T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAHMUTBEY-MECİDİYEKÖY (İSTANBUL) METRO TÜNELİNDE DEĞİŞEN LİTOLOJİDE TÜNEL AÇMA MAKİNASI (TBM) PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih KARA

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. M. Murat KAVURMACI

AKSARAY, 2017

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ONAY BELGESİ

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 122302001 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, "Fatih KARA", ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "MAHMUTBEY-MECİDİYEKÖY (İSTANBUL) METRO TÜNELİNDE DEĞİŞEN LİTOLOJİDE TÜNEL AÇMA MAKİNASI (TBM) PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Yrd. Doç. Dr. M. Murat KAVURMACI** **Aksaray Üniversitesi**	**....…….**
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Mutluhan AKIN** **Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi**	**.....**
Jüri Üyeleri :	**Yrd. Doç. Dr. Ahmet Orhan** **Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi**	**.....**

Teslim Tarihi: 2 Mayıs 2017

Savunma Tarihi: 23 Mayıs 2017

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ve bu eserleri her kullanışımda alıntı yaparak yararlandığımı belirtir; bunu şerefimle doğrularım.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Fatih KARA

İmza

ÖNSÖZ

Son yüzyılda özellikle metropollerde artan nüfus yoğunluğuna bağlı olarak gelişen trafik probleminin önüne geçmek ve ulaşımı daha hızlı hale getirebilmek için raylı altyapı çalışmaları oldukça önem kazanmıştır. Ülkemizin en kalabalık şehri olan İstanbul'un trafik sorununu çözmek için yeni metro hatları inşa edilmekte ve bu hatların inşasında daha popüler ve pratik olan mekanize kazı sistemleri kullanılmaktadır. İstanbul için, bu mekanize kazı sistemleri içerisinde İstanbul'un karmaşık jeolojisine en uygun olan tam cepheli tünel açma makinaları (EPB - TBM) çoğunlukla tercih edilmektedir.

Mekanize kazı sistemlerinde, kazı performansı, kazı maliyetinin düşmesi ve makinenin etkin kullanımı gibi düşünceler makine tercihinin önemini artırmıştır. Bu tezde, İstanbul Büyükşehir Belediyesinin Raylı Sistemler Başkanlığı, Avrupa Yakası Müdürlüğü'nün yaptırdığı Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Tüneli İnşaatının Terratec TBM ile yapılan kısmı ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, farklı litolojilerde TBM'nin kazı sırasında elde ettiği sayısal verilerden yola çıkarak, parametreler ayrı ayrı incelenmiş ve TBM'nin kazı performansı değerlendirilmiştir.

Bu çalışma aynı zamanda, Türkiye'de Terratec marka TBM'nin kazı çalışmasında ilk olarak kullanılmasından dolayı, Terratec marka TBM'nin de Türkiye'deki ilk performans değerlendirmelerinden birisidir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana destek olup yardımlarını esirgemeyen, tez danışmanım ve değerli hocam Yrd. Doç. Dr. M. Murat KAVURMACI'ya, tezimin başlangıcından bitimine kadar bana her zaman yardımcı ve destek olan, tecrübelerini paylaşan iş arkadaşlarım Uğur ATEŞ ve İrfan Serkan BİNEN'e; tezim için gerekli belgelerin sağlanmasında yardımcı olan TBM tünel şefim Sinan ACUN'a; yüksek lisans öğrenimim boyunca gelişmeme katkıda bulunan değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Gökhan DEMİRELA ve Doç. Dr. Mehmet Emin KARA'ya; tez ve seminer çalışmalarımda ilgili belgelerin paylaşımlarını esirgemeyen Tülay ÇİNAR ve Mehmet Ali BERK'e ve beni bu yaşa kadar büyüten, vatanına ve milletine bağlı, ülkesine katkı sağlayan bir birey olarak yetiştiren aileme en içten sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Fatih KARA

Aksaray, Mayıs 2017

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ…….	**ii**
TEŞEKKÜR…..	**iii**
İÇİNDEKİLER DİZİNİ……..	**iv**
ÖZET.....	**vi**
ABSTRACT…..	**vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	**viii**
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	**x**
SİMGELER DİZİNİ…….....	**xi**
KISALTMALAR DİZİNİ…….....	**xii**
1. GİRİŞ…….....	**1**
1.1 Çalışmanın Amacı ve Önemi	2
1.2 Çalışma Alanının Tanıtılması…….....	2
1.3 Önceki TBM Çalışmaları.....	3
2. MATERYAL ve YÖNTEM……	**7**
2.1 Literatür Çalışmaları.....	7
2.2 Arazi Çalışmaları ve Laboratuvar Çalışmaları.....	7
2.3 Büro Çalışmaları.....	7
3. JEOLOJİ……..……	**9**
3.1 Genel Jeoloji.....	9
3.1.1Trakya formasyonu (Ct).....	10
3.1.2 Çekmece formasyonu Güngören üyesi (Tçg).....	11
3.1.3 Çekmece formasyonu Çukurçeşme üyesi (Tçç)……..	13
3.1.4 Alüvyon……..	13
3.2 Yapısal Jeoloji.....	14
3.3 Depremsellik…….....	16
3.4 Hidrojeoloji……...	17
4. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ……..…….....	**20**
4.1 Araştırma Sondajları...……...……...	20
4.1.1 Standart Penetrasyon Testleri ……	20
4.1.2 Presiyometre Testleri …..…….....	21
4.1.3 Basınçlı Su Testleri (BST, Paker Testi)…….....	22
4.2 Güzergâhta Yer Alan Zemin ve Kaya Birimlerinin Mühendislik Özellikleri..	24
4.2.1 Zemin niteliğindeki ortamlar …….....	24
4.2.2 Kaya nitelikteki ortamlar…….…….……....	29

5. JEOTEKNİK DEĞERLENDİRME……..……..……..... 33
5.1 Zemin - Kaya Birimlerinin Tünel Kazısı Açısından Sınıflandırmaları …..... 33
5.1.1 Zemin ve diyajenezini tamamlamamış birimlerinin tünelcilik açısından sınıflandırılması……..... 33
5.1.2 Kaya birimlerinin tünelcilik açısından sınıflandırılması ……..……. 34
5.1.2.1 Farklı ayrışma düzeyleri için kaya kütle sınıflandırmaları……..... 35
5.1.2.2 Sondaj noktalarında tünel etki zonu için kaya kütle sınıflandırmaları... 35
5.2 Kazılabilirlik ve Aşındırma.……..……..... 37
5.3 Yeraltı Suyu – Tünel İlişkisi …….……... 37
5.4 Tasarım (Projelendirme) Parametreleri …..……..……..... 39
6. TAM CEPHELİ TÜNEL AÇMA MAKİNELERİ (TBM) …..……..…….. 40
6.1 TBM Genel Özellikleri..... 41
6.2 TBM Sınıflandırması..... 43
6.2.1 Sert kayaç tünel açma makineleri..... 43
6.2.2 Yumuşak zemin tünel açma makineleri..... 45
6.3 Projede Kullanılan ve Tez'e Konu Olan TBM Özellikleri……... 47
7. DEĞİŞEN LİTOLOJİDE TERRATEC TBM'İN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ..... 49
7.1 Giriş.……..……..... 49
7.2 İtme Kuvvetine Ait Değerlendirmeler……..... 50
7.3 EPB'ye Ait Değerlendirmeler …… 53
7.4 Torka Ait Değerlendirmeler……... 59
7.5 Rpm'e Ait Değerlendirmeler..... 60
7.6 Köpük Tüketimine Ait Değerlendirmeler..... 62
7.7 Kesici Kafa Elektrik Akımına Ait Değerlendirmeler..... 66
7.8 İlerleme Hızı ve Penetrasyona Ait Değerlendirmeler..... 68
8. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 71
KAYNAKLAR..... 73
EKLER..... 77
ÖZGEÇMİŞ..... 88

ÖZET

MAHMUTBEY-MECİDİYEKÖY (İSTANBUL) METRO TÜNELİNDE DEĞİŞEN LİTOLOJİDE TÜNEL AÇMA MAKİNASI (TBM) PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu araştırmanın konusu, İstanbul Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro tünel hattında kullanılan EPB - TBM makinesinin (arazi basınç dengeleme - tam cepheli tünel açma) değişen litolojideki kazı performansının analizidir. Elde edilen sayısal veriler kullanılarak çizilen grafiklerle kazı performansının değişen litolojideki ayrı ayrı TBM parametreleri incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Tez kapsamında üç farklı formasyondan geçen Terratec TBM, kil oranı yüksek siltli birimlerde maksimum hıza ulaşmıştır. Kaya kalitesinin daha düşük olduğu, geçirimsiz, boşluk oranı yüksek birimlerde EPB değerlerinin daha yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. Kil gibi yapışkanlık özelliği yüksek zeminlerde ise köpük tüketiminin maksimuma ulaştığı görülmüştür. Kumtaşı gibi sert zeminlerde, RQD değeri yüksek zeminlerde kesici kafada motorlarının elektriksel akım çekimi de en yüksek değerlere ulaşmıştır. Buna bağlı olarak itme kuvveti ve tork değerleri de en yüksek değerde seyretmiştir. Kohezyon oranı yüksek birimlerde itme kuvveti ve tork değerinin de daha yüksek seyrettiği belirlenmiştir.

Yer yüzeyini dengeleyici basınç altında kazı yapmaya imkan tanıyan EPB – TBM'ler özellikle İstanbul jeolojine uygun olarak kazı yapmaya elverişlidir. Projede kullanılan TBM'nin de EPB makinası olması kazılarda kolaylık sağlamış ve daha da önemlisi güvenli çalışma ortamı oluşturmuştur. Köpük tercihlerinin zemine uygun şekilde uygulanması da kazılarda verimliliği artırmıştır.

Anahtar Kelimeler: TBM, TBM Parametreleri, Litoloji, Metro Tüneli, İstanbul.

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF TBM IN DIFFERENT GEOLOGICAL CONDITIONS FOR MAHMUTBEY – MECIDIYEKOY (ISTANBUL) METRO PROJECT

Subject of this study is analyzing the excavation performance of EPB/TBM (earth pressure balancing/full face tunnel boring machine) used in Istanbul Mahmutbey-Mecidiyekoy Metro tunnel during transitive lithological conditions. TBM parameters and excavation performance in transitive lithological conditions have been investigated and evaluated with the help of numerical data and graphics.

In the scope of the study, Terratec TBM has gone through 3 different formations. Maximum advance rate has been achieved in silty units that have high clay content. It was observed that higher EPB values have been used in units that have lower rock quality degree, higher void ratio and permeability. It was also seen that foam consumption has been maximized in clay like zones which has adhesion property. In hard ground with high RQD such as sandstone, electrical current which has been fed to the electrical engines of the cutter head reached the highest values. As a result, thrust and torque forces have also shown peak values. In general, it was found that thrust and torque forces are relatively higher for units that have high cohesion.

EPB TBMs which make it possible to excavate under pressure to minimize surface settlements are suitable for the geological conditions especially available in Istanbul. The fact that the TBM which was used in the project is an EPB type machine has offered some great benefits during the excavations and more importantly provided a safer working environment. Adequate application and selection of foam type and quantity regarding the properties of the ground has increased the efficiency.

Keywords: TBM, TBM Parameters, Lithology, Metro Tunnel, Istanbul.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1: Mecidiyeköy – Mahmutbey metro güzergâhının konumu (URL1'den alınmıştır)..…….. 2
Şekil 1.2: TBM ve NATM kazı istasyonları..……. 3
Şekil 3.1: Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları arası jeolojik kesit (Polat, 2015)…… 10
Şekil 3.2: Trakya formasyonuna ait kumtaşlarından alınan karot örnekleri…… 11
Şekil 3.3: Kumtaşı örneğinin çift nikol mikroskop görünümü…… 11
Şekil 3.4: Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arası jeolojik kesit (Polat, 2015)…….. 12
Şekil 3.5: Güngören üyesine ait kiltaşlarının görünümü (Polat, 2015)…….. 12
Şekil 3.6: Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları arası jeolojik kesit (Polat, 2015)…… 13
Şekil 3.7: Çukurçeşme üyesine ait silttaşı ve kumtaşlarının görünümü (Polat, 2015)..……... 13
Şekil 3.8: Yenimahalle - Kazımkarabekir istasyonları arası tüm süreksizlikler (Polat, 2015).……... 15
Şekil 3.9: Kuzey Anadolu Fayının (KAF) Marmara denizi içindeki konumu (Polat, 2015).……... 16
Şekil 3.10: İstanbul ili deprem bölgeleri haritası (URL-2)…… 17
Şekil 3.11: 1. Hatta mesafeye bağlı olarak yass değişimi..... 19
Şekil 4.1: MMT-39'a ait sondaj karot örnekleri (Polat, 2015)…….. 28
Şekil 4.2: MMT-40'a ait sondaj karot örnekleri (Polat, 2015)..... 28
Şekil 6.1: İlk tünel açma makinesi (TBM) (Maidl ve diğ., 2013)……..…. 40
Şekil 6.2: TBM kesit görünüşü (Ateş, 2013).……..... 41
Şekil 6.3: Kalkansız tünel açma makinesi (Ateş, 2013).……. 43
Şekil 6.4: Tek kalkanlı TBM (Ateş, 2013)…….. 44
Şekil 6.5: Çift kalkanlı TBM (Ateş, 2013).……. 44
Şekil 6.6: Slurry tipi TBM (Ateş, 2013)..……..…….. 45
Şekil 6.7: EPB - TBM çalışma prensibi (Mooney ve diğ., 2012)…… 46
Şekil 6.8: EPB - TBM (Ateş, 2013).……... 46
Şekil 6.9: Terratec TBM.……. 47
Şekil 6.10: Lovat TBM (sol), Herrenknecht TBM (sağ)...…… 47
Şekil 7.1: Formasyonların proje güzergâhı üzerindeki yüzdelik dağılımı.……. 50
Şekil 7.2: Ortalama itme kuvvetinin litolojiye göre dağılımı.……. 51
Şekil 7.3: Kabul edilen kayma mekanizması (Horn, 1961)…… 54

Sayfa

Şekil 7.4: Bir EPB uygulamasında su sızma kuvveti f ve efektif destek basıncı s' (σ') (Bilgin, 2016)……. 55
Şekil 7.5: F_{0-3} boyutsuz katsayıları için nomogramlar (Bilgin, 2016)…… 56
Şekil 7.6: Ortalama EPB (bar)'nin litolojiye göre dağılımı…… 57
Şekil 7.7: Ortalama tork'un litolojiye göre dağılımı…….. 58
Şekil 7.8: Ortalama rpm'in değişen litolojiye göre dağılımı…….. 62
Şekil 7.9: Ortalama köpük tüketiminin değişen litolojiye göre dağılımı……... 65
Şekil 7.10: Ortalama CH akım'ın değişen litolojiye göre dağılımı……. 67
Şekil 7.11: Ortalama ilerleme hızı'nın değişen litolojiye göre dağılımı…….. 69
Şekil 7.12: Ortalama penetrasyo'nun değişen litolojiye göre dağılımı…… 70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Güzergâh boyunca, tünel kazı kotunda geçilen kaya ve zemin birimleri (Mesafeler Hat-1'e göre verilmiştir) (Polat, 2015)……... 9

Çizelge 3.2: Tünel kazısında geçilen baskın litolojilerin Hat-1'e göre kabaca dağılımı (Hat 2 için de kabaca benzer aralıklar geçerlidir) (Polat, 2015)…… 14

Çizelge 3.3: İstanbul iline ait uzun yıllar (1926 – 2016) içinde gerçekleşen meteorolojik veriler (URL-3)....…….. 17

Çizelge 3.4: Veysel Karani - Yenimahalle İstasyonu arası güzergâhında yeraltı su seviyeleri (Polat, 2015)...……...…… 19

Çizelge 4.1: Presiyometre test sonuçları (Polat, 2015).…….. 22

Çizelge 4.2: Kayaçların Lugeon yöntemine göre geçirimlilik sınıflaması..…… 22

Çizelge 4.3: Test sonuçlarına göre güzergâhta karşılaşılması beklenen kaya biriminin geçirimlilik düzeyleri (Polat, 2015).……...……. 23

Çizelge 4.4: Orta sıkı – sıkı kum ara tabakalı çok katı – sert siltli kil (3a) tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri (Polat, 2015).……... 25

Çizelge 4.5: Sert kil / siltli kil ve kiltaşı ardalanması, az kumlu (4) tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri (Polat, 2015)..... 26

Çizelge 4.6: Kil ara seviyeli, orta sıkı - sıkı kum / siltli kum (6) tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri (Polat, 2015).…….. 27

Çizelge 4.7: Sıkı – çok sıkı siltli kum, kumtaşı (7) tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri (Polat, 2015).…… 29

Çizelge 4.8: Çok – orta derecede ayrışmış kumtaşı - şeyl kesimine ait mühendislik verileri (Polat, 2015)..……. 30

Çizelge 4.9: Az ayrışmış veya ayrışmamış kumtaşı - şeyl kesimine ait mühendislik verileri (Polat, 2015)...…… 31

Çizelge 4.10: Sondaj noktalarında, tünel etki zonu içinde kalan kaya - zemin kesimlerine ait bazı mühendislik verileri (Polat, 2015)…….. 32

Çizelge 5.1: Güzergâh geneli için ayrışma düzeylerine dayalı kaya kütle sınıflaması (Polat, 2015)…….... 35

Çizelge 5.2: Sondaj noktalarında, tünel etki zonu için kaya kütle sınıflaması (Polat, 2015)…… 36

Çizelge 5.3: Cerchar Aşındırma İndeksine bağlı Trakya formasyonunun aşındırıcılık durumu (Polat, 2008)……...…… 37

Çizelge 5.4: Değişen formasyonlarda yeraltı su seviyesi ile tünel kotu ilişkisi ….. 38

Çizelge 5.5: Tünel güzergâhında yer alan zemin – kaya birimleri için önerilen (Tavsiye edilen) tasarım (Projelendirme) parametreleri (Polat, 2015) 39

Çizelge 6.1: Projedeki TBM'lerin özellikleri.…….. 48

Çizelge 7.1: TBM parametrelerinin formasyonlara göre dağılımı……... 49

Çizelge 7.2: Terratec TBM'in elektriksel teknik özellikleri.……..... 67

SİMGELER DİZİNİ

A	Akım
A^0	Etkin yer ivme katsayısı
c	Kohezyon
D	Tünel çapı
Ep	Presiyometre modülü
H	Örtü tabakası kalınlığı
h_0	Yeraltı suyu seviyesi
h_F	Basınç odasındaki piezometrik basınç
Hz	Herz
H/D	Geometrik parametreler
kN	Kilonewton
Km	Kilometre
lt	Litre
M	Deprem büyüklüğü
MPa	Megapascal
N	Penetrasyon direnç
P	Güç
Po	Zemin içsel basıncı
p	Faz
q	Poisson oranı
q_u	Serbest basınç deneyi
s'	Efektif destek basıncı
T	Tork kapasitesi
V	Voltaj
v	Köşe keskilerin hızı
W	Kaya birimi ayrışma düzeyi
γ'	Zeminin suya doygun birim hacim ağırlığı
γ_d	Kuru birim hacim ağırlık
σ	Efektif destek basıncı
σ'	Düzeltilmiş efektif destek basıncı
σc	Tek eksenli basınç dayanımı
φ'	İçsel sürtünme

KISALTMALAR DİZİNİ

BST	Basınçlı su testi
CAI	Cerchar aşındırma indeksi
CH	Kesici kafa
CL	Düşük plastisite
CSIR (RMR)	Kaya kütle sınıflama sistemi
CT	Trakya formasyonu
dC	Hidrolik silindirlerinin çapı
EPB	Arazi basınç dengeleme
FER	Köpük hava oranı
FIR	Köpük enjeksiyon oranı
FN	Keski başına düşen ortalama baskı kuvveti
GM	Siltli çakıllar
GSI	Jeolojik dayanım indeksi
GW	İyi derecelenmiş temiz çakıllar
İS	Nokta yük indisi
KAF	Kuzey Anadolu fayı
LL	Likit limit
ML	Düşük ve orta plastisite
n	Keski sayısı
NC	İtme silindiri sayısı
NGI(Q)	Kaya kalite indeksi
PC	Net uygulanan hidrolik basınç
PI	Plastisite indisi
PL	Plastik limit
PMT	Presiyometre
RPM	Kesici kafanın dakikadaki dönüş sayısını
RQD	Kaya kalite değeri
SC	Kil - kum
SM	Silt - kum
SPT	Standart penetrasyon testi
TBM	Tünel açma makinesi
TCR	Toplam karot verimi
TÇÇ	Çukurçeşme formasyonu
TÇG	Güngören formasyonu
UD	Örselenmemiş numune
VFD	Değişken frekanslı sürücü
YASS	Yeraltı su seviyesi

1. GİRİŞ

Teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte inşaat ve madencilik sektörlerinde yeraltı yapılarının önemi her geçen gün artmaktadır. Özellikle büyük yerleşim yerlerinde nüfus yoğunluğuna bağlı olarak artan ihtiyaçların karşılanabilmesi için yeraltı çalışmaları ayrı bir önem kazanmıştır. Açılan yeraltı boşluklarının çevreye ve yer üstü yapılarına zararlarının azaltılması ise ancak doğru kazı yönteminin seçimi ile mümkündür.

Tünellerde mekanik kazı yöntemleri son yıllarda hızlı bir gelişim göstermektedir. Bunun nedeni, mekanik kazıda kullanılan makinelerden biri olan tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) ile tünel açmanın ve uygun jeolojik koşullarda uzun tünellerin açılmasında en ekonomik yöntem olmasının açıkça görülmesidir. TBM performansını etkileyen en önemli etken olan kayaç ve zeminlerin durumu, özellikleri, kazı sırasında ve sonrasındaki davranışları genellikle ihmal edilmekte ve performans düşüşleri kaçınılmaz olmaktadır. Özellikle yumuşak zeminlerde kazı yapan arazi basınç dengeleme makinalarının (EPB-TBM) performansını artırmak için zemin şartlandırma sistemi en çok tercih edilen yöntem olmuştur.

Bu araştırmanın konusu, İstanbul Mahmutbey – Mecidiyeköy metro tünel hattında kullanılan EPB - TBM makinesinin (arazi basınç dengeleme - tam cepheli tünel açma) kazı performansının analizidir. Elde edilen sayısal veriler kullanılarak çizilen grafiklerle kazı performansının değişen litolojideki ayrı ayrı parametreleri incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Bu çalışmada öncelikle mevcut tünel hattının genel olarak güzergâh ve proje özellikleri belirtilmiş, aynı zamanda TBM'in gelişim süreci, TBM tipleri ve bu projede kullanılan TBM özellikleri de açıklanmıştır. Sonuç aşamasında EPB – TBM makinesinin kazdığı formasyonun sondaj ve laboratuvar testlerine dayanan jeoteknik ve jeolojik veriler değerlendirilmiştir.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Önemi

Yerbilimlerinde özellikle kentsel alanlarda yeraltı yapılarının önemi her geçen gün artmakta ve teknolojinin hızlı gelişimi sayesinde bu yapılar daha hızlı ve güvenilir bir şekilde oluşturulabilmektedir. Özellikle son dönemlerde yaygınlaşan tünel yapım faaliyetleri, ülkemizin modern gelişimde yer bulması ve yaşamı kolaylaştırması açısından büyük önem taşımaktadır. Tünel kazısında kullanılan kazı makinalarının performanslarının belirlenmesi güvenlik ve ekonomi anlamında oldukça önemlidir.

Bu çalışma, farklı formasyon, makina ve çalışma parametrelerine karşı kazı makinalarının performanslarının önceden belirlenmesi açısından oldukça yüksek maliyetler tutan yeraltı kazı işlerinde yol gösterici olacaktır.

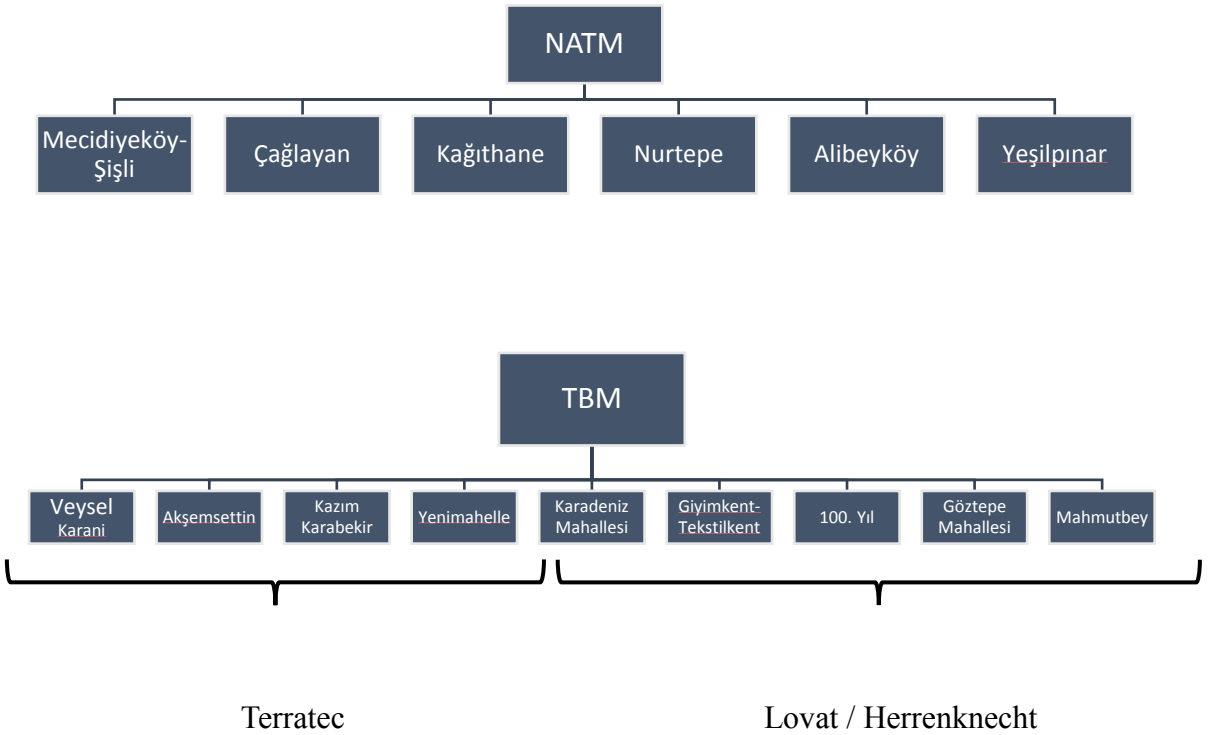
1.2 Çalışma Alanının Tanıtılması

Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Projesi, İstanbul Mecidiyeköy – Mahmutbey metro hattı, depo – bakım sahası ve depo bağlantı hatları inşaat işlerini kapsamaktadır. Proje Şişli ilçesine bağlı Mecidiyeköy semti ile Bağcılar ilçesine bağlı Mahmutbey semti arasında planlanmıştır (Şekil 1.1). Şişli, Kağıthane, Eyüp, Gaziosmanpaşa, Esenler ve Bağcılar ilçelerini kat edecek olan metro hattı, çift tüp halinde olmak üzere yaklaşık 17 km tünel (Toplam 34 km) ve 15 adet istasyondan oluşur. Metro hattının önemli kısmı, yeraltı tünelleri ile geçilirken Kağıthane ve Alibeyköy dere geçişleri ise viyadük şeklinde planlanmıştır.



Şekil 1.1: Mecidiyeköy – Mahmutbey metro güzergâhının konumu (URL-1).

Veysel Karani ile Mahmutbey istasyonları arasını oluşturan tünellerin önemli bir kısmı EPB - TBM, Mecidiyeköy ile Veysel Karani istasyonları arası ise Yeni Avusturya Metodu (NATM) ile açılmıştır. Projede 3 farklı marka EPB tip TBM kullanılmıştır. Bunlardan Lovat ve Herrenknecht marka TBM'ler Yenimahalle İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu arasında tek hat, Terratec marka TBM ise Yenimahalle istasyonu ile Veysel Karani istasyonu arasında çift hat şeklinde kazı yapmıştır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2: TBM ve NATM kazı istasyonları.

Bu tez kapsamında Yenimahalle – Veysel Karani istasyonları arasında yapılan tünel çalışmaları değerlendirilmiştir. EPB - TBM ile kazılan bu etapta, tünel kesitleri tam dairesel olup, tünel çapları gabari 6,57 m. ve kaplanmış halde 5,70 m. olarak gerçekleştirilmiştir.

1.3 Önceki TBM Çalışmaları

Çalışma alanı ve çevresinde önceki dönemlerde tünel kazılarına ve mevcut koşullara özgü gerçekleştirilen bazı önemli çalışmalar tarihsel olarak aşağıda verilmiştir;

Çilsal (2003), Eryaman tünellerini duraylılık açısından TBM ile kazı performansını jeoteknik ölçümlerle incelemiştir. Çalışmasında, TBM ile açılan tünellerdeki zeminin daha duraylı olduğunu belirtmiş, bunun en büyük nedeni olarak da tünel kazısından hemen sonra zeminin, gerekli donatılarla kaplanmasını göstermiştir. NATM ile açılan tünellerde tünel kazısının uzun sürmesi ve zeminin çok fazla açıkta kalması sebebiyle TBM ile açılan tünellere oranla daha duraysız olduğunu ifade etmiştir.

Hajebi (2008), İstanbul'da EPB - TBM ile yapımı süren ikiz metro tünelleri inşası sırasında civar zemin ve yapılarda meydana gelen deformasyonları aletsel gözlemlerden alınan ölçümler ile değerlendirmiştir.

Doğruoğlu (2009), zemin ortamlarında açılan şehir içi tünellerde oluşan zemin yer değiştirmeleri ve düşey deplasmanları incelemiştir. Tünellerin açılmasından dolayı oluşacak yüzey deplasmanlarını değerlendirmek için üç farklı yaklaşımdan yararlanmıştır. Gerekli parametrelerin doğru seçilmesi durumunda, yararlanılan üç değerlendirme yöntemi ile de gerçeğe oldukça yakın olarak hesaplanabileceği ancak Plaxis ile daha iyi tanımlanmış çözümler elde edilebileceğini saptamıştır.

Aksu (2010), TBM'lerde zemin şartlandırmanın pasa basınçlı TBM performansına etkisini değerlendirmiş, köpük tüketimini performans analizi ile birlikte incelenmiştir.

Acaroğlu ve Bayram (2011), Kadıköy-Kozyatağı (İstanbul) güzergâhında yapılan tünel kazısında kullanılan EPB tünel açma makinalarının kazı parametrelerini incelenmiştir.

Avunduk (2011), yaptığı çalışmada zor zemin şartlarının pasa basınçlı EPB - TBM'nin performansına etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Stabilite problemleri yaşanabilecek bölgeler için TBM karşıt ayna basıncı hesaplamaları yapılmıştır. Güzergâhtan geçiş sırasında karşılaşılan problemler kaydedilmiştir ve TBM veri toplama sisteminde kaydedilen raporlar incelenip her bir ring için ölçülen tork, baskı (itme) kuvveti, net kazı hızı ve tünel aynasına gelen arazi basınçları irdelenmiştir.

Gürkan (2011), performans parametrelerinden, zemin koşullandırmasıyla ilgili parametrelerin diğer parametreler ile en çok etkileşim gösterdiğini belirtmiştir. Kuşdili formasyonu, Güngören formasyonu, geçiş zonu ve tüm tünel güzergâh jeolojisinde yapılan çalışmalarda köpük enjeksiyon oranı (FIR) ile penetrasyon oranı değerleri arasında her bir jeolojik formasyonda mükemmel dereceli ilişkiler bulunduğunu ortaya koymuştur. Aynı zamanda, her formasyon için ve tüm tünel

güzergâhı jeolojisi için yapılan gözlemlerde köpük enjeksiyon oranı (FIR) ile 1mm'lik penetrasyon için gerekli olan baskı kuvveti arasında her bir jeolojik formasyonda mükemmel dereceli ilişkiler görüldüğünü de belirtmiştir.

Yurtaydın (2011), çok benzer özellikli tünel açma makinelerini genel olarak karşılaştırmıştır. Farklı jeolojik koşulların, tünel açma makinelerinin ilerleme hızı üzerindeki etkisini değerlendirmiş ve jeolojik koşulların makine parametreleri ve malzeme tüketimi üzerindeki etkilerine değinmiştir.

Öz (2012), Kadıköy – Kartal güzergâhında yapılan kazı performansı değerlendirmesini incelemiştir. Bu çalışmada tünel hattı boyunca belirli aralıklarla kaya ve zemin numuneleri alınmış, kayaç numuneleri üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılarak, bu deney sonuçlarının makinenin itme kuvveti, tork, bunların penetrasyon indeksi değerleri, ilerleme miktarı, kesici kafa dönme sayısı parametrelerine etkileri araştırılmış ve yorumlanmıştır. Buna ek olarak, tam boyutlu kesme deneyleri ile bazı tasarım parametrelerinin ve performans tahminlerinin yapılabilirliği incelenmiş, bu incelemelerin tamamlanan kazı ilerlemeleri ile bağlantıları araştırılmış ve yorumlanmıştır.

Tüysüz (2012), TBM kazısında kritik bölgeleri tanımlayan ve önceki çalışmalardan toplanan verileri esas alarak TBM performansı tahmin metodolojisi geliştirmiştir. Bu metodolojide güzergâh üzerindeki sondajların jeomekanik özelliklerini, tek eksenli basınç dayanımlarını ve kaya kalite oranlarının belirlenmesiyle kaya yapısına ve formasyona göre spesifik enerjisi hesaplanmış, TBM'in pasa basınçlı ya da açık modda çalışabilirliği ve tahmini kazı süresi belirlenmiştir.

Cingöz (2013), Kadıköy - Kartal metrosu inşaatında tünel yapımında kullanılmakta olan iki önemli metot, yeni avusturya tünel açma metodu (NATM) ve tünel açma makinası (TBM), karşılaştırılarak süre performansı üzerine etkileri incelenmiştir.

Sarbangholi (2014), makine kazı zamanı ile diğer parametreler arasındaki ilişkileri araştırmıştır. Kazı esnasında duraklamaların genel nedenine değinmiş ve TBM'nin çalışma zamanı ile makine ve zemin şartlarının arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Makine parametreleri ve jeolojik durumun kazı duraklamalarını en fazla etkileyen parametreler olduğunu belirtmiştir. Özellikle kaygan, kabaran, aşındırıcı ve kırılmış zemin şartlarının duraklama sürelerine farklı etki ettiğini ifade etmiştir.

