



T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

*DEĞİŞKEN LİTOLOJİLERDEKİ AYRIŞMA/BOZULMA DERECELERİNİN  
EPB-TBM'LERİN KAZI PERFORMANSI VE MALİYETİNE ETKİLERİNİN  
SAYISAL ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ*

**İrfan Serkan BİNEN**

**DANIŞMAN**  
**Prof. Dr. Nuray TOKGÖZ**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Maden Mühendisliği Programı**

**İSTANBUL-2019**

Bu çalışma, 27.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Maden Mühendisliğı Anabilim Dalı, Maden Mühendisliğı Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### **Tez Jürisi**

Prof. Dr. Nuray TOKGÖZ(Danışman)  
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Ataç BAŐÇETİN  
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Hanifi ÇOPUR  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
Maden Fakültesi

Unvan Adı SOYADI  
Üniversite  
Fakülte

Unvan Adı SOYADI  
Üniversite  
Fakülte



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## ÖNSÖZ

Hayatta her zaman yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Eda ERGÜN BİNEN'e anlayışı ve hoş görüşü için sonsuz teşekkür ederim. Öğrencilik hayatım boyunca her zaman çok kıymetli tavsiyeleri ve yönlendirmeleri ile her zaman desteğini hissettiğim sayın hocam Prof. Dr. Nuray TOKGÖZ'e de ayrıca şükranlarımı bir borç bilirim. Çalışma hayatım boyunca beraber pek çok zorluğun üstesinden geldiğimiz tüm çalışma arkadaşlarıma ve yöneticilerime ayrıca teşekkür ederim. Bu tezin kapsamında yer alan Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesinde emek vermiş herkes başta olmak üzere Türkiye'de ve tüm dünyada tünel ve maden işlerinde görev alan bütün çalışanlara bu vesile ile teşekkür etmek istiyorum. Bu çalışmanın gerçekleşmesini mümkün kılan Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi yetkililerine verdikleri desteklerden ötürü teşekkür ederim.

Mayıs 2019

İrfan Serkan BİNEN

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
TABLO LİSTESİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xiii
ÖZET .....	xiv
SUMMARY .....	xvi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR.....</b>	<b>6</b>
2.1. TBM GENEL ÇALIŞMA PRENSİPLERİ .....	6
2.2. TBM TÜRLERİ.....	9
2.2.1. Gripper TBM .....	10
2.2.2. Tek Kalkanlı TBM .....	11
2.2.3. Çift Kalkanlı TBM .....	12
2.2.4. Slurry TBM .....	13
2.2.5. Arazi Basıncı Dengeleme (Pasa Basıncı) (EPB) TBM.....	15
2.3. TBM TASARIM PARAMETRELERİ .....	17
2.3.1. Kesici Kafa ve Keskiler .....	17
2.3.2. Tork ve RPM Gereksinimi.....	21
2.3.3. İtme Kuvveti (Thrust) Gereksinimi.....	23
2.3.4. İlerleme Hızı (AR), Penetrasyon (PR), Spesifik Enerji (SE).....	26
2.3.5. Ayna Basıncı (EP).....	27
2.3.6. Zemin Koşullandırma Parametreleri .....	30
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>36</b>
3.1. ÇALIŞMA ALANI.....	36
3.2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ .....	38
3.3. KULLANILAN EPB-TBM'LER VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	55
3.4. VERİ SETLERİNİN OLUŞTURULMASI.....	60
3.4.1. Kazı Performans Verileri .....	60
3.4.2. Jeolojik Veriler.....	64

3.4.3. Vardiya ve Üretim Raporları.....	64
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>67</b>
4.1. EPB TBM'LERİN AYRIŞMA/BOZUNMA ZONLARINA GÖRE KAZI PERFORMANS BULGULARI .....	67
4.2. SPESİFİK ENERJİ (SE) VE PENETRASYON (PR) İLİŞKİSİ .....	79
4.3. NET İTME KUVVETİ [NTH] VE AYNA BASINCI [EP] İLİŞKİSİ.....	84
4.4. ZEMİN KOŞULLANDIRMA BÜYÜKLÜKLERİ (FİR – FER) VE KAZI PERFORMANS BÜYÜKLÜKLERİ İLİŞKİSİ.....	88
4.5. AYRIŞMA ZONLARI VE KESKİ TÜKETİMİ İLİŞKİSİ.....	97
4.6. TBM'LERİN İMALAT PERFORMANSLARI.....	107
4.7. AYRIŞMA ZONLARININ PROJE EKONOMİSİNE ETKİLERİ .....	124
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>146</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>151</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>156</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>157</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1. 1: Dünyada İlk TBM Konsept Çalışmalarından Bir Görünüm (Beckett, 1980).....	2
Şekil 2. 1: Tam Cephe Kesitli Tünel Açma Makinesi TBM Genel Kesit Görünümü (Ateş, 2013).....	6
Şekil 2. 2: Kesici Kafa ve Disk Tipi Keskiler.....	7
Şekil 2. 3: Tek Kalkanlı Bir TBM'e Ait İtme Pistonları.....	8
Şekil 2. 4: TBM Back-Up Bölümü (URL-1) .....	8
Şekil 2. 5: Kalkan Tiplerine Göre TBM'ler (Einstein ve Bobet, 1997) .....	10
Şekil 2. 6: Gripper TBM Kesit Görünümü (URL-2).....	11
Şekil 2. 7: Tek Kalkanlı Sert Kaya TBM İçin Kesit Görünümü (Ateş, 2013).....	12
Şekil 2. 8: Çift Kalkanlı TBM İçin Kesit Görünümü (Zhou ve diğ., 2018).....	13
Şekil 2. 9: Slurry TBM İçin Kesit Görünümü (Mohammed, 2017).....	14
Şekil 2. 10: EPB TBM ve Arazi Basıncı Denge Durumu Kesit Görünümü (Slinchenko, 2010).....	15
Şekil 2. 11: Tane Boyut Dağılımı ve EPB-Slurry TBM Kullanımı İlişkisi (Bappler, 2006).....	16
Şekil 2. 12: EPB TBM ve Ekipmanlarının Kesit Görümü (Shah, 2017). .....	17
Şekil 2. 13: V tipi (a) ve CCS tipi (b) disk fotoğrafları. ....	18
Şekil 2. 14: Bir EPB TBM Kesici Kafası Üzerinde Yer Alan Keski Elemanları. ....	19
Şekil 2. 15: Disk Keskilerin Kesici Kafa Üzerine Tipik Yerleşim Profili (Rostami ve Chang, 2017). ....	20
Şekil 2. 16: CH Üzerinde Disk Keskiler İçin Farklı Yerleşim Profilleri (Rostami ve Chang, 2017). ....	20
Şekil 2. 17: TBM'ler İçin Tipik Bir Tork – RPM Grafiği (Herrenknecht A.G) .....	24
Şekil 2. 18: Kayma Mekanizması Modeli (Anagnostou ve Kovari, 1996).....	29

<b>Şekil 2. 19:</b> $F_{0-3}$ katsayılarının belirlenmesinde kullanılan nomogramlar (Anagnostou ve Kovari, 1996).....	29
<b>Şekil 2. 20:</b> Zemin topaklanma ve tıkanma potansiyeli diyagramı (Hollman ve Thewes, 2013).....	34
<b>Şekil 2. 21:</b> Kesici kafa tıkanma durumu.....	34
<b>Şekil 3. 1:</b> Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesinin harita üzerinde yerleşimi.....	37
<b>Şekil 3. 2:</b> Projede yer alan TBM’lerin kazı güzergâhlarının şematik görünümü .....	38
<b>Şekil 3. 3:</b> Çalışma alanına ait jeoloji haritası.....	38
<b>Şekil 3. 4:</b> Güzergâhlara ait jeolojik kesitler.....	39
<b>Şekil 3. 5:</b> Tünel güzergâhı için jeolojik birimlerin stratigrafik kesit görünümü.....	41
<b>Şekil 3. 6:</b> TBM’lerin kazdığı farklı litoloji birimlerinin yüzdeler dağılımı.....	43
<b>Şekil 3. 7:</b> TBM 2 için parçalı ayna koşullarını gösteren CH içi ayna görüntüsü.....	44
<b>Şekil 3. 8:</b> Zemin – Kaya geçişleri (Vardar, 2018).....	46
<b>Şekil 3. 9:</b> Kayaçların ayrışma derecesine göre gruplandırılması (ANON, 1995; Ündül ve Tuğrul, 2011).....	47
<b>Şekil 3. 10:</b> Kayaçların ayrışmaya bağlı olarak zeminleşmesi (Shirlaw, 2016).....	47
<b>Şekil 3. 11:</b> Ayrışma gruplarının örnek karot görünümleri ve ayna fotoğrafları.....	49
<b>Şekil 3. 12:</b> Ayrışma zonlarına ait mekanik büyüklüklerin istatistikleri.....	51
<b>Şekil 3. 13:</b> $W_{3-4}$ olarak sınıflandırılmış zemin birimlerin plastisite diyagramı (Polat, 2014; Polat, 2015; Çınar ve diğ., 2017).....	51
<b>Şekil 3. 14:</b> Tünel güzergahı ve TBM’lerin ayrışma zonları düşey kesitleri.....	53
<b>Şekil 3. 15:</b> Ayrışma zonlarının her bir TBM için yüzdeler dağılım grafiği.....	54
<b>Şekil 3. 16:</b> Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesinde kullanılan TBM’ler; TBM 1 (b), TBM 2 (a), TBM 3 (c).....	55
<b>Şekil 3. 17:</b> TBM 1 (a), TBM 2 (b) ve TBM 3 (c) için tork grafikleri.....	57
<b>Şekil 3. 18:</b> TBM 1, 2 ve 3 için kesici kafa tasarımları ve keski özellikleri.....	59
<b>Şekil 3. 19:</b> TBM otomasyon ve haberleşme sisteminin basitleştirilmiş şematik görünümü.....	62
<b>Şekil 3. 20:</b> Örnek Vardiya Raporu.....	66



<b>Şekil 4. 1:</b> TBM 1 için başlıca kazı performans parametrelerinin ringlere bağlı dağılımı ve temel istatistik verileri.....	68
<b>Şekil 4. 2:</b> TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 kumlu bölgelerde yapılmış elek analizleri ve EPB Yöntem Diyagramı (Bappler, 2006) .....	69
<b>Şekil 4. 3:</b> TBM 2 için başlıca kazı performans parametrelerinin ringlere bağlı dağılımı ve temel istatistik verileri.....	71
<b>Şekil 4. 4:</b> TBM 2 kesicifi kafada, disk yataklarında ve disk keskilerde meydana gelen aşınmalar (Ateş ve diğ., 2016).....	72
<b>Şekil 4. 5:</b> TBM 3 Hat 1 için başlıca kazı performans parametrelerinin ringlere bağlı dağılımı ve temel istatistik verileri .....	73
<b>Şekil 4. 6:</b> TBM 3 Hat 2 için başlıca kazı performans parametrelerinin ringlere bağlı dağılımı ve temel istatistik verileri .....	74
<b>Şekil 4. 7:</b> Her 3 TBM'in temel kazı performans parametrelerinin ortalama ve ortalamının %95 güvenlik katsayısı için alt ve üst sınır değerleri.....	77
<b>Şekil 4. 8:</b> $W_1$ ayrışma zonu genelinde her üç EPB TBM'in SE – PR büyüklüklerinin regresyon analiz ve değerlendirmesi. ....	80
<b>Şekil 4. 9:</b> $W_{2-3}$ ayrışma zonu genelinde her üç EPB TBM'in SE - PR büyüklüklerinin regresyon analiz ve değerlendirmesi. ....	81
<b>Şekil 4. 10:</b> $W_{3-4}$ ayrışma zonu genelinde her üç EPB TBM'in SE-PR büyüklüklerinin regresyon analiz ve değerlendirmesi. ....	83
<b>Şekil 4. 11:</b> TBM 1 için NTh – EP dağılımları. ....	85
<b>Şekil 4. 12:</b> TBM 2 için NTh – EP dağılımları. ....	86
<b>Şekil 4. 13:</b> TBM 3 için NTh – EP dağılımları. ....	87
<b>Şekil 4. 14:</b> Ringlere bağlı olarak Hat 1 ve Hat 2 için FIR ve FER kullanımları. ....	89
<b>Şekil 4. 15:</b> Hat 1 ve Hat 2 için ayrışma zonlarına göre FIR ve FER değerlerinin dağılımı.....	91
<b>Şekil 4. 16:</b> Hat 1 $W_{3-4}$ ayrışma zonu FIR ve FER kullanımı detaylı dağılımı. ....	92
<b>Şekil 4. 17:</b> TBM 3 Hat 1 $W_{3-4}$ ayrışma zonu için çoklu regresyon analizleri.....	95
<b>Şekil 4. 18:</b> Kesici kafa ekipmanlarının tüketimine etki eden faktörler.....	98
<b>Şekil 4. 19:</b> Tekstilkent – Yüzyıl İstasyonları arası ayrışma zonlarının ve litolojik birimlerin yüzdelik dağılımları.....	100
<b>Şekil 4. 20:</b> Göztepe – Mahmutbey İstasyonları arası ayrışma zonlarının ve litolojik birimlerin yüzdelik dağılımları.....	102

Şekil 4. 21: Homojen olmayan ayna yüzeyi (a) ve homojen ayna yüzeyi (b). .....	104
Şekil 4. 22: TBM 2 için $W_{3-4}$ ayrışma zonuna ait kumlu bölgede gerçekleşen kesici kafa hasarları .....	105
Şekil 4. 23: Tünel imalatlarının TBM'ler arasındaki dağılımı. ....	107
Şekil 4. 24: Aylara göre tünel imalat miktarları.....	109
Şekil 4. 25: Aylara göre günlük ortalama tünel imatları. ....	110
Şekil 4. 26: TBM 1 için gerçekleştirilen imalat faaliyetlerinin yüzdeler dağılımları. ....	114
Şekil 4. 27: TBM 2 için gerçekleştirilen imalat faaliyetlerinin yüzdeler dağılımları. ....	115
Şekil 4. 28: TBM 3 için gerçekleştirilen imalat faaliyetlerinin yüzdeler dağılımları. ....	116
Şekil 4. 29: TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için arıza dağılımları. ....	118
Şekil 4. 30: Aylara göre ortalama kazı sürelerinin dağılımı. ....	120
Şekil 4. 31: Metre başı arıza sürelerinin aylara göre dağılımları. ....	121
Şekil 4. 32: Gerçekleşen ve simüle edilen kümülatif tünel ilerlemeleri .....	123
Şekil 4. 33: Bir EPBM tünel projesi için bazı ekonomik göstergelerin aylara bağlı sayısal analiz modeli.....	128
Şekil 4. 34: Maliyetlerin yüzde olarak dağılımı.....	129
Şekil 4. 35: Ekonomik analiz için akım şeması. ....	131
Şekil 4. 36: Gerçekleşen kümülatif tünel ilerlemeleri ve fonksiyonları.....	132
Şekil 4. 37: Simülasyon 1 kümülatif tünel ilerlemeleri ve fonksiyonları. ....	133
Şekil 4. 38: Ayrışma zonları için geliştirilmiş simülasyonlara ait kümülatif tünel ilerlemeleri.....	135
Şekil 4. 39: Gerçekleşen durum için ekonomik göstergelerin değişimi. ....	137
Şekil 4. 40: Gerçekleşen durum için özet ekonomik veriler. ....	138
Şekil 4. 41: Simülasyon 1 için ekonomik göstergelerin değişimi.....	139
Şekil 4. 42: Simülasyon 1 için özet ekonomik veriler. ....	139
Şekil 4. 43: Simülasyon 2 ( $W_1$ ) için ekonomik göstergelerin değişimi. ....	140
Şekil 4. 44: Simülasyon 2 için özet ekonomik veriler. ....	141
Şekil 4. 45: Simülasyon 3 ( $W_{2-3}$ ) için ekonomik göstergelerin değişimi.....	142

<b>Şekil 4. 46:</b> Simülasyon 3 için özet ekonomik veriler. ....	142
<b>Şekil 4. 47:</b> Simülasyon 4 ( $W_{3,4}$ ) için ekonomik göstergelerin değişimi.....	144
<b>Şekil 4. 48:</b> Simülasyon 4 için özet ekonomik veriler. ....	144



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa No

<b>Tablo 2. 1:</b> Farklı zemin koşullandırma/şartlandırma ajanları ve açıklamaları .....	31
<b>Tablo 3. 1:</b> TBM'lerin kazdığı farklı litoloji birimleri ve kazı ring mesafeleri (Ring = 1,4 metre).....	42
<b>Tablo 3. 2:</b> Farklı ayrışma zonları ve kazı ring mesafeleri (Ring = 1,4 metre) .....	52
<b>Tablo 3. 3:</b> Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesinde kullanılan TBM'lerin teknik özellikleri.....	56
<b>Tablo 3. 4:</b> TBM kazı ve performans parametreleri .....	63
<b>Tablo 4. 1:</b> Kazı performans büyüklüklerinin TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için istatistiksel analizi .....	76
<b>Tablo 4. 2:</b> Zemin koşullandırma ve TBM kazı parametrelerinin tek değişkenli doğrusal regresyon analizi.....	93
<b>Tablo 4. 3:</b> ANOVA test istatistikleri ve değerlendirmesi .....	97
<b>Tablo 4. 4:</b> TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için gerçekleşmiş disk ve sıyrıcı tüketimi verileri.....	99
<b>Tablo 4. 5:</b> Tekstilkent – Yüzyıl İstasyonları arası TBM 1 ve TBM 2 için disk tüketimi verilerinin karşılaştırma tablosu.....	101
<b>Tablo 4. 6:</b> Göztepe – Mahmutbey İstasyonları arası TBM 1 ve TBM 2 için disk tüketimi verilerinin karşılaştırma tablosu.....	103
<b>Tablo 4. 7:</b> Aylık ve günlük bazda en iyi ve ortalama tünel ilerlemesi değerleri.....	111
<b>Tablo 4. 8:</b> TBM'lerden kaynaklanmayan zaman kayıpları.....	112
<b>Tablo 4. 9:</b> TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için makinadan faydalanma (utilization) değerleri.....	113
<b>Tablo 4. 10:</b> Bir TBM tünel projesi için maliyet türleri ve örnekleri.....	125

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

### Simgeler

### Açıklama

<b>m</b>	: Metre
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>N</b>	: Newton
<b>kN</b>	: Kilonewton
<b>Pa</b>	: Paskal
<b>MPa</b>	: Megapaskal
<b>km</b>	: Kilometre
<b>dk</b>	: Dakika

### Kısaltmalar

### Açıklama

<b>TBM</b>	: Tünel Açma Makinesi
<b>EPB</b>	: Arazi Basıncı Dengeleme
<b>CH</b>	: Kesici Kafa
<b>SE</b>	: Spesifik Enerji
<b>Th</b>	: İtme Kuvveti (Thrust)
<b>Tr</b>	: Tork
<b>NTh</b>	: Net İtme Kuvveti
<b>RPM</b>	: Devir/Dakika (revolution per minute)
<b>AR</b>	: İlerleme Hızı
<b>EP</b>	: Ayna Basıncı
<b>CP</b>	: Kazı Odası Basıncı
<b>PR</b>	: Penetrasyon
<b>U</b>	: Makineden Faydalanma Oranı (Ütülizasyon)
<b>NPR</b>	: Net İmalat Hızı

## ÖZET

*Değişken Litolojilerdeki Ayrışma/Bozulma Derecelerinin EPB-TBM'lerin Kazı Performansı ve Maliyetine Etkilerinin Sayısal Analizi ve Değerlendirilmesi*

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrfan Serkan BİNEN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Nuray TOKGÖZ

Bu tez kapsamında Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesinde kullanılan 3 farklı EPB TBM'in kazı performans parametreleri (RPM, Tork, Thrust, İlerleme Hızı, Ayna Basıncı, Penetrasyon ve Spesifik Enerji) ile kazı güzergahında yer alan jeolojik birimlerin ayrışma dereceleri ( $W_1$ ,  $W_{2-3}$  ve  $W_{3-4}$ ) arasındaki ilişkilerin incelenmesi amaçlanmıştır. TBM kazılarından elde edilen yaklaşık 11000 ham veri, proje öncesi yapılan jeoteknik etütler ve projede kazılar sırasında yapılan gözlemlerden elde edilen bilgiler ışığında ayrışma derecesine bağlı olarak gruplandırılmıştır.

Ayrışma derecesinin kazı performansına etkisini belirlemek için regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Zemin şartlandırmanın ayrışma derecesi ile beraber kazı performansına etkisi analiz edilmiştir. Ayrışma derecesinin keski tüketimine etkisi de bu tez kapsamında incelenmiştir. Son olarak ayrışma derecesine bağlı olarak proje ekonomisinin gelişimi enflasyon etkisi de dikkate alınarak belirlenmeye çalışılmıştır.

Ayrışma zonlarına bağlı olarak yapılan değerlendirmeler de spesifik enerji [SE] ile Penetrasyon [PR] büyüklükleri arasında kuvvetli ilişkiler saptanmıştır. Ayna stabilitesini temsil etmek üzere kullanılan Net İtme Kuvveti [NTh] ve Ayna Basıncı [EP] oranlarına göre analizler yapılmış ve ayrışma zonlarının etkisi ortaya konmuştur. Zemin şartlandırma

parametrelerinin aşırı ayrılmış  $W_{3-4}$  ayrışma zonundaki kazı performansına etkileri detaylı olarak incelenmiş, FIR (%), FER gibi büyüklükler ile kazı verimini temsil eden Spesifik Enerji [SE] arasında  $r > 70$  gibi güçlü korelasyonlar saptanmıştır. TBM'lerin keski tüketimlerine ait veriler derlenmiş ve ayrışma zonlarıyla birlikte değerlendirilerek ayrışma derecesinin keski tüketimi üzerindeki etkileri de ayrıca değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde keski tüketimi üzerinde ayrışma derecesiyle birlikte ayrılmaya maruz kalan litolojinin de önemli rol oynadığı gözlenmiştir.

Tez kapsamında yer alan, ayrışma zonlarının kazı ekonomisi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla projeye ait tüm vardiya ve üretim raporları incelenmiştir. Arıza ve duraklama süreleri analiz edilmiştir. TBM'ler için makineden faydalanma oranları saptanmış ve projenin gerçekleşen durumunun bir analizi yapılmıştır. Elde edilen bulgular ile simülasyon çalışmalar gerçekleştirilerek TBM'lerle ilgili olmayan bekleme ve duraklamaların etkisi elimine edilmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarla tünel ilerlemelerinin ve projenin gelişimi her bir ayrışma zonu için ayrıca belirlenmiştir. Projenin mevcut durumda tamamlanma süresi 34 ay iken TBM'lerle ilgili olmayan bekleme ve duraklamalar düşüldüğündeki tamamlanma süresi 28 ay'a gerilemiştir. Ayrışma zonları baz alınarak yapılan analizlerde ise en iyi tamamlanma süresi ve karlılık  $W_{2-3}$  ayrışma zonunda 26 ay tamamlanma süresi ve %23,6 genel karlılık oranı ile elde edilmiştir.

Ayrışmanın ekonomik etkisinin belirlenebilmesi için enflasyon etkisini de dikkate alan bir ekonomik model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu ekonomik model içerisine gerçekleşen ve simülasyon olarak elde edilen tünel ilerlemelerin yerleştirilmesiyle projenin ekonomik gelişimi ayrışma zonlarına bağlı olarak saptanabilmiştir. Son olarak, yapılan çalışmalar sonucunda ayrışma zonlarının proje ekonomisi üzerindeki etkileri açıklanmıştır. Enflasyon etkisinin proje tamamlanma süresinin artmasıyla beraber eksponansiyel olarak arttığı ve karlılığı ciddi şekilde etkileyebildiği gözlenmiştir.  $W_{2-3}$  ayrışma zonundaki orta ve az ayrılmış birimler  $W_1$  ayrışma zonunda gözlenen sert zemin kaynaklı keski tüketimi gibi problemlerle  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda gözlenen stabilite, topaklanma, zemin koşullandırma gibi sorunları barındırmadığından EPB TBM'ler için en uygun kazı koşullarını oluşturmaktadır.

Mayıs 2019, 175 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Ayrışma Derecesi, EPB TBM, Kazı Performans Büyüklükleri, Regresyon, Zemin Şartlandırma, Kazı Ekonomisi, Enflasyon

## **SUMMARY**

*Numerical Analysis And Assessment Of The Effects Of Weathering Degree In Varying Lithological Conditions On The Excavation Performance And Related Costs Of EPB TBMs*

### **M.Sc. THESIS**

**İrfan Serkan BİNEN**

**Istanbul University-Cerrahpasa**

**Institute of Graduate Studies**

**Department of Mining Engineering**

**Supervisor : Prof. Dr. Nuray TOKGÖZ**

In the scope of this thesis study, relations between the weathering degrees ( $W_1$ ,  $W_{2-3}$  and  $W_{3-4}$ ) of the geological units that reside on the excavation route and the excavation performance parameters (RPM, Torque, Thrust, Advance Rate, Face Pressure, Penetration and Specific Energy) of 3 different EPB TBMs that were used during the Mecidiyekoy – Mahmutbey Metro Project have been investigated. Aproximately 11000 raw data which were obtained from TBM's, have been classified depending on their weathering degrees which were assigned according to the information obtained from the preliminary geotechnical studies and observations made during the project.

In order to determine the effect of weathering degree on excavation performance, regression analyses have been performed. Influence of ground conditioning were analyzed with weathering degrees. Effect of weathering on cutter consumption were also investigated in the scope of the thesis study. Lastly, development of the project economy including the effect of inflation has been evaluated in accordance with the weathering degrees.



Evaluations made considering weathering degrees have shown that there are strong correlations between Specific Energy [SE] and Penetration [PR]. Analyses were made in regard of Net Thrust [NTh] and Face Pressure [EP] ratios which were used to represent face stability conditions, and the effects of weathering were presented. Influence of ground conditioning parameters on the excavation performance during the excavations of excessively weathered  $W_{3-4}$  weathering zones has been investigated in detail and strong correlations such as  $r > 70$  were obtained between ground conditioning parameters FIR (%), FER and Spesifik Energy [SE] which represents the excavation efficiency. Also, cutter consumption data of TBMs were put together and evaluated according to the weathering zones, thus it was possible to determine the effects of weathering on the cutter consumption, seperately. According to the evaluations, it was observed that along with the degree of weathering, lithology of the units which were exposed to weathering also plays an important role on cutter consumption.

In the scope of this thesis study, in order to determine the effects of weathering zones on the Project economy, all of the shift and production records and logs have been examined. Stoppage and fault times were analyzed. Utilization values of the TBMs were determined and the realized state of the Project has been analyzed. It was aimed to eliminate the influence of stoppage and fault times which were not directly related with the TBMs by carrying out simulation studies according to the findings obtained from the realized state analysis of the Project. With the help of simulation studies, tunnel advance and Project development were determined for each different weathering zone. While the total completion time of the Project was 34 months, simulations show that eliminating the stoppage times which are not directly related with the TBMs reduces the completion time to 28 months. Through the analyses based on zones with different weathering degrees, best completion time and profitability values were obtained for  $W_{2-3}$  weathering zone with 26 months of completion time and 23.6% overall profitability.

An economical model including the effect of inflation were later developed to find out the economical impact of weathering. Therefore, it was possible to obtain the economical development of the Project according to each weathering zone by implementing the realized and simulated tunnel advances into the developed economical model. Finally, effects of each weathering zone on the Project economy were explained. Enflasyon etkisinin proje tamamlanma süresinin artmasıyla beraber arttığı ve karlılığı ciddi şekilde etkileyebildiği gözlenmiştir.  $W_{2-3}$  ayrışma zonundaki orta ve az ayrışmış birimler  $W_1$  ayrışma zonunda gözlenen sert zemin kaynaklı keski tüketimi gibi problemlerle  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda gözlenen stabilite, topaklanma, zemin koşullandırma gibi sorunları barındırmadığından EPB TBM'ler için en uygun kazı koşullarını oluşturmaktadır. It was observed that the effect of inflation rate exponentially increases with the increasing Project completion time and may affect the overall profitability of the Project drastically. Since slightly or moderately weathered units of  $W_{2-3}$  weathering zone do not possess any of the hard rock related problems observed in  $W_1$  weathering zone such as cutter consumption and face stability issues, clogging, ground conditioning problems observed in  $W_{3-4}$  weathering zone,  $W_{2-3}$  weathering zone has found to be the most favourable for EPB TBMs.

May 2019, 175 pages.

**Keywords:** Weathering Degree, EPB TBM, Excavation Performance Parameters, Regression, Ground Conditioning, Project Economy, Inflation

## 1. GİRİŞ

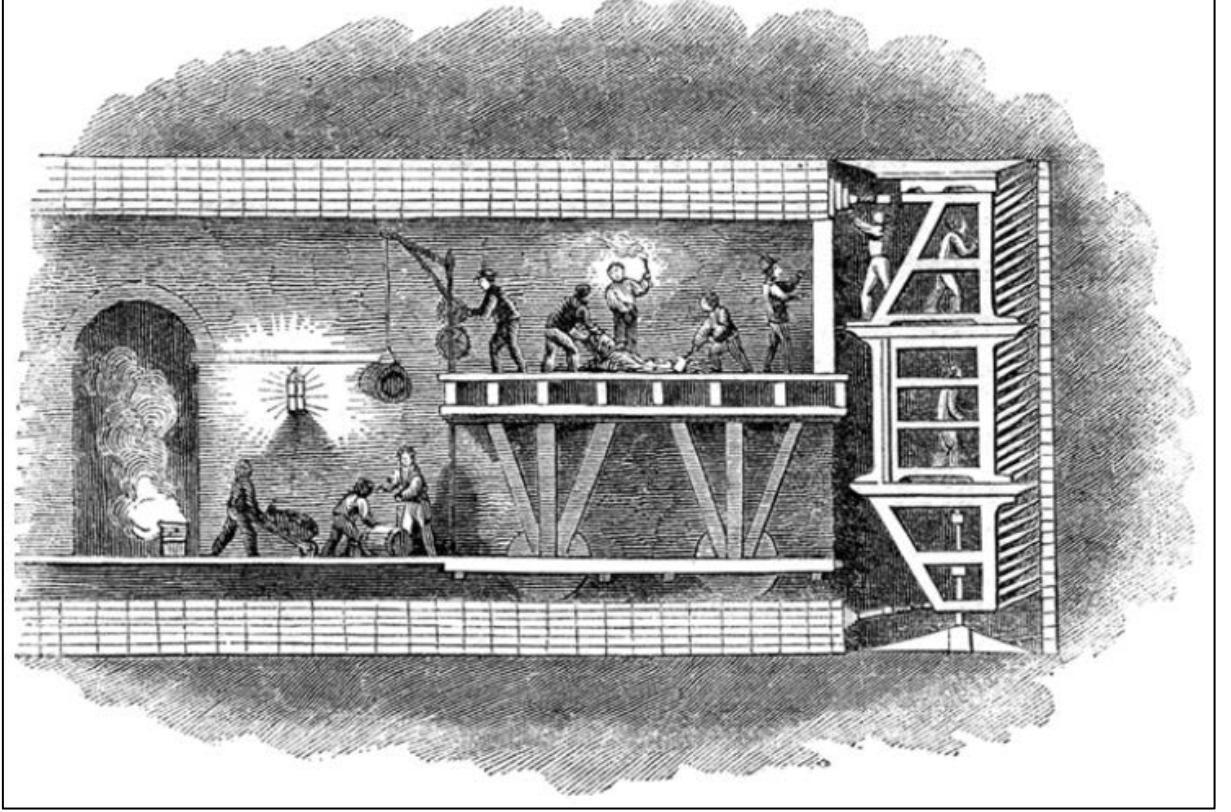
Artan dünya nüfusu ve buna bağılı olarak artan şehirleşme altyapı ihtiyaçlarını ve sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Bu ihtiyaçların karşılanması ve sorunların giderilmesi için söz konusu altyapı projelerinin gerçekleştirilmesinde yüzeydeki şehirleşme de göz önüne alındığında yeraltı kapalı kazı uygulamalarına başvurulmaktadır. Tüm dünyada yaygın şekilde kullanılan konvansiyonel tünelcilik yöntemlerinin (klasik kazı, delme ve patlatma, vb) sık ve yoğun yapılaşmanın olduğu şehir tünelciliğinde uygulanması bazı güçlükleri de beraberinde getirmektedir.

Tam Cephe Tünel Açma Makinaları (TBM) ilerleme hızı, ekonomi ve emniyet gibi açılardan sağladıkları avantajları ile özellikle şehir tünelciliğinde hızla yaygınlaşmakta ve tercih edilmektedir. TBM'lerin kalkanlı yapısı sayesinde tünel ekibi için emniyetli bir çalışma alanı oluşmaktadır. Aynı zamanda çevre kaya veya zemin ortamına minimum düzeyde örülenme gerçekleştiğinden özellikle yoğun yapılaşma altında yer alan tünellerde yüzey oturmalarının emniyeti açısından büyük avantajlar sunmaktadır.

TBM ile ilgili ilk tasarım konsepti (Şekil 1.1) Sir Marc Isambard Brunel tarafından 1825 yılında ortaya atılmıştır. Londra'da Thames nehrinin altından geçecek bir tünel projesi için kalkanlı ve itme silindirleri içeren bir tasarım gerçekleştirmiştir. Ancak bu tasarım her ne kadar kalkan konseptini içerse de kazının klasik yöntemlerle yapılmasından dolayı tam anlamıyla bir mekanizasyon içermemektedir. Öte yandan bu kalkan fikri daha sonra geliştirilecek ve mekanizasyondaki ilerlemelerle birleştirilerek yeni konseptlerin oluşmasını sağlayacaktır.

Yaklaşık 20 yıl kadar sonra Belçikalı Mühendis Henri- Joseph Maus Fransa ve İtalya arasında yapılması planlanan bir demiryolu projesinin tasarımını üstlenmiştir. Bu tünel dağlık alanda 13 km kesintisiz bir tünel yapımını gerektirmektedir. O dönemde tünel yapımı barut kullanımı ve delme patlatma ile gerçekleştiğinden tünel ilerleme hızları patlatma sonrası oluşan zehirli gazların tünelden ne kadar hızlı uzaklaştırılabildiğiyle kontrol edilmektedir. Söz konusu tünelin uzunluğu göz önüne alındığında dönemin havalandırma teknolojileri yetersiz kalmaktadır. Madencilik alanında oldukça büyük bir üne sahip olan Maus, bu amaçla 1846 yılında Torino'da lokomotif benzeyen, üzerinde yüzden fazla darbeli delgi matkabı olan bir

makine dizayn etmiştir. Fakat daha sonra makinenin çalışması ve işletmesi için gerekli olan enerjinin tünel uzunluğu dikkate alındığında mekanik aktarımındaki güçlükler sebebiyle projenin finansmanı durdurulmuştur. Bu tünel daha sonra havalandırma teknolojilerindeki iyileştirmelere bağlı olarak barutla delme ve patlatma yöntemi ile inşa edilmiştir.



**Şekil 1. 1:** Dünyada İlk TBM Konsept Çalışmalarından Bir Görünüm (Beckett, 1980)

TBM'lerle ilgili ilk konsept çalışmalar 1930'lara kadar devam etmiş, pek çok patent alınmış olmasına rağmen bütünlüklü ve işlevsel bir makine imal edilememiştir. 1950'li yıllarda ise ilk modern ve işlevsel TBM olarak kabul gören makine James S. Robbins tarafından tasarlanmıştır.

1950'li yıllardan bu yana sürekli gelişme gösteren TBM'ler bugün dünyanın farklı bölgelerindeki üretici ve mühendisler tarafından 17 metre çapa kadar üretilebilmektedir. Farklı jeolojik veya tünel tasarım koşullarının gereksinimlerini karşılamak amacıyla farklı türde TBM'ler (sert kaya, yumuşak zemin, pasa veya slurry basınçlı, vb) tasarlanmıştır. Günümüzde TBM'ler modern tünelcilikte sıklıkla başvurulan önemli bir araç haline gelmiştir.

Bir tünel projesi için en önemli aşamalardan birisi TBM seçimidir. TBM'lerin ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasından dolayı TBM seçiminin dikkatli yapılması ve iyi planlanması gerekmektedir. Aynı zamanda ortam jeolojik koşullarına uygun olmayan bir makine seçimi üretim hızında büyük dlere sebep olduğu gibi tünel ve yüzey stabilitesi açısından da büyük emniyet risklerini beraberinde getirebilir.

