. İlerleme silindirlerinin gücü basınç bölmesi

aracılığıyla kazılan malzemeye (pasaya) aktararak zeminin aynadan kazı bölgesine kontrol dışı sızması önlenmektedir. EPB TBM'ler (Pasa Basıncılı Tünel Açma Makinesi) zeminde göçme ve kabarmaları, su basıncını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunu kapalı bir hacme dönüştürerek basınç altında tutar (Şekil 4.34). Amaç pasanın kesici kafa haznesini (kazı bölgesi) doldurması ve tüm yüzeyi desteklemesidir. Kazı sırasında arazi basıncının artması ve pasa basıncının arazi basıncını dengeleyememesi durumunda yüzeyde göçmeler meydana gelirken arazi basıncının azalması ve pasa basıncının arazi basıncından fazla olması durumunda yüzeyde kabarmalar oluşur. Her iki durumunda engellenmesi amacıyla kesici kafa haznesinden pasa çıkışı helezon yardımıyla kontrollü biçimde yapılmaktadır. Helezonun devir sayısı, kazı bölgesindeki taşıma hacmini belirleyerek pasa basıncının ayarlanmasını sağlamaktadır. Ayrıca pasa basıncını ilerleme hızı ile düzenlemek de mümkündür. İlerleme hızının düşürülmesi zemin basıncının azalmasına neden olurken ilerleme hızının yükseltilmesi zemin basıncının artmasında etkili olmaktadır. Amaç zemin basıncını ilerleme esnasında sabit tutmaktır.

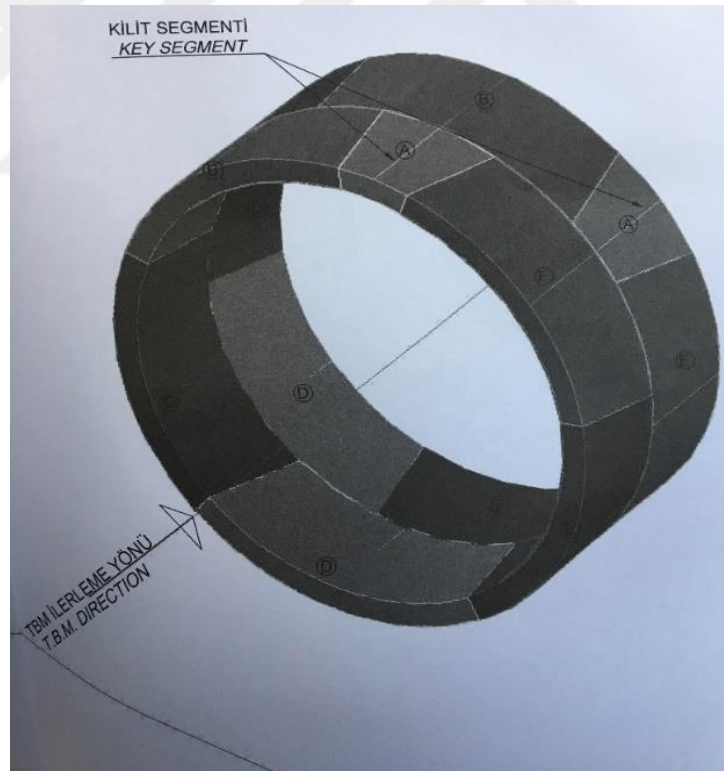


Şekil 4.34 : TBM çalışma prensibi şematik gösterimi (Herrenknecht, 2017).

Aynada gevşemiş olan toprağın destekleme aracı olarak kullanılabilmesi için plastik olarak iyi şekillenebilmesi, düşük iç sürtünme ve düşük oranda su geçirme niteliğine sahip olması gerekmektedir. Bu nitelikler prensipte bir zeminde başlamadan önce de

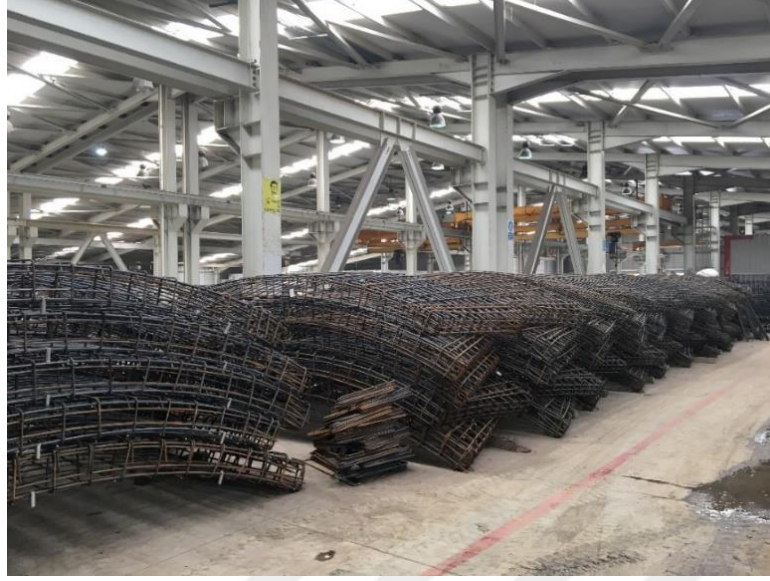
kazmaya başladıktan sonra da tamamen mevcut olmamaktadır. Bu sebeble kazılan malzemenin helezon çıkışından taşıma bandına teslimatının savak içermeyecek şekilde yapılabilmesi ve helezonun içinde bir akım oluşmaması için kimsayal maddeler ilave edilerek şartlandırılması gerekebilir. Zemin şartlandırması adı verilen bu işlem kayalarda toz engelleme, kesicilerin aşınması önleme gibi nedenlerle kullanılırken yumuşak zeminlerde kazılan malzemenin davranışını kontrol etmek amacıyla uygulanmaktadır.

Tünelin kaplanması prefabrik beton segmentlerden oluşturulmaktadır. Kalkan alanında basınç duvarının arkasında atmosferik basınç altında segment erektörü 360° dönebilen vakum sistemi ile segmenti kaldırarak monte edileceği konuma getirmekte ve montajı gerçekleştirilmektedir. Projede kullanılan segmentlerin dış çapı 6.3 m olup iç çapı 5.7 metredir. Uzunlukları 1.5 m olan segmentler 30 cm kalınlığındadır. Bir ring 5 + 1 şeklinde toplam 6 segmentten oluşturulmaktadır (Şekil 4.35).



Şekil 4.35 : Segmentlerin diziliş şeması.

Şekil 4.36 ve Şekil 4.37 segmetin fabrikada üretim aşamalarını göstermektedir. Fabrikadan sahaya ulaştırılan segment Şekil 4.40'da verilen aşamalardan geçerek tünele indirilmektedir.



Şekil 4.36 : Segment donatıları.



Şekil 4.37 : Segmentin kalıbından çıkarılması.

Bu segmentler A, B, C, D, E, ve F şeklinde isimlendirilmektedir. ‘D’ en büyük boyuta sahip segmenttir. ‘A’ ise kilit segmenttir (Şekil 4.38). Segmentler arasındaki milimetrik farklar ve segmentlerle oluşturulan çeşitli kombinasyonlar sayesinde makideki yatayda 1.80 m hareket alanına sahip itme silindirleri kullanılarak TBM yönlendirilmektedir (Şekil 4.39). Şekil 4.41’de Herrenknecht segment pozisyonları örnek olarak paylaşılmıştır. Bir ringin oluşturulmasına ‘D’ segmenti ile başlanarak en

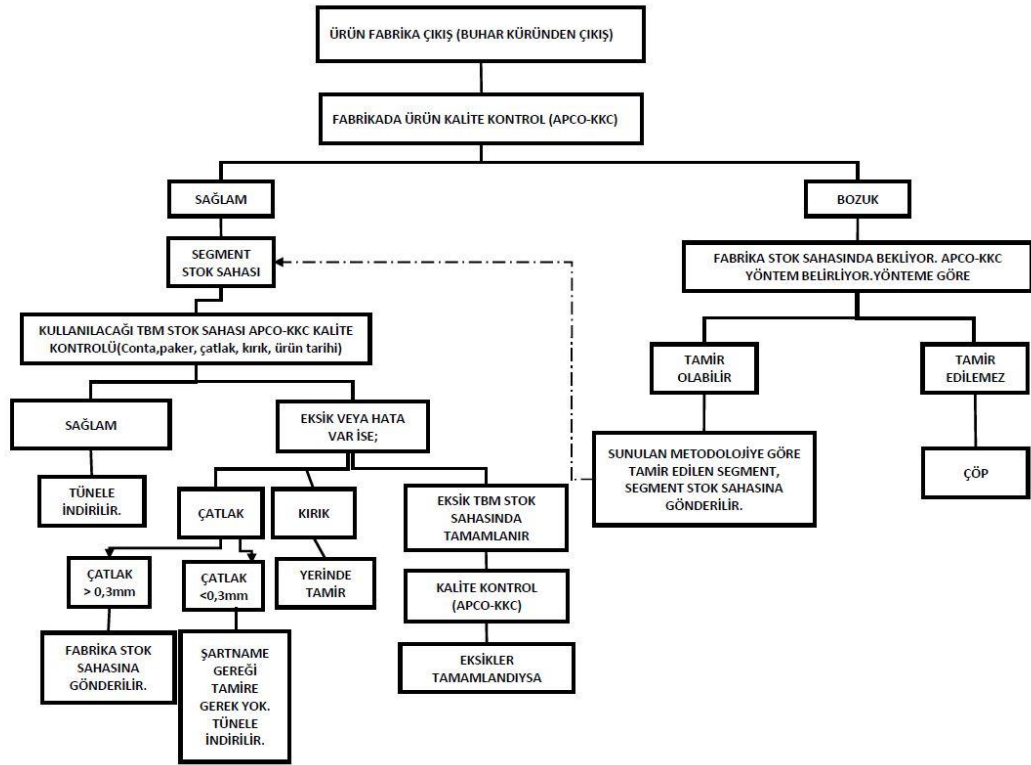
son ‘A’ kilit segmenti yerleştirilmektedir. İki ringin birleşimi segmentlerde toplam 16 adet bulunan pimlerin yardımıyla sağlanmaktadır.



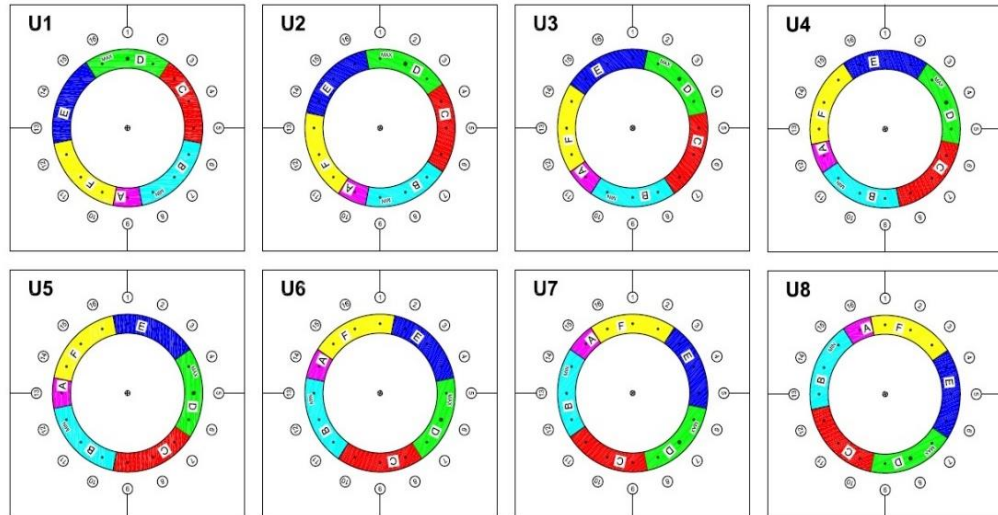
şekil 4.38 : Kilit segment (A) kalıbı.



şekil 4.39 : Segmentlerin yerine yerleştirilmesi.



Şekil 4.40 : Segmentlerin akış şeması.



Şekil 4.41 : Herrenknecht segment pozisyonları (Herrenknecht, 2017).

Şekil 4.41’da pozisyon örnekleri verilen segmentlerin dış tarafı ve kazı çapı arasındaki aralıklar enjeksiyon delikleri oluşturularak harç ile doldurulur. Tünel kaplaması ile zemin arasındaki boşlukların kapatılarak yeraltı suyunun ilerlemesinin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. TBM’lere Şekil 4.42’de görüldüğü gibi imalat sahasına istiflenmiş segmentler ve enjeksiyon nakliyatı MSV (Çok Amaçlı Tünel Servis Aracı)

kullanılarak yapılmaktadır. 22 metre uzunluğundaki MSV'ler kendi ağırlığı ile birlikte 40 ton yük taşıma kapasitesine sahiptir ve beraberinde segment ve enjeksiyon nakliyatı yapabilmektedir. MSV üzerinde TBM'e getirilen segmentler, segment vinci yardımı ile besleme hattı üzerine indirilmektedir.

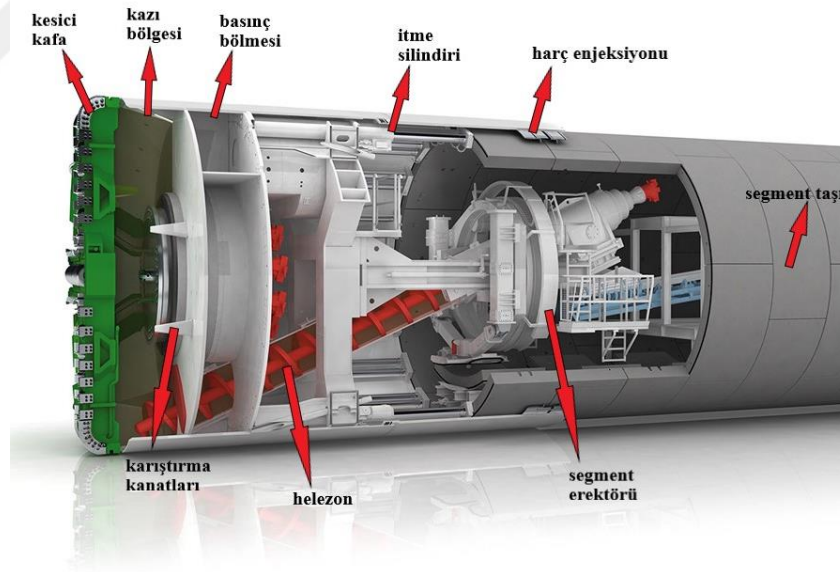


Şekil 4.42 : İmalat sahasında istiflenen segmentler.

TBM ile birlikte giriş yapısından çıkış yapısına kadar ilerleyen destek elemanları mevcuttur. Bunlar 34 500 volt OG (Orta Gerilim) kablosu, pasanın tünel içinden dışarıya aktarımını sağlayan konveyör bant sistemi (Şekil 4.43), drenaj hattı, makine soğutma suyu ve fan tüp olarak sıralanabilir. Ayrıca Şekil 4.44'de yukarıda bahsedilen TBM bileşenlerinin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.43 : Konveyör bant sistemi.



Şekil 4.44 : TBM bileşenleri (Herrenknecht, 2017).

