KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DARICA-BAYRAMOĞLU ATIKSU TÜNELİ MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ ÖZELLİKLERİNİN TÜNEL DELME MAKİNESİ (TBM) SEÇİMİNE ETKİSİ

ABDULLAH ALTUNTAŞ

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DARICA-BAYRAMOĞLU ATIKSU TÜNELİ MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ ÖZELLİKLERİNİN TÜNEL DELME MAKİNESİ (TBM) SEÇİMİNE ETKİSİ

ABDULLAH ALTUNTAŞ

Dr. Öğr. Üyesi Özkan CORUK		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Prof. Dr. Cemal BALCI		
Jüri Üyesi,	**İstanbul Teknik Üniversitesi**	.....
Prof. Dr. Ömer Feyzi GÜRER		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 21.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda planlama, yönlendirme ve fikir alışverişleri ile birlikte emeğini, deneyimlerini ve zamanını esirgemeyen danışmanım Sn. Yard. Doç. Dr. Özkan CORUK'a teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca engin deneyim ve bilgilerini paylaşan, desteğini esirgemeyen Sn. Prof. Dr. Cemal BALCI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Genel Sekreteri Sn. İlhan Bayram'a, Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürü Sn. Ali SAĞLIK'a, Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Etüd ve Projeler Dairesi Başkanı Sn. Mert KANBUR'a, Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Projeler Dairesi Başkanı Sn. Semih TURAN'a ve Yüklenici ÖZKA Firması Proje Müdürü Sn. Meriç YETİŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca görüşleri ile yaşamıma, çalışmalarıma katkıda bulunan, karşılaştığım her zorlukta manevi, maddi desteğini ve zamanını esirgemeyen Babam Haşim ALTUNTAŞ'a ve Annem Kadriye ALTUNTAŞ'a minnetimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca bana her zaman katlanan ve hiçbir zaman yardımını ve sevgisini esirgemeyen sevgili eşim Öznur ALTUNTAŞ'a ve çocuklarım Ömer, Hamza ve Gülce'ye sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs – 2018 Abdullah ALTUNTAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. İNCELEME ALANI KONUMU 2
2. JEOLOJİ VE TEKTONİK 4
2.1. Araştırma Alanı ile İlgili Çalışmalar 4
2.2. Genel Jeoloji 6
2.3. İnceleme Alanının Jeolojisi 7
2.3.1. Trakya formasyonu (Ct) 9
2.3.2. Ballıkaya Formasyonu (TRb) 10
2.3.3. Kazmalı Formasyonu (TRk) 14
2.3.4. Akveren Formasyonu (KTa) 16
2.3.5. Darıca formasyonu (T_{pld}) 17
2.3.6. Dolgu (Qd) 18
2.4. Yapısal Jeoloji 19
2.5. Mühendislik Jeolojisi 21
2.5.1. Sondaj araştırmaları ve arazi deneyleri 21
2.5.2. Laboratuvar deneyleri 24
2.5.3. Kaya sınıflamaları 27
2.5.4. Tünel güzergâhının mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmesi 29
3. TÜNEL DELME MAKİNESİ (TBM) GENEL BİLGİ ve SEÇİMİ 31
3.1. Tünel Kazı Perfomansı ve Tünel Delme Makinesi (TBM) Yönteminin Tarihsel Gelişimi 31
3.2. Tünel Delme Makinesi (TBM) Seçimi 32
4. TBM TASARIM VE PERFORMANS PARAMETRELERİNİN SEÇİMİ 41
4.1. Disk Keskiler ve Özellikleri 42
4.2. Keskilerin Kesici Kafaya Yerleştirilmesi 45
4.3. Keskiler Arası Mesafe ve Keski Sayısı 46
4.4. Kesici Kafa Dönüş Hızı (Devir, RPM) 47
4.5. Kesici Kafa Gücü ve Tork Gereksinimi 47
4.6. İtme Kuvveti Gereksinimi 49
4.7. Cerchar Aşındırıcılık Testi (CAI) 49
4.8. Kesme Derinliği 50
4.9. Kesme Düzeni 51
4.10. Spesifik Enerji 51
4.11. TBM Disk Keski Tüketiminin Tahmini 52

5. TBM PERFORMANS TAHMİNİ, GÜNLÜK İLERLEME İLE TÜNEL BİTİM SÜRESİNİN YAKLAŞIK HESABI 56
5.1. Spesifik Enerji Kavramına Dayalı TBM Performans Tahmini 59
5.2. TBM Faydalanma Oranının Yaklaşık Hesabı 62
5.3. TBM in Teknik Özelliklerinin Belirlenmesi 64
5.4. Darıca – Bayramoğlu TBM İçin Kullanılan Performans Modeli 65
5.5. Darıca – Bayramoğlu TBM Atıksu Tünellerinde Kullanılacak EPB-TBM'in Performans Tahminleri 66
5.6. EPB TBM'lerde Arındırma Basıncı Hesabı 69
5.7. Anagnastou- Kovari'ye Göre Ayna Basıncı Hesaplama Yöntemi 71
5.8. Anagnastou-Kovari Yöntemi İle Yapılan EPB Ayna Basıncı Hesapları 73
6. DARICA-BAYRAMOĞLU ATIKSU TÜNELİNDE MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ ÖZELLİKLERİNİN TBM UYGULAMA PERFORMANSINA ETKİSİ 75
6.1. Kullanılan Tünel Delme Makinesi (TBM) Genel Bilgileri 75
6.2. TBM Kazı Verilerinin Değerlendirilmesi 77
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 89
KAYNAKLAR 91
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 95
ÖZGEÇMİŞ 96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çalışma alanını yer bulduru harita ve görüntüsü 3
Şekil 2.1. Tünel güzergahı jeoloji haritası 8
Şekil 2.2. Tünel Güzergahı Jeolojik Kesidi 8
Şekil 2.3. Trakya formasyonunun grovak-şeyl ardalanmasının görünümü 10
Şekil 2.4. Ballıkaya formasyonunun dolomitik kireçtaşı düzeylerinin görünümü 11
Şekil 2.5. TSK-1/K/61.50-61.60 numunesine ait ince kesit görüntüleri ve XRD kaydı 12
Şekil 2.6. TSK-2/K/80.00-80.30 numunesine ait ince kesit görüntüleri ve XRD kaydı 13
Şekil 2.7. TSK-3/K/9.30-9.50 numunesine ait ince kesit görüntüleri ve XRD Kaydı 14
Şekil 2.8. CSK-3/K/45.00-45.30 numunesine ait ince kesit görüntüleri ve XRD kaydı 15
Şekil 2.9. Akveren formasyonunun killi kireçtaşı düzeylerinin görünümü 16
Şekil 2.10. CSK-5/K/20.20-20.40 numunesine ait ince kesit görüntüleri ve XRD kaydı 17
Şekil 2.11. Darıca formasyonunun çakıllı kil düzeylerinin görünümü 18
Şekil 2.12. Darıca formasyonda tabakalanmaya paralel tanelerin dizilimi ve Darıca sahiline bakan fay şevinin görünümü 20
Şekil 2.13. Tünel güzergah sondaj lokasyon haritası 22
Şekil 2.14. Tünel güzergah sondaj arazi çalışmaları 23
Şekil 3.1. Tam cepheli tünel açma makinesi (Robbins) 33
Şekil 3.2. Kaya formasyon kazısı yapan tam cepheli tünel açma makinesi ve yedekleme sistemleri (Herrenknecht) 34
Şekil 3.3. Pasa basınçlı tünel delme makinesi kesit görünümü (Herrenknecht) 39
Şekil 3.4. Herrenknecht marka Proje de kullanılan EPB tipi tünel delme makinesi 39
Şekil 3.5. Tam kesitli tünel delme makinesi seçimine etki eden parametreler 40
Şekil 4.1. Tek diskli keski 43
Şekil 4.2. Disk keskilerde ring profili (a) V-tip (b) Sabit kesit uçlu (CCS) 43
Şekil 4.3. Farklı çaplardaki ring boyutları (1”=25,4 mm) 44
Şekil 4.4. TBM kazısından sonar oluşan ayna görünümü 46
Şekil 4.5. Cerchar aşındırıcılık tayini ve test aleti 49
Şekil 4.6. Kaya kesme deneyleri parametrelerinin görünümü 50
Şekil 4.7. Kaya kesme deneylerinde yardımsız kesme tanımı 51
Şekil 4.8. Kaya kesme deneylerinde yardımlı kesme tanımı 51
Şekil 4.9. Keskiler arası mesafe ve kesme derinliğinin spesifik enerjiye etkisi 52
Şekil 5.1. Disk keskilerin tasarım parametreleri 56
Şekil 5.2. Disk keskiye gelen kuvvetlerin şematik gösterimi 57

Şekil 5.3. Keskiler arası mesafe/kesme derinliğe oranına bağlı olarak spesifik enerjinin laboratuvar şartlarında değişimine bir örnek 60
Şekil 5.4. Tam boyutlu lineer kesme deney seti 60
Şekil 5.5. Kadıköy Metro Tünelinde, ortalama basınç dayanımı 45,8 MPa olan Kartal Dolayoba kireçtaşı, siltttaşı ve karbonatlı şeyl için TBM'in Spesifik Enerjisi ve penetrasyon arasındaki değişim 61
Şekil 5.6. Laboratuvar şartlarında elde edilen spesifik enerji değerleri ve kayacın basınç dayanımı arasındaki ilişki 62
Şekil 5.7. TBM ekibinin işi öğrenme eğrisi 63
Şekil 5.8. TBM kalkan çapı ile kesici kafa torku arasındaki ilişki 64
Şekil 5.9. TBM kalkan çapı ile itme gücü arasındaki ilişki 64
Şekil 5.10. EPB TBM arın basıncının dengelenmesi 69
Şekil 5.11. Yetersiz ayna basıncının oluşturduğu tasman veya göçme 70
Şekil 5.12. EPB TBM ile ayna basıncının dengelenmesi 71
Şekil 5.13. Kabul edilen kayma mekanizması 72
Şekil 5.14. Bir EPB uygulamasında su sızma kuvveti f ve efektif destek basıncı s' (σ') 73
Şekil 5.15. F0 ,F1 ,F2 ve F3 boyutsuz katsayıları için nomogramlar 73
Şekil 6.1. Herrenknecht Marka EPB TBM Kesici kafa görüntüsü 75
Şekil 6.2. Darıca-Bayramoğlu tüneli TBM için açılan şaft 76
Şekil 6.3. Darıca-Bayramoğlu tüneli tahkimat sistemi 77
Şekil 6.4. Darıca-Bayramoğlu TBM örnek kayıt verisi 1 78
Şekil 6.5. Darıca-Bayramoğlu TBM örnek kayıt verisi 2 78
Şekil 6.6. Darıca-Bayramoğlu TBM örnek kayıt verisi 3 79
Şekil 6.7. Tünel uzunluğu – ilerleme hızı mm/dk grafiği 80
Şekil 6.8. Tünel uzunluğu – kesici kafa devir sayısı/dakika grafiği 81
Şekil 6.9. Tünel uzunluğu – ayna basınç grafiği 81
Şekil 6.10. Tünel uzunluğu – TBM devrilme grafiği 82
Şekil 6.11. Tünel uzunluğu – güncel halka ilerleme grafiği 82
Şekil 6.12. Tünel uzunluğu – ilerleme hız (mm/dak) grafiği 83
Şekil 6.13. Tünel uzunluğu – yağ tankı sıcaklığı grafiği 84
Şekil 6.14. Tünel uzunluğu – kesici kafa basıncı (Bar) grafiği 85
Şekil 6.15. Tünel uzunluğu – toplam itme kuvveti (kN) grafiği 85
Şekil 6.16. Tünel uzunluğu – kazı hızı (m^3/h) 86
Şekil 6.17. İlerleme hızı ile arazi kazılabilirlik indeksi grafiği 87
Şekil 6.18. Makinenin kazılabilirlik indeksi ile spesifik enerji arasındaki ilişki grafiği 87

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Sondajların koordinat, derinlik ve yeraltısuyu seviyesi listesi 22
Tablo 2.2. Basınçlı su test sonuçları özet listesi..... 23
Tablo 2.3. Zemin tabakalarından alınan numunelerin indeks özellikleri..... 24
Tablo 2.4. Zemin tabakalarından alınan numunelerin mekanik özellikleri 25
Tablo 2.5. Kaya tabakalarından alınan numunelerin mekanik özellikleri 26
Tablo 2.6. Sondajlarda kaya tabakalarından alınan numunelerin mekanik özellikleri 27
Tablo 2.7. KM:2+510/0+760 arasındaki kaya birimler için önerilen RMR değerleri 27
Tablo 2.8. KM:0+750/0+000 arasındaki kaya birimler için önerilen RMR değerleri 28
Tablo 2.9. Olası fay zonları için önerilen RMR değerleri..... 28
Tablo 2.10. Tünel güzergahındaki kaya ve zemin tabakalarının mühendislik özellikleri, kaya sınıfı ve jeoteknik tasarım parametreleri..... 30
Tablo 3.1. Tam cepheli tünel delme makinelerinin sınıflandırması ve uygun jeolojik ve jeoteknik koşullara göre seçimi 35
Tablo 4.1. Kazı makinelerinin performansını etkileyen parametreler 41
Tablo 4.2. Üretici firmalar tarafından ön görülen yatak kapasiteleri..... 44
Tablo 4.3. ASTM 2010'a göre CERCHAR aşındırıcılık indeksi sınıflandırması 50
Tablo 4.4. Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tüneli güzergahından alınan numunelerin CAI sonuçları..... 50
Tablo 4.5. Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tüneli farklı formasyonlar İçin keski ömrü ve maliyet tahminleri 54
Tablo 4.6. Darıca–Bayramoğlu TBM atıksu tüneli farklı formasyonlar İçin keski maliyet tahminleri..... 55
Tablo 5.1. TBM den faydalanma oranının tahmininde kullanılan tablo 63
Tablo 5.2. TBM'in bazı teknik özellikleri 64
Tablo 5.3. İstanbul'da benzer kazı çapında kullanılan bazı TBM'lerin genel teknik özellikleri..... 65
Tablo 5.4. Üsküdar-Ümraniye–Çekmeköy-Sancaktepe Metro tünellerinin 1 ve 2 hatlarında TBM ölçülen ve tahmini performans değerleri..... 65
Tablo 5.5. Nümerik örnek için makineden faydalanma oranının hesap edilmesi..... 67
Tablo 5.6. Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tünellerinde kullanılacak EPB-TBM'in performans tahmini 68
Tablo 6.1. TBM'nin teknik özellikleri 76
Tablo 6.2. Tünel açma makinasının elektronik verilerinden elde edilen veriler..... 79
Tablo 6.3. Tünel açma makinasının verilerinden hesaplanan bazı performans parametreleri..... 80
Tablo 6.4. Darıca – Bayramoğlu TBM tahmini ayna basıncı değerleri..... 88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°	: Derece
c	: Kohezyon
CL	: Disk keski ömrü metre cinsinden, (m/s)
CLH	: Saat cinsinden disk keski ömrü, (saat)
CPC	: Keski değişim maliyeti, ($)
c_u	: Ortalama drenajsız dayanımdır (ø = 0 hali)
D	: Disk çapı, (m)
d	: Kesme derinliği, (m)
DTBM	: TBM kesici kafa çapı, (m)
f_L	: Sürtünme kayıpları
FN	: Diskte oluşan normal kuvvet, (kN)
FPI	: Arazi kazılabilirlik indeksi
FR	: Disk yuvarlanma kuvveti, (kN)
FS	: Disk yanal kuvveti, (kN)
FT	: Diske etki eden vektörel kuvvet, (kN)
G_s	: Özgül ağırlık, (kg/m^3)
H	: Tünel derinliği, (m)
IPR	: Net kazı hızı, (m^3/sa)
Is	: Nokta yük indeksi
kWh	: Kilowatt saat, (kW/sa)
N	: Arın basıncı stabilite katsayısı
NC	: Disk keski sayısı
$N_{köşe}$	: Kafadaki köşe keski sayısı
NR	: Kesici kafa dönüş sayısı
P	: Yüzeye uygulanan basınç, (MPa)
PPCC	: Keski başına metreküp kazı miktarı, (m^3)
Q	: Barton-kaya kütle kalitesi sınıflandırması değeri
QTBM	: Barton-TBM için uyarlanmış Q sınıflandırması
r	: Kesici disk yarıçapı, (mm)
R	: Keski dönüş yarıçapı, (mm)
RME	: Kaya kütlesi kazılabilirlik indeksi
RMi	: Kaya kütle indeksi
RPM	: Kesici kafanın dönüş sayısı
s	: Diskler arası mesafe
SCR	: GSI sınıflandırma sisteminde süreksizlik yüzeyi koşulu puanı
SE	: Spesifik enerji, (kWh/m^3)
SF	: Keski konumuna göre belirlenen katsayı
T	: Kesici kafa torku, (Nm)
T	: Keski ucu kalınlığı, (mm)
w	: Disk kalınlığı, (mm)
Wn	: Su muhtevası
γ_b	: Zemin birim hacim ağırlığı, (m^3/kg)
γ_n	: Birim hacim ağırlığı, (m^3/kg)

θ : Kayaç sökülme açısı, (°)
$\sigma_{ç}$: Çekme dayanımı, (Mpa)
σ_{Sur} : Yeryüzü basıncı, (MPa)
σ_{T} : Ayna basıncı, (Mpa)
σ_{u} : Tek eksenli basınç dayanımı, (Mpa))
ϕ : Disk açısı, (°)
ϕ : İçsel sürtünme açısı, (°)
V : Keski hızı (rpm)

Kısaltmalar

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
BS : British Standarts (İngiliz Standartları)
CAI : Cerchar Abrasivity Index (Cerchar Aşındırıcılık Testi)
EPB : Earth Pressure Balance (Toprak Basınç Dengesi)
EPB-TBM : Pasa Basınçlı Tünel Açma Makinesi
GSI : Geological Stability Index (Jeolojik Dayanım İndisi)
İSU : İzmit Su ve Kanalizasyon İdaresi
NTNU : Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)
RMR : Rock Mass Rating (Kaya Kütle Derecesi)
RQD : Rock Quality Designation (Kaya Kalitesi Belirlenmesi)
TBM : Tunnel Boring Machine (Tünel Delme Makinası)
TSE : Türk Standartları Enstitüsü
USD : American Doları
YASS : Yeraltı Su Seviyesi

DARICA-BAYRAMOĞLU ATIKSU TÜNELİ MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ ÖZELLİKLERİNİN TÜNEL DELME MAKİNESİ (TBM) SEÇİMİNE ETKİSİ

ÖZET

Yerleşim alanlarındaki kanalizasyon ve atık suların arıtma tesislerine tünel türü yeraltı iletim hatları ile aktarılması günümüzde işletme, bakım ve onarım giderleri açsından en ekonomik seçeneklerdendir. Bu kapsamda Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, İzmit Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSU) Genel Müdürlüğü'nün Gebze güneyi, Eskihisar ve Darıca yerleşimleri kanalizasyon ve atık suyunun yapılacak tünelle Bayramoğlu kolektörüne aktarılması hem morfolojik yükselti hem de yerleşim yoğunluğu açısından öne çıkan en ekonomik yöntem olarak belirlenmiştir. Bu amaçla tespit edilen güzergâhın jeoloji ve mühendislik jeolojisi modeli, arazi ve sondaj çalışmaları ile belirlenerek jeolojik birimlerin yanal ve düşey değişimleri araştırılmıştır. Tüm sondaj verileri, arazi deneyleri ve sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarına göre tünel güzergâhının mühendislik jeolojisi modeli tanımlanmıştır. Tünel güzergâhı boyunca geçilecek jeolojik birimlerin kaya kütle sınıfı (RMR) değeri örtü birimler hariç Orta Kaya ve Zayıf Kaya, fay olarak belirlenen zonlar Çok Zayıf Kaya sınıfı olarak hesaplanmıştır. Güzergah boyunca geçilen birimlerin mekanik, fiziksel, petrografik, mineralojik özellikleri tüm ayrıntılarıyla saptanmıştır. Yine alınan numuneler üzerinde Cerchar aşındırıcılık deneyleri yaptırılarak birimlerin teknolojik özellikleri tanımlanmış TBM (Tünel Delme Makinası) seçimi, disk keski sarfiyatı ile kazı koşulları belirlenerek yaklaşık iş bitim süresi hesaplanmıştır. Saha da yapılan TBM çalışmalarına ait makine performans verileri değerlendirilmiş, imalat öncesi yapılan hesaplamalarla arazide yapılan çalışmaların tatil günleri, makine arızaları, döküm sahasında oluşan mevsimsel ve idari zaman kayıpları haricinde benzerlik gösterdiği tesbit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya Kütle Sınıflaması, TBM, Tünel Jeolojisi.

ENGINEERING GEOLOGICAL PROPERTIES OF DARICA-BAYRAMOĞLU WASTEWATER TUNNEL AND THEIR EFFECTS ON SELECTION OF TUNNEL BORING MACHINE (TBM)

ABSTRACT

Transportation of sewerage and wastewater in the residential areas to the treatment plants through tunnel type underground transmission lines is the most economical option in terms of operation, maintenance and repair costs. In this context, transportation of Izmit Water and Sewerage Administration (İSU) General Directorate of Kocaeli Metropolitan Municipality of Gebze, Eskihisar and Darica areas to sewer and waste water collector tunnel lines of Bayramoğlu has been determined as the most economical method in terms of both morphological elevation and population density.The geological and engineering geology model of the route determined for this purpose was investigated by lateral and vertical changes of geological units using field and drilling data. The engineering geology model of the tunnel route is defined according to the results of all the drilling data, field tests and laboratory tests on the samples taken from the drilling. Poor and fair rocks except for the cover units of the rock mass class (RMR) of the geological units to be passed along the tunnel route and the zones determined as fault are calculated as poor class. The mechanical, physical, petrographic and mineralogical characteristics of the units passing along the route have been determined in detail. Again Cerchar abrasion tests were carried out on the samples taken and the TBM (Tunnel Boring Machine) selection with the technological characteristics of the units was determined, the excavation conditions with disk cutterconsumption were determined and the project completion time was calculated. The machine performance data of the TBM studies conducted in the field were evaluated and it was determined that the work done in the field with the predictions made before the tunnel excavation showed similar except for holiday days, machine failures, seasonal and administrative time losses in the casting process.

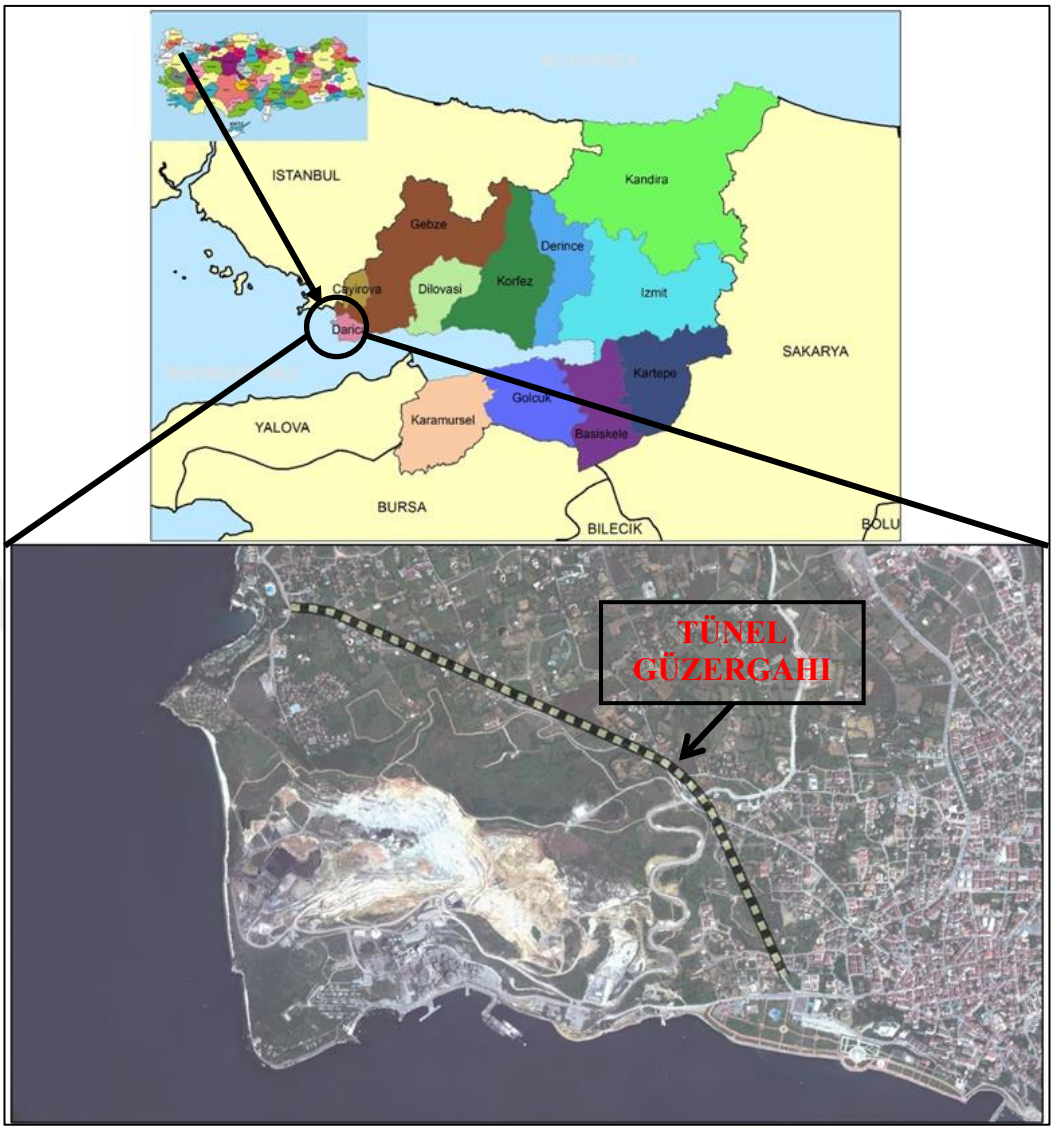
Keywords: Rock Mass Rating(RMR), TBM, Tunnel Geology.

GİRİŞ

Şehirleşmenin ve nüfus yoğunluğunun hızla arttığı kentlerde enerji, alt yapı ve ulaşım ağları zamanında planlanıp inşa edilmelidir. Yüksek teknoloji ürünü tünel açma makineleri bu ihtiyaçları karşıladığı için gelişimi ve kullanımı hızla artmış ve giderek de artmaktadır. Bu çalışmada, Gebze–Eskihisar/ Darıca–Bayramoğlu sahil atıksu kolektörü inşaatı Darıca–Bayramoğlu TBM metodu ile yapılacak tünel güzergâhının jeoloji ve mühendislik jeolojisi modeli, arazi ve sondaj çalışmaları ile belirlenerek jeolojik birimlerin yanal ve düşey değişimleri tespit edilmiştir. Tüm sondaj verileri, arazi deneyleri ve sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarına göre tünel güzergâhının mühendislik jeolojisi modeli tanımlanmış, tünel güzergâhı boyunca geçilecek jeolojik birimlerin kaya kütle sınıfı (RMR), mekanik ve fiziksel özellikleri ile petrografik ve mineralojik özellikleri saptanmıştır. Yine alınan numuneler üzerinde yapılan aşındırıcılık deneyleri sonuçlarına göre birimlerin teknolojik özellikleri tanımlanarak TBM (Tünel Delme Makinası) ile kazı koşulları belirlenmiş ve jeolojik ortamının ideale yakın mühendislik jeolojisi-jeoteknik modeli tanımlanmıştır. Mühendislik jeolojisi modeli ve jeoteknik koşullar dikkate alınarak kazı makinesi seçimi yapılmış, araziyi temsil eden yeterli bilgiler doğrultusunda ilerleme boyunca TBM dönüş hızı, bir dönüşteki optimum penetrasyon, uygulayacağı tork, itme kuvveti ve ayna basınç değerleri hesaplanmıştır. TBM yöntemiyle yapılan tünel kazısı sonrasında makine verileri alınmış ve öngörülen değerler ile ölçülen sonuçlar arasındaki performans durumu karşılaştırılmıştır.

1. İNCELEME ALANI KONUMU

Çalışma alanı; Kocaeli İli, Darıca İlçesi sınırları içinde Darıca Dudayev Parkı ile Bayramoğlu İş Bankası Sosyal Tesisleri arasında kalmaktadır. 1/25000 ölçekli topoğrafik haritanın G23a4 paftası kısmında yer almaktadır. Bölge, hafif engebeli bir topoğrafyaya sahip olup eğim genelde % 10-20 arasındadır, Darıca sahiline bakan yamaçlarda yer yer %30 ve üzeri eğime ulaşan yerler bulunmaktadır. Kıyı şeridi çok dar ve kumsalı oldukça azdır. Eskihisar Bölgesinde Kalealtı burnundan başlayarak Büyük Liman, Küçük Liman, Darıca Burnu, Yelkenkaya Burnu, Kale Burnu, Son Burun, Mağara Burnu, Bal Burunu, Bayramoğlu mevkii'ne kadar yaklaşık 15 km'lik kıyı şeridinde yer yer dik bir yarlar vardır. Bölgedeki en yüksek tepe Pavlı Tepe olup 136 metre yüksekliğindedir. Tünel güzergâhı en doğu uçta Dudayev parkı kuzey sınırında başlar güneydoğu- kuzeybatı doğrultulu güzergah Camii tepeden itibaren hafif bükümlü bir yay oluşturarak doğu-batı doğrultulu bir yönelim kazanır. Şekil 1.1'de çalışma alanını yer bulduru harita ve proje alanı görülmektedir. Yaklaşık 2500 metre uzunluğundaki tünelde taban kotu 5,60 ila 3,30 arasında değişmektedir. Örtü kalınlığı en fazla Camii tepe yükseliminde 95,00 metre dolayındadır.



Şekil 1.1. Çalışma alanını (Tünel güzergâhının) yer bulduru harita ve görüntüsü

2. JEOLOJİ VE TEKTONİK

2.1. Araştırma Alanı ile İlgili Çalışmalar

İnceleme alanı ve yakın dolayı İstanbul Paleozoyik istifinin doğu kesiminde yer alır. Bu kesimde Paleozoyik istif üzerinde Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı sedimenter birimler diskordans olarak izlenir. Yine yakın bölgede Paleozoyik istifi kesen Permiyen yaşlı magmatik sokulum kayaları ve Triyas, Üst Kretase-Eosen yaşlı volkanik birimler vardır. Tchihatcheff (1867), bölgedeki ilk çalışmaları yapan isim olmuştur. Tchihatcheff bölgedeki Paleozoyik-Mesozoyik dokanağı ile ilgili gözlemlerini aktarmış, Gebze'nin doğusundaki beyaz-grimsi beyaz kireçtaşlarının Üst Kretase yaşlı olduğunu söylemiştir. Paleozoyik istifinin en üst düzeyini oluşturan Trakya Formasyonu'nu Trakya serisi olarak isimlendirmiş ve Devoniyen yaşını vermiştir. Kuzeyde Karadeniz kıyı şeridinde yaygın olarak izlenen Üst Kretase yaşlı volkanik birimlerin sınırlarını haritalamış ve bu birimlerin tüf-volkanik akıntılar ile dolerit ve bazalt türü lavlardan oluştuğunu belirtmiştir. Daha sonraki yıllarda Penck (1919), Trakya serisini oluşturan fosilsiz şist ve grovaklarda bitki izlerine rastlamış ve bunları Üst Devoniyen fasiyesine dahil etmiştir. İzmit Körfezi kuzeyi ve güneyinin jeomorfolojik evrimini araştırmış ve bölgedeki yüksek kesimleri oluşturan kuvarsarenitlerin, bir diskordansla fosil kapsayan Devoniyen yaşlı grovak ve şistlerin üzerinde durduğunu öne sürmüştür. Paeckelmann (1925, 1938), İstanbul ve yakın dolayının ilk ayrıntılı jeoloji haritasını hazırlayan ilk araştırmacıdır. Araştırmacı, bölgedeki arkoz ve kuvarsarenitlerin stratigrafik olarak fosil kapsayan Devoniyen yaşlı grovak şistinin altında olduğunu, "grovak horizonu" diye isimlendirdiği birimin de Alt Devoniyen yaşında, Üst Devoniyen yaşını verdiği yumrulu kireçtaşları ve radiolarialı çörtlerin, stratigrafik olarak şeyl, grovak ve kireçtaşları ile yanal geçişli olduğunu öne sürmüştür. Bölgedeki kuvarsitleri 'Esas Kuvarsit Zonu' adı altında tanımlamış, Silüriyen yaşını vermiştir. İki birim arasındaki sınırın faylı olduğunu belirtmiştir. Baykal (1943), Adapazarı - Kandıra bölgesinde çalışmıştır. Triyas yaşını verdiği taban birimi "Ballıkaya Konglomerası" olarak adlandırmıştır. Erguvanlı (1949), Hereke dolayında hazırladığı doktora çalışmasında yakın bölgedeki

birimlerinin stratigrafik ilişkilerini tanımlamıştır Bu birimler içinden derlediği fosillerin tanımlamasını yapmış ve diğer bölgelerle ilişkilendirmiştir. Konglomera ve greler olarak incelediği birime daha sonra Taban konglomeraları adını vermiş ve birimin yaşını Verfaniyen olarak tespit etmiştir. Değirmenköy kireçtaşı adını verdiği birimi; marnlı, plaketli, dolomitik kalker olarak tanımlamış, Muallimköy kireçtaşını alt ve üst üyelere ayırmış, Kazmalı kireçtaşının yaşının Ladiniyen olduğunu belirtmiştir. Sancaktepe granitoyidi olarak adlandırdığı granitin, Üst Silüriyen'in arkoz, kuvarsit serisini kestiğini, bunların az da olsa kontak metamorfizmaya sebep olduğunu, yaşının Devoniyen' den daha genç olduğunu ifade etmiştir. Ketin (1959), Çamlıca'da yaptığı çalışmalar sonucunda, bölgedeki en yaşlı birimlerin arkozlar ve grovak-şistler olduğunu ve üzerine kuvarsitin geldiğini belirtmiş ve yaşını Üst Silüriyen'e dahil etmiştir. Abdüsselamoğlu (1963), İstanbul'un Anadolu yakasındaki Paleozoyik birimlere ait bazı stratigrafik ve paleontolojik yenilikler getirmiştir. Arkoz serisinde olduğu gibi, seri tanımlamasını büyük kaya birimleri için kullanmıştır. Kuvarsit, grovak ve feldspatik kuvarsitin Silüriyen yaşlı olduğunu, mercan fosilli kireçtaşlarının Silüriyen ve Devoniyen yaş aralığında olduğunu belirtmiştir. Grovak ve şistlerle temsil edilen Trakya Formasyonu'nun Karbonifer yaşında olduğunu söylemiştir. Akartuna (1963), İstanbul Boğazı'nın iki yanında incelemeler yaparak kuzeydeki Şile şariyajının varlığından bahsetmiş ve bu şariyajın Boğaz'ın batı yakasındaki devamını araştırmıştır. Bu şariyaj için Paleosen-Eosen yaş aralığını vermiştir. "Şile şariyajının İstanbul boğazının kuzey yakalarında devamı" adlı makalesinde Sarıyer ve civarında daha önce Chaput (1936) tarafından araştırılan bindirmenin varlığını tekrar tespit etmiş, Sarıyer'in kuzeybatısında Teknecidere'de yer alan Paleozoik birimlerinin bir tektonik etken sonucu bölgede bulunduklarını ileri sürmüştür. Baykal ve Kaya (1965), İstanbul bölgesindeki Ordovisiyen ve Silüriyen yaşlı çökeller üzerinde ayrıntılı stratigrafik incelemelerde bulunarak bu zamanlara ait çökellerin stratigrafik istifinin düşey ve yatay ilişkilerini tanımlamıştır. Haas (1968), İstanbul'un doğu kesimlerindeki Gebze ve Tuzla taraflarında ayrıntılı paleontolojik ve stratigrafik çalışmalar yürütmüştür. Kırıntılı birimleri Kurtköy tabakaları olarak isimlendirmiş ve Alt Ordovisiyen yaş konağına dahil etmiştir. Kuvarsarenitlerden oluşan birime Ayazma tabakaları adını vermiş ve yaşını Ordovisiyen-Silüriyen olarak kabul etmiştir. Akviran serisi adı altında incelediği ve stratigrafik olarak alttan üste doğru; Tavşantepe, Bağlarbaşı, Cumaköy, Çakıllıdere, Pelitli ve Kireçhane tabakaları

olarak ayırdığı çökellere içlerinde bulduğu fosiller yardımıyla Venlokiyen yaşını uygun görmüştür. Sayar (1962, 1979), İstanbul ve Kocaeli Yarımadası' nın birçok yerinde gözlemlenen Alt Paleozoyik yaşlı birimlerde ayrıntılı paleontolojik çalışmalar yapmıştır. Ordovisiyen-Silüriyen sınırının Gözdağ Formasyonundan geçtiğini ifade etmiştir. Haliç- Küçükçekmece gölü bölgesinin jeolojisini konu alan doktora çalışmasında, Eosen birimlerini Orta ve Üst olarak ayırt etmiş, Neojen birimlerine ise Üst Miyosen (Sarmasiyen) yaşını vermiştir. Neojen birimlerinin en ayrıntılı incelendiği kabul edilen bu çalışmada; bu birimler alttan üste doğru gre ve Konjeryalı kireçtaşları, kemikli kum ve çakıllar, kil ve marnlar ve Mactralı kireçtaşları (Bakırköy Kireçtaşı) olarak ayırt edilmiştir. Kaya (1971), İstanbul Boğazı'nın batı yakasındaki çalışmasında İstanbul'un Karbonifer stratigrafisine ait ayrıntılı değerlendirmelerde bulunmuş, Trakya Formasyonu'nun kalın şeyl, grovak ve litik konglomera istifinden oluştuğunu, bunun genel olarak fliş fasiyesinde meydana geldiğini belirtmiş ve formasyonu alttan üste doğru Acıbadem, Küçükköy ve Çamurhan olmak üzere üç üyeye ayırmıştır. Önalan (1982), Şile, Pendik ve Adaları kapsayan doktora çalışmasında Paleozoyik yaşlı birimler arasında herhangi bir uyumsuzluğun olmadığını, bütün bu birimlerin birbiriyle yanal ve düşey geçişler sunduğunu söyleyen ilk çalışmacıdır. Birimlerin transgresif bir seri oluşturduğunu belirtmiştir. Aynı araştırmacı 1987-1988 yıllarında İstanbul dolaylarında Devoniyen yaşlı çökellerin sedimanter özellikleriyle ilgili makalesinde, İstanbul bölgesinde Ordovisiyen'den Karbonifer içlerine kadar uzanan bir Paleozoik istif içerisinde bir diskordansın bulunmadığını açıklamıştır. Meriç ve diğ. (1991), İstanbul Kadıköy İlçesinde Kuşdili Çayırı mevkiinde (Kurbağalıdere) bulunan alüvyal çökeller ile ilgili yapmış olduğu paleontolojik çalışmasında, buradaki genç çökelleri içerdiği fosillere göre yaşlandırmış ve bu çökellerin (925.000 yıl) Holosen dönemine kadar çökelim gösterdiklerini saptamış ve bu çökelleri Kuşdili Formasyonu olarak adlandırmıştır.