TBM seçiminin düzgün Şekilde yapılabilmesi için öncelikle kapsamlı ve isabetli bir n jeolojik çalışma gereklidir. Buna ek olarak Şehir tünelciliğinde tasarlanan tünel hattı üzerinde yer alan yüzey yapılarının ve altyapıların da dikkatle incelenmesi ve TBM seçiminde hesaba katılması önemlidir. Daha sonra ihtiyaç duyulan TBM'in türü güncel literatürdeki bilgiler dikkate alınarak belirlenmelidir. TBM'in türüne karar verildikten sonra söz konusu TBM için tasarım parametreleri olan itme kapasitesi, tork kapasitesi, kesici sayısı v.b. gibi parametreler ilgili verilerle eŐleŐtirilerek belirlenmelidir.

TBM'ler ilk yatırım maliyeti yüksek, tasarım ve üretim aŐaması zaman alan ve genellikle projeye özel olarak dizayn edilen kazı makinelerdir. Öte yandan Şehir tnelciliği gibi yzeeye yakın açılan tünelde jeolojik etmenlerin genellikle aŐırılmaŐması, projelerde dünya genelindeki tipikleŐme ve aynı Şehirde ve/veya dünyanın farklı bölgelerinde benzer özellikteki kaya ve zemin koşullarıyla sıkça karŐılaŐılabilmesi gibi sebeplerden ötürü bir proje için kullanılan aynı TBM ve/veya aynı marka/modeldeki TBM uygun özellikteki farklı bir projede de kullanılabilir. Bu anlamda oluşan kısmi seri üretim anlayışı TBM tasarım parametreleri belirlenirken ayrıca dikkate alınması gereken bir unsur olmaktadır. Ek olarak bazı durumlarda elde hazır bulunan bir TBM'in revize edilerek farklı özellikteki bir projede kullanılması yeni bir TBM satın alınması veya üretilmesinden daha ekonomik olabilir. Bu sebeple TBM tasarımında ilerde ortaya çıkabilecek revizyon ihtiyaçlarına imkân verebilecek bir tasarım anlayıŐının belirlenmesi ilerde ortaya çıkabilecek olası revizyon maliyetlerinin azaltılmasında büyük rol oynamaktadır.

TBM'lerin özellikle zorlu zemin ve yüzey koşulları barındıran Şehir tünelciliğinde daha verimli bir Şekilde kullanılması tüm dünyada araŐtırmacıların yoėunlaŐmakta olduğu bir çalışma alanına dönüŐmektedir. TBM'lerin bu anlamda verimlerinin artırılabilmesi için ise tasarım parametreleri ile sahada gerçekleşen performansları arasındaki ilişkinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Öte yandan TBM'lerin çalışma alanları özellikle Şehir tnelciliği için yzeeye yakın, karmaşık jeolojik ortamlar olduğundan performansları da bu jeolojik karmaŐıklıėa

bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple TBM tasarım parametreleri ve saha performanslarını jeolojik etmenlerden bağımsız olarak değerlendirmek çok doğru bir yaklaşım olmamaktadır.

TBM'ler için tasarım parametrelerinin, saha performanslarının ve jeolojik koşulların eşleştirilmesinde en önemli sorunlardan birisi jeolojik koşulların sayısallaştırılmasının zorluğudur. Bu zorlukların başında jeolojik ortamların yapı itibariyle mühendislik malzemesi olmayışından ötürü modellenmesinin güçlüğüdür. Her ne kadar literatürde jeolojinin karakterize edilmesi ve sayılaştırılması için çeşitli yöntemler bulunsa da bu yöntemlerin bir performans analizinde kullanılma açısından hassasiyeti ve pratikliği tartışma konusudur.

Şehir tünelciliğinde yüzeye yakın sedimanter ya da çökel oluşumlu karmaşık jeolojik ortamlarda bu kazı performans tahminlerinin yapılması ve proje ekonomisine olan etkilerinin önceden belirlenebilmesi ise değişken bir ekonomide oldukça güç olabilmektedir. Bu belirsizlikler sebebiyle oluşan yüksek risklerden dolayı tünel projelerinde teknik veya ekonomik sorunlarla karşılaşılabilir.

Bu tez kapsamında yukarıda bahsi geçen sorunlara ışık tutabilmek ve farklı bir bakış açısı sunmak adına İstanbul'da yapımı tamamlanmış olan Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro kazılarında alınan 3 farklı TBM'e ait veriler, jeolojik ortamın ayrışma/bozunma dereceleri ile ilişkilendirilerek incelenmiştir. Burada amaç litolojik değişimler ve bunların özellikle ayrışma/bozunma derecelerini dikkate alan kazı performans kestirim (tahmin) modellerinin yanında bu ayrışma/bozunma derecelerinin özellikle projenin maliyetleri ve ekonomik boyutu üzerindeki etkilerinin “bütünleşik (entegre) sayısal bir model” ile belirlenmesidir.

Bu bağlamda, İstanbul Mahmutbey-Mecidiyeköy Metro Projesinde kazı yapmış olan aynı çapta ancak farklı marka ve teknik özelliklerdeki üç adet EPB TBM'den kazı ve üretim verileri elde edilmiştir. Bu ham veriler özellikle, aynı formasyon (Trakya Formasyonu) içindeki farklı litolojik birimler ve bunların (kumtaşı, siltaşı, kiltası) ayrışma/bozunma derecelerinin, kazı materyallerinin jeomekanik ve jeoteknik büyüklüklerindeki mertebe değişimleri ve bu değişimlerin sağlayacağı kazı kolaylığının, kazı performansı yanında kazı ekonomisi ve dolayısıyla tünelin proje maliyeti üzerine yansımaları irdelenecektir.

Bu amaçla, 16 km'lik proje güzergâhına ait 9000-10000 adet ring kazısı ve bu kazıların her birinde 8-10 adet kazı performans ham verisini (kesici kafa dönüş hızı, kesici kafa torku, itme

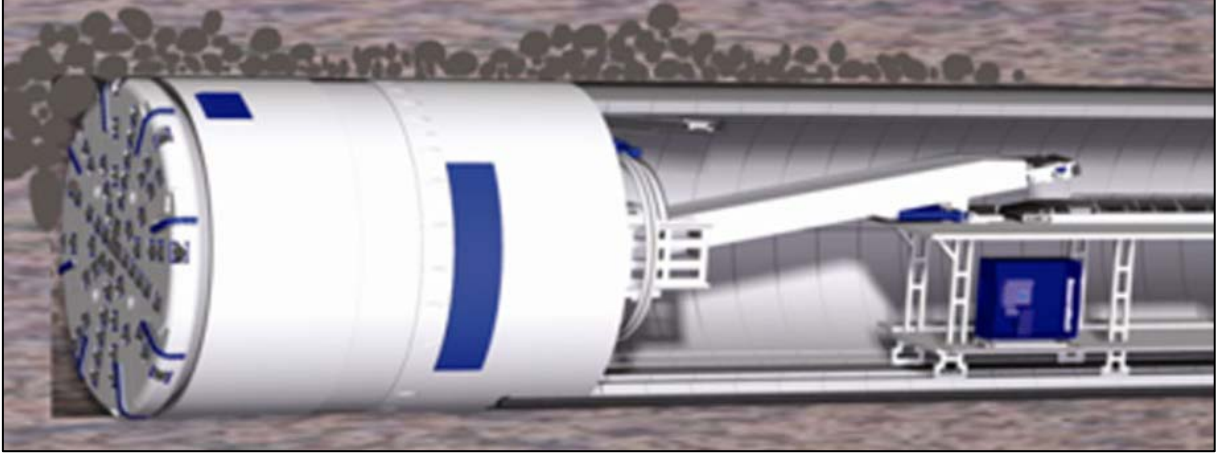
kuvveti, kazı ilerleme hızı, penetrasyon, spesifik enerji, kazıda tüketilen su ve kimyasal miktarlarını (FIR, FER) kapsayan anlık EPB-TBM verileri yanında, vardiyada yapılan ilerlemeleri, meydana gelen arızaları/duraklamaları ve sebeplerini süreleriyle beraber gösteren üretim/vardiya verileri; tünel güzergâhı üzerinde kazılan litolojik birimlerin mekanik ve yapısal özelliklerini kapsayan jeomekanik ve jeoteknik veriler kullanılarak farklı ayrışma/bozunma zonlarına göre gruplandırılacaktır. TBM'lerin kazı performansını denetleyen parametreler ile ayrışma zonları arasındaki ilişkiler irdelenecektir. Ayrışma zonlarının TBM'lerin kazı performansına, zemin koşullandırmaya, kesici kafa ekipmanları ve disk tüketimine, tünel ilerlemeleri ve tünel imalatı performansına ve son olarak da projenin ekonomik gelişimine ve kazı ekonomisine olan etkileri tespit edilmeye çalışılacaktır.

Böylelikle, ülkemizde ve tüm dünyada hızla gelişen şehir tünelticiliği ve altyapı/ulaşım yatırımları için olası teknik ve ekonomik risklerin azaltılmasına daha bilimsel ve teknik bir bakış açısı yanında yerel ve sektörel açıdan da pratik uygulama yöntemleri geliştirerek daha hızlı ve doğru karar alma süreçlerine katkı sağlayabilmek amaçlanmaktadır.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1.TBM GENEL ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

TBM tür ve cinsine, marka veya modeline göre çalışma prensiplerinde bazı farklılıklar olsa bile genel çalışma sisteminde ortak olan noktalar bulunmaktadır. Bu noktalardan ilki TBM'lerin diğer mekanize yeraltı kazı araçlarından (roadheader, tek kollu galeri açma makineleri, tamburlu kesiciler, v.b) farklı olarak tam cephe (tam ayna) kesitli kazı araçları olmasıdır (Şekil 2.1). Bu ortak noktaların şekli veya işleyişinde bazı çeşitlilikler olsa tüm TBM'lerde ortak olan genel sistemler bulunmaktadır.



**Şekil 2. 1:** Tam Cephe Kesitli Tünel Açma Makinesi TBM Genel Kesit Görünümü (Ateş, 2013).

Tüm TBM'ler için en temel ortak unsur kazının yapılış şeklidir. TBM'lerde kesici kafa adı verilen ve üzerinde kesicilerin dizili olduğu bir bölüm bulunmaktadır (Şekil 2.2). Bu bölümün dönmesiyle kesiciler aynayı taramakta ve kesme işlemini gerçekleştirebilmektedir. Kesici kafanın (CH) döndürülebilmesi için bütün TBM'ler bir ana tahrik sistemi ve ana rulman yapısı bulunmaktadır. Ana tahrik sistemi genellikle hidrolik olurken son dönemlerde teknolojinin gelişmesiyle beraber elektrikli tahrik sistemleri daha verimli olmaya başlamış ve bu sebeple de giderek yaygınlaşarak hidrolik tahrik sisteminin yerini almaya başlamıştır.

Yukardaki dönme hareketine ek olarak hem TBM'in kazı yönünde ilerleyebilmesi hem de kazı işleminin gerçekleşmesi için gerekli olan itme kuvvetinin (aynaya normal baskı) sağlanabilmesi amacıyla bütün TBM'lerde bir itme sistemi yer almaktadır (Şekil 2.3). Bu itme

sisteminin özellikleri ve itme gücünün sağlanma şekli TBM türüne göre değişiklik gösterebilmektedir.



**Şekil 2. 2:** Kesici Kafa ve Disk Tipi Kesiciler.

Yapılan kazı işlemi sonucu gevşetilen ve koparılan malzeme (hafriyat) bir şekilde aynadan uzaklaştırılmalıdır. Bunun gerçekleşebilmesi için bütün TBM'ler bir pasa nakil sistemine sahiptir. Bu pasa nakil işlemi genellikle TBM içinde kazı sistemine entegre bir bant konveyör sistemi veya helezon konveyörle beraber bir bant konveyör sistemi marifetiyle gerçekleştirilmektedir.

TBM'in kazı ve tahkimat/destek işlemlerine gerçekleştirebilmesi için gerekli olan tüm ekipman ve donanımın ve bunların kumanda ünitelerinin yer aldığı bölüm ise back-up kısmı olarak adlandırılmaktadır. Çelik konstrüksiyon gantry birimlerinden ve bunların içerisine belli bir düzende yerleştirilmiş ekipmanlardan oluşur (Şekil 2.4).





**Şekil 2. 3:** Tek Kalkanlı Bir TBM'e Ait İtme Pistonları



**Şekil 2. 4:** TBM Back-Up Bölümü (URL-1)

Tüm TBM'lerde ortak olarak yer alan bu birimler aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralanabilir.

- Kesici Kafa
- Ana Tahrik ve Rulman Sistemi
- İtme Sistemi
- Pasa Nakil Sistemi
- Back-Up Sistemi

## 2.2. TBM TÜRLERİ

Tünel açma makineleri genellikle iki ana kısımdan oluşur. Bunlardan ilki kesici kafanın da yer aldığı kalkan kısmı, diğeri ise destek ünitelerin yer aldığı back-up kısmıdır. TBM türüne göre farklılık göstermekle beraber kalkanlı kısımda genellikle motorlar ve benzeri ekipmanlar yer alır. Back-up kısmında ise işletmeyle ilgili diğerk destek üniteleri, hidrolik ve elektrik ekipmanlar, tesisat ve tank elemanları, havalandırma ekipmanları bulunmaktadır.

TBM'lerin üretimi ve seçimi büyük oranda projenin jeolojik koşullarıyla bağlantılıdır. TBM üreticileri tarafından farklı adlandırmalar yapılmış olsa da genel olarak TBM'leri iki kategori altında toplamak mümkündür. Bu kategoriler aşağıda verilmiştir:

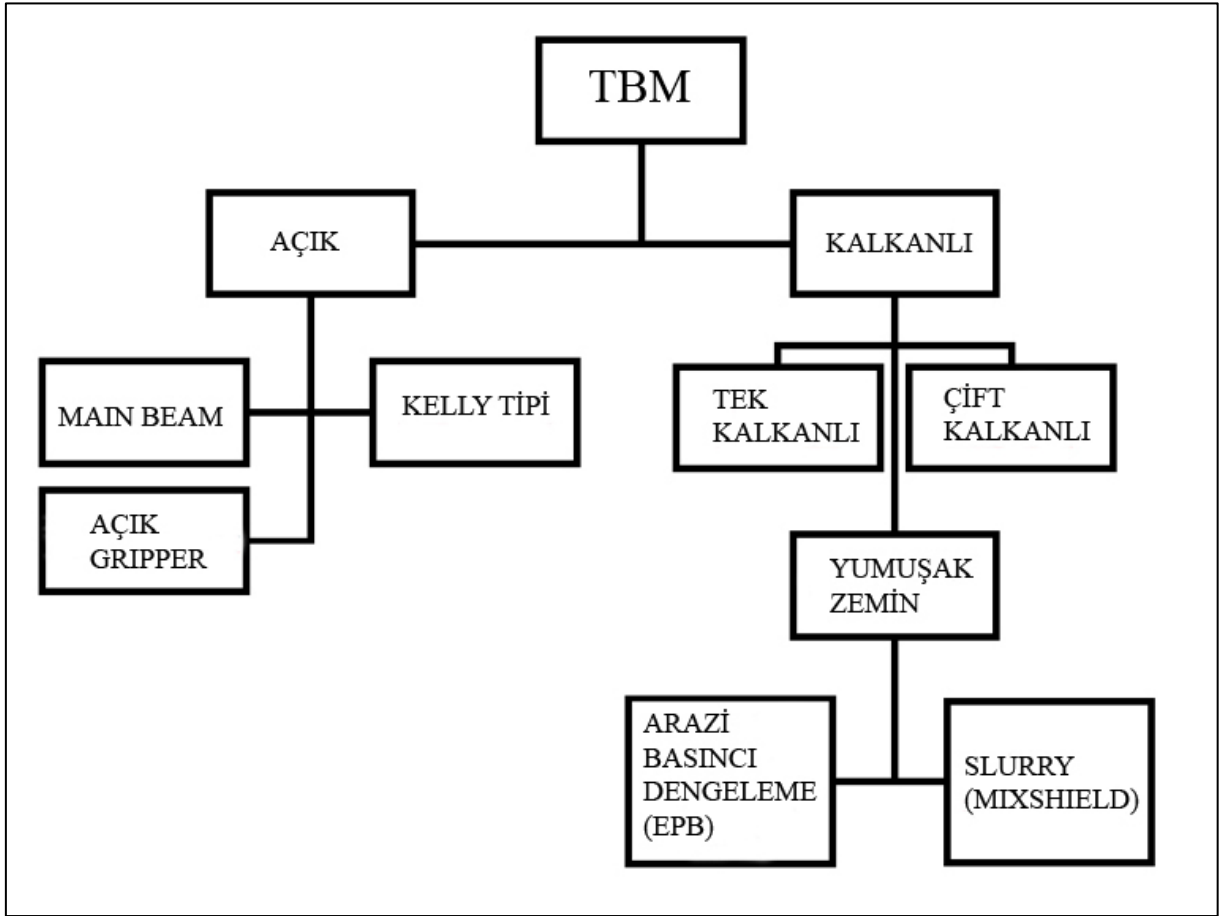
- Sert Kaya (Hard Rock)
- Yumuşak Zemin (Soft Ground)

Einstein ve Bobet (1997) tarafından yapılan çalışmada TBM türleri kalkan tipine göre Şekil 2.5'teki gibi sınıflandırılmıştır. Farklı jeolojik koşullarda o koşullara uygun kalkan desteği sağlayan TBM tipi kullanılmalıdır. Jeolojik koşulların stabil olduğu durumlarda kalkansız açık tip TBM'ler de tercih edilebilmektedir.

TBM seçimi ile ilgili olarak pek çok araştırmacı ve kurum (ITA, DAUB, JSCE, vb.) çeşitli kılavuzlar veya standartlar oluşturmuştur.

Açık kalkanlı (kalkansız) TBM'leri tek grup altında da toplamak mümkündür. Bu TBM'ler tünel etrafında yer alan kaya ortamının çok dayanıklı olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Destek sistemi olarak ise genellikle püskürtme beton ve çelik hasır uygulaması yapılmaktadır. Gerektiği takdirde bu sisteme iksa desteği veya saplama/bulon desteği de eklenebilmektedir. Kaya ortamının çok stabil ve dayanıklı olduğu bazı projelerde hiçbir tahkimat sistemi kullanılmadığı da bilinmektedir.

Kalkanlı TBM'ler zayıf kaya koşullarında veya zemin koşullarında tercih edilir. Kalkanlı TBM'lerde kazı sonrası kalıcı destek olarak önceden hazırlanmış ve belirli bir geometriye sahip prekast beton segmentler kullanılır. Bu segmentler, kalkan içerisinde bir araya getirilerek dairesel (ring) kesitli bir kalıcı beton tahkimat elde edilir.



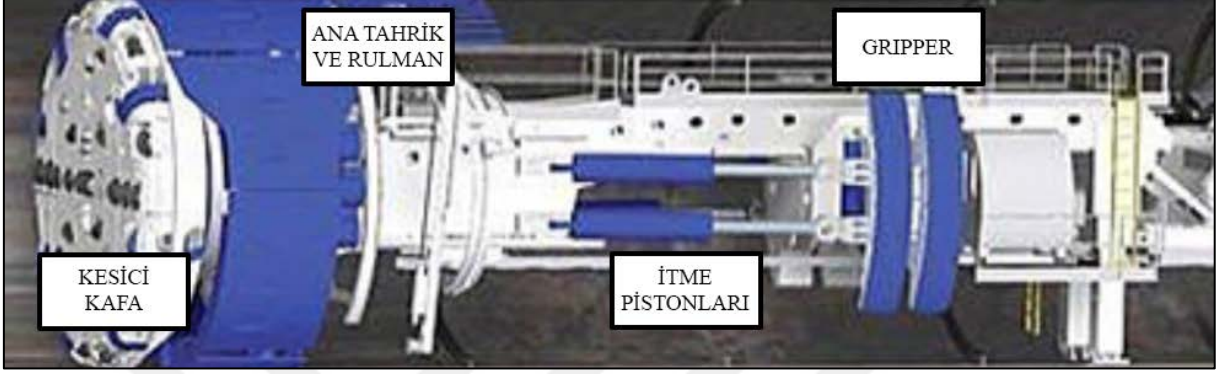
Şekil 2. 5: Kalkan Tiplerine Göre TBM'ler (Einstein ve Bobet, 1997)

### 2.2.1. Gripper TBM

Açık (kalkansız) tip TBM'lerden olan Gripper TBM (Şekil 2.6) stabilitesini orta ve uzun vadede koruyabilen sert kaya ortamlarda kullanılmak üzere dizayn edilmiştir. Tünelin açılacağı kaya kütlelerinin herhangi bir kalıcı iksa, bulon ve hatta püskürtme beton uygulaması gerektirmediği koşullarda Gripper TBM'in kullanımı daha da ekonomikleşmektedir. Kesici kafa arkasında makineyi ilerletmek ve kazı için gerekli itme gücünü oluşturmak adına tünel yan cidarlarına basan hidrolik tahrikli gripper adı verilen pabuçlar yer alır (Maidl et al., 2008).

Gripperlar tünel yan cidarlarına basarak (yanal kuvvet) ana gövdeyi sabitlerler. Daha sonra bu gripperlardan tünel eksenine doğrultusunda uzanan hidrolik pistonlar tünel aynasına normal kuvvet uygulanmasını sağlar. Kesici kafa ana tahrik ve rulman sistemi vasıtasıyla dönüş hareketini gerçekleştirirken bir yandan da itme pistonları tarafından itme kuvveti uygulanır ve kazı işlemi bu sayede gerçekleştirilmiş olur. Kesici kafa tarafından kazılan malzeme kesici kafada yer alan boşluklardan kazı odasına ve buradan da pasa nakil sistemi (bant konveyör)

aktarılır ve aynadan uzaklaştırılır. Piston boyu sonuna geldiğinde kazı döngüsü tamamlanmış olur. Gripperlar serbest bırakılır, öne çekilir ve tekrar yan cidara sabitlenir. Bu işleme regrip adı verilir. Regrip işleminden sonra tekrar itme pistonu uzunluğunun müsaade ettiği adım mesafesi kadar kazı yapılabilir.



Şekil 2. 6: Gripper TBM Kesit Görünümü (URL-2).

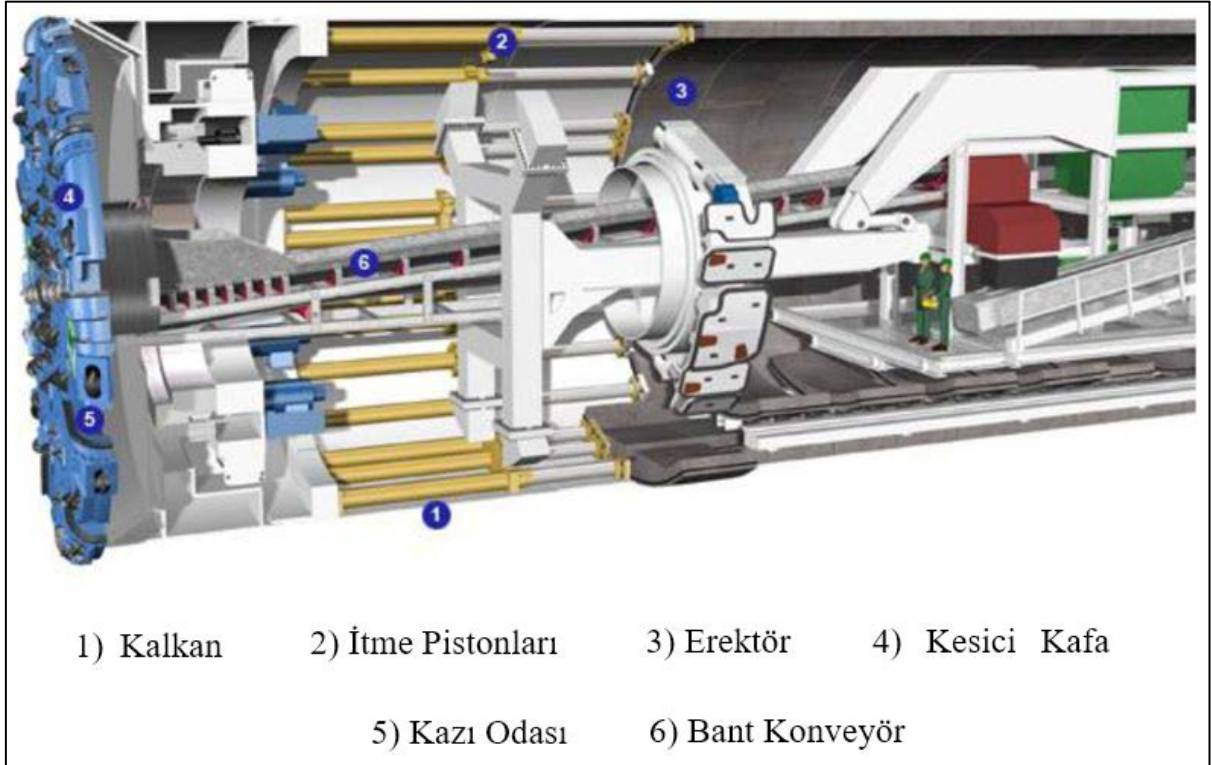
Jeolojik ortamın çok uygun (stabil) olduğu durumlarda herhangi bir tahkimata ihtiyaç duyulmaz. Tahkimat gereken durumlarda ise kazıyla eş zamanlı olarak saplama/bulon, hasır çelik, iksa ve püskürtme beton çözümlerinden biri veya bunların önceden belirlenmiş uygun bir kombinasyonu tünel personeli tarafından uygulanır.

### 2.2.2. Tek Kalkanlı TBM

Tek kalkanlı TBM'ler stabilitesini yalnızca kısa vadede koruyabilen sert kaya ortamı içerisindeki tünel projelerinde kullanılmaktadır. Kesici kafa tasarımı olarak açık (kalkansız) tip TBM'lerden temel olarak bir fark bulunmamakla beraber tünelin geçici olarak desteklenmesi ve TBM ekibi ile ekipmanın korunması amacıyla açık tip TBM'lerden farklı olarak kalkan kısmı eklenmiştir.

Tünelin kalıcı destek sistemini oluşturan precast beton segmentler ise yine kuyruk kısmında yer alan ve kalkan muhafazası içerisinde kalan kuyruk kalkanında birleştirilir. Böylelikle TBM ile kaya/zemin ortamında desteklenmeyen bir boşluk kalmamış olur. Açık tip TBM'lerle olan bir başka farklılık ise kalkanlı TBM'lerde itme kuvvetini oluşturan itme pistonlarının kaya ortamında değil doğrudan en son kurulmuş olan segment destek sistemine basmasıdır. Bu sayede gripper pabuçlara olan ihtiyaç da ortadan kalktığından bu tür TBM'lerde gripper ekipmanı bulunmamaktadır (Maidl et al., 2008).

Şekil 2.7’de bir tek kalkanlı sert kaya TBM’in genel şematik görünümüne yer verilmiştir.



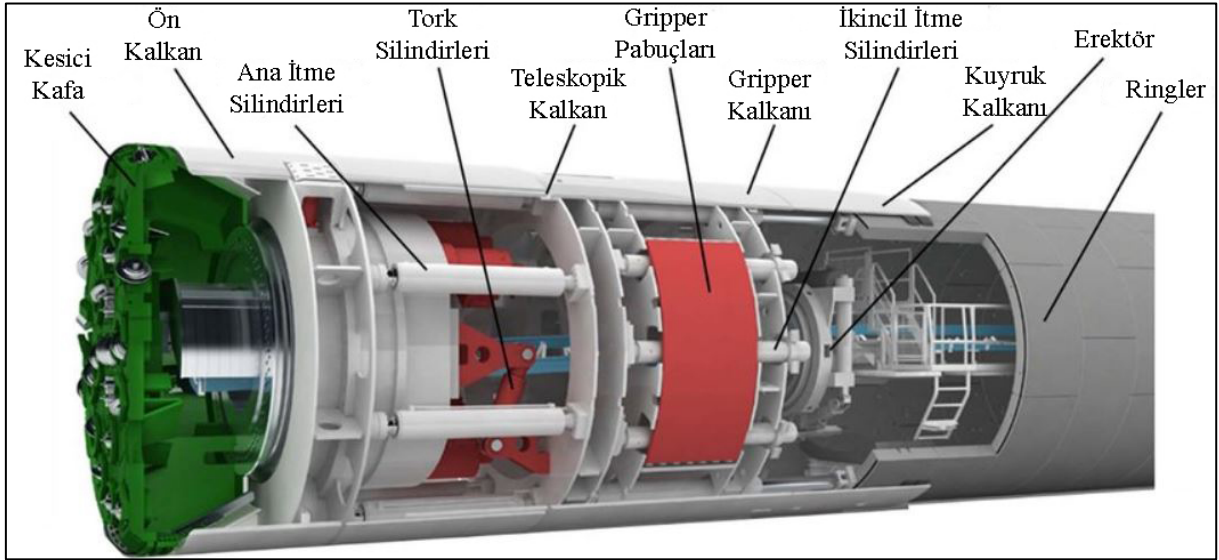
Şekil 2. 7: Tek Kalkanlı Sert Kaya TBM İçin Kesit Görünümü (Ateş, 2013).

### 2.2.3. Çift Kalkanlı TBM

Teleskopik kalkanlı TBM olarak da bilinir. Çift kalkanlı TBM’ler esasen açık tip Gripper TBM ile Tek Kalkanlı (Single Shield) TBM’in bir bileşimidir (Şekil 2.8). Teleskopik olarak açılabilen bir orta kalkan sayesinde tek kalkanlı TBM’lerden farklı olarak kesintisiz kazı yapabilir. Ring kurulumu esnasında gerekli olan destek kuvveti gripper TBM’deki gibi yan kısımda yer alan gripper pabuçlar tarafından telafi edilir. Böylelikle ring kurulumu esnasında oluşan zaman kayıpları büyük oranda ortadan kalkmış olur.

Öte yandan çift kalkanlı (Double Shield) TBM’lerin bu kesintisiz kazı özelliğinin kullanılabilmesi için pabuçların aktif olarak kullanılabilmesi gerekmektedir. Bir başka deyişle kalkan etrafında kaya ortamının pabuçlardan gelecek olan kuvvete dayanabilecek sertlikte ve dayanımda olması gerekmektedir. Kaya ortamının yeterli dayanıma sahip olmadığı durumlarda (ezik zon, fay, vb) teleskopik kalkan kapatılarak sadece itme silindirlere marifetiyle adeta tek kalkanlı bir TBM gibi kazı yapılabilir.

Çift kalkanlı TBM'lerin en büyük dezavantajı kaya ortamının yeterli dayanıma sahip olmadığı yerlerde teleskopik kalkanın kopan kaya parçaları ve pasa nedeniyle tıkanması durumudur. Bu durumda TBM ile kazı faaliyetlerinin durdurularak sıkışan malzemelerin temizlenmesi gerekmektedir. Bir başka büyük dezavantaj ise uzun kalkan tasarımından zayıf veya ezik kaya ortamlarında sıkışmaya (jamming, squeezing) elverişli olmasıdır (Maidl et al., 2008).



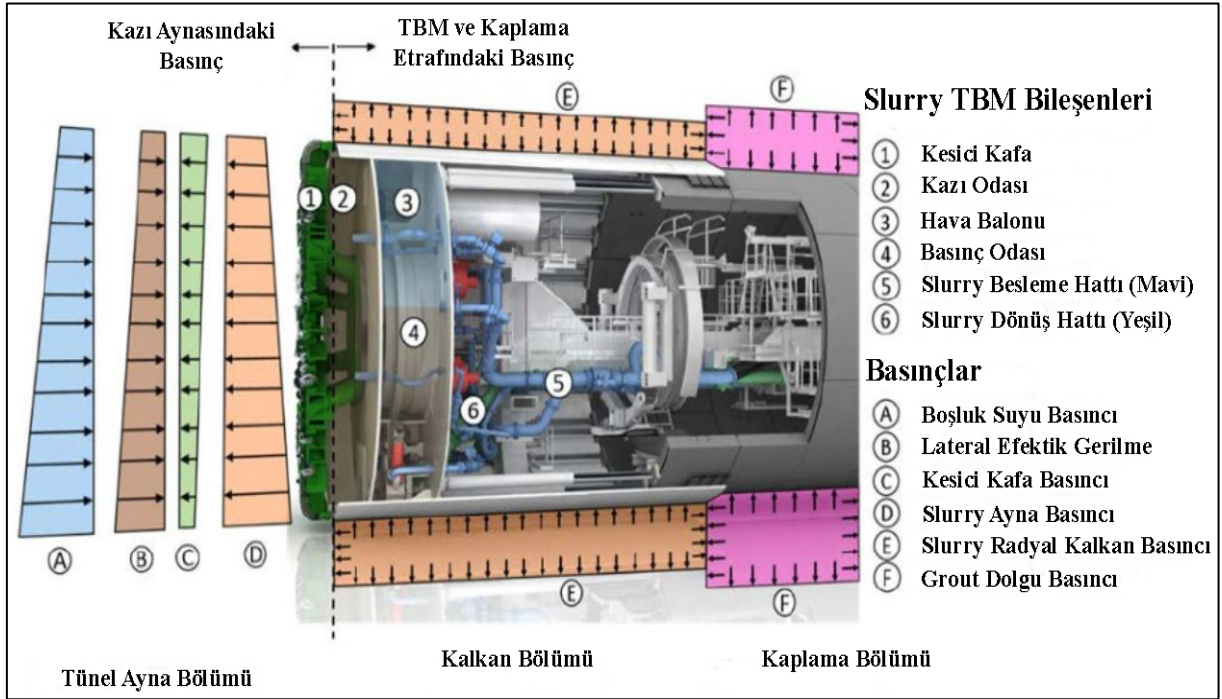
Şekil 2. 8: Çift Kalkanlı TBM İçin Kesit Görünümü (Zhou ve diğ., 2018).

#### 2.2.4. Slurry TBM

Slurry TBM'ler (Şekil 2.9) özellikle iri taneli ve suya doymun zemin özelliği gösteren jeolojik koşulların varlığında kullanılır. Kazı aynasının stabilitesi, TBM'in kesici kafasının da yer aldığı ön kısmında bulunan kazı odasına basınçlı bentonit slurry'si pompalanmasıyla sağlanmaktadır. Bu bentonit karışımı özel olarak dizayn edilir ve belli bir yoğunluğa sahiptir. Gerekli durumlarda karışıma çeşitli kimyasal katkıları da ilave edilmektedir.

Pompaların da yer aldığı bir sirkülasyon tesisatı taze bentonit karışımını kazı odasına pompalar ve kazı odasında kazılmış olan malzemeyle karışan bentonit slurrysini yine bir boru hattı marifetiyle tünelden uzaklaştırır. Giriş ve çıkış hatlarındaki akış ve basınç dengesinin korunmasıyla kazı odasındaki basıncın istenilen düzeye ayarlanması ve sabit tutulması mümkün olmaktadır. Böylelikle gerek duyulan ayna basınç desteği sağlanmış olur (Guglielmetti, 2008).

Kazı odasının tasarımları başlangıçta tek odalı iken 1980'li yıllarda çift odalı sisteme geçilmiştir. Çift odalı sistem tünel aynasındaki basınç koşullarının daha hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Böylelikle özellikle yüzey oturmalarına karşı çok duyarlı olan şehir tünelciliğinde oturma kaynaklı riskler çok büyük oranda azaltılmıştır (Herrenknecht ve Rehm, 2003).