Segment imalatı tamamlanan bölgelerde belli aralıklarla kontak enjeksiyon imalatı uygulanmaktadır. TBM ile uygulanan enjeksiyona göre daha sıvı olan kontak enjeksiyonu (%67 su oranına sahiptir.) tünel kaplaması ile zemin arasında kalan görelî olarak daha küçük boşluklarında doldurulmasını amaçlamaktadır.



Şekil 4.45 : Segment döşemesi ve faz beton imatları tamamlanmış tünel.

Tünel içinde segmentler üzerine rayların monte edilebilmesi için düz bir yüzey oluşturmak amacıyla faz 1 betonu (C14-C16) üzerine fiber donatılı faz 2 betonu (C30-C35) üzerine 4,25 m uzunluğunda imal edilen prekast ray altı betonu (slap track) imatları gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.45’de segment döşemesi ve faz betonları imalatı tamamlanmış tünel görülmektedir. TBM tünellerinde bulunan kablo kanallarında prekast olarak imal edilmekte olup kablo kanallarının üstü acil durumlarda yürüme yolu olarak tasarlanmıştır (Şekil 4.46). Ek olarak peron tünellerinde TBM geçiş yapabilmesi için yamuk kesitli topuk betonları imal edilmektedir.



Şekil 4.46 : Yürüme yolu, ray altı betonu imalatları tamamlanmış tünel.

Zeminde yer alan karstik boşluklar., zon geçişleri ve YASS (Yeraltı Su Seviyesi). Karstik boşluklar TBM altında bulunursa makinenin göçmesine, TBM üstünde bulunursa yüzeyde göcüklerle neden olmaktadır. Tünelin YASS altında bulunduğu bölgelerde tünel içinin kuru tutulabilmesi için sürekli enjeksiyon imalatları gerektirebilmektedir. Tüm bunlar TBM imalatı için büyük problemler oluşturmaktadır. Hat güzergâhı belirlenmesi için veri elde etmek adına yapılan sondajlar yardımıyla bu tür problemlerin gerçekleşebileceği bölgeler önceden belirlenerek gerekli önlemler alınmaktadır. TBM varmadan 50 m önce ve TBM geçtikten 50 m sonra yüzey ve bina oturma bulonlarından sık sık okunmalar alınarak oluşabilecek problemler adına veri elde edilmektedir.

4.2.3. Proje hattındaki aç-kapa uygulamaları

Makas yapılarının, servis istasyonlarının, istasyonlarda yolcu giriş-çıkış bölgelerini oluşturan konkors alanlarının ve inşaat şaftlarının bazılarında aç-kapa yöntemi kullanılmıştır. İmalat öncesinde kazı alanında yer alan doğalgaz, elektrik, su gibi hatlar kazı alanı dışına taşınarak deplase edilmektedir. Kazılacak alanın kazı öncesinde iksa önlemlerinin alınması prensibi ile ilerlenen yöntemde ilk olarak arazi yüzeyinden kazık üst kotuna kadar hafriyat alınmaktadır (Şekil 4.47). Aplikasyon doğrultusunda gidaj betonu denilen kılavuz beton dökülerek kazıkların doğru noktadan imal edilmesi ve

düŖeyden sapmaması sağlanmaktadır (Ŗekil 4.48). Ek olarak tünel geiŖ bölgelerinde bulunan kazıkların dip kotu tünel üŖ kotuna göre ayarlanmaktadır.



Ŗekil 4.47 : Kazık üŖ kotuna göre harfiyat alınan bekleme makası sahası.



Ŗekil 4.48 : Gidaj beton uygulaması T17 servis istasyonu sahası.

Ŗaşırtmalı olarak delgileri yapılan ve derinliklerinin projeye uygunluğu kontrol edilen kazıkların öncesinde sahada hazırlanan donatıları (Ŗekil 4.49), kule vinç yardımıyla

foraj kuyusu içerisine pay paylarına dikkat edilerek ve kazık boyuna bağlı olan durumlara göre bir ya da birkaç kademede yerleştirilir.



Şekil 4.49 : Kazık donatıları.

Kazıkların betonlama işlemi imalat hatalarının minimum olması, betonun serbest düşme yapmadan dökülebilmesi adına kazık boyunda tremi boruları (Şekil 4.50) kullanılarak gerçekleştirilir. Kazık üst kotundan yaklaşık 30 cm yüksek dökülen beton başlık kirişi imalatı öncesi kırılmaktadır.



Şekil 4.50 : Tremi boruları.

Aralarda kalan kazıklarında imalatı tamamlandıktan sonra aynı kotta yer alan kazıkların başlık kirişleri yardımıyla birlikte çalışması sağlanmaktadır. Kazıklar arasında kalan alanda kademeli olarak kazı yapılarak kuşak kirişi imatları gerçekleştirilmektedir. Bir

sonraki kademe kazısına geçilmeden önce yanal yükleri karşılamak adına strut ya da ankraj uygulamalarından biri tercih edilir.

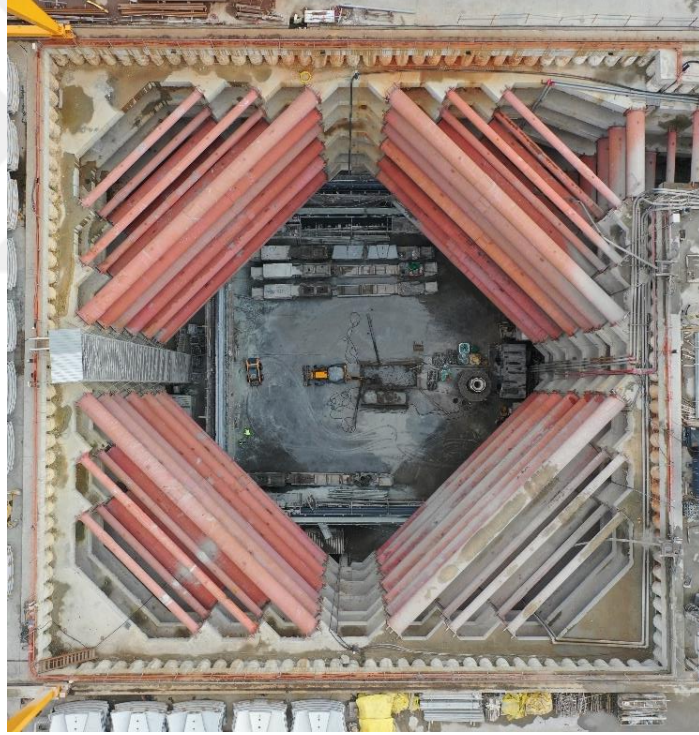
Strutların (Şekil 4.51) maksimum imalat boyu 12 m'dir. İki strut birleştirilerek 24'm lik bir açıklıkta düz olarak kullanılabilir. Fakat iki strut birleştirilerek oluşturulan 12 m'den büyük strutların çapraz olarak çalıştırılması birleşim bölgelerinde zayıf düzlemler oluşacağından istenmemektedir. Bu şekildeki büyük açıklıklarda ankrajlı fore kazık sistemi tercih edilmektedir. Strutların çapraz olarak çalıştırılacağı iksa sistemlerinde (Şekil 4.52) yük aktarımını ve birleştirme kolaylığını sağlamak için kuşak kirişleri guseli olarak imal edilmektedir. Strut ile kiriş arası birleşme derzi 6 cm' den büyükse 1 puntası 3 t kapasiteli argon kaynağı yapılmalı iken daha küçük aralıklarda grout (harç) kullanılarak alt kısımları sac kaynatılarak yan kısımlar ise köpük ve strafor ile kapatılmalıdır.



Şekil 4.51 : Strut



Şekil 4.52 : Kayaşehir istasyonu güney konkors sahasında çapraz strut imalatı.



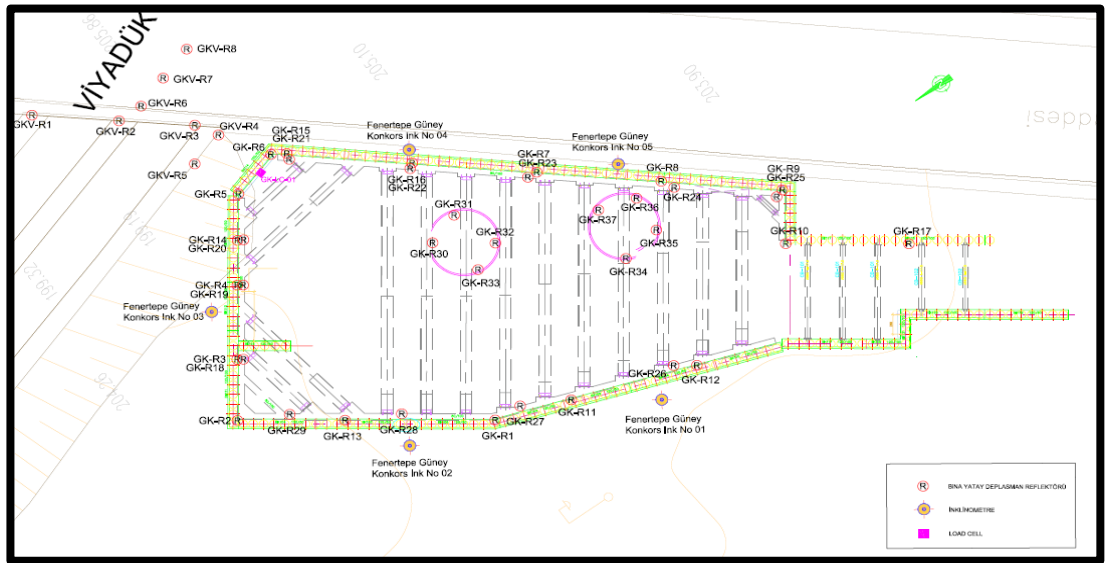
Şekil 4.53 : Olimpiyaköy istasyonu kuzey konkors aç-kapa yapısı.

Açıklığın strut ile geçilemeyecek kadar fazla olduğu ankrajlı sistemlerde kademeleri oluşturan kuşak kirişlerinde yer alan ankrajların kaç kazıkta bir uygulanacağı, kök bölgesi uzunluğu, serbest bölge uzunluğu, halat sayısı, tasarım yükü sahanın jeolojik parametrelerine, imalat süresine, açıklığın boyutlarına, çevre yapıların varlığına ve meydana getirdikleri sürşarj yüklerine bağlı olarak değişiklikler göstermektedir.



Şekil 4.54 : Arnavutköy 1 istasyonu kuzey konkors aç-kapa yapısı.

Aç-kapa yapıları eğilme ölçer (inklinometre), bina yatay deplasman reflektörü, diskli yük hücresi (load cell), gerinim ölçer (strain gage) gibi uygulamalarla denetlenmektedir (Şekil 4.55). İksa sisteminin en fazla 1 m gerisine uygulanan inklinometreler eğimi yatay deplasmana çevirme prensibi ile çalışmakla birlikte sıfır okuması ve hareketsiz uç olmak üzere iki ana referansları bulunmaktadır. Haftalık olarak yapılan okumalar sistemde hareket görülen durumlarda sıklaştırılmaktadır. İnklinometre imalatına imkan bulunmayan sahalarda kuşak kirişlerine kademeli olarak yerleştirilen reflektörler yardımıyla sistemin denetimi sağlanmaktadır.

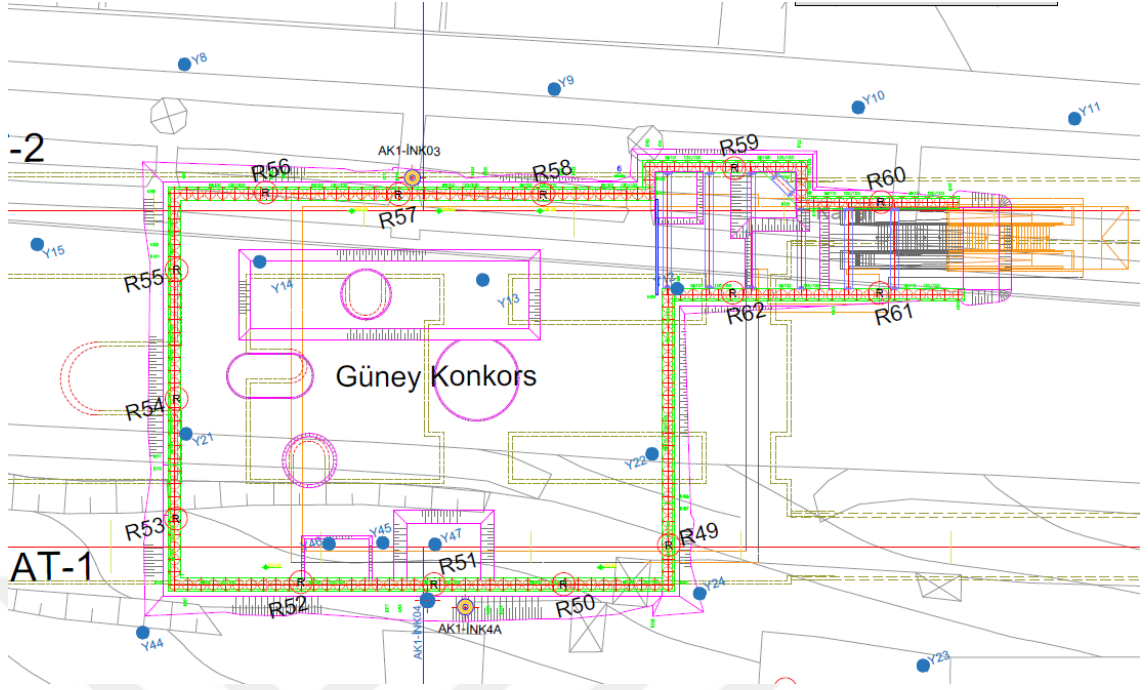


Şekil 4.55 : Fenertepe istasyonu güney konkors aplikasyon planı.

İstasyon konkorslarını oluşturan aç-kapa yapılarında temel altında havalandırma, asansör, elektro-mekanik ve acil kaçış şaftları bulunmaktadır. Kazıcı makinelerle kazısı yapılan bu şaftlarda 2,15 m × 5 m boyutlarında hasır çelik kullanıldığından düşeyde 2 m'lik anolar oluşturulmaktadır. Hasır çelik ile birlikte 20 cm püskürtme beton uygulanan şaftlara nihai betonlama öncesi kaya bulon imal edilerek başlık bölgelerine yerleştirilen reflektörler vasıtasıyla şaftın stabilitesi denetlenmektedir.



Şekil 4.56 : Arnavutköy 1 istasyonu güney konkors temel altı şaft saha görünümü.



Şekil 4.57 : Arnavutköy 1 istasyonu güney konkors aplikasyon planı.