2.2. Genel Jeoloji

İnceleme alanı Kocaeli Yarımadası yükseliminde yer alır. Kocaeli Yarımadası yükseliminde temel kayalar, Paleozoik yaşlı kumtaşı-kireçtaşı ardalanmasından oluşur. İstanbul Paleozoik serisi olarak da tanımlanan bu ardalanma İzmit kuzeyinden başlayarak batıya doğru daha geniş alanlarda yüzeylenir. İstif tabanda Ordivisyen yaşlı arkoz ve konglomera düzeylerinden oluşur. Bu litoloji üzerinde

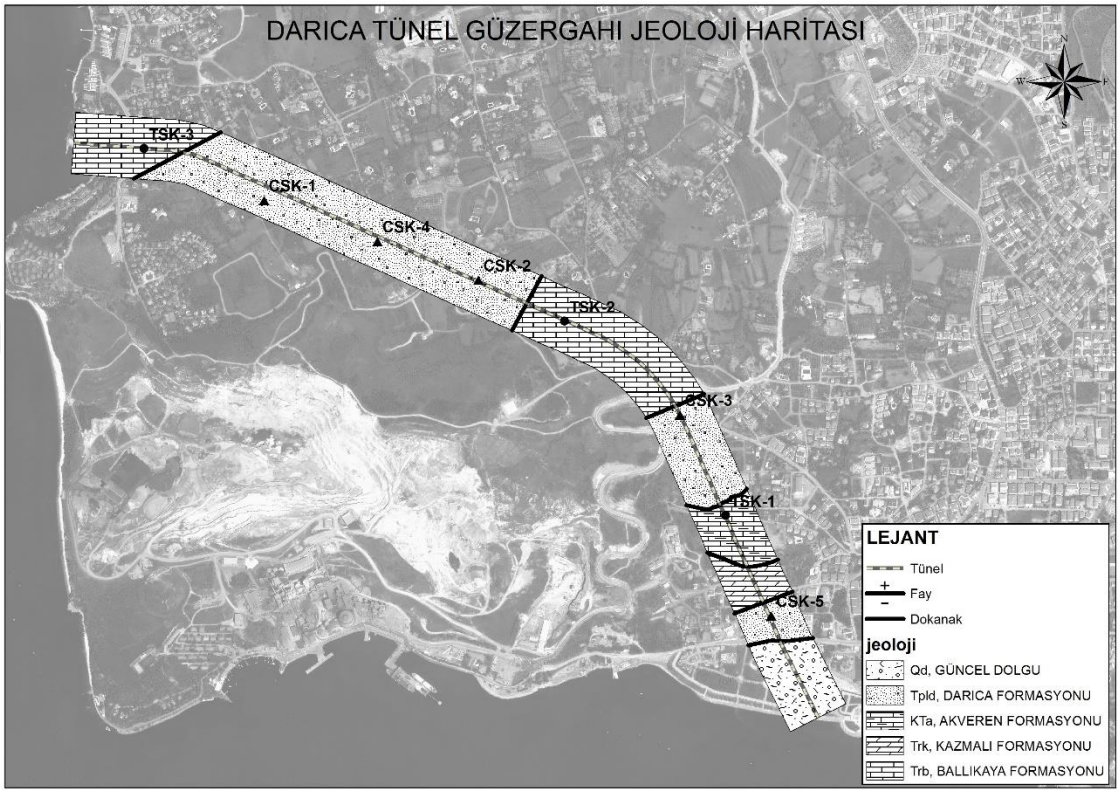
batıda Aydos, Kayış dağı ve Çamlıca tepeleri, doğuda ise Çatal dağ ve Çene dağ yükselimlerinde izlenen kuvars arenitler vardır. Silüriyen, Devoniyen ve Karbonifer'e kadar devam eden zaman aralığında çökelen kumtaşı, kireçtaşı ardalanması ve çört ara katkıları Paleozoik istifin litolojik dizilimini oluşturur. Paleozoik istifi üzerinde, konglomera düzeyi ile başlayan ve daha ince kırıntılılarla devam eden Triyas çökelleri uyumsuz olarak yer alır. Triyas çökelleri üstte doğru kiltaşı, kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve marn düzeylerine geçer. Kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı litolojilerinden oluşan bu düzeyler Ballıkayalar kanyonu, Hereke ve Dilovası yerleşim alanlarının kuzey kesimi ile güneyde Darıca, Eskihisar ve Muallimköy dolaylarında yaygın olarak izlenir. Triyas istifinin alt düzeylerini kesen andezit daykları vardır. Bölgede Jura çökelleri yoktur. Triyas çökelleri üzerinde, Üst Kretase yaşlı kireçtaşı ve diğer karbonatlı kayalardan oluşan birimler uyumsuz olarak izlenir. Hereke, Yarımca kuzeyinde yüzeylenen Üst Kretase kireçtaşı, kiltaşı ve marn ara katkılarıyla Paleosen'e geçer. Kiltaşı, marn, kireçtaşı ve kumtaşı ardalanmasından oluşan ve yer yer volkanik ara katkılı Üst Kretase-Paleosen istifi İzmit kuzey ve kuzey doğusunda geniş yayılımlar sunar.

Kuzeyde Kandıra dolayında Eosen'e ait resifal kireçtaşları ve bunları kesen volkanik sokulumlar vardır. Tüm Bu birimler üzerinde topoğrafik çukurluklarda genç çökeller ve vadi tabanında Kuvaterner çökeller vardır.

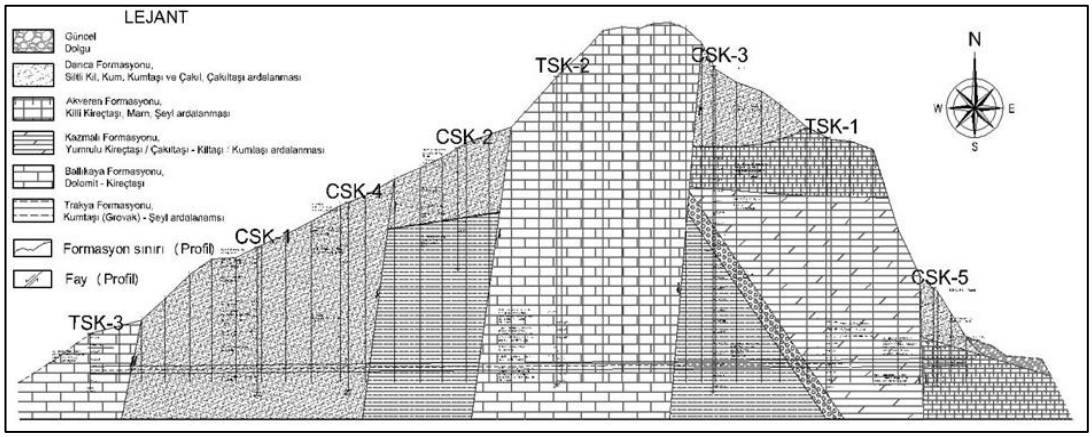
2.3. İnceleme Alanının Jeolojisi

İnceleme alanında Paleozoyik istifinin en üst düzeyini oluşturan Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu, Triyas istifinin karbonatlı düzeylerinin temsil edildiği Ballıkaya formasyonu, Triyas yaşlı konglomera, kumtaşı ve kiltaşı/şeyl litolojilerinden oluşan Kazmalı formasyonu, Üst Kretase yaşlı killi kireçtaşı ve marn ardalanmasından oluşan Akveren formasyonu ile bu birimler üzerinde diskordan olarak izlenen genelde tutturulmamış ve/veya gevşek tutturulmuş kırıntılılardan oluşan Pliyosen yaşlı Darıca formasyonu vardır. Tüm bu birimlerin genel jeoloji haritası Şekil 2.1'de, tünel güzergahının jeolojik kesiti Şekil 2.2'de sunulmuştur. Aşağıdaki bölümlerde birimlerin jeolojik özellikleri arazi gözlemleri ve sondaj verileri dikkate alınarak ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Ayrıca Tünel güzergâhındaki birimlerin mineralojik bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla kayaç karot numunelerinden XRD analizi ve

petrografik ince kesit tanımlaması İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Laboratuvarlarında İSU Genel Müdürlüğü adına yaptırılmıştır. Örneklerin XRD kayıtları ve ince kesit mineralojik–petrografik tanımlamaları ilgili formasyonlar altında bahsedilmiştir.



Şekil 2.1. Tünel güzergahı jeoloji haritası



Şekil 2.2. Tünel Güzergahı Jeolojik Kesiti (Düşey ölçek abartılmıştır)

2.3.1. Trakya formasyonu (Ct)

Birim genelde yeşilimsi gri, yersel olarak pembe renkli, ince-orta tabakalı, kumtaşı ve şeyl ardalanmasından oluşur. Türbidit özellikli olan birimde, laminalanma da gözlenir. Birimin alt düzeyleri gri renkli, ince-orta tabakalı kireçtaşı-ince tabakalı şeyl ardalanması biçimindedir. Yer yer çört bantlı olan kireçtaşları bitki kırıntısı da içerir. Formasyon, üste doğru kumtaşı ağırlıklı kumtaşı-şeyl ardalanmasına geçer. Grovak niteliğindeki kumtaşlarında kum, şeyllerde de silt boyutunda oldukça yoğun olarak gözlenen mika pulları, kumtaşlarına karakteristik bir özellik kazandırır.

İnceleme alanının güney batısında sınırlı alanlarda mostrası izlenir. Şekil 2.3'de Trakya Formasyonunun Grovak-Şeyl Ardalanmasının görünümü bulunmaktadır. Bu kesimde ince-orta tabakalı, grovak-şeyl ardalanmasından oluşur. Atmosferik koşullar etkisiyle ayrışmış, yer yer 2,00 metre kalınlığa ulaşan rezidüel toprak tabakası ile örtülmüştür. Renk yüzeyde yine ayrışma ve atmosferik koşullar etkisiyle sarımsı kahverengidir. Birimin genel niteliğine koşut olarak eklemli ve kırıklı yapısı belirgindir. Şeyl düzeyleri oransal olarak daha ince tabakalı ve yer yer laminalıdır.

Sondajlarda genelde gri renkli şeyl düzeyleri kesilmiştir. CSK-2 nolu sondajda tünel kotu üzerindeki seviyeleri çok ayrışmış, şeyl-çamurtaşı niteliğindedir. CSK-3 nolu sondajda tünel eksenini de içine alan 51,00 ile 90,00 metreler arasında Trakya formasyonun karbonatlı şeyl-kumtaşı (grovak) ardalanması kesilmiştir. Bu zon, ince-orta tabakalı 30-35 derece eğimli, genelde 50 cm aralı ve 60-80 cm eğimli kırıklı, yer yer yaklaşık 20 cm kalınlığında kil (ayrışmış çamurtaşı) ara düzeyli niteliklere sahiptir. Birim, altta Baltalimanı Formasyonu ile geçişlidir. Üsttü aşınmalı olup, Permo-Triyas ve Triyas yaşlı ve daha genç birimler tarafından uyumsuz olarak üzerlenir. Proje alanında daha genç Pliyosen yaşlı Darıca formasyonu birimi yine uyumsuz olarak üzerlemiştir. CSK-3 nolu sondajda normal stratigrafik istif izlenir. Trakya formasyonun üzerinde Triyas yaşlı Kazmalı formasyonuna ait konglomera ve kumtaşı düzeyleri kesilmiştir.



Şekil 2.3. Trakya formasyonunun grovak-şeyl ardalanmasının görünümü

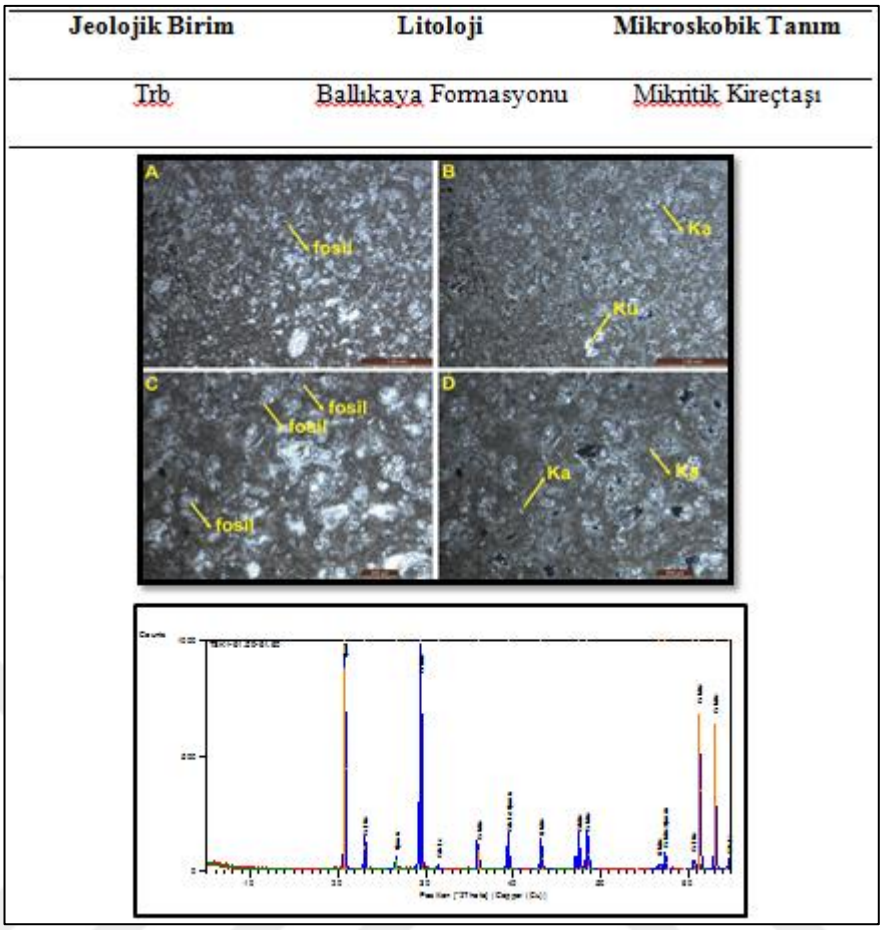
2.3.2. Ballıkaya Formasyonu (TRb)

Formasyon genelde beyazımsı gri, yersel olarak pembe-kırmızı renkli, ince-kalın tabakalı dolomit, dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşlarından oluşur. Nadiren koyu kırmızı renkli çamurtaşı ve/veya şeyl ara tabakaları içeren birimin kırmızı-pembe renkli kesimleri ammonitico-rosso fasiyesini andırır özelliktedir. İyi kristalize olmuş, sert ve tıkız dokuludur. Tabakalanma kalın veya masif görünümlüdür. Dolomitleşme süreci tabakalamayı çoğunlukla belirsizleşmiştir. Egemen litoloji olan dolomit ve dolomitik kireçtaşı düzeylerinin sert ve kırılgan olması birim içinde yaygın çatlak ve kırık türü süreksizliklerin gelişmesine neden olmuştur. Bu süreksizlikler boyunca karstlaşma gelişmiş ve yerel küçük karst boşlukları oluşmuştur. Yaygın bir karst ağı oluşturmayan bu boşlular genellikle ayrışma ürünü olan malzeme ile doldurulmuştur. Şekil 2.4'de Ballıkaya Formasyonunun Dolomitik Kireçtaşı Düzeylerinin görünümü bulunmaktadır. Birim içinde gelişen fay zonları yine yerel ve sınırlı uzunluk ve genişliklerde kırmızımsı kahverengi breşik bir yapı sunar. İnceleme alanında güzergahın batı kesiminde Yelkenkaya burnunun kuzeyinde ve güzergahın orta kesiminde Darıca yükseliminde (Camii Tepe 106 m) mostra verir. Mostralarda gri, kırmızımsı gri, sert, dayanımlı, dolomitik kireçtaşı düzeyleri ana

litolojiyi oluşturur. Süreksizlikler özellikle Cami tepe dolayındaki kazı yarmalarında belirgin olarak izlenir. TSK-3 nolu sondaj tümüyle bu birim içerisinde ilerlemiştir. Tünel eksenini de içine alan bu kesimde birim açık gri, beyazımsı kireçtaşı olarak tanımlanmıştır. TSK-2 nolu sondajda da tünel ekseninin kat ettiği zonda birim yine benzer litolojik özellikler sunmaktadır. Bu kesimde süreksizlikler boyunca gelişmiş karstik boşluklar ve bu boşluklardaki kırmızı kil dolgular özellikle tünel ekseni boyunca yaygındır. Batı uçta başlangıçtan itibaren Km: 2+510/2+394 arasında ve orta kesimde Km:1+300/0+760 arasında tünel kazısı bu birim içinde yapılacaktır. Birim tünel ekseni boyunca batıda Darıca formasyonu, orta kesimde ise Trakya formasyonu ile tektonik dokanaklıdır. Altta Permo Triyas ve Triyas yaşlı karbonatlı veya kırıntılı birimlerle dereceli geçişli olan birim üstte ise genelde daha genç birimleri ile tektonik ilişkilidir. Kısıtlı alanlarda daha üstteki Triyas yaşlı karbonatlı ve kırıntılı birimlerle dereceli geçişleri izlenir. Tipik bir karbonat platformu olan birim Alt-Orta Triyas yaşındadır. XRD kayıtları ve ince kesit mineralojik – petrografik tanımlamalara göre Ballıkaya Formasyonuna ait Mikritik Kireçtaşı Şekil 2.5'de, Dolataşı Şekil 2.6'da, Dolomatik Kireçtaşı Şekil 2.7'de görülmektedir.

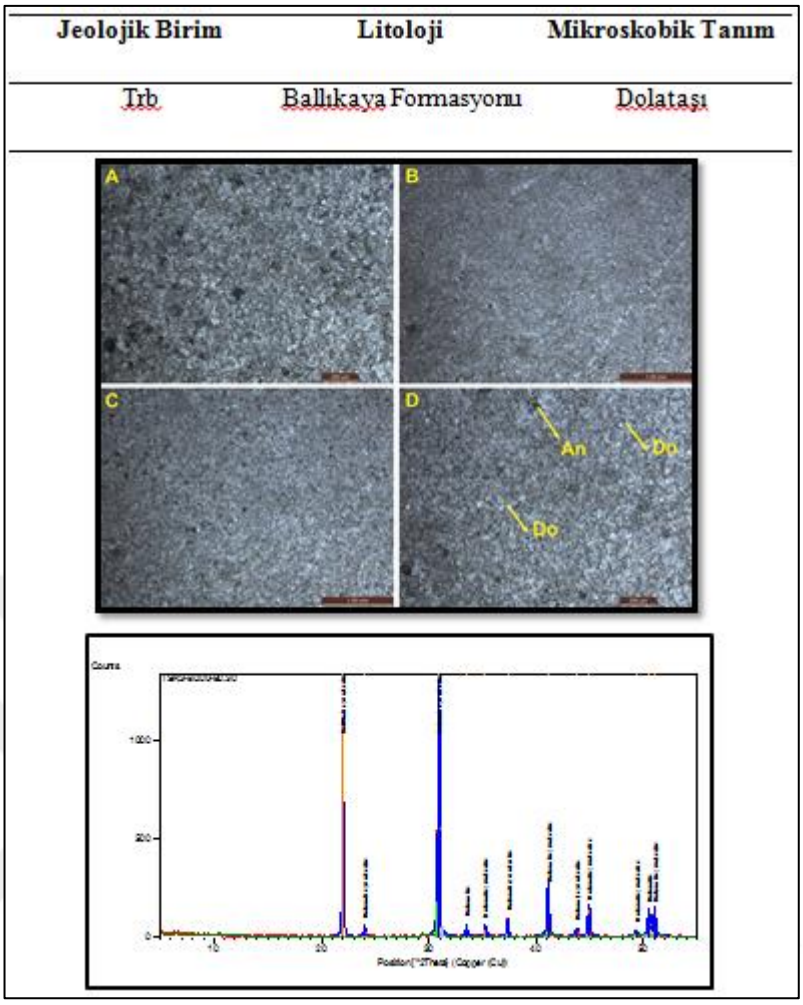


Şekil 2.4. Ballıkaya formasyonunun dolomitik kireçtaşı düzeylerinin görünümü



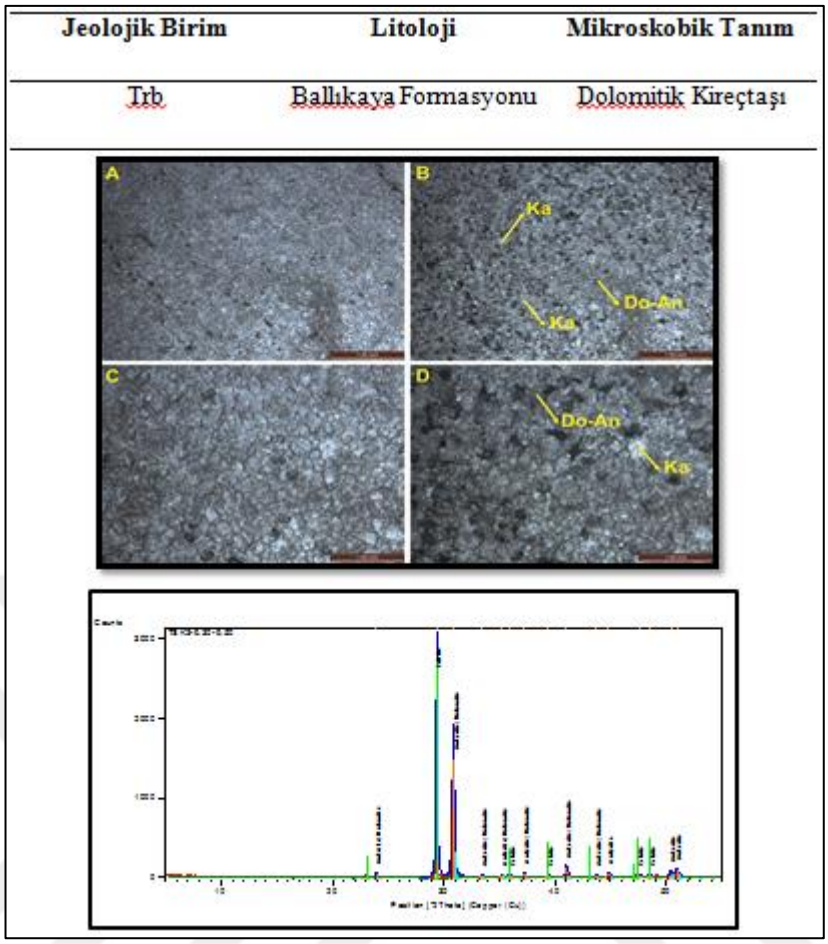
Şekil 2.5. TSK-1/K/61.50-61.60 numunesine ait ince kesit görüntüleri ve XRD kaydı

(A-B) Mikritik kireçtaşı ve içerdiği fosillerin genel görünümü (A Tek nikol, B Çift nikol). C-D) Mikritik kireçtaşı içerisinde kalsit mineralleri (Ka) yakın plan görünümü (C Tek nikol, D çift nikol).



Şekil 2.6. TSK-2/K/80.00-80.30 numunesine ait ince kesit görüntüleri ve XRD kaydı

(A-B) Dolotaşı genel görünüm (A Tek nikol, B Çift nikol). C-D) Dolotaşı içerisinde dolomitler (D_o) ve ankerit mineralleri (A_n) yakın plan görünümü (C Tek nikol, D çift nikol).



Şekil 2.7. TSK-3/K/9.30-9.50 numunesine ait ince kesit görüntüleri ve XRD Kaydı

(A-B) Dolomitik kireçtaşı genel görünüm (A Tek nikol, B Çift nikol). C-D) Dolomitik kireçtaşı içerisinde kalsit (K_a), dolomitler (D_o) ve ankerit mineralleri (An) yakın plan görünümü (C Tek nikol, D çift nikol).

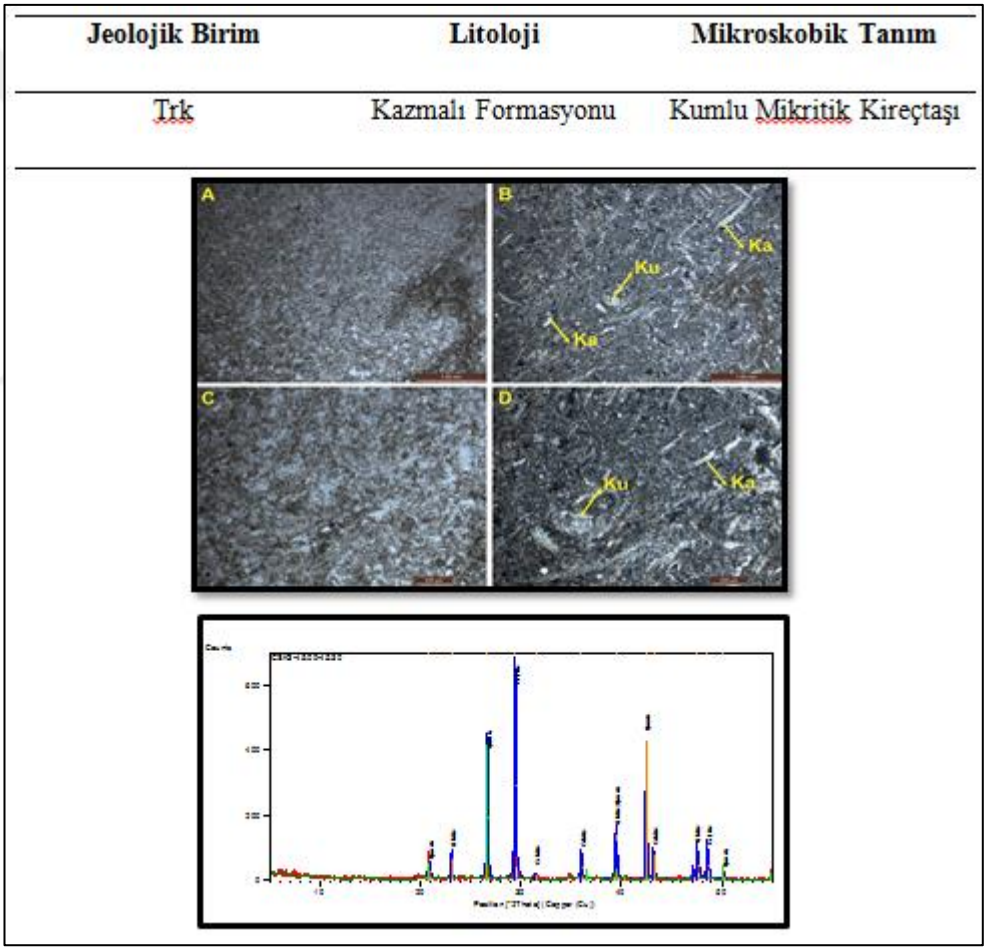
2.3.3. Kazmalı Formasyonu (TRk)

Birim genel olarak gri-koyu gri renkli, ince-orta tabakalı, yumrulu, mikritik-killi kireçtaşı ve yeşilimsi gri renkli, kumtaşı-marn-kiltaşı ardalanmasından oluşur. Birim alt düzeylerde gri-koyu gri renkli, yumrulu, mikritik kireçtaşı-kiltaşı ardalanmasından, orta kesimde açık gri renkli, yumrulu kireçtaşı ve pembemsi gri renkli, marn-şeyl ardalanmasından, üst kesimlerde tekrar gri renkle, yumrulu kireçtaşı-marn ardalanmasından oluşur.

CSK-3 nolu sondajda 34,00 ile 51,00 metre arasında birimin kırıntılı ve karbonatlı düzeyleri kesilmiştir. TSK-1 nolu sondajda birimin kumtaşı-kiltaşı ardalanması

düzeyleri kesilmiştir. CSK-3 nolu sondajda birim içerisinde kalınlığı 0,70 metreye ulaşan andezit filonları vardır. Bu düzey tünel kazı kotunun üzerindedir. TSK-1 nolu sondajda ise tünel kazı zonunda yer yer kalınlığı 0,50 metreye ulaşan kil ara düzeyleri ve kil dolgulu süreksizlikler kesilmiştir.

Birimin kalınlığı değişken olup, bölgede 10-400 metre arasında değişmektedir. Birimin yaşı fosil bulgularına göre önceki araştırmacılar tarafından Orta Triyas olarak benimsenmiştir. XRD kayıtları ve ince kesit mineralojik – petrografik tanımlamalarına göre Kazmalı Formasyonu Kumlu Mikritik Kireçtaşı olarak Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8. CSK-3/K/45.00-45.30 numunesine ait ince kesit görüntüleri ve XRD kaydı

(A-B) Kumlu mikritik kireçtaşı görünüm (A Tek nikol, B Çift nikol). C-D) Kumlu mikritik kireçtaşı içerisinde kuvarslı kırıntılar (K_u) ve kalsit mineralleri (K_a) yakın plan görünümü (C Tek nikol, D çift nikol).