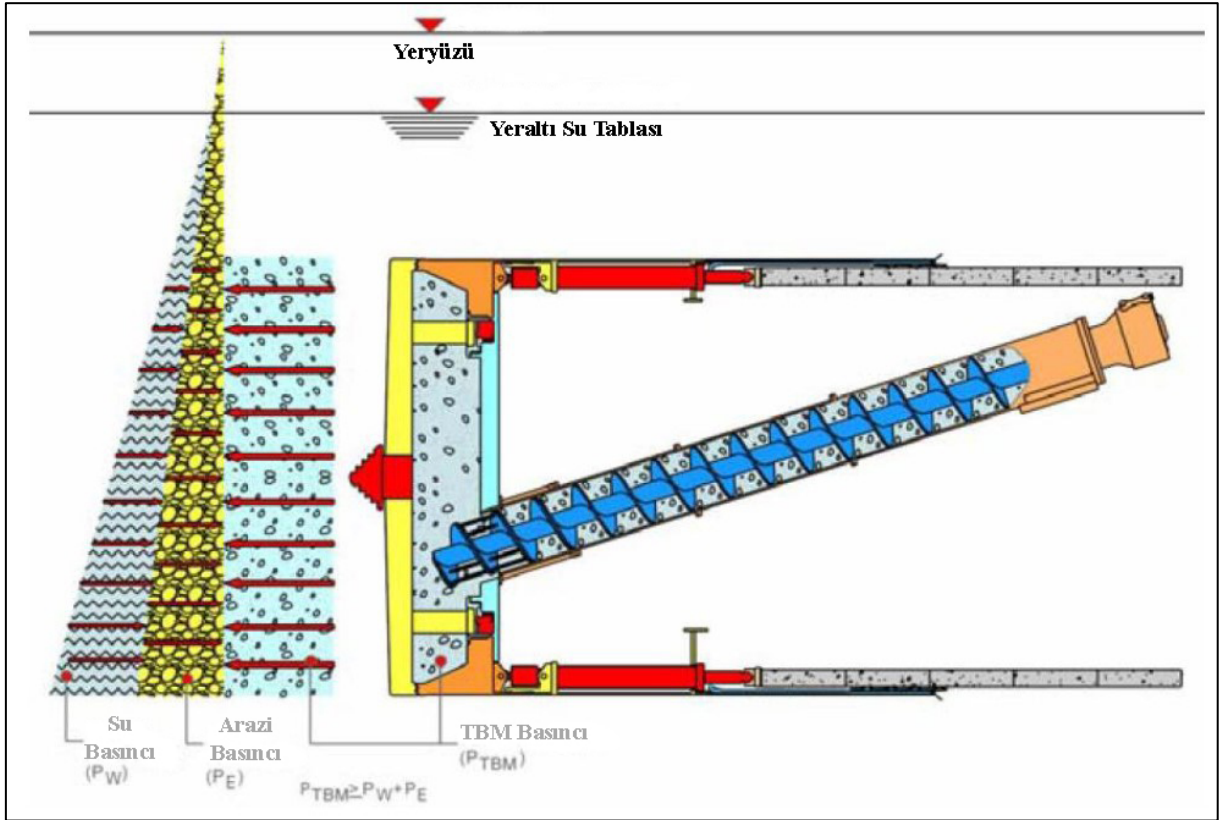


**Şekil 2. 9:** Slurry TBM İçin Kesit Görünümü (Mohammed, 2017).

Slurry tip TBM'ler genellikle kohezyonsuz, stabil olmayan zemin koşullarında ve likit ayna basınç desteğine ihtiyaç duyulan durumlarda kullanılabilir. Bentonit karışımı hem destek hem de taşıyıcı ortam olarak görev yapar. Bentonit karışımı kazılan pasanın naklinden de sorumlu olduğundan Slurry tip TBM'lerin verimli çalışmasının ötesinde gerçek anlamda kazı yapabilmesinde bu bentonit karışımının özelliklerinin önemi büyüktür. Bu sebeple slurry TBM'lerde çok kapsamlı bir ayırma (separation) ünitesi yer alır. Bu ayırma ünitesi bentonitin yoğunluğunun ayarlanmasında ve düşürülmesinde büyük öneme sahiptir. Buna ek olarak yüzeyde de büyük çaplı bir bentonit karışım ünitesi ve yine dönen karışımın pasadan ayrılması için ayrı bir ayırma ünitesi bulunmalıdır (Herrenknecht ve Rehm, 2003).

### 2.2.5. Arazi Basıncı Dengeleme (Pasa Basıncı) (EPB) TBM

Arazi basıncını dengeleme özelliğine sahip EPB (Earth Pressure Balance) TBM'ler, TBM'in itme gücü ve kazılan pasanın kazı odasında biriktirilmesiyle elde edilen pasa basıncı yardımıyla aynanın stabilitesi (duraylılık) için gerek duyulan karşı basıncın oluşturulabilmesini sağlayan, tam cepheli tünel açma makineleridir (Şekil 2.10) (Guglielmetti, 2008). Bu nedenle ulusal literatürde pasa basınçlı TBM'ler olarak da bilinmektedir. Pasa basıncı (EP) genellikle bar cinsinden ifade edilir ve kazı odası içerisinde yer alan basınç sensörleri tarafından ölçülmektedir.

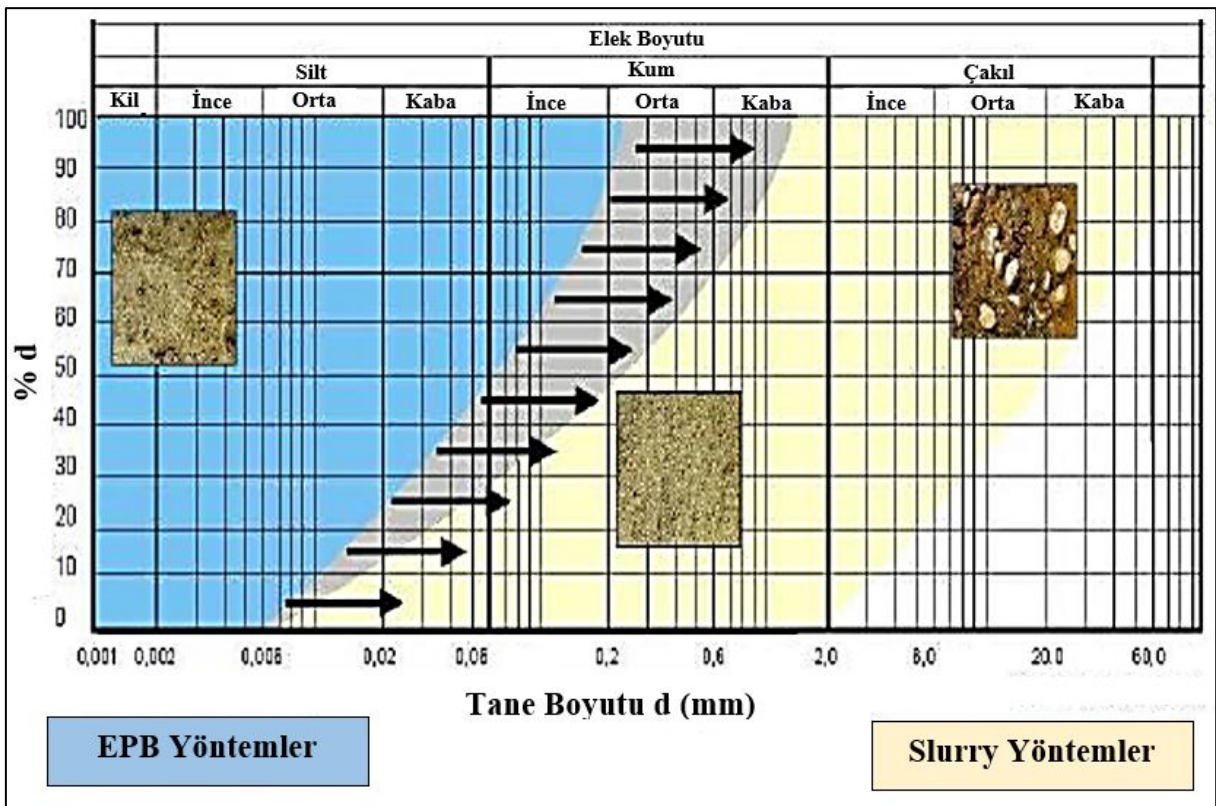


**Şekil 2. 10:** EPB TBM ve Arazi Basıncı Denge Durumu Kesit Görünümü (Slinchenko, 2010).

TBM kazı odası içerisindeki pasa basıncı (aynı zamanda ayna destek basıncı) helikon konveyörün çalışma hızının ayarlanmasıyla TBM'in penetrasyon hızının bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Eksenel itme silindirleri kuyruk kalkanı içerisinde önceden kurulmuş olan prekast ringe basarak TBM'in kazısı için gerekli olan itme kuvvetini oluşturur. Bu itme kuvveti TBM'in ilerlemesi için sürtünme kuvvetinin aşılmasını, kazı işlemi için gerekli normal kuvvetlerin oluşmasını ve ayna destek basıncının sağlanabilmesi için gerekli olan eksenel kuvvetin elde edilmesini sağlar (Guglielmetti, 2008).



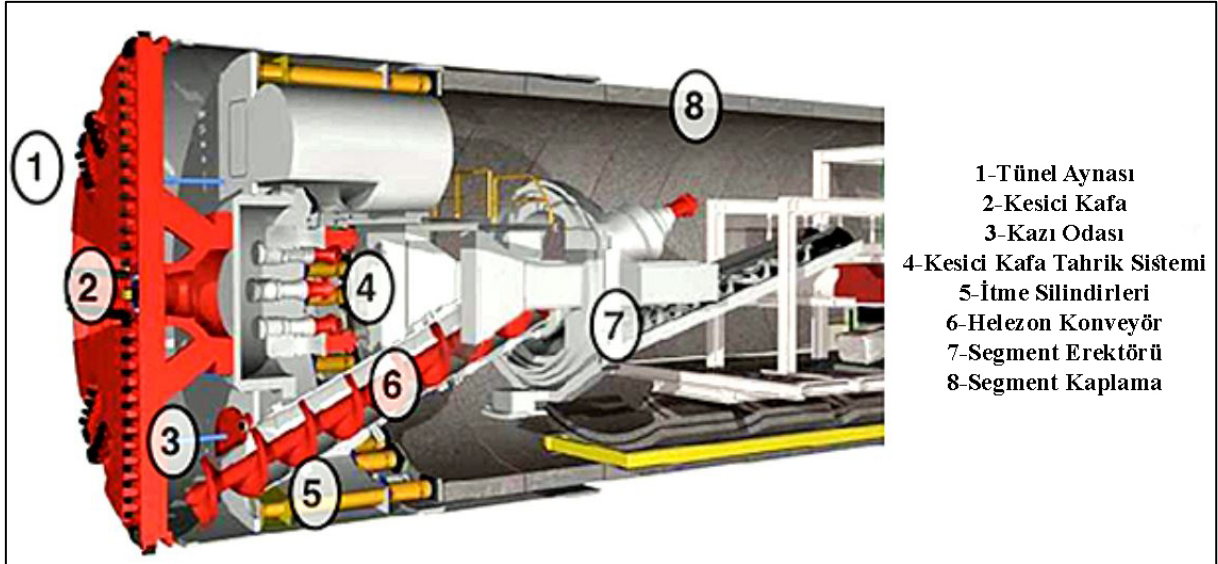
EPB TBM'ler yüzeye yakın şehir tünellerinde sıklıkla kullanılmaktadır. EPB TBM'in kullanım alanları genellikle kazılan zeminin tane boyut dağılımı ile ilişkilendirilmektedir. Bappler (2006) tarafından yapılan bir çalışmada pasa basıncı veya Slurry basıncı ile ayna desteği seçiminin zeminin tane boyut dağılımı ile ilişkisi verilmiştir (Şekil 2.11). Genel olarak tane boyut dağılımının kum ve çakıla doğru gittiği zeminlerde pasa basıncı yardımıyla aynanın desteklenmesi mümkün olamamaktadır. Bunun başlıca sebebi de aynanın homojen bir şekilde desteklenmesinde gerekli olan pasa kıvamının elde edilebilmesi için yeterli miktarda ince malzemenin olmayışıdır.



Şekil 2. 11: Tane Boyut Dağılımı ve EPB-Slurry TBM Kullanımı İlişkisi (Bappler, 2006).

Ek olarak kum ve çakıl gibi geçirimsizliği yüksek zeminlerde basınç iri zemin taneleri arasında kaçmakta ve basınç kayıplarına sebebiyet vermektedir. Bu gibi durumlarda Bentonit karışımı Slurry tip TBM'lerin kullanılması gerekmektedir. Zeminin daha çok kil ve siltten oluşan (< 0.002-0.06mm) ince taneli kazı materyallerinin bulunduran tortul (sedimanter) zayıf-ayrışmış/bozunmuş (kaya özelliğini %50-60 oranında yitirmiş-ayrık ya da parçalanmış zemin-toprak), az veya zayıf çimentolanmış gevşek tortullar, normal-aşırı konsolide olmuş killer ve kazı materyalleri için EPB TBM'ler yaygın şekilde kullanılabilir (Tokgöz ve diğerleri,

2013, Tokgöz ve diğerleri, 2015, Tokgöz, 2016, Tokgöz, 2018). Ancak burada, ince kumlu materyal (0,06 mm-0,08 mm)'in varlığı da önemle hatırlanmalıdır.



Şekil 2. 12: EPB TBM ve Ekipmanlarının Kesit Görümü (Shah, 2017).

Şekil 2.12’de bir EPB TBM’in iç görünümü verilmiştir. Ön kısımda üzerinde kesici disk ve sıyırıcı uçların yer aldığı kafa kısmı bulunmaktadır. Kesici kafa çelik kollar vasıtası ile ana tahrik sistemine bağlanmaktadır. Kesici kafa ile ana tahrik sistemi arasında kalan boşluk kazı odası olarak adlandırılmaktadır. Kesici kafanın dönmesi ile kazılan malzeme bu oda içerisinde toplanır. Daha sonra kazı odasının alt kısmından dışarıya doğru uzanan helezon konveyör, bu pasanın istenilen miktar ve hızda dışarı transfer edilmesine olanak vermektedir.

### 2.3. TBM TASARIM PARAMETRELERİ

#### 2.3.1. Kesici Kafa ve Keskiler

Bir tünel projesi için seçilen TBM’in türü ne olursa olsun, kesici kafa ve keski tasarımı en önemli parametrelerden birisidir. Bunun başlıca sebebi ise tüm makine kompleksinde kazı işleminin fiziki olarak gerçekleştiği, kesici uçların kaya veya zemin ortamına fiziksel olarak temas ettiği ve kazı işlemini gerçekleştirdiği kısmın kesici kafa olmasıdır. Kesici kafa tasarımında dikkat edilen başlıca unsurlar; keski tiplerinin belirlenmesi, jeolojiye uygun olarak keski arası mesafenin belirlenmesi, kesici kafanın biçim ve profilinin belirlenmesi, kesici kafanın denge durumu, pasanın verimli şekilde nakledilebilir olması, sıyırıcıların konumlarının ve tasarımlarının belirlenmesi, bakım ve kontrol için personelin erişiminin

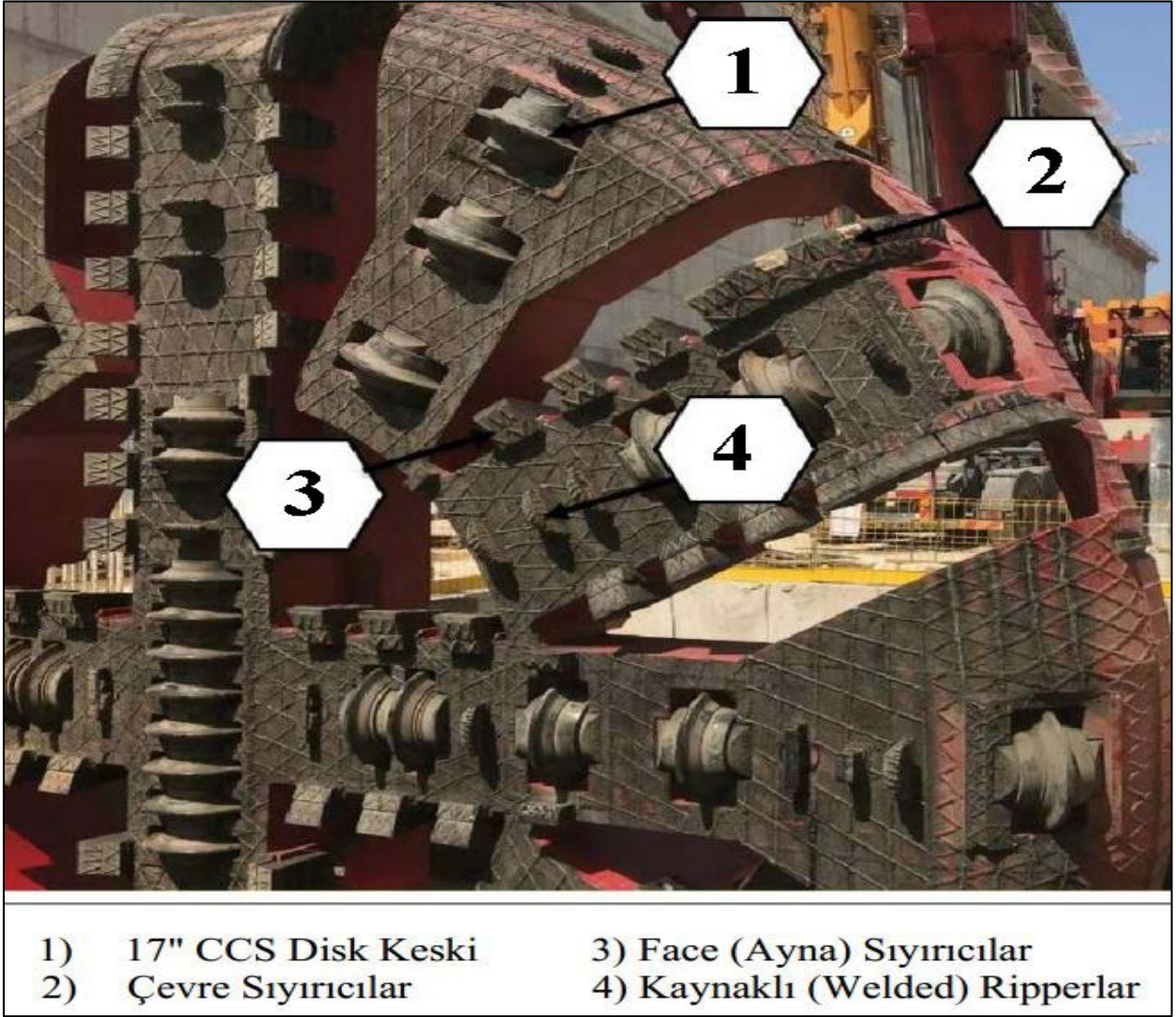
sağlanması, yapısal olarak kolay imal, monte ve nakil edilebilir olması olarak sıralanabilir. Kesici kafa tasarımının bu denli ve karmaşık bir konu olmasının yanı sıra bu konuyla ilgili olarak literatürde yayınlanmış araştırmaların sayısı ise oldukça sınırlıdır. Kesici kafa tasarımları genellikle makine üreticileri tarafından gerçekleştirildiğinden son kullanıcılar tasarım süreciyle ilgili yeterli ayrıntıya sahip olamamaktadır. Diğer taraftan, kesici kafa tasarımı ile ilgili olarak deneyler yapmak, veri elde etmek ve hipotezleri sınamak imkân ve ölçek bakımından oldukça güç olduğundan konuya olan akademik ilgi de çok fazla olamamaktadır (Rostami ve Chang, 2017).



**Şekil 2. 13:** V tipi (a) ve CCS tipi (b) disk fotoğrafları.

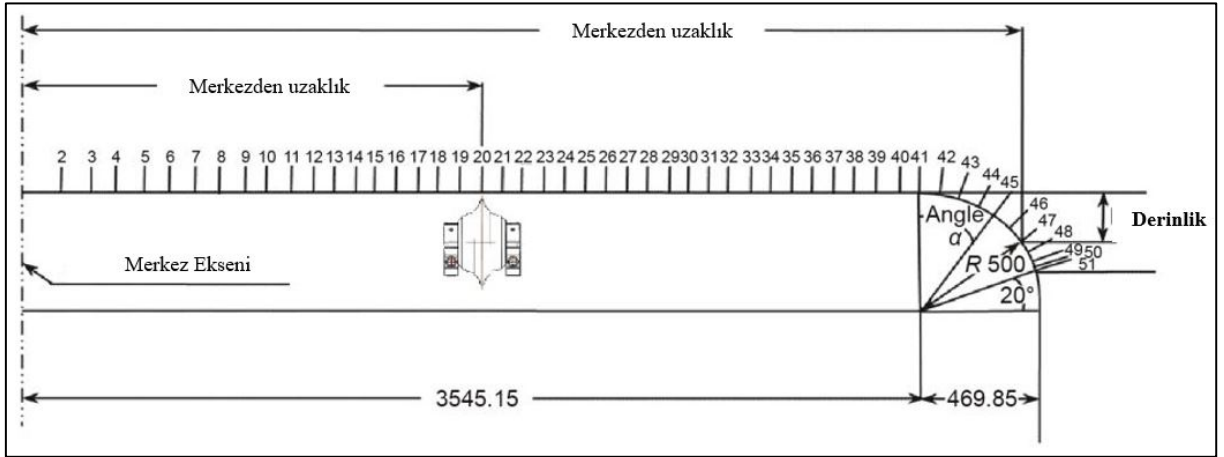
Tünel projesinin yer aldığı hat üzerinde jeolojik çalışmalar tamamlandıktan ve tünel hattı üzerinde yer alan jeolojik unsurlar tanımlandıktan sonra bu söz konusu unsurların en optimum şekilde kazılması için ihtiyaç duyulan keski tipi, boyutları ve keski arası mesafe belirlenir.

Disk tipi keski için 17" CCS (Constant cross section) tür diskler son yıllarda oldukça yaygın şekilde kullanılmaya başlanmış olsa da V tipi veya farklı boyutlarda disk kullanımı da halen mevcuttur ve zayıf zemin koşullarında avantajlı olabilmektedir (Şekil 2.13) (Binen ve diğ., 2018; Balcı ve Tumac, 2012). Yumuşak ve gevşek zeminler için ise disk tipi keskiyle beraber ripper adı verilen kazı uçların kullanılması ya da sadece kazı uçlardan oluşan bir keski tipi tercih edilmesi mümkündür (2.14). Keski tipi ve boyutlarının belirlenmesinde keski üzerine gelecek yükler, bakım ve değişim kolaylığı, aşınmaya karşı direnç özelliği başlıca etmenlerdir.

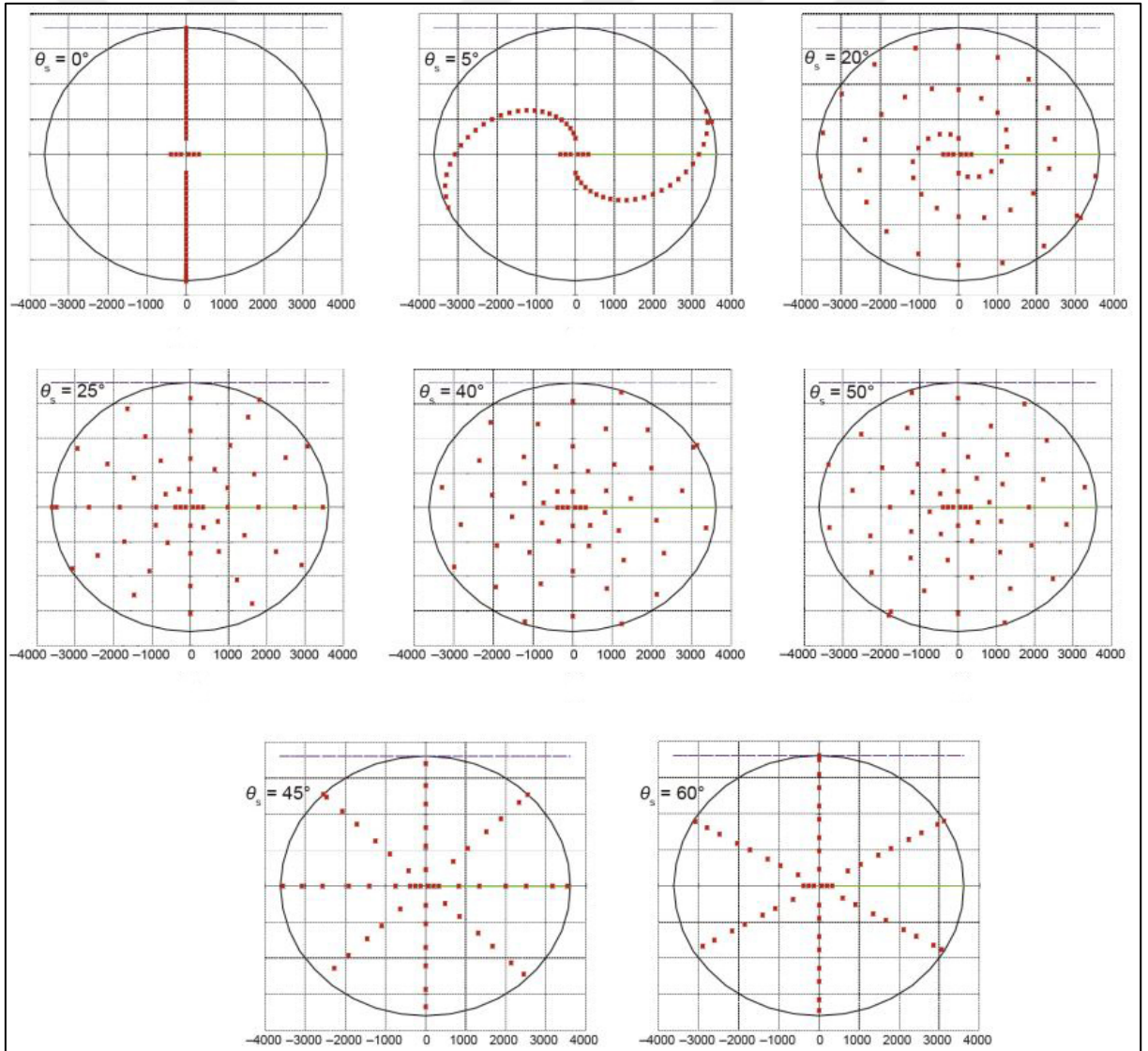


**Şekil 2. 14:** Bir EPB TBM Kesici Kafası Üzerinde Yer Alan Keski Elemanları.

Keskiler arası mesafe, kesme kuvvetlerinin ve penetrasyonun (kesme derinliği) bir fonksiyonudur. Başka bir deyişle optimum keskiler arası mesafe, belirli bir penetrasyon değerinde kesme için gerekli olan enerjinin (Spesifik Enerji – SE) minimum olduğu değerdir. Bu değer belirlenmesi için LCM (Lineer Cutting Machine) deneyleri yapılmaktadır. Optimum SE değerini sağlayan keskiler arası mesafe değerine karar verildikten sonra disk keskinin kesici kafanın yarıçap profili üzerinde bu mesafeyi sağlayacak şekilde yerleştirilmesiyle kesici kafa keski profili elde edilir (Şekil 2.15).



Şekil 2. 15: Disk Kesiklerin Kesici Kafa Üzerine Tipik Yerleşim Profili (Rostami ve Chang, 2017).



Şekil 2. 16: CH Üzerinde Disk Kesikler İçin Farklı Yerleşim Profilleri (Rostami ve Chang, 2017).

Böylelikle TBM kazı çapına bağlı olarak kaç adet disk keski kullanılması gerektiği de aynı zamanda belirlenmiş olmaktadır. Ancak yarıçap üzerinde belirlenen bu profilin tam cephe dairesel alan üzerine dağıtılması farklı bir tasarım ihtiyacını ortaya çıkartmaktadır. Disk keskinin kesici kafa üzerine yerleştirilmesinde mümkün olduğunca homojen ve dengeli bir dağılım elde edilmelidir. Bu sebeple artı, yıldız, spiral gibi belli başlı bazı yerleşim teknikleri (Şekil 2.16) yaygınlaşmıştır (Rostami ve Chang, 2017).

### 2.3.2. Tork ve RPM Gereksinimi

Tork, TBM'in kazı aynasına temas ederek kaya veya zemin ortamının kazılmasını ve kazılan malzemenin aynadan uzaklaştırılmasını, ayna desteği gereken durumlarda aynanın desteklenmesi için gereken basıncın oluşturulduğu kesici kafa bölümünün döndürülebilmesi için gerekli olan dönme kuvvetini ifade etmektedir. Bu sebeple bir TBM için ihtiyaç duyulan tork gereksiniminin belirlenmesi en önemli tasarım parametrelerinden birini oluşturmaktadır. TBM'in türüne, kesici kafa tasarımına ve jeolojik unsurlara bağlı olarak farklı Tork hesaplamaları zaman içerisinde geliştirilmiştir.

Gripper TBM'ler sert ve sağlam kaya koşullarında kullanılır. Gripper TBM'ler için kazı esnasında kesici kafanın tork gereksinimini oluşturan en önemli etmen kazılan kaya kütlelerinin basınç dayanımıdır. Bir gripper TBM'in kesici kafa tork gereksinimi Denklem 2.1'deki gibi hesaplanabilir (Bilgin ve diğ., 2008; Ateş, 2013).

$$T = \sum_{i=1}^{N_c} r_i \times F_C \times f_L \approx N_c \times F_R \times \frac{D}{4} \times f_L \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de yer alan T kesici kafa torkunu ifade eder.  $r_i$ , kesici kafa üzerinde yer alan her bir disk tipi keskinin kesici kafanın merkezine olan uzaklığıdır (Şekil 2.15).  $N_c$  toplam disk keski sayısını belirtir.  $F_R$ , bir kesici diskin o kaya koşullarında ortalama dönme kuvvetidir. D, TBM'in kazı çapıdır.  $f_L$  katsayısı ise sürtünmeden oluşan kayıpları ifade etmektedir.

Tek ve çift kalkanlı TBM'ler yine kaya koşullarında çalıştırılırsalar da bu TBM'lerin çalışma aralığında yer alan kaya kütleleri koşulları Gripper TBM'lerde olduğu kadar stabil değildir. Bu sebeple tek ve çift kalkanlı TBM'ler için özellikle süreksizliklerin olduğu kırıklı çatlaklı kaya koşullarında sürtünme kuvvetleri de tork gereksinimi etkileyen büyük bir etmendir. Bu tür

TBM'ler için tasarım parametrelerini üzerinde çalışılırken jeolojik parametrelerin iyi bir şekilde tayin edilmiş olması gerekir (Ateş, 2013).

Bu tür TBM'ler için tork gereksinimi stabil ayna koşullarında Denklem 2.1'deki gibi hesaplanabilir. Ancak ayna koşullarının stabil olmadığı, kaya ortamının çatlaklı bloklu olduğu durumlarda Denklem 2.2 ve Denklem 2.3'de verilen  $T_1$  ve  $T_2$  değerleri hesaplanan Denklem 2.1 ile hesaplanan tork gereksinimine eklenmelidir.  $T_1$ , kesici kafanın ön yüzüne gelen sürtünme kaynaklı kuvvetleri dikkate alırken  $T_2$ , kesici kafanın dairesel yüzüne gelen sürtünme kaynaklı kuvvetleri tarifler (Shi ve diğ., 2011; Ateş, 2013).

$$T_1 = \frac{\pi D^3}{12} \times K_0 \mu_1 \cdot \gamma \cdot H(1 - \eta) \quad (2.2)$$

$$T_2 = \frac{\pi D^2}{4} (1 + K_0) \mu_1 \cdot \gamma \cdot H \cdot t \quad (2.3)$$

Denklem 2.2. ve 2.3'de,  $D$  TBM kazı çapını,  $K_0$  sükûnette yanal toprak basıncı katsayısını,  $H$  örtü kalınlığını,  $\mu_1$  sürtünme katsayısını,  $\gamma$  kayanın birim hacim ağırlığını,  $\eta$  kesici kafa açıklık oranını ve  $t$  kesici kafa et kalınlığını ifade etmektedir.

Yumuşak zemin TBM'leri olarak da geçen arazi basıncı dengeleme özelliğine sahip EPB TBM'ler için tork gereksiniminin hesaplanmasında dikkate alınması gereken etmenler görece daha fazla olmaktadır. Yumuşak zemin veya aşırı bozunmuş/stabil olmayan kaya koşulları için bir TBM'in tork gereksiniminin hesaplanmasında JSCE (2007), Shi ve diğ. (2011), Song ve diğ. (2010) ve Ateş (2013) gibi farklı araştırmacılar 8 farklı parametreyi esas alan bir yaklaşım önermektedirler. Bu yaklaşıma göre TBM'in toplam tork ihtiyacı 8 farklı tork hesaplamasının bir toplamıdır (Denklem 2.4).

$$\sum T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 \quad (2.4)$$

$T_1$ : Kesici kafanın ön yüzündeki sürtünmeden dolayı oluşan tork

$T_2$ : Kesici kafa çevre yüzünde sürtünmeden dolayı oluşan tork

$T_3$ : Kesici kafanın arka yüzünde sürtünmeden dolayı oluşan tork

$T_4$ : Zeminin kesme direncini karşılamak için gerekli olan tork

T<sub>5</sub>: Kesici kafa açıklık cidarlarında makaslamadan kaynaklanan tork

T<sub>6</sub>: Kesici kafa kazı odasındaki pasanın kafa dönüşü sırasında oluşan dirence karşı gereken tork

T<sub>7</sub>: Ana rulman dönüşünden kaynaklanan tork

T<sub>8</sub>: Ana rulman contasından kaynaklanan tork

Yumuşak zeminde kazı yapan bir TBM için bu 8 adet tork parametresinin toplamı, tork gereksinimini vermektedir. Bu parametrelerin hesaplanmasında kullanılan bazı katsayıların belirlenmesindeki güçlükler ve üretici firmalar tarafından sanayi ve ticari sır kabul edilmesinden dolayı tork gereksinimi kesin olarak belirlemek oldukça güçtür. Yapılan çalışmalar yukarıda bahsedilen 8 parametre içerisinde ilk 3'ünün (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> ve T<sub>3</sub>) büyük önem arz ettiğini göstermiştir (Shi ve diğ., 2011; Song ve diğ., 2010; Ateş, 2013). Bu üç faktörün toplamı toplam tork içerisinde %57 ile %89 arasında değişen bir yüzdeye sahip olabilmektedir. EPB TBM'ler için kazı odasında ayna basınçlandırılmasında kullanılan pasanın kesici kafa dönüşü esnasında ortaya çıkardığı dirençten kaynaklanan tork faktörü de oldukça önem arz etmektedir (Ateş, 2013).

TBM için en önemli olan parametrelerden biri olan tork, fiziksel bir büyüklük olan dönme kuvvetinin bir ifadesidir. Bir başka anlatımla tork, yarıçap ve dönüş hızı (RPM) ile birlikte gücün (Denklem 2.5) bir fonksiyonudur (Bilgin ve diğ., 2014). Dolayısı ile tork gereksinimi belirlenirken TBM kazı çapı ve TBM için ön görülen kesici kafa dönüş hızı (RPM) birlikte düşünülmelidir. Bu sebeple TBM seçimi yapılırken veya seçili TBM'lerin tork karakteristiği ele alınırken Tork-RPM grafiği (Şekil 2.17) kullanılır. Böylelikle TBM'in hangi dönüş hızında ne kadar tork kapasitesine sahip olduğu daha iyi anlaşılabilir.

$$P = 2 \times \pi \times N \times T \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'te yer alan P gücü, N dönüş hızını ve T ise torku ifade etmektedir.

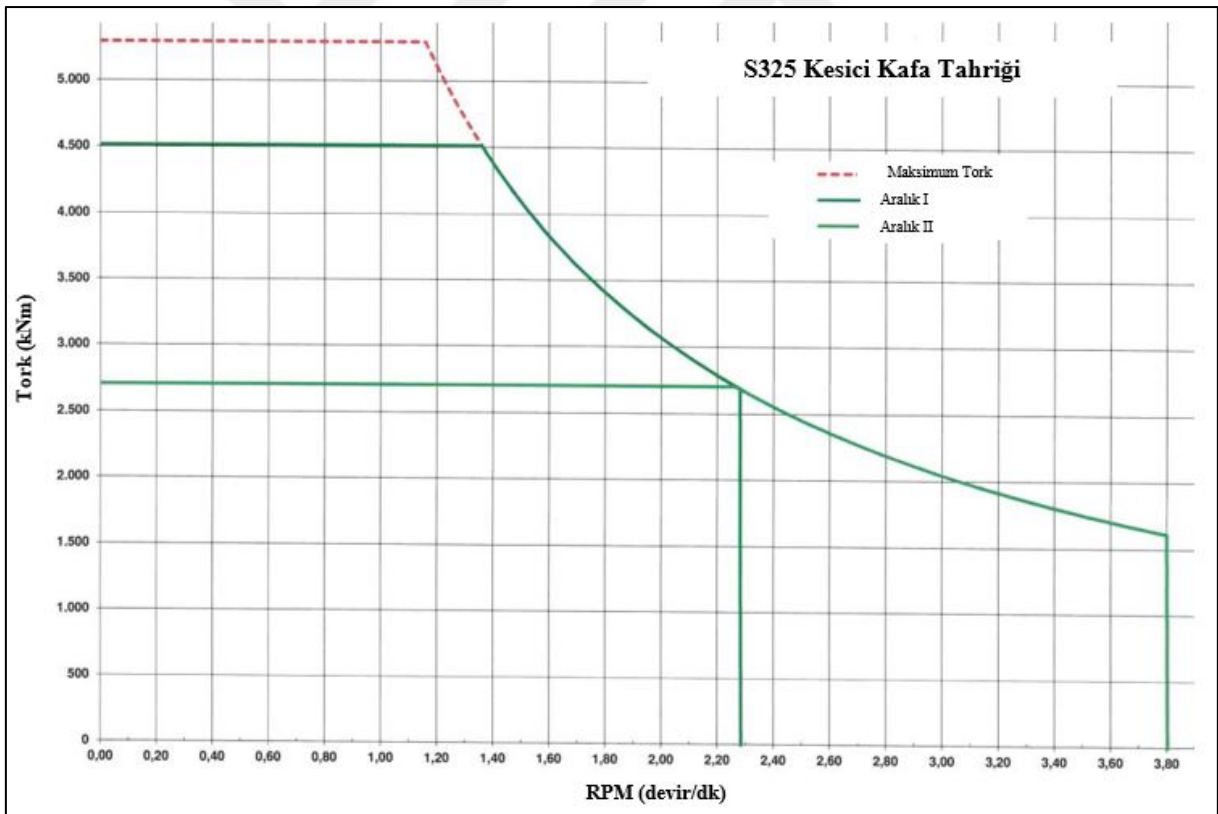
### 2.3.3. İtme Kuvveti (Thrust) Gereksinimi

TBM'lerin ilerlemesi ve kazı yapması için bir itme (thrust) kuvvetine ihtiyaç vardır. Bu itme kuvvetinin başlıca vazifesi aynaya karşı eksenel bir kuvvet oluşturarak kayacın veya zeminin



kazılması, TBM kalkan kısmının sürtünmesine karşı koyarak TBM ilerleyebilmesi ve TBM'in destek ekipmanlarının yer aldığı back-up kısmının ilerletilebilmesi için çekme etkisinin yaratılmasıdır. Pasa veya Slurry basınçlı TBM'lerde bu itme kuvvetinin pasanın veya bentonit karışımının oluşturduğu basıncından üstesinden gelecek şekilde tayin edilmesi gerekmektedir.