Şekil 4.58 : Yeni nesil temel su yalıtım numunesi

Aç-kapa yapılarında Şekil 4.58 'de numune örneği görülen kendinden yapışkanlı SBS (Stiren Bütadien Stiren) katkılı polimer bitümden üretilmiş, yüksek dayanımlı özel keçe taşıyıcılı, - 20°C sıcaklıkta esneklik değerine sahip, üst yüzeyi betona aderans sağlayabilen silis kumu kaplı, alt yüzeyi kendinden yapışkanlı yüzeyden ayrılabilir silikon film kaplı, üst yüzey bindirme yerleri 12 cm kendinden yapışkanlı film kaplı, 3

mm kalınlığında 1m × 10 m boyutlarında yeni nesil temel su yalıtım sistemi kullanılmaktadır ("Url-7,"). Yeraltı ve yüzey sularına maruz kalan tek yüz perdelerin yalıtımının kullanımına uygun bu sistemde, malzemenin betona bakan yüzeyi beton ile tepkimeye girerek sızdırmaz bir yüzey oluşturmaktadır. Herhangi bir sızdırma olması durumunda temel betonu ve su yalıtımı arasında suyun ilerlemesini engelleyerek sızan suyun kaynağının bulunma olasılığı artırır. Bu durum tamirat süreci ve maliyetinden tasarruf sağlanmasının yanında yapının sudan korunma yüzdesine büyük oranda katkı sağlamaktadır. Aç-kapa yapılarında yalıtım uygulamasından önce düzgün bir yüzey elde etmek adına kuşak kirişleri arasındaki boşluklara gaz beton örülmektedir.

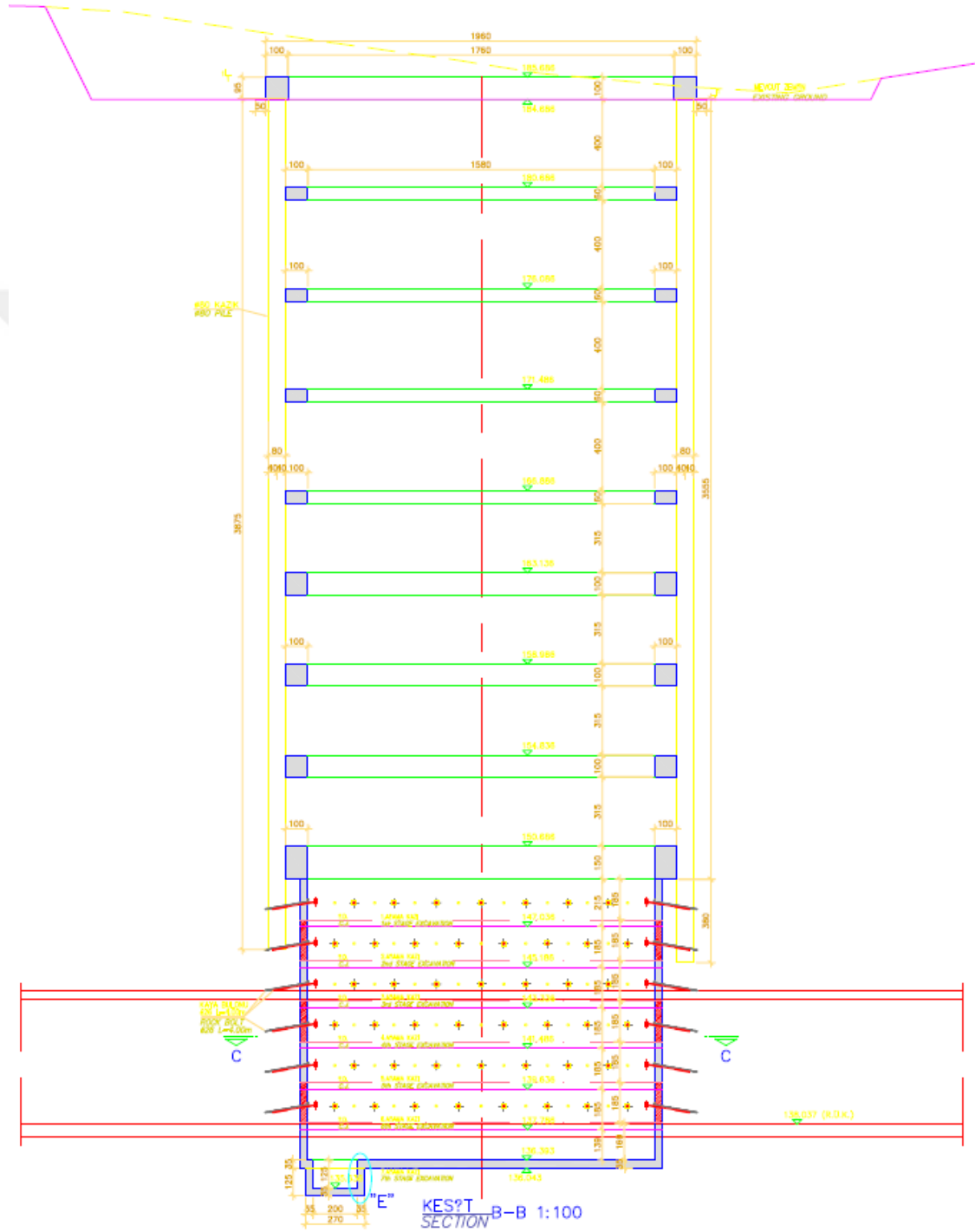


Şekil 4.59 : Arnavutköy 1 istasyonu kuzey konkors aç-kapa yapısı yalıtım uygulaması.

Servis istasyonu şaftları imalat sırasında da metro hattı çalışmaya başladığında da tünel seviyesine ulaşımın sağlanmasını amaçlamaktadır. Bu şaftlar yatayda destek elemanları (strut, ankraj) olmayan fore kazık uygulaması ile daire kesitli imal edilmektedir. Akmaya meyilli zeminlerde ya da yeraltı suyunun şaft içine sızıntısının oluşabileceği durumlarda kuşak kirişleri arasına hasır çelik ile püskürtme beton uygulaması yapılmaktadır.

T14 servis istasyonu şaftı yaklaşık 49 m derinliği ile projede yer alan en derin şaftı oluşturmaktadır (Şekil 4.60). Tünel seviyesine yaya ulaşımının 50 m derinliğe kadar merdiven ile sağlandığı bu şaftlara ihtiyaç durumunda portal vinç kurulmaktadır (Şekil 4.62). Portal vinç vasıtası ile beton mikseri, beton pompası, kamyon, ayna sondaj

makinesi (jumbo), hidrolik kırıcı, ters kollu ekskavatör, kazıcı-yükleyici (backhoe loader), püskürtme beton makinesi gibi yüksek tonajlı araçların ve çeşitli imalat malzemelerinin tünel seviyesine kazı sonucu oluşan pasanın ise tünel dışına aktarımı sağlanmaktadır.



Şekil 4.60 :TK14 servis istasyonu shaftı kesiti.

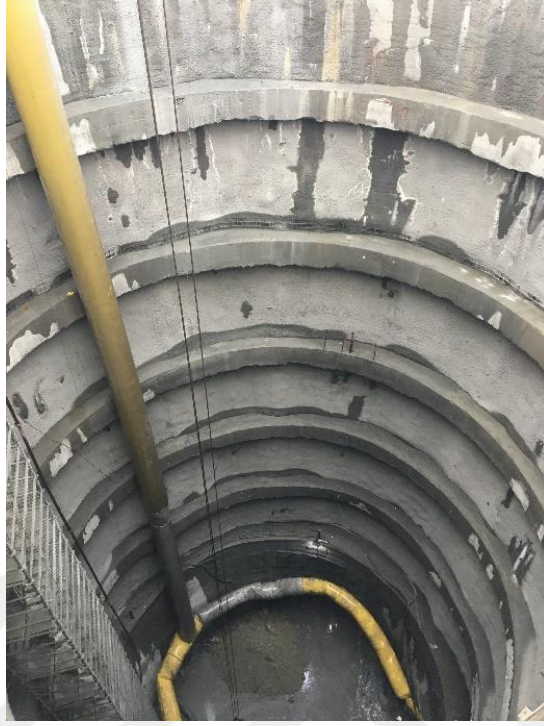


Şekil 4.61 : Fore kazık ve başlık kirişi imalatı tamamlanmış TK14 servis istasyonu şaftı kesiti.



Şekil 4.62 : Portal vinç.

Ayrıca şaft içinde tünel havalandırma fanı boruları (Şekil 4.63) , betonun yüzeyden tünel içine iletilmesi için döşenmiş borular ve merdiven yer almaktadır.



Şekil 4.63 : Tünel havalandırma fanı (TVF).

4.2.4. Proje hattında meydana gelen geoteknik problemler ve çözümleri

Bu başlık altında sekiz aylık haftalık imalat raporlarından ve altı ay boyunca sahada yapılan gözlemlerden elde edilen veriler incelenerek uygulama esnasında meydana gelen problemler ve çözümleri örneklendirilecektir.

Arnavutköy 1 istasyonunda NATM imalatında birim sığ kesimlerde dolguya ve kumlu birime girdiği için zeminde oluşan akma sonucunda yüzeyde göçme meydana gelmiştir (Şekil 4.64). Püskürtme beton ve kontak enjeksiyonu uygulanan bölgeye kaya bulonları çakılarak bölgede stabilite tekrar sağlanmıştır. Devam eden imalatta iksa aralıkları azaltılarak önlem alınmış olup yüzeyde göçen bölge hafif malzeme ile doldurularak kapatılmıştır.



Şekil 4.64 : Arnavutköy 1 istasyonunda meydana gelen göçme

T14 servis istasyonunda TBM'in meydana getirdiği titreşimler ayrılmış birim ve yeraltı su seviyesinde etkisiyle sökülmeye neden olmuştur. İlk aşamada püskürtme beton atılarak hava ile teması kesilen bölgeye püskürtme beton-hasır çelik uygulanarak zemin stabilize edilmiştir. Daha sonra bölgeye devam eden imalatlar adına önlem amacıyla zemin çivisi uygulanmıştır.



Şekil 4.65 : T14 servis istasyonunda meydana gelen sökülme

Fenertepe istasyonunun, bekleme istasyonunun ve bu bölgede yer alan ara geçiş tünellerinin bazılarının NATM imalatı kazılarında sökülmeler meydana gelmiştir. Trakya Formasyonu içinde yer alan sabunsu çamurtaşına sahip süreksizlik yüzeyleri ve bölgelerdeki yeraltı su seviyesi sökülmelerin ana sebebi sayılmaktadır. Bununla birlikte imalat esnasında uzun süre açık bırakılan aynanın hava ile teması da sökülmelere zemin hazırlamaktadır. İlk olarak birimin hava ile teması kesiliği bu tür durumlarda tünel içinden ve konum izin veriyor ise yüzeyden ikincil enjeksiyon yapılmaktadır. Gerekli görülen bölgelerde umbrella delgisi yapılarak devam eden imalatlarda işçi güvenliği sağlanarak tünel stabilizesinin korunması amaçlanmaktadır.



Şekil 4.66 : Bekleme makasında meydana gelen sökülme.

M12 makası aç-yapı yapısında Trakya Formasyonu içinde süreksizlik yönü kazı yönünde ve dayanımı düşük olduğu için yapılan kazılarda kazı yönüne doğru akma gözlemlenmiştir. İklim koşulları sebebiyle geçici çözüm sağlaması adına açılan kazık aralına strafor köpük yerleştirilmiştir. Fakat daha sonrasında yağmurun da etkisiyle kazık aralarından akan birim, kazık arkasında boşluk oluşmasına neden olmuştur. Püskürtme beton-hasır çelik imalatı ile hava ile temasının kesilmesi ve kazık aralarındaki boşlukların beslemesi sağlanan bölgede, kazık arkasında oluşan çukura hafif malzeme ile dolgu yapılarak püskürtme beton atılmıştır.



Şekil 4.67 : M14 makasında meydana gelen akma.



Şekil 4.68 : M14 makasında akma sonrası püskürtme beton-hasır çelik imalatı.

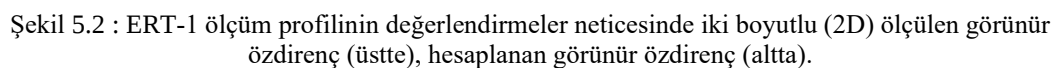
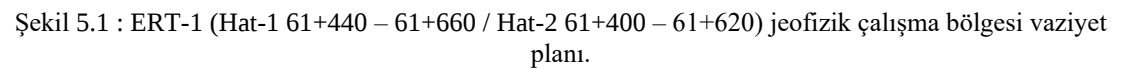
BÖLÜM 5. PROJE HATTINDA OLUŞTURULAN JEOLJİK KESİTLER İLE JEOFİZİK KESİTLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

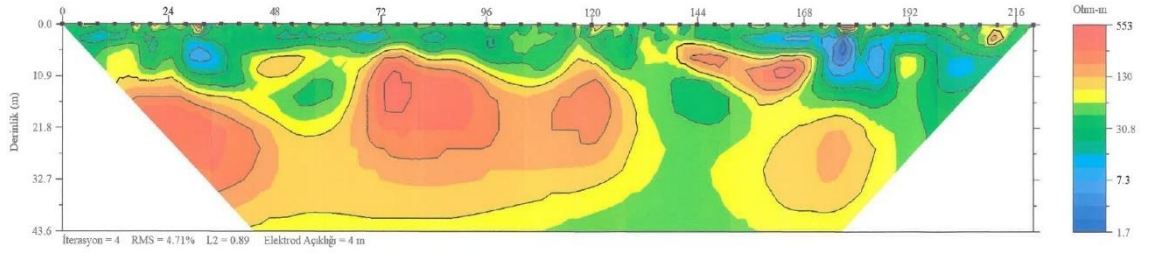
Jeofizik, günümüzde kullanılan birçok farklı ölçüm yöntemi yardımıyla yeraltını tanımlamayı ve gömülü halde bulunan yapıları tespit etmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçlara uygun olarak ASTM yüzey jeofiziği yöntemleri seçim standartlarına (ASTM D6429-99) göre temel teknik yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar; sismik yöntemler, rezistivite yöntemi, yer radarı ve mikrogravite yöntemi olarak sıralanabilir. Yüzey jeofiziği yöntemleri ile yakın yüzey profilini, yapısal unsurları ve diğer zemin özelliklerini belirlemek ve haritalamak mümkün olabilmektedir. Bunun yanı sıra zeminin kimyasal, fiziksel ve elektriksel özelliklerinin ölçülerek yeraltı yapılarının varlığını doğrudan ya da dolaylı olarak belirlemekte mümkündür. Elektrik özdirenç yöntemi ASTM yüzey jeofiziği yöntemleri seçim standartlarına (ASTM D6429-99) göre yaygın olarak kullanılan tekniklerden en önemlisidir. Elektrik özdirenç yöntemi, çatlaklı, boşluklu ve bozunmuş bölgeleri belirlemek, örtü tabakası kalınlığını, ana kaya ve yeraltı su seviyesi derinliğini haritalamak için kullanılabilmektedir (Şahinoğlu, 2018; Uçar, 2014).

5.1. Proje Hattındaki Jeofizik Araştırmalar

Halkalı-Yeni Havalimanı metro hattı projesi kapsamında; TBM güzergahı iki hattın ortasında (Hat-1 Km: 61+440 – 61+660 / Hat-2 Km: 61+400 – 61+620), Olimpiyatköy Stadi istasyonunda (Km: 62+215 – 62+490) iki adet ve TBM güzergahında (Hat-2 Km: 62+835 – 63+050) olmak üzere Çoklu Elektrotlu Elektrik Özdirenç Tomografi ölçüm yöntemi kullanılarak toplam dört adet iki boyutlu (2D) ters çözüm özdirenç yeraltı kesiti elde edilmiştir.

otomatik olarak kaydedilmiştir.