Yüksel (2014), Kadıköy - Kartal Metrosunda, TBM kullanılarak yapılan tünel açma çalışmalarında kaydedilen kazı parametreleri ile yine güzergâhın bu bölümünde

açılmış sondajlardan elde edilen kaya dayanım parametreleri arasındaki istatistiksel ilişkileri araştırmıştır. Aynı zamanda, TBM ile yapılan tünel kazıları sırasında meydana gelen göçüklerin kazı performansına olan etkilerini de incelemiş, fay ve volkanik sokulumlar gibi zayıf zonların geçilmesi sırasında TBM kazı parametrelerinin göçük zonuna yaklaşılırken belirgin bir dalgalanma gösterdiğini, göçük zonunda ise düşük ya da yüksek değerlerde olmak üzere anormal değerlere ulaştığını belirtmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sırasında izlenen yöntem, uygulanan analiz metotları, veri işleme ve değerlendirme yöntemleri anlatılmıştır. Çalışma literatür, arazi, laboratuvar ve büro çalışmaları olmak üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir.

Tezin amacı doğrultusunda, öncelikle Mahmutbey-Mecidiyeköy arasında yapılan metro tüneli kazısının gerçekleştirildiği formasyonların özellikleri, kazı işlemi sırasında oluşan makina ve çalışma parametreleri derlenmiştir. Daha sonra tünel hattı boyunca farklı formasyon özellikleri ve farklı makina çalışma parametreleri ile kıyaslanmıştır.

2.1 Literatür Çalışmaları

Literatür çalışmaları kapsamında inceleme alanı ve çevresinde önceki yıllarda yapılmış doktora ve yüksek lisans tez çalışmaları ve diğer kurum raporları, makaleler, özel şirket raporları ve rapor özelliği taşıyan diğer veriler derlenmiştir. Derlenen literatür çalışmaları kendi aralarında tez konusuna göre sınıflandırılarak değerlendirilmiştir.

2.2 Arazi ve Laboratuvar Çalışmaları

Arazi çalışmaları kapsamında, ilk olarak eski jeolojik haritalar güncellenerek güzergâh boyunca jeolojik haritalama yapılmıştır. Ayrıca 26 adet zemin araştırma sondajı yapılmış, sondajlarda insitu testler (SPT, presiyometre ve basınçlı su testleri) yapılmış ve sondajlardan alınan zemin ve kaya örnekleri üzerinde indeks ve mekanik laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kazı esnasında ayna yüzeyinden alınan bazı numunelerde nokta yük ve birim ağırlık testleri yapılmıştır. Kazı çalışmaları sırasında arazi deneyleri sürekli olarak yinelenmiştir.

2.3. Büro Çalışmaları

Büro çalışmalarının ilk aşaması literatür verilerinden elde edilen ve arazi çalışmaları ile desteklenen jeolojik verilerin görselleştirme işlemidir. Bu kapsamda çalışma alanının jeoloji haritası ve stratigrafik dikme kesiti güncel hali ile çalışılmıştır.

Literatür çalışmalarından elde edilen veriler kendi aralarında sınıflandırılmış ve istatiksel açıdan dağılımları incelenmiştir. Laboratuvar ve arazi çalışmalarından elde edilen veriler sınıflandırıldıktan sonra jeoistatiksel yöntemler kullanılarak veri güvenliği açısından kendi içlerinde ve önceki çalışmalardan da faydalanılarak değerlendirilmiş ve veri güvenliği doğrulanmıştır.

TBM'nin kazı süresince kaydedilen verileri; rpm, ilerleme hızı, köpük tüketimi, CH akım, tork, itme kuvveti, penetrasyon gibi parametreler farklı formasyonlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Her formasyona ait parametrelerin en az, en çok ve ortalama değerleri hesaplanmıştır. Bu verilerden yola çıkarak ilgili grafikler oluşturulmuş ve değişen litolojideki TBM'nin performansı değerlendirilmiştir.

3. JEOLOJİ

3.1 Genel Jeoloji

İstanbul kent merkezi ve yakın çevresi; çok faylı, kıvrımlı ve bindirmeli Paleozoyik, Mesozoyik yaşlı kaya birimleri ile bunlar üzerinde yer alan düzensiz ardalanmalı Tersiyer yaşlı çökellerinden oluşur. Mecidiyeköy – Mahmutbey metro tünelleri güzergâhının, bu teze konu Yenimahalle - Veysel Karani arası kazı kesiminde sırasıyla; Trakya formasyonu (Ct), Çekmece formasyonu Çukurçeşme üyesi (Tçç), Trakya formasyonu (Ct), Çekmece formasyonu Güngören üyesi (Tçg) ve Trakya (Ct) formasyonları geçilmiştir (Polat, 2015).

Trakya formasyonu kumtaşı, şeyl ardalanması, Çekmece formasyonu Güngören üyesi kil, kiltaşı seviyeleri, Çukurçeşme üyesi ise kum ve kumtaşı seviyeleri ile karakteristiktir. En üstte 50 cm ile 150 cm arasında değişen kalınlıkta güncel alüvyal çökeller ve yapay dolgular yer alır (Ek A).

Güzergâh boyunca tünel kazı kotunda geçilen jeolojik birimler Km. belirtilerek Çizelge 3.1'de verilmiştir.

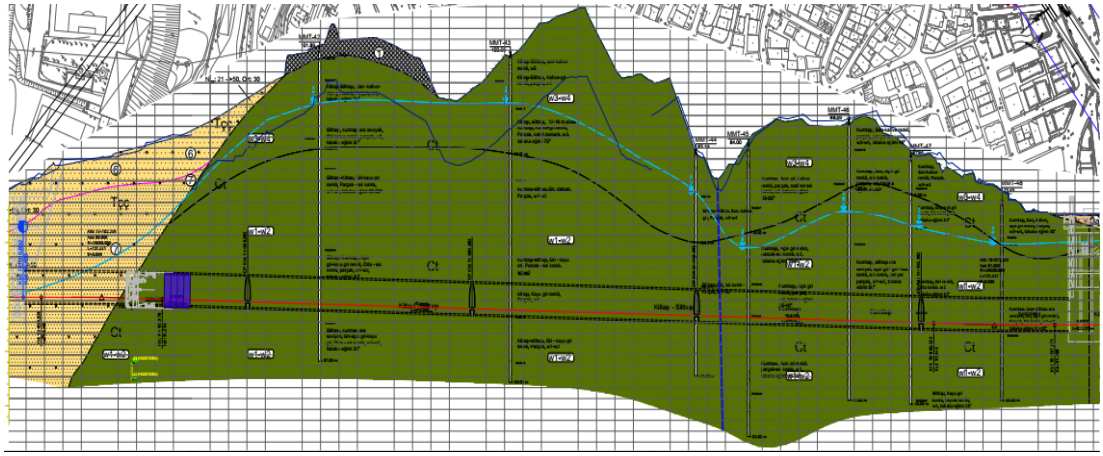
Çizelge 3.1: Güzergâh boyunca, tünel kazı kotunda geçilen kaya ve zemin birimleri (mesafeler Hat-1'e göre verilmiştir) (Polat, 2015).

Yaklaşık Başlangıç Km.	Yaklaşık Bitiş Km.	Formasyon (Üye)	Sembol	Litoloji
10+540	12+500	Trakya	Ct	Kumtaşı - şeyl (Silttaşı, kiltaşı, kumtaşı ardalanması), yer yer kumtaşı baskın
12+500	13+500	Çekmece, (Güngören)	Tçg	Ağırlıklı olarak kil, siltli kil ve killi silt, üst seviyeleri yer yer kumlu. Kiltaşı, silttaşı ve kumtaşı ara seviyeli
13+500	13+760	Trakya	Ct	Kumtaşı – şeyl (Silttaşı, kiltaşı, kumtaşı ardalanması)
13+760	14+150	Çekmece, (Çukurçeşme)	Tçç	Kum, siltli kum, yer yer kil katkılı. Yer yer çakıl ara seviyeli. Kısmen pekişmiş.
14+150	15+150	Trakya	Ct	Kumtaşı – şeyl (Silttaşı, kiltaşı, kumtaşı ardalanması)

3.1.1 Trakya formasyonu (Ct)

Birim kazı güzergâhında yüzeyde Hat 1'e göre Km 10+540 - 12+500, 13+500 - 13+760 aralığında, tünel kotlarında ise kabaca Km 14+150 – ile 15+150 aralıklarında geçilmiştir (Şekil 3.1). Trakya formasyonu, esas olarak kumtaşı, silttaşı (çamurtaşı) ve kiltaşı tabakalarının ardalanmasından oluşur. Bazı araştırmacılar tarafından kumtaşı – şeyl ardalanması olarak tanımlanmıştır. Yine bazı araştırmacılar "silttaşı" terimi yerine, "çamurtaşı" terimini kullanmayı tercih etmişlerdir.

Birimin ilksel rengi açık – koyu gri arasında değişim gösterir. Çok ayrışmış kesimlerde hakim renk sarı, kahverengi; orta derecede ayrışmış kesimlerde sarımsı gri, zeytin yeşili, boz; az ayrışmış kesimlerde ise gri, açık gri ve koyu gri renklidir. Ayrışma genel olarak derinlik yönünde azalır. Ancak birimi kesen fay ve makaslama zonları ile volkanik dayk sınırlarında derinliğe bağlı olmaksızın ileri derecede ayrışmış seviyeler nadir de olsa gözlenmiştir (Polat, 2015).



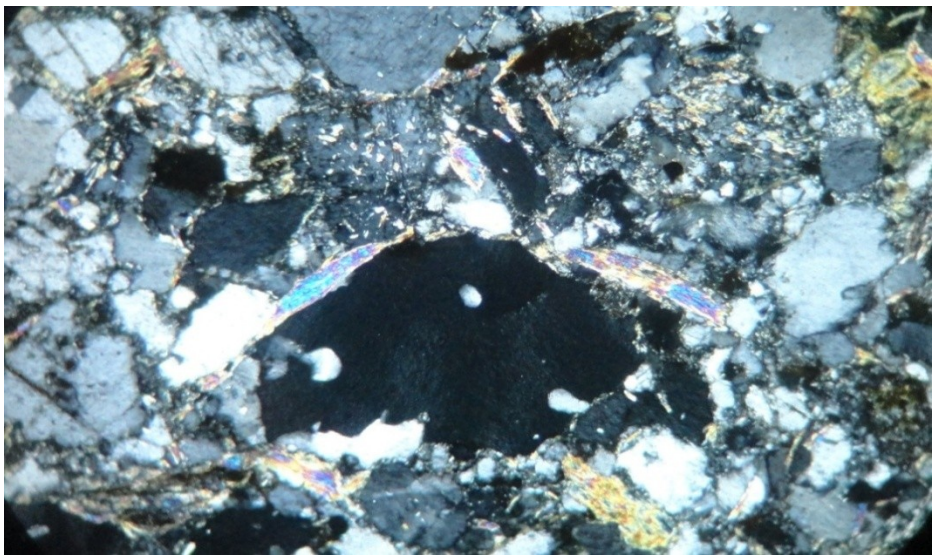
Şekil 3.1: Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları arası jeolojik kesit (Polat, 2015).

Kumtaşı seviyeleri orta - kalın tabakalı, sert, orta sert, genellikle orta - ince taneli, kötü boylanmış, bol mika, kuvars ve kayaç kırıntılarından oluşur. Taneler demirli ve silisli çimento ile bağlanmıştır. Çok ayrışmış kesimleri sarı, orta ayrışmış kesimleri boz, sarımsı boz ve ayrışmamış kesimlerde açık gri, mavimsi gri renklidir (Şekil 3.2). Silttaşı seviyeleri genellikle ince – orta tabakalı, ayrışmamış halde gri – koyu gri renkli, orta derecede ayrışmış kesimlerde zeytin yeşili, grimsi sarı veya sarımsı gri, çok ayrışmış kesimlerde ise sarı, kahve renklidir. Kiltaşı seviyeleri, genellikle ince tabakalı, ayrışmamış halde koyu gri, orta düzeyde ayrıştığı kesimlerde zeytin yeşili - sarımsı gri, çok ayrıştığı kesimlerde ise sarı – kahve renklidir.



Şekil 3.2: Trakya formasyonuna ait kumtaşlarından alınan karot örnekleri.

Kumtaşlarından alınan örnekler üzerinde yaptırılan ince kesit incelemeleri sonucunda, kumtaşlarının bol kuvarslı, mikalı, feldspatlı ve granüler tanesel doku özelliği gösterdikleri belirlenmiştir. Kayacın mineral bileşimi, %50-55 kuvars, %15-20 feldispat, %12-15 mika, %10-12 opak mineraller ve %5-10 yabancı kayaç parçalarından oluşur. Kuvarslar farklı tane boyutlarına sahip olup, dalgalı sönme özelliği gösterirler. Bazen tek mineral halinde, bazen de polikristalin olarak gözlenirler. Feldspatlar genellikle plajiyoklaz ve ortoz bileşimlidir. Mikalar, biyotit ve muskovitlerden oluşmuştur. Yer yer kloritleşmeler gözlenir (Şekil 3.3).

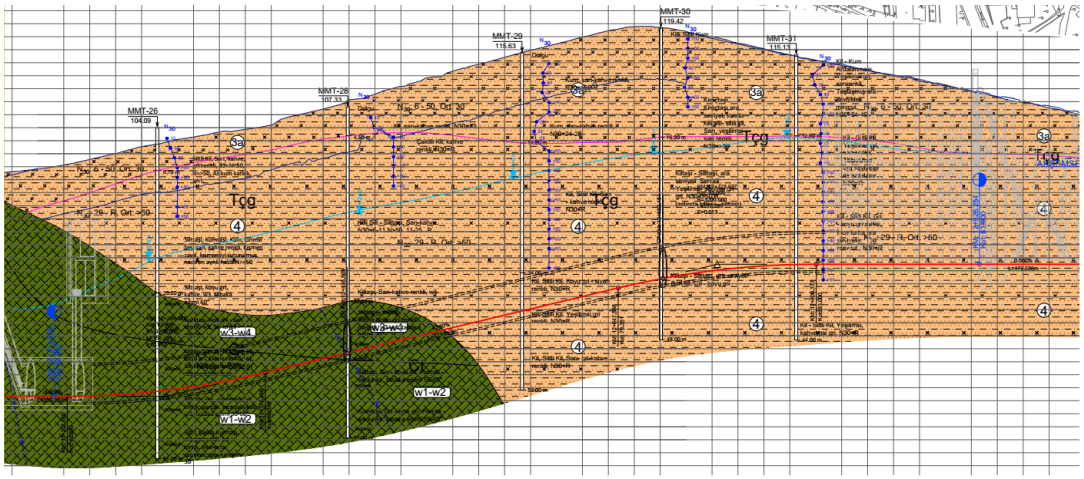


Şekil 3.3: Kumtaşı örneğinin çift nikol mikroskop görünümü.

3.1.2 Çekmece formasyonu Güngören üyesi (Tçg)

Birim kazı güzergâhının bu kesiminde yüzeyde Hat 1'e göre Km 12+140 – 13+750 aralığında, tünel kotlarında ise kabaca Km 12+500 – ile 13+500 aralığında geçilmiştir (Şekil 3.4).

Bu aralıkta, Güngören üyesi, üstte sarı, sarımsı açık kahve, bazen bej, yeşilimsi sarı renkli, kil, siltli kil, kum ve bunların sıkılaşmış (kiltaşı, siltli - kiltaşı) seviyelerinden oluşur. Orta kesimde organik malzeme bakımından zengin, gri – koyu gri renkli, bitki kalıntıları ve turba katkıları ihtiva eden kil ve siltli killer (bazen kum katkılı killi siltler), alt kesimde ise yeşilimsi, sarımsı kahve, grimsi sarı renkli kil ve siltli killerden oluşur (Şekil 3.5). Güngören üyesi, yanal (Tünel ilerleme yönünde) ve düşey yönde dereceli olarak Çukurçeşme üyesi ile geçişlidir (Polat, 2015).



Şekil 3.4: Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arası jeolojik kesit (Polat, 2015).

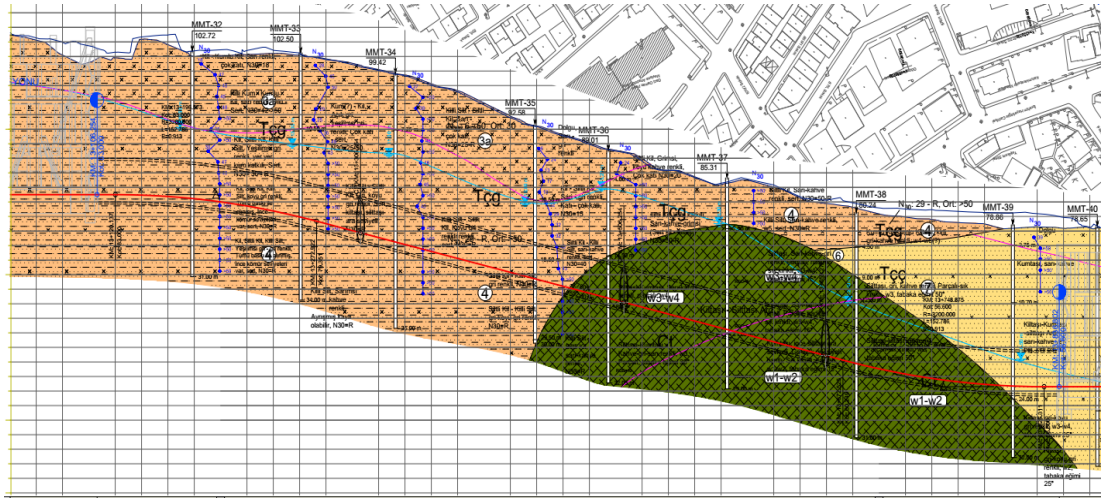
Birim, bazı kısımlarının yaygın şekilde bitkisel gereç ve ince turba seviyeleri içermesinden dolayı bazı araştırmacılar tarafından Gürpınar üyesine dahil edilmektedir. Bu nedenle bazı sondaj loglarında formasyon ismi olarak Gürpınar kullanılmıştır. Ancak birimin tümü ile Güngören veya eşdeğeri bir çökel olduğu düşünülmekte olup, proje öncesi çalışmasında Güngören üyesi olarak isimlendirilmesi tercih edilmiştir (Polat, 2015).



Şekil 3.5: Güngören üyesine ait kiltaşlarının görünümü (Polat, 2015).

3.1.3 Çekmece formasyonu Çukurçeşme üyesi (Tçç)

Güzergâhın bu kesiminde Çukurçeşme üyesi yüzeyde Hat 1'e göre Km 13+820 – 14+300 aralığında, tünel kotlarında ise kabaca Km 13+760 - 14+150 ve 12+500 – 10+450 aralığında geçilmiştir (Şekil 3.6). Ağırlıklı olarak sarı renkli, sıkı yerleşmiş, ince – orta taneli, mika pullu kum ve siltli kumlar ile bunlarla ardalanan pekişmiş haldeki kumtaşı, silttaşı seviyelerinden oluşur (Şekil 3.7). Yer yer çakıl ve çakıllı kum ara seviyeleri bulundurur. Tabanında yaygın olarak, Trakya formasyonuna ait, orta taneli çakıl boyutunda, tamamen köşeli grovak katkıları gözlenir (Polat, 2015).



Şekil 3.6: Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları arası jeolojik kesit (Polat, 2015).



Şekil 3.7: Çukurçeşme üyesine ait silttaşı ve kumtaşlarının görünümü (Polat, 2015).

3.1.4 Alüvyon

Dönemsel olarak değişik enerji sistemlerine sahip akarsuların yüksek kotlardan diğer birimlerin aşınması sonucu getirdiği gevşek, tutturulmamış, çakıl - kum - silt ve kil boyu malzemeden oluşmuş alüvyon kötü boylanmalı, kahverengi - yeşilimsi - gri

renklidir. Güzergâhın Yenimahalle istasyonuna bağlandığı kısımda daha geniş yayılım gösterir. Alüvyon içerisinde iri taneli malzemeler çoğunluktadır ancak tane boyu bölgesel olarak farklılıklar içerir. Stratigrafik ilişkilerine göre alüvyonun yaşı Holosen olup, oluşumu halen devam etmektedir (Polat, 2015).

Tünel güzergâhı boyunca geçilen kaya birimleri genel olarak kiltaşı - silttaşı - kumtaşı ardalanması şeklinde gelişmiştir. Güzergâh boyunca çoğu zaman birimler birbirleriyle yanal ve düşey yönde tedrici olarak geçişlidir. Çoğu zaman heterojen bir yapı sunarlar. Yer yer bu litolojilerden herhangi birinin baskın litolojiyi oluşturduğu kesimlerde mevcuttur. Sondaj verilerine göre, tünel kazılarında gözlenen belirli litolojilerin egemen olan aralıkları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Tünel kazısında geçilen baskın litolojilerin Hat-1'e göre kabaca dağılımı (Hat 2 için de kabaca benzer aralıklar geçerlidir) (Polat, 2015).

Yaklaşık Başlangıç Km.	Yaklaşık Bitiş Km.	Litoloji
10+540	11+050	Kumtaşı - Silttaşı
11+050	11+850	Kumtaşı
11+850	12+500	Silttaşı, Kiltaşı
13+500	13+780	Silttaşı, Kiltaşı
14+150	14+800	Silttaşı, Kiltaşı
14+800	15+200	Kumtaşı
15+200	15+354	Kiltaşı - Silttaşı

3.2 Yapısal Jeoloji

Tünel güzergâhı boyunca geniş yayılım gösteren Trakya formasyonu, doğu - batı, kuzey - güney yönlü sıkışmaya maruz kalmıştır. Bunun sonucu olarak, yaygın şekilde çatlaklı ve kıvrımlı bir yapı kazanan birim, sıkça makaslanma ve fay zonları ile kesilmiştir. Fay zonlarının alt kesimleri genellikle milonitleşmiştir. Tünel güzergâhı boyunca ince – orta kalınlıkta, doğu - batı doğrultulu andezit – diyabaz daykları yerleşmiştir. Fay zonları daykları da kesmiştir. Süreksizlik ve zonlar, tünelin yersel doğrultusuna bağlı olarak genel olarak paralel şekilde görülürler (Polat, 2015).

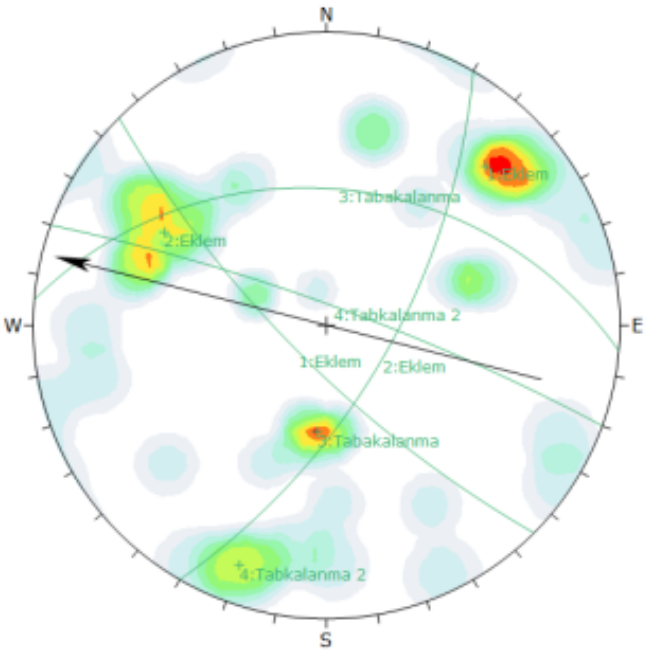
Bu çalışma kapsamında yapılan sondajlar ve jeolojik incelemelerden elde edilen yapısal unsurlar aşağıdaki gibidir;

Km 14+800 de görülen ani litoloji değişimi (Kiltaşı - silttaşı ardalanmasından yaygın şekilde kumtaşına geçiş söz konusu) şüpheli veya muhtemel bir fayı çağrıştırmaktadır. Örnek verecek olursak; TBM parametrelerinden olan itme kuvveti değeri bu formasyonda 17000 – 18000 kN değerindeyken, faylı zon geçildiğinde

20000 – 21000 kN değerine çıkmıştır. Ancak kazı esnasında herhangi bir etki olmamıştır. Km 12+200, Km 12+460 ve Km 14+440'da, sondaj verilerine göre birimlerde gözlenen kot farkı ve tabaka kalınlıklarının azalması eğim atımlı normal bir fayı işaret etmektedir.

Kaya (Trakya Formasyonu) mostralarının sınırlı şekilde izlenebildiği güzergâhta, ölçülebilen sınırlı sayıdaki süreksizlik (tabaka, eklem, çatlak, kırık, makaslama vb.) kısmen jeoloji haritaları üzerinde gösterilmiş ve gül diyagramları - steronetler halinde verilmiştir. Steronetlerden görüleceği üzere Trakya formasyonu üç sistematik ve bir düzensiz süreksizlik (çatlak) ile kesilmiştir. Güzergâh boyunca süreksizliklere ait eğim ve doğrultular sıkça değişim göstermektedir. Bununla birlikte, kaya mostralarının sınırlı şekilde gözlenebildiği Kazım Karabekir istasyonu ile Yenimahalle istasyonu arasında tabakalar kuzey yönde 40 – 80 derece arasında, eklemler ise güneydoğu – güneybatı yönde 65 – 75 derece eğimlidir (Polat, 2015).

Tünel kazısı, bu etapta TBM ile Yenimahalle istasyonundan başlayıp geriye Veysel Karani istasyonuna doğru yapılmıştır. Konumları itibari ile hakim süreksizlik gruplarına ait doğrultuların, Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arasında ağırlıklı olarak tünel eksenine verev, kısmen dik, zaman zaman da paralel olması beklenmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Yenimahalle - Kazımkarabekir istasyonları arası tüm süreksizlikler (Polat, 2015).

3.3 Depremsellik

İstanbul, İzmit körfezi ve Marmara denizi tabanında doğu batı doğrultuda uzanan Kuzey Anadolu Fayı'nın etkisinde olup, yüksek deprem riskine sahiptir. İstanbul ve çevresinde, tarihsel ve aletsel dönemde Kuzey Anadolu Fayı'na bağlı olarak çok sayıda orta ve büyük ölçekte deprem meydana gelmiş ve bunların birçoğu önemli can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Kuzey Anadolu Fayı'nın, kazı alanına olan mesafesi 21 ile 23 km arasında değişim gösterir (Şekil 3.9).

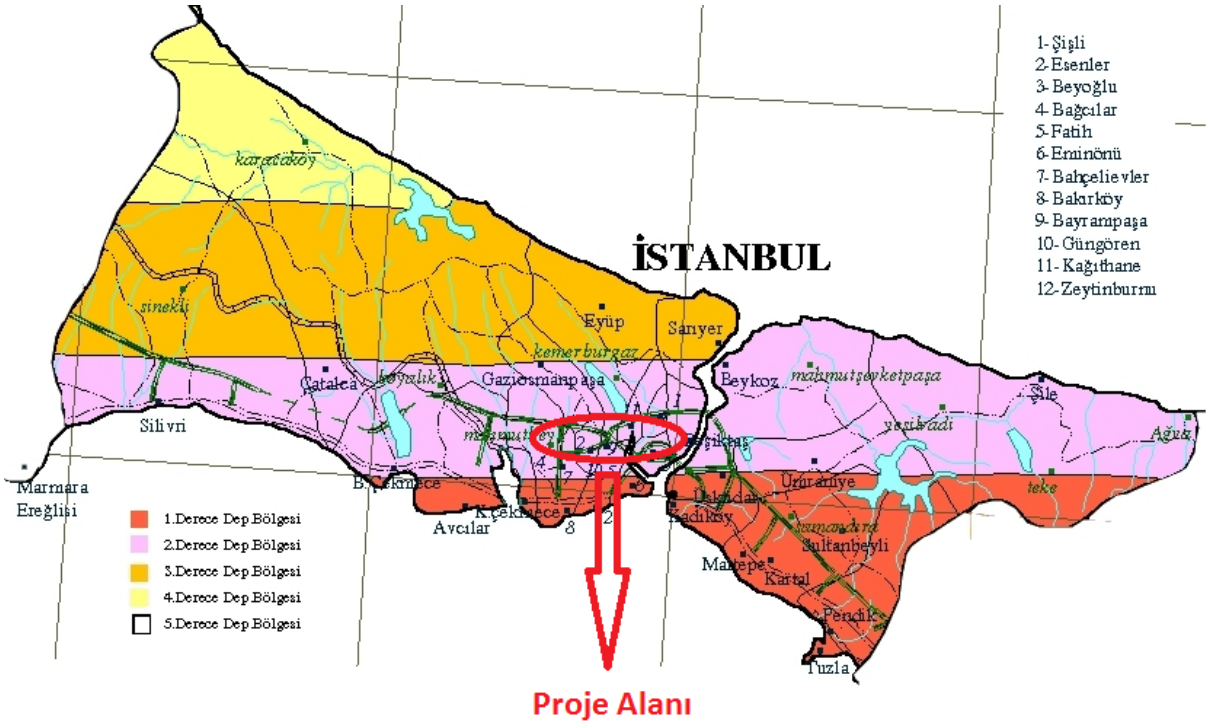
Son araştırmalar, Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara denizi içindeki kısmının 70 km (Doğu Marmara Fayı) ve 130 km (Batı Marmara Fayı) olmak üzere iki parçadan oluştuğunu göstermektedir. Doğu Marmara kısmının kırılması halinde meydana gelecek deprem büyüklüğünün M = 7,2, Batı Marmara kısmının kırılması halinde, M = 7,5 ve iki parçanın birlikte kırılması halinde ise meydana gelecek deprem büyüklüğünün en az M = 7,6 olacağı tahmin edilmektedir (Le Pichon vd., 2001).



Şekil 3.9: Kuzey Anadolu Fayının (KAF) Marmara denizi içindeki konumu (Polat, 2015).

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 İstanbul'da meydana gelebilecek büyük bir depremin 30 yıl içinde olma olasılığı % 62 ± 15, on yıl içinde olma olasılığı ise %32 ± 12 hesaplanmıştır (Parsons vd., 2000).

Bayındırlık ve İskân Bakanlığı tarafından 1998 yılında yayınlanan Deprem Bölgeleri Haritasına göre, proje alanı 2. derece deprem bölgesi içinde kalmaktadır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: İstanbul ili deprem bölgeleri haritası (URL-2).

3.4 Hidrojeoloji

İnceleme alanının yer aldığı İstanbul ili, Marmara iklim tipinin etkisindedir. Yazlar sıcak ve nispeten kurak, bahar ve kış ayları ise yağışlı geçer. Yağışların hemen hemen tamamı yağmur şeklinde olup çok sınırlı şekilde kar yağışı söz konusudur. Kışlar genel olarak yarı ılımandır. Yıllık ortalama yağış miktarı 815,2 mm, yıllık ortalama sıcaklık 14,4 °C'dir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3: İstanbul iline ait uzun yıllar (1926 – 2016) içinde gerçekleşen meteorolojik veriler (URL-3).

Parametre	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
T	6	6.1	7.7	12	16.8	21.4	23.8	23.8	20.1	15.7	11.7	8.2	14.4
Ty	8.5	9	10.9	15.5	20	24.6	26.6	26.8	23.7	19.2	14.8	10.7	17.5
Td	3.2	3.1	4.2	7.7	12.1	16.5	19.5	20.1	16.8	13	8.9	5.4	10.9
GS	3.6	3.4	4.4	6.3	8.5	10.4	11.3	10.4	8.2	5.4	4	2.5	78.4
Yg	17.2	15.1	13.7	10.2	8	6.1	4.2	4.9	7.4	11.2	13	17.2	128.2
P	104.4	78.2	71.5	46.1	34.2	35.9	32.5	40.1	60.6	87.8	101.2	122.7	815.2

T; ortalama sıcaklık (^{0}C), Ty; ortalama en yüksek sıcaklık (^{0}C), Td; ortalama en düşük sıcaklık (^{0}C), Yg; ortalama yağışlı gün sayısı, Gs; Güneşlenme süresi, P; aylık ortalama yağış miktarı (kg/m^2)

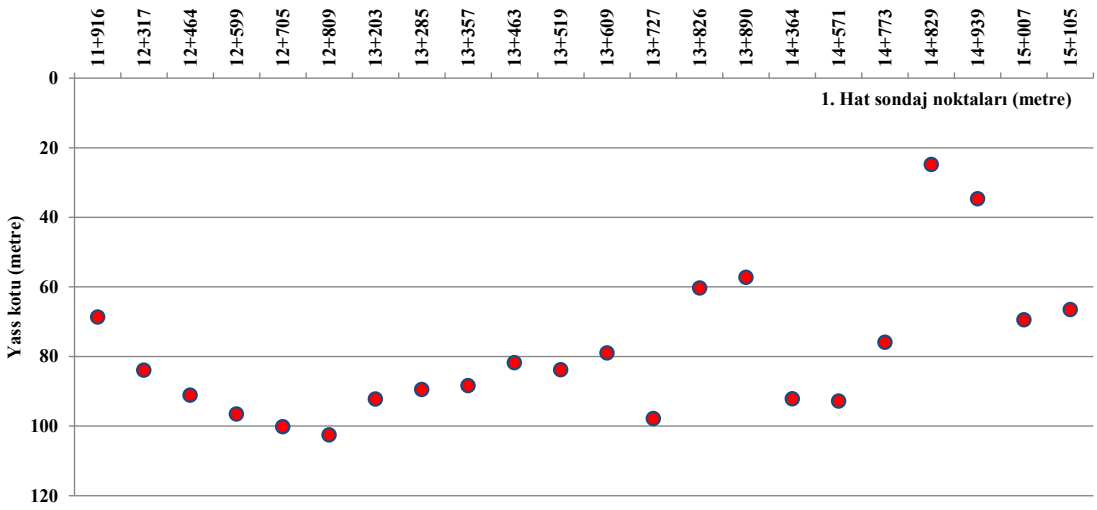
Çalışma alanı için yoğun yağış dönemi, Ekim – Mart arası, en kurak dönem ise Mayıs – Eylül arasıdır. Ancak son yıllarda yağışlı dönemlerin geçmişe oranla daha düzensiz seyrettiği, zaman zaman ani ve şiddetli yağışların yaşandığı gözlemlenmektedir. Yağışlar döküm sahalarının kapanmasına sebebiyet verdiklerinden dolayı kazı çalışmasının durmasına neden olabilirler. Ekonomik ve zamansal kayıpların önüne geçebilmek için döküm sahalarının daha özenli planlanması gerekmektedir.

Kazı güzergâhı ve çevresindeki yoğun şehirleşme dolayısı ile yağışların çok önemli bir kısmı akışa geçmekte ve şehrin alt yapı hatları vasıtası ile derelere veya denize ulaşmaktadır. Dolayısı ile yağışın çok az bir miktarı yeraltına süzülebilmektedir.

Kazı tünelleri güzergâhına en yakın konumda bulunan yüzeysel su kaynağı Alibeyköy deresi ile bu dereye ait daha güneybatıda kalan yan kollardır. Bunun dışında güzergâhta herhangi bir yüzeysel su kaynağı (Akar halde dere, göl veya deniz) mevcut değildir (Polat, 2015).