İtme kuvveti gereksiniminin belirlenmesinde aynı tork gereksiniminde olduğu gibi farklı TBM türleri için farklı araştırmacılar tarafından çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlarda yine tork gereksiniminde olduğu gibi itme kuvvetinin kullanıldığı farklı gereksinimlerin bir toplamı olarak verilmektedir. Örnek olarak kalkansız bir TBM türü olan ve stabil kaya ortamlarında kullanılan Gripper TBM'ler için ayna destek basıncı söz konusu değildir ve tork hesabında ihmal edilmektedir. Öte yandan EPB TBM'ler için ayna destek basıncı veya kalkan sürtünme kayıpları itme kuvveti hesabında yer alan önemli parametrelerdir (Ateş, 2013).



Şekil 2. 17: TBM'ler İçin Tipik Bir Tork – RPM Grafiği (Herrenknecht A.G)

Gripper TBM'ler gibi kalkansız sert kaya makineleri için Bilgin ve diğ. (2008) tarafından Denklem 2.6'da verilen eşitlik önerilmektedir.

$$F = N_C \times F_N \times f_L \quad (2.6)$$

Burada F (kN) TBM için gerek duyulan itme kuvvetidir.  $N_C$  toplam disk keski sayısını ifade ederken,  $F_N$  ise ayna düzlemine gelen normal kuvveti tanımlamaktadır.  $f_L$  ise sürtünme kayıpları katsayısı olup genellikle 1,2 olarak alınabilmektedir. Denklem 2.6'da yer alan parametreler arasında TBM'in back-up adı verilen destek kısımlarını çektirmek için gereken kuvvetin yer almadığı görülebilir. Bu kuvvetin de TBM itme gereksinimi hesaplamasında dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır (Ateş, 2013).

Yumuşak zeminlerde çalışan EPB veya Slurry tip TBM'ler için itme gereksinimin hesaplanmasında Denklem 2.7'de yer alan yaklaşım kullanılmaktadır (JSCE, 2007; Ateş, 2013; Ateş ve diğ., 2014).

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de F toplam itme kuvvetini,  $F_1$  zemin ile kalkan arasında zemin baskısından kaynaklanan sürtünmenin yenilmesi için gereken itme kuvvetini,  $F_2$  kazı odasına etkiyen pasa veya slurry basıncının yenilmesi için gereken itme kuvvetini,  $F_3$  TBM yönlendirilirken kuvvet doğrultusunun değişmesine bağlı olarak azalan kuvvet bileşkesinin telafisi için gereken ek itme kuvvetini,  $F_4$  segmentler ile kuyruk fırçaları ve/veya conta yapısı arasındaki sürtünmenin yenilmesi için gereken itme kuvvetini ve  $F_5$  ise TBM back-up bölümünün sürüklenebilmesi/çektirilebilmesi için gerekli kuvveti ifade etmektedir.

Denklem 2.7'ye ek olarak aynadaki jeolojik durumun belli bir penetrasyon büyüklüğüne ihtiyaç duyduğu kaya-zemin geçişli ortamlar veya çok ayrılmış/bozunmuş, stabil olmayan kaya ortamları için Denklem 2.6'da verilen eşitlik altıncı bir parametre olarak itme kuvveti hesabına eklenebilir (Ateş ve diğ., 2014). Bu durumda Denklem 2.7, Denklem 2.8'deki gibi düzenlenebilir.

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \quad (2.8)$$

Deterministik bir yaklaşımla hesaplanmış olan TBM itme gereksinimi genellikle bir emniyet katsayısı ile düzeltilmelidir. Böylelikle jeolojik belirsizliklere veya işletme bazında ihtiyaçların değişimine bağlı olarak ortaya çıkabilecek problemler bertaraf edilebilir. Bu amaçla belirlenmiş olan itme gereksinimi Denklem 2.9'da olduğu gibi bir emniyet katsayısı

ile düzeltilir ve kurulu itme kapasitesi belirlenmiş olur. Bu emniyet katsayısı TBM üreticilerine veya müşteri tercihlerine göre değişkenlik gösterebilmektedir (Ateş,2013; Ateş ve diğ., 2014).

$$F_{Kurulu} = \sum F \times \text{Emniyet Katsayısı} \quad (2.9)$$

#### 2.3.4. İlerleme Hızı (AR), Penetrasyon (PR), Spesifik Enerji (SE)

TBM ile tünel açılması tam mekanize ve otomasyon prensiplerine dayanan bir süreç olduğundan TBM'in birim zamanında ne kadar kazı yapabildiği, başka bir deyişle birim zamanda ne kadar tünel ilerlemesi gerçekleştirebildiği önemli bir performans ve tasarım kriteridir. Aylık (m/ay), günlük (m/gün) veya saatlik (m/h) ilerleme hızı kavramları TBM'lerin hem aktif kazı durumlarını hem de aktif kazı yapılmadığı ancak tünel tahkimatı, bakım, disk değişimi ve benzeri faaliyetleri kapsayan genel ilerleme yaklaşımları olup çoğunlukla üretimin planlanmasında ve performans tahmininde kullanılmaktadırlar. Öte yandan TBM'in aktif kazı durumunda olduğu ilerleme hızı (advance rate) kavramı bir makine performans ve tasarım parametresi olup TBM'in kazı anında dakikada kaç milimetre ilerleyebildiğini tarif etmektedir. Genellikle AR (Advance Rate) ile gösterilir ve birimi mm/dk'dır (Farrokh, 2013; Copur ve diğ., 2014; Rostami, 2016).

TBM'ler ile ilgili pek çok parametre bu ilerleme hızı kriterine göre tasarlanmaktadır. Örneğin pasa nakli için helezon konveyör ve bant konveyör kullanılan TBM'lerde bu ekipmanların kapasiteleri birim zamanda nakledilmesi gereken maksimum pasa hacmine dolayısıyla TBM'in ilerleme hızına doğrudan bağlıdır.

TBM'ler için ilerleme hızı kadar önem arz eden bir başka parametre ise penetrasyondur. Penetrasyon, kesici kafanın bir tam turuna karşılık gelen ilerleme miktarı olarak ifade edilir ve birimi mm/rev'dir. Başka bir deyişle penetrasyon ilerleme hızı ve RPM'in bir fonksiyonudur (Denklem 2.10).

$$PR = \frac{AR}{RPM} \quad (2.10)$$

Denklem 2.10'daki PR penetrasyonu, AR ilerleme hızını ve RPM ise kesici kafa dönüş hızını tanımlamaktadır.

Penetrasyon değeri tıpkı ilerleme hızında olduğu TBM için önemli bir tasarım parametresidir. Kazı mekaniğiyle doğrudan ilişkili olan bu parametre gerek kesici kafa ve keski tasarımında gerekse tork-RPM tasarımında kullanılmaktadır. Aynı zamanda ilerleme hızını da tayin ettiğinden TBM'in diğer bileşenlerinin dizaynında da dolaylı yoldan rol oynamaktadır.

Penetrasyon parametresi TBM keski tasarımında kesme derinliğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kesici kafa tasarımında keski ile sıyrıcılar arasındaki mesafenin tayin edilmesinde dikkate alınan önemli bir ölçüttür (Bilgin ve diğ., 2014).

İlerleme hızı ve penetrasyon doğrudan veya dolaylı olarak kazı mekaniği ile ilişkili olduğundan makine performansının değerlendirilmesinde de sıklıkla kullanılan parametrelerdir. Değişen penetrasyon ve ilerleme hızı değerleri kesici kafa ve keski mekanik durumu, aynadaki jeolojik değişimler (dayanım değişimi, zemin özelliklerinin değişimi, vb) gibi konularda fikir verir. Tork, itme kuvveti, ayna basıncı gibi diğer parametreler ile birleştirildiğinde çok daha kapsamlı analizlerin yapılmasına olanak sağlar (Tokgöz ve diğ., 2013; Tokgöz ve diğ., 2015; Tokgöz ve Binen, 2018; Avunduk ve Çopur, 2018).

Spesifik Enerji (SE), birim hacimdeki kayayı kazmak için gereken enerji miktarı olarak tanımlanır. Mekanize kazılarda kazı verimliliğini ifade etmede oldukça önemli bir faktördür. SE'nin birimi kWh/m<sup>3</sup>'tür. SE, Tork (kNm) ve RPM'in bir fonksiyonu olan gücün (kW), Net İmalat Hızı'na (NPR) bölünmesi ve bir k enerji transfer katsayısıyla düzeltilmesi ile elde edilir. Burada NPR (m<sup>3</sup>/h) birim zamanda kazılan hacimdir ve temel olarak anlık ilerleme hızının (AR) bir türevidir. Kesici kafadan aynaya enerji transferini ifade eden k ise TBM'ler için genellikle 0,8 olarak alınır. SE, Denklem 2.11'deki gibi hesaplanabilir (Namlı ve Bilgin., 2017; Bilgin ve diğ., 2016).

$$SE = k \times \frac{P}{NPR} \quad (2.11)$$

### 2.3.5. Ayna Basıncı (EP)

Ayna basıncı (Face pressure) EPB veya Slurry tip TBM'ler için aynanın kendi kendine stabil kalamadığı olumsuz zemin koşullarında yüzey oturmalarını ve göçükleri önlemek için, başka bir deyişle kazı sırasında aynanın stabil kalabilmesi için uygulanması gereken basıncı ifade

etmektedir. Bu nedenle ayna basıncının kazılardan önce isabetli bir şekilde belirlenmesi ve kazılar sırasında bu basıncın doğru bir şekilde uygulanması önem arz etmektedir. Ayna basıncı zemin veya kaya ortamının türüne, mekanik özelliklerine, yeraltı suyu durumuna, şehir tünelciliğinde altyapı ve üst yapıların varlığına oldukça duyarlı olduğundan ön jeolojik ve jeoteknik etütler büyük bir hassasiyet ve dikkat ile yürütülmelidir (Ateş ve diğ., 2016).

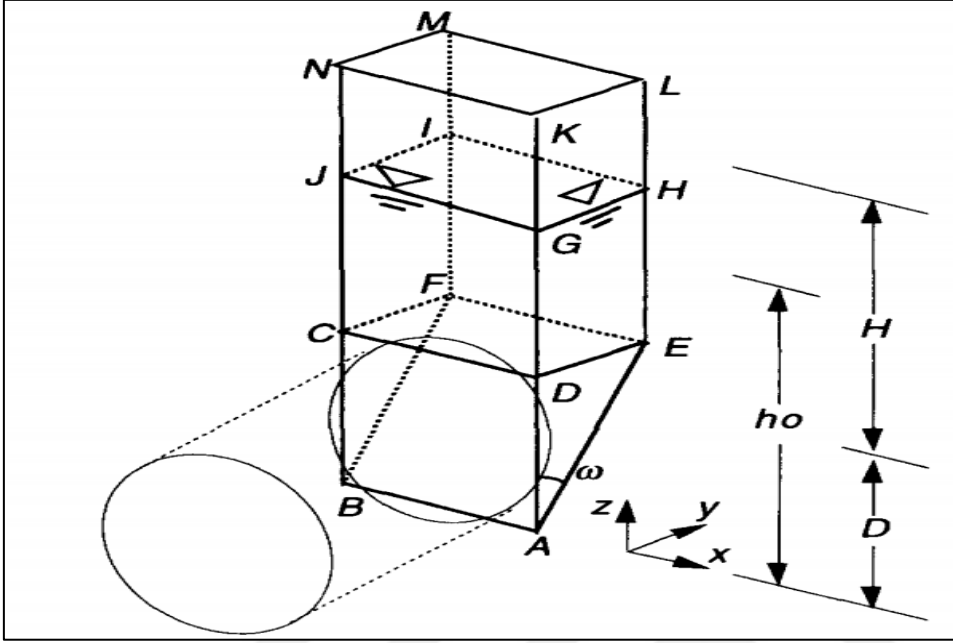
Ayna basıncının sağlanabilmesi, sağlanan ayna basıncının korunabilmesi (sızdırmazlık) ve sağlanan basınç altında TBM'in istenen performans düzeyinde kazı yapabilmesi gibi unsurlar dikkate alındığında ayna basıncı EPB ve Slurry TBM'ler için aynı zamanda önemli bir tasarım parametresi olmaktadır. Buna ek olarak özellikle EPB ve Slurry TBM'ler için ayna basıncının uygulandığı kapalı mod kazılar ile herhangi bir ayna basıncının uygulanmadığı açık mod kazılarının mekanik karakteristikleri birbirinden çok farklıdır. Bu tür TBM'lerin kazı performansları incelenirken uygulanan ayna basıncı (CP, chamber pressure) mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır (Gonzalez ve diğ., 2016; Tokgöz ve Binen, 2018).

Ayna basıncının hesaplanmasında farklı yöntemler farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Ayna basıncının hesaplanması temel olarak tünel kotunda yer alan tünel aynasının stabilite koşullarının belirlenmesini ve bu koşulların sağlanması için gerekli olan basıncın kestirilmesini amaçlar. Anagnostou ve Kovari (1996) önerdikleri model günümüzde yaygın şekilde kullanılmakta ve özellikle İstanbul metro projelerinde ihale şartnamelerinde yer bulmaktadır (Bilgin, 2018; Bilgin, 2015)

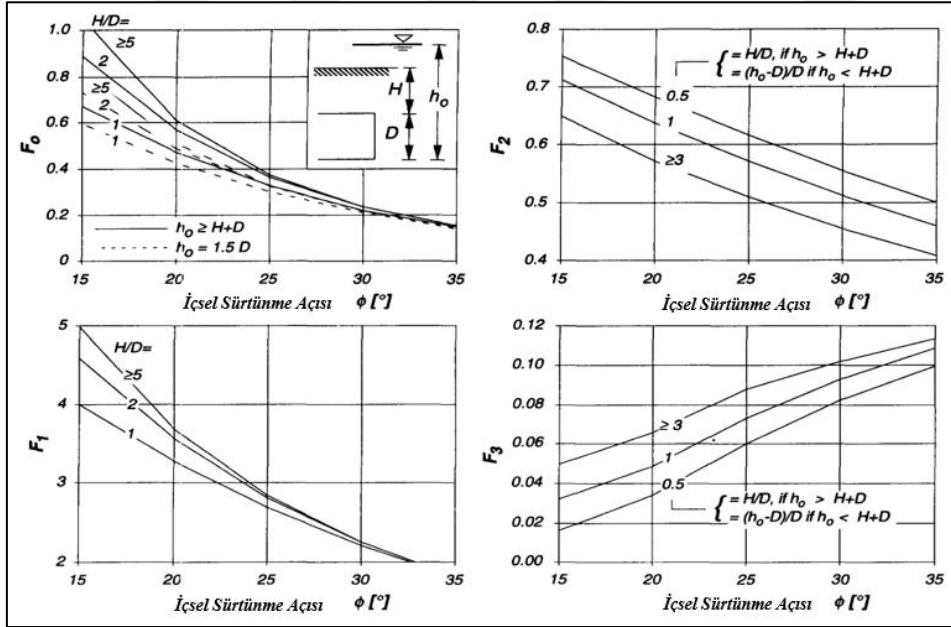
Anagnostou ve Kovari (1996) yönteminde homojen zeminde ayna stabilitesi, prizmatik zemin kütlesi tarafından yüklenen bir kama şeklindeki kütlelerin sınır dengesi dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Bu modelde Mohr-Coulomb yenilme kriteri ve drenajlı koşulların geçerli olduğu kabul edilir. Prizma yükü, aktif kama üzerine etkiyen düşey efektif gerilmeleri kemerlenme nedeniyle azaltıcı etkisi olan silo teorisine dayanarak hesaplanır (Şekil 2.18) (Bilgin, 2018; Bilgin, 2015; Anagnostou ve Kovari, 1996).

Sınır dengesinde bulunan efektif destek basıncı  $s'$ , tünel çapı  $D$ , örtü tabakası derinliği  $H$ , basınç odasındaki piezometrik basınç  $h_F$ , yeraltı suyu seviyesi  $h_0$ , kesme mukavemeti parametreleri ( $c$  ve  $\phi'$ ) ve zeminin suya doygun birim hacim ağırlığına  $\gamma'$  bağlıdır. Boyut analizi kullanarak ve denge ve yenilme denklemlerinin doğrusallığını dikkate alarak, sınır

denge durumu için Denklem 2.12'deki genel eşitlik önerilmiştir (Bilgin, 2018; Bilgin, 2015; Anagnostou ve Kovari, 1996).



Şekil 2. 18: Kayma Mekanizması Modeli (Anagnostou ve Kovari, 1996).



Şekil 2. 19:  $F_{0-3}$  katsayılarının belirlenmesinde kullanılan nomogramlar (Anagnostou ve Kovari, 1996).

$$s' = F_0 \gamma' D - F_1 c + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c \frac{\Delta h}{D} \quad (2.12)$$

Denklem 2.12'deki  $F_{0-3}$  boyutsuz katsayılar olup Şekil 2.19'da verilen nomogramlar vasıtasıyla içsel sürtünme açısı, tünel çapı, örtü tabakası, yeraltı su seviyesi gibi parametrelere bağlı olarak tayin edilir.

Elde edilen ayna basıncı değeri genellikle bar cinsinden ifade edilir ve tünel aynasının orta kısmındaki basıncı temsil etmektedir. TBM'lerin kazı odalarının cidarında yer alan basınç sensörleri kazı odasındaki basıncın (CP) anlık olarak takip edilmesini sağlar. CP değerinin önceden belirlenmiş olan EP değerine ayarlanmasıyla kazılar stabil ayna koşullarında gerçekleştirilir. Başka bir deyişle  $CP \approx EP$  olmalıdır. CP'nin EP'den büyük olduğu ( $CP > EP$ ) olduğu durumda TBM kazı performansında ciddi düşüşler meydana gelebileceği gibi yüzey oturması durumunun tersi olan yüzey kabarması (heave) gerçekleşebilir. CP'nin EP'den küçük olduğu durumlarda ( $CP < EP$ ) ise yüzeyde ciddi oturmalar gözlenebilir.

EP değerinin tam olarak kestirilmesi özellikle karmaşık zemin koşullarında oldukça güç olduğundan kazılar sırasında yüzey deformasyon kontrolü sürekli olarak yapılmalı, kazı esnasında TBM kazı parametrelerindeki değişimler anlık olarak takip edilmeli ve elde edilen geri bildirimler analiz edilerek ön görülen EP değerleri sürekli olarak güncellenmelidir.

### 2.3.6. Zemin Koşullandırma Parametreleri

TBM'lerin kazıları sırasında jeolojik ortama bağlı olarak toz oluşumunun azaltılması, pas-metal arasında kaydırıcılığın artırılarak sürtünmenin azaltılması, kazılan pasanın işlenebilirliğinin artırılması, kesici kafa ve ekipmanlarının sıcaklığının düşürülmesi, kesici kafa ve ekipmanlarının aşınmasının azaltılması, ayna destek basıncının sağlanabilmesi, yeraltı suyunun yoğun olduğu durumlarda pasa kıvamının korunabilmesi, killi zemin durumlarında kilin mineralojik yapısına bağlı olarak gelişen metal yüzey adezyonu problemlerinin ve yine killi zemin koşullarında gelişen tıkanma ve topaklanma sorunlarının aşılabilmesi için su, hava ve çeşitli kimyasal ajanlar kullanılmaktadır. Bu kimyasal ajanlar genellikle su ve hava ile belli bir dozajlama yapılarak karıştırılır ve köpük formunda kesici kafa üzerinde yer alan nozzlelerden aynaya püskürtülür. Tablo 2.1'de bu ajanlar ve özellikleri yer almaktadır (Milligan, 2000; EFNARC, 2005; Aksu, 2010; Budach ve Thewes, 2015; Peila, 2014; Langmaack ve Lee, 2016).

Temel olarak bir yüzey aktif kimyasal ajanı suyun yüzey gerilimini düşürerek etki gücünü artırmada ve stabil köpük oluşumunu sağlamada kullanılır. Bu yüzey aktif ajana ek olarak

çeşitli yan katkı kimyasalları da karışıma ilave edilebilir. Örnek olarak kuvars içeriği yüksek kumlu veya kuvarşça zengin kaya kütlesi gibi bir jeolojik ortamda kazı yapan TBM için disk kesicilerin ömrünün uzatılması ve kesici kafada aşınmaların önlenmesi adına yüzey aktif madde, su ve hava karışımına aşınma önleyici kimyasal katkı da ilave edilebilmektedir (Langmaack ve Lee, 2016; Milligan, 2000; EFNARC, 2005; Budach ve Thewes, 2015; Peila, 2014).

**Tablo 2. 1:** Farklı zemin koşullandırma/şartlandırma ajanları ve açıklamaları

<b>Koşullandırma/Şartlandırma Ajanları</b>	<b>Açıklama</b>
• Temel Köpük (Yüzey Aktif Madde)	<i>İçerdiği yüzey aktif madde ile suyun yüzey gerilimini düşürerek etki gücünü artıran ve köpük yapısının oluşumu sağlayan temel çözeltilidir.</i>
• Yüzey Aktif Madde + Su Tutucu Polimer	<i>Temel köpük bileşimine ek olarak içeriğinde su tutucu polimer katkı içeren çözeltilidir. Genellikle suya doymun kumlu veya aşırı su geliri olan zeminlerde kullanılır.</i>
• Yüzey Aktif Madde + Anti-Kil Ajanı	<i>Temel köpük bileşimine ek olarak kilin hidrofıl özelliğine karşı etkili polimer ajan içeren çözeltilidir. Kil içeriğinde kaynaklı olan tıkanma ve adezyon problemlerinin gözlemlendiği zeminlerde kullanılır.</i>
• Yüzey Aktif Madde + Aşınma Önleyici Ajan	<i>Temel köpük bileşimine ek olarak metal yüzeylerde aşınmanın önlenmesine yönelik aşınma önleyici katkı içeren çözeltilidir. Genellikle aşındırıcılığı yüksek kuvars içeren zeminlerde kullanılır.</i>
• Yüzey Aktif Madde + Toz Önleyici Ajan	<i>Sert kaya makinelerinde toz oluşumunun önlenmesinde kullanılmaktadır.</i>

Zemin koşullandırma ajanlarının sağlık bir şekilde çalışabilmesi için dozajlamanın iyi bir şekilde tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir. Bu durum özellikle yumuşak zemin/ayırışmış kaya ortamında kazı yapan ayna destek basınçlı TBM'ler için büyük önem arz eder. Bu tür TBM'lerde genellikle sofistike yapıda bir zemin koşullandırma sistemi ve köpük jeneratörü yer alır. Bu sistemin görevi, parametreler çerçevesinde su, hava ve kimyasal katkıyı belirlenen oranlarda dozajlamak ve kesici kafadan aynaya püskürtülmesini sağlamaktır.



Birinci aşama su ve kimyasal katkının birbirlerine dozajlanmasıdır. Böylelikle bir kimyasal katkı çözeltisi elde edilir. Bu çözeltinin kimyasal konsantrasyonu  $C_f$  (%) parametresiyle ifade edilmektedir.  $C_f$ , Deklem 2.13'teki gibi hesaplanır (Langmaack, 2002).

$$C_f = \frac{\text{Kimyasal Katkı (l)}}{\text{Su} + \text{Kimyasal Katkı (l)}} \times 100 \quad (2.13)$$

İdeal koşullar altında  $C_f$  değerinin genel olarak %0,5 ile %5 arasında tutulması önerilmektedirken konsantrasyon oranı seçilirken üretici firmanın önerdiği aralık da göz önünde bulundurulmalıdır (EFNARC, 2005).

Köpük oluşumu için bir başka önemli parametre köpük genleşme oranı (FER)'dir. FER temel olarak kimyasal katkı ve sudan oluşan çözeltinin o çözeltiyi köpük haline getirmek için kullanılan havaya oranı olarak ifade edilmektedir ve Denklem 2.14'deki gibi hesaplanır (Langmaack, 2002).

$$FER = \frac{\text{Hava (l)} + \text{Su (l)} + \text{Kimyasal Katkı (l)}}{\text{Su (l)} + \text{Kimyasal Katkı (l)}} = \frac{V_{\text{Köpük}}}{V_{\text{Çözelti}}} \quad (2.14)$$

FER değeri oluşan köpüğün kıvamıyla ilgili bir parametredir. FER değerinin 8 – 20 arasında tutulması önerilmektedir. Düşük FER değerleri daha nemli ve ıslak bir köpük elde edilmesini, yüksek FER değerleri ise daha kuru bir köpük elde edilmesini sağlar. FER için normal koşullarda genellikle 10 veya 12 değeri tercih edilir. 8'in altında kullanılan FER değerleri ile oluşturulan köpük stabil olamamakta ve hızla çökmektedir. 20'in üzerinde alınan FER değerleri ile oluşturulan köpük ise *çok kuru* olmakta ve işlevselliğini yitirmektedir (EFNARC,2005).

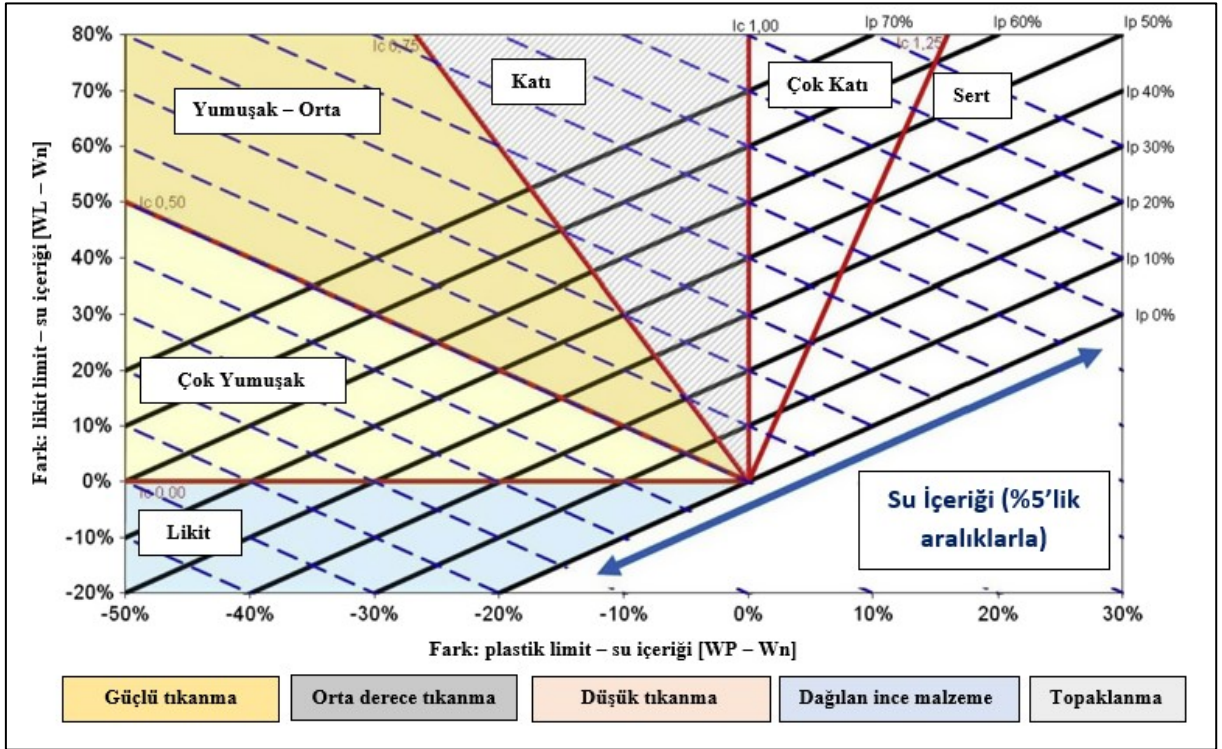
$C_f$  ve FER değerleri elde edilmek istenen köpüğün konsantrasyonu ve kıvamını tanımlayan parametrelerdir. Oluşturulan köpüğün kazı esnasında kullanım miktarını kontrol eden parametre ise Köpük Enjeksiyon Oranı olarak adlandırılan FIR değeridir. FIR basitçe birim hacmi kazmak için kullanılan köpük miktarının yüzde cinsinden ifadesi olarak tanımlanabilir ve Denklem 2.15'de görüldüğü gibi hesaplanır (Langmaack, 2002).

$$FIR = \frac{V_{\text{Köpük}}}{V_{\text{Zemin}}} \times 100 \quad (2.15)$$

FIR değeri için EFNARC (2005) önerdiği aralık %10- %80 aralığıdır. Çoğu durumda %30- %60 aralığında gerçekleşen kullanımlar koşullandırma için yeterli olacaktır. Ancak koşullandırmanın kalitesi,  $C_f$  ve FER değeriyle, ek olarak da zeminin özellikleri ve su içeriğiyle de doğrudan ilişkili olduğundan FIR aralığı da buna bağlı olarak yüksek değişkenlik gösterebilir (EFNARC, 2005).

Bir TBM projesinin ön çalışma ve tasarım aşamalarından birisi de güzergâh üzerinde yer alan jeolojik unsurlar içerisinde yapılacak kazılarda kullanılacak zemin koşullandırma ajanlarının türlerinin, konsantrasyonlarının, FER ve FIR değerlerinin belirlenmesidir. Bu çalışmalar jeoteknik örnekleme ve sınıflandırmaların ardından teorik ve laboratuvar çalışmaları şeklinde gerçekleştirilir. Elde edilen bulgular TBM'in zemin koşullandırma sisteminin ve bileşenlerinin özellik ve kapasitelerini belirlemede büyük önem arz etmektedir. Buna ek olarak özellikle EPB TBM'ler için zemin koşullandırmanın başarısı hem yüzey stabilitesinin sağlanabilmesine hem de en iyi makine performansına ulaşılmasına imkân vermektedir (Tokgöz, 2016, Tokgöz ve diğ., 2015; Tokgöz ve diğ., 2018).

EPB TBM'lerde zemin koşullandırmayla ilgili karşılan en büyük sorunlardan bir tanesi kil içeriğine bağlı gelişen topaklanma ve kesici kafanın tıkanması problemi. Zeminin içerisinde yer alan kil minerallerinin oranına, cinsine, zeminin kıvam özelliklerine ve zeminin doğal su içeriğine bağlı olarak gelişen bu topaklanma ve tıkanma risklerini belirleyebilmek için Şekil 2.20'deki diyagram Hollman ve Thewes (2013) önerilmiştir. Kesici kafada yaşanan bu tür tıkanmalar, kazıcı uçların işlevselliğini yitirmesine ve pasa naklinde kullanılan helezon konveyör gibi bileşenlerin işlevini yerine getirememesine sebep olmaktadır. Bunun sonucunda ise kazı performansında ciddi düşüşler görülebilmektedir. Tam anlamıyla tıkanma durumu gerçekleştiğinde kazı faaliyeti artık yürütülemez duruma gelir. Kesici kafaya girilerek söz konusu tıkanıklığın insan gücü ile giderilmesi gerekmektedir. Bu işlem oldukça zahmetli olmakla beraber ciddi zaman ve üretim kayıplarını da beraberinde getirmektedir (Tokgöz, 2016; Tokgöz ve diğ., 2015; Tokgöz ve diğ., 2018; Thewes ve Hollmann, 2016; Hollmann ve Thewes, 2013).



Şekil 2. 20: Zemin topaklanma ve tıkanma potansiyeli diyagramı (Hollman ve Thewes, 2013).



Şekil 2. 21: Kesici kafa tıkanma durumu.

Kiltaşı gibi ince taneli mineraller veya kil minerallerden oluşan kayaçlarda, özellikle düşük dayanım veya yüksek ayrışma/bozunma derecesi söz konusu olduğunda, kazılan pasa kesici kafa içerisinde ince taneli materyal gibi davranmaktadır. Tıkanma durumu her ne kadar killi zeminlere özgü bir durum olsa da yukarıda bahsedilen koşullar gerçekleştiğinde kapalı mod kazılarda benzer sorunlarla karşılaşılabilenekte (Şekil 2.21) ve makine performans kayıpları ya da üretim kayıpları gözlenebilmektedir (Thewes ve Hollman, 2016).



### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında gerçekleştirilen analiz ve değerlendirmelere ait verilerin temin edildiği Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi hakkında genel bilgiler verilmiş, projenin ve TBM ile açılan delme tünellerin bulunduğu güzergaha ait jeolojik ve jeoteknik çalışmalar özetlenmiş, projede kullanılmış olan TBM'lere ait teknik veriler sunulmuş ve yine bu tez kapsamında yer alan analiz ve değerlendirmelerde kullanılan veri setlerinin nasıl ve ne şekilde oluşturulduğu anlatılmıştır.

#### 3.1. ÇALIŞMA ALANI

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar İstanbul, Türkiye'de yapımı tamamlanmış olan Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesinden derlenen verilerle gerçekleştirilmiştir. Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi her biri 18 km uzunluğunda olan iki hattın oluşmaktadır ve ikiz tüp sistemiyle inşa edilmiştir. Bir ucu Mahmutbey istasyonunda diğer ucu ise Mecidiyeköy istasyonunda olan proje kapsamında 15 adet istasyon, 1 adet depo sahası ve depo sahası bağlantısı yer almaktadır. Şekil 3.1'de proje güzergahının bir haritası ve istasyonların konumlarıyla isimleri verilmiştir.

Projenin güzergahı İstanbul'un Avrupa yakasında doğu – batı doğrultusunda uzanmaktadır ve şehirleşmenin oldukça yoğun olduğu bir bölgededir. Aynı zamanda İstanbul'un ve özellikle Avrupa yakasının karmaşık jeolojik özellikleri göz önüne alındığında mekanize şehir tünelticiliğinin incelenmesi için oldukça önemli bir örnek teşkil etmektedir. Özellikle sürekli değişen litoloji koşulları, yeraltı suyu durumu, yoğun ve değişken kalitede üst ve alt yapıların varlığı proje sırasında çeşitli özgün sorunlara sebep olmuş ve özgün çözümler gerçekleştirilmesini gerektirmiştir. Bu anlamda projeye ilgili pek çok araştırmacı tarafından çeşitli yayınlar gerçekleştirilmiş ve sunulmuştur (Binen ve diğ., 2018; Ateş ve diğ., 2016; Kara ve diğ., 2018; Tokgöz ve Binen, 2018; Ateş ve diğ., 2017; Bilgin ve diğ., 2017; Kara, 2017)

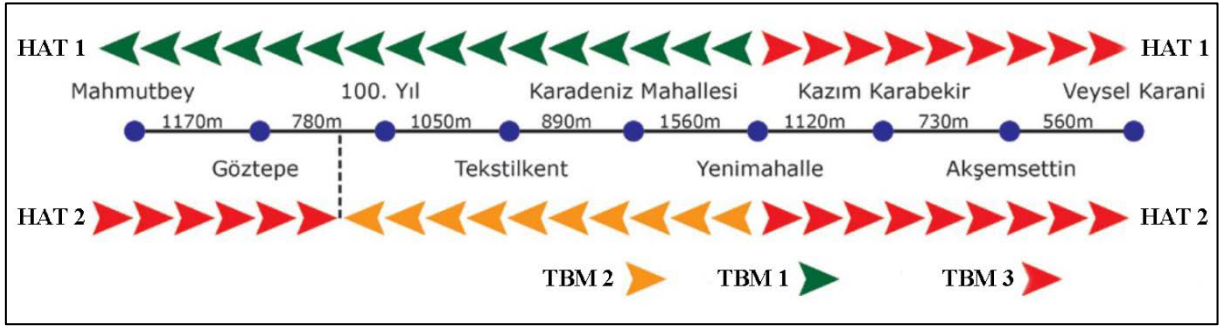
Projenin karmaşık jeolojik yapısı ve yapılan ön fizibilite çalışmalarının sonuçlarına bağlı olarak projede yer alan delme tünellerinin bir kısmının konvansiyonel yöntemlerden biri olarak bilinen NATM yöntemi ile açılması, kalan kısmının ise 3 adet EPB TBM ile açılması

kararlaştırılmıştır. NATM ile açılan kısımlar Veysel Karani – Mecidiyeköy İstasyonları arasında yer alan bölümdür. TBM’le açılan tüneller ise Veysel Karani – Mahmutbey İstasyonları arasında yer almaktadır. Her iki yöntemle açılan tünellerin toplam uzunlukları birbirleriyle yaklaşık olarak eşittir.