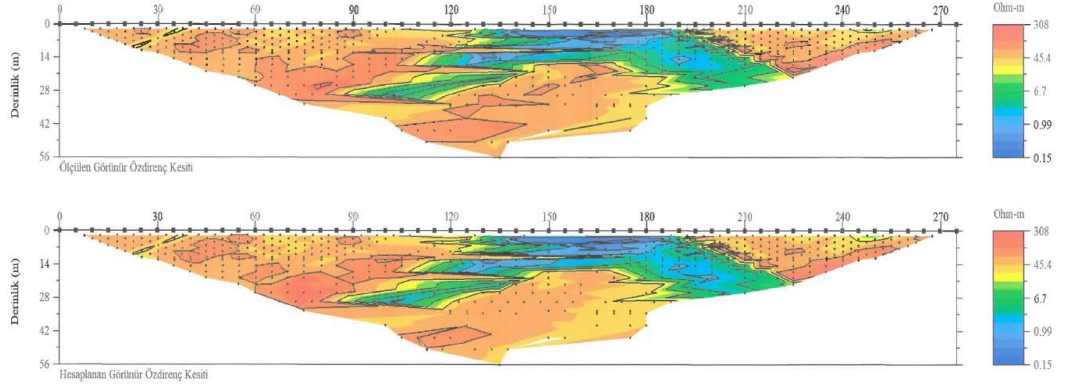




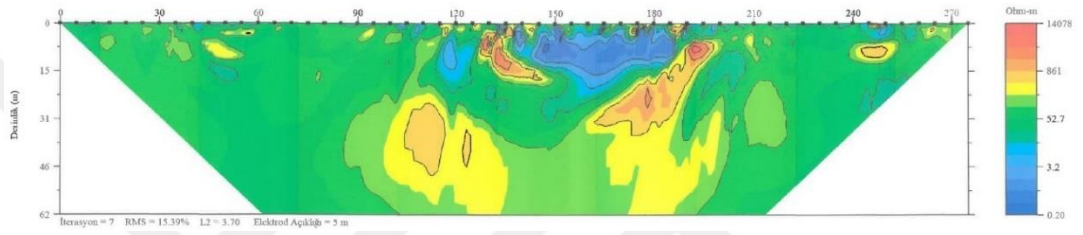
Şekil 5.3 : ERT-1 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde hesaplanan iki boyutlu (2D) öz direnç ters çözüm kesiti.



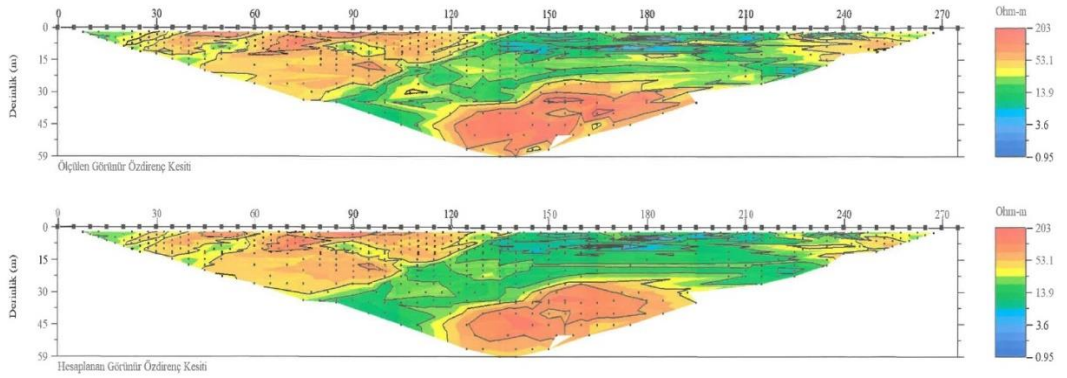
Şekil 5.4 : ERT-2 / ERT-3 (Olimpiyatköy Stadı istasyonunda) jeofizik çalışma bölgesi vaziyet planı.



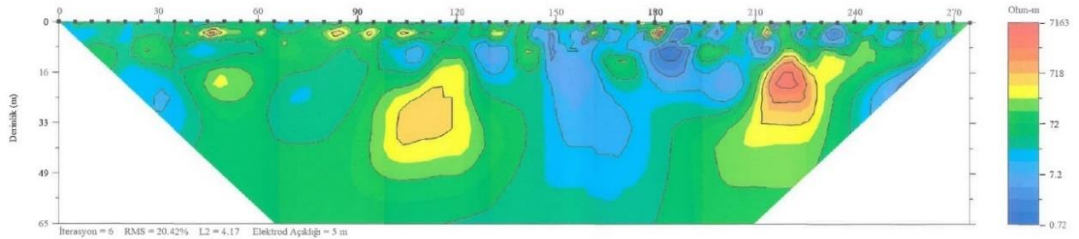
Şekil 5.5 : ERT-2 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde iki boyutlu (2D) ölçülen görünür öz direnç (üstte), hesaplanan görünür öz direnç (altta).



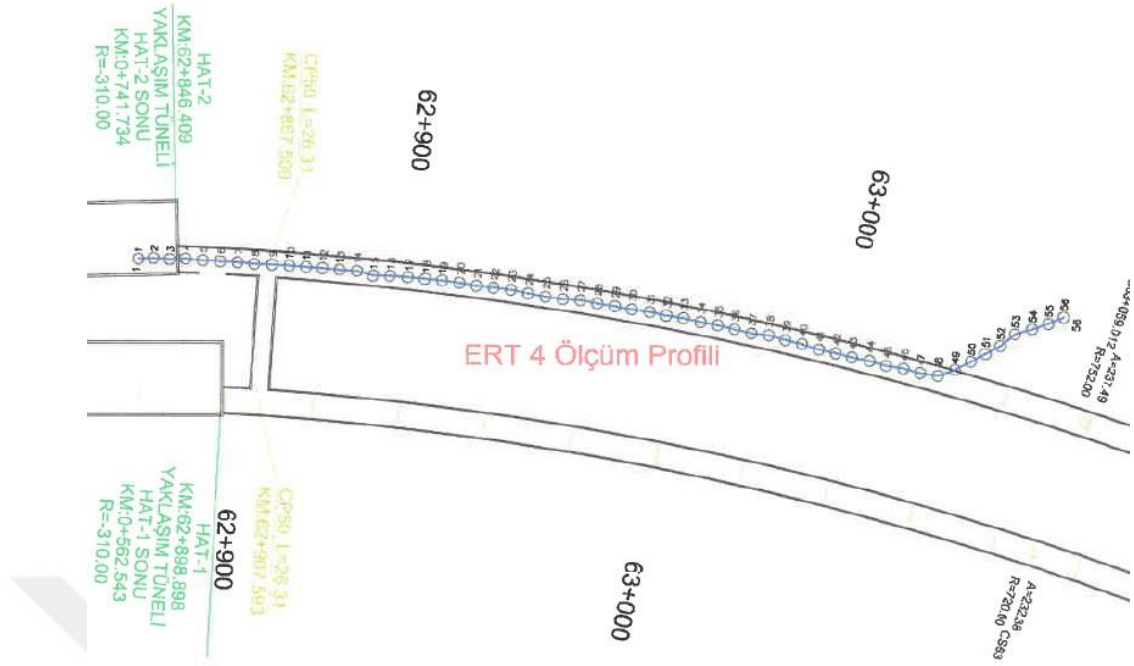
Şekil 5.6 : ERT-2 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde hesaplanan iki boyutlu (2D) öz direnç ters çözüm kesiti.



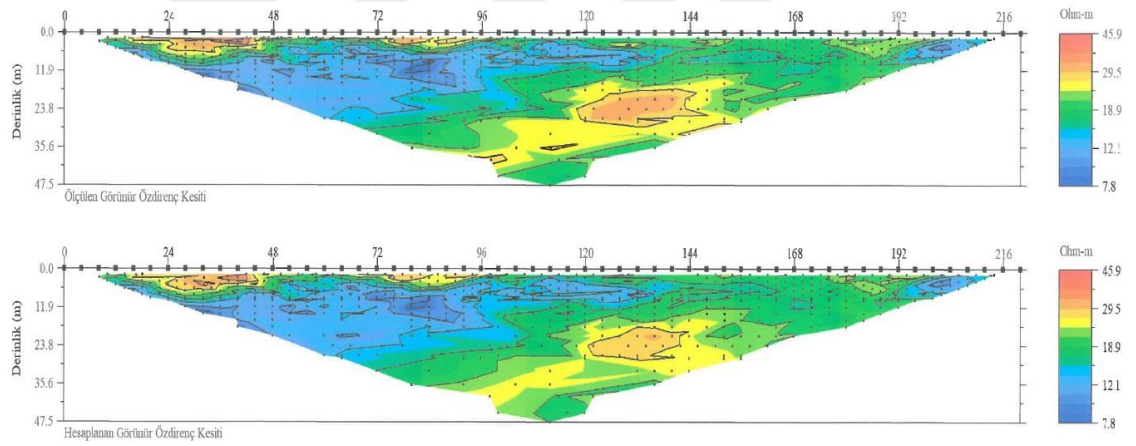
Şekil 5.7 : ERT-3 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde iki boyutlu (2D) ölçülen görünür öz direnç (üstte), hesaplanan görünür öz direnç (altta).



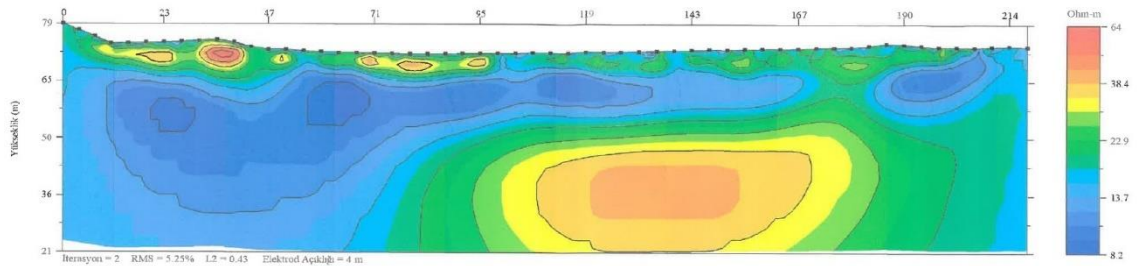
Şekil 5.8 : ERT-3 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde hesaplanan iki boyutlu (2D) öz direnç ters çözüm kesiti.



Şekil 5.9 : ERT- 4 (Hat-2 62+835 – 63+050) çalışma bölgesi vaziyet planı.



Şekil 5.10 : ERT-4 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde iki boyutlu (2D) ölçülen görünür öz direnç (üstte), hesaplanan görünür öz direnç (altta).



Şekil 5.11 : ERT-4 ölçüm profilinin değerlendirmeler neticesinde hesaplanan iki boyutlu (2D) öz direnç ters çözüm kesiti.

Lejantlarda sarı, turuncu ve kırmızı renkle görülen bölgelerin potansiyel karstik boşluklarını gösterdiği düşünülmektedir. Koyu mavi, mavi renkle görülen bölgelerin, öz direnç değerinin 10-15 ohm.m'den küçük olduğu seviyelerin, dolgu birimler olduğu düşünülmektedir.

5.2. Proje Hattında Oluşturulan Jeolojik Kesitler ile Jeofizik Kesitlerin Karşılaştırılması

Bu başlık altında hat üzerinde çoklu elektrotlu elektrik öz direnç tomografi ölçüm yöntemi sonucu elde edilen dört adet öz direnç ters çözüm kesitleri ile bu kesitlere denk gelen sondajlar yardımıyla oluşturulan jeolojik kesitler karşılaştırılarak yorumlanacaktır.

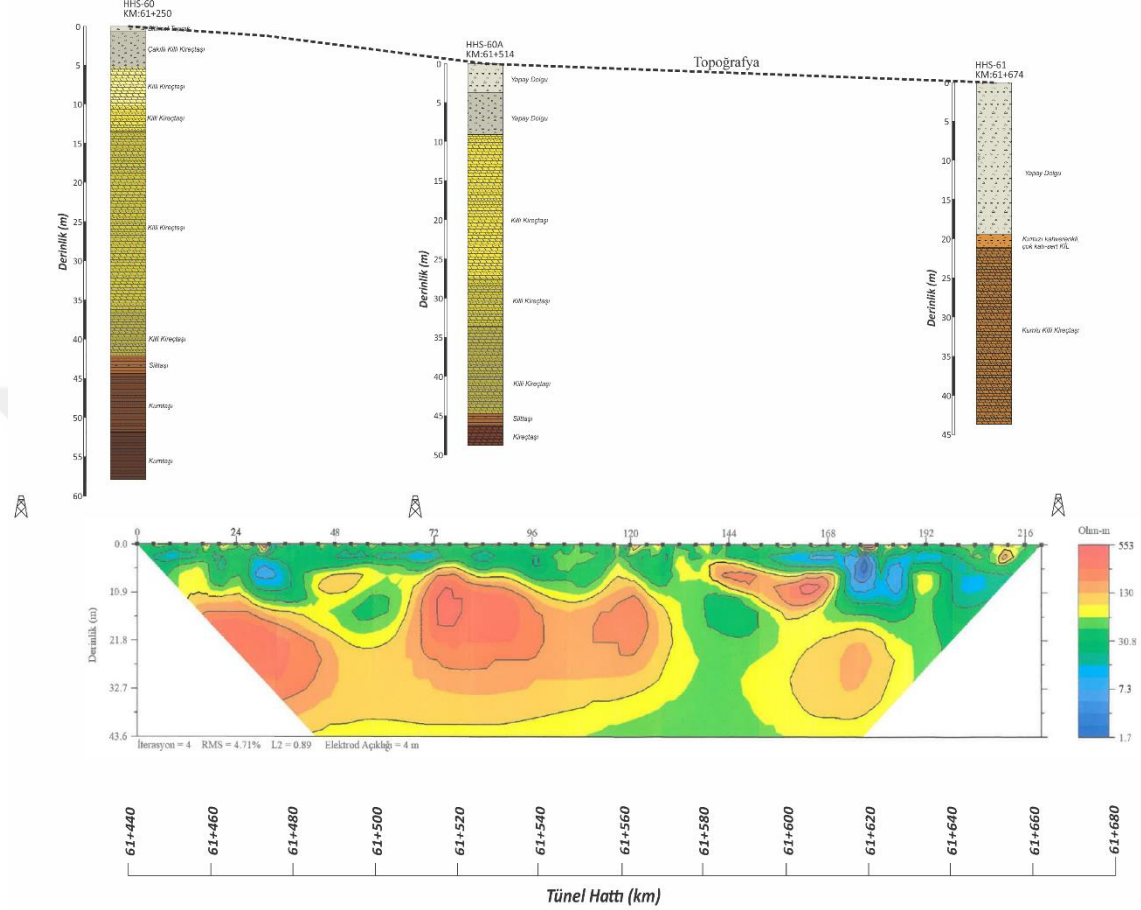
Şekil 3.8.1'de TBM güzergahında iki hattın ortasında Hat-1 Km: 61+440 – 61+660 / Hat-2 Km: 61+400 – 61+620 konumunda jeofizik inceleme yapılarak oluşturulan ERT-1 kesiti ile bu kesite denk gelen HHS-60, HHS-60A ve HHS-61 sondajlarından elde edilen jeolojik kesit gösterilmektedir.