Güzergâhta kabaca Km 13+820 ile Km 14+300 arasında yer alan Çukurçeşme üyesine ait kum ve siltli kumlar orta - yüksek geçirimli özellikleri dolayısı ile akifer olma potansiyeline sahiptir. Gerek yoğun şehirleşme dolayısı ile beslenme alanlarının özelliklerinin yitirilmesi gerekse aşırı su çekimlerinden dolayı akiferler hidrojeolojik anlamda verimsizdir. Güzergâhın Km 12+140 – 13+820 arasında kalan kesimini oluşturan Çekmece formasyonunun Güngören üyesi, ağırlıklı olarak kil ve siltli killerden oluşmakta olup, hidrojeolojik anlamda geçirimsizdir ve kazı alanında yerel bariyerlerdir. Kazı güzergâhında yer alan siltli birimler yarı geçirimlidir. Tektonik süreçler sonucunda jeolojik birimlerin sonradan kazanmış olduğu kırıklı yapılar ve yüzeye yakın kesimlerinin ayrışması kayaçlarda ikincil geçirimliliği artırmıştır.

Çalışmalar kapsamında açılan araştırma sondaj kuyuları, yeraltı su ölçümleri yapılması amacı ile PVC borular ile teçhiz edilmiştir. Kuyularda yaklaşık 15 – 60 gün süre ile ölçümler yapılarak statik yeraltı su seviyeleri (YASS) tespit edilmiştir (Şekil 3.11, Çizelge 3.4). İnceleme alanında yeraltı su kotu 24 metre ile 102 metre arasında değişim gösterir (Polat, 2015).



Şekil 3.11: 1. Hatta mesafeye bağlı olarak yass değişimi.

Çizelge 3.4: Veysel Karani - Yenimahalle İstasyonu arası güzergahında yeraltı su seviyeleri (Polat, 2015).

Sondaj No	Km (Hat-1)	X	Y	Kot	Kuyu Derinliği	Y.A.S.S	Y.A.S.S Kotu
MMT-27	11+916	4549988	410164	87,41	39	18,70	68.71
MMT-26	12+317	4550009	409766	104,09	51	20,10	83.99
MMT-28	12+464	4550042	409616	107,33	51	16,20	91.13
MMT-29	12+599	4550136	409517	115,63	52	19,10	96.53
MMT-30	12+705	4550184	409426	119,42	48	19,20	100.22
MMT-31	12+809	4550239	409337	115,13	44	12,60	102.53
MMT-32	13+203	4550325	408954	102,72	31	10,50	92.22
MMT-33	13+285	4550338	408870	102,50	34	13,00	89.5
MMT-34	13+357	4550382	408811	99,42	35	11,00	88.42
MMT-35	13+463	4550439	408721	92,58	30	10,80	81.78
MMT-36	13+519	4550470	408675	89,01	32	5,20	83.81
MMT-37	13+609	4550523	408602	58,31	29	6,30	79.01
MMT-38	13+727	4550582	408502	80,24	31	12,40	97.84
MMT-39	13+826	4550620	408412	78,86	32	18,50	60.36
MMT-40	13+890	4550639	408351	78,65	33	21,40	57.25
MMT-42	14+364	4550629	407881	101,89	57	9,70	92.19
MMT-43	14+571	4550532	407705	100,96	60	8,30	92.86
MMT-44	14+773	4550380	407574	83,14	41	7,20	75.94
MMT-45	14+829	4550299	407504	78,77	43	18,20	24.8
MMT-46	14+939	4550311	407425	88,66	51	16,30	34.7
MMT-47	15+007	4550303	407357	81,97	45	12,50	69.47
MMT-48	15+105	4550346	407266	73,63	36	7,10	66.53

4. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

Jeoteknik çalışmalar kapsamında, 26 adet zemin araştırma sondajı açılmış, sondajlarda yerinde standart penetrasyon testi (SPT), presiyometre ve basınçlı su testleri gibi deneyler gerçekleştirilmiş ve sondajlardan alınan zemin ve kaya örnekleri üzerinde indeks ve mekanik laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Kazı ile eş zamanlı olarak ayna yüzeyinden alınan bazı numunelerde nokta yük ve birim ağırlık testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonucu ve yorumlamasına TBM'in performansı bölümünde değinilmiştir.

4.1 Araştırma Sondajları

Sondaj çalışmaları kapsamında, derinlikleri 29 m ile 75 m arasında (ortalama derinlik 43 m) değişen 26 adet zemin araştırma sondajı yapılmıştır (Ek A). Karotlu delgiler kısmen Wire-Line yöntemle, NQ çaplı karotiyerle, kısmen de klasik yöntemde çift veya tek tüplü karotiyerler ile gerçekleştirilmiştir. Zemin niteliğindeki birimlerde (Tamamen ayrışmış kaya dahil) düşeyde 1,5 m aralıkla penetrasyon testleri yapılmış ve örselenmiş numuneler, kaya ortamda ise sürekli karot numuneler alınmıştır. Killi seviyelerde ayrıca örselenmemiş (UD) örnekler alınmıştır. Birçok kuyuda, delgiler sırasında ayrıca basınçlı su testleri (BST) ve presiyometre (PMT) testleri yapılmıştır. Sondajların bir kısmında uygun ve yeterli örnek alınmış olmasına karşın, bazı sondajlarda, zemin koşullarından veya sondaj tekniğinden kaynaklanan sebeplerden dolayı, yeterli örnek alınamamıştır.

4.1.1 Standart Penetrasyon Testleri

Delgiler sırasında başta kumlu kısımlar olmak üzere, zemin ve tamamen ayrışmış kaya niteliğindeki seviyelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile toplam 178 adet Standart Penetrasyon Testi (SPT) yapılmıştır.

SPT kum zeminlerin sıkılığı, kil zeminlerin ise kıvamlarının tespiti amacı ile yapılır. ASTM standardına göre, test 63,5 kg ağırlığındaki şahmerdanın 76 cm yükseklikten düşürülerek sondaj dizisinin ucundaki penetrasyon tüpünün zemin içine 30 cm batması için gerekli darbe sayısının (N_{30}, veya penetrasyon direnci) tespiti esasına

dayanır (Polat, 2015). Yüksek N_{30} değerleri sağlam, düşük N_{30} değerleri ise gevşek zeminlere karşılık gelir. Penetrasyon testleri sırasında 15 cm lik penetrasyon boylarının her hangi birinin penetrasyonu sırasında, darbe sayısının 50 ve üzerine ulaşması "refü" yani kaya olarak değerlendirilmiştir.

Güzergâhta karşılaşılan zemin niteliğindeki seviyelerin, killi ve kumlu kısımları ayrı tutulmaksızın, yüzeye yakın (Yüzeyden itibaren 8 – 10 m) kesimlerinde penetrasyon direnci (N_{30}) 6 ile >50 arasında değişim gösterirken, derin kısımlarda 35 ile >50 aralığında değer almıştır. Birçok penetrasyon testi ise ilk 15 cm de veya ikinci 15 cm de refü değere ulaşmıştır. Buna göre, güzergâhta karşılaşılan zemin niteliğindeki birimler, üst seviyelerde orta sıkı kum veya çok katı killerden, alt seviyelerde ise genellikle sıkı yerleşmiş kumlar ve katı killerden oluşmaktadır. Yüzeye yakın kesimlerde nispeten düşük değerler elde edilmiş olması, birimlerin yüzeye yakın kesimlerinin atmosferik etkilerle ayrışmasından kaynaklanmaktadır.

4.1.2 Presiyometre Testleri

Zemin ve kaya birimlerinin mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile araştırma programında belirtilen kuyularda 48 adet presiyometre deneyi yapılmıştır.

Presiyometre deneyi, çok yumuşak ve yumuşak zeminlerden başlayarak elastisite modülü, 200 kg/cm^2 ye kadar olan kayaların mekanik karakteristiklerinin belirlenmesi ve jeolojik süreksizliklerin etüdü için yapılır. Deneyin prensibi, sondaj kuyusu içinde belli seviyelerde, cihazın kuyuya indirilen kısmı ile meydana getirilen radyal basınçların, kuyu cidarında oluşturduğu deformasyonlara karşıt gelen hacim – basınç grafiğinin değerlendirilmesinden ibarettir. Deney yapıldıktan sonra, OX ekseni basınç cinsinden, OY ekseni ise hacim cinsinden değişimleri göstermek üzere, hacim – basınç diyagramı çizilir. Eğrinin tümsek kısmı, verilen basınç artması ile probun zemine oturması ve zeminin içsel basıncına (Po) karşılık gelir. Po'dan sonra eğri lineer olur. Bu safhaya elastik safha denir. Elastik safhadan sonra eğri yükselmeye başlar. Bu safhaya ise plastik safha denir. Limit basınç (Pl) hacim artışlarının teorik olarak sonsuza vardığı noktadır ki, bu nokta aynı zamanda teorik olarak zeminin taşıma gücünü gösterir (Polat, 2015).

Presiyometre deneylerine ait veriler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Presiyometre test sonuçları (Polat, 2015).

Formasyon	Litoloji	Limit Basınç – Pi (kg/cm^2)			Presiyometre Modülü – Ep (MPa)		
		En düşük	En yüksek	Ortalama	En düşük	En yüksek	Ortalama
Çekmece (Güngören)	Kil, kumlu kil, killi kum	6	23,5	18,5	3	32	18
Çekmece (Çukurçeşme)	Kum, siltli kum, killi kum	9,5	23	15,4	14	27	21
Orta derecede ayrışmış kaya	Kumtaşı, şeyl	23,3	23,5	23,4	230	339	286
Az ayrışmış – ayrışmamış kaya	Kumtaşı, şeyl	23,3	37,7	31,4	284	599	405

Zemin kısımlarda ortalama limit basınç değeri 15,4 ile 18,5 kg/cm^2 arasında, presiyometrik modül ise 18 ile 21 MPa arasında ölçülmüştür. Buna karşın, kaya kısımlarda ortalama limit basınç değeri 23,4 ile 31,4 kg/cm^2 arasında, presiyometrik modül ise 286 ile 409 MPa arasında değerler almıştır. Gerek kaya içinde elde edilen limit basınç değerlerinin düşüklüğü, gerekse test grafikleri, kaya içinde yapılan deneylerde kayaç dayanım göstermiştir (Polat, 2015).

4.1.3 Basınçlı Su Testleri (BST, Paker Testi)

Basınçlı su testleri kayaç ortamların geçirimliliğini belirlemek amacı ile kayaca basınç altında su verilmesi şeklinde yapılır. Deney, kayacın özelliklerine (kırıklılık vb.) bağlı olarak tek lastikli (tıkaçlı) ve çift lastikli olmak üzere iki şekilde yapılır. Yapılan deney sonuçlarından kayaç ortamın geçirimliliğinin belirlenmesi değişik yöntemler ile hesaplanabilir. Günümüzde en yaygın kullanılan hesap ve değerlendirme şekli Lugeon yöntemidir. Lugeon, 1 m uzunluğundaki deney zonuna, 10 atmosfer gerçek basınç altında, 1 dakika boyunca litre olarak basılan su miktarıdır. Birimi lt/dakika/metre şeklindedir (Polat, 2015). Lugeon değerlerine göre kaya birimleri geçirimlilik düzeylerine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2: Kayaçların Lugeon yöntemine göre geçirimlilik sınıflaması.

Lugeon Değeri (l/dakika/m)	Geçirimlilik
< 1	Geçirimsiz
1 – 5	Az geçirimli
5 – 25	Geçirimli
> 25	Çok geçirimli

Basınçlı su deneyleri (BST, paker testi) kuyu ilerledikçe uygun görülen derinliklerde yapılmıştır. Yüksek basınca ulaşabilen, değişik akım ve basınç aralıklarına sahip pompalar ve ölçme hassasiyeti uygun araçlar (manometre) kullanılmıştır. Paker yerleştirilmeden önce dışarıda şişirilerek deney öncesi sağlamlığı ve paker hortumlarındaki olası kaçaklar izlenmiştir. Deneylerde 2-4-6-8-10-8-6-4-2 basınç kademeleri ile 1.50 m'lik deney zonlarında 10 dakikalık aralarla okumalar alınmıştır. Bu aralar sırasında elde edilen su kaybı değerleri, sahada tutulan formlara işlenmiş ve değerlendirilmiştir (Polat, 2015).

Güzergâhın bu teze konu kesiminde, kaya seviyesi içinde 55 adet basınçlı su testi (BST) yapılmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen Lugeon değerleri ve kaya guruplarına göre dağılımı aşağıda Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3: Test sonuçlarına göre güzergâhta karşılaşılması beklenen kaya biriminin geçirimlilik düzeyleri (Polat, 2015).

Sondaj No	Geçirimlilik (Lugeon) Değerleri (l/dakika/m)			Geçirimlilik Sınıflaması
	En düşük	En yüksek	Ortalama	
MMT 22	0,54	0,62	0,57	Geçirimsiz
MMT 23	0,57	0,63	0,57	Geçirimsiz
MMT 24	0,68	0,74	0,71	Geçirimsiz
MMT 25	0,48	0,58	0,55	Geçirimsiz
MMT 26	0,58	0,6	0,59	Geçirimsiz
MMT 27	0,44	0,63	0,51	Geçirimsiz
MMT 28	0,53	0,61	0,57	Geçirimsiz
MMT 36	0,64	0,64	0,64	Geçirimsiz
MMT 37	0,66	0,68	0,67	Geçirimsiz
MMT 38	0,58	0,59	0,59	Geçirimsiz
MMT 42	0,58	0,66	0,62	Geçirimsiz
MMT 43	0,55	0,58	0,57	Geçirimsiz
MMT 44	0,62	0,67	0,65	Geçirimsiz
MMT 45	0,67	0,7	0,69	Geçirimsiz
MMT 46	0,63	0,67	0,65	Geçirimsiz
MMT 47	0,57	0,62	0,6	Geçirimsiz
MMT 48	0,68	0,78	0,73	Geçirimsiz

Çizelge 4.3'ten görüleceği üzere tüm Lugeon değerleri, 1 değerinden küçük elde edilmiştir. Buna göre güzergâhta karşılaşılacak kaya biriminin tamamıyla geçirimsiz olması beklenmiştir. Ancak kazı sırasında, elde edilen bu verilere oranla daha yüksek su sızıntıları ile karşılaşılmasının ihtimal dâhilinde olduğu, kumtaşı seviyeleri, fay

zonları ve kaya biriminin Çukurçeşme kumları ile örtülü ve tünel üstündeki kaya kalınlığının az olduğu kesimlerde, nispeten daha fazla su sızıntısı ile karşılaşılmıştır.

4.2 Güzergâhta Yer Alan Zemin ve Kaya Birimlerinin Mühendislik Özellikleri

Jeolojik – litolojik özellikleri bakımından, güzergâhta iki tür zemin (kum ve kil zeminler) ve bir kaya ortamı söz konusu olmasına karşın, birimlerin düşey ve yanal yönde sık değişim göstermeleri ve ardalanmalı heterojen yapı göstermeleri mühendislik özellikleri açısından 4 farklı zemin ve 2 farklı kaya ortamı tanımlanmıştır.

Sondajlardan alınan yaklaşık 110 adet zemin ve 170 adet dolayında kaya örneği üzerinde tanımlayıcı (Dane boyu dağılım, hidrometre, kıvam, birim hacim ağırlık, su içeriği) ve mekanik (Kayada ve zeminde serbest basınç, üç eksenli basınç, kesme kutusu ve nokta yükleme) deneyleri yapılmıştır (Polat, 2015).

Değerlendirme aşamasında kaya birimi ayrışma düzeylerine göre W3-W4 (Çok – orta derecede ayrışmış) ve W1-W2 (az ayrışmış - ayrışmamış) kaya birimi olmak üzere iki seviye şeklinde tanımlanmıştır.

Güzergâhı oluşturan zemin – kaya ortamlar, aşağıda sıralanmış ve jeoteknik kesitler (Ek B) üzerinde gösterilmiştir. Güzergâh için hazırlanmış olan diğer çalışmalarla bütünlük sağlaması açısından, zemin profilinde yer alan tabakalar, daha önce sunulan çalışmadaki benzer tabakalarla aynı sayı numarası ile numaralandırılmıştır;

Zemin (Ayrık – Yarı Pekişmiş) Ortamlar

- Orta sıkı – sıkı kum ara tabakalı çok katı – sert siltli kil (3a)
- Sert kil, siltli kil, kiltaşı ara seviyeli (4)
- Orta sıkı - sıkı kum / siltli kum, kil ara seviyeli (6)
- Sıkı siltli kum (7)

Kaya Nitelikteki Ortamlar

- Çok - orta derecede ayrışmış kumtaşı – şeyl (W3-W4)
- Az ayrışmış veya ayrışmamış kumtaşı – şeyl (W1-W2)

4.2.1 Zemin niteliğindeki ortamlar

Orta Sıkı – Sıkı Kum Ara Tabakalı Çok Katı – Sert Siltli Kil (3a) : Birim ağırlıklı olarak düşük plastisiteli çok katı – sert kil ve orta sıkı – sıkı siltli kum seviyelerinden oluşmaktadır. Yüzeyde kabaca Km 12+150 civarında ince bir seviye halinde başlayıp

tünel ilerleme yönünde kalınlaşarak devam eder. Ağırlıklı olarak kil ve siltli killerden oluşmakla birlikte, yaygın şekilde siltli ince kum, kumlu silt ve kumlu kil ara seviyeler içerir. Bu birim için arazi ve laboratuvarda elde edilen mühendislik verileri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4: Orta sıkı – sıkı kum ara tabakalı çok katı – sert siltli kil (3a) tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri (Polat, 2015).

Parametre		En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama	Zemin Grubu	Örnek Sayısı
Penetrasyon Direnci	SPT, N_{30}	6	50	30	SM %36 CL %46 Diğerleri (CH, ML, SC, GW-GM) %18	58
Çakıl Oranı %		0	52	3		28
Kum Oranı %		1	81	30		28
Kil+Silt Oranı %		10	99	67		28
Likit Limit (LL)%		27	67	44		28
Plastik Limit (PL)%		8	23	13		28
Plastisite İndisi (PI)%		17	53	31		28
Su İçeriği (W_n)%		12	38	23		28
Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)		17,8	18,5	18,2		2
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)		123	148	136		2
Kohezyon (kPa)		50	88	69		Cu=qu/2
İçsel Sürtünme Açısı φ(derece)		9	12	10		2
Net limit basınç (kg/cm^2)		6	13	9		3
Presiyometrik Modül (MPa)		3	10	7		3

Ortalama N_{30} penetrasyon test değerleri 30 olarak hesaplanmıştır. Laboratuvar deneylerinde örneklere ait su içeriği değerleri, genellikle plastik limit değerinden yüksek bazen iki katına ulaşmaktadır. Bu durum, su içeriği deneylerinin ağırlıklı olarak örselenmiş ve sondaj suyundan etkilenmiş örnekler üzerinde yapılmış olmasından kaynaklanmaktadır (Polat, 2015).

Sert Kil / Siltli Kil ve Kiltaşı Ardalanması, Az Kumlu (4) : Gri, koyu gri, alt seviyelerde sarımsı - kahvemsi gri, kahve renkli, sert kil - siltli killer ile bunların taşlaşmış formlarından oluşur. Yüzeyden itibaren kabaca 2 – 16 m arasında başlayan birim, tünel kazı kotlarında, Km 12+500 – 13+500 aralığında geçilmiştir. Yer yer az kalınlıklı kum ve kumtaşı ara seviyeleri içerir. Tabanında yer alan kayaya yakın kesimlerde renk tedrici olarak sarı – kahveye döner ve seyrek olarak ana kayadan kopmuş parçalardan oluşan çakıl ihtiva eder. Bu tabaka esas olarak sert zemin – yumuşak kaya özelliğindedir. Tabakaya ait arazi ve laboratuvar verileri aşağıda Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5: Sert kil / siltli kil ve kiltaşı ardalanması, az kumlu (4) tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri (Polat, 2015).

Parametre	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama	Zemin Grubu	Müh. Tanımlama	Örnek sayısı
Penetrasyon Direnci SPT, N_{30}	29	R	>50	CL – CH %86	Sert Kil / Siltli Kil ve Kiltaşı Ardalanması Kumlu Ara Seviyeler Bulundurur.	96
Çakıl Oranı %	0	47	2	Diğerleri (ML, SC, MH) %14		63
Kum Oranı %	0	87	12			63
Kil+Silt Oranı %	13	100	86			63
Likit Limit (LL) %	25	75	50			61
Plastik Limit (PL) %	6	39	14			61
Plastisite İndisi (PI) %	13	63	36			61
Su İçeriği (Wn) %	13	42	28			46
Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	1,9	2,6	2,2			12
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	310	760	560			4
Nokta Yük Dayanım İndeksi (MPa)	0,11	1,47	0,53			10
Elastisite Modülü (MPa)	44	54	47			3
Net Limit Basınç (MPa)	1	2,3	1,9			36
Presiyometrik Modül (MPa)	7	32	19			36

Birim ağırlıklı olarak düşük – yüksek plastisiteli kil ve kiltaşlarından oluşmaktadır. Bu seviyeye karşılık gelen toplam 98 adet penetrasyon testinin 18 adedinde N_{30} değerleri 29 – 50 arasında, 18 tanesinde 50 den büyük elde edilmiş, 62 adet testte ise "refü" değere ulaşılmıştır. Bu seviye için N > 50 kabulü yapılmıştır.

Birimin bazı kesimlerinin yeterince pekişmiş olması dolayısı ile sınırlı sayıda tek eksenli basınç dayanım deneyi yanı sıra nokta yük indisi deneyleri yapılmıştır.

Basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında, nokta yük indeksi değerlerinin çok yüksek olduğu görülmektedir (Polat, 2015).

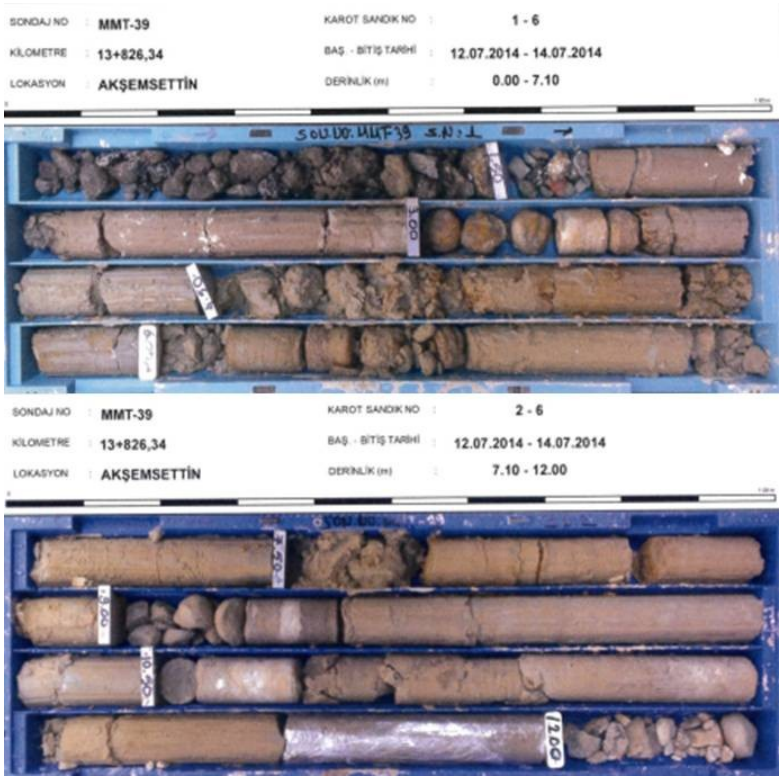
Orta Sıkı - Sıkı Kum / Siltli Kum, İnce Kil Ara Seviyeli (6) : Kumlu kil - killi kum ara seviyeler bulundurmakla birlikte, ağırlıklı olarak sarı renkli ince kum ve siltli kumlardan oluşur. Yüzeyde Km 13+750 – 14+320 arasında yer alan bu tabakayla, delme tünel kazı kotlarında veya tünel etki zonunda karşılaşılmamıştır. Birim için arazi ve laboratuvarda elde edilen mühendislik veriler, aşağıda Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6: Kil ara seviyeli, orta sıkı - sıkı kum / siltli kum (6) tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri (Polat, 2015).

Parametre	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama	Zemin Grubu	Müh. Tanımlama	Örnek sayısı
Penetrasyon Direnci SPT, N_{30}	21	50	30	Bir örnek SM, bir örnek CL	Orta sıkı – Sıkı Siltli Kum	4
Çakıl Oranı %		0				2
Kum Oranı %		18 – 65				2
Kil+Silt Oranı %		35 - 82				2
Likit Limit (LL) %						2
Plastik Limit (PL) %	NP - 29	NP - 18	NP - 11			2
Plastisite İndisi (PI) %						2

Sınırlı sayıdaki penetrasyon test verisine göre "Orta sıkı - Sıkı kum" olarak kabul edilebilir. Tabakanın killi ara seviyeleri ise çok katı kıvamlı, düşük plastisiteli (CL) kile karşılık gelir. Düzeltilmiş N_{30} penetrasyon test değerleri, ortalama 30 olarak alınmıştır.

Sıkı – Çok Sıkı Siltli Kum – Kumtaşı Ardalanması (7): Yüzeyden itibaren kabaca 2 – 8 m arasında değişen derinlikte başlayan bu seviye, esas olarak sarı kahvemsi sarı renkli, sıkı yerleşmiş siltli ince kumlar ile bunlarla ardalanan zayıf – orta derecede tutturulmuş (çimentolanmış) kumtaşı ara seviyelerden (Özellikle MMT 39 sondajında) oluşur (Şekil 4.1, Şekil 4.2).



Şekil 4.1: MMT-39'a ait sondaj karot örnekleri (Polat, 2015).

İnce ara seviyeler halinde çakıllı kısımlar da bulundurur. Kumlar, genellikle ince – orta taneli, ağırlıklı olarak kuvars kökenlidir. Bu tabaka için elde edilen arazi ve laboratuvar verileri Çizelge 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.2: MMT-40'a ait sondaj karot örnekleri (Polat, 2015).

Çizelge 4.7: Sıkı – çok sıkı siltli kum, kumtaşı (7) tabakasına ait arazi ve laboratuvar verileri (Polat, 2015).

Parametre	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama	Zemin Grubu	Müh. Tanımlama	Örnek sayısı
Penetrasyon Direnci SPT, N_{30}	51	R	>50	SM (Siltli Kum)	Sıkı – Çok Sıkı Kum	17
Çakıl oranı %	0	40	8			
Kum Oranı %	21	68	55			8
Kil+Silt Oranı %	32	42	37			
Net Limit Basınç (kg/cm^2)	17	23	21			5
Presiyometrik Modül (MPa)	14	21	19			5

MMT 39 ve 40 numaralı sondajlarda yapılan penetrasyon testlerinde, N_{30} değeri 50 den büyük veya refü şeklinde elde edilmiştir. Ancak yakın mesafede yapılan İstasyon sondajlarında penetrasyon direnç değerlerinin 30 ile 50 arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu tabaka birleştirilmiş zemin sınıflama sistemine göre SM (Siltli kum) grubu zemine, penetrasyon direncine göre ise sıkı – çok sıkı kum – Kumtaşı olarak tanımlanabilir.

4.2.2 Kaya nitelikteki ortamlar

Kaya nitelikli ortamların büyük kısmı, kumtaşı – şeyl ardalanmasından oluşan Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu içerisinde yer alır. Birim yoğun şekilde süreksizlik düzlemleri ile kesilmiştir. Genelde sık kırıklı – parçalı olmakla birlikte, yer yer çok parçalı, yer yer ise orta – seyrek kırıklıdır.

Yoğun şehirleşme ve kısmen Neojen birimlerle örtülü olması nedeni ile güzergâhta sınırlı sayıda kaya mostrası gözlemlenebilmiştir. Bu mostralardan, kaya biriminin tabakalanma dâhil süreksizlikler ile kesildiği, bazı kesimlerde ise yoğun şekilde kırıklı ve çatlaklı olduğu gözlenmiştir. Mostralarda tabakalanma düzlemleri kısmen batı – güneybatı yönde, kısmen de kuzey yönde eğimli olmakla birlikte, kıvrımlanma sonucu sıkça değişim gösterir.

Eklem ve çatlaklar, ileri derecede ayrışmış kesimlerde belirsiz, orta - az ayrışmış kesimlerde kil dolgulu veya açıktır. Kiltaşı seviyelerinde süreksizlikler sıkı, ancak düz ve dalgasız, buna karşın kumtaşı seviyelerinde nispeten aralıklı, dalgalı ve hafif pürüzlüdür. Çamurtaşları ise genellikle bu ikisinin arasında özellikler sergiler.

Yoğun yapılaşma nedeniyle yüzey mostraları verileri çok sınırlı şekilde gözlemlenebilmiştir. Bu nedenle fay vb. yapısal unsurların geometrileri hakkında bilgi edinilememiştir. Ancak, gerek bu çalışma kapsamında yapılan sondajlar,

gerekse Trakya formasyonunda bu güne kadar yapılmış çok sayıdaki çalışma, birimin sıkça küçüklü - büyüklü fay ve makaslama türü süreksizlik düzlemleri (zonlar) ile kesildiğini göstermektedir (Polat, 2015).

Çok – Orta Derecede Ayrışmış Kumtaşı - Şeyl (W3-W4): Sondaj verileri ve halihazırda belirlenmiş tünel kazı kotlarına göre, W3-W4 kaya kesimi, Alibeyköy doğu portalında, Km 12+400 – 12+500 arasında ve Km 13+500 – 13+700 arasında tünel aynasında, Km 11+550 – 12+000 ile Km 12+200 – 12+400 aralıklarında ise tünel etki zonu içerisinde geçilmiştir.

Çok ayrışmış kesimler sarı, kahve, yer yer zeytin yeşili renklidir. Bu kesimde süreksizlik yüzeyleri genellikle killeşmiş, kısmen düz ve kayma izli, süreksizlikler yumuşayabilir kil dolguludur. Orta derecede ayrışmış kısımlar ise genelde sarımsı gri, zeytin yeşili, kumtaşı seviyeleri boz renklidir. Süreksizlik yüzeyleri kiltaşı ve silt taşlarında düzlemsel - düz, bazen çok ayrışmış, kumtaşlarında ise dalgalı, az pürüzlüdür. Süreksizlikler kısmen belirsiz, kısmen kil dolguludur. Bu kesime ait mühendislik verileri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8: Çok – orta derecede ayrışmış kumtaşı - şeyl kesimine ait mühendislik verileri (Polat, 2015).

Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama
Toplam Karot Verimi (TCR)	32	100	73
Kaya Kalite Değeri – RQD	0	32	6
Nokta Yük İndisi – İs (50) (MPa)	0,5	4,6	2,1
Tek Eksenli Basınç Dayanımı – σc(MPa)	1	10	15*
Presiyometre Modülü – Em (MPa)		230	

*Basınç dayanım değeri nokta yük indeksinden belirlenmiştir.

Çok – orta derecede ayrışmış kaya kesiminden yalnızca iki adet tek eksenli basınç deneyi yapılabilmiştir. Söz konusu bu deneylerden, 1 MPa ve 10 MPa gibi birbirlerinden ve alışıla gelmişten çok farklı dayanım sonuçları elde edilmiştir. Bu nedenle kaya biriminin bu kesimi için, basınç dayanımının nokta yük indeksinden üretilmesi tercih edilmiştir. Nokta yük indeksinden basınç dayanımına dönüşüm katsayısı (k) W3-W4 düzeyde ayrışmış kaya için 7 kabul edilmiştir. Öte yandan, bu kesimde yapılmış bir adet presiyometre sonucuna göre, presiyometrik modül değeri 230 MPa olup, beklenenden düşüktür. Bu kesim, genel olarak "düşük - orta dayanımlı, çok zayıf – zayıf, orta sert kaya" olarak değerlendirilebilir (Polat, 2015).

Az Ayrışmış veya Ayrışmamış (Taze) Kumtaşı - Şeyl (W1-W2) : Metro tünellerinin bu tez'e konu etabının kaya içinde kalan kısmının çok önemli bir kesimi az ayrışmış – ayrışmamış kaya (Kumtaşı - şeyl) içerisinde geçilmiştir.

Az ayrışmış – ayrışmamış kaya kesiminin kiltaşı seviyeleri genelde koyu gri, silttaşı seviyeleri gri, kumtaşı seviyeleri ise açık gri – mavimsi gri renklidir. Az ayrışmış kesimlerde süreksizlik yüzeyleri ayrışma sonucu sarı - kahve renk almıştır. Süreksizlik yüzeyleri kiltaşlarında düzlemsel - düz, kumtaşlarında ise dalgalı, orta denebilecek düzeyde pürüzlüdür. Eklem ve çatlaklar üst seviyelere göre nispeten dar, kısmen kil, kısmen kalsit veya silis dolguludur. Kil dolguları gri renkli ve ayrışmamıştır. Açıklıkların bir kısmı ise temiz haldedir. Az ayrışmış – ayrışmamış kaya kesimine ait mühendislik verileri Çizelge 4.9'da verilmiştir (Polat, 2015).

Çizelge 4.9: Az ayrışmış veya ayrışmamış kumtaşı - şeyl kesimine ait mühendislik verileri (Polat, 2015).

Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama
Toplam Karot Verimi (TCR)	12	100	91
Kaya Kalite Değeri – RQD	0	100	35
Nokta Yük İndisi – İs (50) (MPa)	0,8	8,1	3,7
Tek Eksenli Başınç Dayanımı – σc(MPa)	3	108	33
Presiyometre Modülü – Em (MPa)	293	363	333

Her sondaj noktasında, tünel tavanı üstünde 10 metre ile tünel tabanı altında 5 metre arası kesim, tünel etki zonu kabul edilip, kaya içinde yapılan sondajların bu zonda kalan kısımları, her sondaj noktası için mühendislik açıdan ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Çizelge 4.10). Tünellerin zemin içinde kalan kısımları için ise tüm kesitin değerlendirilmesi tercih edilmiştir.

Çizelge 4.10: Sondaj noktalarında, tünel etki zonu içinde kalan kaya - zemin kesimlerine ait bazı mühendislik verileri (Polat, 2015).