**Şekil 3. 1:** Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesinin harita üzerinde yerleşimi.

TBM ile açılacak olan tüneller için merkez şantiye olarak Yenimahalle İstasyonu seçilmiştir. 2 adet EPB TBM birinci ve ikinci hatlar olan Hat 1 (TBM 1) ve Hat 2’den (TBM 2) batı yönüne, Mahmutbey İstasyonuna doğru kazılarını gerçekleştirmiştir. Üçüncü EPB TBM (TBM 3) ise yine Yenimahalle İstasyonu’ndan doğu yönüne, Veysel Karani İstasyonu’na doğru önce Hat 1’i kazmış, daha sonra sökülerek tekrar Yenimahalle İstasyonu’na taşınmış, tekrar monte edilerek bu kez Hat 2’nin kazılarını tamamlamıştır. Batı yönüne Hat 2’de kazı yapan TBM’in (TBM 2) yaşamış olduğu teknik problemler (Ateş ve diğ., 2016; Ateş ve diğ., 2017, Binen ve diğ., 2018) sebebiyle proje planlamışının gerisinde kalmasından dolayı doğu yönünde kazın TBM (TBM 3) tekrar sökülerek Mahmutbey İstasyonu’na taşınmış ve burada yeniden monte edilerek bu kez Mahmutbey İstasyonu’ndan doğu yönüne Göztepe İstasyonu’na doğru Hat 2 kazılarını gerçekleştirmiştir. TBM 1, TBM 2 ve TBM 3’ün kazı yönleri ve yerleşimleri Şekil 3.2’de temsil edilmiştir.

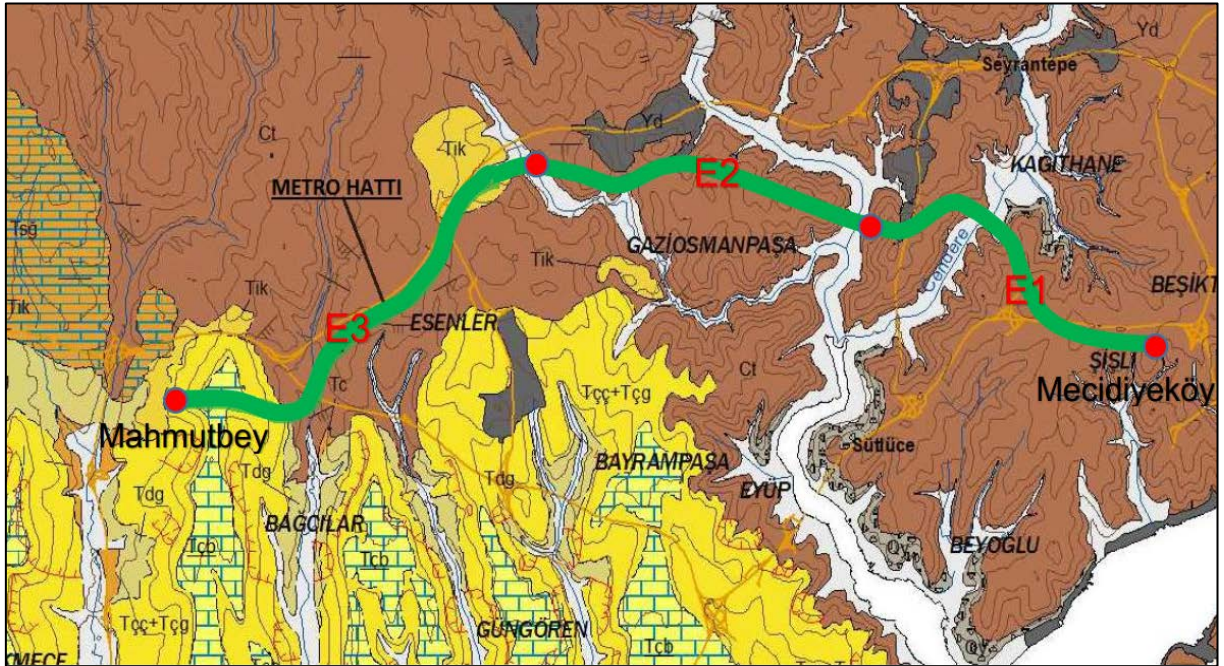


Şekil 3. 2: Projede yer alan TBM'lerin kazı güzergâhlarının şematik görünümü

### 3.2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

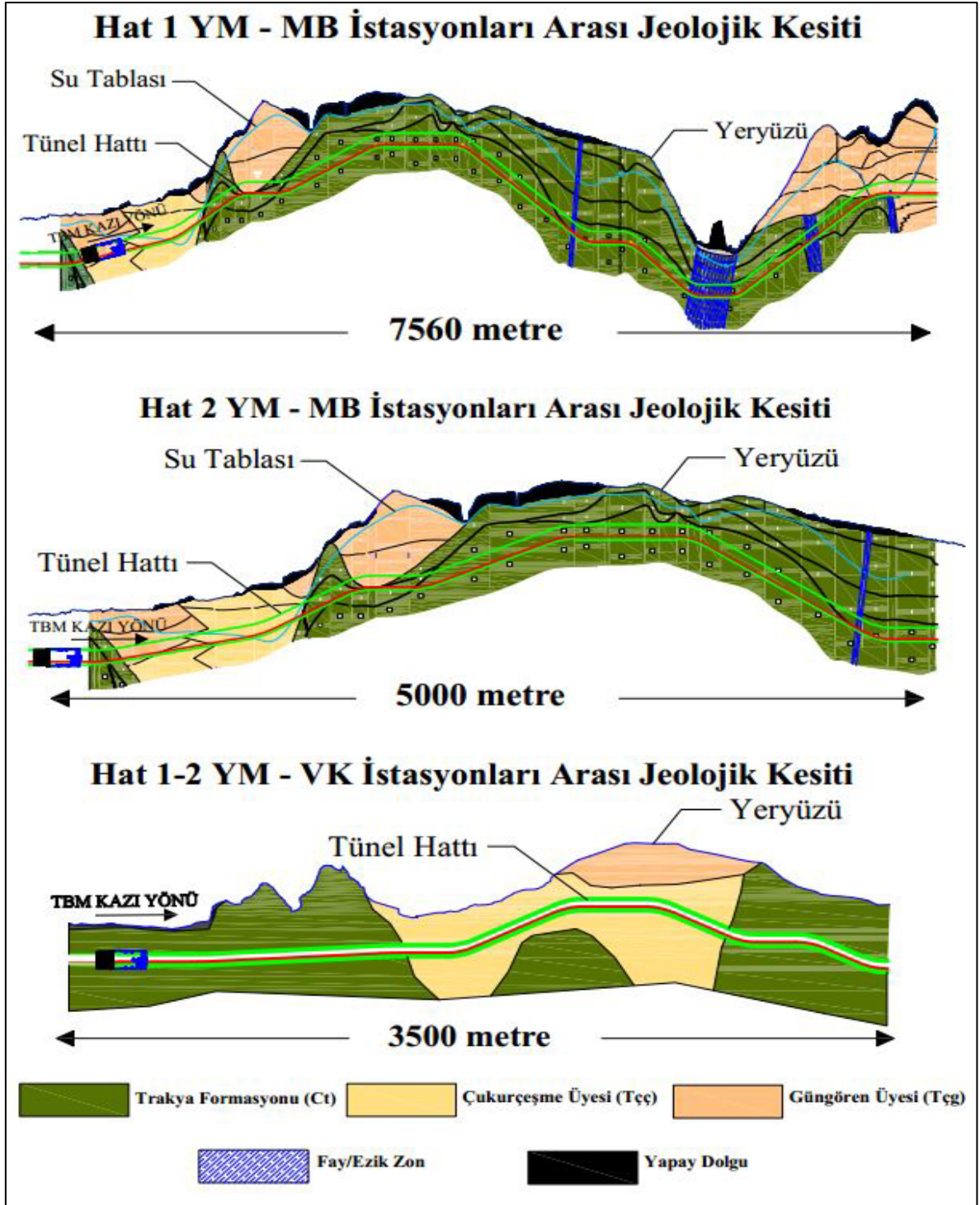
Tünel güzergahının doğu – batı doğrultusunda yer aldığı İstanbul'un Avrupa yakası jeolojik gelişimi ve tarihi açısından karmaşık jeolojik özelliklere sahiptir. Bu karmaşık özellikler fay hatları, ezik zonlar, volkanik intrüzyonlar (dayklar), suya doymun kum mercekleri, oldukça ayrılmış/bozunmuş veya bloklu zonlar, sık formasyon veya litoloji geçişleri ve kazı aynasının iki veya daha fazla farklı özellikteki jeolojik unsuru barındırdığı parçalı ayna koşulları olarak sıralanabilir.

Şekil 3.3'de bölgeye ait jeoloji haritası verilmiştir.



Şekil 3. 3: Çalışma alanına ait jeoloji haritası.

Çalışma alanının TBM ile açılan delme tüneller kapsamında yer alan başlıca formasyonlar Trakya Formasyonu ( $C_t$ ) ve Çekmece Formasyonunun ( $T_c$ ) Çekmece ( $T_{cç}$ ) ve Güngören ( $T_{cğ}$ ) üyeleridir. Şekil 3.4'te güzergahlara ait jeolojik düşey kesitlere yer verilmiştir.



Şekil 3. 4: Güzergâhlara ait jeolojik kesitler.

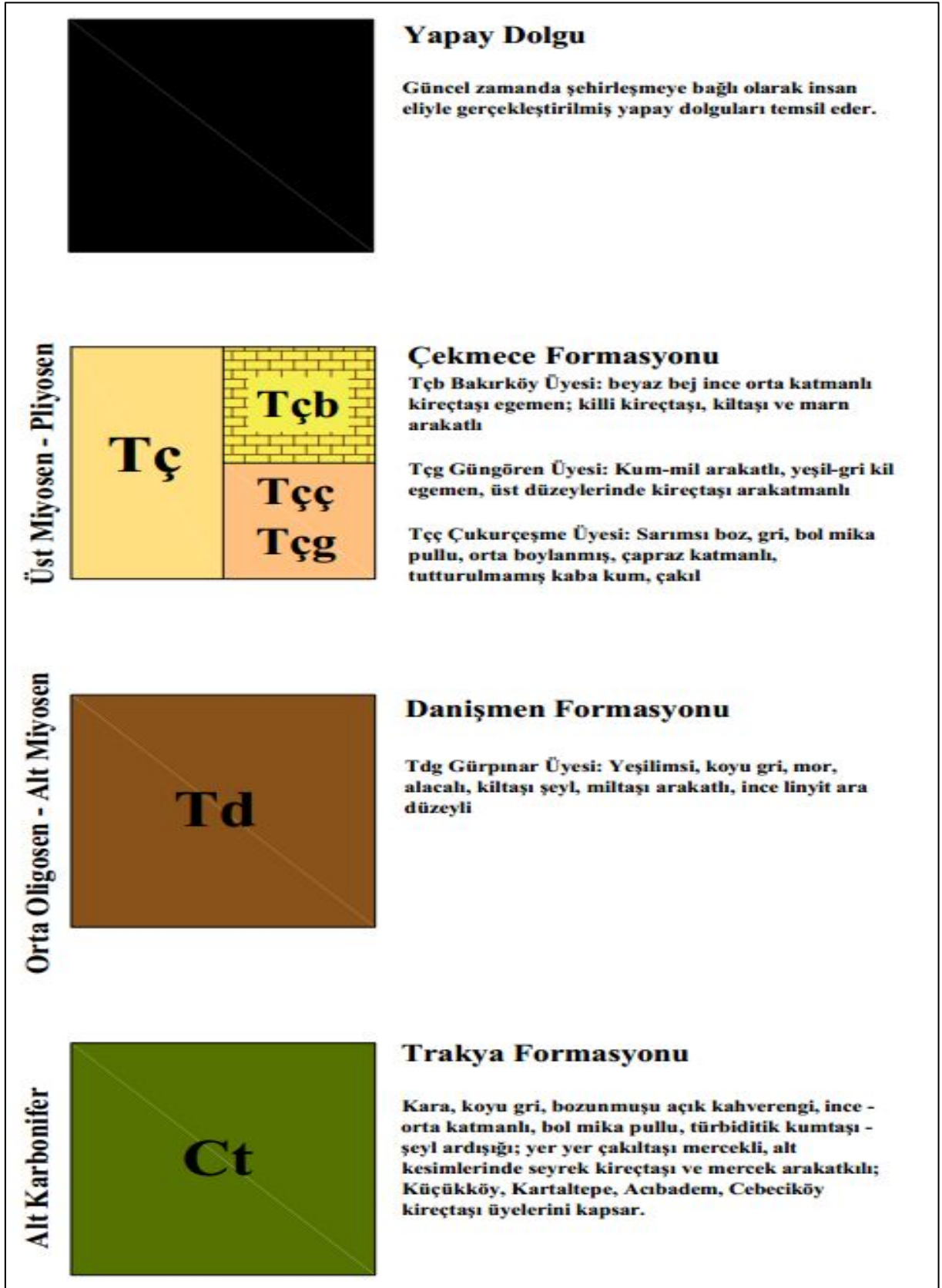


Karbonifer dönemine ait Trakya Formasyonu, başlıca kara, koyu gri, bozunmuşu açık kahverengi, ince – orta katmanlı, bol mika pullu, türbiditik kumtaşı – şeyl ardışığı; yer yer çakıltaşı mercekli, alt kesimlerinde seyrek kireçtaşı ve mercek arakatlı; Küçükköy, Kartaltepe, Acıbadem ve Cebeciköy kireçtaşı üyelerini kapsar. Kumtaşları kuvarsça zengin, orta sert ve sert dayanımdadır. Kırıklı/çatlaklı, bloklu zonlar mevcut olup su varlığında aşırı altere olmuş bölgeler de gözlenmiştir. Formasyon içerisinde yer alan şeyller kil ve silt içermektedir.

Çekmece Formasyonu üst miyosen – pliyosen dönemine ait olup, Güngören üyesi kum-mil arakatlı, yeşil-gri kil egemen, üst düzeylerinde kireçtaşı arakatmanlı olarak tanımlanırken, Çukurçeşme üyesi ise sarımsı boz, gri, bol mika pullu, orta boylanmış, çapraz katmanlı, tutturulmamış kaba kum, çakıl olarak tanımlanmaktadır. Suyu doygun, gevşek kumlu siltli zonlar EPB TBM'lerle yapılan kazılarda ayna stabilitesi ve yüzey oturmaları açısından önem arz ederken, yüksek kil içeriğine sahip zonlar kazılar sırasında tıkanma/topaklanma ve diğer adezyonla ilişkili riskleri barındırmaktadır.

Tünel güzergahı üzerinde yer alan jeolojik birimleri ve birbirleri olan ilişkilerini açıklamaları ile gösteren statigrafik kesit Şekil 3.5'te sunulmuştur.

Çalışma alanı hidrojeolojik açıdan ele alındığında tünel hattının genel olarak Çekmece Formasyonun Çukurçeşme ve Güngören üyeleri gibi teorik açıdan geçirimli veya yarı geçirimli bölgelerden ya da Trakya Formasyonu'nun teorik olarak geçirimsiz olduğu ifade edilen kumtaşlarından oluşan bölgelerden geçtiği görülmektedir. Öte yandan Trakya Formasyonu'na ait kumtaşları geçmiş tektonik aktivitelerin oluşturmuş olduğu kırık ve çatlaklara sahiptir. Bu kırık ve çatlaklar yeraltı suyu için akış ağları teşkil etmektedir. Yapılan kazılar sırasında da teorik olarak geçirimsiz olduğu düşünülen bu formasyonda kırık/çatlak gelişimine bağlı su gelirleriyle sıkça karşılaşmıştır. Yoğun şehirleşme nedeniyle yağın yağışların yeraltı suyuna çok büyük bir katkı yapmadan deşarj olması beklense de tünel güzergahı üzerinde yer alan geçirimli kumlu – siltli zonlarda akifer ve yeraltı suyu havzalarına rastlanmıştır. Daha da önemlisi güzergâh üzerinde çarpık şehirleşmeye bağlı olarak çok sayıda aktif veya terk edilmiş su kuyularına rastlanmıştır. Güzergâh üzerinde ve hatta bazen tünel kotuna kadar erişen bu su kuyuları EPB TBM'ler ile yapılan kazılar için çeşitli sorunlara neden olmuş ve ek önlemler alınmasını gerektirmiştir.



Şekil 3. 5: Tünel güzergâhı için jeolojik birimlerin stratigrafik kesit görünümü.

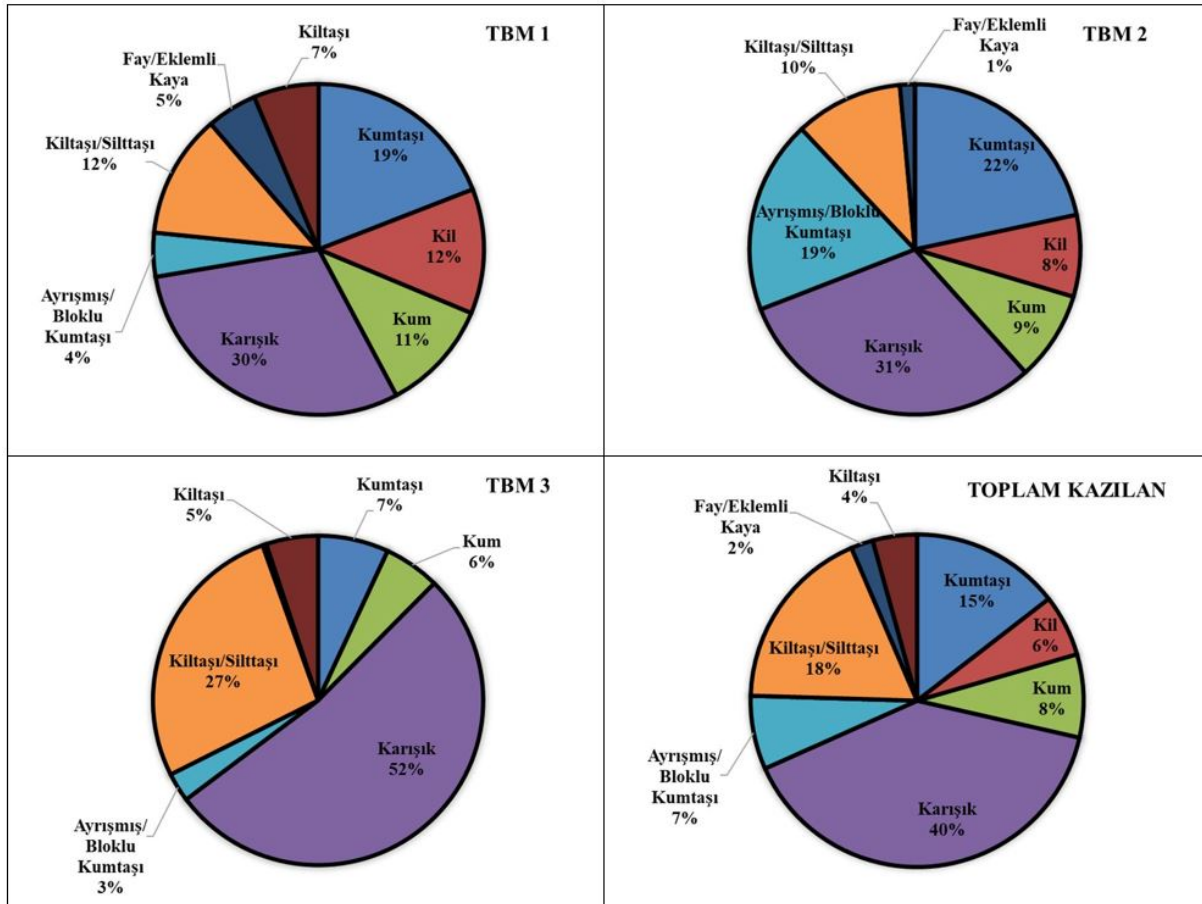
Yukarıda bahsedilen ve tünel güzergâhında gözlemlenen formasyonlar sık ardalanmalar ve litoloji geçişleri içermektedir. Bu litoloji değişimleri kazılabilirlik açısından önem arz etmektedir. Örnek olarak Trakya Formasyonunda yer alan kumtaşının kazı mekaniği anlamında davranışı aynı formasyonda gözlenen kıltaşı/silttaşından veya aşırı bozunmuş/ayrışmış bloklu kumtaşlarından farklı olmaktadır. Bu sebeple yapılan ön jeoteknik etütler, sondaj karot görünümleri, tünel kazıları sırasında yapılan ayna ve kazı malzemesi gözlemlerinden yola çıkılarak hattın her bir TBM'e bağlı olarak litolojik açıdan bir karakterizasyonu yapılmıştır. Tablo 3.1'de litolojik birimler ve metraj verileri Şekil 3.6'da ise bu birimlerin yüzdelik dağılım grafiği sunulmuştur.

**Tablo 3. 1:** TBM'lerin kazdığı farklı litoloji birimleri ve kazı ring mesafeleri (Ring = 1,4 metre)

Litoloji	TBM 1	TBM 2	TBM 3	Toplam
				Kazılan
Kumtaşı	735	595	340	1670
Kil	470	220	0	690
Kum	420	240	270	930
Karışık	1160	845	2570	4575
Ayrışmış/Bloklu Kumtaşı	165	520	140	825
Kıltaşı/Silttaşı	465	290	1325	2080
Fay/Eklemlili Kaya	190	40	18	248
Kıltaşı	245	0	250	495

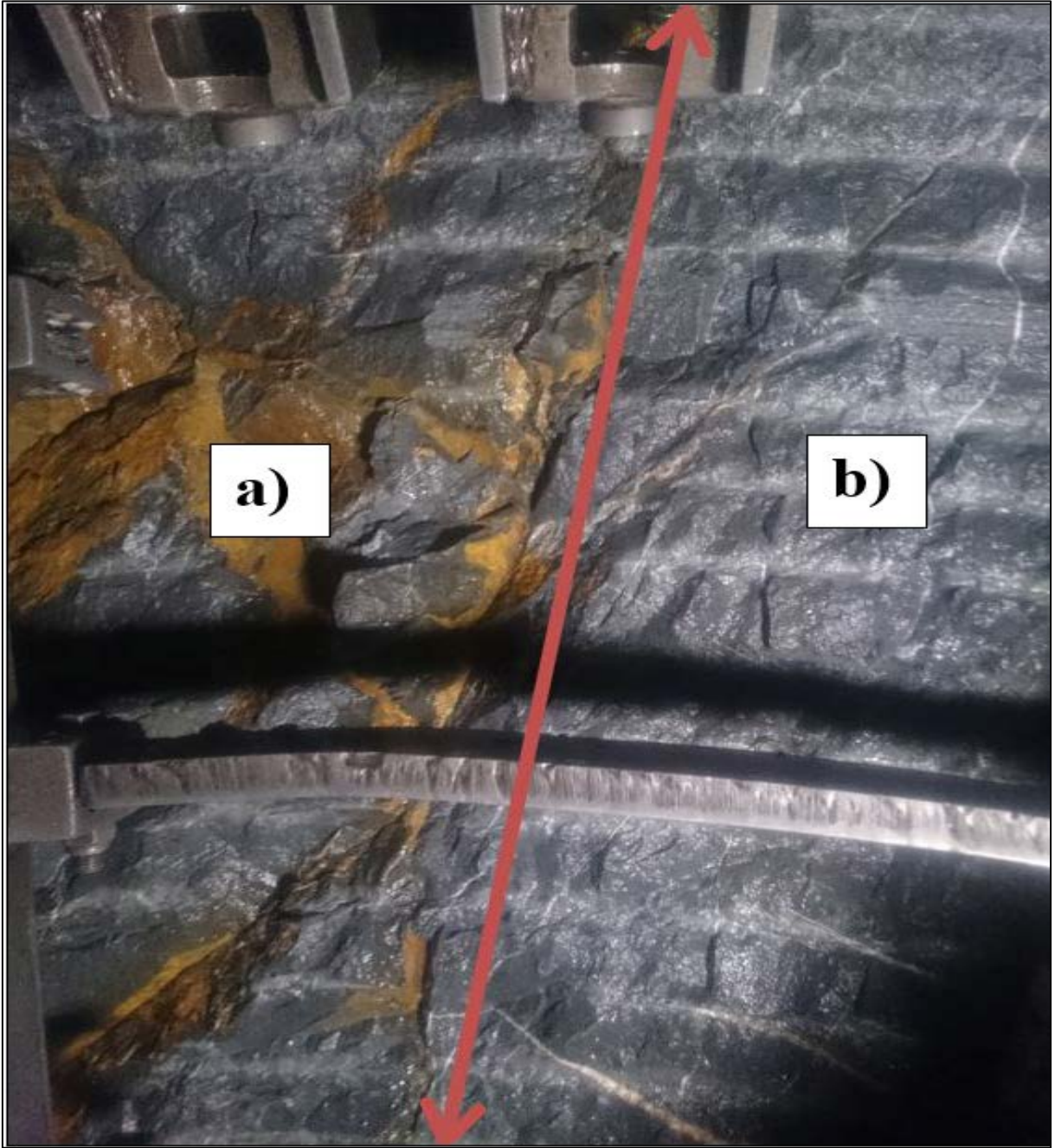
Şekil 3.6 ve Tablo 3.1 incelendiğinde toplam yapılan kazıların yaklaşık %40'lık bir kısmının (4575 ring, 6405 metre) karışık olarak ifade edilen parçalı ayna koşullarında gerçekleştiği görülmektedir. Kil ve kum gibi zemin özelliği gösteren çimentolanmamış/tutturulmamış kazı malzemesi ise toplam yapılan kazılar içerisinde yaklaşık %14'lük bir yer kaplamaktadır. Ayrışmamış olarak kabul edilen kumtaşlarının toplam kazı malzemesi içerisindeki yeri %15 olarak gözlenirken ayrışmış/bozunmuş veya bloklanmış kumtaşları ise toplam kazı malzemesi içerisinde %7'lik bir orana sahip olmuştur. Aşırı konsolide ve taşlaşmış kıltaşı ve

kiltaşı/silttaşı birimlerin toplam kazı malzemesi içerisindeki yüzdesi ise %22 dolaylarındadır. Aynı zamanda fay/eklemlili kaya veya ezik zon olarak kabul edilen bölgelerin toplam kazı malzemesi içerisindeki yeri %2 olarak gözlenmiştir.



Şekil 3. 6: TBM'lerin kazdığı farklı litoloji birimlerinin yüzdeler dağılımı.

TBM 3, TBM 2 ve 1'e oranla daha fazla parçalı ayna (Şekil 3.7) koşullarında kazı gerçekleştirmiştir (sırasıyla %52, %30 ve %31). TBM 1 ve TBM 2 yanyana hatlarda kazdıkları için bu iki TBM'in kazısını gerçekleştirdiği litolojik birimlerin oranları birbirine yakın olmakla beraber, TBM 2'nin teknik problemlerden ötürü TBM 1'e göre yaklaşık 2 istasyon eksik kazmasından ötürü yüzdeler dilimlerde farklılıklar görülebilmektedir. TBM 3, TBM 1 ve 2'ye göre görece olarak düşük dayanımlı kabul edilen kilttaşı ve silttaşı birimlerinde daha fazla kazı gerçekleştirenken TBM 1 ve TBM 2 ise TBM 3'e göre daha fazla kumtaşı veya ayrılmış/bozunmuş kumtaşında kazılarını gerçekleştirmiştir.



**Şekil 3. 7:** TBM 2 için parçalı ayna koşullarını gösteren CH içi ayna görüntüsü.

Şekil 3.7’de yer alan görüntüde TBM 2’nin kazı aynasında aynanın sol tarafının (a) ayrılmış/bozunmuş, blok halinde dökülebilen kumtaşından oluştuğu, aynanın sağ tarafının (b) ise sağlam olarak tarif edilebilecek kumtaşından oluştuğu gözlenmektedir.

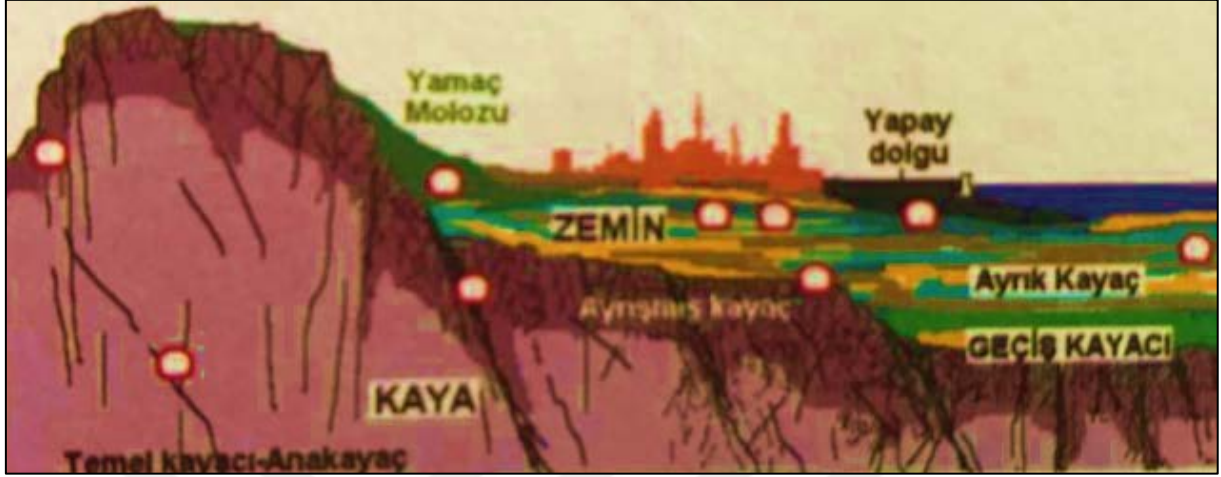
TBM ile yapılan kazılarda kazı aynasındaki litolojik birimlerin önemi büyüktür. Ancak bu litolojik birimlerin uygulamada tespit edilmesi, karakterize edilmesi, geçiş zonlarının kesin olarak belirlenebilmesi, kazılabilirliğe etkilerinin analiz edilmesi, gerekli örnekleme sayısının

çok yüksek olması dolayısıyla bazı problemler teşkil etmektedir. Tokgöz ve Binen (2018) tarafından yapılan ön araştırmada; şehir tünellerinde karşılaşılan ve ayrışma derecesinin belirlendiği ve denetlediği orta, zayıf ve çok zayıf kayaç dayanım sınıfında yeralan sedimanter oluşumlu kumtaşı, kiltası ve silttaşı ardalanmalarının artan ayrışmayla dağılıp parçalanma sonrasında kayaç özelliğinin %30-50'sinin kaybederek ayrışık-kaya/zemin (geçiş kayacı) özelliği kazanan kazı materyallerindeki 2 farklı EPBM'in performans büyüklüklerinden, spesifik enerji ve kazı ilerleme hızları üzerinde etkisini toplam 1438 adet veri kapsamında incelemiştir. Bu tez kapsamında ise aynı litolojik birimlerin ayrışma/bozunmaya bağlı veri sayısı daha da artırılarak yaklaşık 11000 adet ayrışma/bozunma derecesi farklı marka ve teknik özellikteki 3 adet EPBM'in kazı performansına etkisi daha geniş kapsamda analiz edilip, incelenecektir.

Kayaç kavramı çeşitli farklı veya aynı cins minerallerin bir araya gelerek çimentolanması/tutturulması ile oluşan kütleler olarak tanımlanırken (Ketin, 2016), zemin kavramı ise Önalp ve Arel (2013) tarafından bir bağlayıcı ile tamamen veya kısmen çimentolanmamış değişik türden minerallerin su ve/veya hava ile karışımı ile oluşan birikintiler olarak tanımlanmaktadır. Ayrışma kayaçların mekanik veya kimyasal etkiler ile ufalanarak daha küçük parçalara ayrılması, bütünlük özelliklerini kaybetmesi olarak tanımlanmaktadır (Das, 2013; Önalp ve Arel, 2013; Ketin, 2016). Bu bağlamda zeminlerin kayaçların ayrışması/bozunması ile oluştuğu anlaşılmaktadır. O halde hem zemin hem de kayaları kategorize ederken ayrışma/bozunma özelliğinin kullanılması, başka bir deyişle zeminlerin aşırı ayrışmış/bozunmuş kayaçlar olarak kategorize sınıflandırılması mümkün olmaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, jeoteknikçinin pek çok projede ya ayrışarak kaya niteliğini büyük ölçüde yitirmiş, ya da sıkışarak, kaynaşarak ve pekleşerek taşlaşmaya başlamış kaya veya benzeri zeminlerle karşılaşmasıdır. Bu ortamlar "geçiş kayacı" olarak adlandırılmaktadır (Vardar, 2018) (Şekil 3.8). Bu ortamların tanımı ve mekanik yorumu özel bir uğraşı ve uzmanlık alanı gerektirmektedir.

ANON (1995) ayrışma derecesinin belirlenmesine yönelik olarak 6 farklı gruplama önermiştir. Bu gruplama kayacın orijinal halinden zemine dönüşüne kadar geçen süreçteki aşamaları dayanım, renk, doku, bütünlük gibi fiziksel özelliklerine bağlı olarak ifade etmektedir (Ündül ve Tuğrul, 2011) (Şekil 3.9). Materyal ve kütle esasını temel alan bu sınıflandırma sisteminde

materyal karot numuneleri gibi küçük numune boyutlarını temsil ederken kütle haritalandırılmış şevler gibi büyük alansal kayaç kütlelerini ifade etmektedir.