Km: 61+514 lokasyonunda bulunan HHS-60A sondajında 10 metre boyunca su içermeyen, çakıllı birimlerden oluşan yapay dolguda elektrik öz direnç değeri ortalama 30 ohm.m ölçülmüştür. Sondajın devamında görülen yaklaşık 35 metre derinliğe kadar ulaşan su içermeyen, kırık çatlak oranı fazla killi kireçtaşı birimleri için elektrik öz

direnç değerlerinin 553 ohm.m 'ye kadar yükseldiği görülmektedir. Sondajın son 5 metrelik bölümünde ise kırık çatlak oranının artması ve yeraltı suyunun varlığı öz direnç değerlerinin azalmasına sebep olmuştur.

Aynı öz direnç ters çözüm kesitinin HHS-61 (Km: 61+674) sondajının denk geldiği bölgesinde elektrik öz direnç yöntemi yatay veri kaybından kaynaklı ilk 20 metreden sonrası görüntülenememektedir. Çözümleme yapılan ilk 20 metrelik birimde ve HHS-60A sondajında gözlenen, yapay dolu ile temsil edilen birimde ölçülen elektrik öz direnç değerleri paralellik göstermektedir. Bu paralelliğin başka bir göstergesi HHS-61 sondaj logunda yaklaşık ilk 20 metrenin yapay dolgu olarak nitelendirilmesidir.

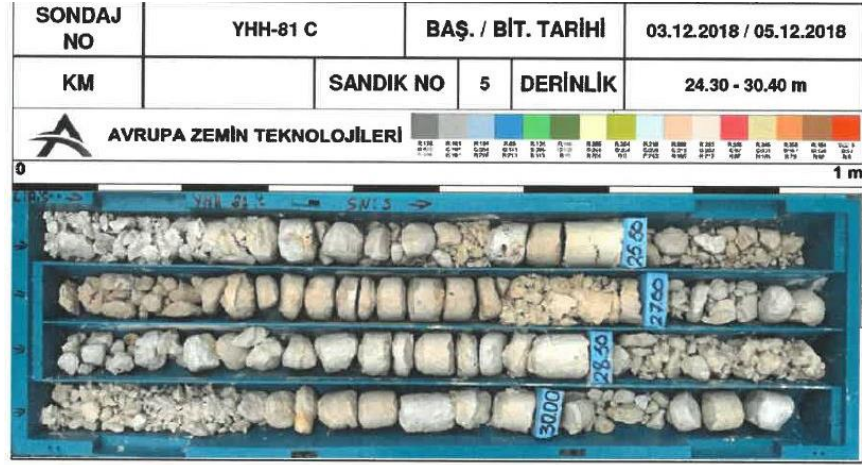
Km: 61+570 - 61+590 arasında yer alan düşük elektrik özdirenç değerlerine sahip zon muhtemel kil veya yeraltı su seviyesinin yükselimi ile birlikte kireçtaşı çatlaklarının suyla dolmasıyla açıklanabilir.



Şekil 5.12 : ERT-1 ters  z m kesiti ve aynı lokasyondaki sondajlardan elde edilen jeolojik kesit.

Şekil 3.22’de Olimpiyatköy istasyonunda yapılan jeofizik inceleme sonucu oluşturulan ERT-2, ERT-3 kesitleri ile bu kesitlere denk gelen YHH-81, YHH-81A, YHH-81C ve YHH-81E sondajlarından elde edilen jeolojik kesit gösterilmektedir.

ERT-2 ve ERT-3 kesitinde YHH-81A ve YHH-81E sondajlarına karşılık gelen   z mlmelerde elektrik özdirenç değerlerinde bir farklılık söz konusu değildir. Bu durum  ekil 3.23 ‘deki sondaj sandık fotoğrafında görüleceği üzere oldukça yüksek oranda kırıklı çatlaklı yapının devamlılığı ile ilgilidir.

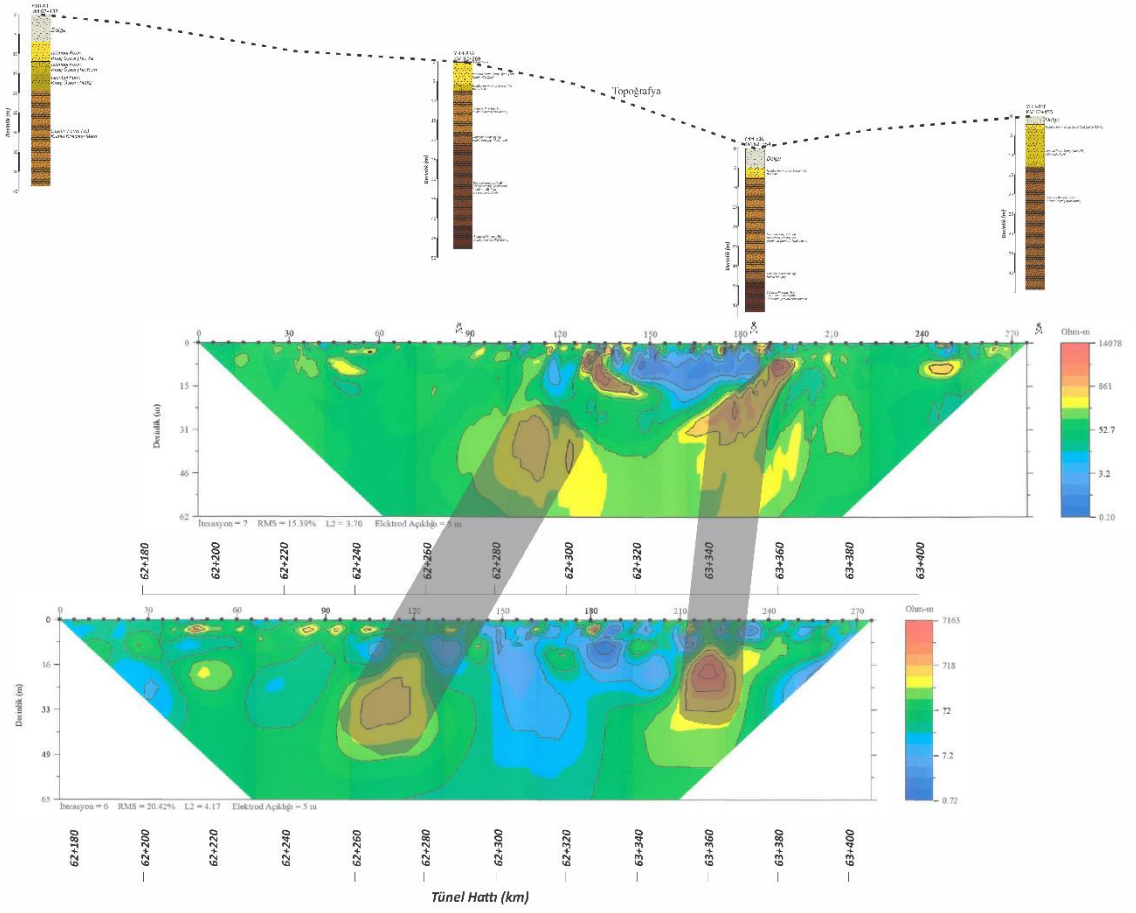


Şekil 5.13 : YHH-81C sondajı 24.30 m – 30.40 m arası sandık görseli.

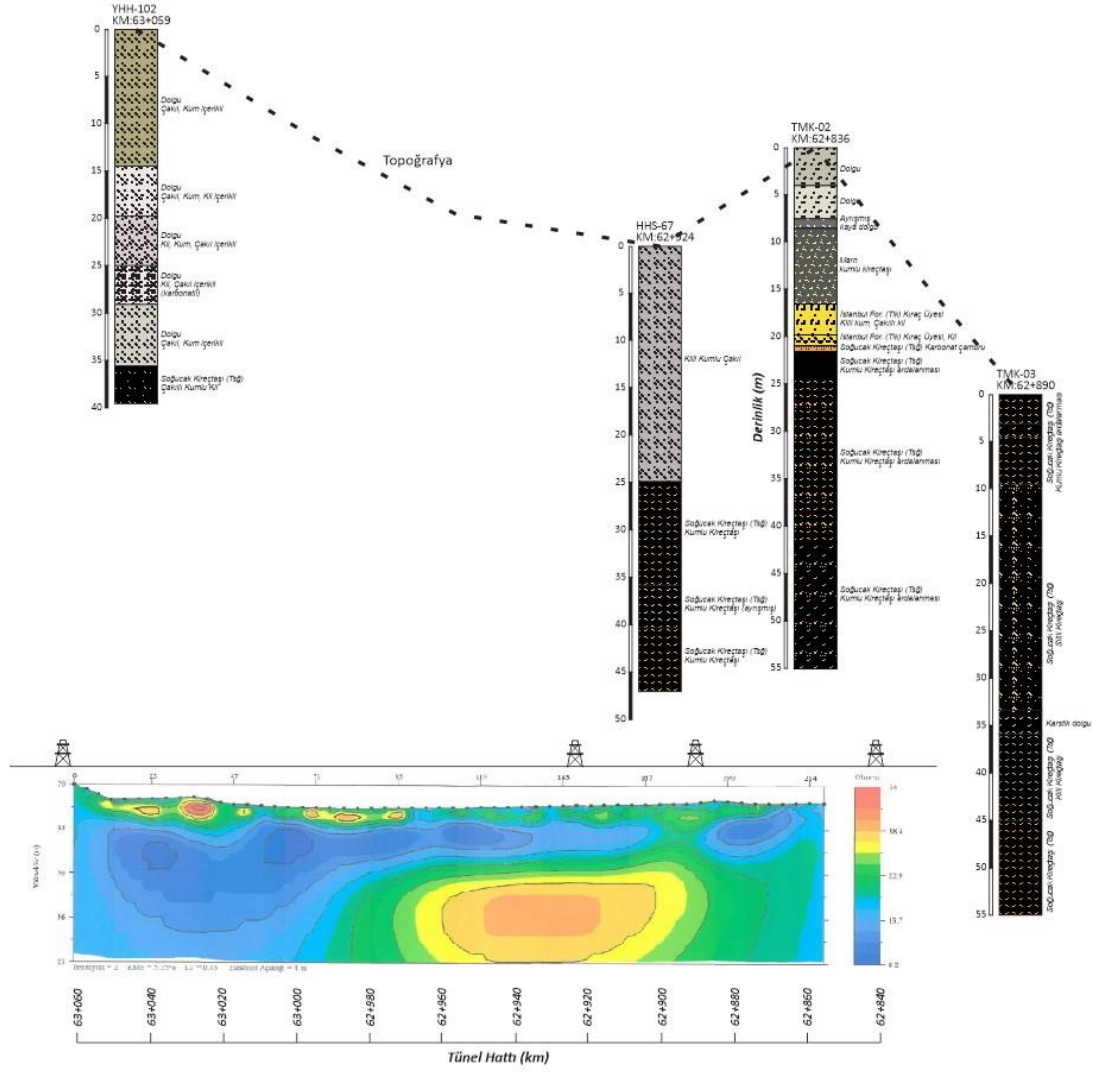
Öte yandan öz direnç ters çözüm kesitlerinde YHH-81C sondajına karşılık gelen bölgelerde dolgu ile kireçtaşı arasındaki ayrışıklık açıktır. Dolgu kısmında elektrik öz direnç değerleri dolgunun killi siltli birimlerden oluşması nedeniyle 10 – 15 ohm.m iken kireçtaşında çatlaklı yapının etkisiyle 50 – 70 ohm.m seviyelerinde tespit edilmiştir.

Bu iki kesitte dikkat çeken yüzeye yakın ve yüzeyden 30 – 30 metre derinlikte ortaya çıkan 7000 ohm.m ve 14000 ohm.m seviyelerindeki görece yüksek elektrik öz direnç değerli kapanımlardır. Kireçtaşı içerisinde bir anda ortaya çıkan yüksek elektrik öz direnç değerleri muhtemel karstik boşlukların etkisiyle iletkenliğin düşmesiyle açıklanabilir. Olimpiyatköy istasyonu imalatı sırasında gözlemlenen karstik boşluklar bu yorumu desteklemektedir.

Birbirine paralel gerçekleştirilen ERT-2 ve ERT-3 ölçümlerinin konumlarının ölçeklendirilmesi ile olası karstik boşlukların yataydaki uzanımları yaklaşık olarak Şekil 3.24 'de gösterilmektedir.



Şekil 5.14 : ERT-2/ERT-3 ters çözüm kesitleri ve aynı lokasyondaki sondajlardan elde edilen jeolojik kesit.



Şekil 5.15 : ERT-4 ters çözüm kesiti ve aynı lokasyondaki sondajlardan elde edilen jeolojik kesit.

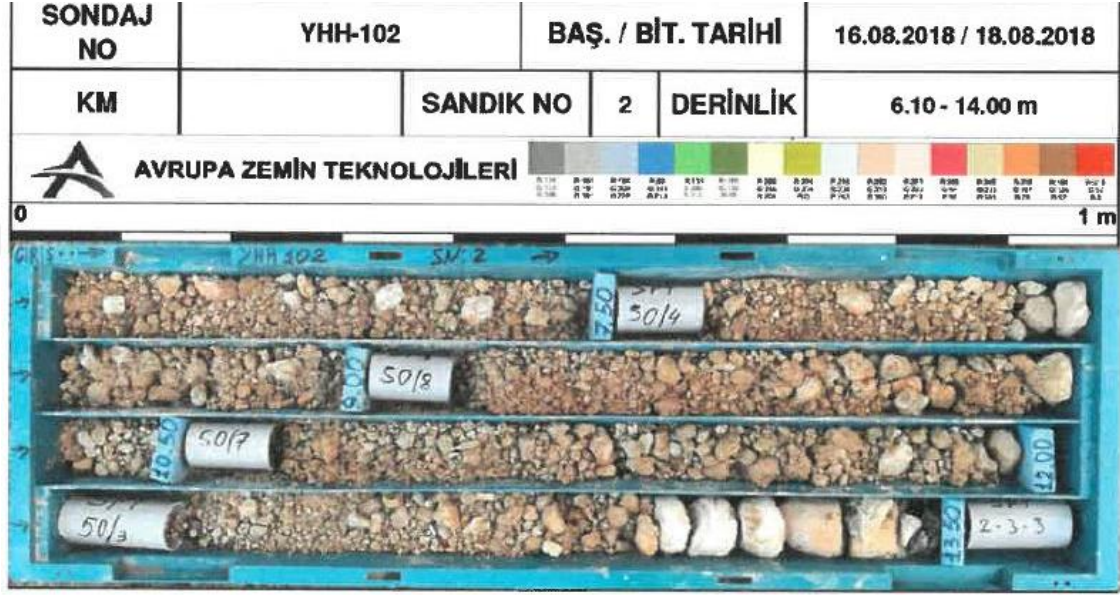
Şekil 3.25’de TBM güzergahında Hat-2 Km: 62+835 – 63+050 yapılan jeofizik inceleme sonucu oluşturulan ERT-4 kesiti ile bu kesite denk gelen TMK-02, TMK-03, HHS-67 ve YHH-102 sondajlarından elde edilen jeolojik kesit gösterilmektedir.