Sondaj No	Litoloji	Ayrışma (ISRM 1985)	Karot verimi TCR	RQD	Nokta Yük İndeksi (MPa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Prsmet. Modülü (MPa)
MMT-22	Kumtaşı %25 Kiltaşı – Silttaşı Ard. %75	W_2 W_1-W_2	93	25	3,2	27	-
MMT-23	Kumtaşı – Siltaşı Ard.	W_1	98	74	4,4	32	-
MMT-24	Kumtaşı %75 Silttaşı	W_1-W_2	100	56	3,8	48	-
MMT-25	Kumtaşı	W_2-W_3	97	13	3,5	41	341
MMT-27	Silttaşı – Kiltaşı Ard.	W_2	71	20	3,6	15	-
MMT-26	Kiltaşı – Silttaşı %70 Kumtaşı %30	W_1-W_3	100	30	4,4	39	363
MMT-28	Silttaşı - Kiltaşı	W_5 W_3-W_4	61	10	2,5	15	23
MMT-36	Tünel Aynası ve Alt yarı kumtaşı %50 – Silttaşı %50	W_3-W_4	67	4	2	14*	-
MMT-37	Kumtaşı %60 Silttaşı %40	W_3-W_4	72	8	2,3	21	230
MMT-38	Silttaşı – Kiltaşı Ard.	W_2 az W_3	95	26	1,5	5	-
MMT-42	Silttaşı %70 Kumtaşı %30	W_1-W_2	94	41	4	38	-
MMT-43	Kiltaşı – Silttaşı %80, Kumtaşı %20	W_1-W_2	83	6	2,8	25*	-
MMT-44	Silttaşı	W_1-W_2	65	19	4,7	11	-
MMT-45	Kumtaşı	W_1-W_2	99	26	2,5	30	-
MMT-46	Kumtaşı	W_1-W_2	100	41	2,5	23	-
MMT-47	Kumtaşı	W_1	97	66	4,1	43	-
MMT-48	Kumtaşı %90 Silttaşı %10	W_1-W_2	99	29	5,7	38	-

*Bu sondajlardan alınan öreklerde yeterli miktarda tek eksenli basınç dayanımı deneyi yapılamadığı için basınç dayanım değeri nokta yük indeksinden hesaplanmıştır. Hesaplamada dönüşüm katsayısı (k) w1 - w2 ayrışmış kaya için 9, W3 – W4 kaya için 7 alınmıştır (Polat, 2015).

5. JEOTEKNİK DEĞERLENDİRME

Bu bölümde söz konusu jeolojik birimlere ait mühendislik ve tünel kazısı açısından sınıflandırılmış ve tasarıma esas parametreler verilmiştir.

5.1 Zemin - Kaya Birimlerinin Tünel Kazısı Açısından Sınıflandırmaları

Yeraltı kazılarının güvenli ve ekonomik şekilde gerçekleştirilmesi, karşılaşılacak kaya ve zemin birimlerin doğru şekilde tespit edilmesi, sınıflandırılması ve tasarım parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesi ile mümkündür.

5.1.1 Zemin ve diyajenezini tamamlamamış birimlerinin tünelcilik açısından sınıflandırılması

Birleştirilmiş zemin sınıflamasına ek olarak, tünel mühendisliğinde zeminler kütlesel dayanım ve permeabiliteleri ile bunlara bağlı özellikleri açısından da sınıflandırılır. Kaba daneli zeminlerin (çakıl – kum karışımları) tünelcilikteki davranışları ve buna bağlı sınıflamaları, çok yaygın olarak granülometri ve standart penetrasyon test (SPT) verilerine göre, ince daneli zeminlerin ise kıvam, serbest basınç ve üç eksenli basınç test verilerine göre yapılır. Ayrıca zemin tabakasının yeraltı su seviyesi üzerinde veya altında olması da sınıflamada önemli bir etkendir. Özellikle kum zeminler, yeraltı kazılarında, yeraltı su seviyesi üzerinde veya altında bulunmalarına ve permeabilitelerine göre çok farklı davranış gösterirler (Polat, 2015).

Çalışmalar, Terzaghi (1950), Huer (1974), Huer ve Virgens (1987), Deere ve diğ. (1969) tarafından geliştirilen zemin sınıflamaları ve bu sınıflamalar dikkate alınarak çalışmalar yapılmıştır.

Bu sınıflamalara göre, tünel kazı kotunda yer alması beklenen sert kil – kiltaşı ardalanma (4) tabakası, yeraltı su seviyesi üstünde “Sağlam” su altında ise “Yavaş dökülen” zemin olarak tanımlanmıştır. Sıkı – çok sıkı siltli kum (7) tabakasının tutturulmamış kısımlarının yeraltı su seviyesi üstünde “Hızlı dökülen”, su seviyesi altında ise “Akıcı kum” şeklinde davranması, tabakanın pekişmiş (Çimentolanmış) kısımlarının ise yeraltı su seviyesi üstünde “Sağlam” su altında ise “Yavaş dökülen” zemin şeklinde davrandığı belirlenmiştir (Polat, 2015).

5.1.2 Kaya birimlerinin tünelcilik açısından sınıflandırılması

Günümüz modern tünelciliğinde projelendirmeye esas teşkil eden kaya sınıflandırmalarında, daha ziyade kayanın kütle özelliği dikkate alınmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen ve birçok ülkede yeraltı kazılarında yaygın olarak kullanılan üç önemli kaya sınıflaması mevcuttur.

Bu sınıflamalar;

NGI(Q): Tünel destekleme tasarımı için kaya kütlelerinin mühendislik sınıflaması (Kaya kalite indeksi).

CSIR (RMR) : Eklemli kaya kütlelerinin jeomekanik sınıflaması (Kaya kütle puanlama sistemi).

GSI: Jeolojik dayanım indeksi (Geological strength indeks = GSI) sınıflaması.

NGI (Q) sınıflamasında, Q değeri 0,001 ile 1000 arasında değerler almakta olup, en kötü kaya koşulu ile mükemmel kaya arasını kapsamaktadır. Benzer şekilde, 0 – 100 aralığında değişen puan sistemine dayalı RMR sınıflaması, çok iyi ile çok kötü olmak üzere 5 kaya sınıfı tanımlar. GSI sınıflamasında ise, kayaç kütlesi tekstürel açıdan 6, çatlakların durumu ve ayrışma derecesi açısından ise 5 olmak üzere toplam 25 kategori içinde sayısal olarak ifade edilmektedir. GSI sınıflaması, en kötüden en iyi kaya koşuluna uygulanabilirliği dolayısı ile günümüzde özellikle mühendislik değerlendirmeler açısından CSIR sınıflamasına tercih edilmektedir. Başlangıçta (1995) RMR ve Q sınıflandırma puanları ile ilişkilendirilen GSI, daha sonraki yıllarda yapılan değişikliklerle tek başına bir sınıflandırma sistemi olarak kullanılmaktadır (Polat, 2015).

Sınıflandırmalar arasındaki teorik bağıntılar aşağıdaki şekildedir.

$$RMR = 9 \text{ Log } Q + 44 \tag{5.1}$$

GSI = RMR 76, veya GSI = RMR 89 - 5 (76 ve 89, RMR değerinin hesaplanması ile ilgili 1976 ve 1989 yıllarındaki versiyonlarını ifade eder)

$$GSI = 9 \text{ Log } Q' + 44 \tag{5.2}$$

Q' Modifiye edilmiş Q olup, (RQD/Jn)*(Jr/Ja) olarak ifade edilir.

Yukarıdaki bölümlerde sunulan mühendislik verileri, saha gözlemleri ve yeraltı suyu koşulu birlikte değerlendirilerek, güzergâhı oluşturan kaya birimi, hem farklı ayrışma düzeyleri hem de tünel etki zonu için ayrı ayrı olmak üzere kaya kalite indeksi (Q),

kaya kütlesi puanlama sistemi (RMR) ve jeolojik dayanım indeksi (GSI) ne göre sınıflandırılmıştır.

RMR sınıflandırması Bieniawski (1989)'a göre yapılmıştır. Sınıflamada yeraltı su puanı, eklemdeki su basıncı / en büyük asal gerilim (Sığ tüneller için en büyük asal gerilim = düşey gerilim kabul edillir (Hoek, 2002)) oranına göre belirlenmiş, süreksizlik yönelim düzeltmesi için ise –5 (orta) alınmıştır. RMR puanı, RMR "Temel", süreksizlik düzeltmesi yapılmış RMR ve GSI değerinin belirlenmesine yönelik olmak üzere üç şekilde hesaplanmıştır (Polat, 2015).

GSI değerinin belirlenmesine yönelik RMR hesaplamasında, yeraltı su durumu için 15 (tamamen kuru), süreksizlik yönelim düzeltmesi için ise "0" (çok uygun) puan alınmıştır (Polat, 2015). GSI değerleri, kısmen RMR ve Q değerlerinden, yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak, kısmen de arazide gözlemlenebilen mostralardan belirlenmeye çalışılmıştır.

5.1.2.1 Farklı ayrışma düzeyleri için kaya kütle sınıflandırmaları

Tünel etki zonu içinde kalan farklı düzeyde ayrışmış kaya seviyeleri için yukarıdaki bölümlerde sunulan fiziksel, litolojik özellikler ve mühendislik verilere dayalı olarak hazırlanan kaya kütle sınıflaması Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Güzergâh geneli için ayrışma düzeylerine dayalı kaya kütle sınıflaması (Polat, 2015).

Kaya Grubu	Q Değeri ve Kaya Sınıfı		RMR Temel ve Kaya Sınıfı		RMR_{SYD}	GSI_{ORT} Değeri ve Kaya Sınıfı	
Az Ayrışmış veya Ayrışmamış W_1-W_2	1,04	Zayıf	43	Orta Kaliteli Kaya	38	49	İyi / Bloklu - Örselenmiş
Çok – Orta Derecede Ayrışmış W_3-W_4	0,10	Çok Zayıf	32	Zayıf Kaya	27	39	Orta – Zayıf / Bloklu - Örselenmiş

5.1.2.2 Sondaj noktalarında tünel etki zonu için kaya kütle sınıflandırmaları

Güzergâhta yapılan her sondaj noktasında, tünel etki zonunda kalan kaya kesimi için yukarıdaki bölümlerde verilen fiziksel, litolojik özellikler ve mühendislik verilerine dayalı olarak hazırlanan kaya kütle sınıflaması özet olarak Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2: Sondaj noktalarında, tünel etki zonu için kaya kütle sınıflaması (Polat, 2015).

Sondaj No	Tünel Etki Zonu (Derinlikler Yüzeyden İtibaren)	Q Kaya Kütle Sınıflaması (Barton & Lien 1974)		Kaya Kütle Değeri (Bieniawski 1989)			Jeolojik Dayanım İndeksi GSI_{ORT}	
		Q Değeri	Kaya Sınıfı	Temel RMR Puanı	Kaya Sınıfı	RMR_{SYD}	GSI Değeri	Kaya Sınıfı
MMT-22	16-38	0,31	Çok Zayıf	42	Orta Kaya	37	44	Bloklu – Örselenmiş – parçalanmış / Çok Zayıf - İyi
MMT-23	47-69	7,4	Orta	50	Orta Kaya	45	57	
MMT-24	27,5-49	1,66	Zayıf	51	Orta Kaya	46	53	
MMT-25	17-38	0,22	Çok Zayıf	43	Orta Kaya	38	45	
MMT-27	13-34	0,33	Çok Zayıf	42	Orta Kaya	37	45	
MMT-26	26-47	0,5	Çok Zayıf	40	Orta Kaya	35	46	
MMT-28	23-44	0,03	Çok Fazla Zayıf	28	Orta Kaya	23	36	
MMT-36	16-27	0,03	Çok Fazla Zayıf	27	Orta Kaya	22	36	
MMT-37	May.26	0,03	Çok Fazla Zayıf	28	Orta Kaya	23	36	
MMT-38	Eyl.25	0,12	Çok Zayıf	34	Orta Kaya	29	40	
MMT-42	34-55	0,46	Çok Zayıf	39	Orta Kaya	34	47	
MMT-43	33-55	0,1	Çok Zayıf	33	Orta Kaya	28	41	
MMT-44	16-37	0,25	Çok Zayıf	35	Orta Kaya	30	43	
MMT-45	17-39	0,58	Çok Zayıf	42	Orta Kaya	37	48	
MMT-46	22-43	1,21	Zayıf	46	Orta Kaya	41	50	
MMT-47	15-36	7	Orta	53	Orta Kaya	48	57	
MMT-48	Tem.28	0,97	Çok Zayıf	45	Orta Kaya	40	50	
En Küçük Değer		0,03	Çok Fazla Zayıf	27	Zayıf Kaya	22	36	
En Yüksek Değer		7,4	Orta	53	Orta Kaya	48	57	
Ortalama		1,128 (0,5)*	Zayıf	40	Orta Kaya	34	45,3	

*MMT 23 ve MMT 47 sondajlarındaki yüksek Q değerleri dolayısı ile ortalama Q değeri beklenenden yüksek hesaplanmaktadır. Ortalama 0,5 alınması tavsiye edilir

5.2 Kazılabilirlik ve Aşındırma

Kazı güzergâhında, kazının ağırlıklı olarak az ayrışmış veya ayrışmamış kaya seviyesi içinde kaldığı görülmüştür. Az ayrışmış veya ayrışmamış kesimlerde kumtaşı seviyeleri orta sert, orta dayanımlı, orta derecede aşındırıcı, ayrışmış kesimlerde ise yumuşak – az dayanımlı, az aşındırıcıdır. Kiltaşı ve Silttaşı seviyelerinin ise az aşındırıcı olması kabul edilebilir.

Çizelge 5.3'te Cerchar Aşındırma İndeksine (CAI) bağlı Trakya Formasyonunun yeri verilmiştir. Çizelge 5.3'ten görüleceği üzere Trakya formasyonu orta derecede aşındırıcı sınıfına karşılık gelmektedir.

TBM kesici kafasındaki keskilerin belirli bir aşınma limiti vardır. Kesici kafadaki sensörlerin bilgisayar ortamına aktardığı sayısal veriler yorumlanarak keskilerin kontrol zamanlarına karar verilir. Kontrol edilmeye karar verildiğinde bir keski ölçme aparatı ile keskilerin aşınmaları tespit edilir. Aşınma limitine gelmiş olan keskiler yenisi ile değiştirilir. Kuvars miktarı yüksek birimlerde bu aşınma yüksek miktarda olur. Çizelge 5.3'te de görüldüğü üzere Trakya formasyonundaki kumtaşlarının yüksek kuvars içeriği Cerchar aşındırma indeksinde orta aşındırıcı – aşındırıcı sınıfına dâhil olmaktadır.

Çizelge 5.3: Cerchar Aşındırma İndeksine bağlı Trakya formasyonunun aşındırıcılık durumu (Polat, 2008).

Kategori	Cerchar Aşındırma İndeksi (CAI) (İğne Sertliği 43)	Trakya Formasyonu
Aşındırıcı Değil	0,3 – 0,5	
Az Aşındırıcı	0,5 – 1,0	
Orta Aşındırıcı – Aşındırıcı	1,0 – 2,0	1,1 – 2,00
Çok Aşındırıcı	2,0 – 4,0	
Oldukça Aşındırıcı	4,0 – 6,0	
Kuvarsik	6,0 – 7,0	

5.3 Yeraltı Suyu – Tünel İlişkisi

Güzergâhın, bu etabının önemli bir kısmını oluşturan Trakya formasyonunun, genel olarak geçirimsiz - az geçirimli, özellikle fay zonları ve kumtaşı seviyelerinde olmak üzere kısmen geçirimli olduğu kabul edilebilir. Etabın orta kısmında (Km 12+500 – 13+500 arasında) karşılaşılması beklenen Güngören formasyonu, baskın olarak kil ve kiltaşlarından oluşmakta olup, esas olarak geçirimsiz veya az geçirimlidir. Ancak birim içinde ara seviyeler halinde bulunan kum - kumtaşı baskın seviyelerin yarı

geçirimli olduğu kabul edilebilir. Kazı güzergâhının Km 13+840 – 14+150 arasında Çukurçeşme formasyonunun tünel kotlarında kalan kesimi ağırlıklı olarak siltli kumlardan oluşmakta olup yarı geçirimlidir (Polat, 2015).

Sondaj verilerine göre, güzergâh boyunca, kabaca Km 13+840 - 14+150 arası hariç, yeraltı suyunun 10 - 20 m tünel tavanı üstünde yer alması, yeraltı su seviyesinin tünel tavanı ile tünel tabanı arasında değişkenlik göstermesi söz konusudur. Geçirimliliğin ve su taşıma potansiyelinin en yüksek olduğu bu aralıkta, su seviyesinin bu denli düşük olması, yeraltı suyunun kuyular vasıtası ile çekiliyor olması ile açıklanabilir. Formasyonların tünel kotu ile yeraltı su seviyesi ile olan ilişkisi Çizelge 5.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4: Değişen formasyonlarda yeraltı su seviyesi ile tünel kotu ilişkisi.

Formasyon	İstasyon	Sondaj no	y.a.s.s	Tünel kotu	km
Ct	YENİMAHALLE - KAZIM KARABEKİR	MMT - 48	7.1	19.62	15+080
		MMT - 47	12.5	27.86	14+980
		MMT - 46	16.3	32.2	14+900
		MMT - 45	18.2	24.71	14+800
		MMT - 44	7.2	22.53	14+710
		MMT - 43	8.1	37.25	14+560
		MMT - 42	9.7	43.3	14+340
Tçç	KAZIM KARABEKİR - AKŞEMSETTİN	MMT - 39	18.5	18.67	13+800
		MMT - 38	12.4	16.94	13+680
Ct		MMT - 37	6.3	14.4	13+580
		MMT - 36	5.2	15.38	13+500
		MMT - 35	10.8	15.88	13+440
Tçg		MMT - 34	11	18.09	13+340
		MMT - 33	13	17.71	13+272
		MMT - 32	10.5	15.221	13+180
Tçg	AKŞEMSETTİN - VEYSEL KARANİ	MMT - 31	12.6	26.84	12+800
		MMT - 30	19.2	33.59	12+680
		MMT - 29	19.1	33.84	12+580
Ct		MMT - 28	16.2	33.73	12+440
		MMT - 26	20.1	33.54	12+292

y.a.s.s.: yeraltı su seviyesi

Olası fay zonları dışında, Trakya formasyonu içinde yapılan kazılarda, yeraltı suyunun önemli bir problem teşkil etmediği görülmüştür. Aynı şekilde Güngören killeri içinde yapılan kazılar sırasında da, zaman zaman kesilmesi beklenen kumlu merceklerden gelecek küçük su boşalımları dışında önemli bir yeraltı suyu problemi ile karşılaşılmamıştır (Polat, 2015).

5.4 Tasarım (Projelendirme) Parametreleri

Zemin ve kaya birimlerine ait yukarıda verilen mühendislik özellikleri ve sınıflamalar dikkate alınarak, litolojik veya mühendislik açısından farklılık gösteren her zemin – kaya tabakası için ayrı ayrı olmak üzere, projelendirmeye esas jeoteknik parametreler (γ_n, φ ,c, Em, q) belirlenerek Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5: Tünel güzergâhında yer alan zemin – kaya birimleri için önerilen (Tavsiye edilen) tasarım (Projelendirme) parametreleri (Polat, 2015).

Kilometre	Zemin – Kaya Tabakası	D.B.H.A γ_n (kN/m^3)	Kohezyon c (kN/m^3)	İçsel Sürtünme Açısı φ(*)	Deformasyon (Elastisite) Modülü Em (Mpa)	Poisson Oranı (q)
11+584 – 12+320	Kumtaşı (Ct) Silttaşı – Kiltaşı – Ard. W_1-W_4		125	35	1400	0,3
12+320 – 12+500	Tünel üstü Tçg Ayna ve altyarı Silttaşı – Kiltaşı (Ct) W_3-W_4-W_5	24	75	24	800	0,3
12+500 – 13+500	Sert Kil / Siltli Kil ve Kiltaşı Ardalanması (4)	22	160	0	50	0,32
13+500 - 13+780	Etki bölgesi kısmen zemin, Kumtaşı – Silttaşı – Kiltaşı (Ct) – W_3 – W_4	24	75	24	650	0,3
13+780 – 14+066	Sıkı – Çok Sıkı Siltli Kum – Kumtaşı Ard. (7)	19	5	34	30	0,33
14+246 – 14+800	Kiltaşı – Silttaşı – Kumtaşı (Ct) W_1 - W_2	26	100	32	1250	0,3
14+800 – 15+635	Ağırlıklı Olarak Kumtaşı (Ct) W_1 – W_2	26	150	36	2500	0,3

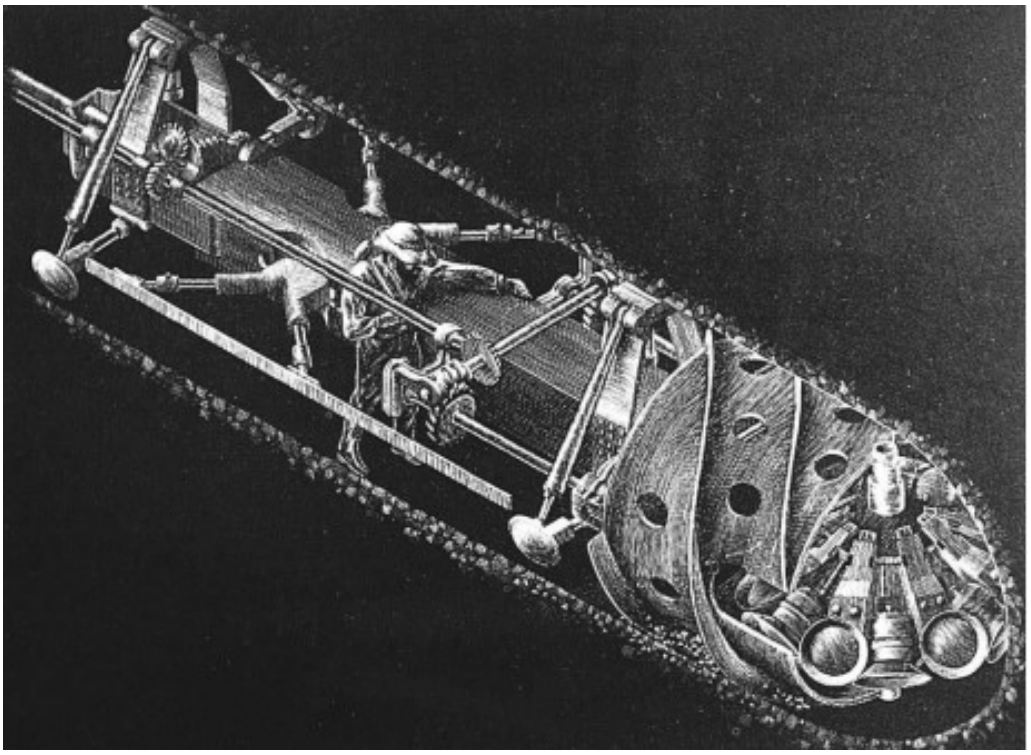
Zemin kesimlere ait parametreler SPT, PMT değerleri, laboratuvar deney sonuçları ve literatürden (Terzaghi ve Peck (1948) ve Lamb, & Whitman (1979) gibi araştırmacılar tarafından verilen grafik ve bağıntılardan) yararlanılarak belirlenmiştir.

Kaya kesimlere ait parametreler ise Q sınıflama sistemi Ja (Çatlakların alterasyonu) parametresi ve RMR değerlerinden doğrudan kestirim ve GSI ile serbest basınç dayanım değerleri kullanılarak Rocklab kaya jeomekanik analiz programı ve PMT sonuçlarından yararlanılarak belirlenmiştir. Elde edilen jeoteknik (Jeomekanik) parametreler, kısmen güvenli tarafta kalacak şekilde düzenlenerek projelendirmeye esas tavsiye parametreleri olarak verilmiştir (Polat, 2015).

Gerek zemin, gerekse kaya kısmında yapılan presiyometre testlerinden elde edilen presiyometrik modül değerleri Briaud 1992'ye göre revize edilmiştir. Rocklab analizinde m_i (Kaya sabiti) ve *MR (Kaya modülü)* için, sahamızdaki kaya birimi ile benzerliği dolayısı ile "Şeyl" kayası için önerilen değerler kullanılmıştır (Polat, 2015).

6. TAM CEPHELİ TÜNEL AÇMA MAKİNELERİ (TBM)

İlk tünel açma makinesi Amerika'daki Hoosac Tüneli'nde kullanılmıştır. Bu makine daire şeklinde döner bir kesme kafasına sahipti ve keskiler konsantrik daireler çizerek kazı yapacak şekilde dizilmişlerdi (Şekil 6.1) . Tutunma mekanizması, itme (baskı) mekanizması ve pasa uzaklaştırma düzenekleri vardı. 1856 yılı için oldukça başarılı sayılabilecek olan bu makineyi kullanan Herman Haupt isimli meşhur inşaat mühendisi, bu makine ile 3 metrelik bir ilerleme yapmayı başarmıştı (Çınar ve Feridunoğlu, 2002; Öz, 2012).



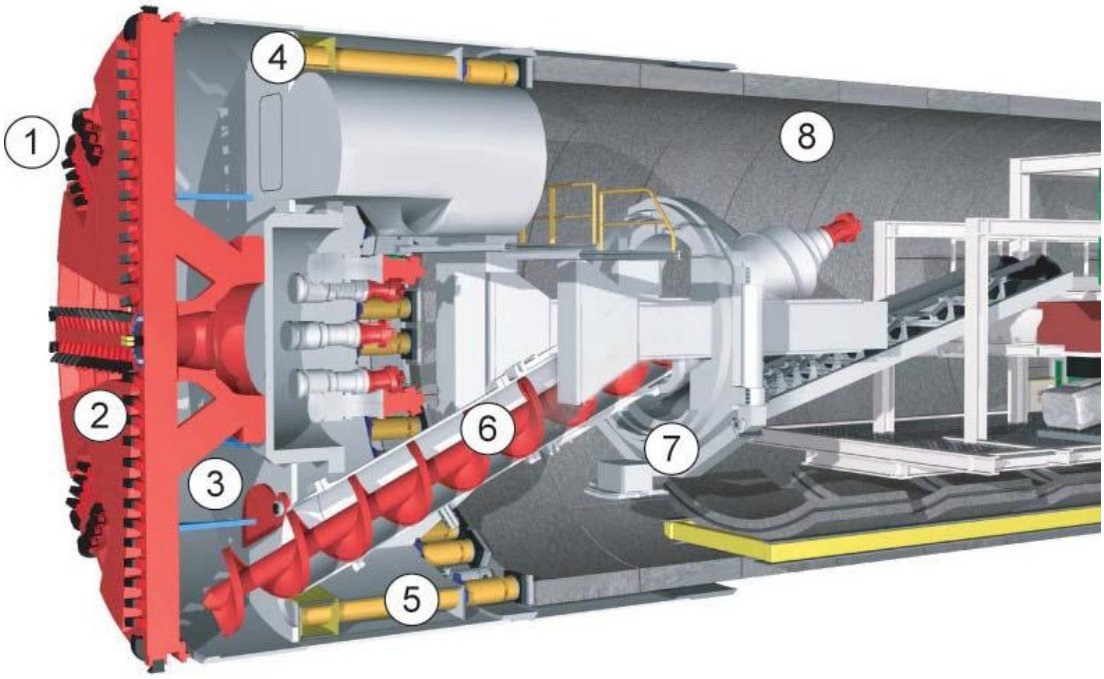
Şekil 6.1: İlk tünel açma makinesi (TBM) (Maidl vd., 2013).

James Robbins isimli mühendis 1956 yılında, kalem keskiler yerine döner disklerin kullanılma fikrini ortaya atmıştır. Bu fikir günümüzdeki tam cephe tünel açma makinelerinin gelişiminde çok önemli bir yere sahiptir. Toronto'daki bir uygulamada günde 3,8 m.'lik ilerleme gerçekleşmiştir. Bu uygulama, tam cephe tünel açma makinelerinin yumuşak ve orta sert kayaçlarda ekonomik olarak kullanılabileceğinin ilk örneği olmuştur (Öz, 2012).

6.1 TBM Genel Özellikleri

Her ne kadar ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) tasman gibi istenilmeyen yeraltı hareketlerini önleme kabiliyeti, daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir (Çınar ve Feridunoğlu, 2002). Sert, orta sert, yumuşak ve akıcı formasyonlar için kullanılacak kafa dizaynları ve keski tipleri, makineyi dengeleme sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri çeşitli yönlerden farklılıklar göstermektedir. Açılacak yeraltı boşluğu boyunca geçilecek formasyonların önceden tespiti, kullanılacak makinenin seçiminde en önemli faktörlerden biri olmaktadır (Çınar ve Feridunoğlu, 2002; Öz, 2012).

TBM'lerin yapısal özellikleri olarak kesici kafa, itme silindirleri, yönlendirme silindirleri, kilitleme pabuçları, kesici kafayı döndüren motorlar ve segmentleri yerleştiren erektörler olarak sayılabilir. TBM arkasında bulunan geri besleme sistemi olarak adlandırılan kısımda ise hidrolik güç üniteleri, elektrik trafoları, tavan cıvataları için bir delici, havalandırma fanları, pasa nakliyatı için bant konveyörler ve vagonlar bulunmaktadır (Çınar ve Feridunoğlu, 2002). Ayrıca su kesme için segment arkasına yapılan enjeksiyon sistemleri de geri besleme sisteminde bulunabilir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2: TBM kesit görünüşü (Ateş, 2013).

Şekil 6.2'de görüldüğü gibi 1 numara ile gösterilen kısım kesici kafa, 2 numaralı kısım kazı odası (hafriyat haznesi), 3 numaralı kısım basınç bölmesi, 4 numaralı kısım hidrolik itme silindirleri, 5 numaralı kısım beton tahkimatların yerleştirilmesine yardımcı olan erektör, 6 numaralı kısım pasanın dışarı atılmasına yardımcı olan konveyör, 7 numaralı kısım segment taşını şilt bölgesi taşıyan feeder'ı, 8 numara ile gösterilen yerde beton tahkimatları (segmentleri) gösterir.

Hidrolik itme silindirleri makinenin kazı yüzeyine baskı yapabilmesini ve ilerlemesini sağlamaktadır. TBM performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri olan kesici kafanın tasarımıdır. Kesici kafa tasarımı içinde kafanın açıklık oranı, açıklıkların geometrileri ve bu açıklıkların kesici kafadaki dağılımları ile kesici kafada kullanılacak olan disk ve/veya tırnak keskilerin boyutları, sayıları ve kesici kafadaki dağılımları yer almaktadır. Özellikle kesici kafa açıklıkları TBM'in güç ihtiyacını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Nitekim kullanılacak farklı açıklık oranlarında sağlam kaya TBM'lerinde pasa, kesici kafa ile arın arasına sıkışarak disk keskilerin arına istenilen oranda gücü aktaramamasına ve ciddi tork kayıplarının yaşanmasına neden olabilmektedir. Ayrıca kazı esnasında açığa çıkan pasa ne kadar çabuk kazı ortamından uzaklaştırılsa gerek kesici disklerde gerekse de kesici kafanın ana yapısında o denli az aşınma ve bu aşınmaya bağlı daha az hasar oluşmaktadır.

Mekanize kazı yönteminin, klasik delme patlatma yöntemine göre avantajlarını kıyaslarsak:

- Gelişmiş güvenlik önlemleri
- Yeryüzünün minimum düzeyde etkilenmesi
- Daha az tahkimat gereksinimi
- Sürekli kazı
- Patlatma titreşimlerini giderme
- Daha az havalandırma gereksinimi
- Daha yüksek oranda cevher kazanımı
- Seçici madencilik imkânı
- Üretimde verimi arttırma ve madencilik masraflarını düşürme

Mekanize kazı yönteminin, klasik delme patlatma yöntemine göre dezavantajlarını kıyaslarsak:

- Açıklığın şekli
- Yüksek ilk yatırım maliyeti
- Kolay taşınabilir ve esnek olmayışı
- Kazı için başlama süresinin uzun oluşu
- Kalifiye eleman gereksinimi

6.2 TBM Sınıflandırması

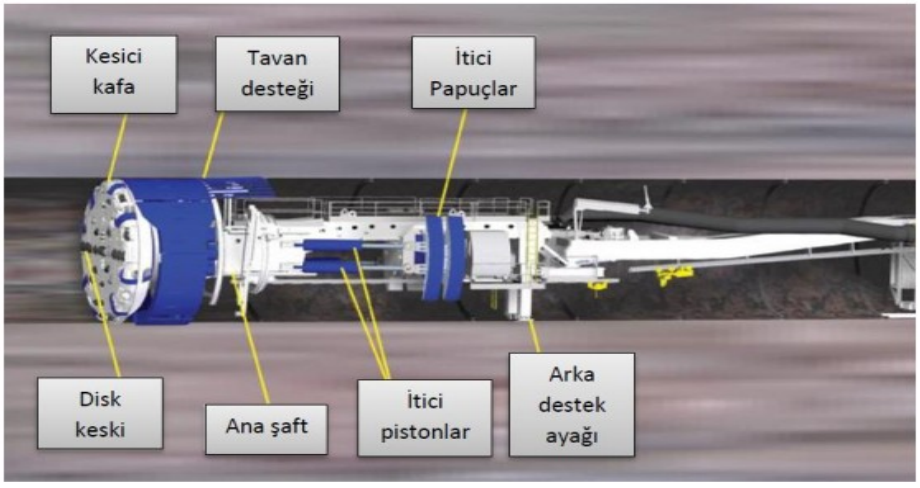
Tam cepheli tünel açma makineleri, jeolojik ve jeoteknik koşullara göre sert kayaçlar veya yumuşak zeminler olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılır. Zemin sertten yumuşağa gittikçe kesici kafanın parametreleri ve makine güçleri farklılık gösterir.

6.2.1 Sert kayaç tünel açma makineleri

Kendi kendini taşıyabilen, göçük riski olmayan, sert ve basınç dayanımı yüksek formasyonda kazı yapabilmek için tasarlanmış makinalardır. Zemin şartlarına göre açık (kalkansız) ve kalkanlı (kapalı) olmak üzere 2 gruba ayrılırlar.

Kalkansız TBM

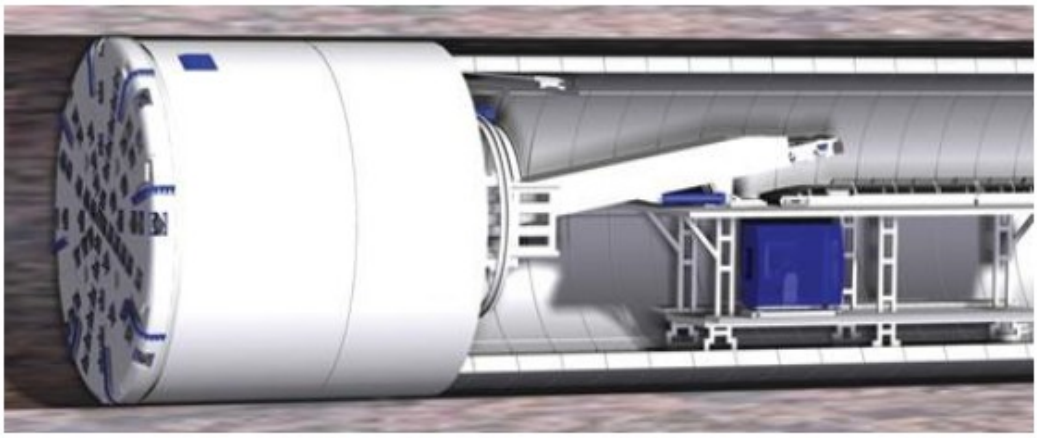
Kendi kendini taşıyabilen sert kaya birimlerinde kullanılan makinelerdir. Kalkana ihtiyaç yoktur. TBM arkasından tavan kaya saplamaları veya dairesel beton segmentler şeklinde tahkimat yapılır. Kalkansız tünel açma makineleri yanda bulunan 2 ya da 4 adet pabuçları ile tünel yüzeyine sabitleyerek ilerlemesini sağlar (Şekil 6.3).