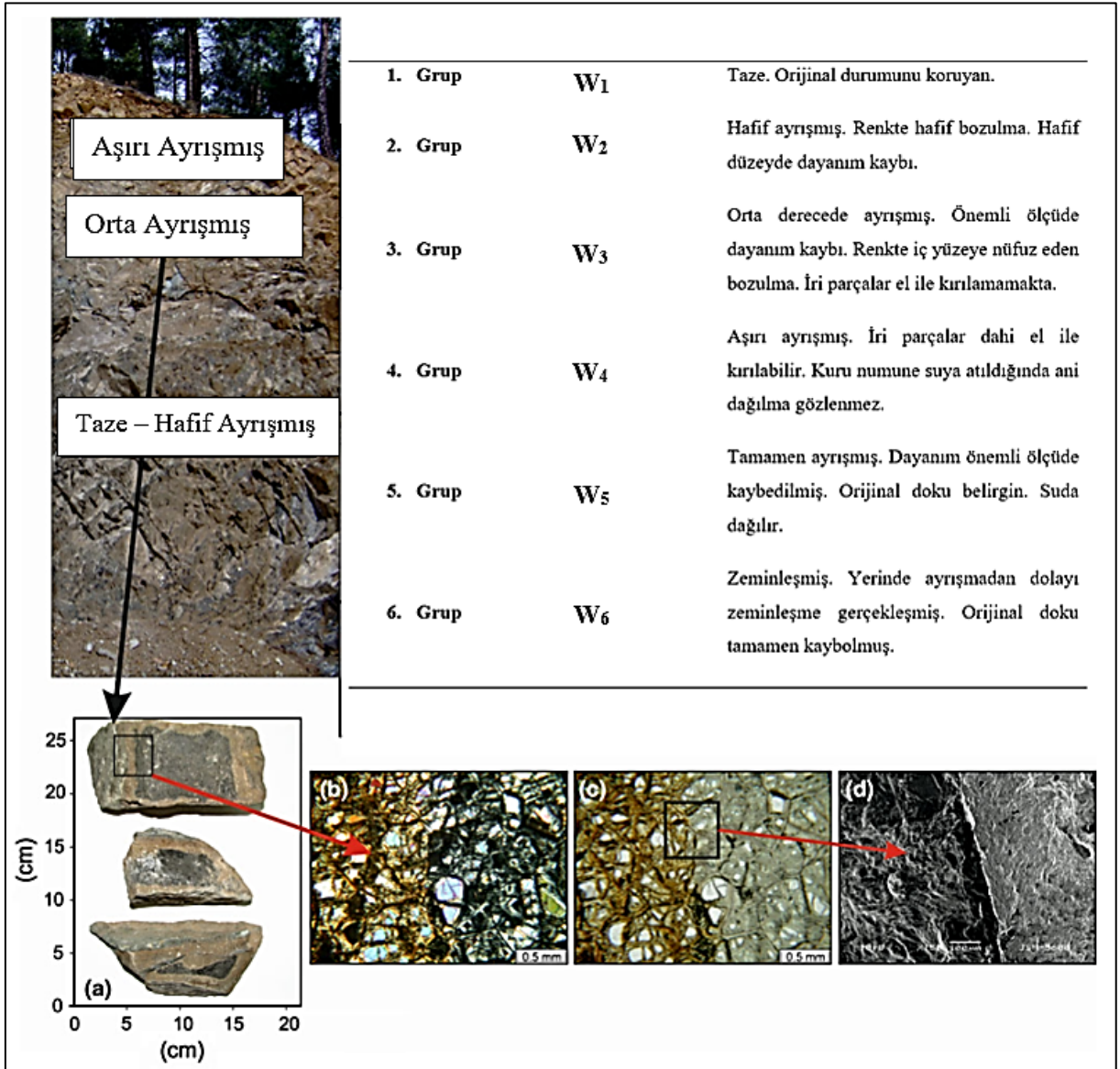


Şekil 3. 8: Zemin – Kaya geçişleri (Vardar, 2018).

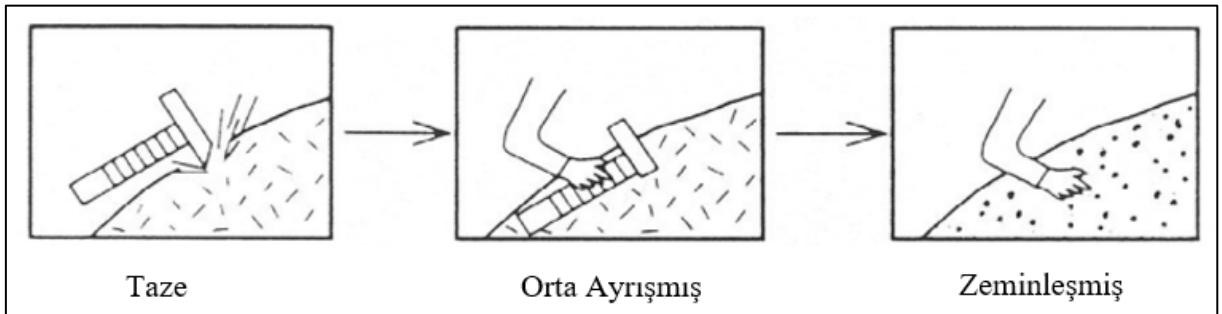
Shirlaw (2016), kayaçların zemine dönüşmesi (kayaç döngüsü) süreci olarak ifade edilen fiziksel ve mekanik ayrışmanın (Şekil 3.10) ve ayrışma/bozunma derecesinin TBM ile yapılan tünel kazılarında yaratmış olduğu parçalı ayna koşulları, ayna basıncının korunamaması, yüzey stabilitesinin kaybolması, göçük, düşük ilerleme hızları, yüksek keski tüketimi, tıkanma ve blokaj gibi problemleri incelemiştir. Shirlaw (2016) çalışmasında ANON (1995) tarafından önerilen ayrışma derecesi sınıflandırmasını temel almıştır.

Ayrıca, Vergara ve Saraglou (2017) yaptıkları çalışmada karışık zeminler ve parçalı ayna koşullarını içeren tünel güzergâhlarında EPB TBM'ler için performans kestirim modeli geliştirmeye çalışmışlardır. Bu modelin jeolojik girdilerinde ise ayrışma derecesini temel almışlardır. Ancak volkanik kayaçlardan Bukit Timah Graniti üzerinde ilgili araştırmaları gerçekleştirmişlerdir.

Polat (2014, 2015) Mahmutbey – Mecidiyeköy metro projesinin geoteknik değerlendirme raporunda Trakya formasyonuna ait çamurtaşı, kumtaşı, kiltası, silttaşı gibi litolojilerin tünel güzergâhı üzerinde çok sık aralanmalı olduğunu ve kaya biriminde litolojiye dayalı bir ayırım yapmanın çok zor olduğunu belirtmiştir. Buna ek olarak ayrışma derecesine bağlı bir ayırımın mümkün olduğunu ve mühendislik açısından daha uygun ve anlamlı olacağını ifade etmiştir. Tünellerin kazıları sırasında yapılan gözlemler Polat (2014, 2015) tarafından yukarıda verilen önermeyi doğrular nitelikte olmuştur.



Şekil 3. 9: Kayaçların ayrışma derecesine göre gruplandırılması (ANON, 1995; Ündül ve Tuğrul, 2011).



Şekil 3. 10: Kayaçların ayrışmaya bağlı olarak zeminleşmesi (Shirlaw, 2016).

Bu tez kapsamında yukarıda bahsedilen sınıflandırmanın gerçekleştirilebilmesi için ön jeoteknik etüt ve raporlardan, sondaj karotlarından, TBM kazıları esnasında yapılan



örneklemeler ve ayna incelemelerinden faydalanılmış ve 3 temel ayrışma/bozunma derecesi/grubu ( $W_1$ ,  $W_{2-3}$ ,  $W_{3-4}$ ) oluşturulmuştur.  $W_1$ , ayrışma/bozunmanın gözlenmediği veya çok az gözlendiği, bütünlüğünü ve çimentolanma özelliğini çok büyük oranda koruyan, görece olarak dayanımı yüksek kayaç birimleri kapsamaktadır.  $W_{2-3}$ , ayrışma/bozunmanın orta derecede gözlendiği, görece olarak kolay dağılan ve dayanımı düşük, çimentolanma özelliği zayıflamış birimleri kapsamaktadır.  $W_{3-4}$  ise aşınma/bozunmanın aşırı derecede gözlendiği, bütünlüğünü ve çimentolanma özelliğini kaybetmiş veya çok az çimentolanma özelliği gösterebilen, kolayca dağılan, dayanımın çok düşük gözlendiği, kendi kendini tutamayan birimleri kapsamaktadır (Bkz. Kum mercekleri, konsolide veya gevşek killer gibi zeminler veya fay/ezik zon gibi çok baskı görmüş birimler de yine  $W_{3-4}$  kategorisi altında sınıflandırılmıştır.

Yukarda bahsedilen ayrışma zonu sınıflandırmaları, örnek karot görünümleri ve ayna fotoğrafları ile Şekil 3.11’de verilmiştir.

$W_1$  olarak tanımlanan grupta yer alan birimler, ayrışma/bozunma derecesi en düşük olan birimlerdir. Genellikle Trakya Formasyonuna ait sağlam kumtaşları bu grup içerisinde yer almıştır. Bu birimlerin karot örneklerinde de birimlerin bütünlüğü ve intakt durumları görülebilmektedir. TBM kazıları sırasında bu grup altında sınıflandırılmış birimler içerisinde yapılan kazılar genellikle açık modda gerçekleştirilmiş ve herhangi bir stabilite problemi ile karşılaşılmaştır. Yapılan kesici kafa kontrolleri ve ayna incelemelerinde ise bu grup altında sınıflandırılan birimler de ayna yüzeyinde disk keskinin izleri net bir şekilde görülmüş, ayna yüzeyi homojen olarak izlenmiş ve herhangi bir dökülme not edilmemiştir. Kazılar sırasında alınan numuneler üzerinde yapılan tek eksenli basma deneylerinde bu kumtaşlarının 150 MPa’ya kadar çıkan dayanımlar sergilediği kaydedilmiştir (Ateş ve diğ., 2016).



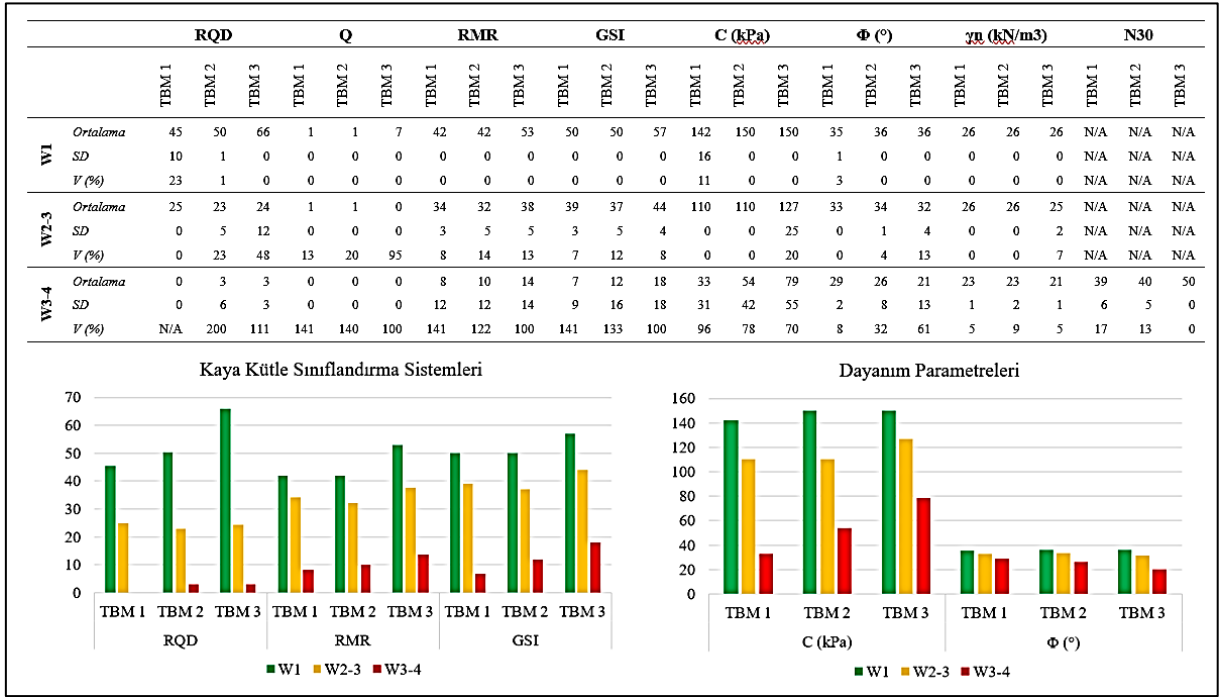
Şekil 3. 11: Ayrışma gruplarının örnek karot görünümleri ve ayna fotoğrafları.

W<sub>2-3</sub> grubunda yer alan birimler Trakya Formasyonuna ait orta derecede aşınmış/bozunmuş, genellikle bütünlüğünü koruyabilen, görece olarak stabil kabul edilebilecek kıltaşı-silttaşı, ayrılmış/bloklu kumtaşı gibi birimlerden oluşmaktadır. Bu birimlere ait karot ve ayna fotoğrafları Şekil 3.11’de verilmiştir. Ayna fotoğraflarında görüldüğü üzere söz konusu gruba ait birimlerde ayna stabilitesi söz konusu olsa bile disk keski izleri görülememekte, bunun yerine bloklu yapıda heterojen bir kazı aynası ve blok dökülmeler gözlenmektedir. Ayrılmış/bozunmuş kumtaşlarından kopan bloklar orta – sert dayanım gösterse de bloklu yapıdan dolayı tam anlamıyla bir ayna stabilitesi gelişmemektedir. Grup içerisinde yer alan kıltaşı, silttaşı gibi birimler zayıf çimentolu ve düşük dayanımlı olmalarının yanı sıra, sık aralanmalı bir yapıya sahip olarak gözlenmiştir.

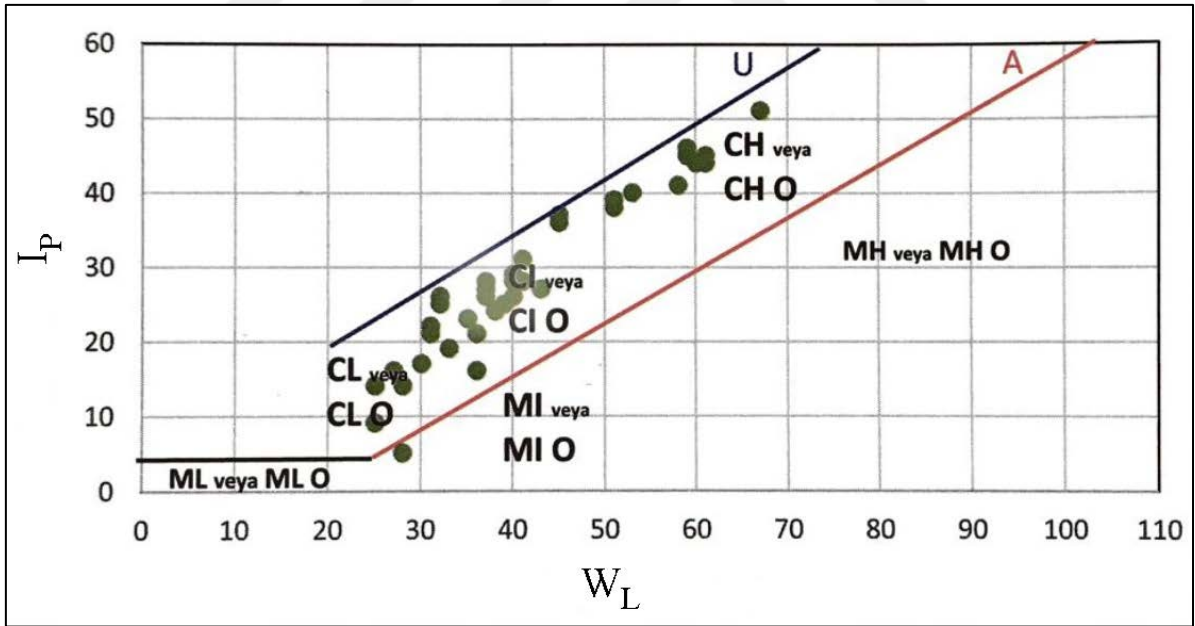
W<sub>3-4</sub> ayrışma grubuna dahil olan birimler Trakya Formasyonuna ait aşırı derecede ayrılmış, stabil olmayan, çok kırıklı/çatlaklı, ezik yapıda kayaç birimler ile Çekmece Formasyonunun Güngören ve Çukurçeşme üyelerine ait olan kumlu killi, zemin özelliği gösteren birimlerdir ve Şekil 3.11’de her iki durum için örnekleme yapılmıştır. Bu gruba ait olan birimlerin kazıları kapalı modda ve görece olarak yüksek ayna basınçları ile gerçekleştirilmiştir. Ayna stabilite problemleri ile sıklıkla karşılaşmıştır. Bu grupta yer alan birimlerin kazı parametreleri üzerindeki etkileri Tokgöz ve Binen (2018) incelenmiştir. Daha detaylı ve kapsamlı değerlendirmeler bu tezin ilerleyen bölümlerinde verilmektedir.

Ayrışma zonlarına ait bazı mekanik büyüklükler ve bu büyüklüklerin istatistiki değerlenmeleri Şekil 3,12’de verilmiştir.

Şekil 3.12 incelendiğinde W<sub>1</sub>, W<sub>2-3</sub> ve W<sub>3-4</sub> olarak belirlenmiş ayrışma zonlarının her bir EPBM için ayrı olarak kaya kütle sınıflandırma sistemleri, dayanım parametreleri açısından ortalama değerleri, standart sapma (SD) ve değişkenlik katsayısı (%V) ile birlikte sunulmuştur. Kaya kütle sınıflama sistemleri olarak RQD, Q, RMR ve GSI sistemlerine ait olan veriler ön geoteknik etütlerden derlenmiştir (Polat, 2014; Polat, 2015). Ayrıca, bazı fiziksel ve mekanik büyüklüklerden; doğal birim hacim ağırlığı ( $\gamma_n$ ), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ), ve SPT (N30) verileri de yine geoteknik etütlerden ham veri olarak derlenmiştir.



Şekil 3. 12: Ayrışma zonlarına ait mekanik büyüklüklerin istatistikleri.



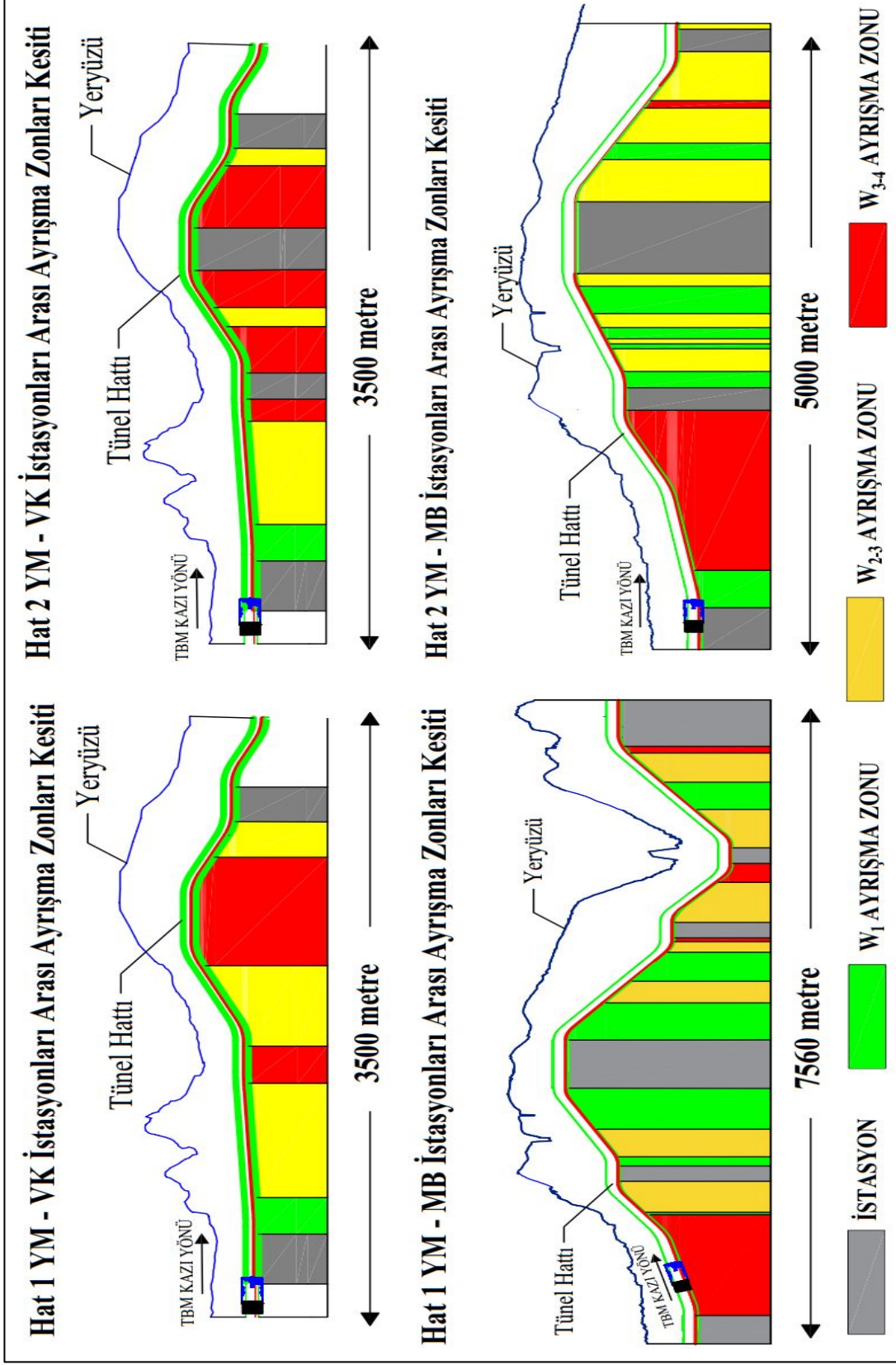
Şekil 3. 13:  $W_{3-4}$  olarak sınıflandırılmış zemin birimlerin plastisite diyagramı (Polat, 2014; Polat, 2015; Çınar ve diğ., 2017)

$W_{3-4}$  ayrışma zonu içerisinde sınıflandırılmış olan Çekmece formasyonunun Çukurçeşme ve Güngören üyeleri için proje öncesi ön geoteknik çalışmalardan elde edilen likit limit ( $W_L$ ) ve plastisite indisi ( $I_p$ ) dağılımları Şekil 3.13’de verilmiştir.

Ayrışma/bozunma derecelendirmesine göre yapılan gruplamalar sonucu tünel hattının Şekil 3.14’de sunulan düşey ayrışma zonları kesitleri hazırlanmıştır. Aynı zamanda her bir ayrışma zonunun her bir TBM için yüzdeler halinde dağılım grafiği de Şekil 3.15’de verilmiştir. Ek olarak Tablo 3.2’de her bir ayrışma zonu ve TBM için ilgili mesafe bilgileri tablo halinde gösterilmektedir.

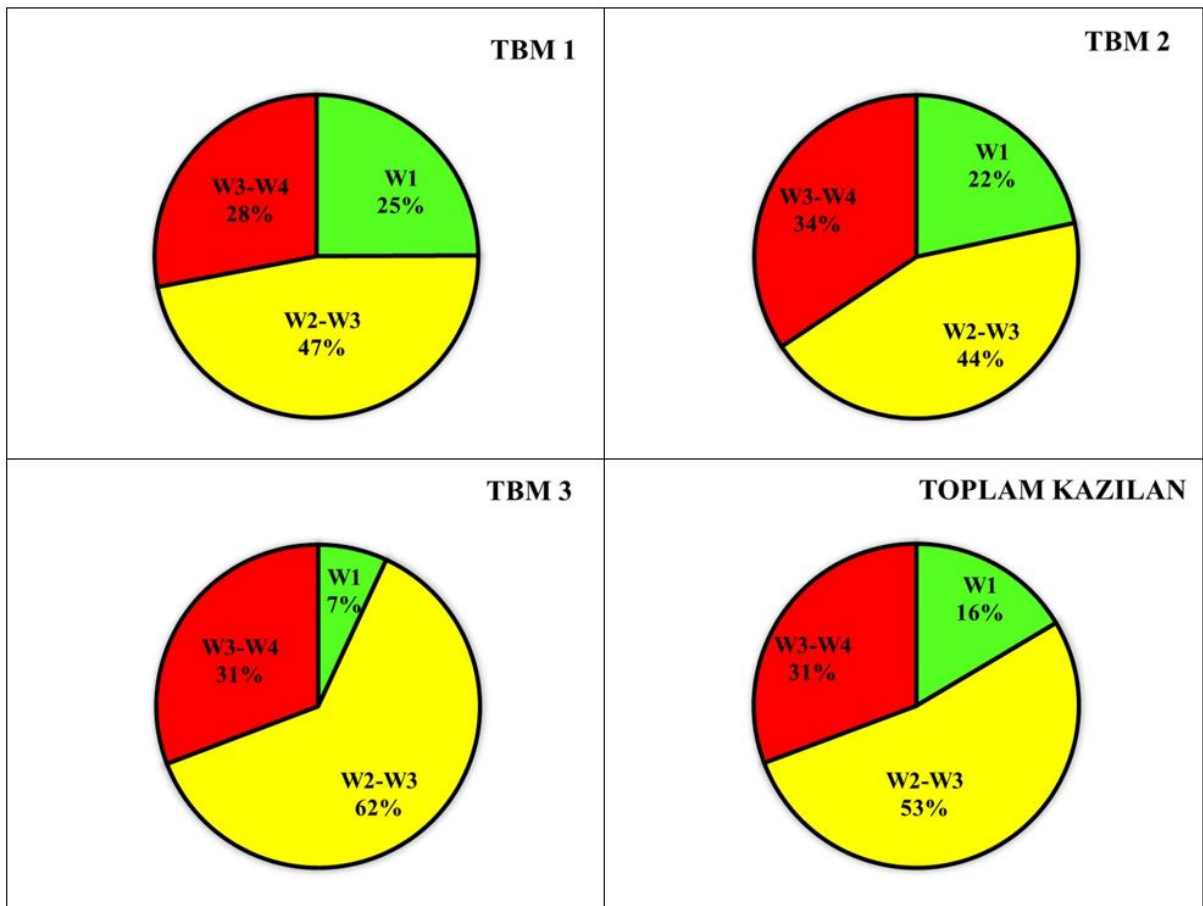
**Tablo 3. 2:** Farklı ayrışma zonları ve kazı ring mesafeleri (Ring = 1,4 metre)

<b>Ayrışma</b>	<b>TBM 1</b>	<b>TBM 2</b>	<b>TBM 3</b>	<b>Toplam Kazı</b>
W <sub>1</sub>	960	595	340	1895
W <sub>2-3</sub>	1810	1210	3060	6080
W <sub>3-4</sub>	1080	945	1513	3538



Şekil 3. 14: Tünel güzergahı ve TBM'lerin ayrışma zonları düşey kesitleri.

Şekil 3.14’de yer alan kesit incelendiğinde Yenimahalle – Mahmutbey İstasyonları arasında kalan bölgede problemlili kabul edilebilecek  $W_{3-4}$  ayrışma zonuna ait birimler Yenimahalle ve Karadeniz İstasyonları arasındaki bölgede yoğun olarak gözlenmiştir. Yenimahalle – Veysel Karani İstasyonları arasında ise  $W_{3-4}$  ayrışma zonu Kazım Karabekir İstasyonu öncesinde başlamakta ve neredeyse TBM çıkış istasyonu olan Veysel Karani İstasyonuna kadar aralıklı olarak devam etmektedir. Yenimahalle – Yüzyıl İstasyonları arasında  $W_1$  ve  $W_{2-3}$  ayrışma zonlarının ardalanmalı olarak birbirini izlediği görülmektedir.  $W_1$  ayrışma zonu özellikle Yenimahalle – Tekstilkent İstasyonları arasında daha yoğun olarak gözlenebilmektedir.



**Şekil 3. 15:** Ayrışma zonlarının her bir TBM için yüzdeler dağılım grafiği.

Tablo 3.3 ve Şekil 3.15 incelendiğinde tüm kazıların yaklaşık yarısının  $W_{2-3}$  olarak tanımlanan ayrışma zonu içerisinde yapıldığı,  $W_{3-4}$  ayrışma zonu kazılarının toplam kazılan birimlerin yaklaşık 1/3’üne tekabül ettiği ve  $W_1$  ayrışma zonunun toplam kazılardaki payının yalnızca %16 dolaylarında olduğu görülmektedir. Aynı yöne ve yan yana hatlarda kazı yapan TBM 1 ve TBM 2’nin ayrışma zonu yüzdeleri beklendiği şekilde birbirine yakın olarak

izlenmiştir. TBM 3, öte yandan çoğunlukla  $W_{2-3}$  ve  $W_{3-4}$  ayrışma zonları içerisinde kazı yapmış,  $W_1$  zonu içerisinde yaptığı kazılar toplam kazılarının yalnızca %7'sine tekabül etmiştir.

### 3.3. KULLANILAN EPB-TBM'LER VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesinin mekanize delme tünellerinin imalatı için 3 adet 6,5 m kazı çapına sahip EPB TBM kullanılmıştır. Bu EPM TBM'lerden 2 adeti daha önce başka projelerde kullanılmış ve revize edilmiş TBM'ler olup 1 adeti ise proje için özel olarak temin edilmiş yeni bir EPB TBM'dir ve daha önce başka herhangi bir projede kullanılmamıştır. Ateş ve diğ., (2017) yaptıkları çalışmada Mahmutbey – Mecidiyeköy projesinde kullanılan TBM'lerin teknik özelliklerine, yeni veya eski olma durumlarına bağlı olarak genel performanslarını değerlendirmişlerdir. Yeni TBM'lerin yüksek ilk yatırım maliyetlerinden kaçınmak için uygun kullanılmış TBM'lerin bakım ve revizyondan geçirilerek yeniden kullanılması dünyada da sıklıkla başvurulan uygulamalardandır. Ancak kullanılmış TBM'ler ile ilişkilendirilen arıza ve bakım durumları ile yedek parça teminindeki sorunlar veya genel olarak yüksek olan işletme maliyetler de göz ardı edilmemelidir. Tablo 3.3'de projede kullanılan TBM'lerin teknik özellikleri verilmiştir. Şekil 3.16'da ise projede kullanılan TBM'lerin önden görünümüleri yer almaktadır.



**Şekil 3. 16:** Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesinde kullanılan TBM'ler; TBM 1 (b), TBM 2 (a), TBM 3 (c).

TBM 1, Alman TBM üreticisi Herrenknecht yapımı bir EPB TBM olup 2005 senesinde imal edilmiş ve ilk kez Başakşehir – Otogar – Kirazlı Metro Projesinin (İstanbul, Türkiye) kazılarında kullanılmıştır. Bu projenin tamamlanmasının ardından makine parkına çekilen TBM, Mahmutbey – Mecidiyeköy projesi için revizyon ve bakımdan geçirilmiştir.

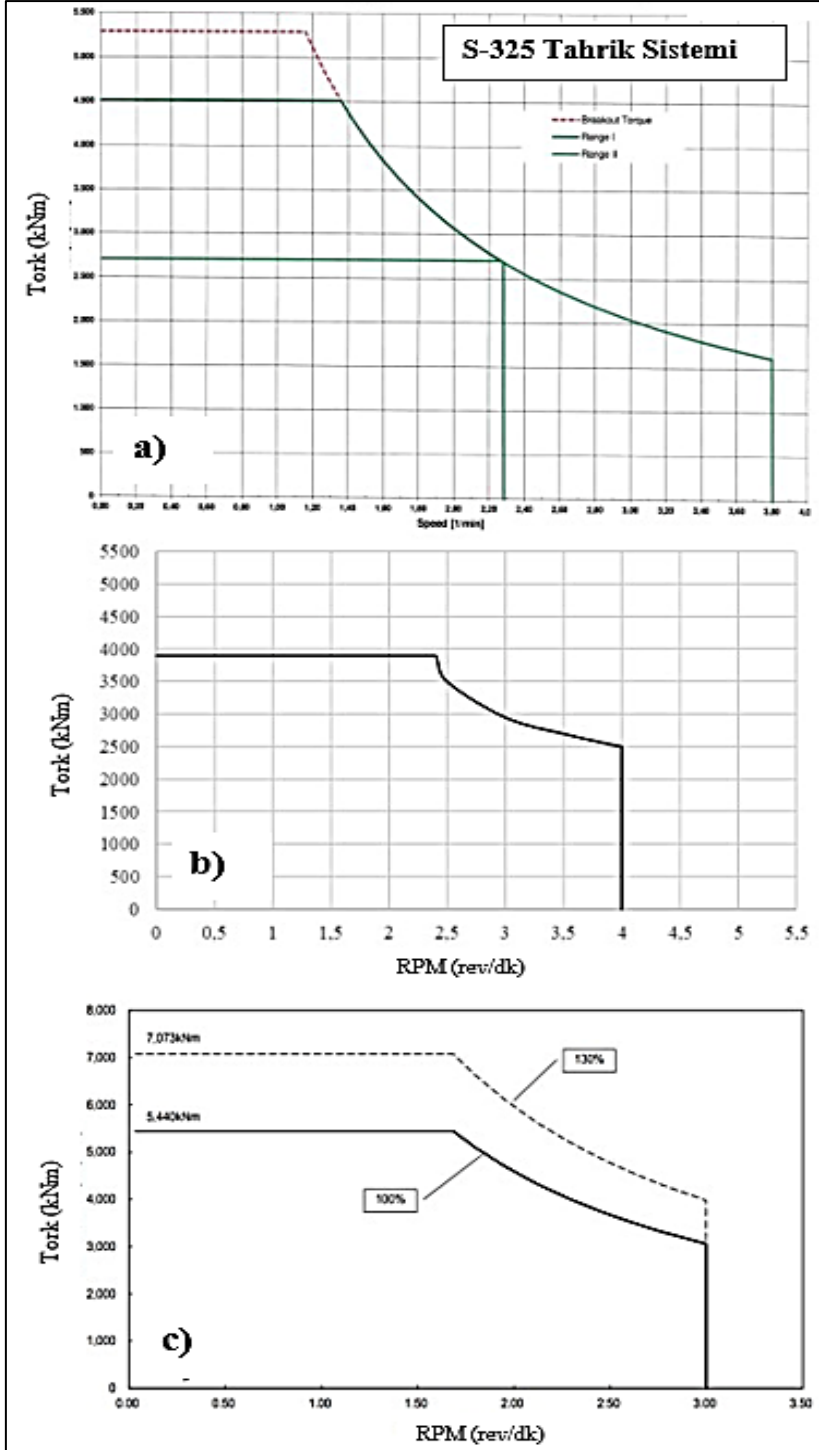


TBM 2, Kanadalı TBM üreticisi Lovat yapımı bir EPB TBM olmakla birlikte 1998 senesinde üretilmiştir ve projenin de en yaşlı TBM'idir. İlk olarak Singapur'da metro kazıları yapan TBM 2, daha sonra İtalya'da Milan metrosunun kazılarında kullanılmıştır. TBM 1'de olduğu gibi TBM 2'de Başakşehir – Otogar – Kirazlı Metro Projesinin kazılarında görev almış ve daha sonra makine parkına çekilmiştir. Yine TBM 1'de olduğu gibi Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi için bir bakım ve revizyon işleminden geçirilmiştir.

**Tablo 3. 3:** Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesinde kullanılan TBM'lerin teknik özellikleri.

<b>Teknik Özellikler</b>	<b>TBM 1</b>	<b>TBM 2</b>	<b>TBM 3</b>
Marka	Herrenknecht	Lovat	Terratec
Model	S-325	RME257SE – 1800	S-42
Üretim Yılı	2005	1998	2015
Kazı Çapı (m)	6,55	6,57	6,56
İtme Kapasitesi (kN)	32000	55000	40000
Tork Kapasitesi (kNm)	4400 @ 1,8 RPM, 2100 @ 3,8 RPM	4500	5440
Kesici Kafa Tahrik Türü	Hidrolik	Hidrolik	Elektrik VFD
Kesici Kafa Motor Sayısı	8	8	6
Kesici Kafa RPM Aralığı	0 – 1,8 1,8 – 3,8	0 – 4	0 – 3
Kesici Kafa Açıklık Oranı (%)	20	29	37

TBM 3, Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi için özel olarak Avustralya menşeli TBM üreticisi Terratec tarafından 2015 yılında Çin’de imal edilmiştir. Bu anlamda projedeki en yeni ve kullanılmamış olan tek TBM’dir.



Şekil 3. 17: TBM 1 (a), TBM 2 (b) ve TBM 3 (c) için tork grafikleri

Her 3 TBM’inde kazı çapları yaklaşık olarak aynıdır. TBM 1 ve TBM 2 hidrolik bir kesici kafa tahrik sistemine sahipken TBM 3 daha modern elektrikli (VFD) bir kesici kafa tahrik sistemine sahiptir. TBM 1 ve TBM 2’de 8 adet hidromotor yer almaktadır. TBM 3 ise 6 adet doğrudan bağlı elektrik motoruna sahiptir. TBM 3 5440 kNm’lik tork kapasitesi ve 0 – 3 RPM’lik dönüş hızı aralığıyla en yüksek tork kapasitesine sahip olan TBM’dir. TBM 2 4500 kNm ile tork kapasitesi ve 0 – 4 RPM dönüş hızı aralığına sahiptir. TBM 1 ise iki kademeli bir dişli aktarım sistemine sahiptir. Birinci kademedede sadece 0 – 1,8 RPM dönüş hızı aralığına erişebilirken bu aralıkta tork kapasitesi 4400 kNm olmaktadır. İkinci kademedede ise 1,8 – 3,8 RPM dönüş hızı aralığına ulaşabilen TBM 1’in bu aralıkta tork kapasitesi 2100 kNm’ye kadar düşmektedir. İkinci kademedeki bu düşük tork kapasitesi değerinden dolayı projede TBM 1’in 1,8 – 3,8 RPM aralığı neredeyse hiç kullanılmamıştır (Şekil 3.17).