Km: 62+924 lokasyonundaki HHS-67 sondajında killi kumlu çakıl birimine karşılık gelen ilk 25 metrenin elektrik özdirenç değeri özdirenç ters çözüm kesitinde 8 – 20 ohm.m aralığında temsil edilmiştir. Devam kısımda 64 ohm.m ‘ye kadar yükseldiği gözlenen elektrik özdirenç değeri soğukak kireçtaşının farklı derecelerde ayrılmış yapısı ile temsil edilmektedir.

HHS-67 sondajının 35 m gerisindeki TMK-03 sondajına karşılık gelen elektrik özdirenç değerleri devam eden birimler için benzeşim göstermektedir. Ayrıca sondaj logunda

yaklaşık 35 metre derinlikte gözlenen karstik boşluk, öz direnç ters çözüm kesitinde aynı derinlikte maksimum öz direnç değerlerinin ölçüldüğü bölgeye karşılık gelmektedir.

YHH-102 sondajında görülen dolgu zemin ERT-4 kesitinin sonunda 8 – 13 ohm.m elektrik öz direnç değerlerini vermektedir. Görece düşük öz direnç değerleri Şekil 3.26 'da görülen zeminin oldukça boşluklu yapısı ile açıklanabilir.



Şekil 5.16 : YHH-102 sondajı 6.10 m – 14.00 m arası sandık görseli.

Olimpiyatköy istasyonunda yapılan sondajlarda karstik boşluklar tespit edilememiştir. Yeraltı raylı sistemleri gibi kilometrelerce alanda farklı derinlik ve boyutlarda imalat gerektiren projelerde karstik boşluk gibi proje sahasına göre oldukça küçük alanların sondaj ile tespiti oldukça maliyetli ve zaman alıcı olacağından jeofizik yöntemlerin kullanımı imalat aşamasındaki olası problemleri ön görme ve önleme adına efektif zaman kullanımı ve tasarruf sağlayacağı açıktır.

İmalatın bir hat üzerinde dolayısıyla tek boyutta yoğunlaştığı raylı sistem projelerinde sondaj planı da çoğunlukla bu hattı takip etmektedir. İstasyon yapıları gibi ikinci boyutta imalatın yoğun olduğu bölgelerde sondajlardan elde edilen veriler yetersiz kalabileceğinden jeofizik yöntemlere baş vurulabilir. Ayrıca topoğrafya ya da yoğun yapılaşma sebebi ile sondaj açılmayan bölgelerde veri alımı jeofizik yöntemler ile yapılabilir.

Buna karşın indirek olarak gerçekleştirilen jeofizik yöntemlerin sondaj veya farklı yöntemler ile desteklenmesi gerektiği bir gerçektir. Elektrik öz direnç değerlerinin yorumlanmasının doğruya yaklaşabilmesi adına yeraltı su seviyesi varlığı, zeminlerin tabakalaşması, kaya kalitesi gibi sondajlar ile elde edebilecek temel verilere ihtiyaç duyulmaktadır.



BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Halkalı-Yeni Havalimanı metro hattı projesi kapsamında yapılan jeolojik çalışmalar hazırlanan jeolojik-jeoteknik etüt raporları yardımıyla incelenmiştir. Hattın imalat aşamalarını meydana getiren geoteknik uygulamalar ise altı ay boyunca yerinde gözlemler yapılarak ve uygulayıcı, denetleyici departmanlardaki mühendislerle iletişim kurularak araştırılmıştır.

Kilometrelerce uzunlukta, açılacak tünel kesitine bağlı olarak değişen genişlik ve derinlikteki yeraltının inşaat alanı olduğu bu sistemlerde; sondajlar vasıtasıyla yapılan arazi ve laboratuvar deney sonuçları, jeofizik araştırmalar imalat öncesi elimizdeki somut verileri oluşturmaktadır. Halkalı – Yeni Havalimanı metro hattı imalatı için gerçekleştirilen jeolojik-jeoteknik inceleme kapsamındaki bu veriler, tez içeriğinde literatüre kazandırılmıştır.

Jeolojik-jeoteknik inceleme sonucu elde edilen litoloji, ayrışma, formasyon, üye, sondaj noktası, sondaj üst kotu, sondaj derinliği, yeraltı su seviyesi, RQD(%), TCR(%), SPT, presiyometre, Q, RMR, GSI, likit limit, plastisite indeksi, siyah kot, ray üst kot, kilometre bilgisi içeren jeolojik plan-profil yeraltında imalat sırasında başvuru harita görevi görmektedir.

Yeraltı raylı sistem inşaatlarında NATM, TBM, aç-kapa uygulamalarını örnek metro hattı üzerinde inceleyen bu çalışma ile imalat detaylarına ulaşılmıştır. Bunun sonucunda TBM tek kesitte çalışırken NATM’ın sekiz farklı kesitte uygulandığı görülmüştür. TBM tünellerine izolasyon uygulaması yapılmazken NATM tünelleri için altyarı ve üstyarıda farklı olan izolasyon imalatları mevcuttur.

TBM tünellerinde prefabrik elemanlar kullanılırken (segmentler, ray altı betonu, kablo kanalları, yürüyüş yolları) NATM tünellerinde iş gücü ağırlıklı bir imalat (hidrolik kırıcı, püskürtme beton, hasır çelik vb.) söz konusudur.

TBM'lerin çalışma mesafeleri proje süresini etkileyen önemli bir parametre iken TBM sayısı da ciddi bir maliyet kalemi oluşturmaktadır. TBM normal şartlarda NATM'a göre daha hızlı bir imalat gerçekleştirmektedir. Fakat tek makineye bağlı bu imalat makine arızalarında uzun süreli aksamalar oluşturmalarının yanında güzergâh üzerinde başka imalatların devam etmesine de engel teşkil etmektedir. Projede bu optimizasyon problemi TBM destek elemanları taşınarak çözülmüştür.

Halkalı-Yeni Havalimanı metro hattı projesi yeni nesil temel su yalıtım sisteminin aç-kapa imalatlarında kullanıldığı ilk projelerden biri olma özelliğini taşımaktadır. Şu an da tek yüz perdelerde dikey olarak kullanılabilen bu sistemin tünel içine kullanılabilecek şekilde geliştirilmesi tünel imalatlarının hızlanmasına, imalat sonrası yalıtım tamiratlarının minimize olmasına imkan sağlayabilir.

Tüm uygulama yöntemlerinde yeraltı suyu en büyük payda problemi oluşturmaktayken akıcı zeminler, zemin içindeki süreksizler ve fay zonları bir diğer önemli problem kaynağıdır. Zemin içinde yer alan fay zonları ve süreksizliklerin daha çok NATM uygulamalarında sökülme ve zaman zaman yüzeye ulaşan çökmelere neden olduğu görülmüştür. TBM ise yerleşim yerleri içinde yüzeye yakın konumlarda gerçekleştirilen kazılar sırasında yapılarda oturma problemlerine sebep olmuştur.

Birçok farklı disiplinin bir arada çalışmasını gerektiren yeraltı raylı sistem inşaatlarında gerekli verilerin doğru, hızlı ve net olarak paylaşılması zaman ve maliyet başlıkları altında büyük önem arz etmektedir.

Yeraltı raylı sistemleri gibi kilometrelerce alanda farklı derinlik ve boyutlarda imalat gerektiren projelerde karstik boşluk gibi proje sahasına göre oldukça küçük alanların sondaj ile tespiti oldukça maliyetli ve zaman alıcı olacağından jeofizik yöntemlerin kullanımı imalat aşamasındaki olası problemleri ön görme ve önleme adına efektif zaman kullanımı ve tasarruf sağlayacağı açıktır.

İmalatın bir hat üzerinde dolayısıyla tek boyutta yoğunlaştığı raylı sistem projelerinde sondaj planı da çoğunlukla bu hattı takip etmektedir. İstasyon yapıları gibi ikinci boyutta imalatın yoğun olduğu bölgelerde sondajlardan elde edilen veriler yetersiz kalabileceğinden jeofizik yöntemlere baş vurulabilir. Ayrıca topoğrafya ya da yoğun yapılaşma sebebi ile sondaj açılmayan bölgelerde veri alımı jeofizik yöntemler ile yapılabilir.

Buna karşın indirek olarak gerçekleştirilen jeofizik yöntemlerin sondaj veya farklı yöntemler ile desteklenmesi gerektiği bir gerçektir. Elektrik öz direnç değerlerinin yorumlanmasının doğruya yaklaşabilmesi adına yeraltı su seviyesi varlığı, zeminlerin tabakalaşması, kaya kalitesi gibi sondajlar ile elde edebilecek temel verilere ihtiyaç duyulmaktadır.



KAYNAKLAR

- Aksu, F. (2010). *Zemin şartlandırmanın pasa basınçlı (EPB) TBM'in performansına etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aktaş, S. Ş. (2009). *Yeni Avusturya tünel açma yöntemi ile inşa edilen bir tünelin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi ve değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arioğlu, S. E. (2010). *Tünel açma makinelerinin (TBM) performansına etki eden etkenler ve kadıköy kartal tünelinde kullanılan TBM'in performansının arazi penetrasyon indisi ile kestirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Artson Geoteknik Mühendislik ve Müşavirlik (2018). *Km: 38+077 - Km: 44+700 Arası Güzergâh Jeolojik - Jeoteknik Etüt Raporu*. İstanbul.
- Artson Geoteknik Mühendislik ve Müşavirlik (2018). *Km: 44+700 - Km: 57+700 Arası Güzergâh Jeolojik - Jeoteknik Etüt Raporu*. İstanbul.
- Artson Geoteknik Mühendislik ve Müşavirlik (2018). *Km: 57+700 - Km: 62+500 Arası Güzergâh Jeolojik - Jeoteknik Etüt Raporu*. İstanbul.
- Artson Geoteknik Mühendislik ve Müşavirlik (2018). *Km: 62+500 - Km: 69+359 (Hat Sonu) Arası Güzergâh Jeolojik - Jeoteknik Etüt Raporu*. İstanbul.
- Ayaydın, N. (1996) *İstanbul metrosu 1. asama inşaatı hesap raporları*. IGT Geotechnik und Tunnelbau.
- Aygar, E. B. (2020). Evaluation of new Austrian tunnelling method applied to Bolu tunnel's weak rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(3), 541-556. doi:10.1016/j.jrmge.2019.12.011
- Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P. G., & Cardoso, A. G. (2005). EPB-TBM Face support control in the metro do porto project Portugal. *Proceedings 2005 Rapid Excavation & Tunneling Conference*, Seattle. Retrieved from www.geoengineer.org
- Berge, M. A. (2005). *İki-boyutlu öz direnç ters-çözüm modellemesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Bozkurt, M. (1987). *Tüneller ders notları*. İstanbul, İTÜ inşaat fakültesi matbaası.

- Bernard, J., & Leite, O. (2004). Multi-electrode resistivity imaging for environmental applications. *Progress in Environmental and Engineering Geophysics*, 317-322. Retrieved from <Go to ISI>://WOS:000223170000055
- Cingöz, C. A. (2013). *Natm ve tbm yöntemlerinin deneysel olarak maliyet ve süre kriterleriyle karşılaştırılması*. (Yüksek lisans tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çetinçelik, M. (1964). Dünya yeraltı metropolitenleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 10-20.
- Dey, K., & Murthy, V. M. S. R. (2011). Determining blast damage envelope through vibration model and validation using seismic imaging. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy Section a-Mining Technology*, 120(2), 90-94. doi:10.1179/1743286311y.0000000004
- DLH. (2007). *Demiryolu planlama ve tasarım teknik hesapları*. Ankara: T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü.
- Drahor, M., G., Göktürkler, G., Berge, M. A., & Kurtulmuş, Ö. T. (2004). Dört farklı elektrot dizilimine göre bazı üç-boyutlu sığ yeraltı yapılarının görünür öz direnç modellemesi. *Yerbilimleri*, 115-128.
- Emiroğlu, A. (2010). *İstanbul (4. Levent-Hacıosman arası) metro tüneline mühendislik uygulamaları* (Yüksek lisans tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Geometrik Mühendislik Müşavirlik Yeraltı Araştırmaları (2020). *İstanbul Yeni Havalimanı-Halkalı Metro Hattı Projesi TBM Güzergâhı Hat-1/Hat-2 Arası İki Boyutlu (2D) Boyutlu Elektrik Öz direnç Tomografi Jeofizik Araştırmaları*. İstanbul.
- Geometrik Mühendislik Müşavirlik Yeraltı Araştırmaları (2020). *İstanbul Yeni Havalimanı-Halkalı Metro Hattı Projesi Olimpiyatköy İstasyonu İki Boyutlu (2D) Boyutlu Elektrik Öz direnç Tomografi Jeofizik Araştırmaları*. İstanbul.
- Geometrik Mühendislik Müşavirlik Yeraltı Araştırmaları (2020). *İstanbul Yeni Havalimanı-Halkalı Metro Hattı Projesi TBM Güzergâhı İki Boyutlu (2D) Boyutlu Elektrik Öz direnç Tomografi Jeofizik Araştırmaları*. İstanbul.
- Goel, R. K., Singh, B., & Zhao, J. (2012). *Underground Infrastructures: Planning, Design, and Construction*. Birleşik Krallık: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67210-5>
- Herrenknecht. (2017). *İstanbul 3rd airport metro line*, Herrenknecht, S-1081-1084.
- Hoek, E. (1999). Putting numbers to geology-an engineer's view point. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, 1-19.
- Kemp, J. B. (2005). *Ancient Egypt*: Routledge.
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., & Herrenknecht, M. (2008). *Hardrock tunnel boring machines*. Almanya: Ernst & Sohn.