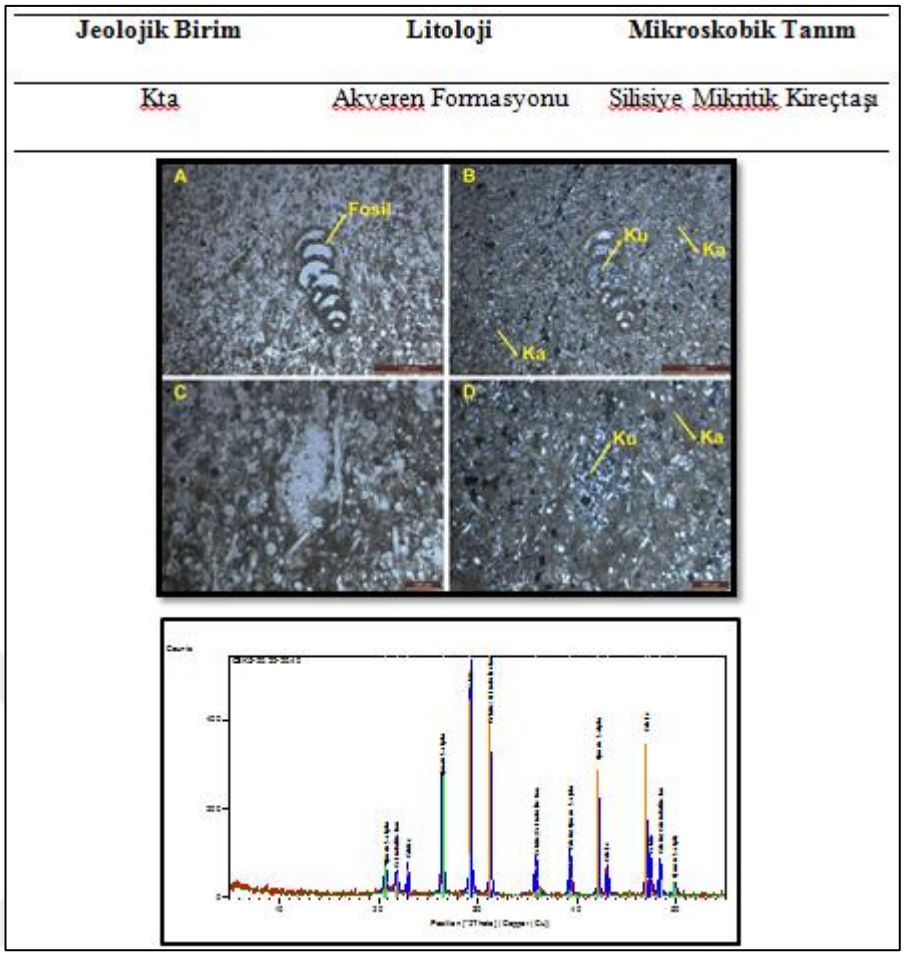
2.3.4. Akveren Formasyonu (KTa)

Akveren formasyonu beyaz, bej ve pembe renkli, ince-orta tabakalı, mikritik ve killi kireçtaşı, kalkarenit, marn ve yeşilimsi gri-yeşil renkli şeyllerden oluşur. Bazı lokasyonlarda tümüyle beyaz, gri, bej ve pembe renkli, ince tabakalı, porselenimsi görünümlü, killi, mikritik kireçtaşı; bazı istiflerde kireçtaşı-marn ve tüirbiditik kireçtaşı ardalanması biçimindedir. Alt seviyelerinde mercekler halinde yer yer kireçtaşı aratabakalı şeyl ve marn tabakaları vardır.

Proje alanında Darıca kıyı şeridinin ilk seki düzlüğünde, Aslan Çimento sahasında mostra verir. Şekil 2.9'da Akveren Formasyonunun Killi Kireçtaşı Düzeylerinin Görünümü bulunmaktadır. CSK-5 nolu sondajda tünel kazı zonunda bu birim kesilmiştir. Bu kesimde ve güzergahtaki mostralarında egemen litoloji killi kireçtaşı-kireçtaşı ardalanmasıdır. XRD kayıtları ve ince kesit mineralojik – petrografik tanımlamalarına göre Akveren Formasyonuna ait Silisiye Mikritik Kireçtaşı Şekil 2.10'da, görülmektedir.



Şekil 2.9. Akveren formasyonunun killi kireçtaşı düzeylerinin görünümü



Şekil 2.10. CSK-5/K/20.20-20.40 numunesine ait ince kesit görüntüleri ve XRD kaydı

(A-B) Silisifiye mikritik kireçtaşı ve içerdiği fosil kavkısından genel bir görünüm (A Tek nikol, B Çift nikol). C-D) Silisifiye mikritik kireçtaşı içerisinde kuvarslar (K_u) ve kalsit mineralleri (K_a) yakın plan görünümü (C Tek nikol, D çift nikol).

2.3.5. Darıca formasyonu (T_{pld})

Şeyl, killi kireçtaşı kırıntıları ve kil-silt matriksinden oluşan yer yer bloklu yelpaze çökelleri Darıca formasyonu olarak ayırt edilmiştir. Genelde Darıca bölgesinde mostra verir. Birim, genellikle yassı şekilli şeyl ve kireçtaşı kökenli çakıl boyutundaki kırıntılılardan oluşur. Kırıntı dizilimleri binik yapılı olup belirli bir çizgisellik takip eder. Bazı kesimlerde belli-belirsiz tabakalanma sunar. Şekil 2.11'da Darıca Formasyonunun Çakıllı Kil Düzeylerinin Görünümü bulunmaktadır. Tutturucu çoğunlukla silt ve kildir. Birimde Ballıkaya ve Akveren formasyonlarına ait kireçtaşı kökenli, çakıl ve blokları gözlenir.

CSK-1 ve CSK-4 nolu sondajlarında tümüyle bu birim içerisinde, CSK-2 nolu sondajda ise ilk 19,50 metre, CSK-3 nolu sondajda ilk 22,30 metre, CSK-5 nolu sondajda ise ilk 13,00 metre bu birimde ilerlenmiştir. CSK-1 ve CSK-4 nolu sondajlarda tünel kazı kesitinde bu birim vardır. Bu kesimde birim genelde kil-silt boyutundaki ince kırıntılılardan oluşur. Çakıl seyrek, genelde köşeli ve şeyl kökenlidir. Sondajlarda yer yer kalınlığı 0,50 metreye ulaşan çakıl bantları veya mercekleri kesilmiştir.

Birim daha yaşlı birimler üzerinde açısal uyumsuz olarak izlenir. Batı kesimde Kartal formasyonu üzerindedir. Diskordans düzlemi tünel eksenini yaklaşık Km: 1+675 dolayındadır. Birim benzer litolojilerle yapılan korelasyona göre Pliyosen olarak yaşlandırılmaktadır. Formasyonun kalınlığı 50 m dolayında tahmin edilmektedir.



Şekil 2.11. Darıca formasyonunun çakıllı kil düzeylerinin görünümü

2.3.6. Dolgu (Qd)

Proje alanında dolgular genelde kontrolsüz atıklar niteliğindedir. Yelkenkaya Tepe civarındaki olanlar Çimento Fabrikası hammadde taş ocaklarından çıkan hafriyat malzemesinin yığıldığı alanlardır. Çoğunlukla iri blok boyutundaki kaya parçalarından oluşur. Darıca sahili dolayındaki dolgular ise Belediye tarafından Dudayev parkına imar kazanmak amacıyla yapılmış iri blok boyutundan kil boyutuna

kadar tane boyu değişimi gösteren birimlerden oluşmaktadır kalınlıkları en fazla 10 metre dolayındadır.

2.4. Yapısal Jeoloji

İnceleme alanında Paleozoyik ve Senozoyik yaşlı birimler Hersiniyen ve Alpin Orojenezleri etkisiyle kıvrımlı ve kırıklı bir yapı kazanmıştır. Ayrıca kuzey Anadolu Fay zonunun aktivitesine bağlı olarak gelişen yapısal unsurlar da bölgenin morfotektonik konumunu kontrol etmektedir.

Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu bu orojenik hareketlerin denetiminde genelde kıvrımlı bir yapı kazanmış ve çoğunlukla birimde düşey ve düşeye yakın eklem takımları gelişmiştir. Tabakalamanın ince olduğu şeyl-çamurtaşı düzeylerinde ise kalem klivajı şeklindeki dilinim yapıları yaygındır. Proje alanında birimin genel eğimi 30-40 derece güneydoğuyadır. 80 ve 85 derece eğimli birbirine dik eklem düzlemleri kısıtlı alanlarda izlenebilen mostralarında belirgindir. Kıvrımlı yapı veya hafif metamorfizmaya bağlı gelişen foalisyon düzlemleri karot numunelerde yer yer izlenir.

Triyas'a ait kırıntılı ve karbonatlı birimler Trakya Formasyonu üzerinde diskordan olarak izlenir. Bu diskordans düzlemi tünel güzergahının Km: 0+530 ile Km: 0+500 dolayındadır. Diskordans yüzeyine paralel olarak Triyas birimleri Kuzey-Kuzeydoğu eğimlidir. Tabaka düzlemlerinin eğimi 25° ile 30° dolayındadır. Özellikle karbonatlı düzeylerde gelişen düşey ve düşeye yakın süreksizlikler boyunca karstlaşma ve karstlaşmaya bağlı olarak karstik erime boşlukları gelişmiştir. Kretase yaşlı Akveren Formasyonu genelde ince-orta-kalın tabakalı seyrek süreksizlik düzlemleri içerir. Bu birimde de yine karbonat düzeylerinin arttığı kesimlerde süreksizlik düzlemlerinin kontrolünde sınırlı ve yerel karstik erime boşlukları oluşmuştur.

Pliyosen'e ait Darıca Formasyonu genelde yatay/yataya yakın eğimli ve üzerine çökeldiği paleotopoğrafyanın geometrisine bağlı bir yapı kazanmıştır. Tabakalanma belirgin değildir. Ancak tanelerin yönelimi ve dizilimi tabaka düzlemleri veya çökelmenin konumunu işaret eder. Şekil 2.12'de Darıca Formasyonda Tabakalanmaya Paralel Tanelerin Dizilimi ve Darıca Sahiline Bakan Fay Şevinin Görünümü



Şekil 2.12. Darıca formasyonda tabakalanmaya paralel tanelerin dizilimi ve Darıca sahiline bakan fay şevinin görünümü

Tünel güzergâhı boyunca 4 farklı kesimde jeolojik birimler arasındaki dokanaklar tektonik olarak tanımlanmıştır. Km:2+394/2+384 arasında Ballıkaya Formasyonu, Km:+0+760/0+750 arasında Ballıkaya Formasyonu ile Trakya Formasyonu ve Km:0+130/0+115 arasında Kazmalı Formasyonu ile Akveren Formasyonu arasındaki dokanaklar faylıdır. Bu tektonik dokanaklardan sadece Kazmalı Formasyonu ile Akveren Formasyonu arasındaki faylı yapı yüzeyde izlenir. Darıca sahiline bakan yükselti önündeki ani kesiklik bu fayın morfolojideki izidir. Diğer süreksizlikler genelde Darıca Formasyonu ve/veya güncel birimler tarafından örtülmüştür. Ancak Ballıkaya Formasyonu ile Trakya Formasyonu arasında her iki taraftaki faylı yapının izi kısmen de olsa morfolojide izlenir.

Tünel güzergâhında fay zonlarının birimlerinin mühendislik özelliklerinin etkilenme genişliği yaklaşık 10 metre olarak öngörülmüştür. Faylanma genelde düşey ve düşeye yakındır. Sadece Kazmalı Formasyonu ile Akveren Formasyonu arasındaki fay düzleminin eğimi yaklaşık 85°G'dir. Eğime ve fayın konumuna bağlı olarak bu kısımda etkilenme sınırı yaklaşık 15 metre olarak öngörülmüştür. Fay düzlemlerinde ezik zon Milonit veya Kil dolgulu olmalıdır.

2.5. Mühendislik Jeolojisi

Yaklaşık 2500 metre uzunluğundaki atıksu tünelindeki jeolojik birimlerin mühendislik jeolojisi özellikleri, arazi ve laboratuvar deneyi ölçüm ve gözlemleriyle tanımlanmıştır. Bu amaçla tünel güzergahı boyunca farklı noktalarda 8 adet sondaj çalışması yapılmıştır. Sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen tüm veri ve bu bilgiler doğrultusunda tünel güzergâhı boyunca geçilecek jeolojik birimlerin, kaya sınıfı ve jeoteknik tasarım parametreleri belirlenmiştir.

2.5.1. Sondaj araştırmaları ve arazi deneyleri

Proje kapsamında İSU Genel Müdürlüğü tarafından 3 noktada sondaj çalışması yapılmıştır. Sondajlarda sadece tünel eksenini içine alan yaklaşık 10 metrelik zonda karotlu ilerleme, üst düzeylerde ise karotsuz ilerleme yapılmıştır. İlk aşama çalışmalara ait bu sondajların tanımlanmasında TSK simgesi kullanılmıştır. Daha sonraki aşamada 5 farklı noktada derinlikleri 25-90 metre arasında değişen toplam 233,00 metre ek sondaj yapılmıştır. Bu ikinci aşamada yapılan sondajlar ise CSK simgesiyle tanımlanmıştır. Sondajlarda projede belirtilen tünel taban kotunun en az 5,00 metre daha alt kotuna kadar ilerleme yapılmış, sadece CSK-2 sondajı çevre koşulları dikkate alınarak tünel eksen kotunun üzerinde sonlandırılmak zorunda kalınmıştır. Numune alma ve değerlendirmede TSE 1901 ve BS 5930 standartlarına bağlı kalınmıştır. Kaya ortamında çift tüplü T2 - 76 mm karotiyer kullanılarak karot alınmış, her manevradaki toplam karot yüzdesi (TCR), Solid karot yüzdesi (SCR) ve kaya kalitesi oranı (RQD) değerleri hesaplanarak sondaj loglarına kaydedilmiştir. Sondaj çalışma sırasında tüm örneklerin özellikleri ayrıntılı olarak tanımlanmış zemin-kaya mekaniği laboratuvarındaki deneyler için uygun numuneler seçilmiştir. Yapılan sondaj lokasyon haritası Şekil 2.13'de verilmiştir.



Şekil 2.13. Tünel güzergah sondaj lokasyon haritası

İnceleme alanındaki sondajların numaraları, derinlikleri ve koordinatları ve ölçülen yeraltısu seviyeleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Ayrıca Tünel Güzergah Sondaj arazi çalışmaları Şekil 2.14'de görülmektedir.

Tablo 2.1. Sondajların koordinat, derinlik ve yeraltısuyu seviyesi listesi

Sondaj No	Koordinatlar			Derinlik (m)	Karotlu İlerleme Derinliği (m)	YASS (m)
	X	Y	Z (m)			
CSK-1	4515159,7008	445899,8985	35,00	40,00	0,00 - 40,00	-
CSK-2	4514927,3701	446525,8600	65,00	25,00	0,00 - 25,00	-
CSK-3	4514533,6164	447113,4584	90,00	90,00	0,00 - 90,00	20,00
CSK-4	4515040,2416	446231,3782	50,00	52,00	0,00 - 52,00	-
CSK-5	4513947,8278	447380,0531	25,00	26,00	0,00 - 25,00	-
TSK-1	4514246,376	447245,352	68,80	70,00	50,00 - 70,00	42,00
TSK-2	4514813,597	446778,195	85,00	85,00	65,00 - 85,00	-
TSK-3	4515400,5623	449806,6304	14,45	15,00	0,00 - 15,00	4,00



Şekil 2.14. Tünel güzergahındaki sondaj çalışmaları

TSK-1 ve TSK-2 nolu sondajlarda Tünel eksenini kapsayan yaklaşık 20 metre kalınlığındaki zon boyunca Lugeon Basınçlı Su Testleri yapılmıştır. Deney verilerine göre yapılan hesaplamamalarda Lugeon değeri 0,22 ile 8,84 arasında bulunmuştur. Özellikle süreksizlik düzlemleri boyunca gelişen karstik boşluklara bağlı olarak Lugeon değeri beşin üzerinde hesaplanmıştır. Geçirimli olarak tanımlanan bu kesimlerde Lugeon eğrisinin konumu su basıncı ile kil dolgulu boşlukların yıkandığını göstermektedir. Deney sonuçları Tablo 2.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.2. Basınçlı su test sonuçları özet listesi

Sondaj No	Derinlik (m)	Lugeon	
TSK-1	50,00-52,00	0,79	Geçirimsiz
	52,00-54,00	0,65	Geçirimsiz
	54,00-56,00	2,08	Az Geçirimli
	56,00-58,00	2,37	Az Geçirimli
	58,00-60,00	5,46	Geçirimli
	60,00-62,00	1,11	Az Geçirimli
	62,00-64,00	0,78	Geçirimsiz
	64,00-66,00	1,34	Az Geçirimli
	66,00-68,00	2,14	Az Geçirimli
	68,00-70,00	2,22	Az Geçirimli

Tablo 2.2. (Devam) Basınçlı su test sonuçları özet listesi

TSK-2	65,00-67,00	0,22	Geçirimsiz
	67,00-69,00	0,17	Geçirimsiz
	69,00-71,00	7,93	Geçirimli
	71,00-73,00	6,69	Geçirimli
	73,00-75,00	8,84	Geçirimli
	75,00-77,00	8,14	Geçirimli
	77,00-79,00	5,28	Geçirimli
	79,00-81,00	0,39	Geçirimsiz
	81,00-83,00	0,3	Geçirimsiz
	83,00-85,00	0,4	Geçirimsiz

2.5.2. Laboratuvar deneyleri

Tünel güzergâhındaki jeolojik birimlerin indeks veya fiziksel özellikleri ile mekanik özelliklerini belirlemek için İSU Genel Müdürlüğü tarafından yaptırılan laboratuvar deneylerinden yararlanılmıştır. Fiziksel ve Mekanik özelliklerin saptandığı deney sonuçlarına göre jeolojik birimlerin jeoteknik ve jeomekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu özellikler yardımı ile de TBM seçimine dönük önerilerde bulunulmuştur. Seçilen TBM'in çalışma performansı bu özelliklerle daha sonra karşılaştırılmış aradaki ilişki istatistik olarak değerlendirilmiştir.

Zemin ve kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri

Tünel kazı kesitinde karşılaşılacak zemin tabakalarının daha ayrıntılı fiziksel ve mekanik özelliklerinin saptanması amacıyla bu zondan alınan numuneler üzerinde elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri, su muhtevası, birim hacim ağırlık, tek eksenli basınç dayanımı ve Elastisite modülü deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları da Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'de sunulmuştur.

Tablo 2.3. Zemin tabakalarından alınan numunelerin indeks özellikleri (ISU, 2016)

Numune Bilgileri (Sample Information)			Elek Analizi (Sieve Analysis)		Hidrometre (Hydrometer)		Limit Limit, Plastik Limit, Plastisite Indisi (Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index)			Zemin Sınıfı (Soil Classification)	Özgül Ağılık (Sprecific Gravity)	Su Muhtevası (Water Content)	Jeoteknik Birim	Formasyon
Sondaj No (Borehole	Numune No (Sample	Derinlik (Depth) (m)	+4 (Gravel) (%)	-200 (Fine) (%)	Silt (Silt) (%)	Kil (Clay) (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)		Gs	Wn (%)		
CSK-1	K	2,50	1,40	77,21			51	16	35	CH	2,68	20,7	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	3,70	0,69	86,13			38	12	26	CL	2,64	17,0	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	5,00	4,80	44,65			35	16	19	SC	2,71	20,7	Killi KUM	Tpld
CSK-1	K	10,20	16,04	38,79			35	16	19	SC	2,70	19,4	Killi KUM	Tpld
CSK-1	K	18,50	5,42	87,03			43	15	28	CL	2,65	17,6	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	21,70	2,92	70,68			35	13	22	CL	2,65	11,5	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	24,20	6,41	54,99			35	17	18	CL	2,69	13,4	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	32,00	26,31	50,72	26,20	24,52	32	15	17	CL	2,66	13,8	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	33,50	0,00	96,88	56,42	40,46	34	18	16	CL	2,65	18,1	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	34,30	0,00	86,27	52,20	34,07	42	15	27	CL	2,63	15,1	Siltli KİL	Tpld

Tablo 2.3. (Devam) Zemin tabakalarından alınan numunelerin indeks özellikleri (ISU, 2016)

CSK-1	K	35,50	1,15	79,35			33	12	21	CL	2,66	12,7	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	36,30	18,53	71,22			33	15	18	CL	2,67	15,4	Siltli KİL	Tpld
CSK-2	K	2,00	6,11	80,96			46	15	31	CL	2,63	22,2	Dolgu	Tpld
CSK-2	K	4,30	7,94	77,63			42	10	32	CL	2,68	17,7	Siltli KİL	Tpld
CSK-2	K	8,50	7,78	51,92			40	17	23	CL	2,66	16,9	Siltli KİL	Tpld
CSK-2	K	17,00	3,94	53,95			33	13	20	CL	2,68	11,8	Kumlu KİL	Tpld
CSK-2	K	19,00	84,27	1,72			NP	NP	NP	GP	2,62	5,7	Kumlu ÇAKI	Tpld
CSK-2	K	20,00	13,41	42,63			24	14	10	SC	2,73	10,5	KUMTAŞI	Ct
CSK-3	K	2,60	5,09	74,33			39	16	23	CL	2,68	14,1	Siltli KİL	Tpld
CSK-3	K	8,80	7,75	76,88			40	17	23	CL	2,63	15,7	Siltli KİL	Tpld
CSK-3	K	19,90	8,33	54,22			32	19	13	CL	2,68	18,3	Kumlu KİL	Tpld
CSK-3	K	21,25	36,74	51,47			34	17	17	CL	2,66	15,4	Kumlu KİL	Tpld
CSK-3	K	29,10	8,54	59,33			32	13	19	CL	2,67	10,1	MARN-KİLTA	Kta
CSK-4	K	2,00	2,31	68,91			32	14	18	CL	2,65	16,3	KUM-KALİŞ	Tpld
CSK-4	K	4,00	1,70	85,39			31	13	18	CL	2,68	12,2	KUM-KALİŞ	Tpld
CSK-4	K	8,50	1,56	63,83			44	14	30	CL	2,68	21,1	Siltli KİL	Tpld
CSK-4	K	15,20	5,10	55,14			32	17	15	CL	2,66	15,3	Siltli KİL	Tpld
CSK-4	K	25,80	15,52	44,19			38	17	21	SC	2,70	16,0	Kumlu KİL	Tpld
CSK-4	K	36,70	6,79	59,44			43	17	26	CL	2,69	18,4	Kumlu KİL	Tpld
CSK-4	K	42,80	0,00	83,35			39	17	22	CL	2,68	16,7	Kumlu KİL	Tpld
CSK-4	K	44,20	0,00	74,18	39,96	34,29	34	15	19	CL	2,66	17,1	Kumlu KİL	Tpld
CSK-4	K	45,10	15,95	41,69	17,20	24,49	31	16	15	SC	2,68	16,3	Kumlu KİL	Tpld
CSK-4	K	47,20	7,33	59,79			35	15	20	CL	2,69	18,9	Kumlu KİL	Tpld
CSK-4	K	49,50	0,00	76,93			40	15	25	CL	2,60	16,6	Kumlu KİL	Tpld

Tablo 2.4. Zemin tabakalarından alınan numunelerin mekanik özellikleri (ISU, 2016)

Numune Bilgileri (Sample Information)			Birim Hacim Ağırlık (Unit Weight)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (Uniaxial Compressive Strength)	Elastisite Modülü (Elasticity Modulus)	Jeoteknik Birim	Formasyon
Sondaj No (Borehole No)	Numune No (Sample No)	Derinlik (Depth) (m)	γn (gr/cm^3)	σ_u (MPa)	E (GPa)		
CSK-1	K	33,50	2,15	0,57	0,09	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	34,30	2,28	1,86	0,34	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	35,50	2,27	1,99	0,26	Siltli KİL	Tpld
CSK-1	K	36,30	2,25	0,73	0,13	Siltli KİL	Tpld
CSK-4	K	44,20	2,27	0,56	0,16	Kumlu KİL	Tpld
CSK-4	K	45,10	2,20	0,12	0,03	Kumlu KİL	Tpld
CSK-4	K	47,20	2,15	0,20	0,05	Kumlu KİL	Tpld
CSK-4	K	49,50	2,54	0,79	0,19	Kumlu KİL	Tpld

Tünel eksenini içine alan yaklaşık 10 metre kalınlığındaki zondan alınan kaya numuneler üzerinde ise birim hacim ağırlık, tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı (Brezilian) deneyi, Elastisite modülü ve poisson oranı deneyi

yaptırılmıştır. Deney sonuçları, alınan numunelerin hangi litoloji ve jeolojik birimlere ait olduğunu gösteren bilgiler Tablo 2.5.'de, birim hacim ağırlık, tek eksenli basınç dayanımı, Elastisite modülü ve poisson oranı deneyi sonuçları da Tablo 2.6.'de sunulmuştur.

Deney sonuçlarına göre zemin ve kaya tabakalarının mühendislik özellikleri belirlenmiş ve bu sonuçlara göre tünel güzergâhında karşılaşılacak kaya ortamlarının kaya sınıfı, zemin ve kaya tabakalarının jeoteknik tasarım parametreleri belirlenmiştir.

Tablo 2.5. Kaya tabakalarından alınan numunelerin mekanik özellikleri (ISU, 2016)

Numune Bilgileri (Sample Information)			Birim Hacim Ağırlık (Unit Weight)	Kayada Tek Eksenli Basınç Dayanımı (Uniaxial Compressive Strength)	Elastisite Modülü (Elasticity Modulus)	Poisson Oranı (Poisson Ratio)	Brazillian Deney Yöntemiyle Çekme Dayanımı Tayini (Tensile Strength	Nokla Yükleme (Point Load)	Jeoteknik Birim	Formasyon
Sondaj No (Borehole No)	Numune No (Sample No)	Derinlik (Depth) (m)								
			γn (gr/cm^3)	σu (MPa)	E (GPa)	v	σu (MPa)	Is50 (Mpa)		
CSK-3	K	45,00-45,30	2,68					1,33	Çakıltaşı	TRk
CSK-3	K	45,80-46,00	2,56				2,48		Çakıltaşı	TRk
CSK-3	K	45,80-46,00	2,57				3,02		Çakıltaşı	TRk
CSK-3	K	82,60-82,90	2,63					1,28	Karbonatlı şeyl-killi kireçtaşı- grovak ardalanması	Ct
CSK-3	K	82,90-83,10	2,47				7,18	0,32	Karbonatlı şeyl-killi kireçtaşı- grovak ardalanması	Ct
CSK-3	K	83,10-83,30	2,69				10,52		Karbonatlı şeyl-killi kireçtaşı- grovak ardalanması	Ct
CSK-5	K	20,20-20,40	2,51	30,74	4.67	0.21			Kireçtaşı-killi kireçtaşı ardalanması	Kta
CSK-5	K	20,40-20,80	2,53				6,35		Kireçtaşı-killi kireçtaşı ardalanması	Kta
TSK-1	K	61,50-61,60	2,41					0,47	Kiltaşı	TRk
TSK-1	K	62,15-62,20	2,44					1,05	Kiltaşı	TRk
TSK-3	K	9,30-9,50	2,55	5,52	0.55	0.31	2,94		Kireçtaşı	TRb
TSK-3	K	9,30-9,50	2,52				7,59		Kireçtaşı	TRb
TSK-3	K	10,00-10,50	2,63				2,92		Kireçtaşı	TRb
TSK-2	K	80,00-80,30	2,83	58,04	4.07	0.24			Kireçtaşı	TRb

Tablo 2.6. Sondajlarda kaya tabakalarından alınan numunelerin mekanik özellikleri (ISU, 2016)

Sondaj No	Numune No	Derinlik	Doğal Birim Hacim Ağırlık	Tek Eksenli Basınç Deneyi	Elastisite Modulu	Poisson Oranı
		(m)	(Kn/m^3	σ_b (kg/cm^2)	E (Gpa)	v
TSK-1	KAROT	53,49-53,67	22,99	124,9		
	KAROT	65,65-65,85		389,7	2,03	0,372
	KAROT	69,12-69,37	24,49	161,0		
TSK-2	KAROT	75,52-75,75	26,12	779,4		
	KAROT	78,00-78,21		717,6	7,12	0,198
	KAROT	80,70-80,94	26,72	661,7		
TSK-3	KAROT	11,60-11,80	25,90	455,2		

2.5.3. Kaya sınıflamaları

Tünel güzergâhındaki kaya ortamının, kaya kütle sınıfı, Rock Mass Classification (RMR) sistemi (Bieniawski, 1989) sondajlardan elde edilen karotlar üzerinde yapılan nokta yük dayanımı, elastisite modülü, tek eksenli basınç dayanımı verileri değerlendirilerek belirlenmiştir. Bu amaçla öncelikle RQD değerleri ve karotlardan gözlenen süreksizliklerle ilgili bilgiler değerlendirilmiş, laboratuvar verileri kontrol edilmiş, yeraltısuyu verileri değerlendirilmiş ve süreksizliklerin yönelimi kaya ortamının tünel duraylılık koşuluna göre değerlendirilmiştir. Tüm bu değerlendirmeler sonucu tünel güzergâhındaki kaya ortamlarının RMR sınıflamasına göre kaya kütle sınıfları belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar, puanlama ve kaya sınıflamaları Tablo 2.7, Tablo 2.8 ve Tablo 2.9'da sunulmuştur.

Tablo 2.7. KM:2+510/0+760 arasındaki kaya birimler için önerilen RMR değerleri (ISU, 2016)

Formasyon	Ballıkaya Formasyonu		Trakya Formasyonu		Ballıkaya Formasyonu	
KM	KM:2+510/2+394		KM:1+676/1+310		KM:1+300/0+760	
Litoloji	Dolomitik Kireçtaşı		Karbonatlı Şeyl-Grovak		Dolomitik Kreçtaşı	
Özellikler	Değer/Tanım	Puan	Değer/Tanım	Puan	Değer/Tanım	Puan
Kayanın Tek Eksenli Basınç Dayanımı Mpa	30	4	10	2	60	7
RQD (%)	60	13	40	9	75	16
Süreksizlik Aralığı; (mm)	200-600	10	60-200	8	200-600	10
Süreksizlik Durumu;	Sert Eklem Yüzeyleri Ayrılma < 1mm	25	Yumuşak Eklem Yüzeyleri Ayrılma < 1mm	20	Sert Eklem Yüzeyleri Ayrılma < 1mm	25
Yeraltı Suyu;	Islak	7	Islak	7	Islak	7

Tablo 2.7. (Devam) KM:2+510/0+760 arasındaki kaya birimler için önerilen RMR değerleri (ISU, 2016)

Süreksizliklerin Doğrultu-Eğim Konumu	Orta	-5	Uygun Değil	-10	Uygun Değil	-10
RMR - Değeri	-	54	-	36	-	55
RMR Sınıf	Orta Kaya	III	Zayıf Kaya	IV	Orta Kaya	III

Tablo 2.8. KM:0+750/0+000 arasındaki kaya birimler için önerilen RMR değerleri (ISU, 2016)

Formasyon	Trakya Formasyonu		Kazmalı Formasyonu		Kazmalı Formasyonu		Akveren Formasyonu	
KM	KM:0+750/0+510		KM:0+510/0+450		KM:0+450/0+130		KM:0+115/0+000	
Litoloji	Karbonatlı Şeyl-Grovak		Yumrulu Kireçtaşı-Çakıltaşı		Kiltaşı-Kumtaşı		Killi Kireçtaşı-Marn	
Özellikler	Değer/Tanım	PUAN	Değer/Tanım	Puan	Değer/Tanım	Puan	Değer/Tanım	Puan
Kayanın Tek Eksenli Basınç Dayanımı Mpa	10	2	12	3	15	3	30	5
RQD (%)	55	13	60	13	20	3	60	15
Süreksizlik Aralığı; (mm)	200-600	10	200-600	10	60-200	8	200-600	10
Süreksizlik Durumu;	Sert Eklem Yüzeyleri Ayrılma < 1mm	25	Sert Eklem Yüzeyleri Ayrılma < 1mm	25	Yumuşak Eklem Yüzeyleri Ayrılma < 1mm	20	Yumuşak Eklem Yüzeyleri Ayrılma < 1mm	20
Yeraltı Suyu;	Islak	7	Islak	7	Islak	7	Islak	7
Süreksizliklerin Doğrultu-Eğim Konumu	Orta	-5	Orta-Uygun Değil	-8	Orta-Uygun Değil	-8	Uygun Değil	-10
RMR - Değeri	-	52	-	50	-	33	-	47
RMR Sınıf	Orta Kaya	III	Orta Kaya	III	Zayıf Kaya	IV	Orta Kaya	III

Tablo 2.9. Olası fay zonları için önerilen RMR değerleri (ISU, 2016)

Formasyon	Fay Zonu		Fay Zonu		Fay Zonu	
KM	KM:2+394/2+384		KM:1+310/1+300		KM:0+760/0+750-0+130/0+115	
Litoloji	Milonit		Milonit		Milonit	
Özellikler	Değer/Tanım	Puan	Değer/Tanım	Puan	Değer/Tanım	Puan
Kayanın Tek Eksenli Basınç Dayanımı Mpa	1	0	1	0	1	0
RQD (%)	0	3	0	3	0	3
Süreksizlik Aralığı; (mm)	<60	5	<60	5	<60	5
Süreksizlik Durumu;	Yumuşak Fay Dolgusu	0	Yumuşak Fay Dolgusu	0	Yumuşak Fay Dolgusu	0
Yeraltı Suyu;	Su Akışı	0	Su Akışı	0	Su Akışı	0
RMR - Değeri	-	8	-	8	-	8
RMR Sınıf	Çok Zayıf Kaya	V	Çok Zayıf Kaya	V	Çok Zayıf Kaya	V

2.5.4. Tünel güzergâhının mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmesi

Zemin tabakalarının mühendislik özelikleri ve jeoteknik tasarım parametreleri arazi ve laboratuvar deney sonuçlarına göre belirlenmiştir. Tünel güzergâhında yaklaşık olarak KM:2+384/1+676 arasında geçilmesi beklenen zemin tabakası "Sert, düşük plastisiteli, siltli, kumlu KİL (CL)" olarak tanımlanmıştır. Laboratuvar tek eksenli basınç dayanımı ve elastisite modülü deneylerine göre mekanik özellikleri tanımlanmıştır.

Kaya kütlelerinin jeoteknik tasarım parametrelerinin değerlendirilmesinde ise Rock Lab 1.0 yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımda gerekli olan parametreler için yine litolojik özellikler, laboratuvar deney sonuçları ve süreksizliklerin konumu dikkate alınmıştır. GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) GSI=RMR(1989)-5 ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır. Fay zonları jeolojik değerlendirmelere göre 10 ile 15 metre genişliğinde bir etkilenme zonu olarak tanımlanmıştır. Bu zonlar olası risklere göre "Çok Zayıf Kaya" sınıfı olarak ayırt edilmiştir. Tünel güzergâhındaki farklı zemin ve kaya tabakalarının jeoteknik tasarım parametreleri Tablo 2.10'da verilmiştir.