Şekil 6.3: Kalkansız tünel açma makinesi (Ateş, 2013).

Tek Kalkanlı (Tek Şiltli) TBM

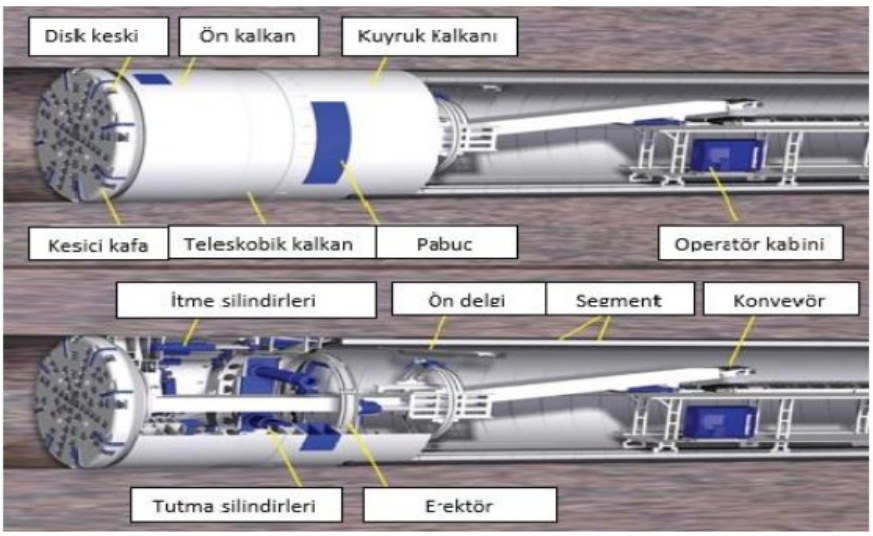
Tek şiltli TBM'lerde tam daire şeklinde komple bir şilt mevcuttur. Tek şiltli TBM'ler yumuşak zeminlerde, sert kaya zeminlerde ve kaya içerisinde açılacak tünellerde kullanılabilirler. Tahkimat olarak beton segmentler kullanılır (Çınar ve Feridunoğlu, 2002) (Şekil 6.4).



Şekil 6.4: Tek kalkanlı TBM (Ateş, 2013).

Çift Kalkanlı (Çift Şiltli) TBM

Çift şiltli TBM iki türlü çalışabilmektedir (Şekil 6.5). Yukarda anlatıldığı gibi tek şilt olarak veya teleskopik olarak ana şildin içinde uzanabilen kuyruk tarafındaki ikinci şilti bir kavrayıcılar düzeniyle kullanmak mümkündür. Bu tür yapının avantajı sabit kuyruk şiltinde kaplama işi ile kavrayıcıları iterek yapılacak delme işlerinin aynı anda gerçekleştirilmesine imkân sağlayıp çalışıldığı zaman ortaya çıkmaktadır (Çınar ve Feridunoğlu, 2002).



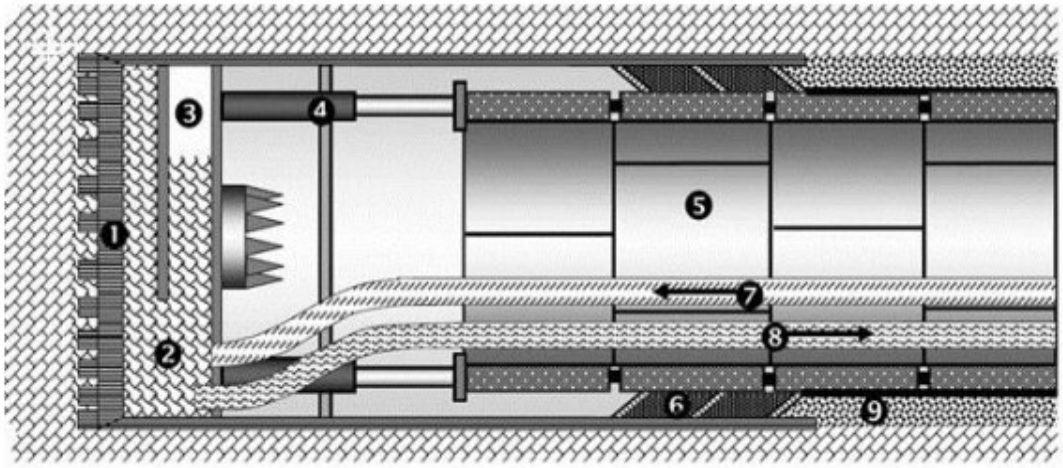
Şekil 6.5: Çift kalkanlı TBM (Ateş, 2013).

6.2.2 Yumuşak zemin tünel açma makineleri

Zeminin kendi kendini tutamadığı ve akıcı olduğu formasyonlarda bu tip yumuşak zemin için tasarlanan TBM'ler kullanılmaktadır. Bu tip TBM'ler sert kayaç TBM'lerine göre tasarımlarında farklılık göstermektedir. Disk keskilerin yerine kalem keskiler kullanılmaktadır.

Slurry tipi TBM

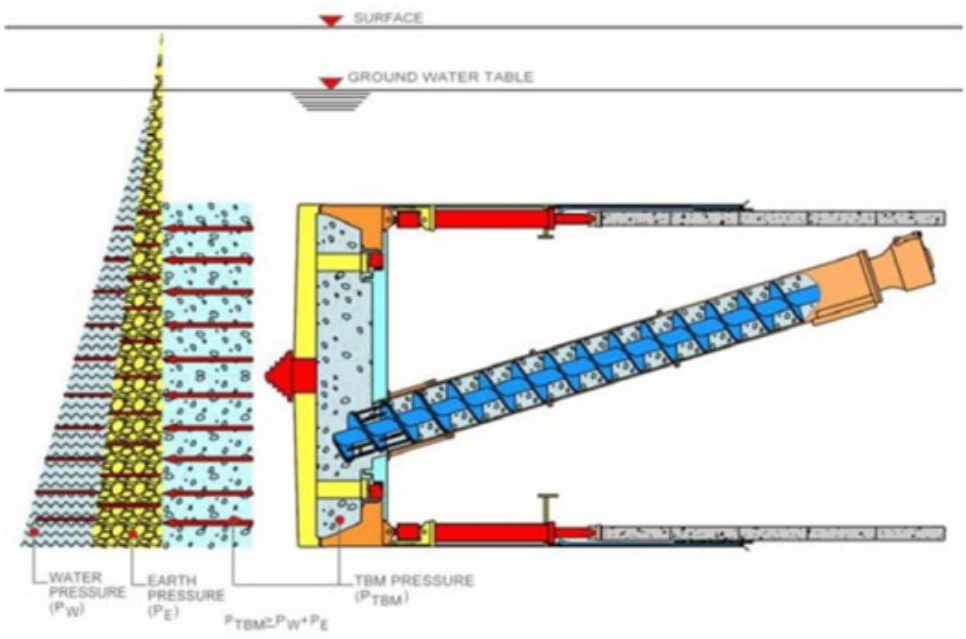
Slurry tipi tünel açma makinelerinde kazı arınını dengede tutabilmek için bentonit kullanılır. Kazı odasında bulunan bentonit hem kazı arınını dengede tutacak basıncı oluşturur hem de kazı işlerini kolaylaştırır (Şekil 6.6). Kayganlaştırıcı özelliği ile keskilerin hızlı aşınmasını da önler. Slurry tipi tünel açma makinelerinde bentonit metal borular ile kazı odasına beslenir. Pasa alımı ise vida konveyör ile değil metal borular aracılığı ile yapılır. Slurry tipi tünel açma makineleri bentonit kullandığı için işletimi EPB' lere göre daha masraflıdır. Ayrıca bentonit pasa ile karışmış halde olduğu için bentoniti geri kazanmak için yüzeyde bir ayırma tesisine ihtiyaç duyarlar.



Şekil 6.6: Slurry tipi TBM (1.Kesici kafa, 2.Bentonit/çamur, 3.Hava Kabarcığı, 4.İtme silindirleri, 5.Segment, 6.Fırça, 7.Bentonit Besleme, 8.Bentonit çıkış, 9.Enjeksiyon) (Ateş, 2013).

EPB (Earth pressure balance) tipi - TBM

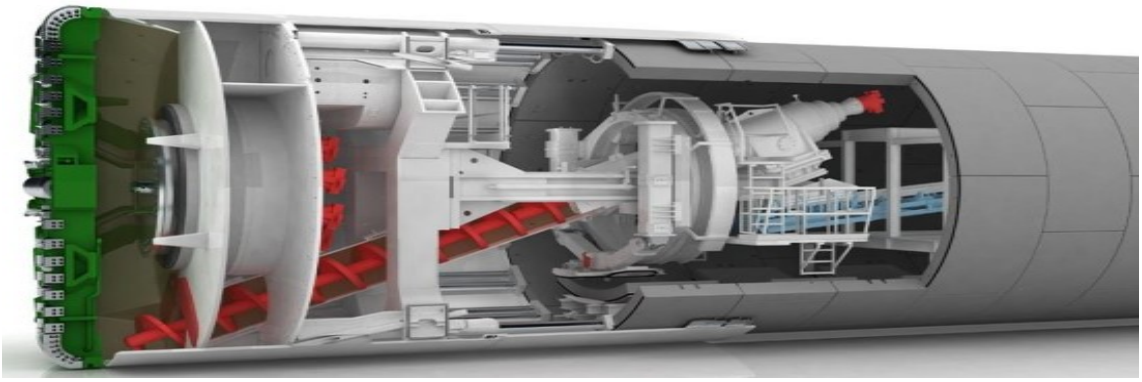
Yapışkan olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminlerde ilerlemeler sırasında içinde bulunduğu şartlarından dolayı zemin dayanımında kayıp meydana gelebilir. Genellikle bu zemin şartlarında ve kendini kısa süreli bile tutamayan kayaçların kazısında bu tip makineden faydalanılır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7: EPB - TBM çalışma prensibi (Mooney vd., 2012).

EPB TBM'lerin temel çalışma prensibi su getirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulmasıdır. Bir başka deyişle amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve tüm yüzeyi desteklemesidir (Öz, 2012).

Bu tür TBM'lerde kazılan malzeme kesici kafadan helezon konveyör vasıtası ile çıkarılır. Kesici kafa içerisinde yüksek basınçta bulunan pasanın basıncı helezon çıkışında düşürülmüş olur. Kazı esnasında arazi basıncı azalmalarını ve bu yüzden oluşacak oturmaların engellenmesi için kesici kafadan malzeme aktarımı kontrollü şekilde yapılır. Kazının tamamlanmasının ardından segment montajı yapılır ve yeni bir kazıya başlanır. TBM'nin kalkanı personel ve ekipmanı zeminden koruyarak güvenli bir çalışma ortamı oluşturmaktadır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8: EPB - TBM (Ateş, 2013).

6.3 Projede Kullanılan ve Tez'e Konu Olan TBM Özellikleri

Projede 3 farklı marka EPB tip TBM kullanılmaktadır (Şekil 6.9). Bunlardan Lovat ve Herrenknecht marka TBM'ler Yenimallahe İstasyonu ile Mahmutbey İstasyonu arasında tek hat, Terratec marka TBM ise Yenimahalle İstasyonu ile Veysel Karani istasyonu arasında ise çift hat halinde kazı yapmaktadır (Şekil 6.10).

Değişen formasyondaki TBM'in performans analizini yapacağımız güzergâhta Terratec marka EPB - TBM kullanılmıştır.



Şekil 6.9: Terratec TBM.



Şekil 6.10: Lovat TBM (sol), Herrenknecht TBM (sağ).

Bu 3 farklı EPB tip TBM'in belirli özellikleri Çizelge 6.1'deki gibidir.

Çizelge 6.1: Projedeki TBM'lerin özellikleri.

MARKA	TERRATEC	LOVAT	HERRENKNECHT
ÇAP	6.56 m	6.57 m	6.55 m
İTME KUVVETİ	40000 kN	55000 kN	32000 kN
TORK	5440 kNm	4500 kNm	4400 kN
DİSK SAYISI VE ÇAPI	43 * 17'	35 * 15.5' , 7 * 16.5'	41 * 17'
KESİCİ KAFA MOTORLARI	6 Adet, elektrik (VFD)	8 Adet, hidrolik	8 Adet, hidrolik
KESİCİ KAFA HIZI	0-3.0 rpm	0-4 rpm	0-3,8 rpm
ELEKTRİK GERİLİMİ	10000 V	6000 V	11000 V

Terratec TBM S42 seri numaralı ve 2014 yılı yapımıdır. Projeye sıfır olarak gelmiş ve yaklaşık 23 aylık bir sürede sorumlu olduğu yaklaşık 6 km'lik tüneli tamamlamıştır. Bu TBM'ler özellikleri ve litolojiye göre performans açısından farklılık gösterebilmektedir. Yıllar içerisinde performansların belirlenmesi için bazı parametreler oluşturulmuştur.

Bu parametreler; kayaç karakteristikleri (Tek eksenli basınç dayanımı, kayaç sağlamlığı, çatlak indeksi), keski geometrisi (Çap, ağız genişliği) ve TBM özellikleridir (Keski başına düşen baskı kuvveti, keskiler arası mesafe, tork ve devir sayısı).

7. DEĞİŞEN LİTOLOJİDE TERRATEC TBM'İN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1 Giriş

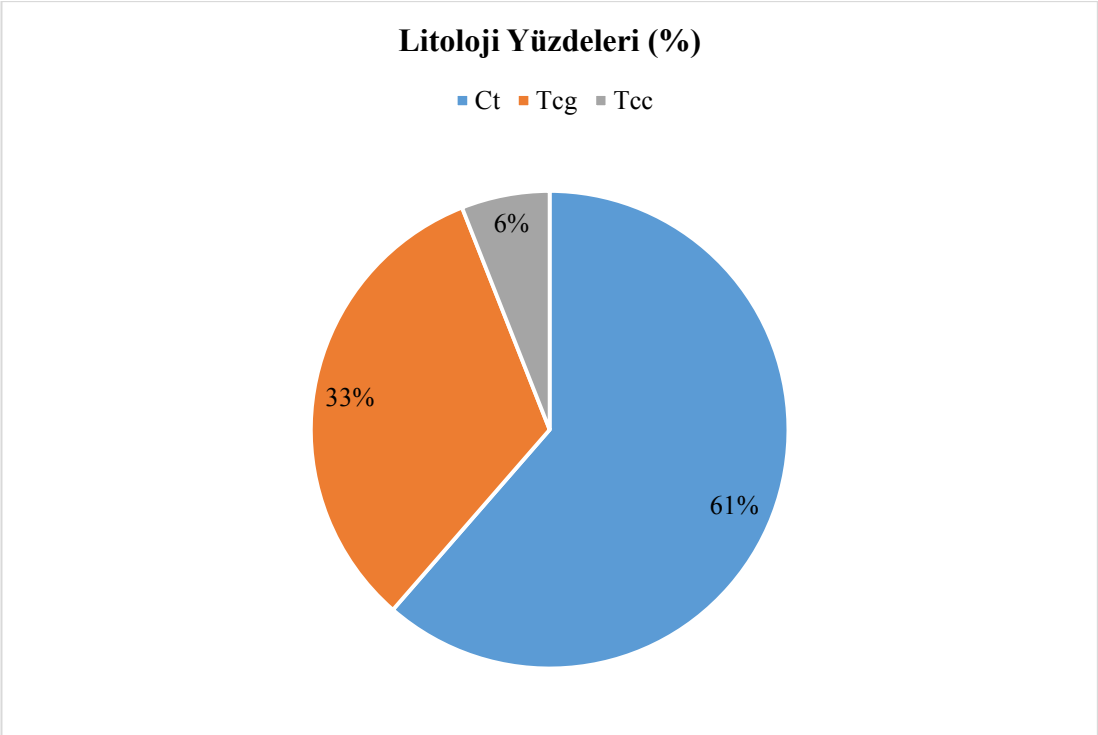
Bu çalışmada kazı parametreleri olarak makinenin uygulamış olduğu itme kuvveti, tork, penetrasyon, köpük tüketim miktarı, rpm, epb, kesici kafa motorlarının elektriksel akımı değişen litoloji ile değerlendirilerek grafiklerle açıklanmıştır. Değerlendirmeler, birinci hat kazılarındaki sayısal verilere göre yapılmıştır.

Terratec marka S-42 seri numaralı tünel açma makinesi projede Yenimahalle – Veysel Karani istasyonları arasını inşa etmiştir. Bu güzergâhtaki formasyon değişimi Km 15+155 – 13+836 arası Ct (Trakya formasyonu), Km 13+836 – 13+660 arası Tçç (Çekmece - Çukurçeşme Formasyonu), Km 13+660 – 13+460 arası Ct (Trakya formasyonu), Km 13+460 – 12+500 arası Tçg (Çekmece – Güngören formasyonu), Km 12+500 – 12+212 arası Ct (Trakya Formasyonu) şeklindedir. TBM parametrelerinin formasyonlara göre ortalamalarının dağılımı Çizelge 7.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1: TBM parametrelerinin formasyonlara göre dağılımı.

PARAMETRELER	FORMASYON		
	Ct	**Tcc**	**Tcg**
Ortalama RPM	2.6	2.5	2.4
Ortalama Tork (kNm)	1224	1457	747
Ortalama İtme Kuvveti (kN)	14532	11821	10106
Ortalama İlerleme Hızı (mm/min)	27.4	26.4	34.8
Ortalama Penetrasyon (mm/devr)	10.7	10.6	14.4
Ortalama EPB (bar)	1.3	1.4	1.9
Ortalama Köpük Tüketimi (L/dk)	652.1	626.9	775.5
Ortalama CH Akım (A)	1038	1139	611

Formasyonların proje güzergâhı üzerindeki yüzdelik dağılımı Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1: Formasyonların proje güzergâhı üzerindeki yüzdelik dağılımı.

7.2 İtme Kuvvetine Ait Değerlendirmeler

İtme kuvveti, tam cepheli tünel açma makinesinin kesici kafasındaki keskilerin aynaya batmasını sağlayan kuvvettir. Kazı işlemi itme kuvveti ile birlikte kesici kafanın döndürülmesiyle gerçekleşir (Öz, 2012).

Baskı kapasitesi, tünel arınındaki yatay deformasyonlardan kaçınmak için gerekli olan kuvveti, yer altı su basıncının makine üzerindeki baskısını, gerekirse TBM'in önündeki dikey yer altı oturmalarını bertaraf etmek için gerekli olan kuvveti, makine ile jeolojik birim arasındaki sürtünme kuvvetini karşılamak zorundadır.

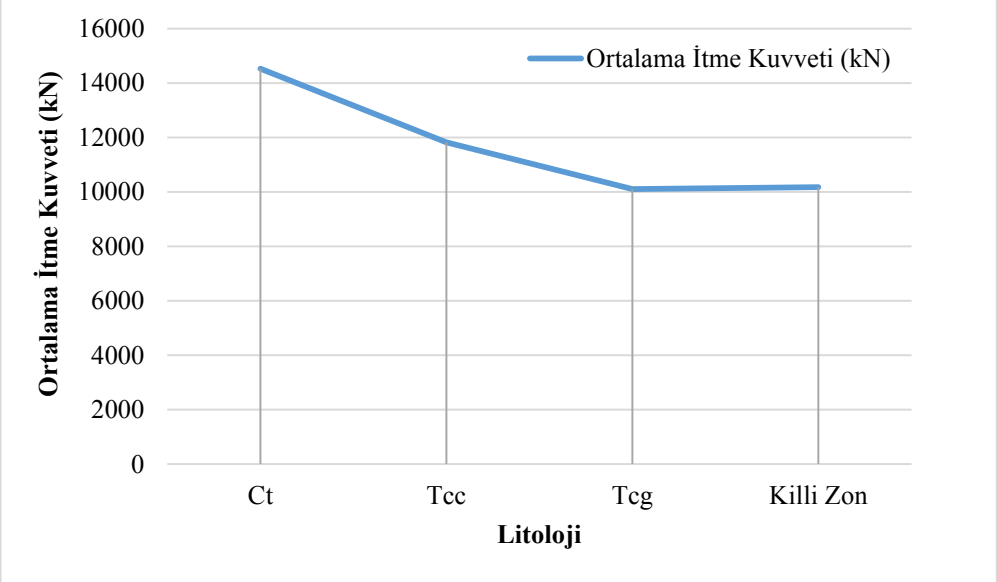
İtme kuvveti, keskilerin kazı arınına batmasını sağlayan kuvvettir. Keskilere dik yönlü etkiyen normal kuvvet, itme kuvvetinin bir fonksiyonudur. Keski başına düşen itme kuvveti penetrasyon oranına en çok etkiyen faktördür. Keski başına düşen ortalama baskı kuvveti (FN), veya normal kuvvet bağıntı 7.1 ile hesaplanabilir.

$$FN = NC \times PC \times \pi \times dC^2 / (4n) \qquad (7.1)$$

Bağıntı (7.1)'de NC itme silindirlerinin sayısını, PC net uygulanan hidrolik basıncı, dC hidrolik silindirlerinin çapını, n kesici kafa üzerinde bulunan keskilerin sayısını ifade eder (Gürkan, 2011).

Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Projesinde çalışan S-42 seri numaralı tünel açma makinesinin uyguladığı itme kuvveti makinanın kesici kafasına yerleştirilmiş sensörler tarafından okunmakta ve bilgisayar ortamına kayıt edilmektedir.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Trakya formasyonundaki (Ct) ortalama itme kuvveti değeri 14532 kN'dur. Tamamı Trakya formasyonu (Ct) olan Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arasında belirli Km'ler arası itme kuvveti değerleri; Km 15+155 – 14+150 arası 12580 kN, Km 14+150 – 14+016 arası 22099 kN, Km 14+016 – 13+836 arası 16771 kN'dur. Kazım Karabekir ile Akşemsettin istasyonları arasında Km 13+660 – 13+460 arasında geçen Trakya formasyonunda (Ct) ise ortalama itme kuvveti değeri 11765 kN'dur. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları arasında Km 12+500 – 12+300 yer alan Trakya formasyonuna (Ct) ait ortalama itme kuvveti değeri 11201 kN, Km 12+300 – 12+212 arası ise 12772 kN'dur (Şekil 7.2).



Şekil 7.2: Ortalama itme kuvvetinin litolojiye göre dağılımı.

Trakya formasyonundaki (Ct) itme kuvveti değerleri kendi aralarında da farklılık göstermiştir. Km 14+150 – 14+016 arasında 22099 kN olan itme kuvveti değeri formasyon içerisinde maksimum değeri göstermektedir. Bu Km'ler arasında kum seviyesinin oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Öyle ki; kum oranı yüksek bir formasyonda itme kuvveti değeri iri kumtaşı - silttaşı içeren bir zemine göre daha yüksek seyretmektedir.

Kum gibi kohezyonsuz ve geçirimli bir litolojide hava ve köpük kum taneleri arasından kolaylıkla sızabildiğinden ayna basıncını stabil hale getirmek ve korumak zordur. EPB makinelerin suya doygun kum ortamında kazıya çok elverişli olmadığı gerçeği dikkate alındığında, yüksek ayna basınçlarıyla kazı yapma gereksinimi doğmaktadır. Aynı zamanda Ramoni ve Anagnostou (2011), kumun sürtünme katsayısının kile ve silte oranla daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Kohezyonsuz yapısından ötürü stabil olmayan zeminlerin özellikle uzun duruşlardan sonra sıkışmalara sebep olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Tüm bu faktörler TBM'in itme kuvveti ve tork kapasitesi gereksinimlerini artıran faktörlerdir (Ateş vd., 2016).

Km 12+440'da geçilen fay zonunda itme değeri incelendiğinde 17000 - 18000 kN iken fay zonu geçişinde 20000 - 21000 kN'a çıktığı gözlemlenmiştir. Bu da fay zonlarında tünel açma makinalarının kazı esnasında daha dikkatli kullanılması gerektiğini göstermektedir. Fay zonu gibi tünel açma makinasını etkileyecek bölgelerde sıkışmayı önlemek için gerekli tedbirler önceden alınmalı, kazı esnasında TBM'in tepkilerine göre hareket edilmelidir. Bilgin ve Ateş (2016) vaka çalışmalarından yola çıkarak faylı bölgelerde sıkışmaların önüne geçmek için probe delgi uygulamasının önemini belirtmiştir.

Km 12+807'de istasyon henüz hazır olmadığı için kapalı geçilmiştir. Bu geçiş esnasında TBM bir diyafram duvarı geçmiştir. Geçiş esnasında itme kuvveti değerlerinde herhangi bir önemli tepki ile karşılaşılmamıştır.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Çukurçeşme formasyonundaki (Tçç) ortalama itme kuvveti değeri 11821 kN'dur. Çekmece – Çukurçeşme formasyonu (Tçç) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları arasında belirli Km'ler arası itme kuvveti değerleri; Km 13+836 – 13+750 arası 13328 kN, Km 13+750 – 13+660 arası 10314 kN'dur.

Çekmece – Çukurçeşme (Tçç) formasyonunda da itme kuvveti değerleri kendi arasında farklılık göstermiştir. Km 13+836 – 13+750 arasında zemin kum – kumtaşı ardalanması (çok sıkı siltli), Km 13+750 – 13+660 arasında ise zemin nispeten daha kil yoğunlukludur. Km13+750 – 13+660 arasında kil yoğunluklu olmakla beraber zemin içeriğinde kiltaşı - silttaşı ardalanması da gözlemlenmiştir. Kil'in daha yoğun olduğu zeminlerde itme kuvveti değeri daha düşük olduğu görülmüştür. Aynı formasyondaki bu iki farklı Km aralığını kıyaslayacak olursak; kil zeminlerde itme

kuvvetinin daha düşük olmasıyla birlikte ilerleme hızının daha yüksek, çekilen elektrik akımının daha düşük, tüketilen köpük miktarının daha düşük olduğu görülmüştür. Kil Penetrasyon değeri operatör tarafından uygun şekilde ayarlanarak kazılar daha sağlıklı şekilde yapılmalıdır. Kil zeminde ilerleme hızının yüksek olması ile birlikte rpm'in de doğru değerlerde ayarlanması gerekir ki kesici kafada uygun penetrasyon değeri yakalansın ve hafriyat sarması problemini ortadan kaldırılabilsin.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Güngören formasyonundaki (Tçg) ortalama itme kuvveti değeri 10106 kN'dur. Çekmece – Güngören formasyonu (Tçg) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları Km 13+460 – 12+807 arası ortalama itme kuvveti değeri 9528 kN'dur. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları Km 12+807 – 12+500 arası ortalama itme kuvveti değeri ise 10684 kN'dur.

Çekmece – Güngören (Tçg) formasyonunda da itme kuvveti değerleri kendi arasında farklılık göstermiştir. Km 13+460 – 12+807 arasında zemin az kumlu – yoğun sert kil (siltli - kil) iken, Km 12+807 – 12+500 arasında da zemin benzerdir fakat kilin sertliği daha yüksektir. Öyle ki; benzer iki killi zemini kıyaslarsak sert kilde tünel açma makinasının itme kuvveti değerinin daha yüksek, ilerleme hızının nispeten daha yavaş, çekilen elektrik akımının daha yüksek olduğunu görmekteyiz. Proje güzergâhındaki geçilen tüm kil zonlarındaki itme kuvveti değeri ortalaması ise 10175 kN'dur.

Yapılan araştırmalar ve tünel açma makinasından alının verilerden elde edilen grafikler yorumlandığında itme kuvveti değeri sert zeminlerde yumuşak zemine göre daha yüksektir. Aynı zeminde ilerleme hızının düştüğü yerlerde itme kuvveti değeri yükseldiği görülmüştür. İlerleme hızının düştüğü ve itme kuvveti değerinin yükseldiği bölgelerde köpük tüketiminin daha yüksek olduğu da gözlemlenmiştir.

Killi zeminlerde gerçekleşen düşük köpük tüketiminin sebebi kazı sürelerinin önemli ölçüde kısalması ile açıklanabilir. Makinenin killi zeminlerde performansına etkiyen bir başka önemli etmende kafa açıklık oranı ve kilin düşük sürtünme katsayısı ile geçirimsiz yapısıdır (Ates vd., 2013).

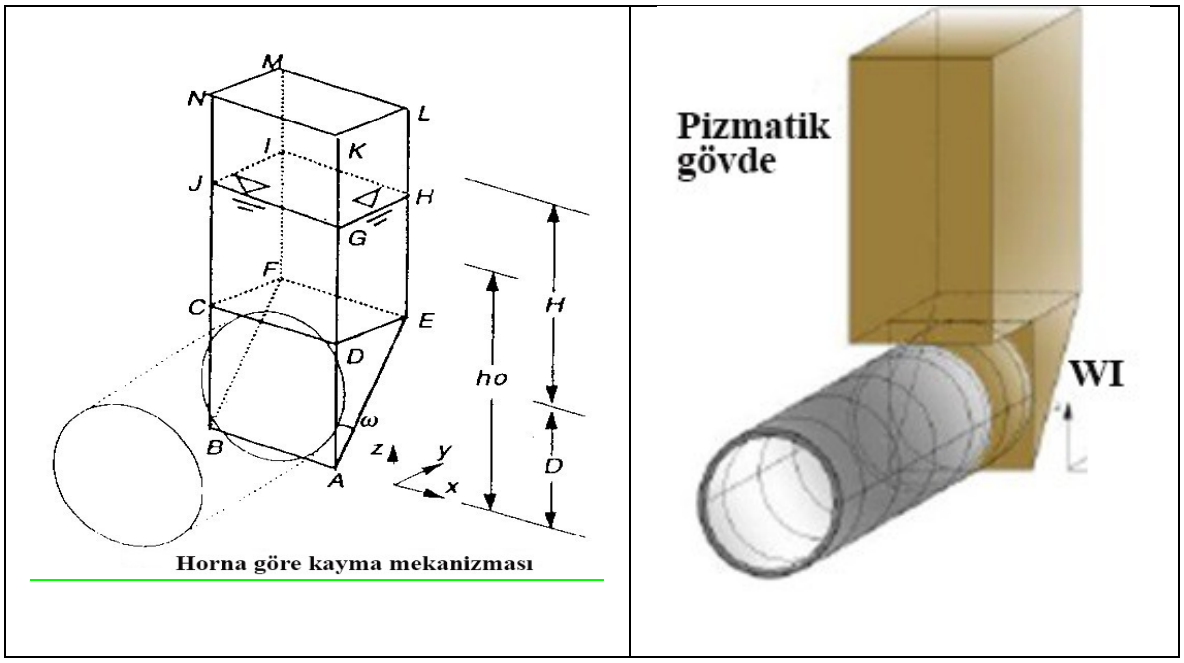
7.3 EPB'ye Ait Değerlendirmeler

EPB - TBM'lerin temel çalışma prensibi su getirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında

tutulmasıdır. Bir başka deyişle amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve tüm yüzeyi desteklemesidir.

Özellikle yer yüzeyine yakın geçen projelerde, tehlikeli olabilecek güzergâhlarda bu tip TBM'ler tercih edilir. Uygulanması gereken EPB değerlerinin belirlenmesinde Anagnastou - Kovari yöntemi kullanılmıştır. İstanbul'da jeoloji çok karmaşık bir yapıya sahiptir, birimler yanal ve düşey yönde tedrici geçişli olup ardalanmalı bir yapıya sahiptir. Formasyonlar dayklarla ve sık sık küçük faylanmalara kesilmektedir. Ayrıca özellikle Trakya formasyonu birçok durumda kırıklı ve çatlaklı bir yapı göstermekte, metro tünellerinin geçtiği hatlarda eski su kuyularından dolayı durum daha da karmaşık bir hal almaktadır. Bu nedenle EPB tip TBM'lerin seçimi oldukça yaygındır. Anagnastou - Kovari yöntemi homojen zeminler için geliştirilmiştir, bu nedenle tünel ilerlemeleri sırasında yüzey deformasyonları devamlı kontrol edilecek, gerektiğinde hesaplanan değerler kalibre edilmelidir.

Şekil 7.3'te görüldüğü gibi homojen zeminde ayna stabilitesi, bir prizmatik zemin kütlesi tarafından yüklenen bir kama şeklindeki zemin kütlesinin sınır dengesi dikkate alınarak değerlendirilir.

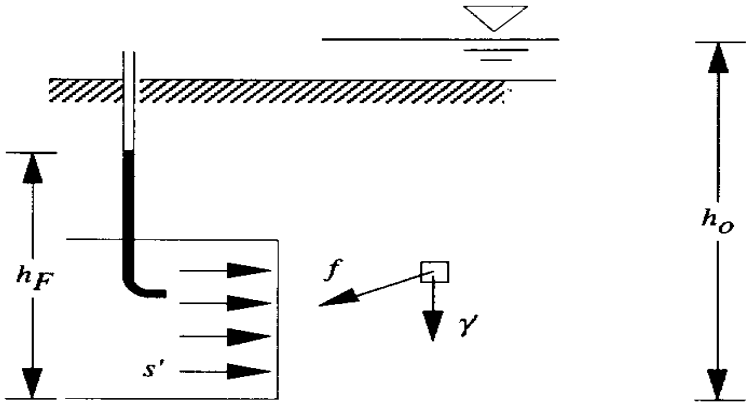


Şekil 7.3: Kabul edilen kayma mekanizması (Horn, 1961).

Bu kayma mekanizması aslında Home (1961) tarafından önerilmiştir ve sığ tünellerde çok sık meydana gelen ayna göçüklerinde gözlenen kayma yüzeylerinin oluşumunu dikkate alır. Bu durumun oluşumunda, Mohr-Coulomb yenilme kriteri ve drenajlı koşulların geçerli olduğu kabul edilir. Prizma yükü, aktif kama üzerine

etkiyen düşey efektif gerilmeleri kemerlenme nedeniyle azaltıcı etkisi olan silo teorisine dayanarak hesaplanır (Bilgin, 2016) .