- Maidl, U. (2005, Haziran). Short course mechanical tunneling. *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Seattle.
- Mouratidis, A. (2008). The “Cut-and-Cover” and “Cover-and-Cut” techniques in highway engineering. *Ejge*, 13.
- Müller, L. (1978). Removing misconceptions on the new Austrian tunnelling method. *Tunnels & Tunnelling International*, 10, 29-32.
- NFPA 130. (2017). *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*. Amerika Birleşik Devletleri: Ulusal Yangından Korunma Derneği.
- Osmanoğlu, S. (2018). *Kahramanmaraş kılavuzlu sulama projesi Belpınar tüneline kullanılan pasa basınçlı tünel açma makinesinin (EPB-TBM) kazı performans analizi*. (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Polat, D. (2010). *Natm metodu kullanılarak tünel tasarımı ve modellenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Rabcewicz, L. V. (1965). The New Austrian Tunnelling Method. *Water Power*.
- Ramamurthy, T. (2004). A geo-engineering classification for rocks and rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1), 89-101. doi:10.1016/S1365-1609(03)00078-9
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, Wiley.
- Sauer, G. (1990). NATM in soft ground, *World Tunnelling*, 3, 431-437.
- Sauer, G. (1997). *Dr. G Sauer desing & consulting company brochure*, Dr. Sauer & Partners Ltd., 41-45.
- Singh, B., & Goel, R. K. (2011a). Geological Strength Index. *Engineering Rock Mass Classification: Tunnelling, Foundations and Landslides*, 319-334. Retrieved from <Go to ISI>://WOS:000318405000027
- Singh, B., & Goel, R. K. (2011b). Rock Mass Quality Q-System. *Engineering Rock Mass Classification: Tunnelling, Foundations and Landslides*, 85-118. Retrieved from <Go to ISI>://WOS:000318405000009
- Singh, B., & Goel, R. K. (2011c). Rock Mass Rating. *Engineering Rock Mass Classification: Tunnelling, Foundations and Landslides*, 45-62. Retrieved from <Go to ISI>://WOS:000318405000007
- Soycan, A., & Faslak, Y. (2019). Tünel inşaatında yapılan jeodezik çalışmalar ve tünel deformasyonları. *EJONS International Journal on Mathematic*, 8.
- Şahinoğlu, A. (2018). Jeofizik yöntemlerin yeraltısını kirliliği araştırmalarındaki uygulamaları. *Mühendislik Alanında Akademik Çalışmalar*, 88-89.
- TS 12127. (1997). *Şehiriçi Yollar - Raylı Taşıma Sistemleri Bölüm 1: Yeraltı İstasyon Tesisleri Tasarım Kuralları*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

- Uçar, E. (2019). *Gayrettepe–yeni havalimanı metro hattında kullanılan epb tbm için performans tahmin modellerinin geliştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Uçar, F. (2014). *2-Boyutlu rezistivite yöntemi kullanılarak karstik aktivite belirlenmesi*, (Yüksek Lisans). Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- Ulusay, R., & Sönmez, H. (2007). *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri*. Ankara: Jeoloji Mühendisleri Odası.
- Vardar, M. (1979). *Yeraltı kaya yapıları mekaniğinde yeni Avusturya tünel açma yönteminin ana ilkeleri, ankajlar ve boyutlandırılması*. Ankara: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- Vardar, M. (1985). Sürtünmeli çelik bağların yeni Avusturya tünel açma yönteminde (NATM) kullanılabilme olanakları. *Rock Mechanics Bulletin*, 3.
- Verma, H. K., Samadhiya, N. K., Singh, M., Goel, R. K., & Singh, P. K. (2018). Blast induced rock mass damage around tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 149-158. doi:10.1016/j.tust.2017.08.019
- Wahlstorm, E. (1973). *Tunneling in Rock*. Amsterdam: Elsevier.
- Young, R. P., & Howel, R. J. (1978). Kayadaki Süreksizliklerin Saptanması. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 6, 49-54.
- Url-1 <<https://madeby.tfl.gov.uk/2019/07/29/tube-trivia-and-facts/>>, erişim tarihi 21.05.2022.
- Url-2. <<https://content.tfl.gov.uk/turkish-tube-map1.pdf>>, erişim tarihi 21.05.2022.
- Url-3 <<http://web.mta.info/nyct/facts/ridership/>>, erişim tarihi 21.05.2022.
- Url-4 <<https://www.metro.istanbul/YolcuHizmetleri/AgHaritalari>>, erişim tarihi 21.05.2022.
- Url-5 <<https://www.hyhmetro.com.tr/>>, erişim tarihi 21.05.2022.
- Url-6 <<https://data.ibb.gov.tr/organization/metro-istanbul-a-s>>, erişim tarihi 21.05.2022.
- Url-7 <<https://www.ode.com.tr/epikon-proof-yeni-nesil-temel-su-yalitim-sistemi>>, erişim tarihi 29.05.2022.
- Url-8. <<https://tunnel.ita-aite.org/en/cases-histories/history/ancient-period>>, erişim tarihi 30.05.2022.
- Url-9 <https://www.imo.org.tr/Eklenti/6789,11658pdf.pdf?0&_tag1=7AF0E334E1819B747F39F5F10C2082ACE63FACA3>, erişim tarihi 30.05.2022.
- Url-10 <https://www.maden.org.tr/resimler/ekler/41dd99a69df0404_ek.pdf>, erişim tarihi 30.05.2022.

EKLER

EK A: Hatta yapılan laboratuvar ve arazi deney sonuçları.

Tablo A 1 : Dolgu tabakasına ait indeks, fiziksel ve mühendislik özellikler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	8	Refü	20
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	0,8	2	1
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	8,7	22	12,5
Permeabilite (m/s)	k	$2,8 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-4}$
Çakıl (%)	-	0	94	35
Kum (%)	-	4	19	10
Kil + Silt (%)	-	3	96	55
Likit Limit (%)	LL	40	50	46
Plastik Limit	PL	17	29	22
Plastisite İndisi	PI	21	29	24
Su İçeriği (%)	Wn	6	33	20
USCS - TS500 zemin sınıflandırması		%40 GW, %40 Cl, %20 MH		

Tablo A 2 : Orta sıkı – sıkı killi kum tabakasına ait indeks, fiziksel ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	13	Refü	29
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	1,1	2,6	1,7
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	21	155	40
Permeabilite (m/s)	k		$2,2 \times 10^{-4}$	
Çakıl (%)	-	0	24	6
Kum (%)	-	56	81	69
Kil + Silt (%)	-	19	38	25
Likit Limit (%)	LL	20	32	25
Plastik Limit	PL	12	17	14
Plastisite İndisi	PI	8	15	11
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	c	6	30	20
Kesme Kutusu Deneyi	Ø	28	34	31
USCS - TS500 zemin sınıflandırması		Ağırlıklı clSa, kısmen grclSa		

Tablo A 3 : Çok Katı Kumlu Kil (Tda) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik özellikler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	7	Refü	22
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	0,21	12,8	1,65
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	8	80	33
Permeabilite (m/s)	k	6.8x10-8	4.9x10-5	7.4x10-5
Çakıl (%)	-	0	21	2
Kum (%)	-	0	45	10
Kil + Silt (%)	-	55	100	87
Likit Limit (%)	LL	29	84	52
Plastik Limit	PL	14	29	20
Plastisite İndisi	PI	11	55	32
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	qu		139	
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	c	49	103	73
Kesme Kutusu Deneyi	Ø	5	16	9
USCS - TS500 zemin sınıflandırması		%60 CH, %40 CI-CL		

Tablo A 4 : Çok Katı – Sert Kil (Tamamen Ayrışmış Kaya) tabakasına ait indeks, fiziksel ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	16	Refü	26
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	0,3	21	3,4
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	5	240	55
Permeabilite (m/s)	k	2.2x10-6	1.1x10-4	3.4x10-5
Çakıl (%)	-	0	11	1
Kum (%)	-	0	23	4
Kil + Silt (%)	-	75	100	95
Likit Limit (%)	LL	28	82	58
Plastik Limit	PL	14	33	22
Plastisite İndisi	PI	14	54	36
Su İçeriği (%)	Wn	11	51	25
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	qu	152	316	250
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	c		51	
Kesme Kutusu Deneyi	Ø		6	
USCS - TS500 zemin sınıflandırması		%73 CH (CIH), %27 CL-CI		

Tablo A 5 : Sert Kil - Kiltası tabakasına ait fiziksel ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	33	100	83
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	56
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	5	20	12
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	66	360	225
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,3	1,4	0,8
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,3	0,5	0,4
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σc	0,84	4,15	2
Elastisite Modülü (MPa)	E	73	522	214
Poisson Oranı	v	0,2	0,34	0,3
Kaya Sabiti	mi		5	

Tablo A 6 : Çok Ayrışmış Marn-Kiltaşı tabakasına ait fiziksel ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	53	100	82
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	43
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	1,3	15,36	6
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	16	253	110
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,5	1,2	0,75
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,05	0,2	0,13
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	1,95	6,6	3,7
Elastisite Modülü (MPa)	E	196	588	343
Poisson Oranı	ν	0,3	0,33	0,32
Kaya Sabiti	mi		5	

Tablo A 7 : Orta – az ayrışmış veya ayrışmamış Marn-Kiltaşı ar dalanmasına ait fiziksel, indeks ve mekanik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	23	100	90
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	75
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	6	22	13
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	67	255	270
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,6	3,6	0,9
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,3	1,62	0,5
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	0,4	11,3	4
Elastisite Modülü (MPa)	E	100	1800	415
Poisson Oranı	ν	0,2	0,37	0,29
Üç Eksenli Basınç Deneyi (MPa)	c	0,82	1,6	1,2
Üç Eksenli Basınç Deneyi	$\emptyset$	20	24	22
Kaya Sabiti	mi		5	

Tablo A 8 : Orta – az ayrışmış veya ayrışmamış Kireçtaşı-Marn ar dalanması tabakasına ait fiziksel, indeks ve mekanik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	0	100	92
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	70
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,73	4,43	2,2
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	1,6	8,2	5,7
Elastisite Modülü (MPa)	E	500	1000	725
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	19	22,26	20,5
Kaya Sabiti	mi		6	

Tablo A 9 : Km 41+550 – 42+340 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks ve mekanik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	53	100	90
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	77
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	9,4	25	18
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	32	536	232
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,51	1,22	0,78
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	1,07	6,93	4
Elastisite Modülü (MPa)	E	229	817	512
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	19,96	23,64	21,5
Poisson Oranı	ν	0,2	0,33	0,27
Kaya Sabiti	mi		6	

Tablo A 10 : Hat-1; Km: 44+700 – Km: 45+900 arası için mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	47	100	89
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	59
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	3,3	38,6	17
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	64	1141	345
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,2	6	1
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	0,5	9	4,41
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,05	2,05	0,7
Elastisite Modülü (MPa)	E	270	1743	787
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	19,85	24,6	21,07
Poisson Oranı	ν	0,2	0,33	0,25

Tablo A 11 : Hat-1; Km: 46+820 – Km: 47+100 arası için mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	28	87	60
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	83	30
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	7	30	15
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	88	356	190
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,8	3,6	1,7
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	3,08	5,32	4
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,1	1,72	0,8
Elastisite Modülü (MPa)	E	341	916	570
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	20,72	21,76	21,1
Poisson Oranı	ν	0,27	0,33	0,31

Tablo A 12 : Hat-1; Km: 45+900 – Km: 46+820 arası için mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	72	83	80
Kaya Kalitesi (%)	RQD	64	78	74
Geçirimsizlik (Lugeon)	L		1,3	
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	1	17	10
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	12	264	141
Penetrasyon Direnci	N30	30	Refü	50
Çakıl (%)	-	0	21	3
Kum (%)	-	5	47	14
Kil + Silt (%)	-	49	95	83
Likit Limit (%)	LL	30	66	41
Plastik Limit	PL	14	25	18
Plastisite İndisi	PI	12	45	23
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	c	56	97	75
Kesme Kutusu Deneyi	Ø	6	11	9

Tablo A 13 : Hat-1; Km: 47+100 – Km: 47+220 arasında Koyunbaba Formasyonu (sert kil) ve tamamen ayrılmış andezit seviyesine ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	30	Refü	50
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	1	17	8
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	12	237	122
Permeabilite (m/s)	k	1,5 x 10-5	1,9x10-4	8,3 x 10-5
Çakıl (%)	-	0	21	3
Kum (%)	-	5	47	12
Kil + Silt (%)	-	53	95	85
Likit Limit (%)	LL	30	66	42
Plastik Limit	PL	14	22	18
Plastisite İndisi	PI	12	45	24
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	c	56	97	75
Kesme Kutusu Deneyi	Ø	6	11	9

Tablo A 14 : Hat-1; Km: 47+100 – Km: 47+220 arasında Boğazköy Andezit üyesinin tünel etki zonu içinde kalan kesimine ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	35	95	62
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	60	12
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	10	30	16
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	171	356	263
Geçirimsizlik (Lugeon)	L	2,37	7,24	4,22
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σc	9,5	66	31
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,04	1,09	0,57
Elastisite Modülü (MPa)	E	3944	13976	8358
Birim Hacim Ağırlık	γn	2380	25,66	24,85
Poisson Oranı	v	0,15	0,19	0,18

Tablo A 15 : Hat-1; Km: 47+100 – Km: 47+220 arasında Boğazköy Andezit üyesinin tünel etki zonu içinde kalan kesimine ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	20	100	77
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	43
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	2	39	17
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	34	521	185
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,75	8,26	3,25
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	22,34	26	24,5
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	2,3	85,5	32
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,05	1,09	0,5
Elastisite Modülü (MPa)	E	400	13976	6500
Poisson Oranı	ν	0,1	0,27	0,15

Tablo A 16 : Hat:1; Km: 47+220 – Km: 47+296 ve Km: 47+476 – Km: 47+800 arası için mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	20	100	77
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	43
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	2	39	17
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	34	521	185
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,75	8,26	3,25
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	22,34	26	24,5
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	2,3	85,5	32
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,05	1,09	0,5
Elastisite Modülü (MPa)	E	400	13976	6500
Poisson Oranı	ν	0,1	0,27	0,15

Tablo A 17 : Hat-1; Km: 47+800 – Km: 48+700 arası için mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	42	100	78
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	30
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	8	12	11
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	145	213	178
Geçirimlilik (Lugeon)	L	1	20	3,5
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	22,1	26,5	24,12
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	1	53	24
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,03	1	0,35
Elastisite Modülü (MPa)	E	350	13700	6150
Poisson Oranı	ν		0,33	

Tablo A 18 : Hat-1; Km: 48+760 – Km:49+450 arası için mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	48	90	76
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	36	11
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	13	30	23
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	180	253	224
Geçirimlilik (Lugeon)	L	7,5	22,5	15
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	23	27,3	26
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	11	95	37
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,62	1,77	1,09
Elastisite Modülü (MPa)	E	1653	17880	7275
Poisson Oranı	ν	0,19	0,21	0,21

Tablo A 19 : Hat-1; Km: 49+450 – Km: 50+200 aralığı mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	40	100	66
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	80	10
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	1	21	12
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	36	328	190
Geçirimlilik (Lugeon)	L	1	17	5
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c		7	
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,3	0,9	0,5
Elastisite Modülü (MPa)	E		2211	
Birim Hacim Ağırlık	γ_n		25	
Poisson Oranı	ν		0,26	

Tablo A 20 : Hat-1; Km: 50+200 – Km: 50+600 arası için mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	63	100	77
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	57	13
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	13	22	18
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	145	279	229
Geçirimlilik (Lugeon)	L	2	30	16
Birim Hacim Ağırlık	γ_n		24,12	
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c		14	
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,44	0,7	0,6
Elastisite Modülü (MPa)	E		5050	
Poisson Oranı	ν		0,15	

Tablo A 21 : Hat-1; Km: 50+600 – Km: 54+000 arası için mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	0	100	74
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	91	31
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	4	33	15
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	77	460	240
Geçirimlilik (Lugeon)	L	4	17	9
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	23,4	28,2	26,00
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	5	75	28
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,25	2,03	0,94
Elastisite Modülü (MPa)	E	808	11117	5500
Poisson Oranı	ν	0,13	0,31	0,21

Tablo A 22 : Hat-1; Km: 54+180 – Km: 54+400 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks vemekanik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	24	98	64
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	93	36
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	2,4	21,9	10
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	63	305	210
Geçirimlilik (Lugeon)	L	3	4	3
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	14	19	17
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,36	0,64	0,47
Elastisite Modülü (MPa)	E	1693	2296	1828
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	24,7	24,8	24,75
Poisson Oranı	ν	0,15	0,19	0,17