Tablo 2.10. Tünel güzergahındaki kaya ve zemin tabakalarının mühendislik özellikleri, kaya sınıfı ve jeoteknik tasarım parametreleri

m	Jeolojik birim	Litoloji	Serbest Basınç Dayanımı (Mpa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Ortalama RQD (%)	Kaya Sınıfı (RMR)	Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	Elastisite Modülü (Mpa)	Deformasyon Modülü (Mpa)	Efektif Kohezyon (C) kPa	Efektif İçsel Sürtünme Açısı (Ø)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Yas durumu
2+510/ 2+394	Ballıkaya fm	Dolomitik kireçtaşı	30	6	60	54	50	4000	1225	250	55	25	Bağlantılı erime boşlukları kontrolünde sınırlı
2+394/ 2+384	Fay zonu	Milonit	1	-	-	8	5	50	3	5	20	21	Düşük basınçlı boşalımlar beklenebilir
2+384/ 1+676	Darıca fm	Çakıllı siltli kil	0,5	0,15	-	10	5	5	2	5	26	21	Sızıntı
1+676/ 1+310	Trakya fm	Karbonatlı şeyl-grovak	10	4	40	36	30	3000	250	150	36	23	Sızıntı
1+310/ 1+300	Fay zonu	Milonit	1	-	-	8	5	50	3	15	20	20	Düşük basınçlı boşalımlar beklenebilir
1+300/ 0+760	Ballıkaya fm	Dolomitik kireçtaşı	60	10	75	55	50	7000	2150	680	50	25	Bağlantılı erime boşlukları kontrolünde sınırlı
0+760/ 0+750	Fay zonu	Milonit	1	-	-	8	5	100	3	15	20	22	Düşük basınçlı boşalımlar beklenebilir
0+750/ 0+510	Trakya fm	Karbonatlı şeyl-grovak	10	4	55	52	45	3000	780	280	42	23	Sızıntı
0+510/ 0+450	Kazmalı fm	Yumrulu kireçtaşı (karbonatlı puding)	12	3	60	50	45	3000	670	235	40	24	Düşük basınçlı sızıntı
0+450/ 0+130	Kazmalı fm	Kiltaşı (şeyl)-kumtaşı	15	4	20	33	28	3000	215	125	34	24	Sızıntı
0+130/ 0+115	Fay zonu	Milonit	1	-	-	8	5	50	3	5	20	22	Düşük basınçlı boşalımlar beklenebilir
0+115/ 0+00	Akveren fm	Killi mikritik kireçtaşı-marn	30	6	60	45	40	6000	950	170	52	23	Bağlantılı erime boşlukları kontrolünde sızıntı

3. TÜNEL DELME MAKİNESİ (TBM) GENEL BİLGİ ve SEÇİMİ

Jeolojik özellikleri, mühendislik jeolojisi ve jeoteknik modeli tanımlanan tünel güzergâhında tünel kazısının Tünel Delme Makinesi (TBM) yöntemi ile yapılması tercih edilmiştir. Tünelin ekonomik açıdan en kısa sürede devreye girme gerekliliği, güzergâhın yerleşim alanını kat etmesi, kullanılmış Tünel Delme Makinelerinin tekrar değerlendirilme imkânlarının varlığı İdareyi (İSU) bu tercihi yönlendiren önemli etkenler olmuştur. Bu nedenle öncelikle bu inceleme kapsamında TBM türü kazı makinelerinin performansı araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda güzergâhın mühendislik jeolojisi koşullarına uygun TBM seçimi değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar ve araştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki bölümlerde genel hatlarıyla sunulmuştur.

3.1. Tünel Kazı Perfomansı ve Tünel Delme Makinesi (TBM) Yönteminin Tarihsel Gelişimi

TBM'in kazı performansıyla ilgili ilk çalışmalar masif kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü, sertliği ve aşındırıcılığı gibi mekanik özellikleri ile penetrasyon, itme kuvveti ve tork gibi kazı parametreleri üzerinde olmuştur. Bu konudaki araştırmaların başlıcaları arasında; Kato (1971), Saito (1971), Roxborough ve Philips (1975), Graham (1976), Özdemir (1977), Snowdown ve diğ. (1982), Nelson (1985), Sanino (1985), Rostami ve Özdemir (1993)'in yaptığı çalışmalar gösterilebilir (Okubo vd., 1993'den) Bu araştırmaların çoğu kuramsal ve yarı görgül çalışmalardır.

Yukarıda değinilen çalışmaların çoğu masif kaya malzemesinin mekanik özelliklerine dayanmakta olup, kaya ortamın tüm jeomekanik özelliklerini içermemektedir. Ancak kayanın yerinde davranışını, dolayısıyla kazı performansını etkileyen özellikleri arasında eklemlenme, blok boyutu, eklem veya tabaka yönelimi, süreksizliklerin yüzey pürüzlülüğü ve ayrışma durumu gibi alt özellikler bulunmaktadır. 1965'li yıllarda önerilen kaya kütle sınıflandırmalarından sonra kaya kütlesi özellikleri ile TBM kazı performansı arasındaki ilişkiler de araştırılmaya

başlanmıştır. Barton vd. (1974)'te önerdikleri Q sınıflama sistemine, kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı ve kuvars içeriği, yatay arazi yükü, disk yükü ve disk ömür indeksi parametrelerini de ekleyerek QTBM ölçütü geliştirmiş ve bu parametre ile ilerleme hızı arasındaki ampirik bağıntılar vermiştir (Barton, 2000). Bienawski vd. (2006) de az-çok benzeri parametrelere dayanan "Kaya Kütle Kazılabilirliği" (RME) ölçütünü ortaya koymuş ve İspanya ile Etiyopya'daki tünellerde yapılan gözlemlerinden faydalanarak ortalama ilerleme hızı, tork ve disk yükü arasındaki ilişkileri önermişlerdir. Sapigni vd. (2002) İspanya'daki tünellerde, Hassanpour vd. (2009), Farrokh vd. (2012) ve Oraee vd. (2010) İran'daki tünellerde, Bilgin vd. (1999) ise Türkiye'deki tünellerde kayanın jeomekanik özelliklerini esas alan kazı performans tahmin modelllerini geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu tahmin modelleri ile penetrasyon, itme kuvveti, döndürme momenti ve ilerleme hızı büyüklükleri için kestirim yapılabilmektedir.

İnsanoğlu var olduğu süreden beri kazı işleri ile uğraşmıştır. Yapılan arkeolojik çalışmalar binlerce yıl önce dahi insanların çeşitli amaçlar için zemini ve kayaları kazdığını ortaya koymuştur. Buna rağmen kazı mekaniğinin anlaşılmaya başlanması ancak 60-70 yıl öncesine dayanmaktadır. Su yapıları ile ilgili tünel kazıları tarihsel olarak çok daha önce yapılmış olmasına rağmen mekanize olarak yapılan ilk kazılar 19. yüzyılda yeraltı kömür üretimi ile başlanmıştır. 1850 yıllarında kesici uçların basınçlı hava ile kullanılmaya başlaması ve 1900'dan sonra elektrik enerjisinin yeraltına inişi ile de gelişim kazanmıştır. ABD'de 1910 ile 1920 yılları arasında malzeme alanında ki gelişmeler, özellikle yeni darbeli delicilerin yapılmasında ve modern kazı makinelerinin tasarımlarının temellerinin atılmasında etkili olmuştur. İnşaat sektöründeki ilk modern gelişme 1884 yılında Albay Beaumont'un Manş denizinin altından geçecek 2,14 m çapında ki bir tünel için tasarladığı tam cepheli tünel delme makinesi ile başlamıştır. Daha sonra 1955 yılında ilk serbest dönen keskili tünel delme makineleri Goodman Manufacturing Company tarafından imal edilmiş ve ABD deki Oahe barajı tünellerinde başarı ile kullanılmıştır.

3.2. Tünel Delme Makinesi (TBM) Seçimi

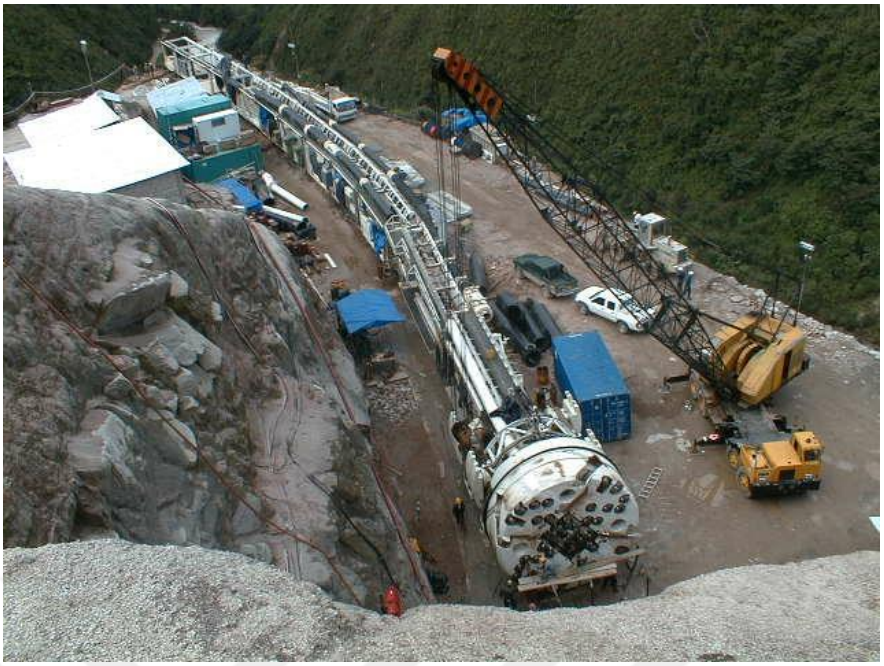
Tam cepheli tünel delme makineleri (TBM) günümüzde 2 ile 17 m çaplarındaki ayna yüzeylerini, belirli kesme derinliğinde bir defada kazabilen makinelerdir (Şekil 3.1,

Şekil 3.2). Tüm donanım uzunlukları 60-200 m arasında değişmektedir. Çapı küçük tam cepheli makinelerle 10-12 m yarıçapında dönemeçler dönülebilmekte, büyük çaplı tam cepheli makinelerle 125-150 m yarıçapında dönemeçler dönülebilmektedir.

Tam cepheli tünel açma makineleri, kazı ve pasa nakliyatı yapabilen tek birimde birleştirilmiş mekanik ve elektrik parçalardan oluşmaktadır. Bu makineler; tam hizalama, pasa nakliyatı, hayati hizmet sağlama sistemi (hava, su, enerji) ve tahkimat gibi alt yapı sistemlerini içine alan geniş kapsamlı mekanize kazı sisteminin bir parçasıdır. Tahkimat üniteleri, elektrik, taşıma sistem ve diğer alt sistemi bileşenlerinin çoğu tam cepheli makinenin arkasından çekilmekte olan kızak ya da platformlar üzerine kurulmuştur. Şekil 3.1. ve Şekil 3.2. kaya formasyon kazısı yapan tam cepheli tünel açma makinesi ve yedekleme sistemlerini göstermektedir. Yapısal olarak şiltli (kalkanlı) ve şiltsiz (kalkansız) olabilirler. Kalkansız makineler stabil kaya ortamlarında kullanılmaktadır. Kalkanlı makineler ise kalkanların varlığı nedeniyle kırıklı çatlaklı formasyonlarda kazı yapabilme özelliğine sahiplerdir.



Şekil 3.1. Tam cepheli tünel delme makinesi (Robbins)



Şekil 3.2. Kaya formasyon kazısı yapan tam cepheli tünel delme makinesi ve yedekleme sistemleri (Herrenknecht)

Bu makinelerin çalışma yöntemi şu şekildedir: Tam cepheli makinelerin önünde sertleştirilmiş çelikten yapılmış disk keskilerle donatılmış kesici kafa vardır. Yüksek randımanlı ve güçlü elektrik motorları kesici kafayı yavaşça döndürür. Kesici kafanın en gerisinde, makinenin kesici kafasının tünel duvarına yüksek basınç uygulamasını sağlayan, hidrolik presler bulunur. Disk keskilerin yüksek basıncı altında, kaya küçük parçalara ayrılır. Bu makineler kısa adımlarla ilerler; her delici darbesinden sonra bütün makine ileri çekilerek pozisyonu desteklenir ve tüm bu işler tekrar edilir.

Açık tip TBM'lerde kesici kafanın tam arkası, çalışanları korumak amacıyla kaya cıvatalar kullanılarak sağlamlaştırılır. Kayacın kalitesine bağlı olarak, buna ilaveten çelik bağlar veya diğer güvenlik önlemleri alınır. Robot kollarla püskürtme beton döşenir. Gunit olarak da bilinen bu malzeme kemerin içini kaplar ve tünel için çok gerekli olan koruyucu kalkanı oluşturur.

Tam cepheli tünel delme makinelerinin arka tarafına yerleştirilen konveyör ile kazılan malzeme taşınır. Malzeme buradan demiryolu veya bantlarla tünelin girişine taşınarak tampon bir siloyla yükleme noktasına götürülür.

Tam cepheli tünel açma makineleri, jeolojik ve jeoteknik koşullara göre açık TBM'ler ve şiltli (kalkanlı) TBM'ler olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Tam cepheli tünel açma makinelerin sınıflandırması Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Tam cepheli tünel delme makinelerinin sınıflandırması ve uygun jeolojik ve jeoteknik koşullara göre seçimi (Bilgin vd., 2014)

<table>
<tr><td rowspan="3">Açık TBM'ler (Open TBM's)</td><td colspan="2">Alttan destekli bir çift pabuçlu - önden motorlu - TBM'ler (Main Beam)</td><td rowspan="3">Çok sert, Aşındırıcı, Masif veya Az kırıklı çatlaklı Kaya koşulları, Kuru veya az su geliri olan koşullar, RMR = 80-100</td></tr>
<tr><td colspan="2">Alttan desteksiz (askıda) bir çift pabuçlu - önden motorlu - TBM'ler (Open Gripper)</td></tr>
<tr><td colspan="2">İki çift pabuçlu - arkadan motorlu - TBM'ler (Kelly Beam)</td></tr>
<tr><td rowspan="8">Şiltli TBM'ler (Shielded TBM's)</td><td rowspan="3">Şiltli Sert Kaya TBM'leri</td><td>Tek Şiltli TBM'ler</td><td rowspan="2">Kırıklı çatlaklı, Bloklu ve kuru veya az su geliri olan koşullar, RMR = 30-80</td></tr>
<tr><td>Teleskopik Şiltli TBM'ler</td></tr>
<tr><td>Sadece Kesici Kafa Bölgesi Şiltli TBM'ler (Gripper Shield)</td><td>Kırıklı çatlaklı, Bloklu ve kuru veya az su geliri olan koşullar, Orta derecede sıkışan killer</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Şiltli Yumuşak Zemin TBM'leri (Ayna Basınçlı)</td><td>Çamur Basınçlı TBM'ler (Slurry Pressure Balance)</td><td>Yer altı suyunun fazla olduğu çakıl, iri ve orta taneli kum formasyon koşulları (Permeabilite Katsayısı < 10^{-7} m/s), RMR = 0-30</td></tr>
<tr><td>Pasa Basınçlı TBM'ler (Earth Pressure Balance)</td><td>Yer altı suyunun fazla olduğu ince taneli kum, kil ve silt formasyon koşulları (Permeabilite Katsayısı < 10^{-4} m/s), RMR = 0-30</td></tr>
<tr><td>Hava Basınçlı TBM'ler (Compressed Air Balance)</td><td>Yer altı suyunun fazla stabil kumlu formasyon koşulları (Permeabilite Katsayısı < 10^{-7} m/s), RMR = 0-30</td></tr>
<tr><td>Kombine TBM'ler (Mixshield)</td><td>Her türlü yumuşak zemin ve sert kaya koşulları RMR = 0-100</td></tr>
<tr><td>Özel TBM'ler (Kesici Kafasız, Çoklu Kesici Kafalı TBM'ler)</td><td>Jeolojik ve jeoteknik koşullara göre özel imalat makinalar</td></tr>
</table>

Açık TBM'ler çok sert, aşındırıcı, az su geliri olan masif veya az kırıklı çatlaklı kaya koşullarda kullanılmaktadır (RMR=80-100). Açık TBM'ler, alttan destekli bir çift

pabuçlu önden motorlu (Main Beam), alttan desteksiz bir çift pabuçlu önden motorlu (Open Gripper) ve iki çift pabuçlu arkadan motorlu (Kelly Beam) TBM'ler olmak üzere üçe ayrılır.

Şiltli TBM'ler ise şiltli sert kaya TBM'leri ve şiltli yumuşak zemin TBM'leri olmak üzere ikiye ayrılır. Şiltli sert kaya TBM'leri kırıklı çatlaklı, bloklu, kuru veya az su geliri olan kaya koşulları ve orta derecede sıkışan kil formasyonlarda kullanılmaktadır (RMR=30-80). Şiltli sert kaya TBM'leri jeolojik ve jeoteknik özelliklere bağlı olarak tek şiltli TBM'ler, teleskopik şiltli TBM'ler ve sadece kesici kafa bölgesi şiltli (Gripper Shield) TBM'ler olmak üzere üç alt gruba ayrılır. Şiltli yumuşak zemin TBM'leri; çamur basınçlı TBM'ler (Slurry TBM's), pasa basınçlı TBM'ler (EPBM's), hava basınçlı TBM'ler (Compressed Air Balance TBM's), kombine TBM'ler (Mixshield) ve özel TBM'ler olmak üzere dört alt gruba ayrılır. Hangi tip şiltli yumuşak zemin TBM'inin kullanılacağını jeolojik ve jeoteknik koşullar sınırlamaktadır. Yeraltı suyunun fazla olduğu çakıl, iri ve orta taneli kum formasyon koşullarında çamur basınçlı TBM'ler; yer altı suyunun fazla olduğu ince taneli kum, kil ve silt formasyon koşullarında pasa basınçlı TBM'ler; yer altı suyunun fazla olduğu stabil kumlu formasyon koşularında hava basınçlı TBM'ler; her türlü yumuşak zemin ve sert kaya koşullarında kombine TBM'ler kullanılmaktadır.

Arazi basıncını dengeleme esasına göre çalışan EPB (Toprak Basınç Dengesi) makineler ilk olarak Japonya'da 1960-70'li yıllarda görülmeye başlamıştır. Yapışkan olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminlerde ilerlemeler sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Genellikle bu gibi alanlarda ve kendini kısa süreli bile tutamayan kayaçların kazısında bu makineden faydalanılır. Temel çalışma prensibi su gelirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması, "bizzat arazi ve içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkan verilmesi" diye tanımlanabilir. Bir başka deyişle amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve tüm yüzeyi desteklemesidir. Bu destekleme basıncının tünel üzerindeki doğal arazi basıncını karşılayacak bir değerde ayarlanması gerekir. Bu makineler 5 bar'a kadar ulaşan basınç altında çalışabilecek şekilde imal edilebilirler. En iyi çalışma koşulları arazi nemlilik oranının % 10-15

veya daha az olduğu durumlardır. EPB (Toprak Basınç Dengesi) makinesi çok sert kayaçlardan (diskli) çok yumuşak olanlarına (kalem keskili) kadar, değişik kayaç ve zemin formasyonlarında kullanılmak üzere tasarımlandırılabilirler. Çalışmalarındaki basitlik ve uygulama alanlarının genişliğinden dolayı, giderek çamur makinelerinin (slurry shield) yerini almaktadırlar.

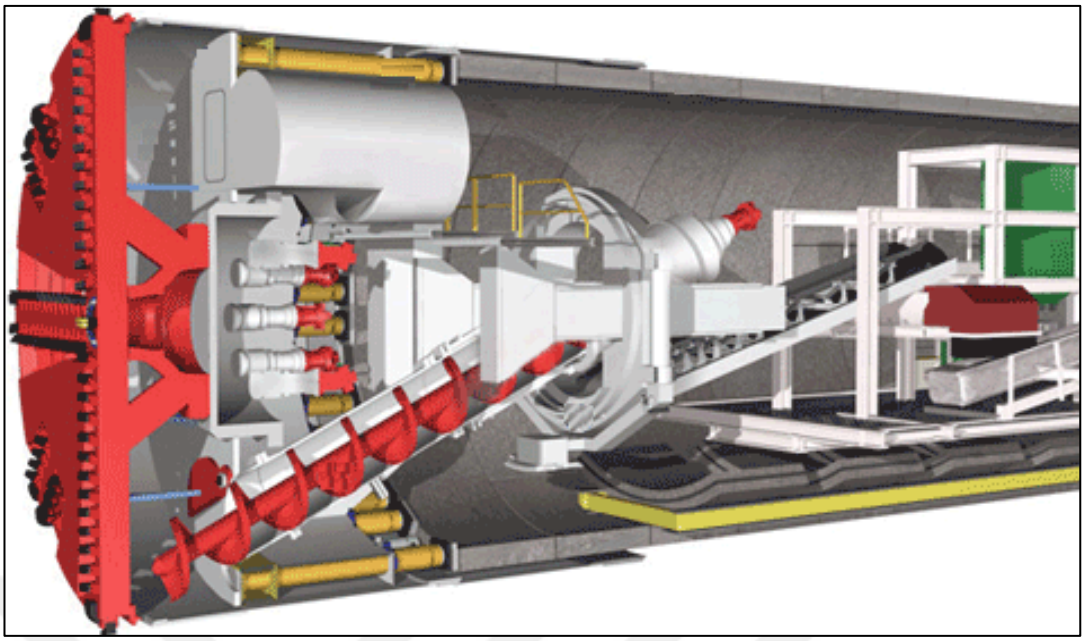
EPB'ler (Toprak Basınç Dengesi) çoğu defa çok amaçlı kullanılabilecek şekilde imal edilmektedirler. İstenildiğinde tek veya çift kalkanlı (şilt) olarak kullanılabilmektedirler. Arazinin durumuna bağlı olarak kapalı (basınç altında) veya açık (atmosfer basıncında) çalışabilecek duruma da kolayca getirilebilmektedirler. Böylece, derin bir deniz altında çalışan bir makine, basınçlı bir damar veya fay zonuna rastlamadığı sürece; çift kalkanlı, açık bir konumda çalışabilmektedir. Gerektiğinde de çok çabuk olarak kapanabilmekte ve gerçek bir EPB (Toprak Basınç Dengesi) makinesi olarak çalışmaya başlamaktadır.

EPB (Toprak Basınç Dengesi) makinesinde kazılan malzeme bir vida konveyör vasıtası ile kesici kafa haznesinden çıkarılır. Kazı bölgesindeki arazi basıncı azalmalarını ve bu yüzden oluşacak oturmaları engellemek için malzeme aktarımının kontrollü bir şekilde yapılması gereklidir. Bu yüzden vida konveyörün hızı malzeme çıkış hızını kontrol etmek için ayarlanabilir. İstenilen şekilde vida hızı ayarlaması bilgisayarlı bir monitörden izleme sistemiyle yapılabilir. Dengeli ve güvenli bir kazı yapabilmek için malzeme çıkış hızının makine ilerleme hızına eşit olması gerekir. Böylece zemin oturmalarına yol açabilecek fazla malzeme çıkışına izin verilmez. Eğer ortamda bulunan suyun basıncı atmosfer basıncının üzerine çok fazla çıkarsa bazı basınç kilitleri gerekli olabilir. Basınç kilitleri vidanın bir yanından diğerine doğru bir patlamayı önlemek için gereklidir ve vidanın çıkış kapısında konumlandırılır.

EPB (Toprak Basınç Dengesi) makinelerinde diğer metotların aksine, ikincil bir destekleme metodu (sıkıştırılmış hava, süspansiyon) kullanılmaz. Akıcı formasyon kesici kafadaki keskiler tarafından kazılır. İtme kuvveti, aynaya kazı haznesinin doldurulmasıyla meydana getirilen basınç duvarı yoluyla transfer edilir. Böylece kazı bölgesinde kontrolden çıkmış bir şekilde malzeme akışı engellenmiş olur. Kazı bölgesindeki formasyon uygulanan itme kuvveti nedeniyle daha fazla yük alamadığı

anda denge sağlanılmış olur. Arazi destekleme basıncı, sağlanan dengenin üzerine çıkarılırsa kazı bölgesindeki akıcı formasyon çok daha sağlam bir hale gelir. Eğer açılan tünel yeryüzüne yakınsa çok fazla uygulanan ayna basıncı sebebiyle yeryüzünde kabarmalar meydana gelebilir. Pasa nakli tünel boyunca bant konveyörlerle, vagonlarla, damperli kamyonlarla ya da borular içerisine taşınmayı kolaylaştıran bir katkı maddesi ekledikten sonra katı taşıma pompaları yardımıyla yapılabilir. EPB'ler çalışma prensiplerine bağlı olarak çeşitli isimler alır: Malzeme hapsedici şiltleri (soil confinement shields), su basıncını destekleme şiltleri (water pressure balance shields), yüksek yoğunluktaki çamur şiltleri (high density slurry shields) ve çamur şiltleri (mud shields).

EPB (Toprak Basınç Dengesi) makinesinin kazı anında çalışma aşamaları da şu şekilde gerçekleşmektedir: Şekil 3.3'te elemanları görülen bir EPB (Toprak Basınç Dengesi) makinesinin öncelikle kesici kafanın döndürme motorları ile döndürülmesi ve kesici kafaya itme silindirleri ile araziyi destekleyecek kadar ya da biraz daha fazla kuvvet verilmesiyle akıcı alüvyal zemin kazı haznesine dolmaya başlar. Kazı haznesi tamamen dolduktan sonra istenilen destekleme ortamı yaratılır ve kazılan malzeme vida konveyör yardımıyla normal basınçtaki bölgeye alınmaya başlar. Burada vida konveyörün en önemli görevi aynada oluşturulan basıncın kademeli olarak düşürülmesi ve normal basınca indirilerek düzenli bir malzeme çıkışının sağlanmasıdır. Vida konveyörün çıkış kapısından bant konveyöre boşalan malzeme kuyruk bölümünde bekleyen vagonlara ulaşır ve buradan da kuyu ağzına gönderilir. Şekil 3.4'de Projede kullanılan EPB (Toprak Basınç Dengesi) Tipi tünel delme makinası görülmektedir.

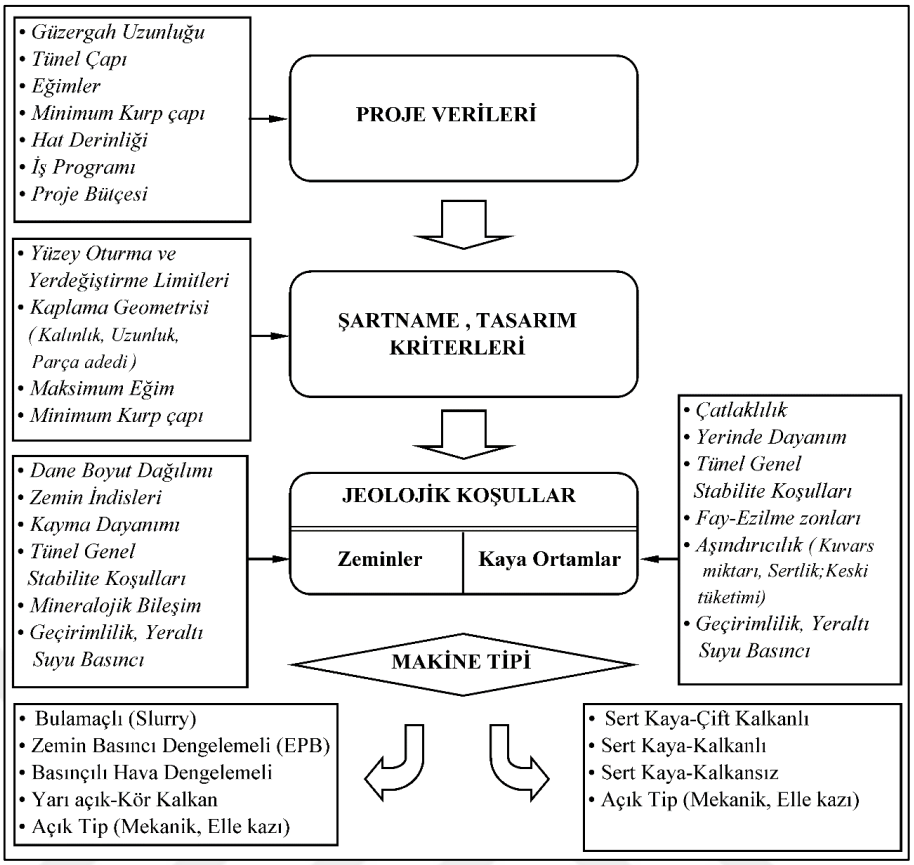


Şekil 3.3. Pasa basınçlı tünel delme makinesi kesit görünümü (Herrenknecht)



Şekil 3.4. Herrenknecht marka Proje de kullanılan EPB tipi tünel delme makinesi

Kazı makinesinin seçiminde başlıca etkili olan parametreler Şekil 3.5'deki akış diyagramı üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Tam kesitli tünel delme makinesi seçimine etki eden parametreler (Yüksel vd., 2006)

4. TBM TASARIM VE PERFORMANS PARAMETRELERİNİN SEÇİMİ

Tam cepheli tünel delme makinelerinin performans tahminleri, makinelerin kullanıldıkları madencilik ve inşaat projelerinde, makinelerin teknik ve ekonomik verimliliklerinin belirlenmesi için kritik bir göstergedir. Tam cepheli tünel delme makinelerinde net ilerleme hızının önceden kestirilmesi tünel projeleri için vazgeçilmez bir parametredir. Makina seçimini ve performansını etkileyen faktörleri iki ana grupta toplanabilir. Birincisi kullanılacak olan kazı makinasının özelliklerine bağlıdır. İkincisi kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerine, işletme parametrelerine ve formasyonun kütlesel özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Ekipman temin hızı, teknik personel kalitesi, işyeri organizasyonu gibi faktörler işletme parametreleridir.

Makine performansının kestirimi için, kazı malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri, kaya kütlesi özellikleri ve makine karakteristikleri hakkında bilgi toplamak çok önemlidir. Bu üç grup arasındaki bağlantı bize keski kaya, makine etkileşimi hakkında bilgi sağlar ve performans kestiriminde yol gösterir. Tünel açma makinesi üretici firmaları kendi bilgi birikimleri ve becerilerini kullanarak farklı formasyonlar için farklı makineler üretmektedirler. Ancak kayaç özellikleri ve jeolojik parametrelerin yanında kayaç kesme mekaniğinin de dikkate alınması gerekmektedir.

Tablo 4.1. Kazı makinelerinin performansını etkileyen parametreler (Bilgin ve diğ., 2014)

Makine Parametreleri	
	Makinenin tipi
	Makinenin ağırlığı ve boyutları
	İtme gücü ve tork kapasitesi
	Kesici kafa tipi
	Kesici kafa güç ve RPM
	Keski tipi ve boyutları, keski metalürjik özellikleri
Jeolojik – Jeoteknik Parametreler	
Kaya kütlesi özellikleri	Kaya kalite değeri (RQD)
	Tabakalanma, fay zonları
	Çatlak kümeleri (yönelim, dolgu, boşluk gibi
	Hidrojeolojik durum

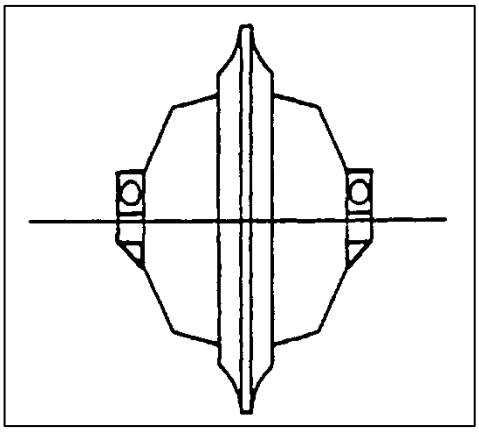
Tablo 4.1. (Devam) Kazı makinelerinin performansını etkileyen parametreler (Bilgin vd., 2014)

Kaya kütlesi özellikleri	Olumsuz jeoloji
Fiziksel ve mekanik özellikler	Kaya kesme parametreleri (spesifik enerji, kesme kuvvetleri)
	Dayanım özellikleri (basınç ve çekme dayanımı, kohezyon, elastik değeri)
	Kaya dokusu ve aşındırıcılık (porozite, sert mineral/kuvars içeriği, mikro çatlaklar, tane boyutu)
	Diğerleri (kırılganlık, su içeriği gibi)
Operasyonel Parametreler	
Teknik parametreler	Açıklık şekli ve boyutları
	Eğim ve rekuplar
Madencilik Parametreleri	Tahkimat (çelik bağ, püskürtme beton gibi)
	Pasa nakliye (konveyör, vagon gibi)
	Yararlanma (güç, su, hava temini)
	Zemin iyileştirme
	Vardiya durumu

4.1. Disk Keskiler ve Özellikleri

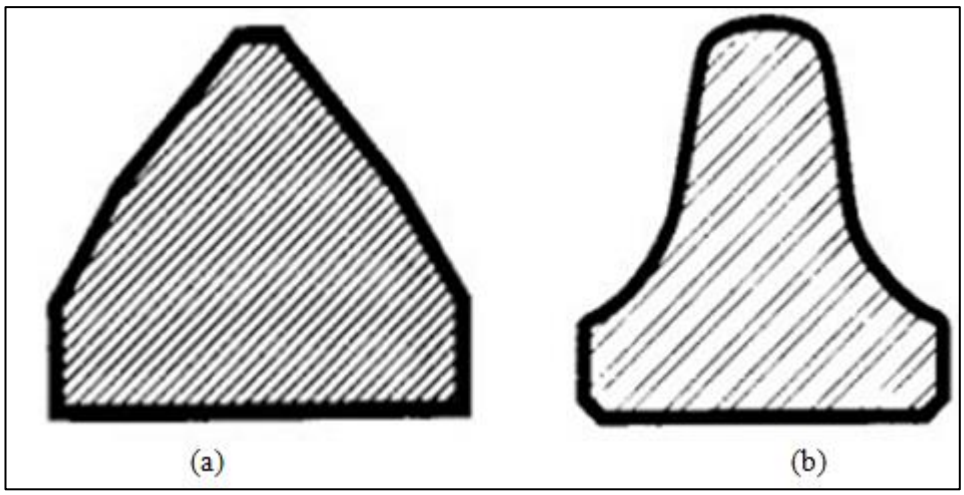
Tünel açma makinelerinde kayacı parçalayan ve etkileşimi sağlayan önemli elemanlardan biri disk keskilerdir. Disk keskiler sıralı, sabit alanlı (CCS) ve V-tipi olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

Tek diskli keskiler diğer döner keskilere oranla birbirini sıralı olarak takip eden kazı sistemleriyle yüksek kazı verimi sağlar (Şekil 4.1). Tek noktadan yükü aldıkları için yüksek yatak kapasiteleri sayesinde daha derin kesme derinliklerine ulaşırlar ve bu keskiler tünel açma makinesi kafasının istenilen bölgesine yerleştirilebilirler. Pahalı olmalarına karşın en önemli avantajlarından birisi keskinin üzerinde ve kesmeyi gerçekleştiren ringin aşındıktan sonra yenilenebilmesidir. Bu sayede tünel açma makinesinin keski maliyetlerinin düşürülmesine olanak sağlanmıştır.