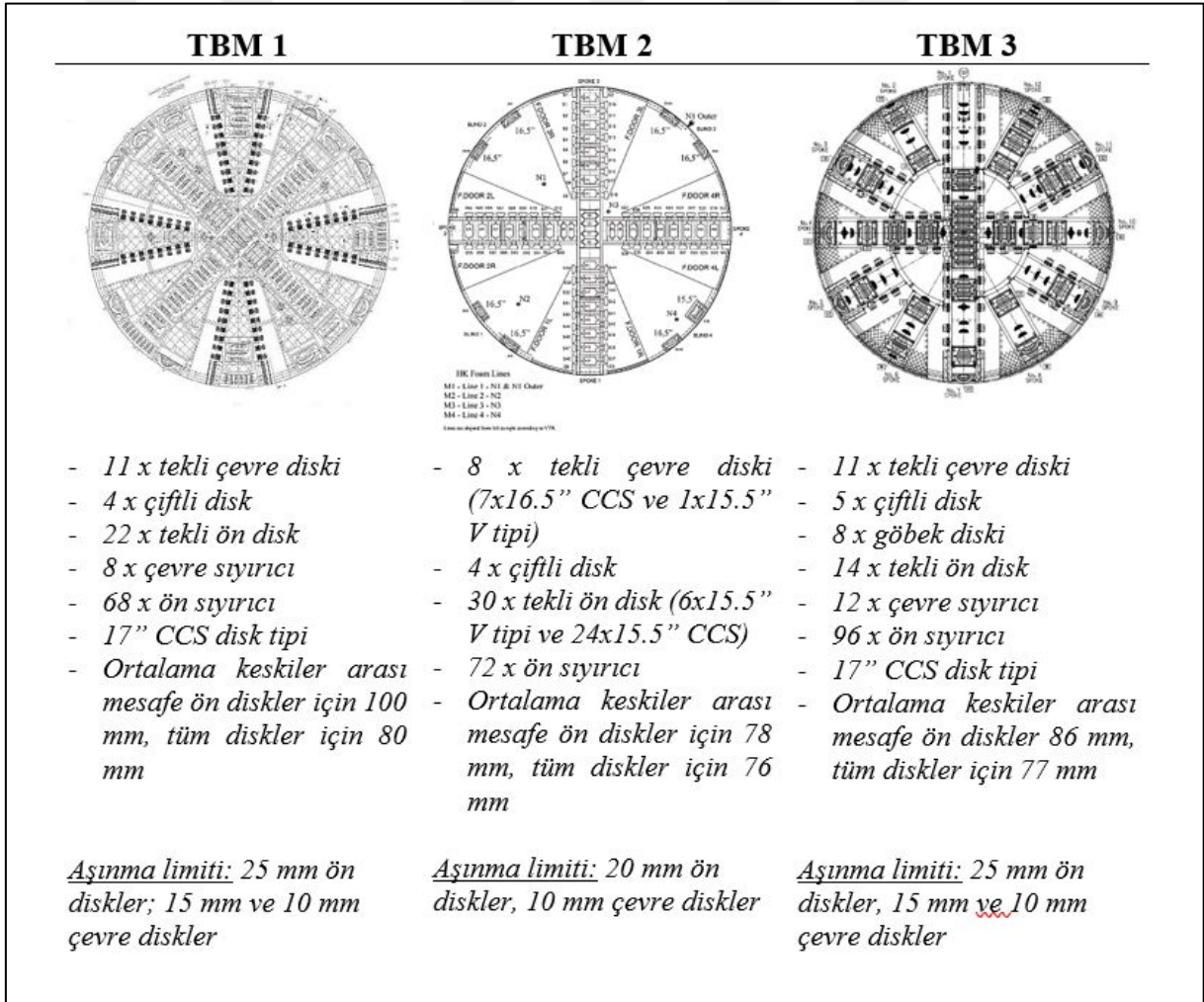
TBM 2 55000 kN ile en yüksek itme kapasitesine sahipken TBM 1 ve 3 onu sırasıyla 32000 kN ve 40000 kN’lik itme kapasiteleriyle izlemektedir. Bu anlamda TBM 1 en düşük itme kapasitesine sahip TBM’dir ancak proje sırasında TBM’lerin itme kapasiteleri ile ilgili bir problemle karşılaşılmamıştır.

EPB TBM’ler için önem arz eden bir başka özellik ise kesici kafa açıklık oranlarıdır (Bilgin, 2017). TBM 1 %20 ile en az kafa açıklık oranına sahip olan TBM’dir. TBM 2 %29’luk kafa açıklık oranı ile ikinci sırada yer alırken TBM 3 ise %37 ile en yüksek kafa açıklık oranına sahip olan TBM’dir (Şekil 3.16).

Projede yer alan EPB TBM’lerin kesici kafa ve keski özellikleri Şekil 3.18’de yer almaktadır.

Şekil 3.18 incelendiğinde TBM 1 ve TBM 2’nin spoke tipi disk yerleşim profiline sahip olduğu görülmektedir. TBM 3 ise yıldız tipi bir disk yerleşimine sahiptir. TBM 1 spoke aralarında iki parça ve görece dar kabul edilebilecek toplam 8 adet açıklığa sahiptir. TBM 2 yine spoke aralarında toplam 4 adet olmak üzere görece geniş açıklığa sahip olup, bu açıklıklar aynı zamanda Flood Door adı verilen bir kapak sistemine sahiptir. Flood door sistemi sayesinde açıklık oranları kontrol edilebilmektedir. TBM 3 ise kesici kafa dizaynı bakımından TBM 1 ve 2’den ayrılmaktadır. TBM 3 göbek kısmında oldukça geniş bir açıklığa sahiptir. Çevre kısımlarda ise spokelerin sağında ve solunda toplam 8 adet dar açıklık yer almaktadır. TBM 3’ün önceki bölümlerde bahsedildiği gibi en geniş açıklık oranı (%37) sahip olduğu unutulmamalıdır. Yapılan kazılar sırasında, özellikle kil içeren ve sarma/tıkanma

potansiyeli olan zeminlerde TBM 3'ün göbekte yer alan açıklığı sayesinde tork ihtiyacının düşük olduğu, sarma/tıkanma ile ilgili problemlerin oldukça seyrek gözlemlendiği proje personeli tarafından rapor edilmiştir. Buna ek olarak çevre kısmında yer alan görece dar açıklıklar göçük ve benzeri ayna stabilite problemleri konusunda önleyici rol üstlenmiştir. TBM 3'ün yüksek açıklık oranının kil içeren ve/veya stabilite riskleri barındıran zorlu zemin koşullarında daha düşük tork gereksinimi sağladığı, özellikle göbek kısmında sıkça rastlanılan sarma/tıkanma sorunlarını azalttığı ve pasa nakil/akışını kolaylaştırdığından ilerleme hızlarına yardımcı olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Bilgin, 2017; Binen ve diğ., 2018). Bu açıklık oranı ve kesici kafa tasarımının TBM 3 için diğer performans parametrelerine olan etkilerine ise tezin ilerleyen bölümlerinde değinilecektir.



**Şekil 3. 18:** TBM 1, 2 ve 3 için kesici kafa tasarımları ve keski özellikleri

TBM 1 ve TBM 3 disk keski olarak 17" CCS tipi disk kesikleri kullanmaktadır. TBM 2 ise orijinal tasarımında 15,5" V tipi keskilere sahiptir. Mahmutbey – Mecidiyeköy projesi için

yapılan revizyonlarda TBM 2'nin çevre disk yatakları genişletilmiş çevre diskler de 16,5" CCS tip diskler kullanılmıştır. TBM 2'nin ön disklerinde ise V tipi ve CCS tipi diskler karma olarak kullanılmıştır.

Keskiler arası mesafenin en geniş olduğu TBM, TBM 1 olup, TBM 2 ise keskiler arası mesafenin en düşük olduğu TBM'dir. Disk aşınma limitleri TBM 1 ve TBM 3 için aynı olmakla birlikte TBM 2'de bu limitler daha düşük tutulmuştur.

### 3.4. VERİ SETLERİNİN OLUŞTURULMASI

Proje kapsamında yapılacak değerlendirmeler için veri setleri her bir TBM için ayrı ayrı olarak oluşturulmuştur. Bu veri setlerinde 3 farklı kaynaktan gelen veriler kullanılmıştır. TBM'lerin data logger adı verilen ve kazılar sırasında kazı verilerini sürekli olarak kaydeden data logger (veri kayıt) sistemlerinden alınan veriler, TBM'lerin kazı ve performans verilerini oluşturmaktadır. Bu veri grubu analizler için başlıca temel alınan veri grubudur.

Kazı performans verilerinin anlamlı olabilmesi için kazı yapılan jeolojik unsurlarında da dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle önceki bölümlerde de açıklandığı gibi ön jeolojik ve jeoteknik etütler ile kazılar sırasında yapılan jeolojik gözlemler derlenmiştir. Bu derlenmiş bilgiler formasyon, litoloji ve ayrışma/bozunma derecesi açısından kendi içerisinde gruplandırılmış ve her bir TBM için güzergâh üzerinde metraja bağlı olarak organize edilmiştir. Daha sonra ise ilgili kazı için elde edilen kazı performansı veri grubuyla eşleştirilmiştir.

TBM kazı performans verileri ile ayrışma/bozunma derecesinin gruplandırması ile elde veri setinin analizlerinde görülen anormalliklerin anlamlandırılması, eratik (hatalı) değerlerin elimine edilebilmesi, görülen değişikliklerin açıklanabilmesi için her bir TBM için vardiyalık olarak tutulan ve günlük olarak sunulan vardiya ve üretim raporlarından yararlanılmıştır.

Elde edilen veri setinde toplamda (her üç TBM'in toplamı) 16 km'lik (11000 ring) veri satırı yer almaktadır.

#### 3.4.1. Kazı Performans Verileri

TBM'ler tam mekanize olup çok sayıda bileşenin otomasyon prensipleriyle çalıştığı/işletildiği ve bir veya birkaç kumanda merkezinden kontrol edildiği sofistike yapıda kazı makineleridir.

Hidrolik veya pnömatik bileşenler, mekanik bileşenler, elektrikli bileşenler gibi çok sayıda farklı prensiplere bağlı işlevi olan bileşenlerden ve bu bileşenlerin üzerinde yer alan çok sayıda sensörden oluşurlar. Bu bileşenlerin kumanda edilebilmesi, işlevlerini birbirleriyle uyum içerisinde ve emniyetli bir şekilde yerine getirebilmesi için bileşenlerin birbirleriyle ve bir kumanda merkeziyle sürekli olarak haberleşmeleri gerekmektedir.

Makine bileşenlerinin mevcut durumları ile ilgili bilgiler (hız, sıcaklık, uzunluk, basınç, voltaj, akım, v.b.) ilgili sensörden bir haberleşme merkezine (PLC) gönderilir ve bu haberleşme merkezinden (PLC) ilgili birimin bağlı olduğu kumanda merkezine iletilir. İlgili kumanda merkezinden girilen komutlar ise yine aynı haberleşme sistemi (PLC) üzerinden ilgili kumanda birimine iletilmektedir.

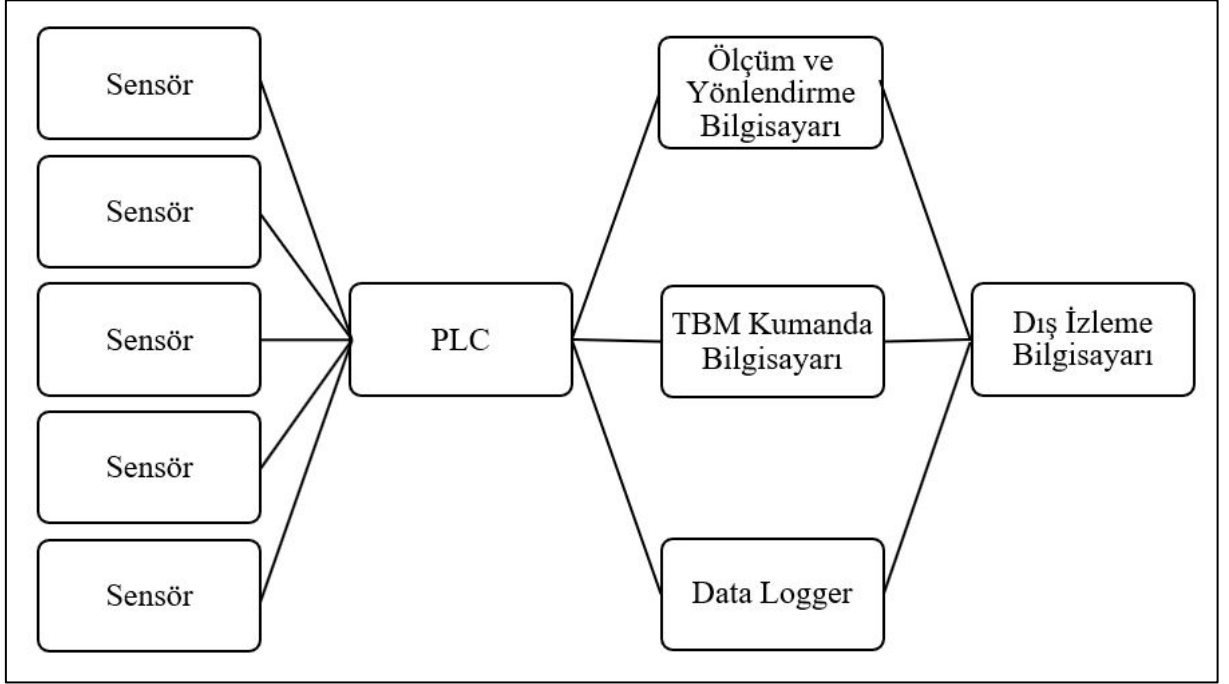
Bu haberleşme faaliyetlerinin yürütüldüğü birime PLC (Programlanabilir mantıksal denetleyici, Programmable logic controller) adı verilmektedir. PLC temel olarak otomasyon sistemlerinde kullanılan ve haberleşmeyi sağlayan bir merkezi bilgisayar ünitesidir. Genel kullanımlı bilgisayarların aksine PLC birçok girişi ve çıkışı olacak şekilde düzenlenir ve elektriksel gürültülere, sıcaklık farklarına, mekanik darbe ve titreşimlere karşı daha dayanıklı tasarlanırlar. PLC'lere denetleyeceği sistemin işleyişine uygun programlar yüklenir. PLC programları, giriş bilgilerini milisaniyeler mertebesinde hızla tarayarak buna uygun çıkış bilgilerini gerçek zamanlıya yakın, cevap verecek şekilde çalışırlar (URL-3).

PLC'ye gelen analog veya dijital veriler PLC veya kumanda bilgisayarı yazılımı üzerinde arzu edilen birime dönüştürülebilir. Örnek olarak bir basınç sensöründen gelen mV (milivolt) değeri kumanda merkezinde bar veya MPa olarak izlenmektedir.

Şekil 3.19'da TBM otomasyon ve haberleşme sisteminin basitleştirilmiş bir şematik görünümü verilmiştir.

TBM'lerde haberleşme ve kumanda işleyişine örnek olarak itme pistonlarının çalışma şekli gösterilebilir. TBM'in ilerletilmesi için gerekli olan hidrolik itme pistonları, pistonların içerisinde yer alan hidrolik yağın basınçlandırılmasıyla ileri ve geri hareket etmektedir. Bir hidrolik pompa pistonların içerisine yağ basmakla görevlidir. Pistonların giriş ve çıkışında yer alan elektronik valfler ise piston içerisine yağ akışını kontrol etmektedir. Pistonlara giden yağ hatlarında yer alan basınç sensörleri ise yağın basıncını ölçmektedir. Sensörden gelen elektriksel (analog) veri PLC üzerinden kumanda bilgisayarına gönderilir ve burada kuvvet

cinsinden (kN) olarak izlenebilmektedir. Pistonun itme kuvveti artırılmak istendiğinde kumanda bilgisayarında ilgili parametre yükseltilir. Kumanda bilgisayarından PLC'ye gönderilen bu komut PLC tarafından ilgili pistonu yağ akışını denetleyen elektronik tahliye valfine aktarılır. Böylelikle piston içerisindeki basıncın artması sağlanmış olur.



**Şekil 3. 19:** TBM otomasyon ve haberleşme sisteminin basitleştirilmiş şematik görünümü.

TBM'lerin haberleşme sistemine ek olarak Şekil 3.18'de de görülen haberleşme ve kumanda sistemine entegre bir data logger sistemi bulunmaktadır. Bu veri kayıt sistemi TBM'ler ile ilgili kazı ve performans parametreleri ile beraber diğer bileşenlerin durumlarını, arıza, hata veya uyarı bilgilerini tarihsel ve zamansal olarak kaydetmektedir. Böylelikle karşılaşılan bir sorun için geriye dönük olarak inceleme yapılması mümkün olmaktadır. Buna ek olarak makine performansıyla ilgili analizlerde geriye dönük olarak yapılabilmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar için kullanılan kazı ve performans parametreleri TBM'lerin data logger sistemlerinden alınmış veya doğrudan alınan verilerden bir formül aracılığıyla türetilmiştir. Alınan veriler her bir TBM'in 1 ilerlemesi, başka bir deyişle 1 ring (1,4 metre) kazı adımı için ortalama değerlerdir. Tablo 3.4'de analizlerde kullanılan başlıca kazı ve performans parametreleri ile bunların açıklamalarına yer verilmiştir.

Ring numarası, RPM, Tork, İtme Kuvveti, AR (İlerleme Hızı), EPB değerleri ve köpük sistemine ait FER, FIR, Toplam Köpük Tüketimi (l/dk) gibi parametreler doğrudan TBM data logger sistemlerinden alınmıştır. PR (Penetrasyon Hızı), Net İtme Kuvveti (Net Thrust), SE (Spesifik Enerji) gibi parametreler ise literatürde yer alan ve bu tezin önceki bölümlerinde verilmiş olan eşitlikler vasıtasıyla doğrudan TBM'lerden alınan verilerden türetilmiştir.

**Tablo 3. 4:** TBM kazı ve performans parametreleri

<b>Parametreler</b>	<b>Açıklama</b>
Ring No	<i>Ring veya İlerleme Numarası. Her bir kazı adımını ifade etmektedir.</i>
RPM	<i>Kesici kafa dönüş hızını ifade eder. Birimi rev/dk'dır.</i>
Tork	<i>Kesici kafa dönme kuvvetidir. Birimi kNm'dir.</i>
İtme Kuvveti (Thrust)	<i>TBM ilerletilmesi ve kazı yapması için kullanılan itme kuvveti değeridir. Birimi kN'dir.</i>
AR (İlerleme Hızı)	<i>TBM'in kazı sırasındaki anlık ilerleme hızıdır. Birimi mm/dk'dır.</i>
EPB	<i>Kazı odasındaki basıncı ifade eder. Birimi bar'dır.</i>
PR (Penetrasyon Hızı)	<i>Kesici kafanın bir tam turuna karşılık gelen ilerleme miktarıdır. Birimi mm/rev'dir.</i>
SE (Spesifik Enerji)	<i>Kazı esnasında birim hacmi kazmak için harcanan enerji miktarıdır. Birimi kWh/m<sup>3</sup>'dür.</i>
Net İtme Kuvveti (Net Thrust)	<i>EPB TBM'lerde kazı odası basıncından arındırılmış itme kuvvetini ifade eder. Birimi kN'dur.</i>

Daha önceki bölümlerde açıklandığı üzere TBM 1 ve TBM 2 eski/kullanılmış TBM'ler olup proje öncesinde bir bakım ve revizyon çalışmasından geçirilmişlerdir. Bu revizyon çalışmaları sırasında TBM'lerin zemin koşullandırma, başka bir deyişle köpük üretme sistemleri de revize edilmiştir. Ancak yapılan revizyonlar sırasında özellikle elektronik aksamda yedek parça sıkıntısı sebebiyle yeni bir sistem kurulması gerekliliği oluşmuştur. Kurulan yeni sistemin TBM 1 ve 2'nin görece daha eski olan haberleşme sistemiyle entegrasyonunda problemler gözlenmiştir. Bu sebeple TBM 2 için TBM otomasyon sisteminin bağımsız bir zemin koşullandırma sistemi kurulmuştur. Bu sistem TBM data logger sistemine entegre edilemediği için TBM 2 için zemin koşullandırma ile ilgili parametreler olan FER, FIR, Köpük Tüketimi kayıt altına alınamamıştır. TBM 1 için ise yine zemin koşullandırma ilgili



parametrelerde sık arızalara bağı olarak büyük tutarsızlıklar gözlenmiş ve bu çalışmada TBM 1'in de zemin koşullandırma parametreleri veri setinden hariç tutulmuştur. Yeni bir TBM olan TBM 3'te ise zemin koşullandırma parametreleri TBM data logger sistemi üzerinden alınmış ve verilerde TBM 1 ve 2'deki gibi bir sorun gözlenmemiştir. Bu sebeple sadece TBM 3 ile ilgili analizlerde zemin koşullandırma parametreleri veri setine dahil edilmiştir.

EPB değerleri için daha önceki bölümlerde açıklandığı üzere TBM kazı odalarında birden fazla sensör yer almaktadır. Tez kapsamında yapılan analizlerde ise genellikle ortalama EPB değeri olarak bu EPB sensörlerinden gelen değerlerin ortalaması kullanılmıştır.

### **3.4.2. Jeolojik Veriler**

Jeolojik veriler tünel güzergahında yer alan jeolojik birimlerin karakterizasyonu sonucu ayrışma/bozunma zonlarının belirlenmesi ve gruplandırılmasıyla oluşturulmuştur. Jeolojiyle ilgili tüm bilgiler proje öncesinde yapılan jeolojik ve jeoteknik etütlerden, sondaj çalışmalarından, ayna basıncı hesaplamalarından (Bilgin, 2015), kazılar sırasında alınan örneklerden, kazılar sırasından yapılan gözlem ve ayna incelemelerinden elde edilmiştir.

Jeolojik verilerin derlenmesinde uygulanan yöntem bu tezin "Çalışma Alanının Jeolojisi" bölümünde detaylı olarak işlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda belirlenen ayrışma zonları W1, W2-3 ve W3-4 her bir TBM için ring bazlı olarak düzenlenen veri grubuna dahil edilmiştir.

### **3.4.3. Vardiya ve Üretim Raporları**

Vardiya ve üretim raporları bütün TBM projeleri için en önemli bilgi kaynaklarından birisidir. Bir vardiya içerisinde üretim esnasında gerçekleştirilen bütün faaliyetler, arıza ve bakım faaliyetleri, vardiya mühendisleri veya TBM operatörleri tarafından yapılan gözlemler vardiya ve üretim raporlarında yer almaktadır. TBM'lerle ilgili geriye dönük analizler yapılırken elde edilen bulguların değerlendirilmesi ve anlamlandırılması sırasında vardiya ve üretim raporları sıkça başvurulan önemli birer aydınlatıcı kaynak olmaktadır.

Bu tez kapsamında Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi'nde TBM ile delme tünellerin yapımı sırasında hazırlanan bütün üretim ve vardiya raporları, vardiya raporlarından derlenen günlük raporlar ve aylık düzenlenen aylık imalat raporları incelenmiştir. Bunlara ek olarak

proje sırasında kesici kafa bakımı ve disk değişimleri sırasında düzenlenen disk takip raporları da yine incelemeye dahil edilmiştir.

Vardiya raporları (Şekil 3.20) 5 dakikalık hassasiyet ile vardiya içerisinde yapılan tüm TBM ilişkili faaliyetlerin kaydedildiği bir zaman çizelgesi içermektedir. Buna ek olarak kazılarla ilgili bazı parametrelerin tutulduğu bir kayıt bölümü yer almaktadır. Vardiya raporlarında TBM operatörü ve vardiya mühendisinin yaşanan arıza/bakım olayları ve duraklamalarla ilgili açıklama ve yorumlarının yer aldığı bir açıklama bölümü bulunmaktadır. Vardiya raporunun üst kısmında ise vardiya başlangıç ve bitişine ait bilgiler, vardiya mühendisi ve/veya operatör bilgileri yer almaktadır.

Kazılar sırasında elle düzenlenen vardiya raporları daha sonra dijital ortama aktarılmakta ve saklanmaktadır. TBM'lerden mekanik olarak faydalanma/yararlanma (utilization), verim v.b. gibi analizler daha sonra aylık raporlarda düzenlenmektedir. Projeye ait olan ve projenin ekonomik gelişiminin değerlendirilmesinde kullanılacak olan bu veriler, bu tezin ilerleyen bölümlerinde analiz edilip irdelenecektir.

Date: 20.03.2017 Gece		TBM operator: Yusuf TOK		Başlangıç KM: 18+811.185		Bitiş KM: 18+820.965	
Lovat S2				Kazılar:			
07:30-08:30		08:30-09:30		09:30-10:30		10:30-11:30	
19:30-20:30		20:30-21:30		21:30-22:30		22:30-23:30	
11:30-12:30		12:30-13:30		13:30-14:30		14:30-15:30	
01:30-02:30		02:30-03:30		03:30-04:30		04:30-05:30	
15:30-16:30		16:30-17:30		17:30-18:30		18:30-19:30	
05:30-06:30		06:30-07:30					
dayshift/nightshift							
conveyor belt							
concrete pump							
electrical fault							
water fault							
compressed air fault							
multicar delay							
change shift							
various							
external faults							
hydraulic							
electrical							
mechanical							
conveyor belt							
cooling system							
TACS							
various							
TBM faults							
scheduled works							
cutterhead inspection							
pail extension							
wiper extension							
scraper extension							
pipelines extension							
various							
maintenance							
hydraulic oil change							
TSG6 grease change							
EP2 grease change							
tools change							
mortar lines cleaning							
TBM/tunnel cleaning							
cleaning							
TBM							
back-up							
tunnel							
stroke							
ring installation							
Advance							
ring number		1859		1860		1861	
ring serial number		111016-11264		111016-1120		111016-11263	
grounding injection		65		70		70	
foam		4.5		4.5		4.5	
cutterhead rotation speed		2.5		2.5		2.5	
advance speed		30		35		30	
earth sensors pressure		0.5		0.5		0.5	
torque		2500		2300		2400	
thrust force		1000		1000		1000	
belt scale (100/m3)		52		50		50	
Remarks:		1- Disk kontrolü yapıldı.					
		2- Tacs lieri alındı.					
		3- Tünel bant ajan yapıldı.					
		4- Shield temizliği yapıldı.					
		5- Döndürme sahbası problemi.					
		6-					

Şekil 3.20: Örnek Vardiya Raporu

## 4. BULGULAR

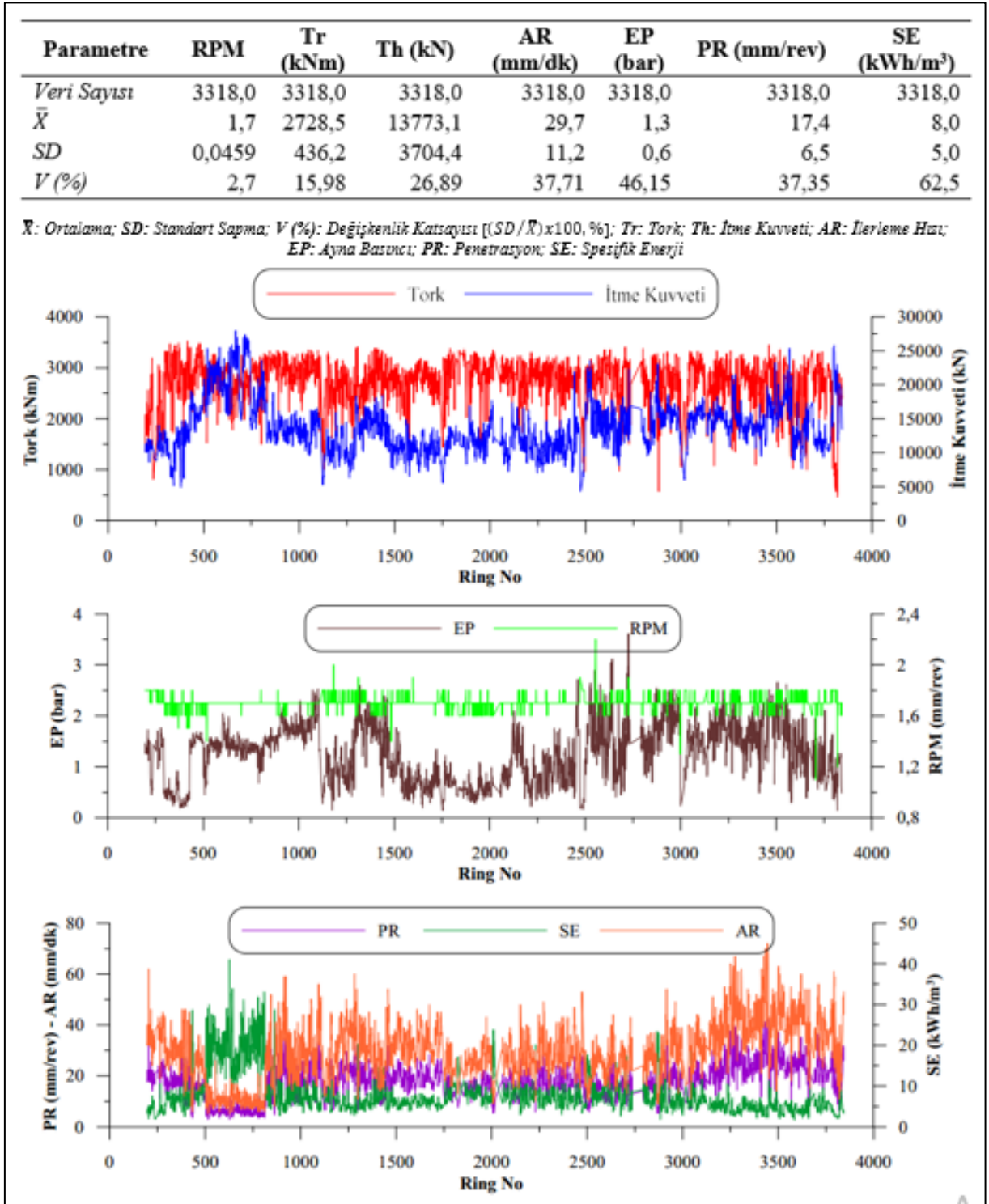
Bu bölümde tez kapsamında elde edilen veriler değerlendirilmiş, yapılan değerlendirmeler sonucu ulaşılan bulgular yine bu bölümde ilgili başlıklar altında verilmiştir.

### 4.1. EPB TBM'LERİN AYRIŞMA/BOZUNMA ZONLARINA GÖRE KAZI PERFORMANS BULGULARI

Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi'nde kazı faaliyetlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılmış aynı kazı çapına sahip fakat farklı marka ve özellikteki 3 adet EPB-TBM'den- (TBM 1, TBM 2 ve TBM 3) elde edilen başlıca kazı performans verileri [RPM (rev./dak.), Tork (Tr, kN.m), İtme Kuvveti (Th, kN), İlerleme Hızı (AR, mm/dak), Ayna Basıncı (EP, bar), Penetrasyon (PR mm/rev.), ve Spesifik Enerji (SE, kWh/m<sup>3</sup>)], her bir TBM ve güzergâha bağlı olarak ilerlemeler (ring) bazında istatistiksel olarak analiz edilerek, kazı performans büyüklüklerinin ayrışma zonuna göre sayısal mertebeye değişimleri Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7'de sırasıyla incelenmiş ve elde edilen bulgulara aşağıda sırasıyla yer verilmiştir.

TBM 1 için RPM değerinin tüm hat kazıları boyunca ortalama 1,7 değerini aldığı görülmektedir. Daha önceki bölümlerde de açıklandığı gibi TBM 1 iki kademeli bir tahrik sistemine sahiptir. İlk kademede 0-1,8 RPM çalışma aralığına sahiptir. İkinci kademeye geçildiğinde RPM değeri yükseltilebilirken TBM'in tork kapasitesinde ciddi bir düşüş meydana gelmektedir. Bu sebeple proje boyunca ikinci tahrik kademesi neredeyse hiç kullanılmamıştır ve kazılar ilk tahrik kademesinde genellikle 1,8 RPM civarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1).

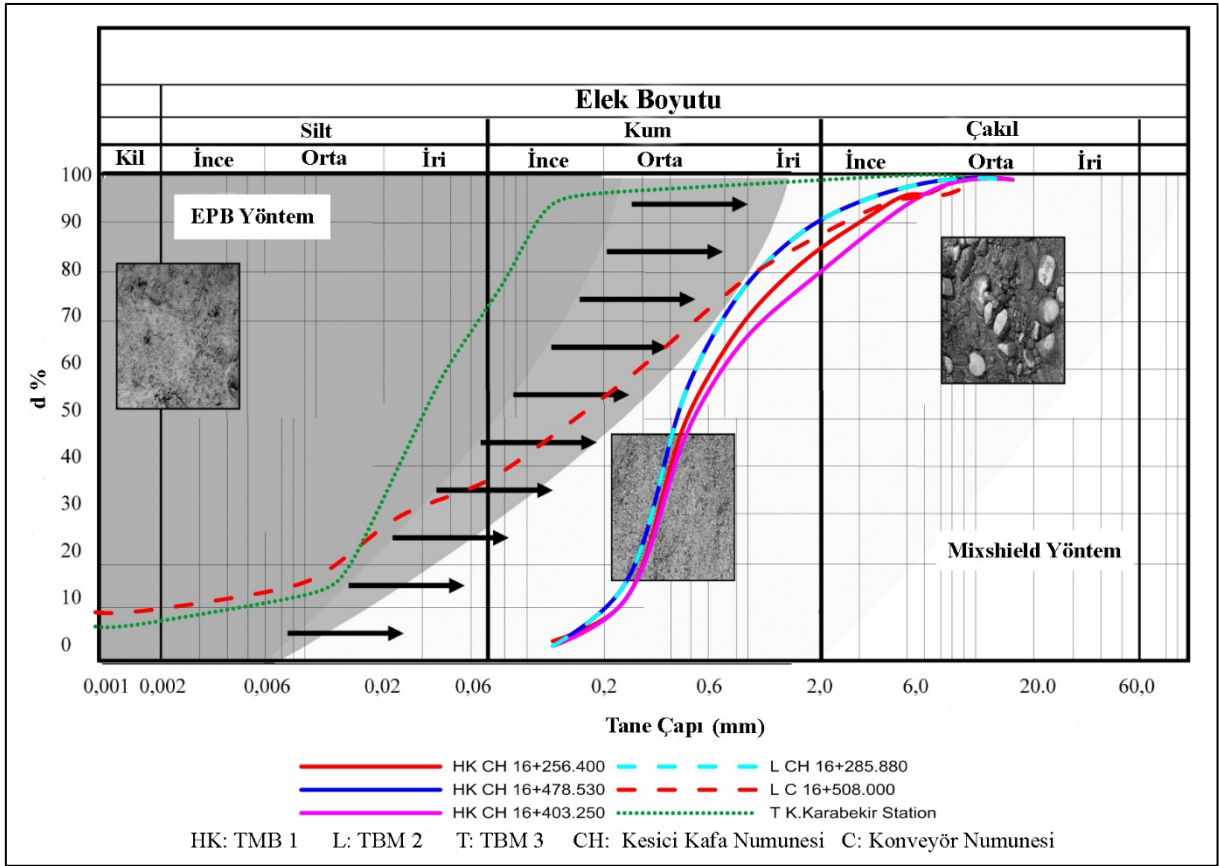
TBM 1 için ayna basıncı değeri ortalama EP=1,3 bar olarak gerçekleşmiştir. Bu sebeple Kazı güzergâhının kompleks jeolojisi ve litolojisinden kaynaklanan farklılıklar, ayrışma/bozunma mertebeleriyle daha da belirginleşerek artmakta ve bu durum değişkenlik katsayısına doğrudan yansımaktadır (V%=46.1).



Şekil 4. 1: TBM 1 için başlıca kazı performans parametrelerinin ringlere bağlı dağılımı ve temel istatistik verileri.

TBM 1 ile yapılan kazılarda ortalama tork değeri 2728,5 kNm olarak gerçekleşmiştir. Bu değer TBM 1'in nominal tork kapasitesi olan 4400 kNm değerinin yalnızca %62'sine denk gelmektedir. TBM 1'in itme kuvveti değerlerinin ortalaması 13773,1 kN'dir. İtme

kuvvetlerinde özellikle Yenimahalle – Karadeniz istasyonları arasında rastlanılan suya doymun kumlu bölgede (Ring 390 – Ring 850) ciddi bir artış gözlenmiştir. Bu bölgede 20000 kN değerlerinin üzerine sıkça çıkmıştır. Yine aynı bölgede spesifik enerjide de hat ortalaması olan  $8 \text{ kWh/m}^3$  değerinin çok üzerinde,  $30 \text{ kWh/m}^3$ 'ü aşan değerler görülmüştür. Verilerdeki bu görünüm TBM 1'in kazı performansındaki ciddi bir düşüşe, başka bir deyişle TBM 1'in oldukça zorlandığına işaret etmektedir. Benzer bir durum TBM 2 içinde aynı bölgede gözlenmiştir.