Tablo A 23 : Hat-1; Km: 54+600 – Km: 55+500 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks vemekanik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	36	100	75
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	98	22
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	10	24	16
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	121	310	230
Geçirimlilik (Lugeon)	L	1	4	2
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	2	56	16
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,34	0,99	0,58
Elastisite Modülü (MPa)	E	662	6719	2874
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	24,8	26,7	25,75
Poisson Oranı	ν	0,19	0,29	0,23

Tablo A 24 : Hat-1 Km: 55+500 – Km: 55+800 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks vemekanik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	20	95	52
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	80	6
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	1	18	9
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	18	410	203
Geçirimlilik (Lugeon)	L	3	11	8
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	25	43	36
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,52	0,54	53
Elastisite Modülü (MPa)	E	6332	7114	6690
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	24,5	26,9	25,7
Poisson Oranı	ν	0,2	0,22	0,21

Tablo A 25 : Hat-1 Km: 55+800 – Km: 57+300 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks vemekanik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	32	100	80
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	43
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	11	22	15
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	198	416	290
Geçirimlilik (Lugeon)	L	3	49	12
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	9	93	19
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,52	2,69	1,16
Elastisite Modülü (MPa)	E	2472	12421	5466
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	24	27	25,7
Poisson Oranı	ν	0,16	0,31	0,21

Tablo A 26 : Hat-1 Km: 57+300 – Km: 57+700 aralığında tünel etki zonuna ait fiziksel, indeks vemekanik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	73	100	99
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	77	22
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	611	21337	4490
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	3,8	9,5	5,6
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	σ_c	4	31	15
Elastisite Modülü (MPa)	E	3000	13800	7033
Birim Hacim Ağırlık	γ_n	26,8	27,5	27

Tablo A 27 : Fay zonlarına ait kısıtlı veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30			>50
Kaya Kalitesi (%)	RQD		0	
Geçirimlilik (Lugeon)	L	2	11	7,5
Çakıl (%)	-	0	36	16
Kum (%)	-	38	82	58
Kil + Silt (%)	-	7	44	26
Likit Limit (%)	LL	23	30	26
Plastik Limit	PL	12	17	15
Plastisite İndisi	PI	8	13	11
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	c	5	29	20
Kesme Kutusu Deneyi	Ø	30	39	33
Sınıflama (USCS, TS500, İSO 14688-2)	clSa, grclSa, grsiSa, SM, SC, Gp, Gc			

Tablo A 28 : Dolgu tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	2	Refü	20
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	0,4	2,7	1,2
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	5	50	18
Permeabilite (m/s)	k	3,22 x 10-6	3,78 x 10-3	6,5 x 10-4
Çakıl (%)	-	0	62	24
Kum (%)	-	0	83	26
Kil + Silt (%)	-	1,2	86	50
Likit Limit (%)	LL	20	57	37
Plastik Limit	PL	12	27	18
Plastisite İndisi	PI	6	33	19
Su İçeriği (%)	Wn	6	33	20
USCS - TS500 Zemin Sınıflaması	%50 NP, %30 Cl %12 GC-GM, %5 SM-SC, %3 diğer.			

Tablo A 29 : Çok Katı Kumlu Kil (Alüvyon) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	14	26	18
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	0,6	1,8	0,8
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	20	23	21
Permeabilite (m/s)	k	8,2 x 10-5	2,5 x 10-4	1,65 x 10-4
Çakıl (%)	-	0	20	7
Kum (%)	-	10	25	16
Kil + Silt (%)	-	64	89	77
Likit Limit (%)	LL	30	47	36
Plastik Limit	PL	14	17	16
Plastisite İndisi	PI	13	31	20
USCS - TS500 Zemin Sınıflaması	Genel olarak CL			

Tablo A 30 : Çakıllı Kumlu Sert Kil- Çakıllı Killi Sıkı Kum (Tik) Tabakasına ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	13	Refü	35
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	0,2	5,5	1,6
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	5	114	26
Permeabilite (m/s)	k	7,6 x 10-7	1,72 x 10-3	2,63 x 10-4
Çakıl (%)	-	0	91	18
Kum (%)	-	1	85	31
Kil + Silt (%)	-	4	99	51
Likit Limit (%)	LL	22	78	38
Plastik Limit	PL	11	34	17
Plastisite İndisi	PI	8	48	21
Su İçeriği (%)	Wn	10	46	39
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	cu	27	32	30
Kesme Kutusu Deneyi	Ø	28	29	29
USCS - TS500 Zemin Sınıflaması	Genel olarak CL-SC, daha az GC-GM-GW, CH çok az SM			

Tablo A 31 : Sert kumlu kil (Tamamen Ayrışmış Kaya) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mekanik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	18	Refü	40
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	0,6	6	3
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	14	198	74
Permeabilite (m/s)	k	3,7 x 10-8	2,3 x 10-4	6,4 x 10-5
Çakıl (%)	-	1	57	14
Kum (%)	-	5	65	31
Kil + Silt (%)	-	13	93	54
Likit Limit (%)	LL	30	49	38
Plastik Limit	PL	13	25	20
Plastisite İndisi	PI	11	26	18
Su İçeriği (%)	Wn	8	27	18
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	c	82	85	84
Kesme Kutusu Deneyi	Ø	7	11	9
USCS - TS500 Zemin Sınıflaması	%51 CL-CI, %44 SC SM ve %5 GC-GM			

Tablo A 32 : Karstik dolgulara (Kd) ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	4	Refü	15
Çakıl (%)	-	0	27	7
Kum (%)	-	3	56	32
Kil + Silt (%)	-	18	97	61
Likit Limit (%)	LL	26	95	45
Plastik Limit	PL	16	25	19
Plastisite İndisi	PI	9	70	26

Tablo A 33 : Fay zonları için beklenen veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	50	30	15 - 50
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	0	0
Beklenen Ortam Özelliği		Çok Zayıf Kaya- Sıkı Zemin	Çok Katı - Killi Zemin	Çok Zayıf Kaya- Sıkı Zemin
Diğer özellikler		Parçalı, ezik, milonitik kaya, fay breşi vb, artan su girişleri	Killeşmiş kaya	Parçalı, ezik kaya, ayrışma, erime boşlukları, karstik dolgu, artan su girişleri

Tablo A 34 : Soğucak kireçtaşı kaya biriminin çok – orta derecede ayrılmış kesimlerine ait veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	0	100	65
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	8
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	1,2	14	4,2
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	38	796	242
Geçirimlilik (Lugeon)	L	1,7	22,5	8,5
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,19	2,45	1,02
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c	1,36	24	10
Elastisite Modülü (MPa)	E	2290	9900	4500
Poisson Oranı	ν	0,2	0,34	0,27
Birim Hacim Ağırlık (kN/m3)	γ_n	19,95	24,8	21,12
Kaya Sabiti	mi		7	

Tablo A 35 : Soğucak kireçtaşı kaya biriminin az ayrılmış, orta – sıkı kırıklı kesimlerine ait veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	17	100	83
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	50
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	1,9	16,2	5,8
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	81	1345	522
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,2	24	7,8
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,71	3,85	1,8
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c	3	42	16
Elastisite Modülü (MPa)	E	700	19500	5100
Poisson Oranı	ν	0,17	0,26	0,21
Birim Hacim Ağırlık (kN/m3)	γ_n	19,95	24,8	23,00
Kaya Sabiti	mi		7	

Tablo A 36 : Kumtaşı-kiltaşı ardalaşmasına (Tk) ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	43	100	92
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	55
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	1,2	6,9	3,4
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	19	406	165
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,10	21	5,4
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,31	1,18	0,8
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c	1	27	7
Elastisite Modülü (MPa)	E	100	8200	2025
Poisson Oranı	ν	0,16	0,31	0,24
Birim Hacim Ağırlık (kN/m3)	γ_n	18,6	25,1	22,10
Kaya Sabiti	mi		5	

Tablo A 37 : Çok – Orta derecede ayrıışmış kumtaşı-şeyl kaya seviyesine ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	17	100	66
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	70	8
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	1,8	4,6	3,3
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	43	857	226
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,50	39	5
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,15	1,27	0,44
Kaya Sabiti	mi		7	

Tablo A 38 : Az ayrıışmış- taze (W2-W1) kaya seviyesine ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	29	100	78
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	18
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	3	43	13
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	102	4784	968
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,35	12,4	5
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,6	14	1,64
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c	10	80	32
Elastisite Modülü (MPa)	E	1722	14710	7300
Poisson Oranı	ν	0,10	0,28	0,2
Birim Hacim Ağırlık (kN/m3)	γ_n	20,6	28,00	25,50
Kaya Sabiti	mi		7	

Tablo A 39 : Dolgu tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	2	Refü	12
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	0,2	2,3	0,9
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	2	39	13
Permeabilite (m/s)	k	3,2 x 10-5	8,9 x 10-4	2,2 x 10-4
Çakıl (%)	-	0	78	28
Kum (%)	-	3	48	24
Kil + Silt (%)	-	10	91	48
Likit Limit (%)	LL	22	71	42
Plastik Limit	PL	14	28	21
Plastisite İndisi	PI	6	44	21
USCS - TS500 Zemin Sınıflaması	%55 düşük – yüksek plastik, %45 Non Plastik			

Tablo A 40 : Çok Katı Kumlu Kil (Alüvyon) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	6	33	14
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	0,3	47	1,2
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	4	29	11
Permeabilite (m/s)	k	4,1 x 10-5	2,9 x 10-4	1 x 10-4
Çakıl (%)	-	0	34	3
Kum (%)	-	3	61	21
Kil + Silt (%)	-	36	97	75
Likit Limit (%)	LL	27	86	48
Plastik Limit	PL	16	35	22
Plastisite İndisi	PI	10	61	26
Birim Hacim Ağırlık (kN/m3)	γ _n		19	
Üç Eksenli Basınç Deneyi (UU)	cu		55	
	Ø		4	
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	c	55	80	67
Kesme Kutusu Deneyi	Ø	4	12	8
USCS - TS500 Zemin Sınıflaması	Genel olarak CL-CH, kısmen MH, SM vb			

Tablo A 41 : Çok katı kumlu kil (Örtü) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	6	Refü	22
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	0,5	5,3	1,8
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	7	22	13
Permeabilite (m/s)	k	1 x 10 ⁻⁷	1,5 x 10 ⁻⁴	4,8 x 10 ⁻⁵
Çakıl (%)	-	0	66	9
Kum (%)	-	0	69	20
Kil + Silt (%)	-	15	100	71
Likit Limit (%)	LL	22	96	46
Plastik Limit	PL	12	31	21
Plastisite İndisi	PI	8	70	26
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	γ _n	18,7	19,5	19
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	qu		158	
Üç Eksenli Basınç Deneyi (UU)	cu	66	69	68
	Ø	6	8	7
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	c	13	77	55
Kesme Kutusu Deneyi	Ø	10	37	21
USCS - TS500 Zemin Sınıflaması		CL-CI-CH %77, SC SM ve SM %23		

Tablo A 42 : Çok katı – sert kumlu kil (Tdg-1) tabakasına ait fiziksel, indeks ve mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Penetrasyon Direnci	N30	8	Refü	33
Net Limit Basınç (Mpa)	Pl	1,3	4,3	3,2
Presiyometrik Modül (Mpa)	Ep	14	90	48
Permeabilite (m/s)	k	2,7 x 10 ⁻⁷	6,9 x 10 ⁻⁵	1,9 x 10 ⁻⁵
Çakıl (%)	-	0	56	4
Kum (%)	-	1	75	27
Kil + Silt (%)	-	10	99	69
Likit Limit (%)	LL	27	80	57
Plastik Limit	PL	14	44	29
Plastisite İndisi	PI	5	51	28
Üç Eksenli Basınç Deneyi (UU)	cu	89	106	97
	Ø	9	15	12
Kesme Kutusu Deneyi (kPa)	c		87	
Kesme Kutusu Deneyi	Ø		10	
USCS - TS500 Zemin Sınıflaması		Ağırlıklı CH-MH, daha az SM – SC, çok az ML		

Tablo A 43 : Sert kil – kilaşı (Tdg-2) tabakasına ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	60	100	75
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	87	50
Geçirimsizlik (Lugeon)	L	0,8	60	19
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c	2,6	5	3,6
Elastisite Modülü (MPa)	E	218	425	314
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	γ_n	20	21	20
Kaya Sabiti	mi		5	

Tablo A 44 : Çok ayrılmış marn-kilaşı-kalkarenit (Tc-1) kaya seviyesine ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	12	100	75
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	81	34
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	25	15	10
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	53	221	156
Geçirimsizlik (Lugeon)	L	0,74	1,45	1
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,1	1,5	0,6
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c	1,5	5,4	3
Elastisite Modülü (MPa)	E	78	683	365
Poisson Oranı	ν	0,19	0,36	0,31
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	γ_n	20,00	23,50	21,40
Kaya Sabiti	mi		7	

Tablo A 45 : Az-orta ayrılmış veya ayrılmamış marn-kilaşı-kalkarenit (Tc-2) kaya seviyesine ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	30	100	84
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	65
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	4,2	23	13
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	138	434	232
Geçirimsizlik (Lugeon)	L	0,10	58	4,6
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,03	1,92	0,6
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c	1	27	6
Elastisite Modülü (MPa)	E	160	7110	1334
Poisson Oranı	ν	0,1	0,36	0,27
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	γ_n	18,00	26,00	22,00
Kaya Sabiti	mi		7	

Tablo A 46 : Kireçtaşı (Tsğ-1) kaya birimine ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	0	100	70
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	100	25
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	4,1	25	12
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	114	606	287
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,60	41	5
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,65	1,98	1,1
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c	2	38	10
Elastisite Modülü (MPa)	E	300	9316	2422
Poisson Oranı	ν	0,13	0,24	0,19
Birim Hacim Ağırlık (kN/m3)	γ_n	19,40	25,00	22,00
Kaya Sabiti	mi		9	

Tablo A 47 : Kireçtaşı-Kalkarenit Ardalaşmasına (Tsğ-2) ait mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	20	100	65
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	91	15
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	4	22	12
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	136	617	277
Geçirimlilik (Lugeon)	L	0,80	15	11,3
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,15	3,37	1,21
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c	1,4	28,2	10
Elastisite Modülü (MPa)	E	221	7600	2231
Poisson Oranı	ν	0,13	0,3	0,2
Birim Hacim Ağırlık (kN/m3)	γ_n	20,00	24,80	22,00
Kaya Sabiti	mi		7	

Tablo A 48 : Ezik Zon için derlenen mühendislik veriler.

Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama
Toplam Karot Verimi (%)	TCR	40	100	70
Kaya Kalitesi (%)	RQD	0	81	8
Net Limit Basınç (MPa)	Pl	4,1	38,5	27
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	127	372	265
Geçirimlilik (Lugeon)	L	7,00	41	15
Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (Mpa)	Is(50)	0,06	2,36	0,81
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	σ_c	2,63	34,76	12
Elastisite Modülü (MPa)	E	1307	4700	3000
Poisson Oranı	ν	0,18	0,33	0,27
Birim Hacim Ağırlık (kN/m3)	γ_n	21,00	25,00	23,00
Kaya Sabiti	mi		9	