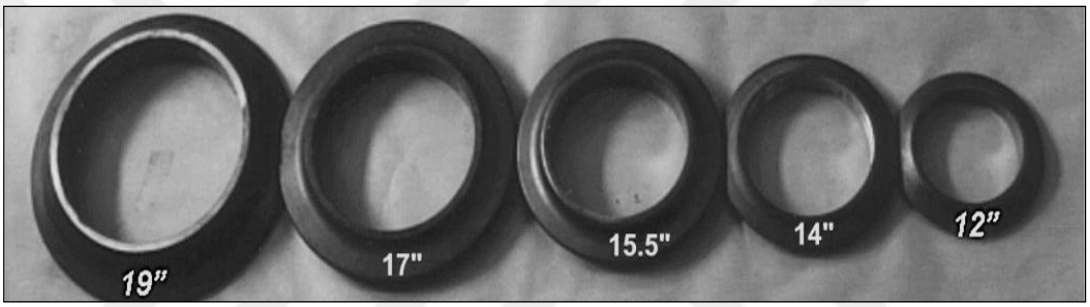
Şekil 4.1. Tek diskli keski

Tek diskli keskilerin geometrisini keskilerin çapları ve kesme profilleri belirler. Bu tür keskilerle donatılmış bir kesici kafanın bir devirlik dönüşü ile elde edilen keskiler arası mesafe ve kesme derinliği kesme prosesini oluşturmaktadır. Yaklaşık 20 yıl öncesine kadar, TBM'lerde kullanılan disk keskilerin uç açıları 60°'den 120°' ye kadar değişmekteydi ve bu keskilere V- tipli keskiler deniliyordu (Şekil 4.2a). Yeni olan V tipli keskilerle yüksek ilerlemelere ulaşılsa da, uç açıları keskin olduklarından çabuk aşındıkları fark edilmiştir. Bu aşınmalarında ilerleme oranlarını zamanla düşürdüğü anlaşılmıştır. Yüksek kesme performansına ulaşabilmek ve aşınmaları azaltmak için ucu küt olan sabit kesitli (CCS) keskiler geliştirilmiştir (Şekil 4.2b). Böylelikle hızlı keski aşınmaları yüzünden makine performansının düşmesinin önüne geçilmiştir. Bu avantajları sayesinde CCS tipli keskiler TBM endüstrisinde bir standart olarak kabul görmüştür.



Şekil 4.2. Disk keskilerde ring profili (a) V-tip (b) Sabit kesit uçlu (CCS)

Disk keskilerin performansını etkileyen diğer bir değişken ise ringin geometrisidir. Endüstriye ilk sunulduklarından bu yana, disk keskilerin çapları 12 inçten (300 mm) 19 ince (483 mm) kadar geliştirilmiştir (Şekil 4.3). Büyük çaplı keskilere aynı itme kuvveti uygulandığında daha fazla ilerleme beklenmemelidir. Bunun nedeni ise kaya ile temas ettikleri yüzeyin genişliğidir. Fakat bunun yanında daha yüksek yatak kapasiteleri ile daha fazla yük alabilirler. Böylelikle daha az arıza ve daha iyi performans verileri elde edilebilmektedir. Bunlara ilaveten, büyük keskiler kesici kafanın bir dakikalık dönüşünde daha yavaş dönerler ve daha az ısı yayılımı olur. Büyük keskilerin yüzey alanları küçük keskilere oranla daha büyük olduğundan, kesici kafanın bir devirlik dönüşünde daha az aşınmaya maruz kalırlar.



Şekil 4.3. Farklı çaplardaki ring boyutları (1"=25,4 mm) (Özdemir, 1995)

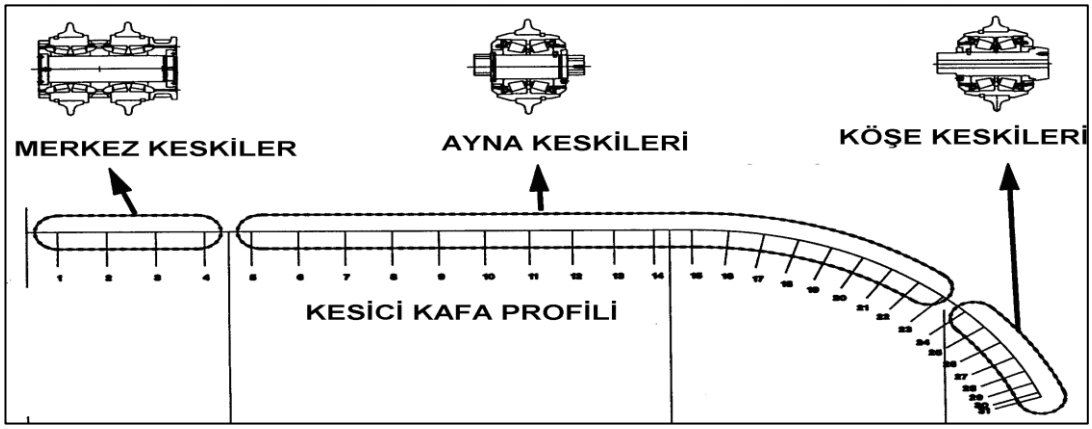
Keskilerde kullanılan malzemelerin ve yatak kapasitelerinin geliştirilmesi ile keski endüstrisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bunun en önemli göstergesi büyük çaplı keskilerin üretilmesi, daha az keski aşınmaları ve yüksek ilerlemelerin elde edilmesidir. Üretici firmalar tarafından maksimum yük kapasitesini kaldırabilecek keski yatakları dizayn edilmiştir (Tablo 4.2). Bu çalışmaların gereği ise; değişken formasyonlarda ve keski ısınmalarında, kayacın parçalanması sırasında keskilerin aşırı yüklenmelere maruz kalmasıdır.

Tablo 4.2. Üretici firmalar tarafından ön görülen yatak kapasiteleri (Özdemir, 1995).

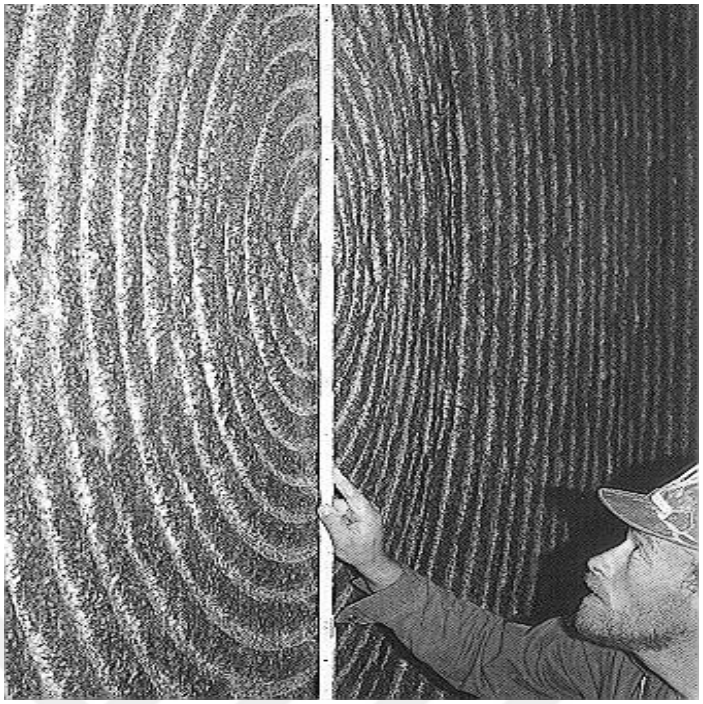
Çap mm (inç)	Keski uç genişliği mm (inç)	Yatak kapasitesi kN (lb)
432 (17)	12,7 (0,500)	222 (50.000)
	15,875 (0,625)	245 (55.000)
	19,05 (0,750)	267 (60.000)
483 (19)	15,875 (0,625)	289 (65.000)
	19,05 (0,750)	311 (70.000)

4.2. Keskilerin Kesici Kafaya Yerleştirilmesi

Keskilerdeki diğer bir önemli konu ise keskilerin kesici kafadaki yerleşim şekilleridir. Optimum keski tasarımı, tünel için uygun bir makinenin seçilmesi kadar önemlidir. TBM tünelciliğinin ekonomisi ilerleme hızına, birim kayacı kesmek için sarf edilen keski maliyetine ve keski değiştirilmesinden kaynaklanan duraklamaların minimize edilmesine dayanır. Disk keskilerin kesici kafaya yerleştirilmesi üç ana grupta toplanabilir (Şekil 4.4). Bunlar; merkez keskiler, yüzey keskileri ve köşe keskileridir. Keskiler kesici kafanın dönüş merkezinden itibaren yerleştirilmeye başlanır ve merkezden uzaklaştıkça yerleştirilme aralıkları azalır. Merkezden en uzağa yerleştirilen son keski, tünel kesitinin yarıçapını tanımlar. Kesici kafaya gelen yükü düzenli bir şekilde yaymak için keskiler belirli bir sistemde kesici kafanın üzerine yerleştirilirler. Keskilerin tümü kendileri için belirlenen yarı çapta dönüş yaparlar (Şekil 4.5). Kesici kafanın merkezini kapatmak için tek bir keski yatağına dört adet keski yerleştirilir ve bunlara merkez keskiler adı verilir. Daha sonra tek tek yerleştirilen keskiler yüzey keski gurubunu oluşturur. Yüzey keski grubunun ardında, kesici kafaya biraz açılı olarak yerleştirilen köşe keskilerdir.



Şekil 4.4. Disk keskilerin TBM kesici kafasındaki yerleşimleri (Özdemir, 1995).



Şekil 4.4. TBM kazısından sonar oluşan ayna görünümü (Özdemir, 1995)

4.3. Keskiler Arası Mesafe ve Keski Sayısı

Birim hacimdeki kayayı belirli keskiler arası mesafede kesebilmek için harcanan enerjiler karşılaştırıldığında her bir kaya için optimum bir keskiler arası mesafenin olduğu belirlenmiştir. Bu keskiler arası mesafeyi, esas olarak formasyonun yapısı etkilemektedir. Oluşan küçük kırıntılar/kesintiler nedeniyle birim hacimdeki kayayı kesmek için daha çok spesifik enerji sarfiyatına sebep olur ve kazı işinin ekonomikliği azalır. Büyük boyutlu kesintilerin elde edilebilmesi için kesici kafa parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir.

Optimum kırıntı boyutuna ulaşmak için ortalama keskiler arası mesafe kayaç özelliklerine göre değişmektedir. Kesici kafanın çapı ile kullanılacak olan keski miktarının doğrusal olarak arttığı bilinmektedir. Bir TBM'in ne kadar keskiye gereksinimi olduğu aşağıdaki Denklem (4.1) ile hesaplanabilir (Balcı,2009);

$$N_c = \frac{D_{TBM}}{2S} + N_{köşe} \quad (4.1)$$

Burada;

D_{TBM}: Kesici kafanın çapı (mm)

S: Optimum kesinti boyutuna ulaşmak için ortalama keskiler arası mesafe (mm)
$N_{köşe}$: Kafadaki köşe keski sayısı (3–10)

Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tüneli TBM için gerekli disk sayısı keskiler arası mesafe 70-80 mm, kazı çapı 3000 mm ve köşe keski sayısı 3 adet olarak düşünüldüğünde;

$$N_c=\frac{3000}{2x80}+3=21,75 \quad (4.2)$$

21,75 adet disk keski ile kesici kafanın donatılmasının uygun olacağı ortaya çıkmaktadır.

4.4. Kesici Kafa Dönüş Hızı (Devir, RPM)

Disk keski yataklarının ve yatak tutucularının kapasiteleri kafanın çevresel dönüş hızını belirlemektedir. Disk keski üreticileri tarafından önerilen köşe keskilerin dönüş hızları disk keski çapına dayanmaktadır. Örneğin; bugünün disk keski teknolojileri ile 432 mm'lik bir keski için tavsiye edilen köşe keski hızı 152 m/dk'dır. Bu bilgi göz önüne alındığında kesici kafanın devri, kesici kafanın çapı ve tavsiye edilen disk keski hızının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki Denklem (4.3) ile hesaplanır;

$$RPM=\frac{V}{\pi x D_{TBM}} \quad (4.3)$$

Burada;
V: Kabul edilebilir disk keski hızı (m/dak)
D_{TBM}: Kesici kafanın çapı (m)

Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tüneli TBM için gerekli devir sayısı kazı çapı 3000 mm ve 305 mm'lik disk keski için köşe keski hızı 90 m/dak' düşünüldüğünde;

Nc=3000/(πx90)=0-10 rpm uygun olacağı ortaya çıkmaktadır.

4.5. Kesici Kafa Gücü ve Tork Gereksinimi

Kesici kafaya monte edilmiş olan bütün keskilerin kazı işlemine karşı göstermiş oldukları direnç, gerekli olan torkun ve makine gücünün belirlenmesini sağlar. Kesici

kafanın arkasına yerleştirilen elektrik motorları yardımıyla da kesici kafanın hareketi sağlanır.

Torku veya gücü hesaplarken kullanılan formül, kaya formasyonunun, disk keskinin ve kesici kafa çapının bir fonksiyonudur. Aşağıdaki basit ve güvenilir Denklem (4.4), sert kaya formasyonlarında kullanılan TBM'lerin tork gereksinimlerinin hesaplanabilmesi için kullanılmaktadır (Balcı, 2009);

$$T=\frac{N_c F_R D_{TBM}(0,54) f_L}{2} \quad (4.4)$$

Burada;
Nc: Disk sayısı
FR: Keski başına ortalama yuvarlanma kuvveti (kN)
D_{TBM}: Kesici kafa çapı (m)
0,54: Ortalama kuvvet moment kolu
f_L: Sürtünme kayıpları

Disk keski başına gelebilecek yuvarlanma kuvvetleri için laboratuarda doğrusal kesme deneyleri yapılmalıdır. Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tünelinden büyük boyutlu kaya numunesi alınamadığı için yuvarlanma kuvvetleri elde edilememiştir. Ancak daha önce araştırmacılar tarafından geliştirilen abaklar yardımı ile tahmin edilmiş olup raporun ilerideki ilgili bölümde bu değerler öngörülmüştür.

Gerekli olan tork ve devir bilindiği takdirde, gerekli olan makine gücü de Denklem (4.5) ile hesaplanabilir (Balcı, 2009);

$$Güç=2x\pi xRPMxT \quad (4.5)$$

Burada;
Güç: Makine gücü (kW)
T: Tork (kNm)
RPM: kesici kafanın bir dakikadaki dönüş hızı

Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tünelinde kullanılması düşünülen TBM'in kesici kafa gücü Bölüm 6'da detaylı olarak verilmiştir.

4.6. İtme Kuvveti Gereksinimi

Denklem (4.6), sert kaya formasyonlarında kullanılan TBM'lerin itme kuvveti gereksinimlerinin hesaplanabilmesi için kullanılmaktadır (Balcı, 2009);

$$FT=N_c x F_N x f_L \quad (4.6)$$

Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tünelinde kullanılması düşünülen TBM'in itme kuvveti Bölüm 6'da detaylı olarak verilmiştir.

4.7. Cerchar Aşındırıcılık Testi (CAI)

Cerchar aşınma deneyi, kayaçların aşındırıcılığını belirten, keski tüketimi ve maliyetleri hakkında bilgi veren indeks bir testtir (Şekil 4.6) . Bu deney yeni kırılmış taze kaya yüzeyleri üzerinde yapılmaktadır. Kayaçların Cerchar aşındırıcılığı 0,5 ile 6 arasında değişmektedir.

160 kg/mm^2 çekme dayanımı olan 90 derece tepe açılı konik bir uç 7 kg bastırma kuvveti ile kayaç üzerinde çekilmekte ve uçta oluşan aşınma yüzeyi kayaç numunesinin aşındırıcılığı vermektedir (West, 1989).



Şekil 4.5. Cerchar aşındırıcılık tayini ve test aleti

ASTM deney standardına göre Cerchar aşındırıcılık indeksi sınıflaması Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. ASTM 2010'a göre CERCHAR aşındırıcılık indeksi sınıflandırması (ASTM, 2010)

Cerchar Aşındırıcılık İndeks (CAI) Değeri	Sınıflama
0,00 – 0,30	Aşındırıcı değil
0,30 – 0,50	Çok az aşındırıcı
0,50 – 1,00	Az aşındırıcı
1,00 – 2,00	Orta aşındırıcı
2,00 – 4,00	Çok aşındırıcı
4,00 – 6,00	Son derece aşındırıcı
6,00 – 7,00	Kuvars

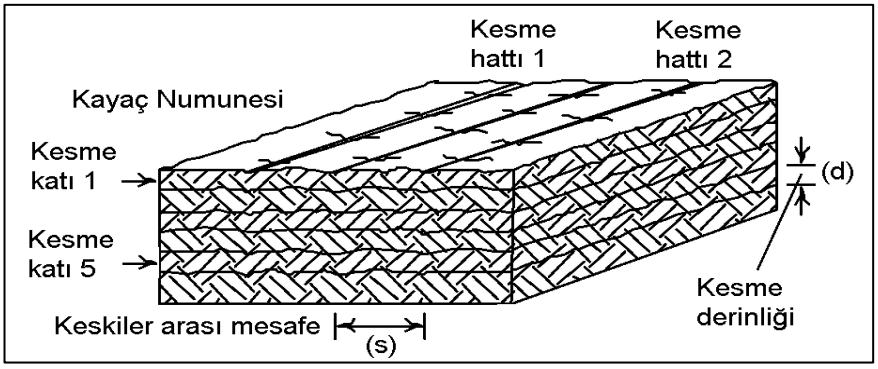
Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tüneli güzergahından alınan numunelerin CAI Sonuçları Tablo 4.4'te özetlenmiştir.

Tablo 4.4. Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tüneli güzergahından alınan numunelerin CAI sonuçları (Balcı, 2016)

Sondaj No	Derinlik (m)	Formasyon	CAI Değeri	Sınıflama
TSK-1	62,10-62,15	KAZMALI FM	0,30	Aşındırıcı değil
TSK-2	71,25	BALLIKAYA FM	2,36	Çok aşındırıcı
TSK-3	10,80-11,00	BALLIKAYA FM	2,22	Çok aşındırıcı
CSK-3	44,90-45,00	TRAKYA FM	0,41	Çok az aşındırıcı
CSK-3	83,30-83,40	TRAKYA FM	0,33	Çok az aşındırıcı
CSK-5	19,60-19,75	AKVEREN FM	0,75	Az aşındırıcı

4.8. Kesme Derinliği

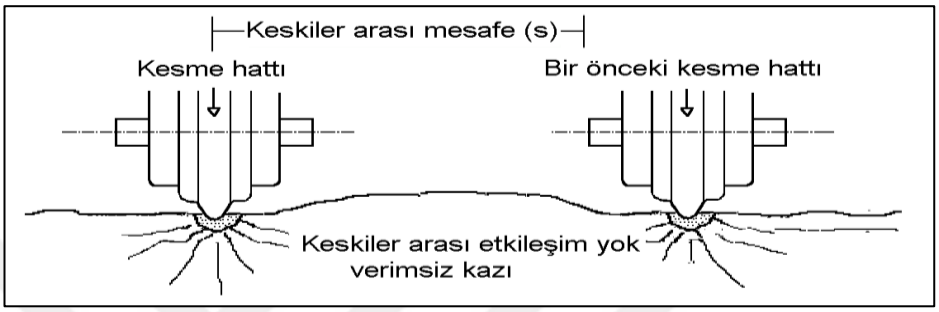
Her numunenin kırılma mekanizması göz önüne alınarak, farklı kesme derinliklerinde kaya kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7'de kaya kesme işlemlerinin yapılmasına dair kesme hattı, kesme derinliği ve keskiler arası mesafenin nasıl oluşturulması gerektiği verilmektedir.



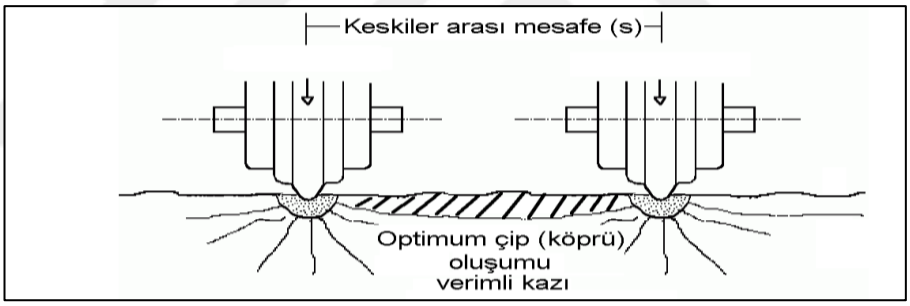
Şekil 4.6. Kaya kesme deneyleri parametrelerinin görünümü (Balcı vd., 2005)

4.9. Kesme Düzeni

Yardımsız kesme; bir kesme hattının bir sonraki kesme hattıyla etkileşmeden kazı işleminin yapılmasıdır (Şekil 4.8). Buradaki amaç, keskiye gelen maksimum kuvvetlerin belirlenmesidir. Yardımlı kesme; Yan yana kesilen iki hattın bir biri ile etkileşimine izin verilmesidir (Şekil 4.9). Buradaki amaç ise optimum s/d oranın+ belirlenmesidir (Balcı, 2009).



Şekil 4.7. Kaya kesme deneylerinde yardımsız kesme tanımı

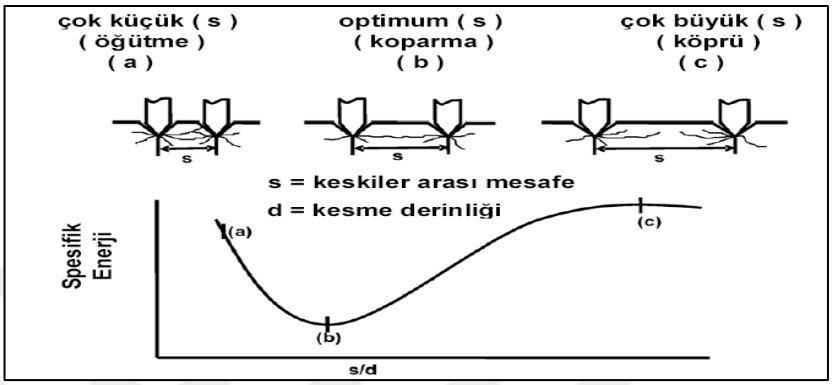


Şekil 4.8. Kaya kesme deneylerinde yardımlı kesme tanımı

4.10. Spesifik Enerji

Kazı mekaniği prensiplerine bağlı olarak yapılan kesme deneylerinde, optimum keskiler arası mesafe/kesme derinliği (s/d) oranı değerinde, birim hacimdeki kayacı kesmek için gerekli olan spesifik enerji en az olmaktadır. Bu değer SE ile ifade edilmektedir ve birimi kWh/m^3 ile gösterilmektedir. Optimum keskiler arası mesafe, kesme derinliğine bağlı olduğundan, boyutsuz olan s/d oranı optimum çalışma şartlarını vermektedir (Şekil 4.10). Şekil 4.10'da; (a) ile gösterilen kesme koşulu, keskiler arası mesafenin birbirine çok yakın olduğunu ifade etmektedir ve kesme işleminde iki hat arasından pasa öğütülmüş olarak alınır, bunun anlamı çok yüksek spesifik enerji değeridir ve verimsiz kesme işlemi olarak adlandırılır. (b) ile gösterilen kesme koşulu, optimum keskiler arası mesafeyi göstermektedir, böylece

iki kesme hattı arasından iri parçalar kopartılabilir ve optimum spesifik enerji değerlerine ulaşılır. (c) ile gösterilen kesme koşulu ise, keskiler arası mesafenin birbirine çok uzak olduğunu ifade etmektedir ve kesme hatlarının birbiri ile etkileşimi gerçekleşmediğinden çok yüksek spesifik enerji değeri elde edilir ve verimsiz kesme işlemi olarak adlandırılır (Balcı, 2009).



Şekil 4.9. Keskiler arası mesafe ve kesme derinliğinin spesifik enerjiye etkisi (Balcı, 2009)

4.11. TBM Disk Keski Tüketiminin Tahmini

Keski tüketim tahmini, sabit kesitli disk keski kullanılması kabulü ile yapılmıştır. Keski maliyet hesaplamaları genel olarak yaklaşık yapılmıştır. Hesaplamalar aşağıdaki gibidir (Balcı, 2016):

1) Kayaların Cerchar Aşındırıcılık İndeksinin (CAI) deneylerle bulunması.

2) Keski ömrünün metre olarak (CL) bulunması;

$$CL=\frac{2x10^6}{CAI}, \text{ metre} \qquad (4.7)$$

3) Keski değiştirmeden önce, TBM kesici kafasının kaç dönüş yapması (NR) gerektiğinin bulunması;

$$NR=\frac{CL}{2\pi xRxSF} \qquad (4.8)$$

R = Keskinin dönüş yarıçapı (metre). Ortalama R değerleri, merkez keskiler için TBM çapının yaklaşık 1/8 'i, ayna keskileri için yaklaşık 1/4 'ü ve köşe keskiler için 1/2,25 'i alınabilir veya tek tek tüm keskiler için hesaplama yapılabilir.

SF = Keski konumuna göre belirlenen katsayı. SF, merkez keskiler için 1,0, ayna keskileri için 1,2 ile 1,5 arasında (ortalama 1,35) alınabilir ve köşe keskiler için 10 ile 20 (ortalama 15) alınabilir.

4) Keski ömrünün saat olarak (CLH) bulunması;

$$CLH=\frac{NR}{PRMx60}, \text{ saat} \quad (4.9)$$

RPM = TBM kesici kafasının dakikadaki devir (dönüş) sayısı

5) Keski değişimi başına kaç metre küp kazı yapıldığının (PPCC) hesaplanması;

$$PPCC=\frac{IPRxAxCLH}{N_c}, m^3 \quad (4.10)$$

IPR = Net Kazı Hızı (metre / saat)

6) Her bir keski değişim maliyetinin (CPC) bulunması;

$$CPC=\frac{HubCost+\frac{Rings}{Hub}xRingCost}{\frac{Rings}{Hub}} x1,15 \text{ her bir keski değişimi için TL veya USD} \quad (4.11)$$

Buradaki Ring / Hub parametresi, her bir hub değiştirilmeden önce, o hub'da kaç adet ring değiştirildiğini göstermektedir. Hub başına ortalama 5 ile 7 ring kullanımı (ortalama 6) kabul edilebilir. Ayrıca, 1,15 katsayısı, çeşitli keski parçaları için %15'lik bir ilave maliyeti kapsamaktadır.

Her bir metre küp kazı için keski maliyetinin (CCCM) bulunması;

$$CCCM=CPC/PPCC, USD/m^3 \quad (4.12)$$

Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tüneli keski ömrü ve maliyeti hesaplamalarında kullanılan girdi parametreleri şöyledir:

- Kesici Kafa Çapı = 3 m
- Toplam Keski Sayısı = 24
- Merkez Keski Sayısı = 4
- Ayna Keskisi Sayısı = 15
- Köşe Keski Sayısı = 5

- Kesici Kafa Dakikadaki Devir Sayısı = 6 RPM
- Kazmalı Formasyonu için Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (TSK-1)= 0,30
- Ballıkaya Formasyonu için Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (TSK-2)= 2,36
- Ballıkaya Formasyonu için Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (TSK-3)= 2,22
- Trakya Formasyonu için Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (CSK-3)= 0,41
- Trakya Formasyonu için Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (CSK-3)= 0,33
- Akveren Formasyonu için Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (CSK-5)=0,75
- Kazmalı Formasyonu için Net Kazı Hızı = (TSK-1)= 3,5 m/saat
- Ballıkaya Formasyonu için Net Kazı Hızı = (TSK-2)= 2 m/saat
- Ballıkaya Formasyonu için Net Kazı Hızı = (TSK-3)= 2 m/saat
- Trakya Formasyonu için Net Kazı Hızı = (CSK-3)= 3,6 m/saat
- Trakya Formasyonu için Net Kazı Hızı = (CSK-3)= 3,6 m/saat
- Akveren Formasyonu için Net Kazı Hızı = (CSK-5)= 2,5 m/saat
- Ring / Hub = 6
- Bir Hub Maliyeti = 2000 USD
- Bir Ring Maliyeti = 200 USD,
- TL / USD = 2,82

Farklı formasyonlar İçin Keski Ömrü ve Maliyet Tahminleri Tablo 4.5' ve Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.5. Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tüneli farklı formasyonlar İçin keski ömrü ve maliyet tahminleri (Balcı, 2016)

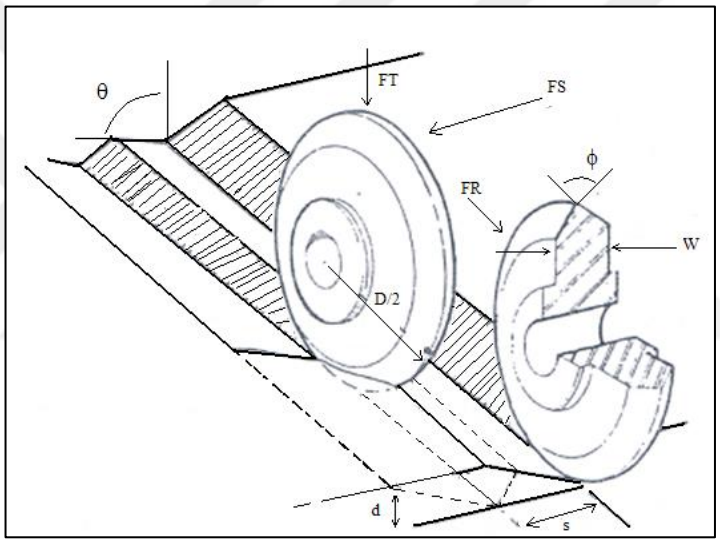
Formasyon	Cerchar Aşındırıcılık İndeksi (CAI)	Keski Ömrü (metre olarak)	Keski Değişimi Öncesi Kesici Kafa Dönüş Sayısı (NR)			Keski Ömrü (Saat Olarak)			Her Bir Keski Değişimi Başına Kazı Miktarı (PPCC)		
		CL	NR_{merkez}	NR_{ayna}	$NR_{köşe}$	CLH_{merkez}	CLH_{ayna}	$CLH_{köşe}$	$PPCC_{merkez}$	$PPCC_{ayna}$	$PPCC_{köşe}$
		(m)	(dönüş)	(dönüş)	(dönüş)	(saat)	(saat)	(saat)	(m^3)	(m^3)	(m^3)
Kazmalı Fm (TSK-1)	0,30	6666667	2829421	1047934	53052	7860	2911	147	12153	1200	182
Ballıkaya Fm (TSK-2)	2,36	847458	359672	133212	6744	999	370	19	883	87	13
Ballıkaya Fm (TSK-3)	2,22	900901	382354	141613	7169	1062	393	20	938	93	14
Trakya Fm (CSK-3)	0,41	4878049	2070308	766781	38818	5751	2130	108	9146	903	137
Trakya Fm (CSK-3)	0,33	6060606	2572201	952667	48229	7145	2646	134	11364	1122	170
Akveren Fm (CSK-5)	0,75	2666667	1131768	419174	21221	3144	1164	59	3500	346	53

Tablo 4.6. Darıca–Bayramoğlu TBM atıksu tüneli farklı formasyonlar İçin keski maliyet tahminleri

Formasyon	Keski Değişim Maliyeti (CPC)	Keski Değişim Maliyeti (CPC)	Metreküp Kazı Başına Keski Maliyeti (CCCM)			Ortalama Keski Maliyeti	Metreküp Kazı Başına Keski Maliyeti (CCCM)			Ortalama Keski Maliyeti
			$CCCM_{merkez}$	$CCCM_{ayna}$	$CCCM_{köşe}$	$CCCM_{ortalama}$	$CCCM_{merke}$	$CCCM_{ayna}$	$CCCM_{köşe}$	$CCCM_{ortalama}$
	(USD)	(TL)	(USD/m^3)	(USD/ m^3)	(USD/ m^3)	(USD/ m^3)	(TL/ m^3)	(TL/ m^3)	(TL/ m^3)	(TL/ m^3)
Kazmalı FM	268	757	0,02	0,22	1,47	0,45	0,06	0,63	4,15	1,27
Ballıkaya FM			0,30	3,08	20,26	6,20	0,86	8,68	57,15	17,47
Ballıkaya FM			0,29	2,90	19,06	5,83	0,81	8,16	53,76	16,44
Trakya FM			0,03	0,30	1,96	0,60	0,08	0,84	5,52	1,69
Trakya FM			0,02	0,24	1,57	0,48	0,07	0,67	4,44	1,36
Akveren FM			0,08	0,78	5,11	1,56	0,22	2,19	14,41	4,41

5. TBM PERFORMANS TAHMİNİ, GÜNLÜK İLERLEME İLE TÜNEL BİTİM SÜRESİNİN YAKLAŞIK HESABI

Bu tasarıma göre kazıyı gerçekleştirecek Tünel Delme Makinesinin (TBM) performansı, ilerleme hızı tünel güzergâhındaki birimlerin mühendislik jeolojisi ve jeoteknik özellikleri dikkate alınarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Tam cepheli tünel açma makinelerinde kullanılan disk keskilerin tasarım parametrelerinin kaya kesme işlemi sırasındaki gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir (Bilgin vd. 2014).



Şekil 5.1. Disk keskilerin tasarım parametreleri (Bilgin, 1989)

Burada;

s: Keskiler Arası Mesafe (mm)

d: Kesme Derinliği (mm)

w: Disk kalınlığı (mm)

D: Disk çapı (mm)

ϕ: Disk açısı

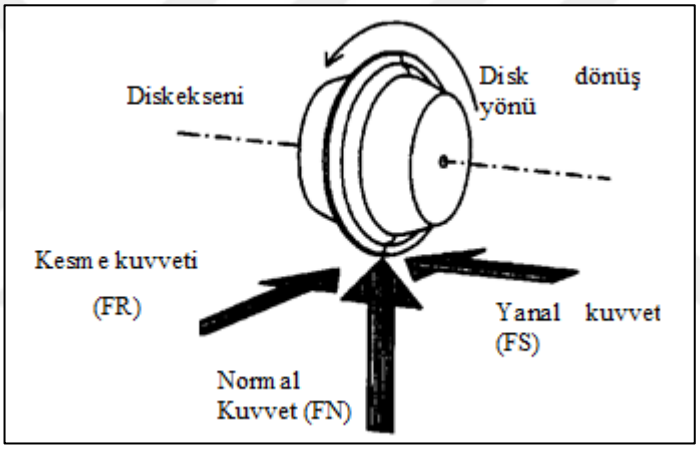
θ: Kayaç sökülme açısı

FR: Yuvarlanma Kuvveti (kN)

FT: Normal Kuvvet (kN)

FS: Yanal Kuvvet (kN)

Disk keskiye gelen kuvvetlerin şematik gösterimi Şekil 5.2'de görülmektedir. Bu kuvvetler (normal, yanal ve yuvarlanma kuvveti), tünel açma makinesinin kesici kafa tasarımı, optimizasyonu ve makine dizaynında kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, bu kuvvetler kesici makinenin işletimi ve performansının tahmininde de kullanılmaktadır. Bu bilgiler, kaya koşullarında kazı yapacak makinelerin mekanik kazı sistemlerinin fizibilite çalışmalarında da önemli yer tutmaktadır. Normal kuvvetler, disk keskilerin kayaya bastırması işleminde ilerlemeyi sağlayabilmek için gerekli olan itme kuvvetinin belirlenmesinde hesaba katılır. Yuvarlanma kuvvetleri, kesici kafanın dönüşü esnasında gerekli olan tork ve güç gereksinimini ifade eder. Yanal kuvvetler ise genellikle makine kesici kafanın balansında titreşimleri en aza indirmek için kullanılmaktadır.