Bir EPB – TBM'nin basınç (Kazı, çalışma) odası, kazılan pasa ile basınçlı olarak doldurulmuş olduğundan, aynaya etki eden toplam ve efektif gerilmeler arasında bir ayırım olmalıdır. Sadece efektif normal gerilme, kazı aynasına etkiyen gerçek ayna (destek) basıncı olarak ifade edilebilir. Bu parametre "efektif destek basıncı" olarak adlandırılır ve σ' olarak belirtilir (Şekil 7.4).



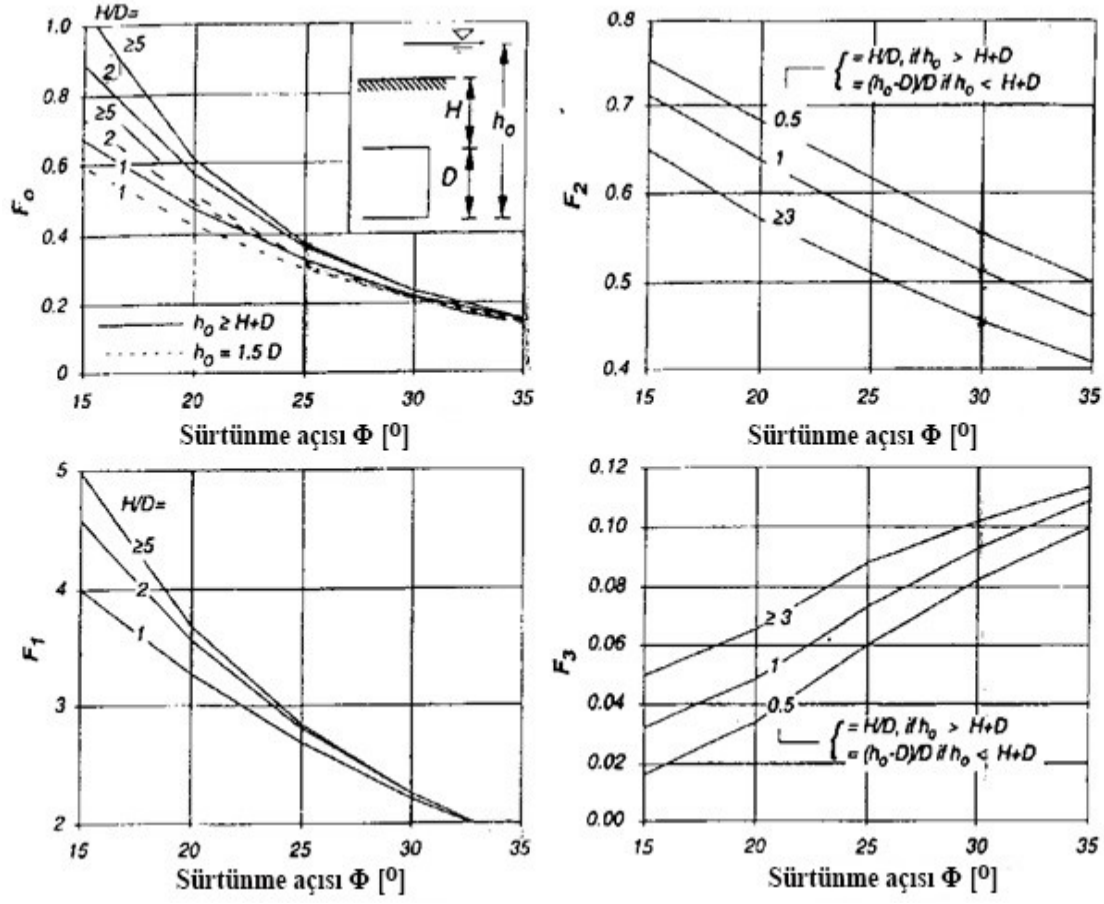
Şekil 7.4: Bir EPB uygulamasında su sızma kuvveti f ve efektif destek basıncı s' (σ') (Bilgin, 2016).

Eğer kazı odasındaki gözenek (boşluk) suyu basıncı (piezometrik basınç) h_F zeminin örselenmemiş durumundaki piezometrik basınçtan (h_0) daha düşükse, bu durumda yeraltı suyu tünel aynasından tünel içine sızacaktır. Bu durum kontrol edilmezse, aynada göçük olabilir.

Sınır dengesinde bulunan efektif destek basıncı σ', tünel çapı D, örtü tabakası derinliği H, basınç odasındaki piezometrik basınç h_F, yeraltı suyu seviyesi h_0, kesme mukavemeti parametreleri (c ve φ') ve zeminin suya doygun birim hacim ağırlığına γ' bağlıdır. Boyut analizi kullanarak ve denge ve yenilme denklemlerinin doğrusallığını dikkate alarak, sınır denge durumu için aşağıdaki genel eşitlik önerilmiştir (Anagnostou ve Kovari, 1996):

$$s' = F_0 \,.\, \gamma'.D - F_1 .\, c + F_2 .\, \gamma'.\Delta .\, h - F_3 .\, c .\, \Delta\, h/D \qquad (7.2)$$

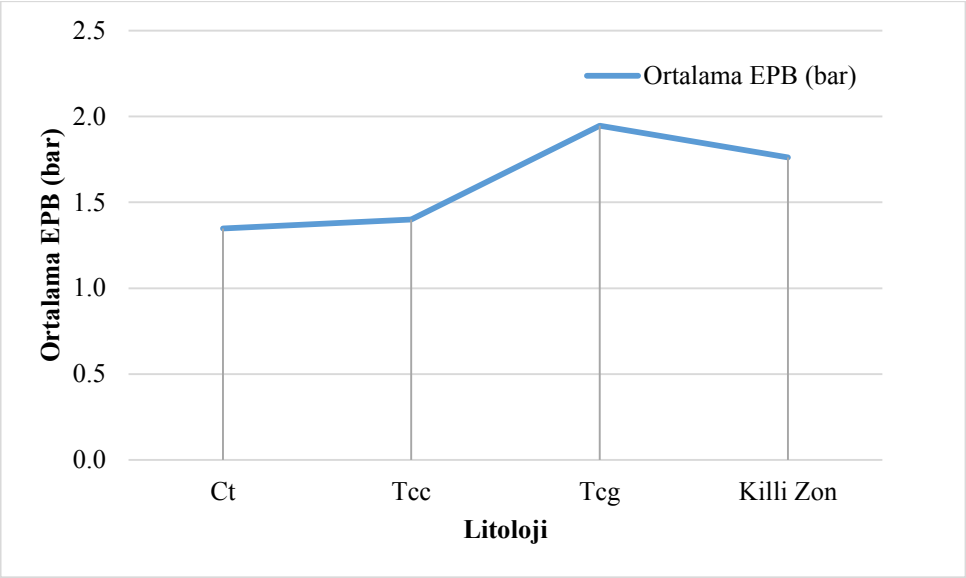
Burada $F_{0\text{-}3}$, içsel sürtünme açısı φ', geometrik parametreler H/D ile $(h_0\text{-}D)/D$ ve kuru ve suya doygun birim hacim ağırlık oranına γ_d/γ' bağlı olan birimsiz katsayılardır, Şekil 7.5'de görülmektedir (Bilgin, 2016).



Şekil 7.5: $F_{0\text{-}3}$ boyutsuz katsayıları için nomogramlar (Bilgin, 2016).

EPB değerleri, sayısı makineden makineye değişmekle birlikte kesici kafa içerisindeki sensörlerin bilgisayar ortamına sayısal verileri ulaştırması ile olmaktadır. Operatör kazı ekranında bu sayısal değerleri görerek güzergâhtaki hesaplanan EPB değerlerine göre kazısını yapmaktadır. Bu teze konu olan Terratec marka EPB TBM'de ise 6 adet EPB sensörü bulunmaktadır.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Trakya formasyonundaki (Ct) ortalama EPB değeri 1,3 bar'dır. Tamamı Trakya formasyonu (Ct) olan Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arasında belirli Km'ler arası EPB değerleri; Km 15+155 – 14+150 arası 0,8 bar, Km 14+150 – 14+016 arası 1,7 bar, Km 14+016 – 13+836 arası 2 bar'dır. Kazım Karabekir ile Akşemsettin istasyonları arasında Km 13+660 – 13+460 arasında geçen Trakya formasyonunda (Ct) ise ortalama EPB değeri 1,7 bar'dır. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları arasında Km 12+500 – 12+300 yer alan Trakya formasyonuna (Ct) ait ortalama EPB değeri 1,3 bar, Km 12+300 – 12+212 arasında da 0,6 bar'dır (Şekil 7.6).



Şekil 7.6: Ortalama EPB (bar)'nin litolojiye göre dağılımı.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Çukurçeşme formasyonundaki (Tçç) ortalama EPB değeri 1,4 bar'dır. Çekmece – Çukurçeşme formasyonu (Tçç) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları arasında belirli Km'ler arası ortalama EPB değerleri; Km 13+836 – 13+750 arası 1,4 bar, Km 13+750 – 13+660 arasında da 1,4 bar'dır.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Güngören formasyonundaki (Tçg) ortalama EPB 1,9 bar'dır. Çekmece – Güngören formasyonu (Tçg) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları Km 13+460 – 12+807 arası ortalama EPB değeri 1,9 bar'dır. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları Km 12+807 – 12+500 arası ortalama EPB değeri ise 2 bar'dır.

EPB değerlerinin değişen litoljideki durumunu yorumlayacak olursak; sert zeminlerde (kumtaşı) en düşük, silttaşı - kiltaşı gibi bir zeminde kum - kumtaşı - siltaşına göre daha yüksek oranda uygulandığını görmekteyiz. Bunun sebebini geçirimlilik ve boşluk oranı ile bağdaştırabiliriz.

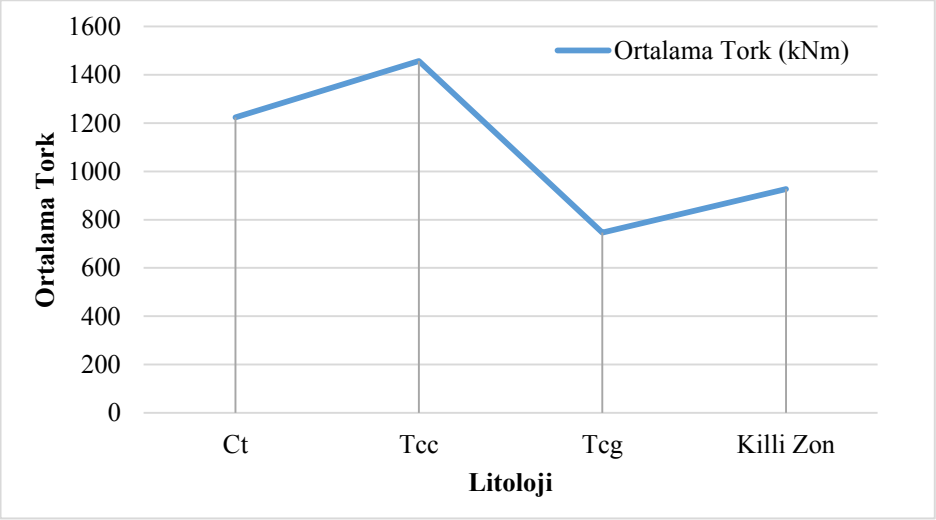
7.4 Torka Ait Değerlendirmeler

Tork kesici kafanın dönme momentidir. Tork kapasitesi, keskiler ile yeri kazmak, kesici kafa ile kazı arını arasındaki sürtünmeyi aşmak, TBM üzerine etki eden radyal kuvvetleri bertaraf etmek, kesici kafanın arkasında ayna basıncını dengeleyen pasanın hareketini sağlamak zorundadır (Gürkan, 2011).

Kesici kafanın dönmesi ve itme kuvvetinin sağlanmasının ardından kesici kafadaki delgi aparatlarının zemine teması anında sensörlerden bilgisayar ortamına sayısal veriler ulaşmaktadır.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Trakya formasyonundaki (Ct) ortalama tork değeri 1224 kNm'dir. Tamamı Trakya formasyonu (Ct) olan Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arasında belirli Km'ler arası tork değerleri; Km 15+155 – 14+150 arası 1109 kNm, Km 14+150 – 14+016 arası 1350 kNm, Km 14+016 – 13+836 arası 1377 kNm'dir. Kazım Karabekir ile Akşemsettin istasyonları arasında Km 13+660 – 13+460 arasında geçen Trakya formasyonunda (Ct) ise ortalama tork değeri 1289 kNm'dir. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları arasında Km 12+500 – 12+300 yer alan Trakya formasyonuna (Ct) ait ortalama tork değeri 1031 kNm, Km 12+300 – 12+212 arası ise 11186 kNm'dir (Şekil 7.7).

Yukarıda da belirttiğimiz gibi Trakya formasyonundaki (Ct) tork değeri, formasyonun kendi içerisinde de farklılık göstermiştir. Km 14+150 – 14+016 arasında 1350 kNm olan tork değeri formasyon içerisinde maksimum değeri göstermektedir. Bu Km'ler arasında kum seviyesinin oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. Öyle ki; kum oranı yüksek bir formasyonda tork değeri iri kumtaşı - silttaşı içeren bir kayaya göre daha yüksek seyretmektedir. İlerleme hızının sert kumtaşı biriminde daha düşük olduğunu görmekteyiz. Böylesi zeminde rpm ve ilerleme hızı kombinasyonu doğru yapılmadığı takdirde kesici kafadaki diskler kısa zamanda aşınarak işlevini yitirir.



Şekil 7.7: Ortalama tork'un litolojiye göre dağılımı.

Kumtaşı birimini kendi içerisinde kil – kumtaşı, gri kumtaşı, kum – kumtaşı diye ayırdığımızda tork değerinin kil – kumtaşı biriminde en düşük, kum – kumtaşı biriminde ise en yüksek olduğunu görmekteyiz. Tork değerinin yüksek olduğu anlarda kesici kafa motorlarının çektiği elektrik akımının da yükseldiği görülmektedir. Bu iki parametre arasında doğru bir orantı vardır. Kil – kumtaşı içeren birimlerde köpük sarfiyatı daha fazla olmaktadır. Zemin şartlandırılmasının doğru yapılmadığı her birimde parametrelerde olması gereken sayısal verileri görmek pek mümkün olmayacaktır. Aynı zamanda kesici kafadaki delici ekipmanlarda kısa zamanda aşınmaya sebep olacaktır. Aşınmanın kısa sürede gerçekleşmesi kesici kafanın açılıp kontrolünün yapılmasını gerektirir. Eğer stabil bir zeminde değilseniz bunu yapmanız oldukça zor ve tehlikelidir. Bu sebepten ötürü kazılarda ilerleme hızı, zemin şartlandırması, rpm gibi parametreleri zemine uygun şekilde yapılması önerilmektedir.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Çukurçeşme formasyonundaki (Tçç) ortalama tork değeri 1457 kNm'dir. Çekmece – Çukurçeşme formasyonu (Tçç) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları arasında belirli Km'ler arası tork değerleri; Km 13+836 – 13+750 arası 1629 kNm, Km 13+750 – 13+660 arası 1285 kNm'dir.

Çekmece – Çukurçeşme (Tçç) formasyonunda da tork değerleri kendi arasında farklılık göstermiştir. Km 13+836 – 13+750 arasında zemin kum – kumtaşı ardalanması (çok sıkı siltli), Km 13+750 – 13+660 arasında ise zemin nispeten daha kil yoğunlukludur. Km13+750 – 13+660 arasında kil yoğunluklu olmakla beraber zemin içeriğinde kiltaşı - silttaşı ardalanması da gözlemlenmiştir. Öyle ki; kilin daha yoğun olduğu zeminlerde tork değerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Aynı formasyondaki bu iki farklı Km aralığını karşılaştıracak olursak; kil zeminlerde torkun daha düşük olmasıyla birlikte ilerleme hızının daha yüksek, çekilen elektrik akımının daha düşük, tüketilen köpük miktarının daha düşük olduğu görülür. Elde edilen sayısal verilerden itme kuvveti ile tork değerleri arasında da doğru bir orantı olduğu görülmektedir. Aynı formasyondaki bu iki farklı birimde ise benzer EPB uygulaması yapılmıştır. Rpm killi birime göre kum - kumtaşı biriminde daha düşük tutulmuştur.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Güngören formasyonundaki (Tçg) ortalama tork değeri 747 kNm'dir. Çekmece – Güngören

formasyonu (Tçg) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları Km 13+460 – 12+807 arası ortalama tork değeri 682 kNm'dir. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları Km 12+807 – 12+500 arası ortalama tork değeri ise 812 kNm'dir.

Çekmece – Güngören (Tçg) formasyonunda da tork değerleri kendi arasında farklılık göstermiştir. Km 13+460 – 12+807 arasındaki zemin, Km 12+807 – 12+500 arasındaki zemine nispeten daha yumuşaktır. Aynı formasyondaki yumuşak birim sert birime göre tork değeri daha düşüktür.

Güzergâh üzerinde geçilen kumtaşı ve silttaşına ait litolojilerde laboratuvar sonuçlarında da görüldüğü üzere kuvars miktarlarının yüksek olduğunu görmekteyiz. Kuvars miktarı yüksek litolojilerde tork değerinin de doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Km 15+155'de kazı başlangıcında aynadan alınan numunenin laboratuvar sonucu aşağıdaki gibidir;

Kayaç gri yeşil karışımı genel renkli, yoğun özellikte ve kristalen görünümlü bir kayaçtır. İnce - orta tane boyutludur. %10'luk HCl asidi ile muamele edildiğinde reaksiyon göstermemesi kalsit, dolomit gibi karbonat grubu mineraller içermediğini işaret etmektedir. Kayacın ortalama sertliği 6 Mohs olup, sert kayaç grubuna girmektedir. Numunenin alındığı gün nokta yük cihazıyla yapılan deneyde numunenin tek eksenli basınç dayanımı 120 MPa bulunmuştur. Kayaç kumtaşı olarak adlanmıştır.

7.5 Rpm'e Ait Değerlendirmeler

Rpm; kesici kafanın bir dakikadaki tam tur dönüşünü tamamlamasıdır. Rpm, ilerleme hızına dolayısıyla tork değerlerine de etki etmektedir. Güzergâh boyunca elde edilen datalardan alınan sonuçları değerlendirdiğimizde her farklı litolojide rpm değeri farklı uygulanmıştır.

Kesici kafanın dakikadaki dönüş sayısını ifade eden değerdir. RPM değeri genel olarak tork ile ters orantıya sahiptir. Tork ve RPM büyüklükleri, belirli oranlardaki transmisyonlarla birbirine dönüştürülebilir. Jeolojik birimin özelliklerine göre gereken tork değeri değişmesi sebebiyle RPM değeri de aynı oranda değişir. Sıkı zeminlerde tork gereksinimi yükselirken, aynı tork değerini makinanın koruyabilmesi için RPM değeri belirli bir ölçüde düşürülür. Tersi durumda, zayıf zemin kazısında yüksek tork değeri gerekli olmadığından, tork değeri düşürülür ve

RPM değeri arttırılarak penetrasyon oranı dahilinde makinenin ilerleme hızı da arttırılmış olacaktır.

Tork'un yanı sıra RPM değerini sınırlandıran bir diğer faktör de kazı çapıdır. Keskiler, kesici kafa çapının merkezinden uzaklaştıkça bir dönüşte aldıkları yol miktarı, dolayısıyla da kazı arınına temas miktarının artması sonucu aşınmaları da artmaktadır. Keskilerin aşınma mukavemetine bağlı olarak, RPM'i sınırlayan hıza kritik hız adı verilir ve Denklem (7.3) ile hesaplanabilir (Güral, 2011).

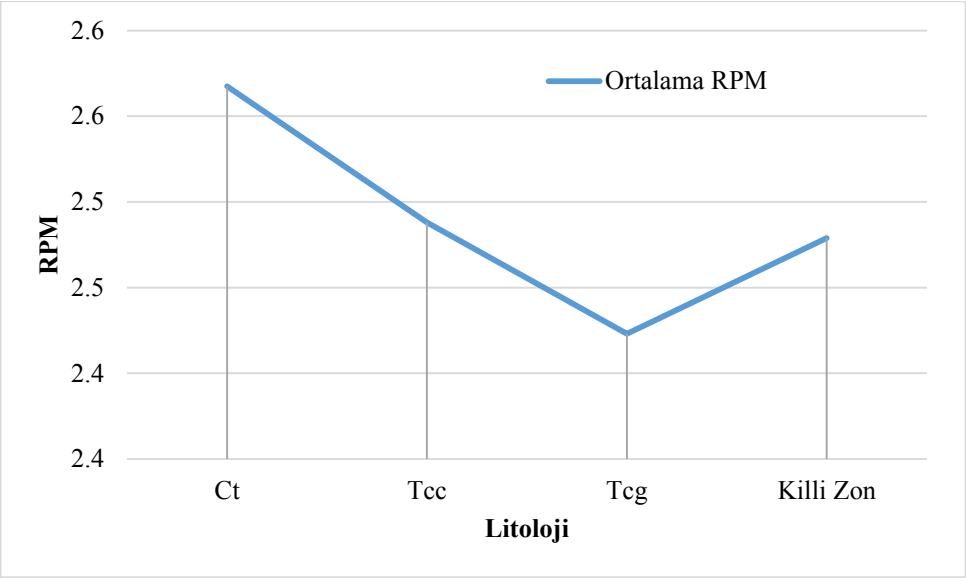
$$RPM = v / (\pi \times DTBM) \quad (7.3)$$

Denklem (7.3)'te v köşe keskilerin hızını DTBM ise makine çapını ifade eder.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Trakya formasyonundaki (Ct) ortalama rpm değeri 2,6 mm/dk'dır. Tamamı Trakya formasyonu (Ct) olan Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arasında belirli Km'ler arası rpm değerleri; Km 15+155 – 14+150 arası 2,5 mm/dk, Km 14+150 – 14+016 arası 2,6 mm/dk, Km 14+016 – 13+836 arası 2,3 mm/dk'dır. Kazım Karabekir ile Akşemsettin istasyonları arasında Km 13+660 – 13+460 arasında geçen Trakya formasyonunda (Ct) ise ortalama rpm değeri 2,5 mm/dk'dır. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları arasında Km 12+500 – 12+300 ve Km 12+300 – 12+212 yer alan Trakya formasyonuna (Ct) ait ortalama rpm değeri 2,7 mm/dk'dır (Şekil 7.8).

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Çukurçeşme formasyonundaki (Tçç) ortalama rpm değeri 2,5 mm/dk'dır. Çekmece – Çukurçeşme formasyonu (Tçç) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları arasında belirli Km'ler arası ortalama rpm değerleri; Km 13+836 – 13+750 arası 2,4 mm/dk, Km 13+750 – 13+660 arasında da 2,6 mm/dk'dır.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Güngören formasyonundaki (Tçg) ortalama rpm değeri 2,4 mm/dk'dır. Çekmece – Güngören formasyonu (Tçg) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları Km 13+460 – 12+807 arası ortalama rpm değeri 2,4 kNm'dır. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları Km 12+807 – 12+500 arası ortalama rpm değeri ise 2,5 mm/dk'dır.



Şekil 7.8: Ortalama rpm'in değişen litolojiye göre dağılımı.

Rpm değeri killi zeminlerde kumtaşı birimine kıyasen daha düşüktür. Kil daha çok yapışkan özelliğe sahip olduğundan zemin şartlandırılmasının da daha dikkatli yapılması gerekmektedir. Eğer bir kil biriminden geçiyorsanız ve rpm hızını ilerleme hızına uygun şekilde ayarlamıyor ve zemin şartlandırmasını uygun şekilde yapmıyorsanız kesici kafanın kil malzemenin sarması kaçınılmaz olacaktır.

7.6 Köpük Tüketimine Ait Değerlendirmeler

Uygun zemin koşullandırması; ayna basıncının kontolünü kolaylaştırması, tork ve güç ihtiyacını düşürmesi, aşınma etkisini azaltması, kazılan malzemenin yapışkanlığını azaltması, permeabiliteyi azaltması, kazılan malzemenin homojenliğinin sağlanması, gevşek zeminlerde zeminin kıvamını arttırarak zeminin kohezyonunu arttırması gibi avantajlar sunmaktadır.

Zemin koşullandırılması; tane boyutu dağılımı, zeminin su içeriği, zeminin likit limit değeri, zeminin plastiklik indeksi, gibi zemin özelliklerinden etkilenir. Zemin koşullandırması uygulamaları sırasında püskürtme uçlarından basılan köpüğe etkiyen, çözeltiyi oluşturan etken maddenin konsantrasyon oranı; FIR, FER faktörleridir. Bu faktörler kazılan jeolojik birimin tipine özgü değişik değerler kazanırlar.

Konsantrasyon oranı, suyla karışan ve köpüğü oluşturan kimyasalların, çözelti içerisindeki oranıdır. Konsantrasyon oranı, kullanılan kimyasalın özelliklerine bağlı olarak uygulanacağı zeminin özelliklerine uygun olarak belirlenir.

Köpük stabilitesi, köpüğün zaman geçtikçe bozulmadan kalabilmesini ifade eder. Bu durum çözeltiye ne kadar hava eklendiğine bağlı olarak değişir ve bu genleşme oranıyla ifade edilir. FER (Foam expansion ratio), yani köpük genleşme oranı, üretilen köpük hacminin köpük sıvısının hacmine oranıdır. FER aşağıda bulunan Denklem (7.4) ile hesaplanabilir:

$$FER = V_{köpük} / V_{çözelti} \quad (7.4)$$

Köpük stabilitesi ayrıca kesici kafa kazı (Basınç) odasında biriktirilen malzemenin bulunduğu kısımın basıncına da bağlıdır. Bu kısımdaki yüksek basınç köpük sıvısındaki yüksek konsantrasyon oranına ve gereken FER'in yüksek olmasına sebep olur.

FIR (foam injection rate), yani köpük enjeksiyon oranı ise köpüğün kazılan zemine göre yüzdesidir. Enjekte edilen zeminin boşluk oranına, bir başka deyişle uygulanan zeminin yoğunluğuna bağlı olarak köpük nüfuz etme derecesi değişmektedir. Yüksek yoğunluklu, sıkı zeminlerde nüfuz etme azalırken; düşük yoğunluklu gevşek zeminlerde ise köpük enjeksiyon oranı yüksektir. FIR aşağıda bulunan Denklem (7.5) ile hesaplanabilir.

$$FIR = 100 \times V_{köpük} / V_{zemin} \quad (7.5)$$

Bu parametrelerin düzgün ayarlanmaması durumunda, örneğin fazla hava eklenirse, kesici kafanın basınç odasında biriktirilen zemin kuruyacaktır. Bunun sonucu kazı işlemini sürdürmek için gerekli olan tork artacaktır. Ayrıca kesici kafanın ısısı, sürtünmenin artması sonucu artacak, bunun sonucu olarak da hızın azaltılması gerekecektir. Eğer fazla sıvı veya köpük eklenirse, kazılan malzemenin akışkanlığı artacak ve pasanın uzaklaştırılması zorlaşacaktır.

Ayrıca fazla kimyasal harcanmasından dolayı kazı maliyeti yükselir. Gerekenden az köpük zemine enjekte edilir ise zeminin kesici kafayı veya vida konveyörü tıkaması olasıdır. Bunun sonucunda düşük ilerleme oranı ile makine aşınmasında artış yaşanır.

Kazı esnasında, tork artışıyla makinenin daha sıkı bir zemini kazmaya başladığı anlaşılır. Bu durumda FIR değeri veya enjekte edilen sıvının konsantrasyonu arttırılmalıdır. Eğer makinenin gevşek ve kumlu bir zeminde kazı yaptığı gözleniyorsa vida konveyörde tıkanma olasılığı oluşur. Bu durumda dozaj oranı düşürülerek olası tıkanmaların önüne geçilebilir. Zemin yüksek miktarda su ihtiva ediyorsa ve istenilen konsantrasyon oranı, FER, FIR değerleri tutturulamıyorsa kullanılan kimyasal cinsi değiştirilmelidir (Lovat ve Eng, 2006).

Sert kayaçların kazılması için kullanılan TBM'lerde kimyasal katkılar toz oluşumunu önlemek, açığa çıkan tozu bastırmak, makinenin metal aksamlarında ve keskilerde meydana gelen aşınmaları minimuma indirmek amacıyla kullanılırlar. Yumuşak zeminlerde kazı yapan EPB ve Slurry TBM'lerde ise zemin şartlandırma amacıyla kullanılırlar. EPB ve Slurry TBM'lerin her iki türünde de kazılan malzemenin davranışını kontrol altında tutabilmek için kimyasal katkılara ihtiyaç vardır (Lovat ve Eng, 2006). Kimyasal katkılar kullanılarak kazılan malzemeye en uygun litoloji kazandırılır ve böylelikle malzemenin davranışı kontrol altına alınmış olur. EPB uygulamalarında zemin şartlandırmanın rol oynadığı en önemli iki konu, geçirgenliğin düşürülmesi ve kazı malzemesinin, pasa odasındaki basıncı aynaya iletebilecek uygun plastik kıvama getirilmesidir. Zeminin şartlandırılması için kullanılan katkılar şunlardır (Herrenknecht ve Rehm, 2003):

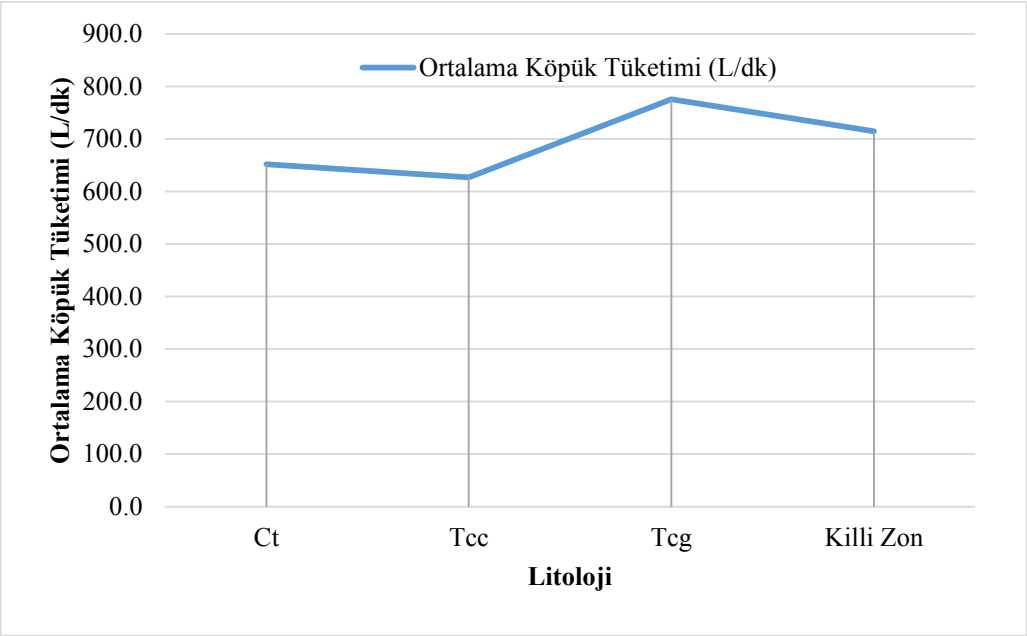
- Köpük
- Polimer
- Köpük – Polimer karışımı
- Bentonit, kil ya da polimer solüsyonu
- Su

İlk EPB uygulamalarında zemin şartlandırma için su ve bentonit kullanılırken günümüzde bunun yerine köpük ve polimerler kullanılmaktadır (Erickson vd., 2008).

Zemin şartlandırıcı kimyasallar kohezif malzemeye akıcılık, kumlu zeminlere ise viskozite (kohezyon) kazandırarak zeminin karakteristiğinde değişiklilere yol açmakta ve EPB uygulamalarında gerekli olan koşullar için zemini uygun hale getirmektedir (Aksu, 2010).

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Trakya formasyonundaki (Ct) ortalama ortalama köpük tüketimi (lt/dk) değeri 652,1 lt/dk'dır. Tamamı Trakya formasyonu (Ct) olan Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arasında belirli Km'ler arası köpük tüketimi değerleri; Km 15+155 – 14+150 arası 606,7 lt/dk, Km 14+150 – 14+016 arası 600,5 lt/dk, Km 14+016 – 13+836 arası 571,8 lt/dk'dır. Kazım Karabekir ile Akşemsettin istasyonları arasında Km 13+660 – 13+460 arasında geçen Trakya formasyonunda (Ct) ise ortalama köpük tüketimi (lt/dk) değeri 622,48 lt/dk'dır. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları arasında Km 12+500 – 12+300 ortalama köpük tüketimi 718,9 lt/dk ve Km 12+300 – 12+212

arasında yer alan Trakya formasyonuna (Ct) ait ortalama köpük tüketimi değeri 792,5 lt/dk'dır (Şekil 7.9).



Şekil 7.9: Ortalama köpük tüketiminin değişen litolojiye göre dağılımı.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Çukurçeşme formasyonundaki (Tçç) ortalama köpük tüketimi değeri 626,9 lt/dk'dır. Çekmece – Çukurçeşme formasyonu (Tçç) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları arasında belirli Km'ler arası ortalama köpük tüketim değerleri; Km 13+836 – 13+750 arası 661,5 lt/dk, Km 13+750 – 13+660 arasında da 592,5 lt/dk'dır.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Güngören formasyonundaki (Tçg) ortalama köpük tüketim değeri 775,5 mm/dk'dır. Çekmece – Güngören formasyonu (Tçg) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları Km 13+460 – 12+807 arası ortalama köpük tüketim değeri 839,8 lt/dk'dır. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları Km 12+807 – 12+500 arası ortalama köpük tüketim değeri ise 711,3 lt/dk'dır.

Killi zeminde ilerleyen TBM'lerde kilin şişerek yapışkan hale gelmesi, topaklanarak blokajlara neden olması, kesici kafanın açıklıklarını ve helezoni konveyörden geçişi zorlandırması nedeniyle problemler oluşmaktadır. Bu tür sorunlar makinenin durdurulmasına ve temizlik bakım onarım gibi nedenlerle projenin de durmasına neden olmaktadır. Bir başka sorun ise pasa basınçlı TBM'ler için ideal kıvam olan plastik kıvam özelliğine pasanın her zaman sahip olamamasıdır. Bu durumda basınç

değişimlerine, pasanın rahat ilerletilememesine ve yine topaklanma ve yapışma problemlerine yol açılacaktır (Aksu, 2010).

Özellikle kil zeminlerde zemin şartlandırılmasının doğru şekilde yapılması bu tür zaman ve iş kaybını önlemede yardımcı olacaktır. Kilin geçirgenliği kumtaşına ya da silttaşına göre çok daha az olduğunu düşünürsek köpük sarfiyatı da doğru orantılı olarak kil zeminlerde daha fazla olacaktır. Öyle ki, elde ettiğimiz grafik sonucu (Şekil 7.9) da bunu doğrulamaktadır.