Şekil 5.2. Disk keskiye gelen kuvvetlerin şematik gösterimi (Balcı, 2009)

Rostami ve Ozdemir, disk keski altında kalan kırılma basıncını hesaba katarak, bu keskiler için bir teori geliştirmiştir. Bu çalışması günümüzde TBM'lerde sıkça kullanılan sabit kesit alanlı (CCS) disk keskiler içindir. FN ve FR kuvvetleri, toplam FT ve kesme katsayısı kullanılarak Denklem (5.1)'deki gibi tanımlanmıştır;

$$F_T = \frac{PxRxTx\gamma}{\Psi+1} \qquad (5.1)$$

Burada;

P: Yüzeye uygulanan basınç, MPa

R: Disk keski yarıçapı, mm

T: Keski ucu kalınlığı, mm

ψ: CCS tip keskiler için ψ değeri sıfıra yakındır ve artan keski ağzı genişliği ile azalır. V tip keskiler için bu değer 1 civarındadır;

$$\gamma=\cos^{-1}\left(\frac{R-d}{R}\right) \quad (5.2)$$

R: Disk keski yarıçapı, mm

d: Kesme derinliği, mm

Bu eşitliklerde, P dışındaki bütün değişkenler bilinmektedir. P ise kesme geometrisi (keskiler arası mesafe ve kesme derinliği) ve kaya özelliklerinin (basınç ve çekme dayanımı) bir fonksiyonudur. Ezilme zonu için genel bir çözüm bulunamamış ve sadece doğrusal kazı seti kullanılarak tanımlamaları yapılabilmiştir. Rostami ve Ozdemir disk keski altındaki temel basıncı tahmin etmek için Denklem (5.3) eşitliğini önermiştir. Bu çalışma laboratuardaki tam boyutlu doğrusal kazı seti veri bankasındaki değerlerden elde edilmiştir. Disk keski altında kalan basıncın bilinmesiyle, Denklem (5.4) ve (5.5) kullanılarak, disk keskiye gelen FN ve FR kuvvetleri hesaplanabilir;

$$P=C\sqrt[3]{\frac{sx\sigma_c^2\sigma_T}{\gamma\sqrt{RxT}}} \quad (5.3)$$

Burada;

C : Birimler arası dönüşüm katsayı ≈ 2,12

s : Keskiler arası mesafe, mm

σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı, MPa

σ_t : Kayacın çekme dayanımı, MPa

$$F_N=F_T\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (5.4)$$

$$F_R=F_T\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (5.5)$$

Burada;

F_N: Normal kuvvet, N

F_R: Yuvarlanma kuvveti, N

TBM performans tahmini için NTNU ve Colorado School of Mines da kullanılan tam boyutlu kesme seti yöntemi gibi birçok performans tahmin yöntemleri geliştirilmiştir, Bilgin, Copur, Balcı (2013). Ama bunların hiç biri İstanbul'da olduğu gibi zor jeolojik şartlarda kullanılan EPB tipi TBM'ler için geçerli değildir. Bu nedenle İstanbul'da son on senedir kullanılan TBM verileri değerlendirilmiş ve İstanbul şartlarına uygun bir EPB-TBM performans tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem Üsküdar–Ümraniye Metro tünellerinde denenmiş ve tahmin edilen değerlerin yerinde elde edilen değerlere çok yakın olduğu bulunmuştur. Geliştirilen bu yöntem Darıca–Bayramoğlu TBM atıksu tünellerinde kullanılacak EPB-TBM'lerin performans analizinde de aşağıda anlatılacağı gibi kullanılmıştır.

5.1. Spesifik Enerji Kavramına Dayalı TBM Performans Tahmini

Spesifik enerji birim hacimdeki kayacı kesmek için gerekli enerji olarak tarif edilir ve kazı sisteminin verimliğini belirleyen en önemli faktördür, aynı zamanda Denklem (5.6)'da verildiği gibi mekanik kazıda net kazı hızının hesaplanmasında kullanılır (Bilgin vd., 2014). Şekil 5.3'de tarif edilen optimum spesifik enerji değeri Şekil 5.4'de verilen kazı seti yardımı ile bulunur (Balcı, 2009);

$$NPR=kP/SE \tag{5.6}$$

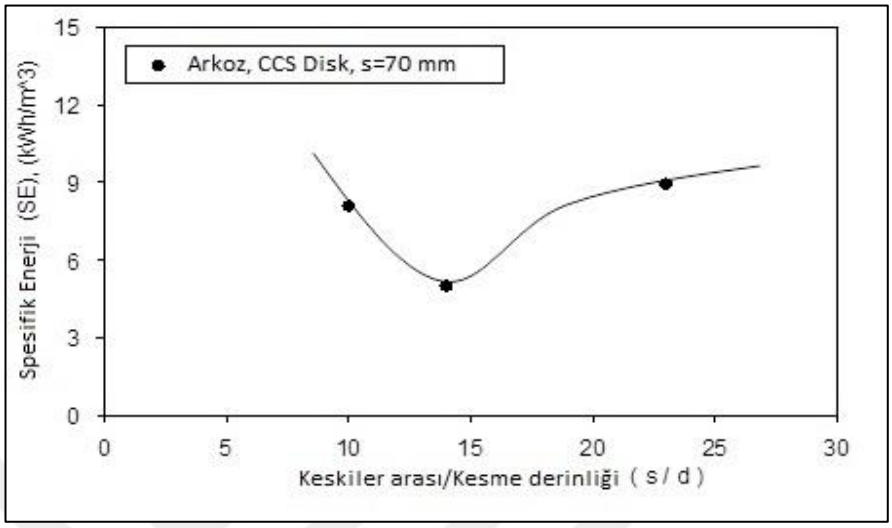
Bu denklemde NPR (m^3/h) olarak net kazı hızı, k ise kesici kafa ile kazı arını arasındaki enerji transfer katsayısıdır ve bu değer genelde 0,8'dir. P, TBM in kazı için harcadığı ortalama güçtür ve SE (kWh/m^3) olarak spesifik enerjidir.

TBM'in kazısı sırasındaki spesifik enerji değeri ise aşağıdaki Denklem (5.7)'nin yardımı ile bulunabilir;

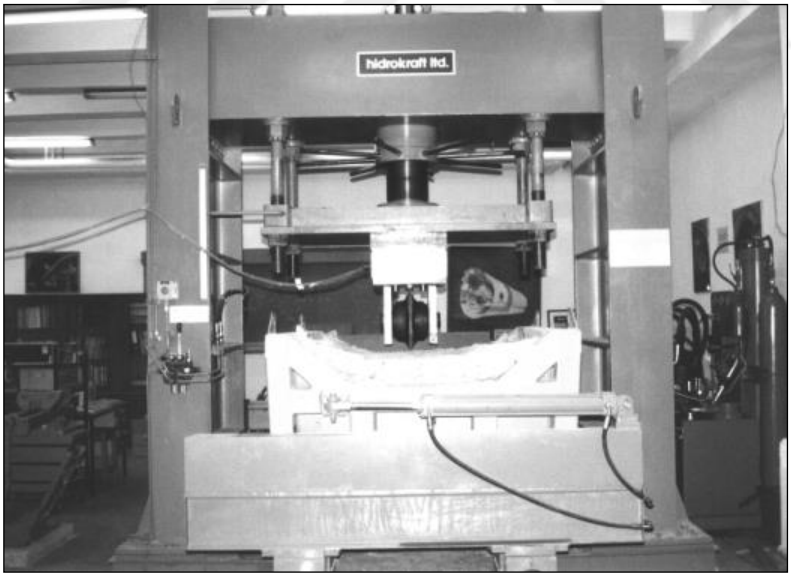
$$SE=2\pi NT/NPR \tag{5.7}$$

Burada N (rpm) olarak kesici kafanın dönüş hızıdır, T, TBM (kN.m) olarak torkudur ve direk olarak TBM kayıt sisteminden elde edilir, ($2\pi NT$) ise belirli bir dönüş hızı ve tork değerindeki TBM in kesme sırasında harcadığı güçtür.

Yukarıda verilen (5.6) ve (5.7) nolu denklemler, yerindeki spesifik enerji değerleri ve kazı sırasında TBM in harcadığı ortalama kazı gücü bilindiğinde, TBM in net üretim veya kazı hızının hesaplanabileceğini göstermiştir.



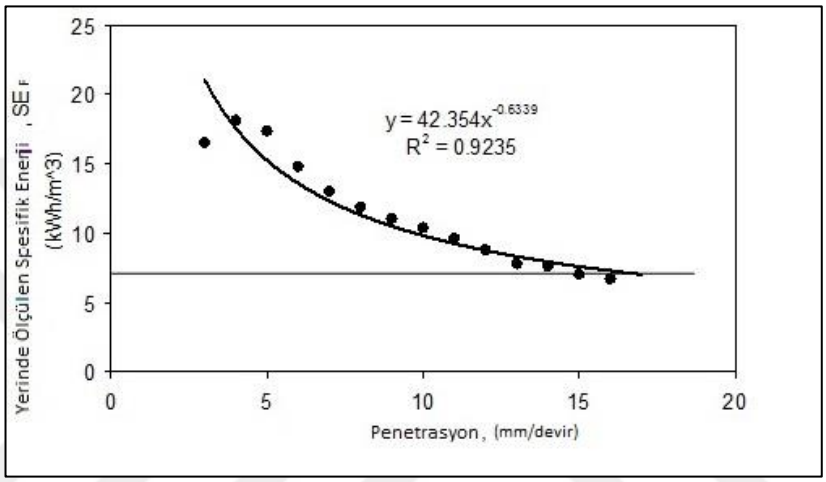
Şekil 5.3. Keskiler arası mesafe/kesme derinliğe oranına bağlı olarak spesifik enerjinin laboratuvar şartlarında değişimine bir örnek



Şekil 5.4. Tam boyutlu lineer kesme deney seti

Kadıköy-Kartal Metro hattında açık modda kazı sırasında elde edilen elde edilen spesifik enerjinin bir devirde elde edilen penetrasyon ile değişimi Şekil 5.5'de verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi belirli bir penetrasyon değerinden sonra spesifik enerji değeri optimum bir değer almaktadır. Aynı şekilde değişik

uygulamalarda elde edilen yerindeki optimum spesifik enerji değerinin aynı kayaçlarda laboratuvarda elde edilen optimum spesifik enerji değerlerine çok yakın olduğu bulunmuştur, Namlı vd (2013). Buna rağmen unutulmaması gereken bir hususta kapalı modda TBM basınç odası pasa ile doludur ve bunu çevirmek için de TBM bir ilave bir enerji harcamaktadır, bu nedenle, EPB şartlarında çalışan TBM'lerde spesifik enerjinin bulunması için laboratuvar şartlarında elde edilen spesifik enerji değerleri 1,8 ile çarpılmalıdır.

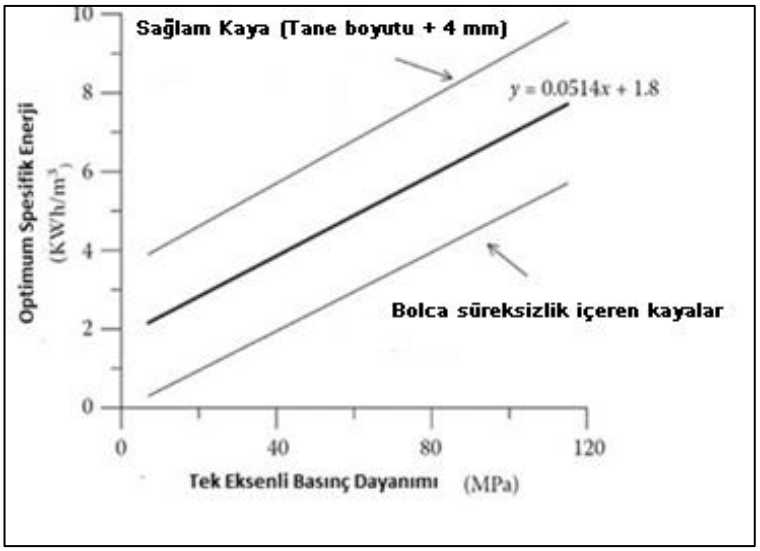


Şekil 5.5. Kadıköy Metro Tünelinde, ortalama basınç dayanımı 45,8 MPa olan Kartal Dolayoba kireçtaşı, siltttaşı ve karbonatlı şeyl için TBM'in Spesifik Enerjisi ve penetrasyon arasındaki değişim (Balcı, 2016)

Laboratuvar şartlarında elde edilen spesifik enerji değerleri ve kayacın basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 5.6'da verilmiştir. Burada dikkat edilecek önemli bir husus eğer kesilen inceleme alanında da olduğu gibi dayanımlı kumtaşı ve konglomera gibi iri taneli bir kaya ortamlarında hesap edilen spesifik enerjinin % 20 kadar arttırılması gerekliliğidir. Eğer TBM de açık modda ilerleme yapılırsa RQD oranına bağlı olarak spesifik enerji aşağıdaki gibi azaltılmalıdır.

100% ≥ RQD ≥ 70%, durumunda spesifik enerji değeri aynı kalır; 70% > RQD ≥ 50%, durumunda spesifik enerji % 5 azaltılır; 50% > RQD ≥ 30%, durumunda spesifik enerji değeri %15 azaltılmalıdır; 20% > RQD, durumunda tünel aynasının göçme ihtimali vardır ve spesifik enerji %20 azaltılır.

EPB-TBM kullanıldığında kapalı modda çalışma durumunda Şekil 5.6'dan elde edilen değer 1,8'le çarpılmalıdır.



Şekil 5.6. Laboratuvar şartlarında elde edilen spesifik enerji değerleri ve kayacın basınç dayanımı arasındaki ilişki (Namlı vd., 2014)

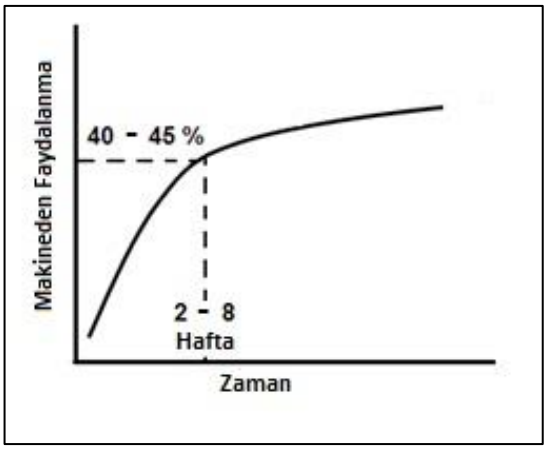
EPB-TBM in kesme sırasındaki ortalama gücü Denklem (5.8)'deki gibi hesap edilebilir;

$$P_{kesme\text{-}EPD}=118{,}8D \tag{5.8}$$

Burada P_{kesme} kW kesme gücü, D ise m olarak TBM in çapıdır.

5.2. TBM Faydalanma Oranının Yaklaşık Hesabı

Günlük ilerlemelerin hesabında makineden faydalanma oranı ve Şekil 5.7'de gösterildiği gibi işi öğrenme zamanı da hesaba katılmalıdır. Makineden faydalanma oranı tüm vardiya süresinde duraklamaların dışında makinenin bir fiil çalışma oranıdır. İşi öğrenme zamanı ise TBM ekibinin işe alışma zamanıdır. Günlük ilerlemelerin hesabında makineden faydalanma oranının önemi büyüktür, bu oran Tablo 5.1 yardımı ile bulunabilir.



Şekil 5.7. TBM ekibinin işi öğrenme eğrisi (Namlı vd., 2014)

Tablo 5.1. TBM den faydalanma oranının tahmininde kullanılan tablo (Namlı vd. 2014)

Duraklamalar		Vardiya süresinde % olarak duraklamalar
Kötü zemin koşulları	Jeolojik formasyonlar arasında geçiş zonları	Birkaç günden 1 haftaya kadar
	Dayklar	Birkaç günden 1 haftaya kadar
	Faylar	Birkaç günden 2 haftaya kadar
	Su	Birkaç günden 1 haftaya kadar
TBM arızaları	Yeni TBM (tecrübeli ekip)	2-4%
	Yeni TBM(tecrübesiz ekip)	4-6%
	Daha önce kullanılmış TBM (tecrübeli ekip)	4-6%
	Daha önce kullanılmış TBM (tecrübesiz ekip)	6-8%
Keski değişimi	Kuvars miktarı 0-20%	5%
	Kuvars miktarı 20% den fazla ve kırıklı çatlaklı zemin	5-10%
	Kuvars miktarı 20% den fazla, masif kaya	10%
Pasa taşıma	Demir yolu ile: Taşıma mesafesi 0-3 km	7%
	Demir yolu ile: Taşıma mesafesi 3 km den fazla	10%
	Bant ile: taşıma mesafesi 0-3 km	5%
	Bant ile: taşıma mesafesi 3 km den fazla	7%
Bakım	Tecrübeli ekip ve yüklenici	10%
	Orta tecrübeli ekip ve yüklenici	15%
Segmentlerin yerleştirilmesi		20-25%
TBM in istasyonlardan geçişi		2-3 hafta
Diğer duraklamalar		10-15%
MAKİNADAN FAYDALANMA		22-43%

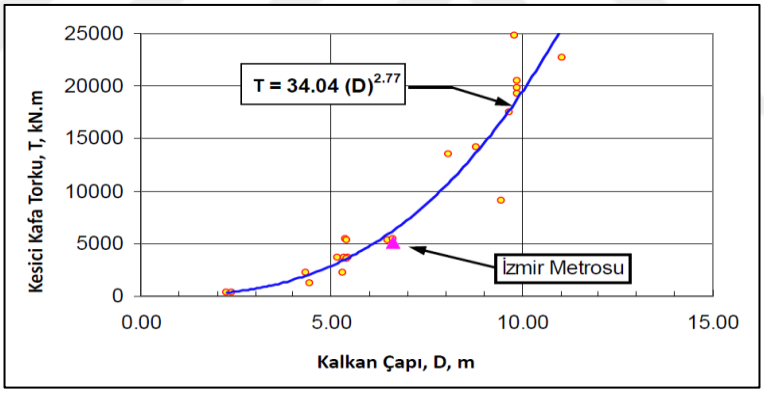
5.3. TBM in Teknik Özelliklerinin Belirlenmesi

TBM in bazı karakteristik değerleri Tablo 5.2'deki bağıntılardan hesap edilebilir.

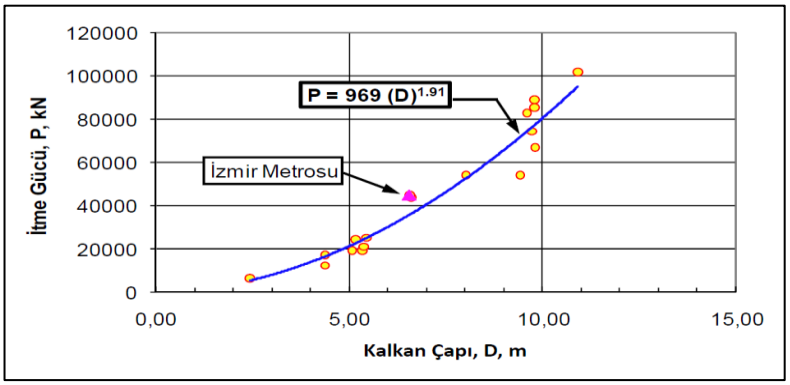
Tablo 5.2. TBM'in bazı teknik özellikleri (Bilgin, 2014)

TBM Türü	İtme Kuvveti (kN)	Tork (kNm)	Toplam Ağırlık (Ton)
EPB	8972 $xD^{0,2208}$	13,438x $D^{3,154}$	9,673 $xD^{2,1956}$
	Min. Değer =-%40	Min. Değer =-%63	
	Max. Değer=+%47	Max. Değer =+%55	

Tablo 5.2'den TBM in itme kuvvetinin 11,435 kN, 4574 kN minimum, maksimum 16,809 kN; torkunun ise 430 kNm, 270 kNm minimum, 667 kN maksimum arasında değişmesi gerektiği, hesaplanmıştır, toplam ağırlığı ise 107 ton olarak hesaplanır. Benzer şekilde Arıoğlu vd. tarafından geliştirilen Şekil 5.8 ve 5.9'dan 3 metre çapındaki TBM'in itme kuvvetinin 7,899 kN; torkunun ise 713 kNm arasında değişmesi gerektiği hesaplanmıştır.



Şekil 5.8. TBM kalkan çapı ile kesici kafa torku arasındaki ilişki (Arıoğlu, 2009)



Şekil 5.9. TBM kalkan çapı ile itme gücü arasındaki ilişki (Arıoğlu, 2009)

İstanbul'da farklı bölgelerde benzer kazı çapında 3 adet projede kullanılan TBM'lerin teknik özellikleri farklı araştırmacıların yayınlarından aşağıdaki Tablo 5.3'de özetlenmiştir.

Tablo 5.3. İstanbul'da benzer kazı çapında kullanılan bazı TBM'lerin genel teknik özellikleri (Balcı, 2016)

	Proje 1	Proje 2	Proje 3
Toplam Uzunluk TBM+Backup	62	62	
Kazı çapı	3,251	3,151	2915
Toplam itme kuvveti	10,688	9,500	9,750
Tork	620-780	620-780	725
RPM	0-9,2	0-9,2	0-16
Kurulu Güç	400	800	620
Verimlilik	29	45	35
EPB	Kapalı ve Açık Mod	Kapalı ve Açık Mod	
Nakliyat	Lokomotif 4 vagon	Lokomotif 4 vagon	
Vardiya	8 saat 3 vardiya	8 saat 3 vardiya	
Örtü Kalınlığı	5-90	10-90	

Tablo 5.3'den görüleceği üzere benzer kazı çapına sahip arazide kullanılan TBM teknik özellikleri ile bu çalışmada tahmin edilen TBM teknik özellikleri önemli ölçüde birbiri ile uyuşmaktadır.

5.4. Darıca – Bayramoğlu TBM İçin Kullanılan Performans Modeli

Bu modelin doğruluğu açılmakta olan Üsküdar-Ümraniye–Çekmeköy-Sancaktepe Metro tünellerinde denenmiştir, Namlı vd. (2014). Tablo 5.4'den de görüldüğü gibi tahmin edilen performans değerleri ve ölçülen değerler birbirlerine çok yakındır.

Tablo 5.4. Üsküdar-Ümraniye–Çekmeköy-Sancaktepe Metro tünellerinin 1 ve 2 hatlarında TBM ölçülen ve tahmini performans değerleri (Namlı vd., 2014)

Kazı parametresi	Tahmini	Ölçülen Tahmini Hat 2	Ölçülen Tahmini Hat 1
Makineden faydalanma oranı %	29-38	16	24
Segment yerleştirme %	23-25	17	21
S.E kWh/m^3	5,7-7,7	6,8	7,3

Tablo 5.4. (Devam) Üsküdar-Ümraniye–Çekmeköy-Sancaktepe Metro tünellerinin 1 ve 2 hatlarında TBM ölçülen ve tahmini performans değerleri (Namlı vd., 2014)

Bekleme zamanı	34-38	20	30
Duraklamalar dahil ortalama, m/gün	8,0-12,3	8,4	11,0
Duraklamalar olmaksızın ortalama m/gün	15,3-28,0	10,6	21,2
İş bitim zamanı, gün	62-99	97	62

5.5. Darıca – Bayramoğlu TBM Atıksu Tünellerinde Kullanılacak EPB-TBM'in Performans Tahminleri

Darıca– Bayramoğlu TBM atıksu tünellerinde kullanılacak EPB-TBM'lerin performans tahmininde kullanılan yöntem için yukarıdaki bilgiler ışığında aşağıdaki Tablo 5.5 oluşturulmuştur. Anlatılan TBM performans yönteminin daha açık ve anlaşılabilir olması için aşağıda bir nümerik örnek verilmiştir (Balcı, 2016).

Tablo 5.5'da görüldüğü gibi TBM'ler (2+510/2+394) m'ler arasında Ballıkaya formasyonunu geçecektir. Tünel kotunda bu formasyonun ortalama basınç dayanımı 30 MPa'dır. Laboratuvar kesme spesifik enerji değeri Şekil 5.6'daki bağıntı yardımı ile 3,34 kWh/m^3 olarak hesap edilir. EPB-TBM e ait yerindeki spesifik enerji değeri ise 3,34x1,8= 6,02 kWh/m^3 bulunur.

3 m çapında bir EPB TBM in ortalama kesme gücü bağıntı 6.7'ye göre 118,8x3 = 356,4 kW dır.

Denklem (5.6)'ya göre net kazı hızı;

$$0{,}8x(356{,}4/6{,}02)=47{,}4m^3/h \quad (5.9)$$

olarak bulunmuştur.

Günde 20 saatlik bir çalışma ile günlük net ilerleme;

$$47{,}4m^3/h \times 20h(4/\pi x3^2)=134{,}1\ m/gün \quad (5.10)$$

olarak bulunur.

Günlük ortalama ilerlemeyi bulmak için bu değer makine faydalanma oranı ile çarpılmalıdır.

Makineden faydalanma oranı Tablo 5.6'de verildiği gibi hesap edilebilir. Buradan da görüldüğü gibi bu örnekte beklenen duraklamalar tüm vardiya süresinin %64'ü, makinadan faydalanma oranı ise %36 olarak hesap edilmiştir. Ayrıca Tablo 5.6'dan de görüldüğü gibi İstanbul'da jeolojik şartların zor olması nedeni ile, her formasyon değiştiğinde, belirli aralıklarla daykla veya faylarla karşılaşıldığında TBM'in ilerlemesinde arızalar oluşmakta ve makine belirli sürelerle beklemektedir.

%36'lık bir makinadan faydalanma oranı ile bu örnek için günlük ilerleme 134,1x0,36 = 48,2 m bulunur.

Tablo 5.5. Nümerik örnek için makineden faydalanma oranının hesap edilmesi (Namlı vd., 2014)

Daha önce kullanılmış TBM (tecrübeli ekip)	%4
Kuvars miktarı 20% den fazla ve kırıklı çatlaklı zemin	%10
Demir yolu ile: Taşıma mesafesi 3 km den fazla	%10
Bakım, tecrübeli ekip ve yüklenici	%10
Segmentlerin yerleştirilmesi	%20
Diğer duraklamalar	%10
Beklenen duraklamalar	%64
Makineden faydalanma oranı	%36

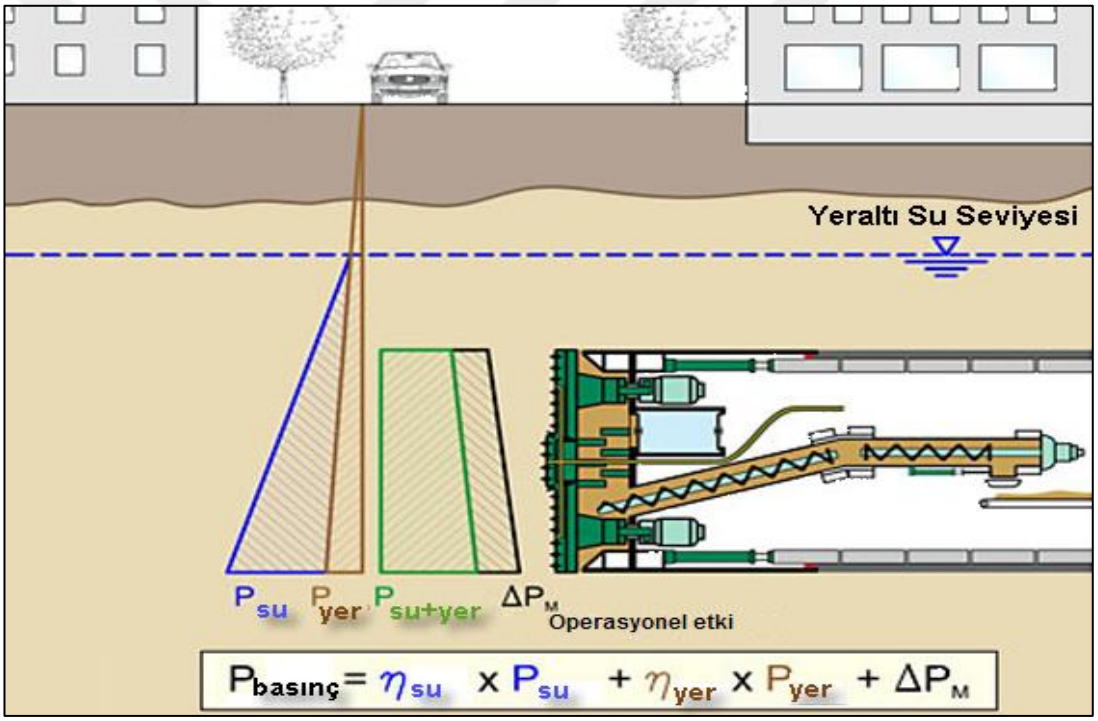
Darıca–Bayramoğlu TBM Atıksu tünellerinde kullanılacak EPB-TBM'in performans tahmini yukarıda anlatılan örnek temel alınarak ayrı ayrı hesaplanmış ve Tablo 5.6'da sonuçları topluca verilmiştir.

Tablo 5.6. Darıca – Bayramoğlu TBM atıksu tünellerinde kullanılacak EPB-TBM'in performans tahmini (Balcı, 2016)

Tünel Metrajı	Litoloji	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama RQD	Kaya Sınıfı (RMR)	SE (kWh/m^3)	Net kazı miktarı(m^3/h)	Net kazı hızı (m/gün)	TBM'den faydalanma oranı (%)	Ortalama net kazı hızı (m/gün)	Bekleme (gün)	Tünel Uzunluğu (m)	Bitim süresi (gün)
2+510/2+394	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI	30	60	54	6,02	47,40	134,17	20	26,8	7	120	11,5
2+394/2+384	MİLONİT	1	-	8	3,33	85,56	242,20	20	48,4	20	30	20,6
2+384/1+676	ÇAKILLI SİLTLİ KİL	0,5	-	10	3,29	86,76	245,61	30	73,7	14	670	23,1
1+676/1+310	KARBONATLI ŞEYL-GROVAK	10	40	36	4,17	68,45	193,78	30	58,1	14	320	19,5
1+310/1+300	MİLONİT	1	-	8	3,33	85,56	242,20	30	72,7	20	30	20,4
1+300/0+760	DOLOMİTİK KİREÇTAŞI	60	75	55	8,79	32,43	91,81	35	32,1	14	570	31,7
0+760/0+750	MİLONİT	1	-	8	3,33	85,56	242,20	30	72,7	20	15	20,2
0+750/0+550	KARBONATLI ŞEYL-GROVAK	10	55	52	4,17	68,45	193,78	30	58,1	14	320	19,5
0+550/0+450	YUMRULU KİREÇTAŞI (KARBONATLI PUDİNG)	12	60	50	4,35	65,54	185,54	30	55,7	14	50	14,9
0+450/0+130	KİLTAŞI (ŞEYL) KUMTAŞI	15	20	33	4,63	61,61	174,41	30	52,3	14	320	20,1
0+130/0+115	MİLONİT	1	-	8	3,33	85,56	242,20	30	72,7	14	30	14,4
0+115/0+00	KİLLİ MİKRİTİK KİREÇTAŞI-MARN	30	60	45	6,02	47,40	134,17	30	40,3	10	130	13,2
TOPLAM												229,2

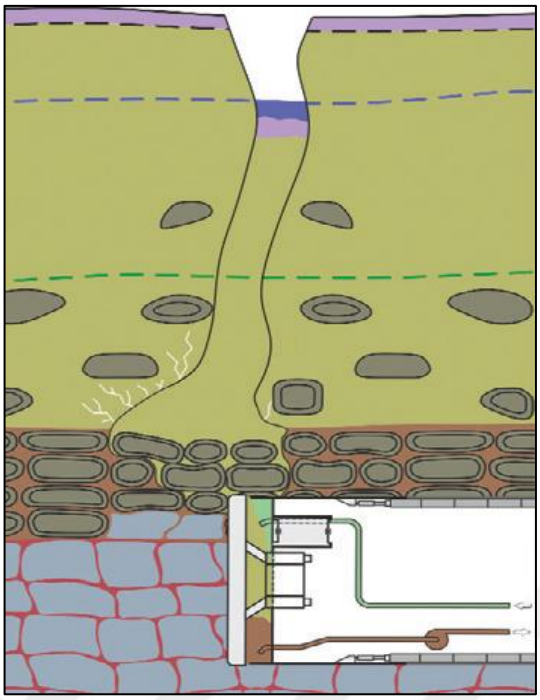
5.6. EPB TBM'lerde Arındırma Basıncı Hesabı

Darıca-Bayramoğlu TBM atıksu tüneli jeolojik kesitinden de görüleceği üzere güzergah boyunca formasyonlar kaya+zemin profili değişkenlik göstermektedir. TBM ile kazıda tünel arınında oluşabilecek arın basıncının; yeryüzünde tasman oluşmaması ve emniyetli çalışma koşullarının sağlanması için hesaplanmalıdır. Tünel aynasında oluşacak toplam basınç, yeryüzü yükleri (statik+dinamik), yer altı suyu basıncı ve sürsarj yataya indirgenmiş yüklerden oluşur. TBM ile kazıda bu oluşacak toplam basıncın dengelenmesi gerekmektedir. Şekil 5.10'da EPB TBM'e yerüstü arazi+trafik+bina yükleri ve yer altı suyunun oluşturduğu basınçlar ve buna karşı TBM'in ayna basınçları görülmektedir.



Şekil 5.10. EPB TBM arın basıncının dengelenmesi

Yetersiz ayna basıncının sebep olduğu göçme ve tasman Şekil 5.11'deki gibidir. Benzer şekilde arına fazla basınç uygulanması durumunda da yeryüzünde kabarmalar meydana gelmekte ve yine üst yapıya zarar verilebilmektedir.



Şekil 5.11. Yetersiz ayna basıncının oluşturduğu tasman veya göçme (Babendererde, 2015)

Broms ve Bennermark (1967) tarafından yapılan çalışmaya göre, aşağıda formülde verilen stabilite katsayısı (N), kohezyonlu zeminlerde 4'ten küçük veya eşit ise tünel aynasının stabil veya az sınırlı akma olduğu kabul edilmektedir. Bu katsayının 4 ile 6 arasında ise plastik akma ve eğer 6'dan büyük ise tünel aynasında ciddi stabilite problemleri beklenmelidir;

$$N=\left[\frac{\sigma_{sur}+\gamma_b\left(h+\frac{D_{TBM}}{2}\right)-\sigma_T}{C_U}\right] \tag{5.11}$$

Burada,

N = Arın Basıncı Stabilite katsayısı

σ_{Sur} = Yeryüzü basıncı (kPa),

σ_T = Ayna arın basıncı (kPa),

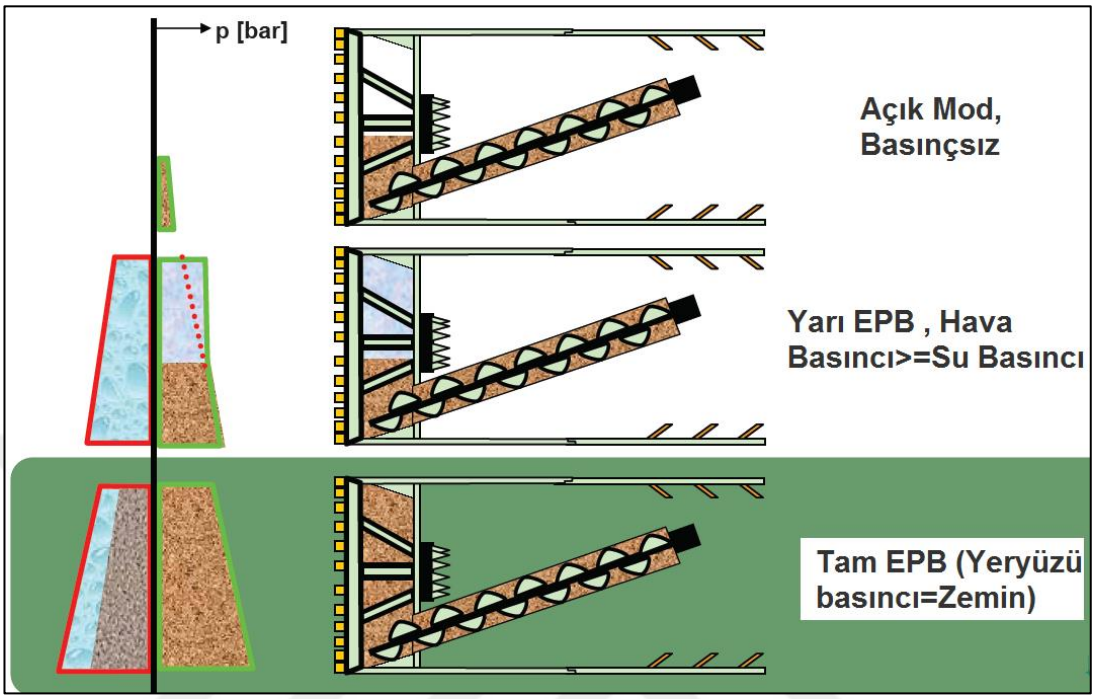
γ_b = Zeminin birim hacim ağırlığı (kN/m^3),

h = Tünelin üst kısmına olan örtü kalınlığı (m),

D_{TBM} = Tünel çapı veya TBM Kazı çapı (m),

C_U = Drenajsız kohezyon, (Kohezyonlu zeminde drenajsız kemse direnci) (kPa).

Tünel arınındaki basınçlar EBP TBM ile Şekil 5.12'deki gibi üç farklı operasyon çalışma yöntemi ile dengelenir.



Şekil 5.12. EPB TBM ile ayna basıncının dengelenmesi

5.7. Anagnastou- Kovari'ye Göre Ayna Basıncı Hesaplama Yöntemi

Şekil 5.13'de görüldüğü gibi homojen zeminde ayna stabilitesi, bir prizmatik zemin kütlesi tarafından yüklenen bir kama şeklindeki zemin kütlesinin sınır dengesi dikkate alınarak değerlendirilir. Bu kayma mekanizması aslında Horn 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.

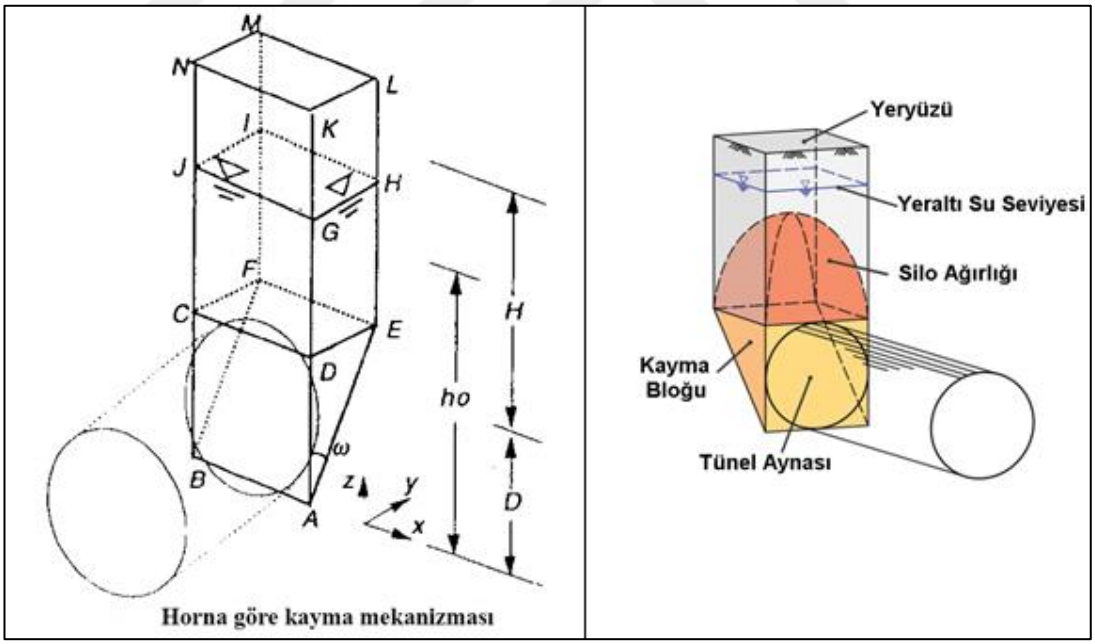
Bir EPB-TBM'in basınç (kazı, çalışma) odası, kazılan pasa ile basınçlı olarak doldurulmuş olduğundan, aynaya etki eden toplam ve efektif gerilmeler arasında bir ayırım olmalıdır. Sadece efektif normal gerilme, kazı aynasına etkiyen gerçek ayna (destek) basıncı olarak ifade edilebilir. Bu parametre "efektif destek basıncı" olarak adlandırılacak ve Şekil 5.14 gibi σ' olarak belirtilecektir. 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.

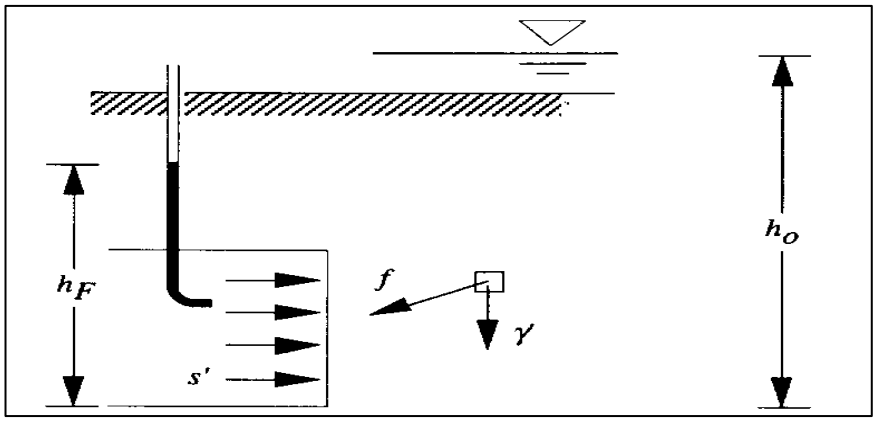
Sınır dengesinde bulunan efektif destek basıncı σ', tünel çapı D, örtü tabakası derinliği H, basınç odasındaki piezometrik basınç h_F, yeraltı suyu seviyesi h_0, kesme mukavemeti parametreleri (c ve φ') ve zeminin suya doygun birim hacim ağırlığına γ' bağlıdır. Boyut analizi kullanarak ve denge ve yenilme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

$$s' = F_0 . Y'.D - F_1 . c + F_2 . Y.\Delta . h - F_3 . c . \Delta h/D \qquad (5.12)$$

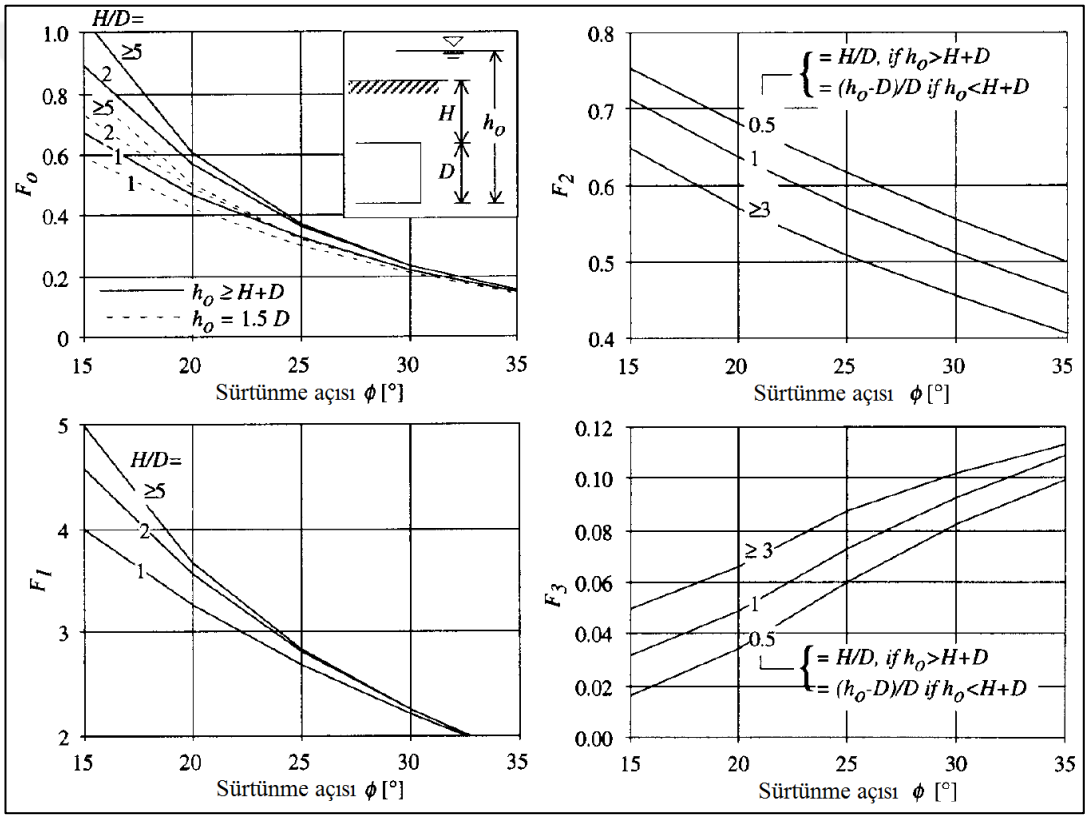
Burada $F_{0\text{-}3}$, içsel sürtünme açısı φ', geometrik parametreler H/D ile $(h_0\text{-}D)/D$ ve kuru ve suya doygun birim hacim ağırlık oranına γ_d/γ' bağlı olan birimsiz katsayılardır, Şekil 5.15'de görülmektedir.



Şekil 5.13. Kabul edilen kayma mekanizması (Anagnostou, 1994; Kovári, 1996)



Şekil 5.14. Bir EPB uygulamasında su sızma kuvveti f ve efektif destek basıncı s' (σ') (Anagnostou, 1994; Kovári, 1996)



Şekil 5.15. F0 ,F1 ,F2 ve F3 boyutsuz katsayıları için nomogramlar (Anagnostou, 1994; Kovári, 1996)

5.8. Anagnastou-Kovari Yöntemi İle Yapılan EPB Ayna Basıncı Hesapları

Anagnastou-Kovari yöntemi ile yapılan EPB ayna basıncı hesapları aşağıdaki Tablo 5.7'de verilmiştir. Bu hesaplamalarda alınan parametreler Darıca-Bayramoğlu TBM Atıksu tünelleri için hazırlanan jeoteknik raporlardan alınmıştır. Hesaplamalarda TBM'in basınç odasındaki suyun piezometrik yüksekliği 0 m kabul edilmiştir.

Anagnastou-Kovari'nin önerdiği yöntem, formasyonun kohezyonuna, iç sürtünme açısına ve yer altı su seviyesine çok duyarlıdır. Bu yöntemle hesap edilen S' ayna basınçları basınç odasının ortasındaki değerlerdir. Tünel Çapı D=3 m, sınırlı ve düşük Basınçlı YSS durumunda ho=10, hf=0 (m) kabul edilmiştir. Tünel güzergâhı 12 parçaya bölünmüş ve her biri için ayrı ayrı ayna basınçları hesaplanmamıştır.

6. DARICA-BAYRAMOĞLU ATIKSU TÜNELİNDE MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ ÖZELLİKLERİNİN TBM UYGULAMA PERFORMANSINA ETKİSİ

Bu bölümde tünel açma makinesinin kazı parametreleri bulunmaktadır. Ayrıca bu yüksek lisans çalışmasının konusu olan kazı parametrelerinin incelenmesi sonucu oluşturulan grafikler ile ilgili kazı parametreleri ve grafikleri de bulunmaktadır.

6.1. Kullanılan Tünel Delme Makinesi (TBM) Genel Bilgileri

Bu yapım yönteminde Darıca-Bayramoğlu Projesi güzergâhı boyunca inşa edilecek olan mekanize tünelin mevcut zemin şartları göz önünde bulundurularak, Pasa Basınç Dengeleyici Tünel Açma Makinesi (Earth Pressure Balance/Tunnel Boring Machine, EPB/TBM) kullanılmıştır. Şekil 6.1'de TBM'in kesici kafa ve diskleri gösterilmektedir. Makinenin Teknik Özellikleri Tablo 6.1'de TBM'in teknik özellikleri detaylı bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Herrenknecht Marka EPB TBM Kesici kafa görüntüsü

Tablo 6.1. TBM'nin teknik özellikleri

Marka, Model	Herrenknecht
Şilt tipi	EPB Zemin TBM
Kesici kafa çapı	2,910 m
TBM uzunluğu	14,17 m
Kesici kafa Devir sayısı	0-6 dev/dak
Disk keski sayısı	27
Motor Sayısı	2
İtme silindiri sayısı	4
İtme silindirinin uzunluğu	1700 mm
Bir silindirin itme kuvveti	4580 kN
Toplam güç	499,7 kW
Kesici kafa gücü	400 kW
Vidalı konveyör hızı	0-29 rpm

Darıca-Bayramoğlu atıksu tüneli TBM Şekil 6.2'de görülen şaft ile indirilmiştir.



Şekil 6.2. Darıca-Bayramoğlu tüneli TBM için açılan şaft

Darıca-Bayramoğlu tüneline uygulan tahkimat sistemi Şekil 6.3'de görüldüğü gibi beton donatılı dairesel segmentlerden oluşmaktadır.



Şekil 6.3. Darıca-Bayramoğlu tüneli tahkimat sistemi

6.2. TBM Kazı Verilerinin Değerlendirilmesi

TBM performansına tünel güzergâhı boyunca geçilecek jeolojik birimlerin kaya kütle sınıfı (RMR), mekanik ve fiziksel özellikleri, petrografik ve mineralojik özellikleri, çatlak sıklığı, blok boyutu, çatlak veya tabaka yönelimi, çatlak takım sayısı, pürüzlülük, yeraltusuyu ve ayrışma durumu gibi parametreler etki etmektedir. Sondaj çalışmaları-arazi gözlemleri-laboratuvar sonuçlarından elde edilen veriler neticesinde güzergah boyunca Ballıkaya Formasyonu Orta Sert Kaya, Trakya Formasyonu Orta Sert Kaya-Yumuşak Kaya, Kazmalı Formasyonu Orta Sert Kaya-Yumuşak Kaya, Akveren Formasyonu Orta Sert Kaya, Fay Zonları Çok Yumuşak Kaya olarak adlandırılmıştır. Ayrıca Darıca Formasyonu olarak adlandırılan yelpaze çökelleri bulunmaktadır.

TBM'in kesici kafasının devir başına ilerlemesi, dönüş hızı, torku, ilerleme oranı ve itme kuvveti gibi işlevsel parametreleri makine tarafından kaydedilir ve her ringte ayrı ayrı analiz edilmektedir. Genelde TBM' lerde veri elde etme sistemi ekipmanı bu veri kayıt işlemlerini yapmaktadır.

Darıca – Bayramoğlu tünelinde çalışan TBM ’in veri kayıt listesi mevcuttur. Bu kayıt sistemine ait bir örnek Şekil 6.4, Şekil 6.5. ve Şekil 6.6.’da görülmektedir.

PROTOKOL **AVG**

BAUSTELLE DARICA

ERSTELLT 24.02.2018 11:00:12

HERRENKNECHT Tunnelvortriebstechnik

1. DATE_TIME
2. TIME
3. Kesici kafa pompasý1 besleme basýncý,bar
4. Helezon itici stroku, mm
5. Helezon devir sayýsý,d/d
6. Helezon toprak basýncý,bar
7. Ýlerlemehýzý,mm/dak

1	2	3	4	5	6	7
22.04.2017	09:16:33	0.0	999.6	0.0	0.1	0.0
22.04.2017	09:25:38	14.8	997.1	19.1	0.1	38.4
22.04.2017	09:28:34	14.9	996.7	19.0	0.1	28.4
22.04.2017	09:31:46	15.0	997.2	15.8	0.1	27.7
22.04.2017	09:35:10	15.0	996.5	29.1	0.1	30.4
22.04.2017	09:38:53	15.0	998.4	17.5	0.1	8.3
22.04.2017	09:41:59	15.0	997.7	15.3	0.1	28.7
22.04.2017	09:45:48	15.1	998.0	10.3	0.1	18.7
22.04.2017	09:49:07	15.0	997.6	22.9	0.1	22.4
22.04.2017	09:52:34	15.1	996.6	25.4	0.1	26.5
22.04.2017	10:02:34	12.8	999.6	28.3	0.1	-5.1
22.04.2017	10:12:34	0.0	999.6	0.0	0.1	0.0
22.04.2017	10:22:34	0.0	999.6	0.0	0.1	0.0
22.04.2017	10:32:34	0.0	999.6	0.0	0.1	0.0
22.04.2017	10:42:34	0.0	999.6	0.0	0.1	0.0
22.04.2017	10:44:40	14.9	998.3	16.6	0.1	21.7
22.04.2017	10:49:44	15.1	997.0	17.8	0.1	22.8
22.04.2017	10:52:52	15.1	997.2	17.8	0.1	24.7
22.04.2017	10:56:06	15.1	997.6	13.8	0.1	28.1
22.04.2017	10:59:10	15.1	997.5	13.4	0.1	27.9

Şekil 6.4. Darıca-Bayramoğlu TBM örnek kayıt verisi 1

PROTOKOL

BAUSTELLE DARICA

ERSTELLT 24.02.2018 12:11:44

HERRENKNECHT Tunnelvortriebstechnik

1. DATE_TIME
2. TIME
3. Tank 1 yað sýcaklýðý,deg C
4. Kesici kafa torku yükleme faktörü, %
5. Kesici kafa devir sayýsý,1/dak
6. Halka tesisatýön seçimi
7. Ýlerlemeön seçimi
8. Dikey Kalkan mafsalý,mm
9. Savrulma TBM,mm/m
10. V34_Knick_hor_mm_Z
11. Güncel halka numarasý
12. Ýlerlemehýzý,mm/dak

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
14.05.2017	23:26:00	41.8	46	2.9			3	1.4	-64	625	64.9
14.05.2017	23:27:27	42.0	45	2.9			3	1.4	-64	625	64.7
14.05.2017	23:28:57	42.4	44	2.9			3	1.4	-64	625	62.8
14.05.2017	23:38:57	40.7	0	0.0			12	1.4	-63	625	0.2
14.05.2017	23:48:58	38.9	0	0.0			11	1.4	-63	625	0.9
14.05.2017	23:54:40	39.9	31	3.0			18	1.4	-63	626	68.3
14.05.2017	23:56:06	40.3	43	2.9			6	1.4	-63	626	64.7
14.05.2017	23:57:31	40.5	47	2.9			7	1.4	-63	626	63.7
14.05.2017	23:58:58	41.1	46	2.9			7	1.4	-63	626	63.5
15.05.2017	00:00:23	41.6	44	2.9			5	1.4	-63	626	64.9

Şekil 6.5. Darıca-Bayramoğlu TBM örnek kayıt verisi 2

PROTOKOL **AVG**

BAUSTELLE DARICA

ERSTELLT 24.02.2018 10:10:48

HERRENKNECHT Tunnelvortriebstechnik

1. DATE_TIME
2. TIME
3. Kesici kafa devir sayýsý,1/dak
4. Kesici kafa torku yükleme faktörü, %
5. Ýlerlemegrubu A stroku, mm
6. Ýlerlemegrubu B stroku, mm
7. Ýlerlemegrubu C stroku, mm
8. Ýlerlemegrubu D stroku, mm
9. VTP Grup A toplam basýncý,kN
10. VTP Grup B toplam basýncý,kN
11. VTP Grup C toplam basýncý,kN
12. VTP Grup D toplam basýncý,kN

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
29.05.2017	08:20:50	0.0	0	1363.3	1366.5	1371.2	1348.3	109.9	338.3	832.0	173.6
29.05.2017	08:27:42	1.8	18	1370.9	1374.3	1376.3	1359.4	155.6	413.4	996.1	508.7
29.05.2017	08:29:09	3.3	30	1464.5	1467.7	1472.0	1450.9	221.6	552.1	1192.4	967.0
29.05.2017	08:30:58	3.2	29	1566.2	1569.5	1572.0	1552.0	224.3	556.5	1055.5	973.9
29.05.2017	08:40:58	1.0	11	481.8	472.2	643.0	691.3	23.8	63.1	111.9	8.5
29.05.2017	08:50:58	0.0	0	279.8	554.9	642.9	552.6	21.4	161.5	31.1	676.1
29.05.2017	08:58:36	1.9	31	715.0	706.8	714.8	703.3	341.5	628.1	1058.5	1122.3
29.05.2017	09:00:04	3.0	39	811.7	803.2	810.6	800.0	345.3	641.1	1062.2	1135.5
29.05.2017	09:01:23	2.9	43	908.1	899.5	906.6	896.7	337.4	632.0	1032.6	1121.1
29.05.2017	09:02:42	2.9	42	1012.1	1003.4	1009.9	1001.0	332.8	625.8	1020.2	1113.6
29.05.2017	09:04:07	2.9	45	1115.1	1106.2	1112.3	1104.2	330.1	624.0	1016.3	1110.6
29.05.2017	09:05:43	2.9	45	1217.6	1208.6	1214.0	1206.9	316.5	616.0	898.5	1096.3

Şekil 6.6. Darıca-Bayramoğlu TBM örnek kayıt verisi 3

Bu veriler, tünel açma makinesinin kazı esnasında, ilerleme hızı, bir devirdeki dönüş hızı, kesici kafanın torku, toplam itme kuvveti vb. şeklinde özetlenebilir. Tünel delme makinesinin çalışma parametreleri, formasyonlar içinde ve kendi içinde aritmetik ortalamaları alınarak, Veri alınamayan bilgiler göz ardı edilerek 2480 ring incelenerek hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalar Tablo 6.2 ve Tablo 6.3'de gösterilmiştir. Ayrıca Darıca Bayramoğlu atıksu TBM'inin kayıt sistemindeki bazı noksanlıklardan dolayı tüm tünel uzunluğu boyunca bazı veriler alınamamıştır. İncelenen 2480 ringlik TBM verisi tünel uzunluğuna çevrilmiştir. TBM'in kazı yaptığı formasyonlar tünel uzunluğuna göre sınıflandırılmıştır. Aşağıdaki tablodan görüleceği üzere 393 m, 908 m, 1378 m, 1817 m, 1991, 2258 m ve 2398 metrelerin TBM verisi tabloda gösterilmiştir.

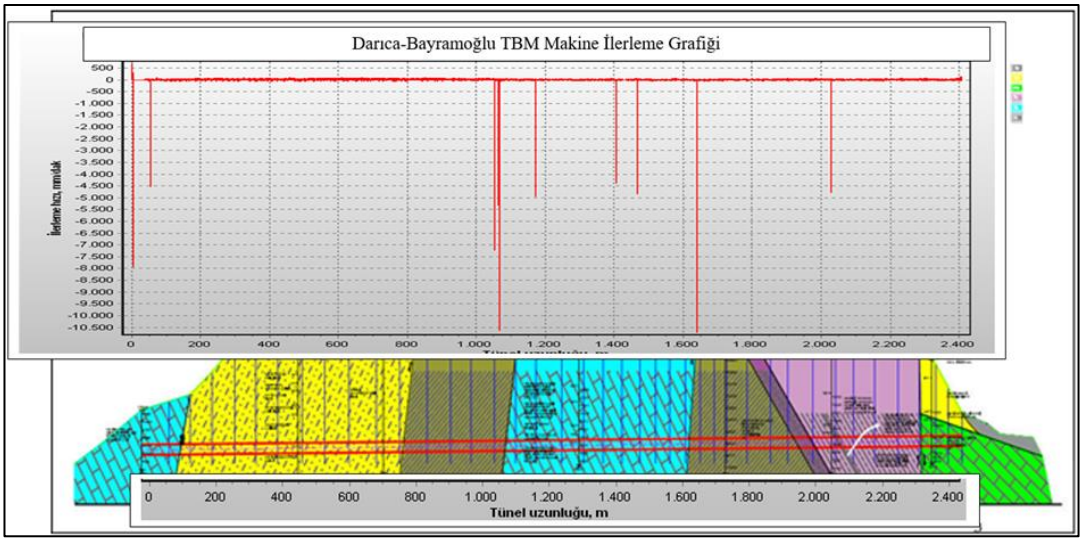
Tablo 6.2. Tünel delme makinasının elektronik verilerinden elde edilen veriler

Uzunluk	İlerleme	Sıcaklık	Kesici Basıncı	Toplam itme	Kazı Süresi	Devir	İlerleme
(m)	(mm/dak)	C	Bar	(kN)	dak	dev/dak	(mm)
393	64,65	41,25	14,975	714,409375	10	2,9	945,3469
908	43,92	43,84	15,2	494,415	9	2,86	1397,635
1378	7,72	59,98	15,211	729,6779412	40	2,9	1062,454
1817	19,51	45,96	15,29	645,8	33	2,8875	1054,156
1991	40,03	36,58	14,7	339,125	7	2,625	867,2813
2258	27,98	39,6	15,1	469,76875	9	2,75	892,1875
2398	16,41	43,46	15,19	730,2678571	35	2,928571	1024,082

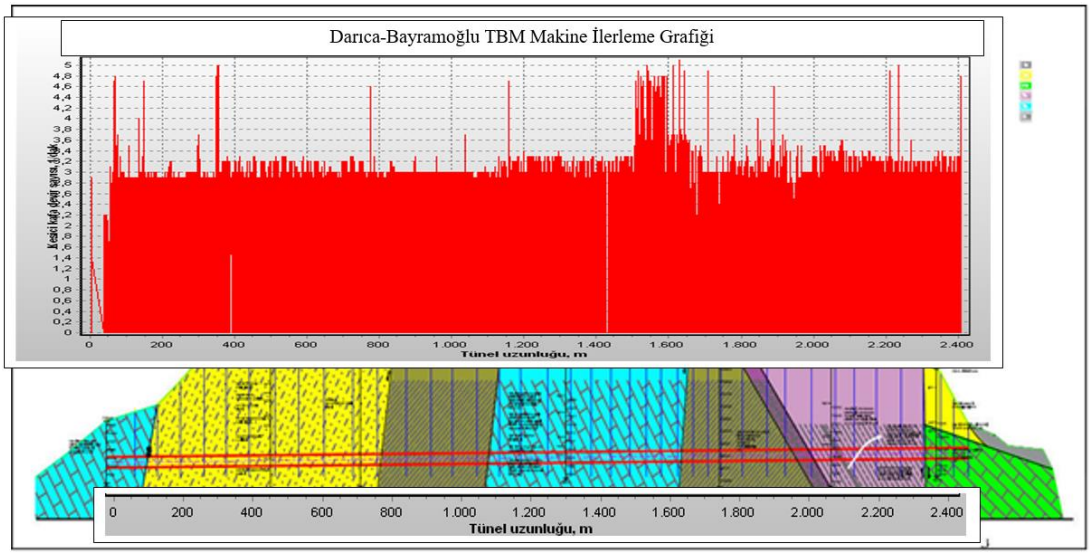
Tablo 6.3. Tünel açma makinasının verilerinden hesaplanan bazı performans parametreleri

Uzunluk (m)	İtme kuvveti/Keski (kN)	BI	Kazı Hızı (m^3/h)	Güç (kW)	SE (kWh/m^3)
393	26,45960648	2,443347	317,8996	227,4	0,715276
908	18,31166667	2,398471	212,9864	227,6	1,068702
1378	27,02510893	0,28566	37,96109	231,0	6,084371
1817	23,91851852	0,815686	95,52184	231,2	2,420056
1991	12,56018519	3,187055	178,1715	202,0	1,133984
2258	17,39884259	1,608153	130,4679	217,4	1,666497
2398	27,04695767	0,606723	81,4869	232,9	2,858409

Şekil 6.7 ile Şekil 6.8'de Birimlerin genel olarak Kaya sınıflamalarının benzer olmalarına rağmen makine kesici kafa devir sayısı "penetrasyon" (dev/dakika) ile "penetrasyon hızı" (mm/dakika) veya "ilerleme hızı" ile benzerlik göstermediği gözlenmiştir. Bu durum birimlerin çatlak sıklığı, blok boyutu, çatlak veya tabaka yönelimi, çatlak takım sayısı, ve ayrışma durumu ile daha çok bağlantılı olduğu düşünülebilir. Yine Şekil 6.4'de formasyonun kazılabilirliği arttıkça ilerleme hızlarının arttığı gözlenmiştir. Buna en iyi örnek güzergâhta geçilen Darıca Formasyonu'dur. TBM ilerleme hızı dayanımın yüksekliği ile ters orantılı olduğu da Ballıkaya Formasyonundan görülmektedir.

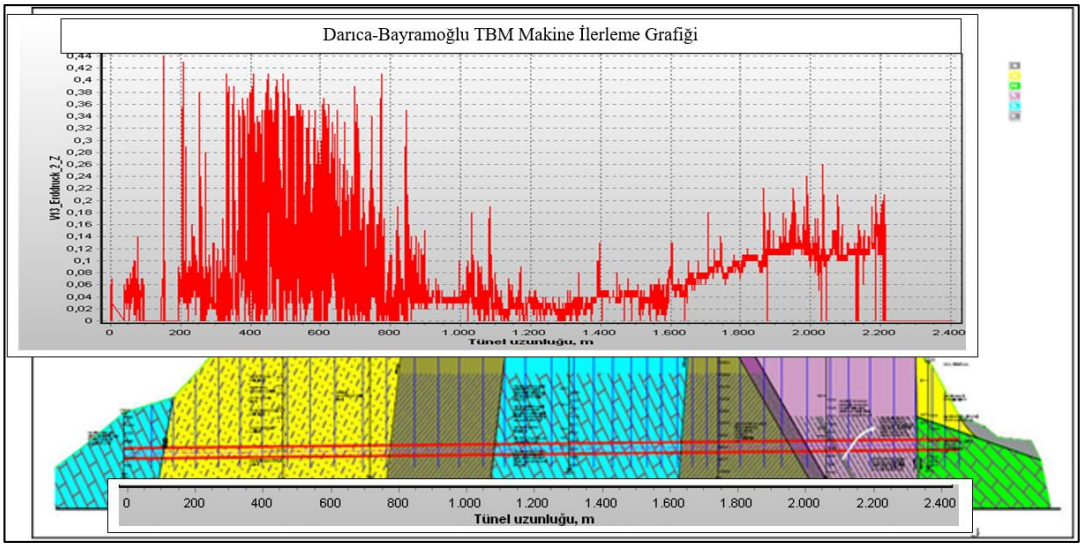


Şekil 6.7. Tünel Uzunluğu – İlerleme hızı mm/dk grafiği



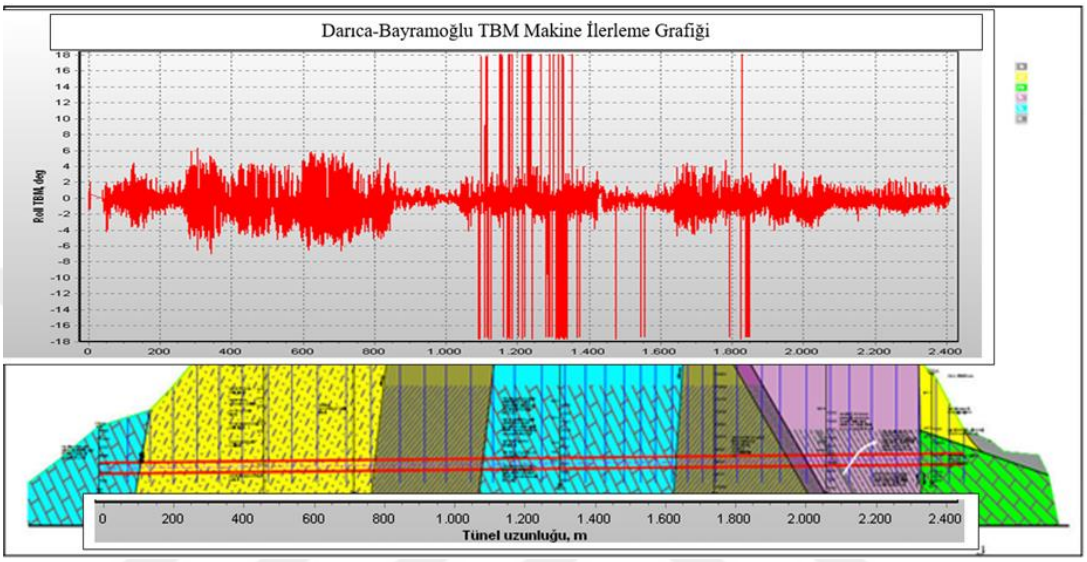
Şekil 6.8. Tünel uzunluğu – kesici kafa devir sayısı/dakika grafiği

Şekil 6.9'da Darıca Formasyonu diye adlandırılan alüvyon nitelikli bölge kazı esnasında operatörün yüzey toprak basıncına ve makinanın ekseninden kaymaması için yüksek basınçta, Ballıkaya ve diğer Birimlerde daha normale yakın basınçta gittiği gözlenmiştir. Grafik daha ayrıntılı incelendiğinde ise Darıca formasyonu içerisinde bulunan Akveren ve Ballıkaya formasyonlarına ait iri blokların varlığı, Ballıkaya formasyonuna ait kil ve/veya sulu boşlukların olduğu, Trakya, Kazmalı, Akveren formasyonlarının kendi içinde tabaka, doğrultu, ayrışma zonların varlığı gözlenmektedir.