7.7 Kesici Kafa Elektrik Akımına Ait Değerlendirmeler

TBM'in toplam elektrik güç kapasitesi, makinenin gereksinim duyduğu tork, itme kuvvetini karşılamak zorundadır. TBM'in elektrik gücü gereksinimi, makinenin gereksinim duyduğu tork ve itme kuvvetinin bir fonksiyonudur. TBM'nin elektrik gücü gereksinimi Denklem (7.6) ile hesaplanabilir.

$$P = 2\,\pi \times RPM \times T / 60 \qquad (7.6)$$

Denklem (7.6)'da P elektrik gücü, RPM kesici kafanın dakikadaki dönüş sayısını, T ise tork kapasitesini ifade eder.

Kazılacak olan jeolojik birimin jeoteknik özelliklerine göre tork gereksinimi de değiştiğinden, toplam elektrik gücü gereksinimini de dolaylı olarak etkiler (Gürkan, 2011).

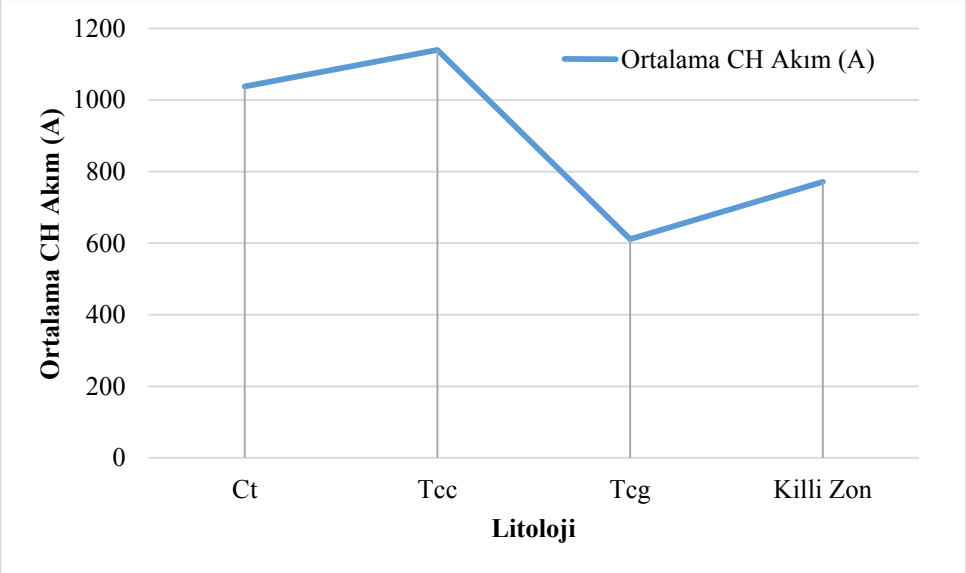
Tez'e konu olan Terratec marka TBM'de 6 adet kesici kafayı besleyen elektrik motoru vardır. Terratec TBM'in elektriksel teknik özellikleri Çizelge 7.2'de verilmiştir. TBM'de VFD kontrol sistemi kullanılmaktadır. VFD (Variable frequency drive) ayarlanabilir frekans sürücüsü anlamındadır.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Trakya formasyonundaki (Ct) ortalama CH (kesici kafa) akım değeri 1038 A'dir. Tamamı Trakya formasyonu (Ct) olan Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arasında belirli Km'ler arası CH akım değerleri; Km 15+155 – 14+150 arası 921 A, Km 14+150 – 14+016 arası 1193 A, Km 14+016 – 13+836 arası 985 A'dir. Kazım Karabekir ile Akşemsettin istasyonları arasında Km 13+660 – 13+460 arasında geçen Trakya formasyonunda (Ct) ise ortalama CH akımı değeri 1048 A'dir. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları arasında Km 12+500 – 12+300 ortalama CH akımı 954 A ve Km 12+300 – 12+212 arasında yer alan Trakya formasyonuna (Ct) ait ortalama CH akım değeri 1125 A'dir (Şekil 7.10).

Çizelge 7.2: Terratec TBM'in elektriksel teknik özellikleri.

İsmi	Güç (kW)	Faz (p)	Güç Kaynağı (V x Hz)	Adet	Not
Tür: Tamamen kapalı, fan soğutmalı.					
İtme	75	4	400 x 50	1	
Erektör Pistonu	11	4	400 x 50	1	
Erektör Dönüş	37	4	400 x 50	1	
Vakum	4.8	4	400 x 50	1	
Artikülasyon	18.5	4	400 x 50	1	
Copy Kesici	11	4	400 x 50	1	
Gres Yağlama	0.2	4	400 x 50	2	
Yağ	0.75	4	400 x 50	1	
Helezon	75	4	400 x 50	3	
Helezon Kapağı	18.5	4	400 x 50	1	
Segment Taşıyıcı	37	4	400 x 50	1	
Tür: Tamamen kapalı, su soğutmalı.					
Cutterhead	160	6	380 x 51.7	6	VFD Kontrol

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Çukurçeşme formasyonundaki (Tçç) ortalama CH akımı değeri 1139 A'dir. Çekmece – Çukurçeşme formasyonu (Tçç) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları arasında belirli Km'ler arası ortalama CH akımı değerleri; Km 13+836 – 13+750 arası 1186 A, Km 13+750 – 13+660 arasında da 1092 A'dir.



Şekil 7.10: Ortalama Ch akım'ın değişen litolojiye göre dağılımı.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Güngören formasyonundaki (Tçg) ortalama CH akımı değeri 611 A'dir. Çekmece – Güngören formasyonu (Tçg) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları Km 13+460 – 12+807 arası ortalama CH akımı değeri 552 A'dir. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları Km 12+807 – 12+500 arası ortalama CH akımı değeri ise 670 A'dir.

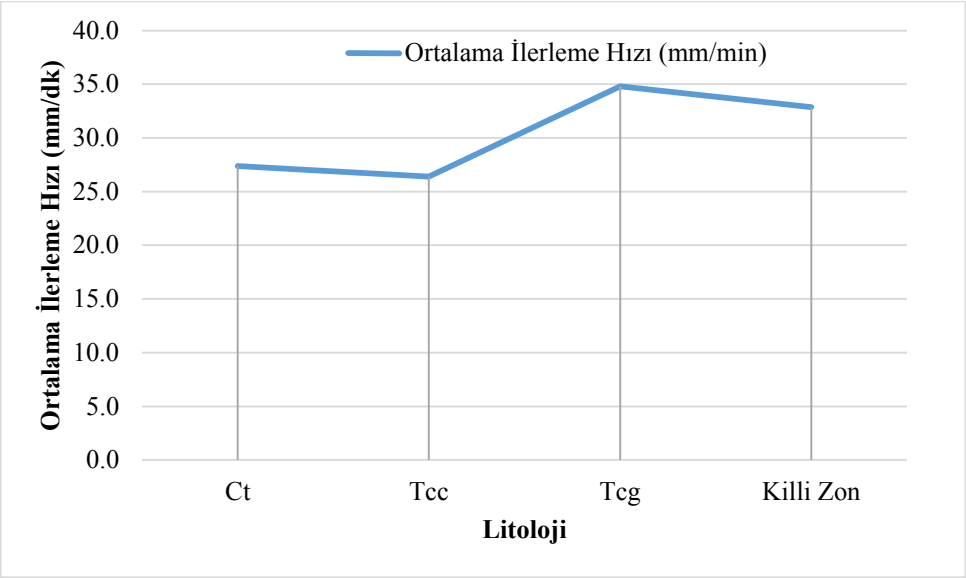
Şekil 7.10'da gördüğümüz gibi sert litolojilerde CH (Kesici kafa)'in çektiği amper yumuşak birimlere göre daha yüksektir. Sert zeminlerde sürtünme daha fazla ve RQD değerleri daha yüksek olduğundan elektrik motorları bu litolojide daha yüksek değerler gösterir. Kil ve silttaşı birimlerini kıyaslarsak killi birimlerde geçirimlilik azaldıkça CH (Kesici kafa)'nın çektiği amper de doğru orantılı olarak yüksek olacaktır.

7.8 İlerleme Hızı ve Penetrasyona Ait Değerlendirmeler

İlerleme hızı bir TBM'in dakikada kat ettiği mesafe olarak tanımlanmaktadır. Hız birimi TBM kabinlerindeki bilgisayarlarda mm cinsinden kullanılır. Makine performansı hakkında fikir edinebilmek amacıyla ilerleme hızı (mm/dak) ve kesici kafanın bir devirde yapmış olduğu penetrasyon (mm/devir) bulunmuştur.

Yukarıda bahsettiğimiz her bir madde ilerleme hızına ve dolayısıyla penetrasyona etki etmektedir. Örneğin; köpüğün uygun şekilde kullanılmaması ilerleme hızını direkt olarak düşürerek etki edecektir.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Trakya formasyonundaki (Ct) ortalama ilerleme hızı değeri 27,4 mm/dk'dır. Tamamı Trakya formasyonu (Ct) olan Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arasında belirli Km'ler arası ilerleme hızı değerleri; Km 15+155 – 14+150 arası 26,4 mm/dk, Km 14+150 – 14+016 arası 24,4 mm/dk, Km 14+016 – 13+836 arası 24,8 mm/dk'dır. Kazım Karabekir ile Akşemsettin istasyonları arasında Km 13+660 – 13+460 arasında geçen Trakya formasyonunda (Ct) ise ortalama ilerleme hızı 29,6 mm/dk'dır. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları arasında Km 12+500 – 12+300 ortalama ilerleme hızı 30 mm/dk'dır ve Km 12+300 – 12+212 arasında yer alan Trakya formasyonuna (Ct) ait ortalama ilerleme hızı değeri 28,9 mm/dk'dır (Şekil 7.11).



Şekil 7.11: Ortalama ilerleme hızı'nın değişen litolojiye göre dağılımı.

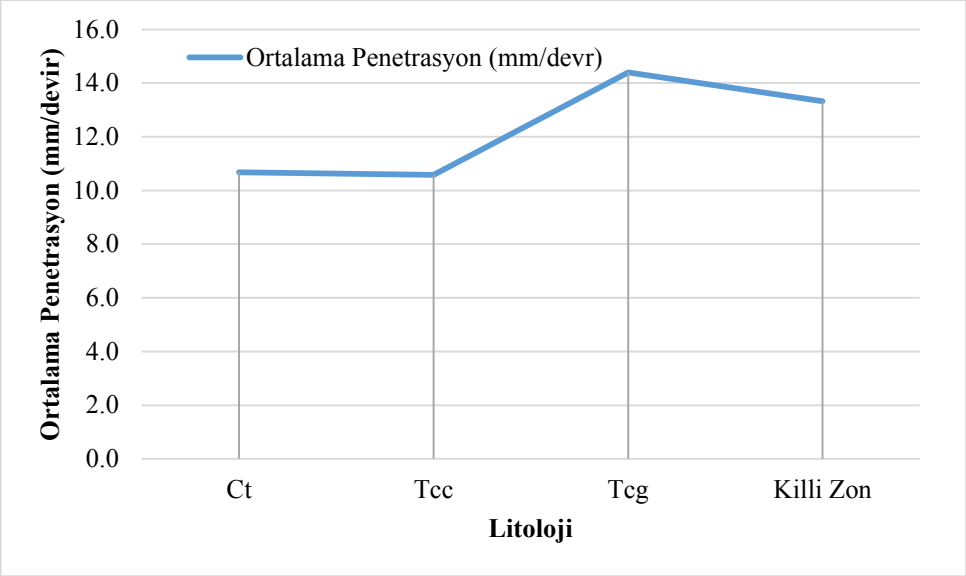
Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Çukurçeşme formasyonundaki (Tçç) ortalama ilerleme hızı değeri 26,4 mm/dk'dır. Çekmece – Çukurçeşme formasyonu (Tçç) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları arasında belirli Km'ler arası ortalama ilerleme hızı değerleri; Km 13+836 – 13+750 arası 23,9 mm/dk, Km 13+750 – 13+660 arasında da 28,9 mm/dk'dır.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Güngören formasyonundaki (Tçg) ortalama ilerleme hızı değeri 34,8 mm/dk'dır. Çekmece – Güngören formasyonu (Tçg) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları Km 13+460 – 12+807 arası ortalama ilerleme hızı değeri 36,1 mm/dk'dır. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları Km 12+807 – 12+500 arası ortalama ilerleme hızı değeri ise 33,5 mm/dk'dır.

Elde ettiğimiz datalardan yola çıkarak oluşturduğumuz Şekil 7.11'de, kil yoğunluklu zeminlerde ilerleme hızının sert zeminlere göre (kumtaşı) daha yüksek olduğunu görmekteyiz. Kil ile birlikte sillttaşı ardalanmasının olduğu litolojilerde ilerleme hızı maksimuma ulaşmıştır.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Trakya formasyonundaki (Ct) ortalama penetrasyon değeri 10,7 mm/devir'dir. Tamamı Trakya formasyonu (Ct) olan Yenimahalle – Kazım Karabekir istasyonları arasında belirli Km'ler arası penetrasyon değerleri; Km 15+155 – 14+150 arası 10,5 mm/devir, Km 14+150 – 14+016 arası 9,3 mm/devir, Km 14+016 – 13+836 arası 10,6 mm/devir'dir. Kazım Karabekir ile Akşemsettin istasyonları arasında Km 13+660 – 13+460 arasında geçen

Trakya formasyonunda (Ct) ise ortalama penetrasyon değeri 11,8 mm/devir'dir. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları arasında Km 12+500 – 12+300 ortalama penetrasyon 11,2 mm/devir ve Km 12+300 – 12+212 arasında yer alan Trakya formasyonuna (Ct) ait ortalama penetrasyon değeri 10,6 mm/devir'dir (Şekil 7.12).



Şekil 7.12: Ortalama penetrasyonun değişen litolojiye göre dağılımı.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Çukurçeşme formasyonundaki (Tçç) ortalama penetrasyon değeri 10,6 mm/devir'dir. Çekmece – Çukurçeşme formasyonu (Tçç) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları arasında belirli Km'ler arası ortalama penetrasyon değerleri; Km 13+836 – 13+750 arası 10 mm/devir, Km 13+750 – 13+660 arasında da 11,2 mm/devir'dir.

Tünel açma makinasının proje boyunca geçtiği tüm Çekmece – Güngören formasyonundaki (Tçg) ortalama penetrasyon değeri 14,4 mm/devir'dir. Çekmece – Güngören formasyonu (Tçg) olan Kazım Karabekir – Akşemsettin istasyonları Km 13+460 – 12+807 arası ortalama penetrasyon değeri 15,1 mm/devir'dir. Akşemsettin – Veysel Karani istasyonları Km 12+807 – 12+500 arası ortalama penetrasyon değeri ise 13,7 mm/devir'dir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yenimahalle – Veysel Karani metro istasyonları arasında yapılan metro tüneli kazı çalışmalarında Terratec TBM marka kazı makinesi kullanılmış ve Terratec TBM için tork, itme kuvveti, penetrasyon, köpük tüketimi, çekilen elektrik akımı, epb, rpm gibi TBM parametreleri litolojiye bağlı olarak değerlendirilmiştir.

Kazı çalışmaları, Trakya formasyonu ile Çekmece formasyonuna ait Güngören ve Çukurçeşme üyeleri olmak üzere üç farklı jeolojik birim içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Trakya formasyonu kumtaşı, şeyl ardalanması, Çekmece formasyonu Güngören üyesi kil, kiltaşı, silttaşı seviyeleri, Çukurçeşme üyesi ise kum ve siltli kumtaşı seviyeleri ile karakteristiktir.

Kazı güzergâhı boyunca sırasıyla; Trakya formasyonu, Çekmece formasyonu Çukurçeşme üyesi, Trakya formasyonu, Çekmece formasyonu Güngören üyesi ve Trakya formasyonları geçilmiştir.

Jeolojik birimler arasında ilerleme hızı en yüksek Çekmece formasyonuna ait Güngören üyesinde tespit edilmiştir. Güngören üyesini oluşturan silttaşı – kiltaşı ardalanmasının yüksek kohezyon, düşük plastisite indisi ve çok düşük sürtünme değerlerine sahip olması kazı ilerleme hızında önemli ölçüde avantaj sağlamıştır.

Çekmece formasyonu Güngören üyesinde köpük tüketimi diğer birimlere oranla daha fazladır. En düşük tork ve elektrik motorlarının çektiği elektriksel akım değeri Güngören üyesinde tespit edilmiştir. Sürtünme ve RQD değerinin CH akımını doğru orantılı etkilediği görülmektedir. Bu formasyondaki silttaşının yoğun olduğu parçalı kısımlarda ise, zemini stabil hale getirmek için EPB değeri kumtaşı birimine göre daha yüksek tutulmuştur.

Çukurçeşme üyesi güzergâhtaki kum oranının en yüksek olduğu bölgedir. Tork değeri diğer formasyonlara göre burada daha yüksek seyretmiştir. Formasyonun birim içerikleri Trakya formasyonuna yakın olduğundan TBM parametre değerleri çok farklılık göstermemiştir.

Trakya formasyonundaki gibi yoğun kumtaşı ağırlıklı bir litolojide RQD değeri diğer formasyonlara göre daha yüksektir. Burada kesici kafanın daha çok sürtünmeye maruz kalması, elektrik motorlarının çektiği akımı da doğru orantılı etkilemektedir. Bu litolojinin parçalanmasının oldukça zor olması, itme kuvveti ve tork değerini de doğru orantılı olarak arttırmıştır. İlerleme hızı ile rpm doğru orantılı uygulanarak penetrasyon değeri ideal ölçüde tutulmuştur. Bu formasyondaki kumlu kısımlarda, sürtünme artarak tork değerini de yükseltmiştir. Kum gibi kohezyonsuz ve geçirimli bir litolojide hava ve köpük kum taneleri arasından kolaylıkla sızabildiğinden ayna basıncını stabil hale getirmek ve korumak zordur. Şayet böyle bir pozisyonda TBM durduğu takdirde kesici kafa içerisine bentonit uygulaması yapılması önerilir. Bentonit hem kazı arınını dengede tutacak basıncı oluşturacak hem de kazı işlerini kolaylaştıracaktır. Ayrıca kayganlaştırıcı özelliği ile keskilerin hızlı aşınmasını da önleyecektir. Aksi takdirde aynaya uygulanan EPB basıncı zaman içerisinde düşebilir ve yüzeyde deformasyona sebep olabilir.

Kum zeminlerde kazı yapmak için EPB makinesi yerine slurry tip TBM'ler tercih edilmelidir. Ancak bu çalışmadaki gibi güzergâhın çok düşük bir dilimi söz konusu ise EPB - TBM'ler bu iş için doğru olacaktır.

Kazılarda EPB değerlerinin doğru uygulanması oldukça önemlidir. EPB değerlerinin doğru uygulanması ve kazıların doğru parametreler ile yapılması kazıların en ideal seviyede ve en güvenli şekilde yapılmasını sağlar. EPB değerleri proje başında formasyonlara göre ayrı ayrı hesaplanmalı ve işletme ekibine uygulatılmalıdır.

Kazılarda kil gibi yapışkan birimlerden geçiliyorsa zemin şartlandırmasının doğru şekilde yapılması önemlidir. Zemin şartlandırması kesici kafadaki keski malzemesinin ömrünü uzatmakla birlikte malzemeyi toplayıcı özelliğiyle hafriyatı çekme kolaylığı da sağlayacaktır. Eğer mevcut şartlar yeterli gelmez ise zeminde stabiliteyi sağlamak için kesici kafaya bentonit uygulaması yapılabilir.

Sürekli dökülen zeminlerde TBM'e önden ya da yüzeyden enjeksiyon ile kuvvetlendirme yapılarak kazı yaptırılması önerilir.

KAYNAKLAR

Aksu, F., 2010. Zemin Şartlandırmanın Pasa Basınçlı (Epb) Tbm'in Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 153 s.

Anagnostou, G. ve Kovári, K. 1994. The face stability of slurry-shield-driven tunnels. Tunnelling & Underground Space Technology, 9, 2, 165-174.

Anagnostou, G. ve Kovári, K. 1996. Face stability conditions with earth pressure balanced shields, Tunnelling & Underground Space Technology, 11, 2, 165-173.

Anagnostou, G ve Kovári, K. 1996. Face stability in slurry and EPB shield tunnelling, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Edit Mair & Taylor, 28,12, 453-458.

Ateş, U., 2013. TBM tasarım parametreleri arasındaki ilişkilerin araştırılması ve buna bağlı olarak iki büyük çaplı TBM projesinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 133 s.

Ates, U., Bilgin, N., ve Copur, H. 2014. Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects, Tunnelling and Underground Space Technology, 40, 46-63.

Avunduk, E., 2011. Kadıköy – Kartal metrosunda zor jeolojik koşullarda kullanılan epb-tbm'in performans analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 106 s.

Barton, N., Lien, R. ve Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanic, 6, 4, 189-239.

Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Willey and Sons, Newyork, 237 s.

Bilgin, N. ve Algan, M. 2012. The performance of a TBM in a squeezing ground at Uluabat, Turkey. Tunn. Tunnelling and Underground Space Technology, 32, 58–65.

Bilgin, N. ve Ateş, U. 2016. Probe drilling ahead of two TBMs difficult ground conditions in Turkey, Rock Mechanics and Rock Engineering, 49, 7, 2763-2772.

Bilgin, N. 2016. An appraisal of TBM performances in Turkey in difficult ground conditions and some recommendations. Tunnelling and Underground Space Technology, 57, 265-276.

Cingöz, C., 2013. NATM ve TBM yöntemlerinin deneysel olarak maliyet ve süre kriterleriyle karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 117 s.

Çilsal, M., 2003. Ankara metrosu 3. aşama projesinde TBM ile açılan tünellerin duraylılığının analizi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İsparta, 113 s.

Çınar, M. ve Feridunoğlu, O.C., 2002. Tünel Açma Makineleri (TBM), Ulaşımda Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu Genişletilmiş Baskı, TMMOB.

Deere, D.U., Coon, R.F., ve Merritt, A.H. 1969. Engineering classification of in-situ rock, Illinois Univ. At Urbana Dept Of Civil Engineering.

Doğruoğlu, M. T., 2009. TBM metodu ile açılan ikiz tünellerde meydana gelebilecek deformasyonların sonlu elemanlar metodu ve numerik hesaplarla tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 144 s.

Erickson, L., Raleigh, P., ve Romero, V. 2008. Geotechnical conditions and TBM selection for the bay tunnel, In North American Tunneling Conference (NAT), San Francisco, USA, 389-398.

Gürkan, B., 2011. İski avrupa 2.kısım yenikapı atıksu tünelinde kullanılan epb tbm'in s6 - s7 kuyuları arasındaki performansının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 103 s.

Hajebi, D., 2008. TBM ile açılan ikiz tüneller çevresinde gözlenen oturma ve deformasyonlar, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 98 s.

Hasanpour, R., 2013, Çift kalkanlı tünel açma makinelerinin sıkışan zemin koşullarında kullanabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 141 s.

Herrenknecht M. ve Rehm U. 2003. Earth pressure balance shield technolohy, Internal lecture in Colorado School of Mine, Colorado, DN.

Heuer, R.E. 1974. Important, ground parameters in soft gro-und tunnelling, In: Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction:. ASCE, 41-55.

Heuer, R.E. ve Virgens. D.L. 1987. Anticipated Behavior of Silty Sands in Tunneling in Proceedings Rapid Excavation and Tunneling Conference, Society of Mining Engineers, Littleton, CO.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. ve Corkum, B., 2002. Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition. Proc. North Am. Rock Mech. Soc. Meeting, Toronto-Kanada, 267-273.

Hoek E. 2000. Practical rock engineering, London, Institution of Mining and Metallurgy, 341 s.

Horn, M. 1961. Horizontaler Erddruck auf senkrechte Abschlussflächen von Tunneln (Horizontal earth pressure on vertical tunnel fronts), In Landeskonferenz der ungarischen Tiefbauindustrie (National Conference of Hungarian Civil Engineering Industry). Translation into German by STUVA, Düsseldorf.

Lamb T.W. ve Whitman, R.V. 1979. Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, 30 s.

Le Pichon, X., Şengör, A. M. C., Demirbağ, E., Rangin, C., Imren, C., Armijo, R. ve Saatçılar, R. 2001. The active main Marmara fault, Earth and Planetary Science Letters, 192, 4, 595-616.

Lovat, R.P., ve Eng, P. 2006. TBM design considerations: selection of earth pressure balance or slurry pressure balance tunnel boring machines. In Int. Symp. on Utilization of underground space in urban areas, 6-7.

Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., ve Wehrmeyer, G. 2013. Mechanised shield tunnelling, John Wiley & Sons. 490 s.

Mooney, M. A., Walter, B., ve Frenzel, C. 2012. Real-time tunnel boring machine monitoring: A state of the art review, North American Tunneling 2012 Proceedings, 71 s.

Öz, A., 2012. İstanbul - Kadıköy Kartal metro tünelinde kullanılan tünel açma makinesinde (TBM) kazı performans analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 86 s.

Parsons, T., Toda, S., Stein, R.S., Barka, A., ve Dieterich, J.H. 2000. Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: an interaction-based probability calculation, Science, 288, 5466, 661-665.

Polat, F., 2015. Gülermak- Kolin-Kalyon Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Yapım Ortaklığı Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Hattı, Depo, Bakım Sahası ve Depo Bağlantı Hatları İnşaat İşleri, Alibeyköy Deresi - Yenimahalle İstasyonu Arası Güzergâh Kesin Proje, Jeolojik - Jeoteknik Etüt Raporu. (Yayınlanmamış).

Polat, F., 2008. Cerchar Aşındırma İndeksine Bağlı Kaya Aşındırma Sınıflaması ve Trakya Formasyonunun aşındırıcılık durumu, Otogar - Bağcılar Metro Güzergâh Raporu. (Yayınlanmamış).

Poşluk, E., 2012. Ankara-istanbul hızlı tren projesi 26 nolu tünelin tbm kazı performansının Qtbm metodu ile tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 120 s.

Ramoni, M. ve Anagnostou, G., 2011. The effect of consolidation on TBM shield loading in water-bearing squeezing ground, Rock Mechanics and Rock Engineering,44, 1, 63-83.

Sarbangholi, F.S., 2014. Tünel açma makinelerinin (TBM), kazı zamanı, makine ve kaya özelliklerine göre istatiksel analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 83 s.

Terzaghi, K. 1950. Mechanism of Landslides: In Application of Geology to Engineering Practice, Geological Society of America, Berkey, 83-123

Terzaghi, K. ve Peck, R.B., 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, N.Y.

Tüysüz, L., 2012. İstanbul'da açılacak metro tünellerinde TBM (Tünel açma makinesi) performansını tahmin etmek için yeni bir yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 101 s.

Yurtaydın, H.Ö., 2011. İstanbul'daki iki tünelde TBM performansları ve kaya kütle sınıflandırmasının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 105 s.

Yüksel, A., 2014. TBM makinelerinde kayaç özellikleri ve makro süreksizliklerin kazı performansına etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 270 s.

URL-1<https://i1.wp.com/www.rayhaber.com/wp-content/uploads/Mecidiyekoy-Mahmutbey-Metro-Hatti-duraklari.jpg,

URL-2<http://www.deprem.gov.tr/depbolge/istanbul.gif, 5 Haziran 2017.

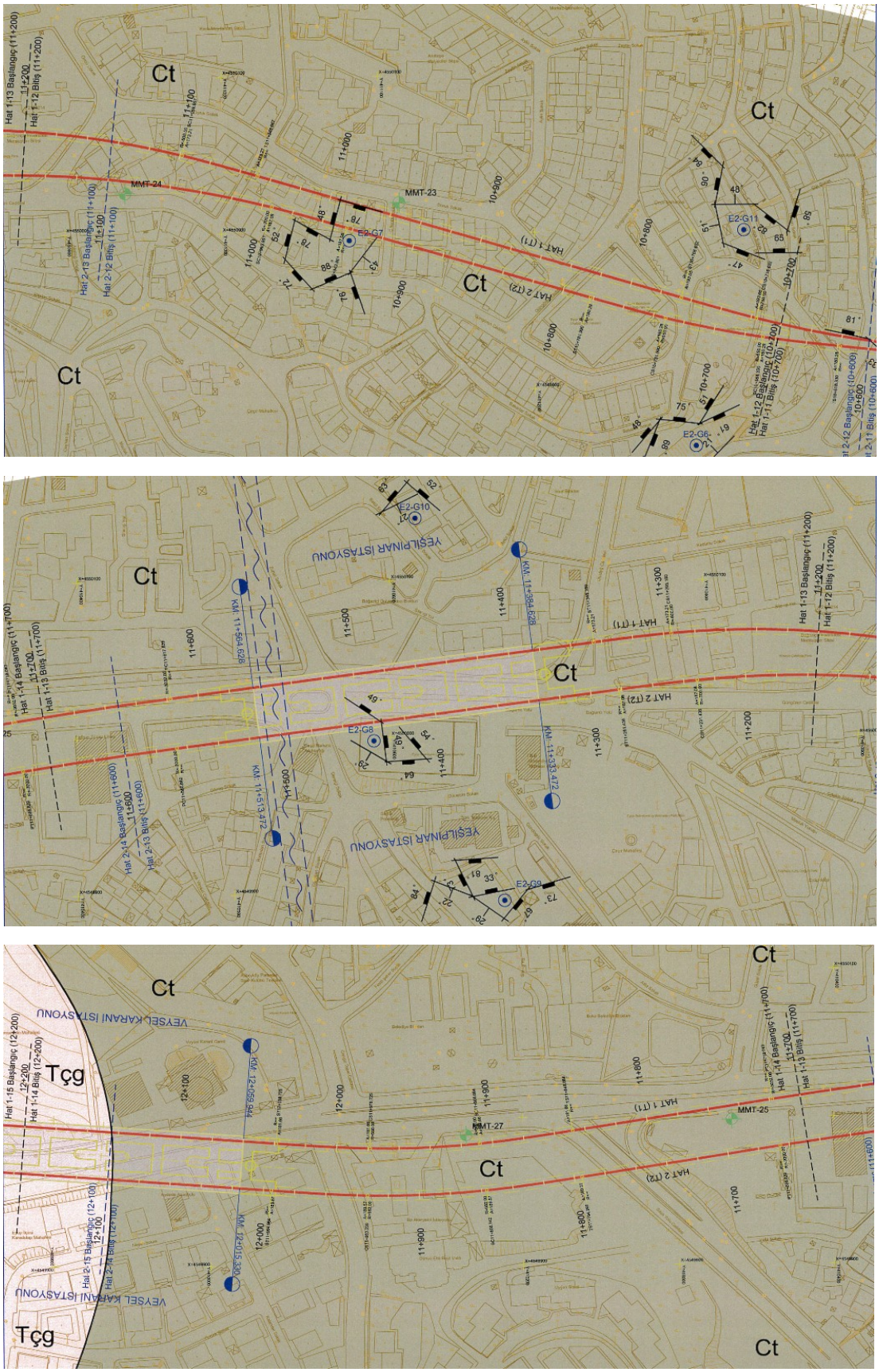
URL-3<https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ISTANBUL, 12 Nisan 2017.

EKLER

Şekil A.1 Jeoloji Haritası (10+500-15+700 Km arası).

Şekil A.2 Jeolojik ve Jeoteknik Kesitler (Hat1-11 ve Hat 1-21 arası).

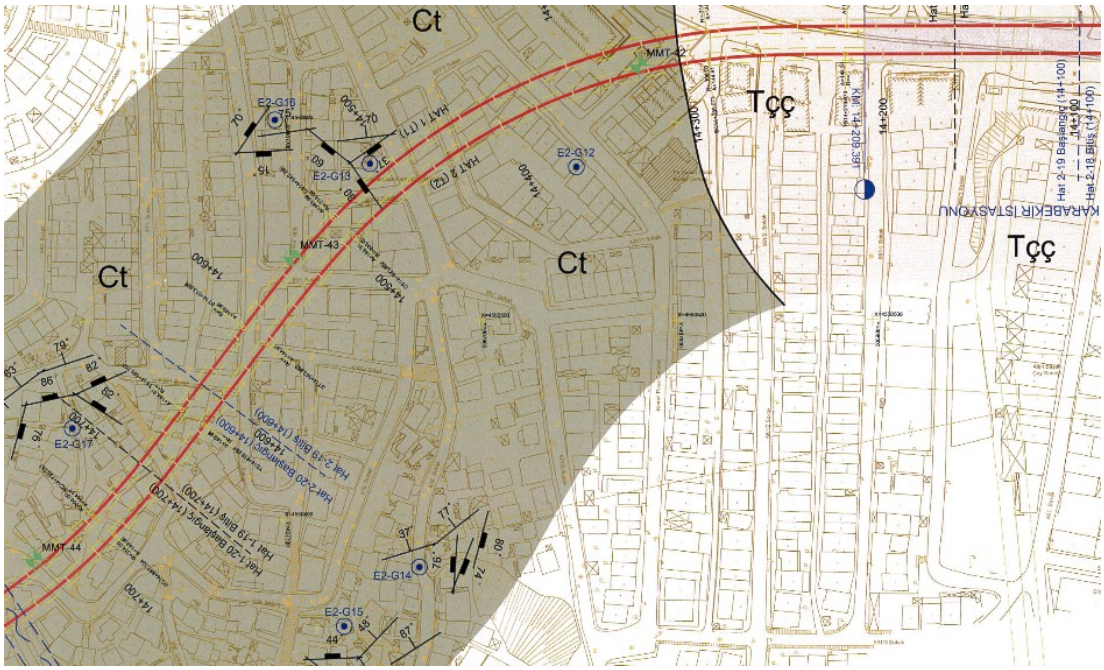
Şekil A.1: Jeoloji Haritası (10+500-15+700 Km arası).

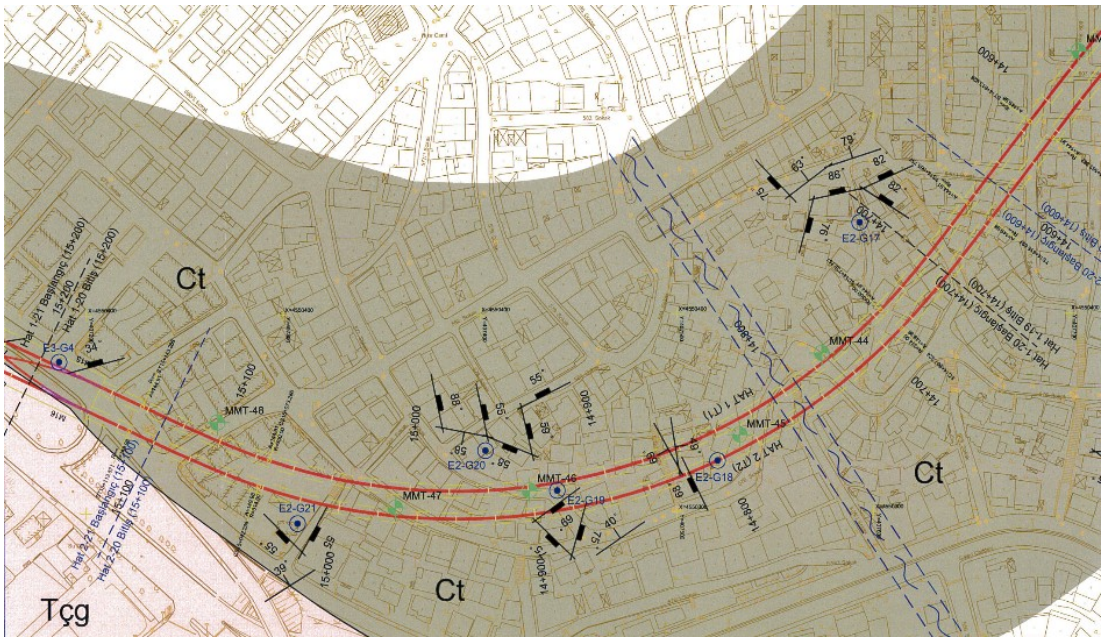


Şekil A.1 (devam): Jeoloji Haritası (10+500-15+700 Km arası).