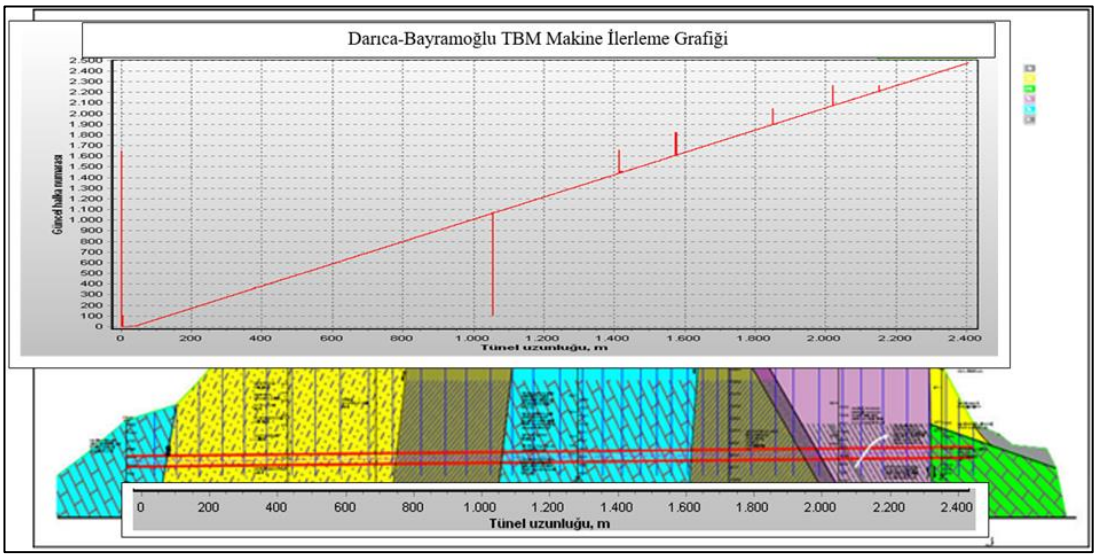
Şekil 6.9. Tünel uzunluğu – ayna basınç grafiği

Şekil 6.10'de Ballıkaya Formasyonuna ait birimlerin kil ve/veya sulu olması kendi içerisinde iri tutturulmamış blok koparması, formasyon içerinde güzergah boyunca kil dolguların TBM ekseninden kaçmasına yol açması gibi sebeplerle sıkışmaların olduğu ve aynı şekilde Trakya Formasyonu ile Kazmalı Formasyonu Fay Geçişinde de bunun gözlendiği Jeoloji Kesitinden de anlaşılmaktadır..



Şekil 6.10. Tünel uzunluğu – TBM devrilme grafiği

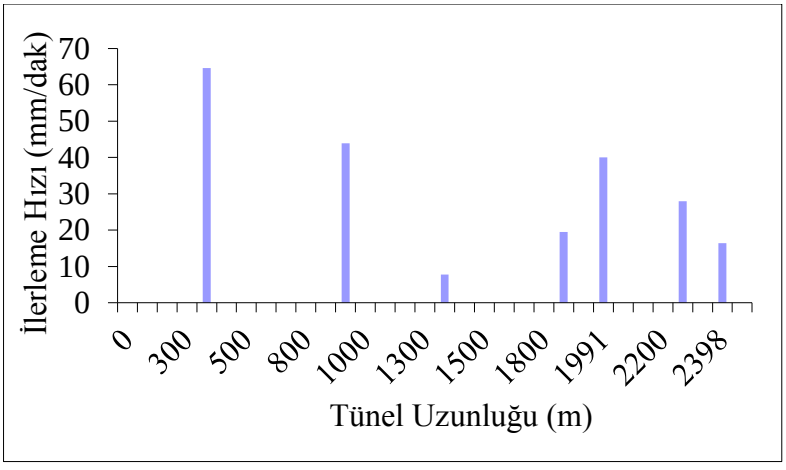
Şekil 6.11'de Güzergah boyunca teşkil edilen segment halka numaralarına aittir. Grafikte görülen ani değişimlerle ilgili herhangi bir fikir edinilememiştir.



Şekil 6.11. Tünel uzunluğu- güncel halka ilerleme grafiği

Jeolojik koşullar aynı proje kapsamında güzergah boyunca aynı jeolojik birim içerisinde bile farklılıklar ve kendine özel mekanik ve fiziksel değişimler gösterebilmektedir. Bu nedenle, TBM performansı ile jeolojik koşulların sistematik bir ilişkisinin varlığı söz konusu değildir. Ancak jeolojik koşulların TBM performansındaki etkisi büyük ölçüde TBM'in seçimi ile ilintilidir. Bu da yalnızca proje öncesinde yapılan jeolojik araştırma çalışmalarının yoğunluğu, kalitesi, gerekli deneylerin yapılması ve elde edilen bilgilerin TBM'in seçimi açısından yorumlanması ile gerçekleştirilebilecektir.

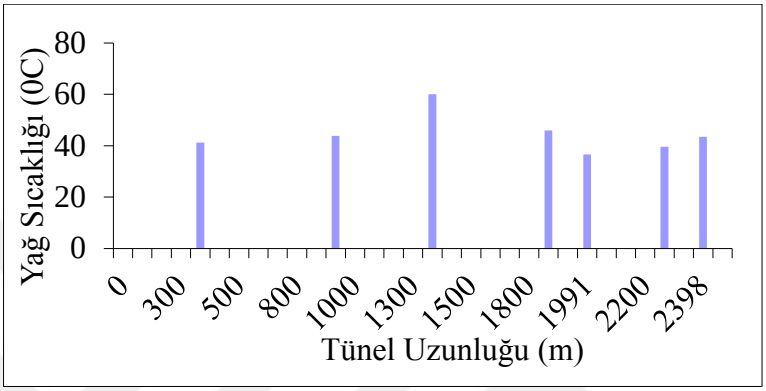
Şekil 6.12'de TBM ilerleme hızı kayıt verisi ile tünel uzunluğu boyunca geçilen formasyonların arasındaki ilişki verilmektedir. 393 m'de Darıca formasyonunda TBM ortalama 65 mm/dakika, 908 m'de Orta Sert Kaya-Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda TBM ortalama 43,92 mm/dakika, 1378 m'de Orta Sert Kaya Ballıkaya Formasyonunda TBM ortalama 7,72 mm/dakika, 1817 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda 19,51 mm/dakika, 1991 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda 40,03 mm/dakika, 2258 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Kazmalı Formasyonunda 27,98 mm/dakika, 2398 m'de Orta Sert Kaya Akveren Formasyonunda 16,41 mm/dakika İlerleme Hızı hesaplanmıştır. Yukarıdaki verilerden de izlendiği gibi jeolojik birimlerin mühendislik özellikleri ilerleme hızını denetleyen önemli faktörlerdendir.



Şekil 6.12. Tünel uzunluğu – ilerleme hız (mm/dak) grafiği

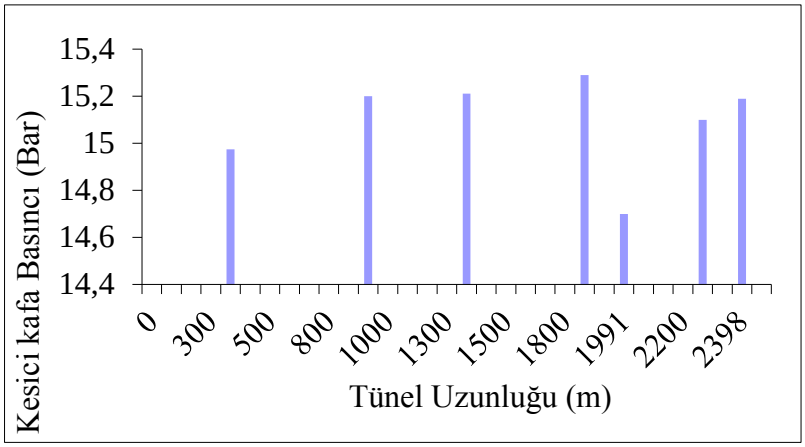
Şekil 6.13'da TBM yağ sıcaklığı kayıt verisi ile tünel uzunluğu boyunca geçilen formasyonların arasındaki ilişki verilmektedir. 393m'de Darıca formasyonunda TBM ortalama 41,25 (°C), 908m'de Orta Sert Kaya-Yumuşak Kaya Trakya

Formasyonunda TBM ortalama 43,84 (°C), 1378m'de Orta Sert Kaya Ballıkaya Formasyonunda TBM ortalama 59,98 (°C), 1817m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda 45,96 (°C), 1991m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda 36,58 (°C), 2258m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Kazmalı Formasyonunda 39,6 (°C), 2398m'de Orta Sert Kaya Akveren Formasyonunda 43,46 (°C) yağ basınç tank sıcaklığı ölçülmüştür.



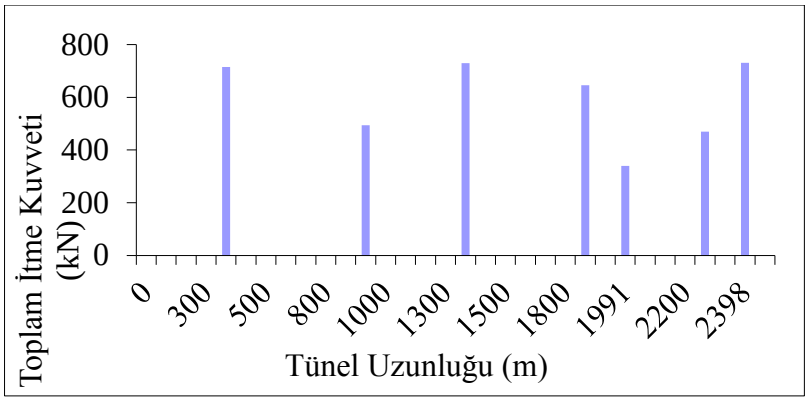
Şekil 6.13. Tünel uzunluğu – yağ tankı sıcaklığı grafiği

Şekil 6.14'de TBM Kesici Kafa Basıncı (Bar) kayıt verisi ile tünel uzunluğu boyunca geçilen formasyonların arasındaki ilişki verilmektedir. 393 m'de Darıca formasyonunda TBM ortalama 14,975 (Bar), 908 m'de Orta Sert Kaya-Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda TBM ortalama 15,2 (Bar), 1378 m'de Orta Sert Kaya Ballıkaya Formasyonunda TBM ortalama 15,211 (Bar), 1817 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda 15,29 (Bar), 1991 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda 14,7 (Bar), 2258 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Kazmalı Formasyonunda 15,1 (Bar), 2398 m'de Orta Sert Kaya Akveren Formasyonunda 15,19 (Bar) Kesici Kafa Basıncı (Bar) ölçülmüştür.



Şekil 6.14. Tünel uzunluğu – kesici kafa basıncı (Bar) grafiği

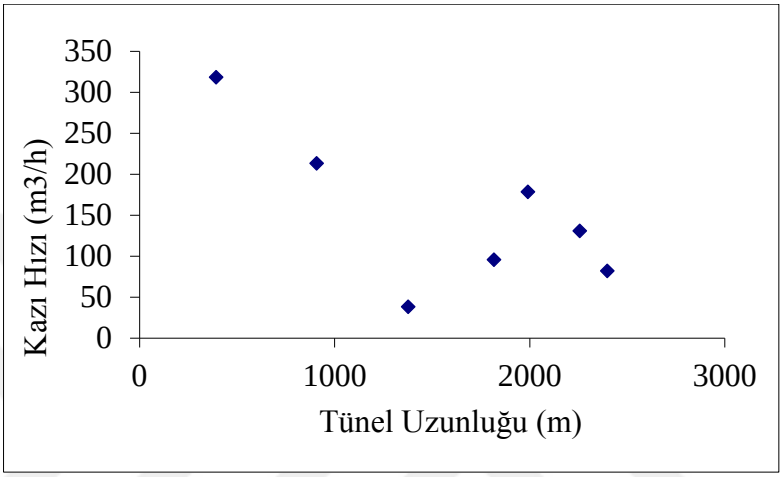
Şekil 6.15'de TBM Toplam İtme Kuvveti (kN) kayıt verisi ile tünel uzunluğu boyunca geçilen formasyonların arasındaki ilişki verilmektedir. 393 m'de Darıca formasyonunda TBM ortalama 714,409375 (kN), 908 m'de Orta Sert Kaya-Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda TBM ortalama 494,415 (kN), 1378 m'de Orta Sert Kaya Ballıkaya Formasyonunda TBM ortalama 729,6779412 (kN), 1817 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda 645,8 (kN), 1991 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda 339,125 (kN), 2258 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Kazmalı Formasyonunda 469,76875 (kN), 2398 m'de Orta Sert Kaya Akveren Formasyonunda 730,2678571 (kN) Toplam itme Kuvveti (kN) ölçülmüştür.



Şekil 6.15. Tünel uzunluğu – toplam itme kuvveti (kN) grafiği

Şekil 6.16'de TBM Kazı Hızı (m³/h) kayıt verisi ile tünel uzunluğu boyunca geçilen formasyonların arasındaki ilişki verilmektedir. 393 m'de Darıca formasyonunda TBM ortalama 317,8996 (m³/h), 908 m'de Orta Sert Kaya-Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda TBM ortalama 212,9864 (m³/h), 1378 m'de Orta Sert Kaya

Ballıkaya Formasyonunda TBM ortalama 37,96109 (m³/h), 1817 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda 95,52184 (m³/h), 1991 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Trakya Formasyonunda 178,1715 (m³/h), 2258 m'de Orta Sert Kaya – Yumuşak Kaya Kazmalı Formasyonunda 130,4679 (m³/h), 2398 m'de Orta Sert Kaya Akveren Formasyonunda 81,4869 (m³/h) Kazı Hızı (m³/h) ölçülmüştür.



Şekil 6.16. Tünel uzunluğu – kazı hızı (m³/h)

Şekil 6.17 ilerleme hızı ile arazi kazılabilirlik indeksi (Boreability Index, BI) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu şekilde kazılabilirlik indeksi ile devir başına ilerleme arasında açık bir ilişki olduğu görülmektedir. Excel'de üstel regresyon yöntemi ile bulunan eğilim çizgisinin denklemi y = 22,10 x $e^{0,77}$'dir. Şekil 5.4'de TBM'nin itme kuvveti, devir başına ilerleme arasındaki ilişki görülmektedir.

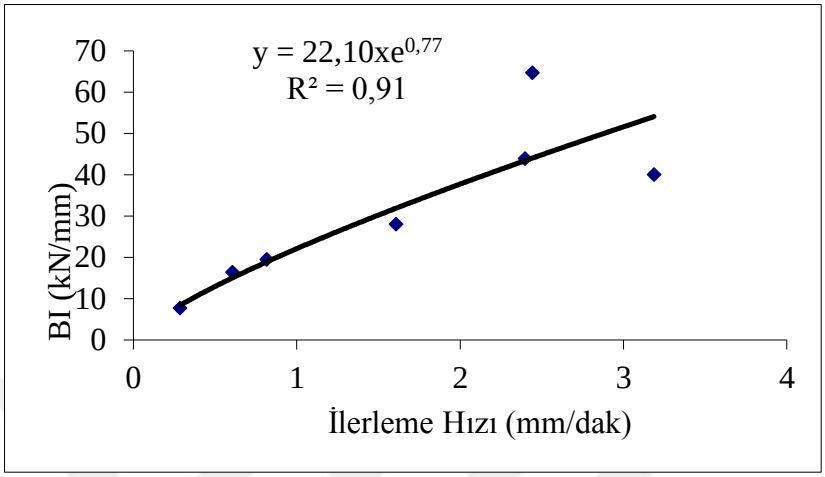
Arazi Kazılabilirlik indeksi (FBI) Denklem (6.1)'deki gibi hesap edilmektedir;

$$FPI=\frac{\text{Uygulanan ortalama normal disk kuvveti}}{\text{Uyggulanan penetrasyon miktarı}}=\frac{F_N(^{kN}/_{\text{disk keski}})}{p(^{mm}/_{dev})} \quad (6.1)$$

Burada; FN = Bir disk keskine gelen normal disk kuvveti (kN/disk keski); p = kesici kafanın penetrasyon miktarı (mm/dev)'dir.

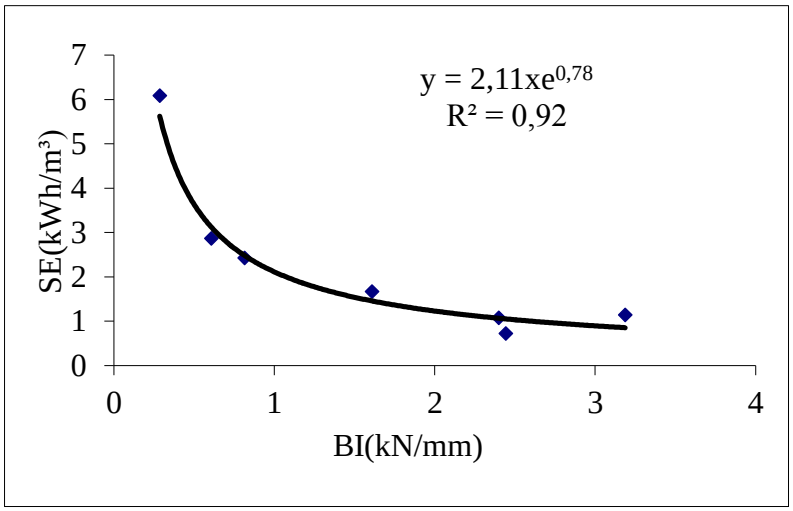
Şekil 6.17. İtme Kuvveti ile Devir Başına ilerleme arasındaki ilişki, arazi penetrasyon indeksi (FPI) TBM'in kesici kafasının bir dönüşü sonucu elde edilen birim penetrasyon başına bir disk keskisine etkiyen ortalama normal kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Gong vd., kazılabilirlik indeksinin kayaç kütlesine bağlı sabit bir

değişken olmadığını ortaya koymuştur. Bu çalışmada Darıca-Bayramoğlu tünelinden kullanılan TBM'in verisi istatistiksel olarak incelenmiş ve anlamlı bir ilişkinin varlığı ortaya konulmuştur.



Şekil 6.17. İlerleme hızı ile arazi kazılabilirlik indeksi grafiği

Şekil 6.18'da makinenin kazılabilirlik indeksi ile spesifik enerji arasındaki ilişki görülmektedir. Şekilde kazılabilirlik indeksi ile spesifik enerji arasında açık bir ilişki olduğu görülmektedir. Excel'de doğrusal regresyon yöntemi ile bulunan eğilim çizgisinin denklemi $y = 2{,}11xe^{0{,}78}$'dir. Kazılabilirlik indeksi arttıkça, spesifik enerjinin de azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.18. Makinenin kazılabilirlik indeksi ile spesifik enerji arasındaki ilişki grafiği

Tablo 6.4'de tünel çapı D=3m olarak, sınırlı ve düşük basınçlı YSS durumunda h_o 10, h_f 0 (m) kabul edilmiştir.

Tablo 6.4. Darıca – Bayramoğlu TBM tahmini ayna basıncı değerleri

Km	Jeolojik Birim	YSS Durumu	RQD_{ORT} (%)	RMR	GSI	H_{ort} (m)	h_o (m)	h_f (m)	C (kPa)	Ø (°)	γ (kN/m^3)	F_o	F_1	F_2	F_3	S’ (Bar)
2+510/2+394	Ballıkaya FM	Sınırlı	60	54	50	11,06	10	0	250	55	25	0,156	1,997	0,428	0,112	<0,5
2+394/2+384	Fay Zonu	Düşük Basınçlı	-	8	5	12,02	10	0	5	20	21	0,499	3,637	0,594	5,981	1,37
2+384/1+676	Darıca FM	Sızıntı	-	10	5	44,72	10	0	5	26	21	0,310	2,724	0,520	8,578	1,14
1+676/1+310	Trakya FM	Sızıntı	40	36	30	56,99	10	0	150	36	23	0,156	1,997	0,428	0,112	<0,5
1+310/1+300	Fay Zonu	Düşük Basınçlı	-	8	5	62,02	10	0	15	20	20	0,507	3,677	0,594	5,981	0,91
1+300/0+760	Ballıkaya FM	Sınırlı	75	55	50	92,49	10	0	680	50	25	0,156	1,997	0,428	0,112	<0,5
0+760/0+750	Fay Zonu	Düşük Basınçlı	-	8	5	93,14	10	0	15	20	22	0,507	3,677	0,594	5,981	1,06
0+750/0+550	Trakya FM	Sızıntı	55	52	45	81,48	10	0	280	42	23	0,156	1,997	0,428	0,112	<0,5
0+550/0+450	Kazmalı FM	Düşük Basınçlı	60	50	45	69,15	10	0	235	40	24	0,156	1,997	0,428	0,112	<0,5
0+450/0+130	Kazmalı FM	Sızıntı	20	33	28	35,99	10	0	125	34	24	0,169	1,997	0,437	0,109	<0,5
0+130/0+115	Fay Zonu	Düşük Basınçlı	-	8	5	22,33	10		5	20	22	0,507	3,677	0,594	5,981	1,45
0+115/0+00	Akveren FM	Sızıntı	60	45	40	12,48	10	0	170	52	23	0,156	1,997	0,428	0,112	<0,5

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

TBM performansını etkileyen birçok faktör vardır. Bunların başında tünel açılacak formasyonun özellikleri, TBM dizaynı ve şantiye organizasyonu gelmektedir. TBM ile yapılacak tünel çalışması için önceden yapılan jeoteknik çalışmaların detaylı olarak yapılması verimli bir tünel çalışması yapılabilmesi için zorunludur. Detaylı yapılmayan jeoteknik çalışmalar; TBM dizaynının yanlış yapılmış olmasına etki edebileceği gibi; TBM güzergâhında bulunabilecek jeolojik problemlerin (Fay, Çatlak Sistemi, Tabaka Doğrultu-Eğimi, Yeraltısu seviyesi vs) önceden tedbir alınmasını ve geçilecek topografyada bulunan önemli yapıların zarar görme ihtimalini azaltmaktadır. Ayrıca Tünellerin projelendirmesi aşamasında; proje güzergâhının jeolojisine, geçilecek formasyonların jeoteknik özelliklerine, bölgenin tektonizmasına ve yeraltısuyu durumuna özel önem verilerek yeterli sayıda ve derinlikte sondaj ile arazi ve laboratuvar deneyleri yaptırılmalıdır.

Tam cephe tünel açma makinelerinin kazı olayını gerçekleştirmesi itici silindirler ile aynaya iletilen itme kuvveti ve kesici kafanın döndürme motorları ile dönmesiyle mümkündür. Makinelerin kazı performansını etkileyen en önemli faktör kazılacak formasyondur. Arıza ve zorunlu sebepler ihmal edildiğinde kazı ilerlemesindeki en etkin parametreler geçilen formasyon özellikleri, su geliri ve zeminin durumudur. Makine parametreleri açısından ilerleme hızı ve buna bağlı olarak kazı verimliliği, kesici kafadaki keskiler arası mesafe ve kesici disklerin penetrasyon indisi ile doğrudan bağlantılıdır. Yapılan hesaplamalar, testler ve kabul edilen yaklaşımlarla hesaplar yapılarak günlük, aylık ve yıllık kazı miktarları tahmin edilir ve bunun sonucunda da proje bitiş süresi belirlenerek buna bağlı olarak da maliyet hesapları yapılmaktadır.

Günümüzde İçmesuyu-kanalizasyon-ulaşım gibi amaçla yapılan imalatlara esas birçok TBM makinası mevcuttur. İhale aşamalarında özel teknik şartnamesinde "Yeni TBM" kullanılmasını zorlayacak ifadelere yer verilmeyip, tünelin çapı ve zemin şartları dikkate alınarak yenileme şartı ile "İkinci El TBM" kullanımına imkân

verilmelidir. Sonuç olarak, TBM performansı tamamlanmış bir kesit için yapılan deneysel yaklaşımlar ve pratik performans verileri birbiriyle uyumludur.

KAYNAKLAR

Abdüsselamoğlu Ş., Kocaeli Yarımadası'nın Jeolojisi, *M.T.A. Enstitüsü,* 3249, 40, 1963.

Akartuna M., Şile Şariyajının İstanbul Boğazı Kuzey Yakalarında Devamı, *MTA Dergisi*, 1963, **61**, 14-20.

Altınlı İ. E., İzmit-Hereke-Kurucadağ Alanının Jeoloji İncelemesi, *M.T.A. Mecmuası*, 1968, **71**, 1-26.

Anagnostou C., Kovári K., Face Stability Conditions with Earth Pressure Balanced Shields, *Tunneling & Underground Space Technology*, 1996, **11(**2), 165-173.

Anagnostou G., Kovári K., Face Stability in Slurry and EPB Shield Tunneling, *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground London,* London, United Kingdom, 15-17 April 1996.

Anagnostou G., Kovári K., The Face Stability Of Slurry-Shield-Driven Tunnels, *Tunneling & Underground Space Technology*, 1994, **9(**2), 165-174.

Arıoğlu B., Yüksel A., Arıoğlu E., İzmir Metrosu Ümmühan Ana Tüneli'nde Zemin Basıncı Dengeleme Tünel Metodu (EPBM) Uygulaması, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, 21-22 Ekim 2002.

Arıoğlu E., *Tünel Açma Makineleri, Arın Basınç Hesapları, Tünel Kaplamaları, Bir Proje Örneği*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.

ASTM D7625-10, Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method, *American Society for Testing and Materials*, Washington, 2010.

Balcı C., Bilgin N., Correlative Study of Linear Small and Full-Scale Rock Cutting Tests to Select Mechanized Excavation Machines, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, **44**, 468-476.

Balcı C., Bilgin N., Çopur H., Tumaç D., Akgül M., Tünel Açma Makinelerinin (TBM) Tam Boyutlu Kesme Deneyi ile Performans Tahmini, *Birinci Maden Makinaları Sempozyumu*, Kütahya, Türkiye, 10-12 Mayıs 2007.

Balcı C., Correlation of Rock Cutting Tests with Field Performance of a TBM in a Highly Fractured Rock Formation: A Case Study in Kozyatagi-Kadikoy Metro Tunnel, Turkey, *Tunneling and Underground Space Technology*, 2009, **4**(24), 423-435.

Balcı C., Demircin M. A., Copur H., Tunçdemir H., Estimation of Optimum Specific Energy Based on Rock Properties for Assessment of Roadheader Performance, *The Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM)*, 2004, **11**, 633-641.

Balcı C., Tumac D., Copur H., Bilgin N., Yazgan S., Demir E., Aslantas G., Performance Prediction And Comparison with In-Situ Values Of A TBM: A Case Study of Otogar-Bagcilar Metro Tunnel In İstanbul, *ITA-AITES World Tunnel Congress*, Budapest, Hungary, 23-28 May 2009.

Baykal M. F., Şile Bölgesinin Jeolojisi, *İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Monografileri*, 1943, **3**, 8.

Bieniawski Z. T., *Engineering Rock Mass Classifications*, 4th ed., John Wiley and Sons, New York, 1989.

Bilgin N., Çopur H., Balcı B., *Mechanical Excavation in Mining and Civil Engineering Industries*, 1st ed., Francis and Taylor Publishing Company, New York, 2014.

Bilgin N., Çopur H., Balcı C., Tumaç D., Akgül M., Yüksel A., Kahraman A., Kadıköy–Kartal Metro Tünellerinde Kullanılacak Tünel Açma Makinelerinin (TBM) Bazı Tasarım Parametrelerinin Kesme Deneyleri ile Belirlenmesi ve Performans Tahmini, *Ulaşımda Yeraltı Kazıları 2. Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 5-8 Temmuz 2007.

Briaud J. L., *The Pressuremeter*, 1st ed., Texas A&M University, Texas, 1992.

Cernica J., *Geotechnical Engineering: Foundation Designing*, 1st ed., John Wiley and Sons Ltd., New York, 1995.

Copur H., Tuncdemir H., Bilgin N., Dincer T., Specific Energy as a Criterion for Use of Rapid Excavation Systems in Turkish Mines, *Transactions - Institution of Mining and Metallurgy*, 2001, **110**, 149–157.

Çakır Ş., Demirciler-Sadıklar-Gündoğdu-Tütünçiftlik (Kocaeli) Bölgesinin Jeolojisi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2000, 101293.

Demirtaş R., Yılmaz R., *Türkiye'nin Sismotektoniği*, 1. Baskı, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı; Deprem Araştırma Dairesi Yayını, Ankara, 1996.

Haas W., Das Alt-Paläozoikum von Bithynien (Nordwest-Türkei*), Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 1968, **131**(2), 178-242.

Hoek E., Diederichs M. S., Emprical Estimation of Rock Modulus, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2006, **43**, 203-215.

Kaya O., İstanbul'un Karbonifer Stratigrafisi, *Türkiye Jeoloji Kurumları Bülteni*, 1971, **14**(2), 143-199.

Ketin İ., Çamlıca Bölgesinin Tektoniği Hakkında (Über die Tektonik des Çamlıca-Gebietes bei İstanbul,. *Türkiye Jeolojisi Kurumları Bülteni*, 1959, **7**(1), 1-18.

Koral H., Eryılmaz M., *İzmit Körfezi'nin Tektoniği, İzmit Körfezi Kuvaterner İstifi*, 1st ed., Kocaeli Valiliği Çevre Koruma Vakfı, Kocaeli, 1995.

Meriç E., Sakınç M., Eroskay, O., 1991 *İstanbul Boğazı ve Haliç çökellerinin evrim modeli*, UMJTMK Bülteni, sayı :10, ss.10-14, İstanbul.

Namlı M., Cakmak I., Pakis I. H., Tuysuz T. D., Dumlu M., Sav S., Balcı C., Copur H., Bilgin N., The Methodology of Using Past Experiences in the Performance Prediction of a TBM in a Complex Geology, *Proceedings of World Tunnel Congress*, Geneva, 9-15 May 2014.

Önalan M., *Pendik Bölgesi ile Adaların Jeolojisi ve Sedimenter Özellikleri*, Doçentlik Tezi, İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi, Jeoloji Bölümü, İstanbul (Yayımlanmamış), 1982.

Özdemir L., *Mechanical Mining, Short Course Notebook, 1st ed.*, Mining Engineering Department, Colorado, 1995.

Paeckelmann W., Beiträge zur Kenntnis des Devons am Bosporus, Insbesondere in Bithynien, *Abhandlungen d. Preussischen Geologischen Landesanstalt*, 1925, **98**, 152.

Penck W., Gründzüge der Geologie des Bosporu,. *Veröffentlichungen d Instituts f. Meereskunde*, 1919, **4**,71.

Rostami J., Ozdemir L., Neil D. M., Performance Prediction: A Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining, *Mining Engineering*, 1994, **11**, 1263-1267.

Sayar C., Boğaziçi Arazisinde Ordovisiyen Conularia'ları, *TJK Bülteni*, 1969, **7**(l-2), 140-156.

Sayar C., İstanbul Boğazı ve Çevresinde Ordovisiyen-Silüriyen Sınırı, *Türkiye Jeoloji Kurumları Bülteni*, 1979, **22**(2), 161-167.

Sayar M., Sayar C., İstanbul'un Surlar İçindeki Kısmının Jeolojisi, *İTÜ Maden Fakültesi Yayını*, 1962, **23**, 1-10.

Serafim S. J., Pereria J., Considerations of the Mechanics Classification of Bieniawski, *International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction*, Lisboan, Portugal, 1-3 May 1983.

Sönmez H., Ulusay R., Modifications to the Geological Strength Index (GSI) and Their Applicability to Stability of Slopes, *International Journal of Rock Mech and Mining Sciences*, 1999, **36**(6), 743-760.

Terzaghi K., Peck R. B., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1967.

Tschihatcheff P. D., Dépots Paléozoiques de la Cappadoce et du Bosphore, *Bulletin de la Société Géologique de France,* 1853, **2**(11), 402-421.

Tschihatcheff P. D., *Asie Mineure*, Géologie, 1986, **1-3**, 552.

Ulusay R., Sönmez H., Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*, 2002, **60**, 243.

URL-1: http://wektor.il.pw.edu.pl/~idim/zgibp/zg/doki/Calculation_of_face_stability_for_EPB.pdf (Ziyaret tarihi: 12 Temmuz 2017)

Wes G., Rock Abrasiveness Testing for Tunneling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1989, **26**, 151-160.

Yüksel A., Yeşilçimen Ö., Arıoğlu E., Kadıköy-Kartal Raylı Toplu Taşıma Sistemi Projesinde Jeolojik ve Jeoteknik Araştırma Çalışmaları, *VIII Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 2-3 Kasım 2006.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Altuntaş A., Coruk Ö., Darıca-Bayramoğlu Atıksu Tüneli TBM Seçimi ve Mühendislik Jeolojisi Araştırmalarının Projeye Olan Katkısı, *Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu*, Adana, Türkiye, 12-14 Ekim 2017.

Altuntaş A., Özdemir A., Koç A., Turan G., Namazgah Baraj Gölü Havzası'nda Yeraltısuyu ve Yüzey Suyu İlişkisinin, Koruma Alanlarının Doğal İzotoplarla Belirlenmesi, *4. Ulusal Hidrojeolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu,* İstanbul, Türkiye, 05-09 Ekim 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Abdullah ALTUNTAŞ 1974'de Almanya'da doğdu. Lise öğrenimini Gebze Anadolu Teknik Lisesi Tıp Elektroniği'nde tamamladı. 1994 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden 1999 güz döneminde mezun oldu. 1998-2003 yılları arasında Mühendislik Hizmetleri ve Ticaretle ilgili Şirket ortaklığı, 2003-2017 yılları arasında Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'nde (İSU) Projeler Daire Başkanlığı'nda ve Planlama, Yatırım ve İnşaat Daire Başkanlığı'nda Kontrol Mühendisliği görevinde bulundu. 2018 yılından itibaren Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Etüd ve Projeler Daire Başkanlığı'nda Mühendis olarak görev yapmaktadır. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.