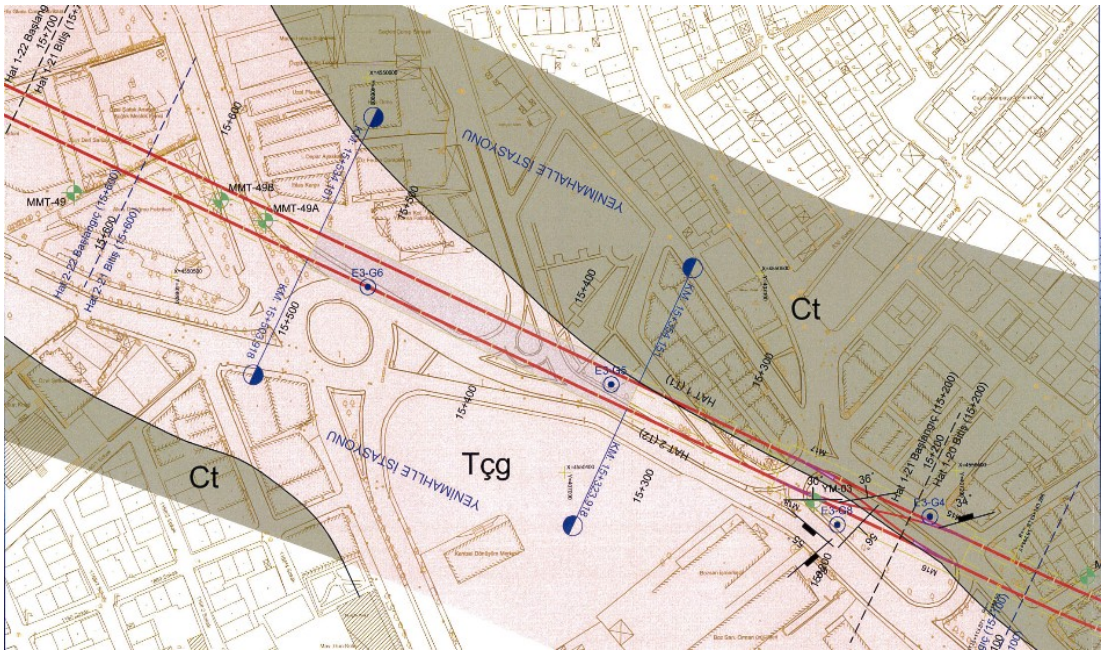


Şekil A.1 (devam): Jeoloji Haritası (10+500-15+700 Km arası).





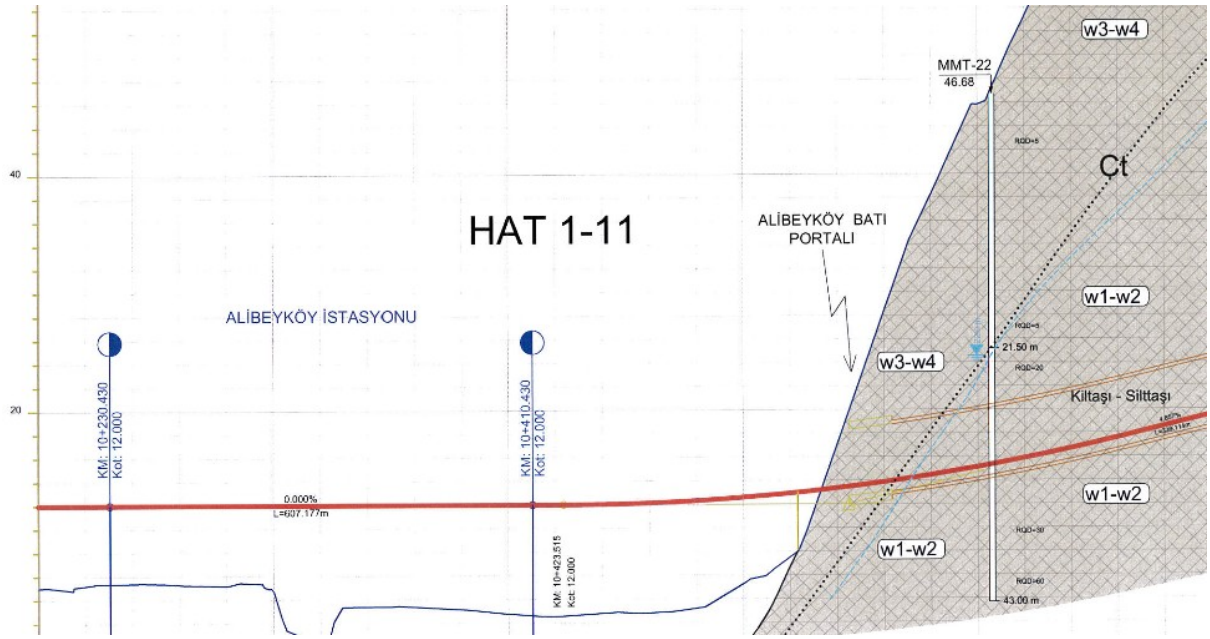
Şekil A.1 (devam): Jeoloji Haritası (10+500-15+700 Km arası).

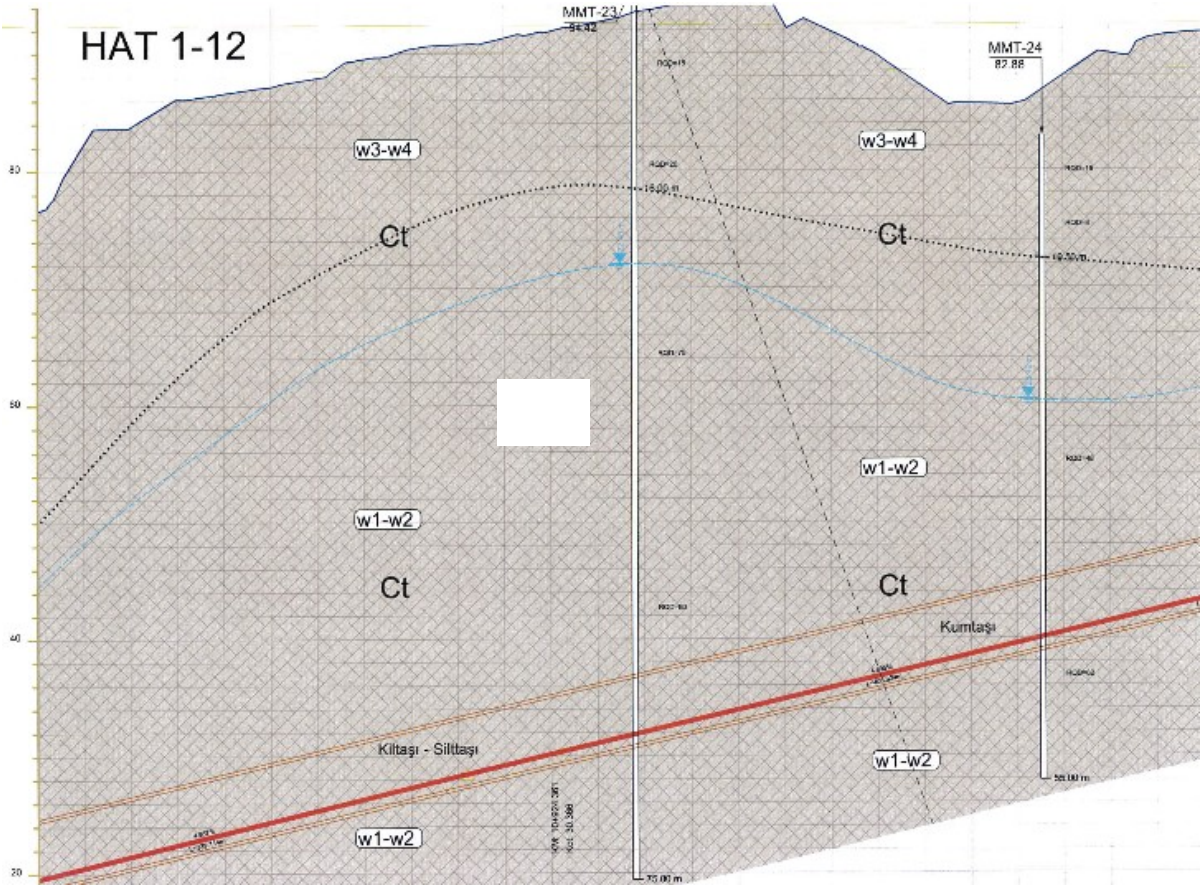


AÇIKLAMALAR

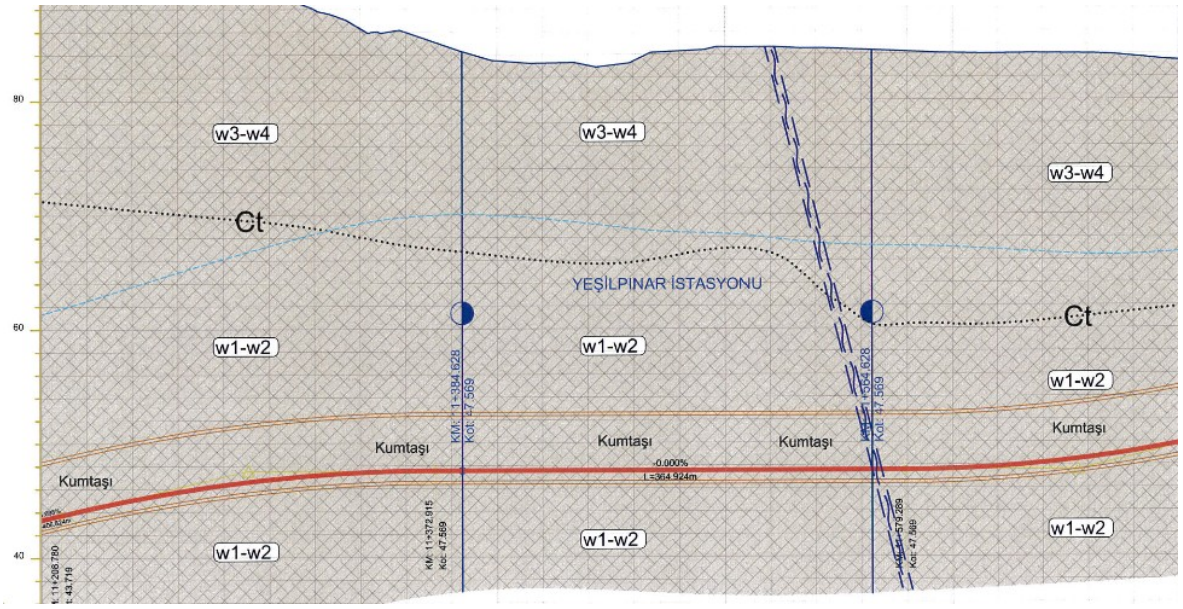
Tçç	**Çekmece Formasyonu - Çukurçeşme Üyesi** Kum; Killi Silt Ara Seviyeli
Tçg	**Çekmece Formasyonu - Güngören Üyesi** Kil - Kiltaşı, Kumlu Kil, Kumlu Kiltaşı
Ct	**Trakya Formasyonu** Kumtaşı - Şeyl Ardalanması
	Dokanak
	Zemin İnceleme Sondajı
	Gözlem Noktası
30°	Tabaka Eğim Doğrultu
40°	Eklem-Çatlak Eğim Doğrultu
	Kesit İçin Kesim Yerleri (Hat 1)
	Kesit İçin Kesim Yerleri (Hat 2)

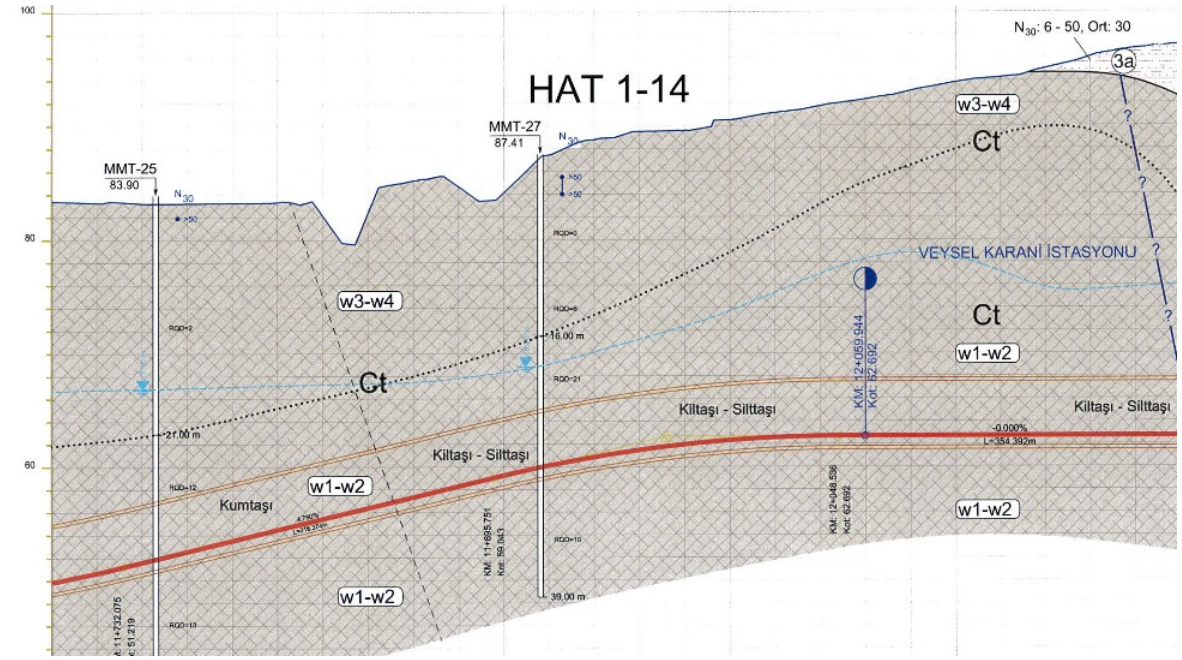
Şekil A.2: Jeolojik ve Jeoteknik Kesitler (Hat1-11 ve Hat 1-21 arası).



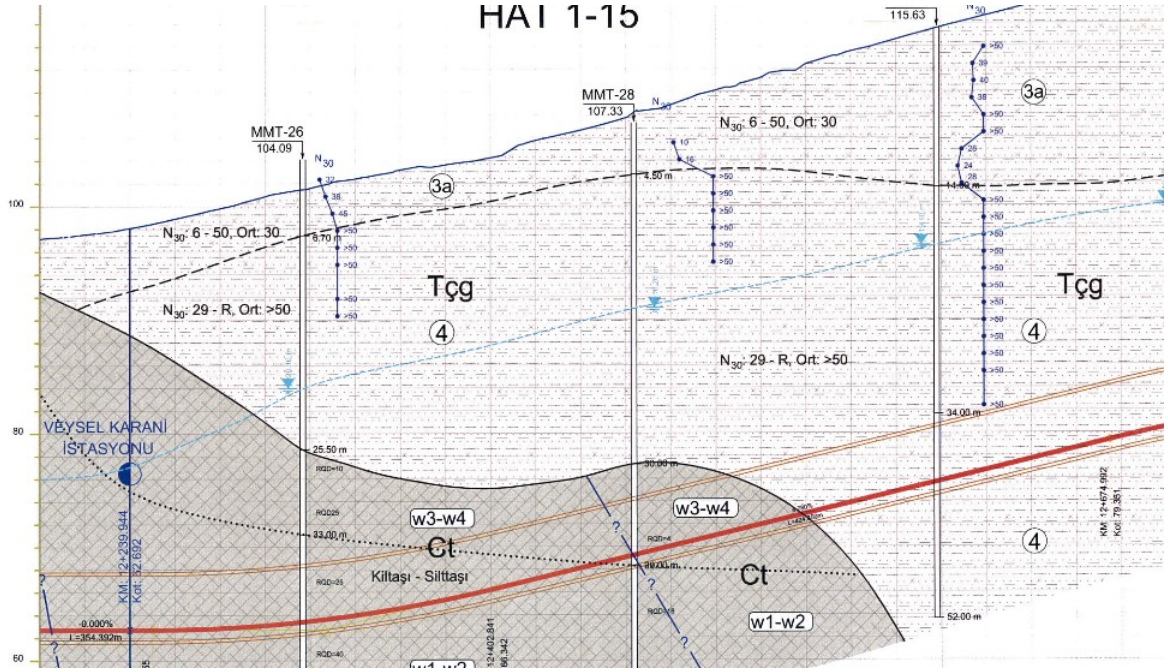


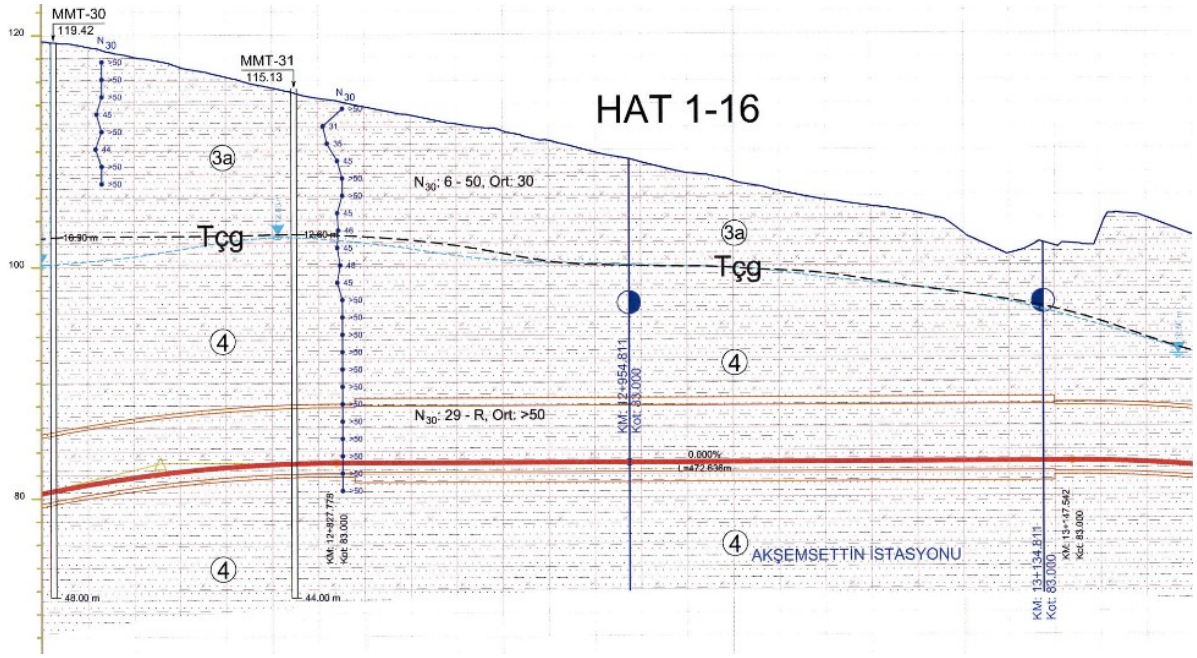
Şekil A.2 (devam): Jeolojik ve Jeoteknik Kesitler (Hat1-11 ve Hat 1-21 arası).



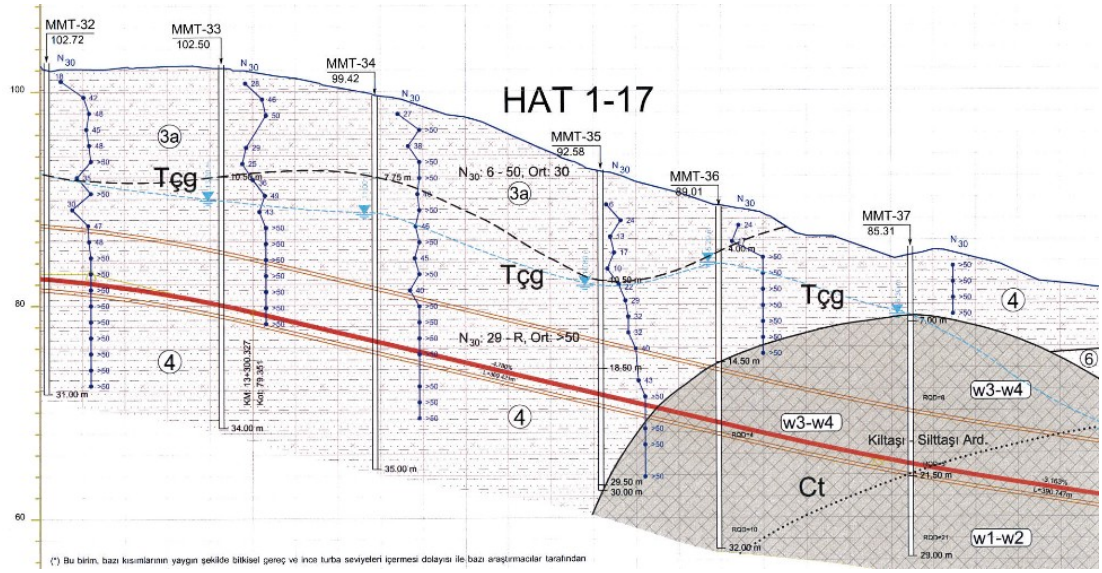


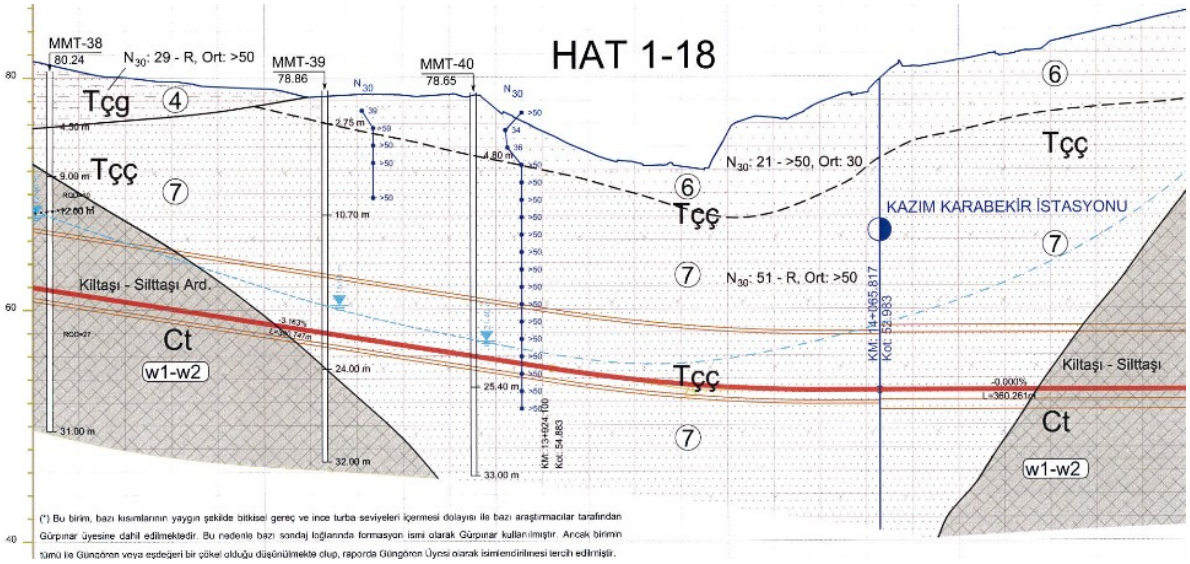
Şekil A.2 (devam): Jeolojik ve Jeoteknik Kesitler (Hat1-11 ve Hat 1-21 arası).



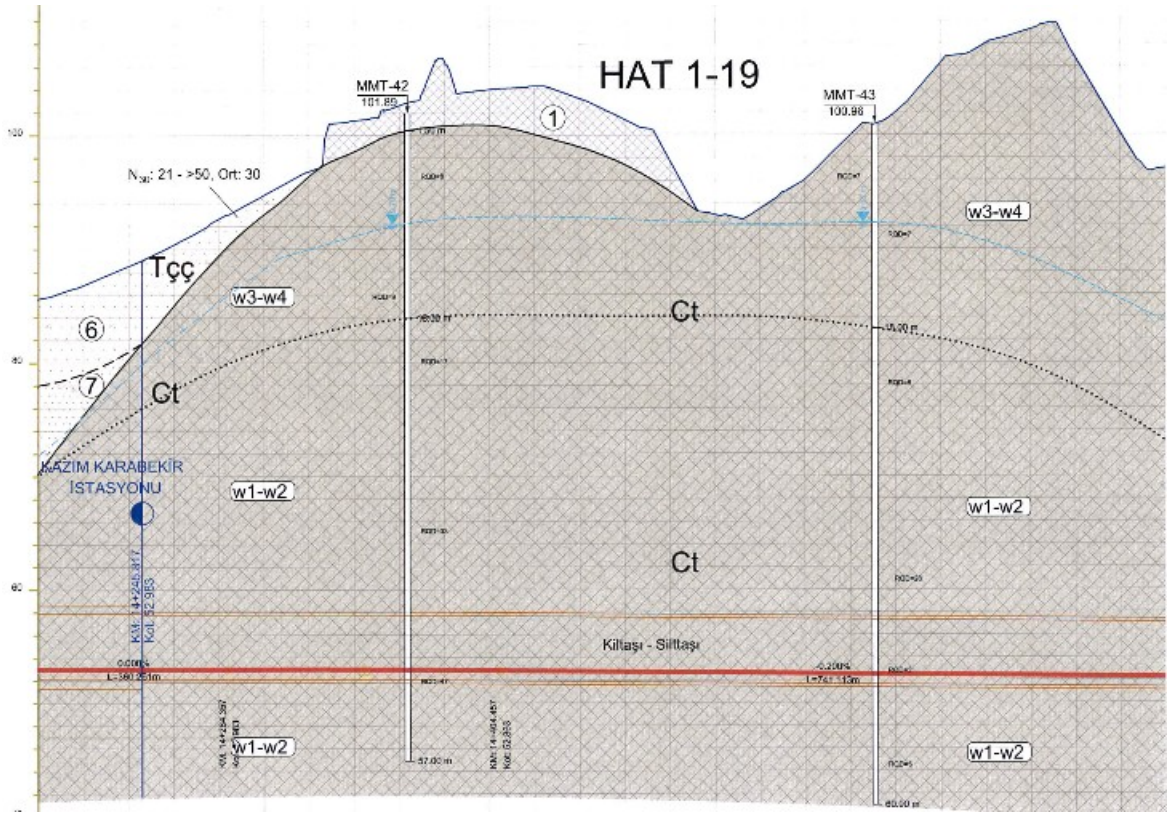


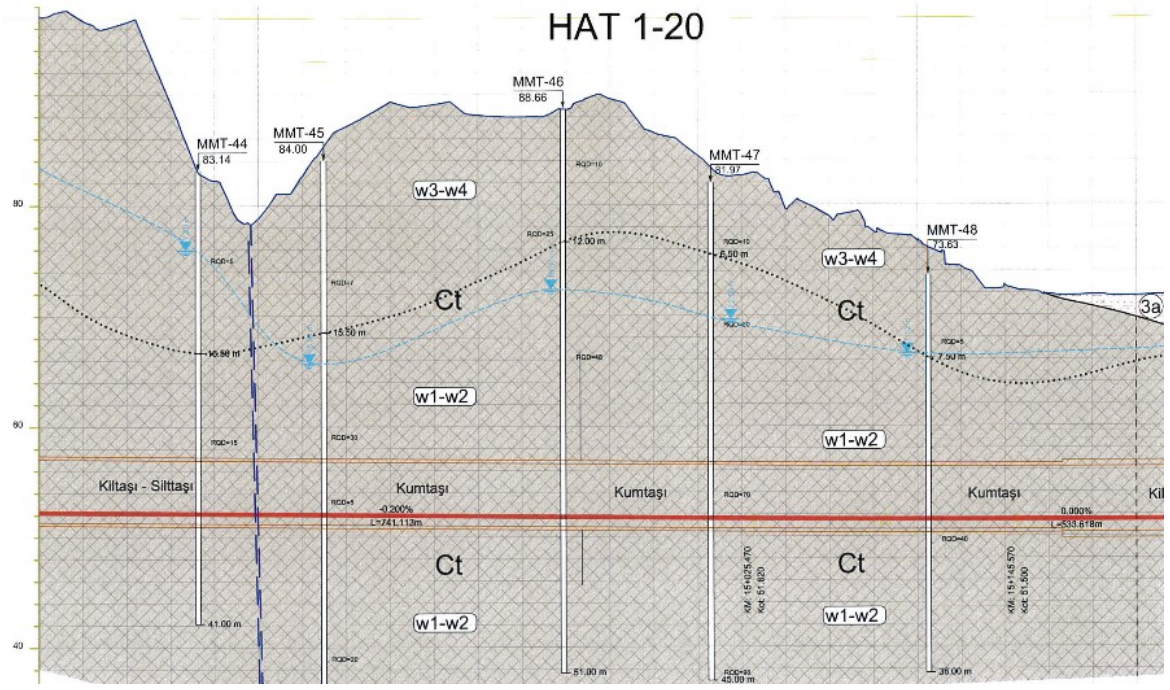
Şekil A.2 (devam): Jeolojik ve Jeoteknik Kesitler (Hat1-11 ve Hat 1-21 arası).



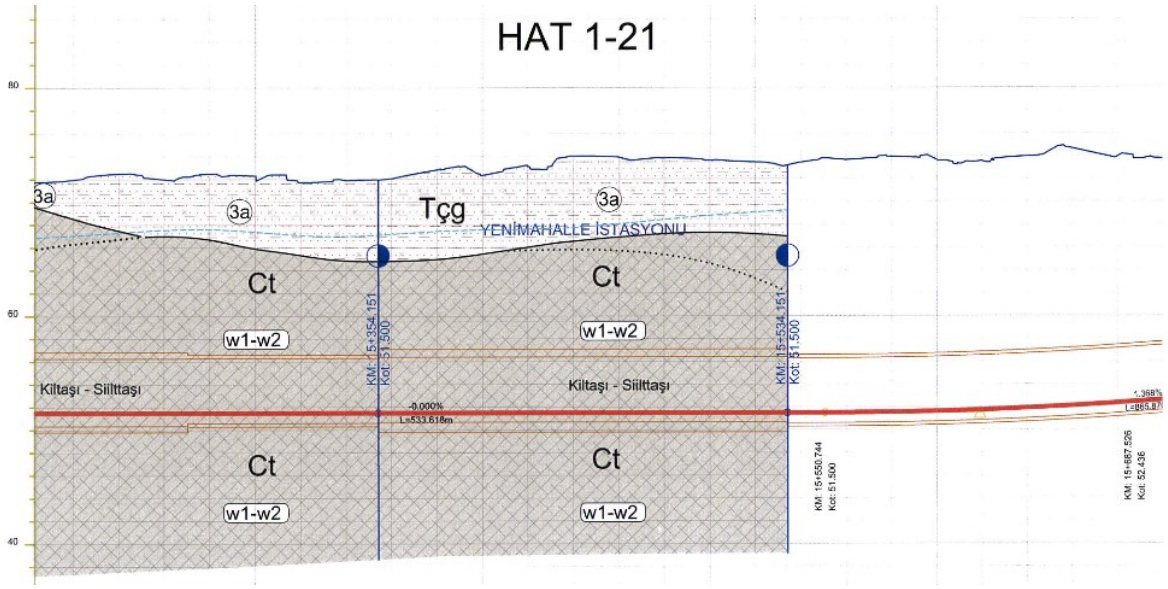


Şekil A.2 (devam): Jeolojik ve Jeoteknik Kesitler (Hat1-11 ve Hat 1-21 arası).





Şekil A.2 (devam): Jeolojik ve Jeoteknik Kesitler (Hat1-11 ve Hat 1-21 arası).



AÇIKLAMALAR

Çekmece Formasyonu - Güngören Üyesi (Tçg)

3a — Orta Sıkı-Sıkı Kum Ara Tabakalı Çok Katı - Sert Siltli Kİl

4 — Sert Kil / Siltli Kil ve Kiltaşı Ardalanması, Az Kumlu (*)

Çekmece Formasyonu - Çukurçeşme Üyesi (Tçç)

6 — Orta Sıkı - Sıkı Kum / Siltli Kum, İnce Kil ve Çakıl Ara Seviyeli

Trakya Formasyonu (Ct)

w3-w4 — Orta Derecede Ayrışmış Kaya (Kumtaşı - Şeyl Ardalanması)

w1-w2 — Az Ayrışmış - Ayrışmamış Kaya (Kumtaşı - Şeyl Ardalanması)

——— Formasyon Sınırı

— — — Zemin Tabaka Sınırı

..... Ayrışma Sınırı

RQD — Ortalama Kaya Kalite Değeri

N_{30} — Penetrasyon Direnci

Yeraltı Su Seviyesi

γn : Birim Hacim Ağırlık [kN/m³]

c : Kohezyon [kPa]

ϕ : Kayma Mukavemet Açısı [derece]

Em : Deformasyon Modülü [Mpa]

μ : Poisson Oranı

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı **:** Fatih KARA

Doğum Tarihi ve Yeri: 24.10.1988 / Ankara

E-posta adresi **:** fatkara06@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans **:** Aksaray Üniversitesi (2006 – 2010)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

2002 yılında Edirne İlhami Ertem Lisesi, 2005 yılında Tınaztepe Lisesi'ni, 2010 yılında Aksaray Üniversitesi Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nü bitirdi. 2012 yılında Aksaray Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2010 - 2011 yılları arasında Spektra Jeotek San. Ve Tic. A.Ş. 'de, 2013 – 2015 yılları arası Yse Yapı – Nas İnşaat Adi Ortaklığında, 2015 yılından itibaren halen devam etmekte olduğum Gülermak Kolin Kalyon Metro Yapım Ortaklığında görevimi sürdürmekteyim.

Aksaray Üniversitesi, lisans derecesi bölüm ikinciliği.