**Şekil 4. 2:** TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 kumlu bölgelerde yapılmış elek analizleri ve EPB Yöntem Diyagramı (Bappler, 2006)

Bu zorlanmanın sebebi aslında EPB TBM'lerin bu tür iri taneli ve suya doymun zeminleri kazmaya çok elverişli olmamasıdır. Bappler (2006) tarafından hazırlanmış olan EPB ve Slurry yöntemler diyagramı üzerine bu bölgede TBM'lerden alınmış numunelerin elek analizleri sonucu elde edilen tane boyut dağılımları yerleştirilmiştir (Şekil 4.2). Şekil 4.2 incelendiğinde bu bölgede yer alan suya doymun kumlu zeminlerin EPB TBM'le kazılmaya uygun olmadığı görülmektedir. Ateş ve diğ., (2016) yaptıkları çalışmada da bu duruma işaret etmişlerdir. Ancak proje güzergahlarında yer alan bu tür kısa mesafeli uyumsuz bölgeler için yeni bir

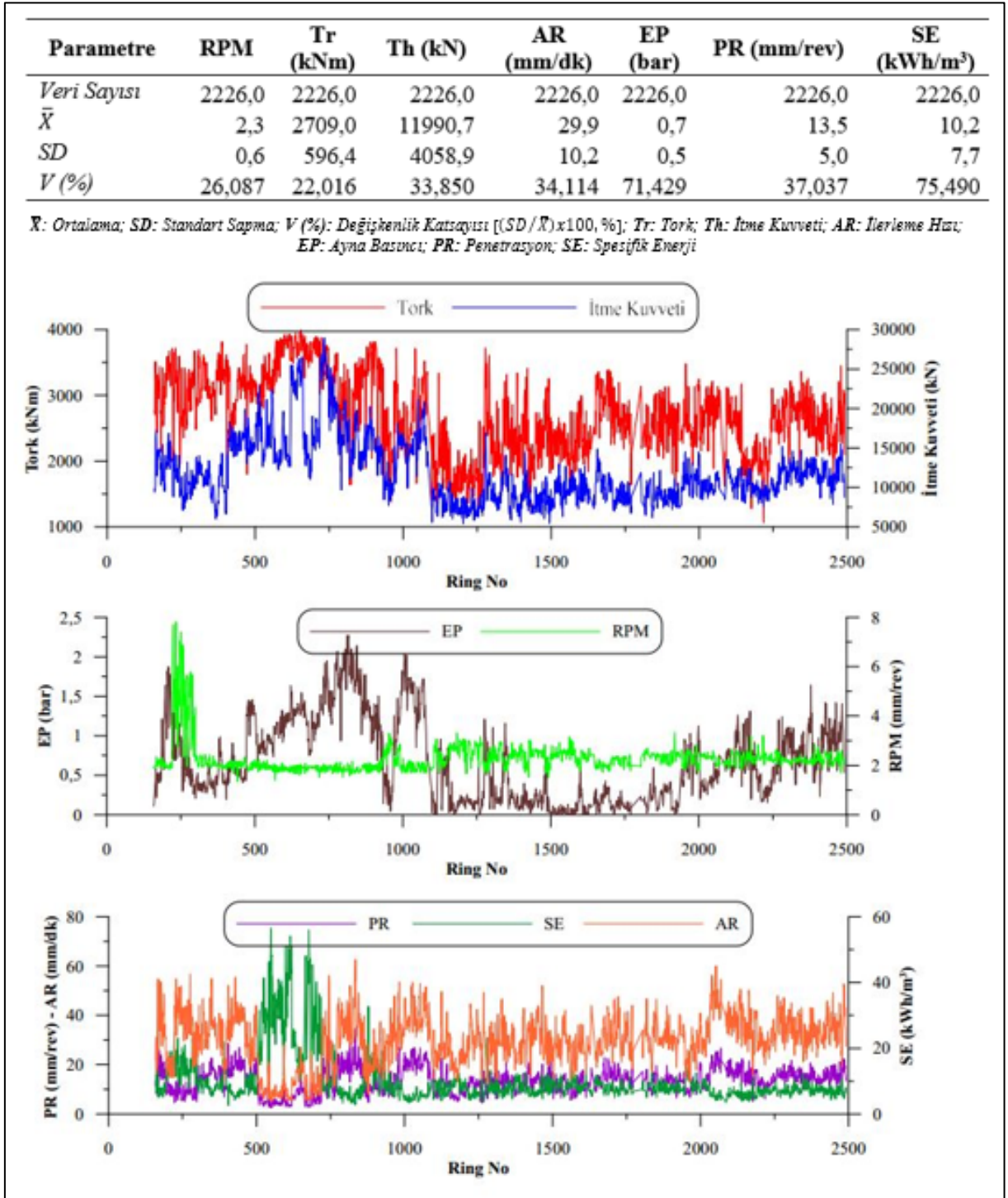
TBM yatırımı ekonomik olmamaktadır. Çeşitli önlemler ile (su tutucu polimer kullanımı, yüzeyden enjeksiyon ile zemin iyileştirme, jet grout, vb) bu gibi bölgelerin kazıları EPB TBM'ler ile gerçekleştirilebilmektedir. Ancak önlemler alınmış dahi olsa EPB TBM'lerin kazı performanslarında TBM'lerin bu tür bölgelerin kazılarında zorlandıklarına işaret eden performans kayıpları gözlenmektedir.

TBM 1'in kazılarında ortalama spesifik enerji SE, penetrasyon PR ve ilerleme hızı AR sırasıyla 8 kWh/m<sup>3</sup>, 17,4 mm/rev ve 29,7 mm/dk olarak saptanmıştır. SE, PR ve AR değerleri için yukarıda da bahsedilen 390. ve 850. Ringler arasında yer alan suya doymuş kumlu bölgenin kazılarında önemli artış ve düşüşler gözlenmiştir. Anomali olarak kabul edilebilecek bu değişimin haricinde gözlenen dalgalanmalar jeolojik etmenlere bağlı olarak kabul edilmiştir ve ilerleyen bölümlerde detaylı olarak incelenecektir.

Şekil 4.3'de TBM 2 için başlıca kazı performans parametrelerinin kazı güzergahı boyunca ringlere bağlı olarak değişimi ve temel istatistikleri verilmiştir. TBM 2 ile TBM 1 yan yana hatlarda kazı yapmışlardır. Bu sebeple TBM 1 ve TBM 2'nin performansları incelenirken bu benzerlik dikkate alınmalıdır.

TBM 2 için güzergâhı boyunca ortalama tork ve itme kuvveti değerleri sırasıyla 2709 kNm ve 11990,7 kN olarak tespit edilmiştir. Ortalama SE, PR ve AR değerleri ise sırasıyla 10,2 kWh/m<sup>3</sup>, 13,5 mm/rev ve 29,9 mm/dk'dır.

TBM 1'de olduğu gibi TBM 2'de Yenimahalle – Karadeniz İstasyonları arasında suya doymuş kumlu bölgeden (R400 – R785 arası) geçmiştir. TBM 1'de olduğu gibi TBM 2'de de bu bölge kazıları sırasında ciddi performans düşüşleri ve TBM'in zorlandığına dair işaretler görülmektedir. Güzergâh boyunca gözlenen en yüksek tork ve itme kuvveti değerleri bu bölgede görülmüştür. 50 kWh/m<sup>3</sup> düzeylerinde spesifik enerji değerleri gözlenmiştir ve bu değer ortalama SE değeri olan 10,2'nin yaklaşık 5 katıdır. PR ve AR değerlerinde ise benzer şekilde ciddi düşüşler gözlenmiştir.

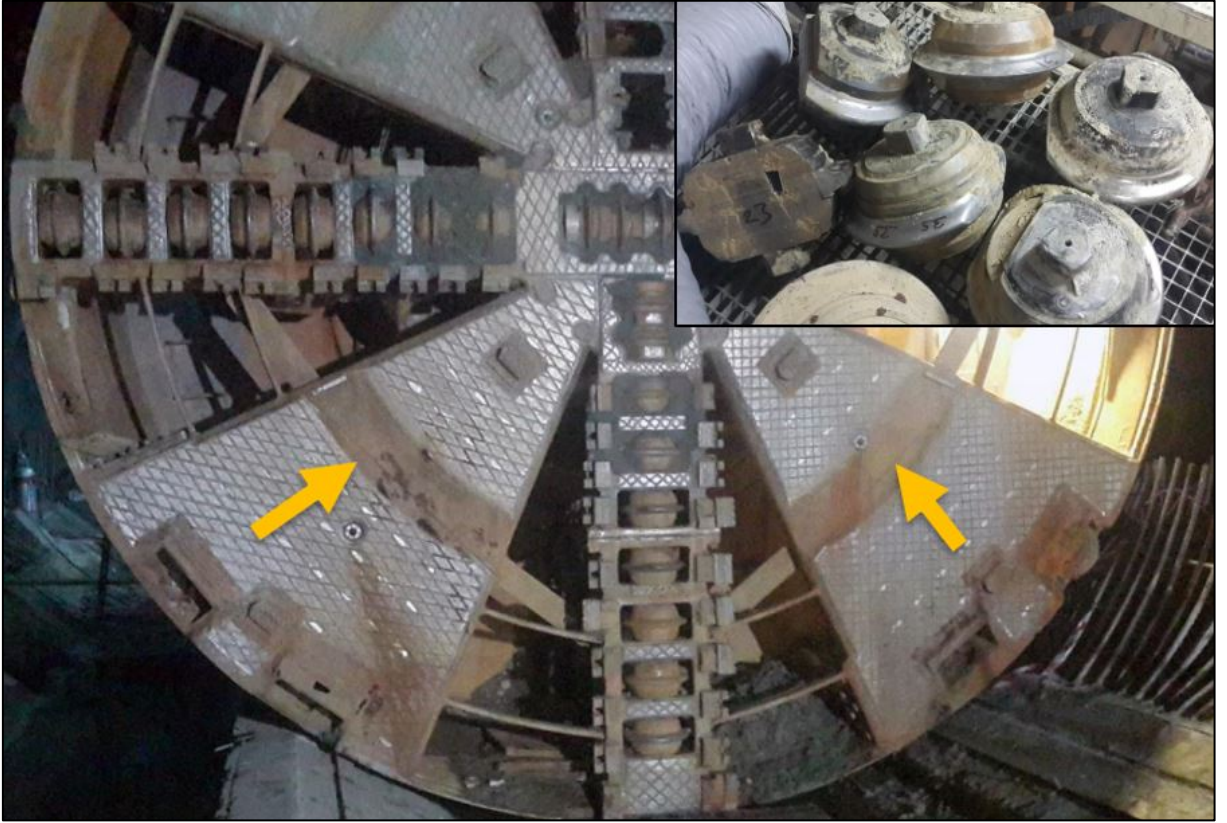


Şekil 4. 3: TBM 2 için başlıca kazı performans parametrelerinin ringlere bağlı dağılımı ve temel istatistik verileri.

TBM 1 için yapılan açıklamalar TBM 2 için de geçerlidir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi suya doymun bu kumlu bölge EPB TBM’ler için uygun değildir. Ancak TBM 1’den farklı olarak TBM 2’nin performans değerlerinde, özellikle de tork ve itme kuvveti değerlerinde R1085’e kadar tam olarak bir normalleşme gözlenememiştir. Bunun sebebi ise TBM 2’nin kumlu



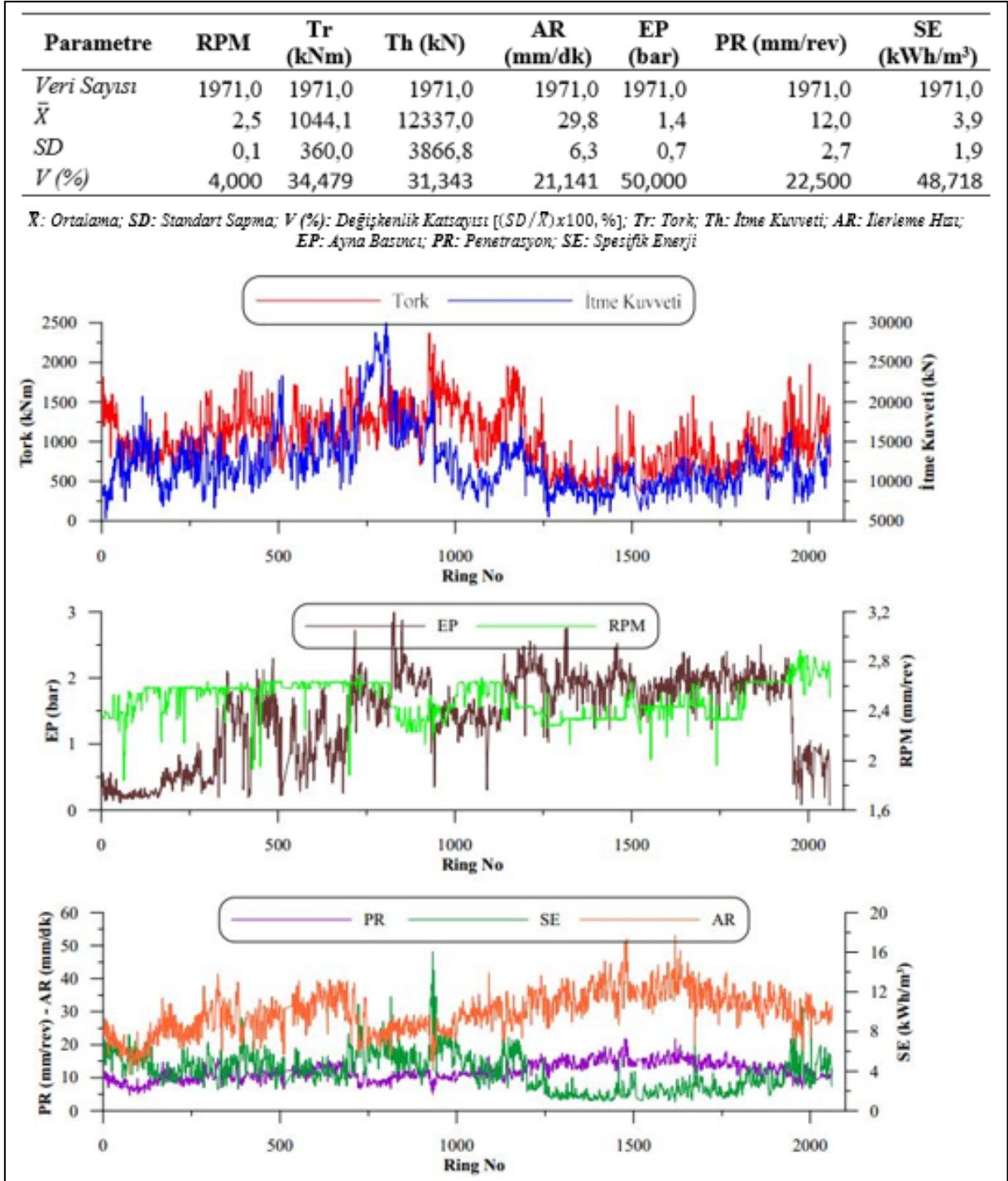
bölgenin kazılarında TBM'in zorlanması ve performansını kaybetmesi sebebiyle yüksek ayna basıncı altında çok uzun süreli kazılar gerçekleştirmesi sonucu kumun aşındırıcılığı dolayısıyla kesici kafada ve özellikle disk yataklarında ciddi hasarların meydana gelmesidir (Şekil 4.4). Bu hasarlara Karadeniz İstasyonu'na kadar müdahale edilememiş ve açık istasyon olan Tekstilkent İstasyonu'nda çok büyük bir operasyon yapılarak kesici kafa komple değiştirilmiştir.



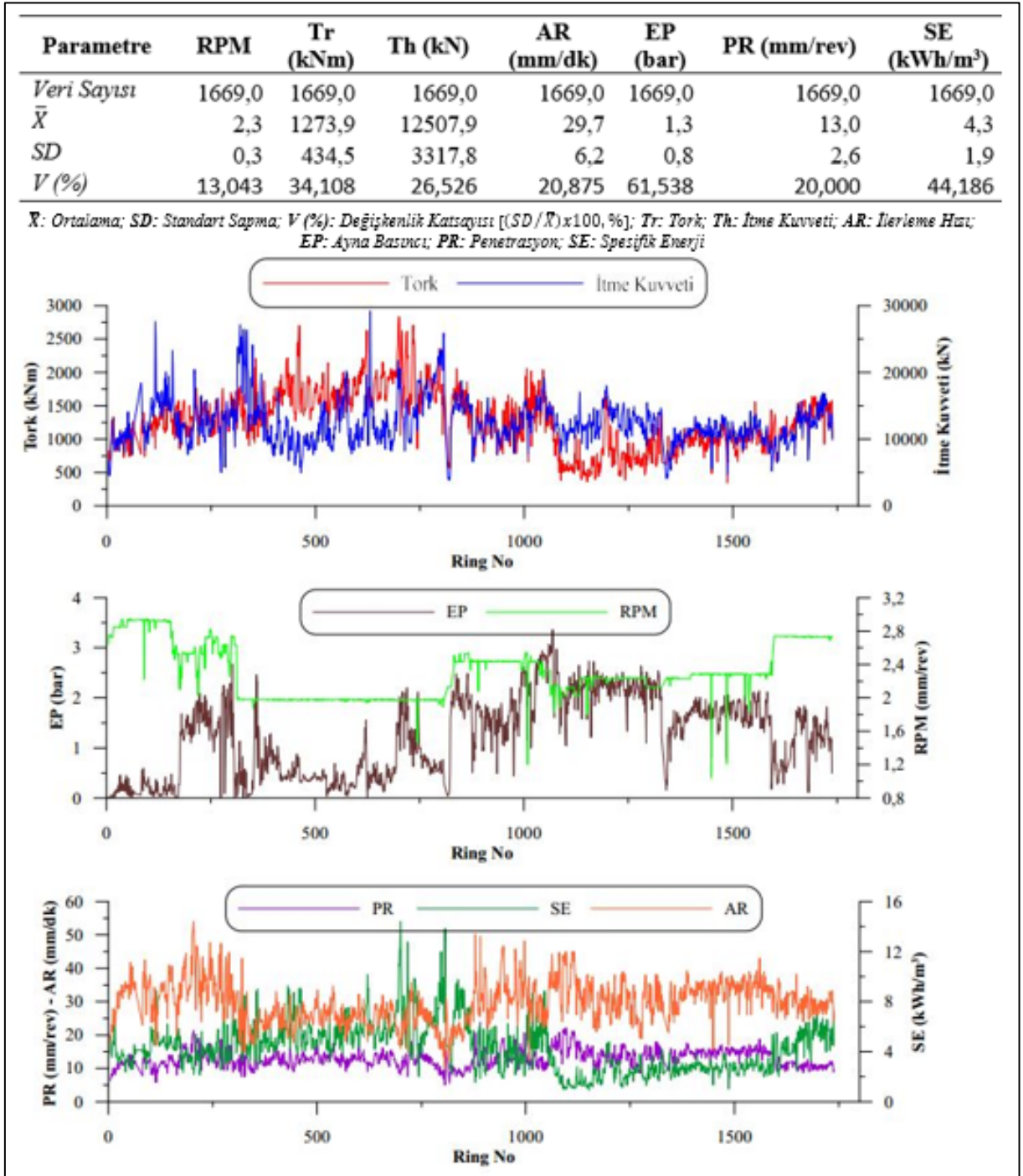
**Şekil 4. 4:** TBM 2 kesicifi kafada, disk yataklarında ve disk keskilerde meydana gelen aşınmalar (Ateş ve diğ., 2016).

Not edilmesi gereken bir başka konu da TBM 1 ve TBM 2'nin açıklık oranlarıyla ilgilidir. Önceki bölümlerde açıklandığı gibi TBM 1 %20, TBM 2 ise %29 kafa açıklık oranına sahiptir. Suya doymuş kumlu zeminler gibi EPB TBM'lerle kazılması uygun olmayan zemin koşullarında kafa açıklık oranının artması ayna stabilitesi açısından da riskler doğurmaktadır. Ayna stabilitesi sebebiyle gelişen problemler daha önce farklı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir (Ateş ve diğ., 2016; Ateş ve diğ., 2017). Stabilitenin korunması için alınan ek önlemler TBM 2'nin performansında TBM 1'e göre bir miktar daha fazla düşüşe sebep olmuş, başka bir deyişle TBM 2 bu bölgenin kazılarında TBM 1'e göre daha fazla

zorlanmıştır. TBM 2'nin aynı zamanda görece daha yaşlı ve daha çok kullanılmış bir TBM olduğu da dikkate alınmalıdır.



Şekil 4. 5: TBM 3 Hat 1 için başlıca kazı performans parametrelerinin ringlere bağlı dağılımı ve temel istatistik verileri



**Şekil 4. 6:** TBM 3 Hat 2 için başlıca kazı performans parametrelerinin ringlere bağlı dağılımı ve temel istatistik verileri

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da TBM 3 için başlıca kazı performans parametrelerinin kazı güzergahları boyunca ringlere bağlı olarak değişimi ve temel istatistikleri verilmiştir. TBM 3 daha önceki bölümlerde açıklandığı üzere diğer iki TBM'e göre ters yönde hem Hat 1 hem de Hat 2'yi kazmıştır. Bu sebeple TBM 3 performans verileri Hat 1 ve Hat 2 olarak bu perspektif üzerinden değerlendirilmiştir.

TBM 3 için Hat 1 ve Hat 2’de ortalama tork değeri sırasıyla 1044 ve 1273,9 kNm olarak belirlenmişken ortalama RPM ise Hat 1 ve Hat 2’de sırasıyla 2,5 ve 2,3 olarak tespit edilmiştir. Ortalama itme kuvveti değerleri Hat 1 ve Hat 2 için 12337 ve 12507,9 kN olarak gözlenmiştir. Ortalama ayna basıncı EP değerleri Hat 1’de 1,4 bar ve Hat 2’de ise 1,3 bar olmuştur. Penetrasyon değeri PR Hat 1 için 12 mm/rev olurken Hat 2 için ise 13 mm/rev olmuştur. Öte yandan ilerleme hızını belirten AR değeri Hat 1 için ortalama 29,8 mm/dk, Hat 2 için ise 29,7 mm/dk olarak belirlenmiştir. Spesifik enerji SE değeri Hat 1’de ortalama 3,8 kWh/m<sup>3</sup> olurken Hat 2’de 4,3 kWh/m<sup>3</sup> olarak gözlenmiştir.

Beklenildiği üzere aynı TBM ve yan yana yer alan hatlarda birbirine çok yakın performans değerleri elde edilmiştir. TBM 3’ün performans değerlerine genel olarak bakıldığında performans kaybına işaret eden ve TBM’in hat boyunca en çok zorlandığı bölge Hat 1 için R720 – R920 arasında, Hat 2 için ise R700 – R810 arasında yer alan suya doymun ve kum – silt gibi görece iri tane boyutuna sahip zemin özellikli bölgedir.

K. Karabekir İstasyonu girişinden alınan numune üzerinde yapılan tane boyut dağılımı Şekil 2’de yeşil kesikli çizgi ile EPB yöntemler diyagramı üzerinde gösterilmiştir. TBM 1 ve TBM 2’nin karşılaştığı kumlu bölgeden farklı olarak TBM 3’ün kazmış olduğu bu bölge EPB yöntemler dahilinde kalsa da yine de sınıra yakın bir noktada yer almaktadır. Bu durum TBM 3’ün performans verilerine ortalamadan sapma olarak yansımış olsa da TBM 1 ve TBM 2’de olduğu gibi aşırı etkiler yaratmamıştır.

Tablo 4.1’de ve Şekil 4.7’de her 3 TBM’in (TBM 1, TBM 2 ve TBM 3) kazı performans verilerinin temel istatistik büyüklükleri verilmiştir. TBM 1 için 3318 adet, TBM 2 için 2226 adet, TBM 3 Hat 1 için 1971 adet ve TBM 3 Hat 2 için 1669 adet olmak üzere, toplamda 9184 adet veri analiz edilmiştir. TBM 3’ün daha sonra kazmış olduğu Mahmutbey – Göztepe İstasyonları arasında kalan bölüm ise bu istatistiksel değerlendirmelere dahil edilmemiştir.

Her üç TBM, gerçekleşen kesici kafa dönüş hızına (RPM, rev/dak.) göre değerlendirildiğinde; TBM 1 (1,7 rev./min), TBM 2 (2,3 rev./min) ve TBM 3 (2,5 rev./min.) mertebeleriyle kazı işlemini gerçekleştirmiştir. TBM 1 de gerçekleşen en düşük kafa hızı (1,7 rev./min), diğer iki TBM’e göre kademeli tahrik sistemindeki fark ile açıklanabilmektedir

TBM 1 ve TBM 2 için ortalama tork değerleri 2700 kNm, en yüksek tork değerleri ise sırasıyla 3520 ve 3992 kNm olarak gerçekleşmiştir. Gerek ortalama tork değerleri gerekse

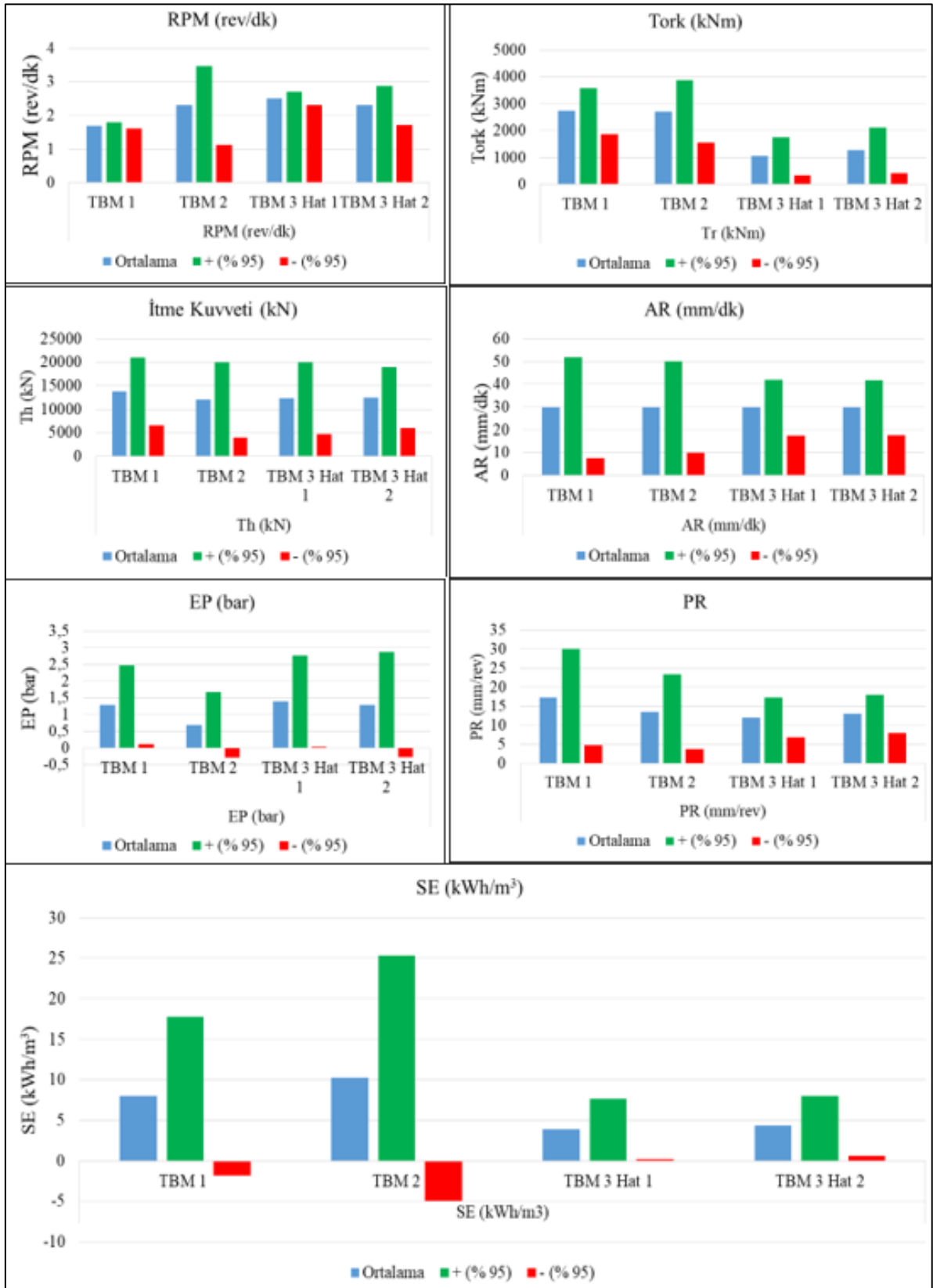
maksimum tork değerleri TBM 1 ve TBM 2'nin nominal tork kapasitelerinin altında gerçekleşmiştir. TBM 3 için ise ortalama tork değeri 1000 – 1300 kNm arasındadır ve 3000 kNm arasında belirlenmiş ve gözlenen en yüksek tork değeri Hat 2'de 2832 kNm olmuştur. TBM 3'ün 5440 kNm olan nominal tork kapasitesi dikkate alındığında tork kapasitesinin en uç durumda bile ancak yarısı kullanılmıştır.

**Tablo 4. 1:** Kazı performans büyüklüklerinin TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için istatistiksel analizi

Parametre	RPM (rev/dk)				Tr (kNm)				Th (kN)				AR (mm/dk)				EP (bar)				PR (mm/rev)				SE (kWh/m <sup>3</sup> )			
	TBM 1	TBM 2	TBM 3 Hat 1	TBM 3 Hat 2	TBM 1	TBM 2	TBM 3 Hat 1	TBM 3 Hat 2	TBM 1	TBM 2	TBM 3 Hat 1	TBM 3 Hat 2	TBM 1	TBM 2	TBM 3 Hat 1	TBM 3 Hat 2	TBM 1	TBM 2	TBM 3 Hat 1	TBM 3 Hat 2	TBM 1	TBM 2	TBM 3 Hat 1	TBM 3 Hat 2	TBM 1	TBM 2	TBM 3 Hat 1	TBM 3 Hat 2
Ortalama Veri Sayısı	3318	2226	1971	1669	3318	2226	1971	1669	3318	2226	1971	1669	3318	2226	1971	1669	3318	2226	1971	1669	3318	2226	1971	1669	3318	2226	1971	1669
Ortalama	1,7	2,3	2,5	2,3	2728,5	2709	1044,1	1273,9	13773,1	11990,7	12337	12507,9	29,7	29,9	29,8	29,7	1,3	0,7	1,4	1,3	17,4	13,5	12	13	8	10,2	3,9	4,3
SD	0,04	0,6	0,1	0,3	436,2	596,4	360,0	434,5	3704,4	4058,9	3866,8	3317,8	11,2	10,2	6,3	6,2	0,6	0,5	0,7	0,8	6,5	5,0	2,7	2,6	5,0	7,7	1,9	1,9
V (%)	2,70	26,0	4	13,0	15,98	22,01	34,47	34,1	26,89	33,85	31,34	26,52	37,71	34,11	21,14	20,87	46,15	71,42	50,0	61,53	37,3	37,0	22,5	20	62,5	75,4	48,7	44,186
+ (%95)	1,8	3,5	2,7	2,9	3583,5	3877,9	1749,7	2125,5	21033,7	19946,1	19915,9	19010,8	51,7	49,9	42,1	41,9	2,5	1,7	2,8	2,9	30,1	23,3	17,3	18,1	17,8	25,3	7,6	8,0
- (%95)	1,6	1,1	2,3	1,7	1873,5	1540,1	338,5	422,3	6512,5	4053,3	4758,1	6005,0	7,7	9,9	17,5	17,5	0,1	-0,3	0,0	-0,3	4,7	3,7	6,7	7,9	-4,8	-4,9	0,2	0,6

TBM 3'ün diğer TBM'lerden tork anlamında daha düşük değerlerde izlenmesinin başlıca sebebi olarak TBM 3'ün %37'lik kafa açıklık oranı gösterilebilir. Bu açıklık oranı hem kesici kafanın ağırlığını ciddi oranda düşürmekte hem de yumuşak zeminlerin kazısında tork artışına sebep olan sürtünmenin azaltılmasında, malzeme akışının daha kolay gerçekleşmesinde, killi zeminlerde ortaya çıkabilen kesici kafa göbek bölümündeki sarma ve tıkanmaların ortadan kaldırılmasında yardımcı olmaktadır. TBM 3'ün aynı zamanda diğer TBM'lerden farklı olarak elektrikli (VFD) ana tahrik sistemine sahip olduğu unutulmamalıdır.

İtme kuvvetleri karşılaştırıldığında her 3 TBM'de benzer ortalama değerlere sahiptir. Ortalama itme kuvveti değerleri 12000 – 13000 kN olarak saptanmış, görülen en yüksek itme değerleri de her 3 TBM için yine benzer şekilde 28000 – 29000 kN olarak gözlenmiştir.



Şekil 4. 7: Her 3 TBM'in temel kazı performans parametrelerinin ortalama ve ortalamanın %95 güvenlik katsayısı için alt ve üst sınır değerleri

Her 3 TBM için ortalama AR değeri 29 mm/dk'dır. En yüksek ilerleme hızı 72 mm/dk ile TBM 1'e aittir. TBM 2'nin maksimum ilerleme hızı 62 mm/dk olmuştur. TBM 3 ise TBM 1 ve TBM 2'ye göre AR değerleri açısından daha tutarlıdır. TBM 3 için en düşük AR değeri 10 mm/dk iken en yüksek AR değeri ise 54 mm/dk'dır.

Ayna basıncı değerlerine bakıldığında TBM 1 ve TBM 3 sırasıyla ortalama 1,3 bar ve 1,4 bar ayna basıncı değerlerine sahiptir. TBM 1 ve TBM 3 için maksimum ayna basıncı değerleri yine sırasıyla 3,6 ve 3,4 bar olarak izlenmiştir. TBM 2 ise ortalama 0,7 bar ile diğer TBM'lerden yaklaşık 0,5 bar daha düşük ayna basınçları ile kazı yapmıştır. TBM 2'nin maksimum ayna basıncı da yine diğer TBM'lerden daha düşük bir değer olan 2,3 bar'dır.

TBM 1, TBM 2 ve TBM 3'ün penetrasyon PR değerleri ortalamaları sırasıyla 17,4 mm/rev, 13,5 mm/rev ve 12 – 13 mm/rev'dir. PR açısından TBM 1 diğerlerinden daha yüksek bir değer almıştır. Bunun başlıca sebebi ise TBM 1'in iki kademeli tahrik sisteminden dolayı 1,8 RPM kesici kafa dönüş hızıyla sınırlanmış olmasıdır. TBM 1 daha düşük RPM'lerde diğer TBM'lerle aynı ilerleme hızlarını (AR) yakalamış ve dolayısıyla birim kesici kafa dönüşü başına daha fazla ilerleme göstermiştir.

Spesifik enerji SE değerlerine bakıldığında TBM 1 ve TBM 2 için ortalama 8 ve 10 kWh/m<sup>3</sup> değerleri göze çarpmaktadır. TBM 3 ise 3,9 ve 4,3 kWh/m<sup>3</sup> ortalama SE değerleri ile diğer TBM'lere göre çok farklı bir profil vermiştir. TBM 3'ün elektrikli (VFD) tahrik sistemi ve yüksek açıklık oranı düşük SE değerlerinin arkasında yer alan önemli aktörler olmuştur.

Ancak güzergahların farklılığı, TBM'lerin yaşları, tahrik sistemlerinin farklı özellikleri, TBM 2'de gözlenen bazı ağır hasar ve arızalar gibi durumlarda SE değerlerine etki etmektedir.

Projede yer alan TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 farklı marka ve özellikte TBM'lerdir. TBM 1 ve TBM 2 yan yana olan hatları kazmış olsa da TBM 3 farklı yönde Hat 1 ve Hat 2'yi kazmıştır. Bu açıdan yola çıkıldığında TBM 1, TBM 2 ve TBM 3'ün performans verilerini genel haliyle doğrudan birbirleri ile kıyaslamak yanıltıcı olabilmektedir. Bu sebeple performans değerlerinin ve farklılıklarının daha iyi anlaşılabilmesi ve bu tezin ana unsurlarından olan ayrışma zonlarının etkisinin belirlenebilmesi için ilerleyen bölümlerde daha detaylı analizler gerçekleştirilecektir.

#### 4.2. SPESİFİK ENERJİ (SE) VE PENETRASYON (PR) İLİŞKİSİ

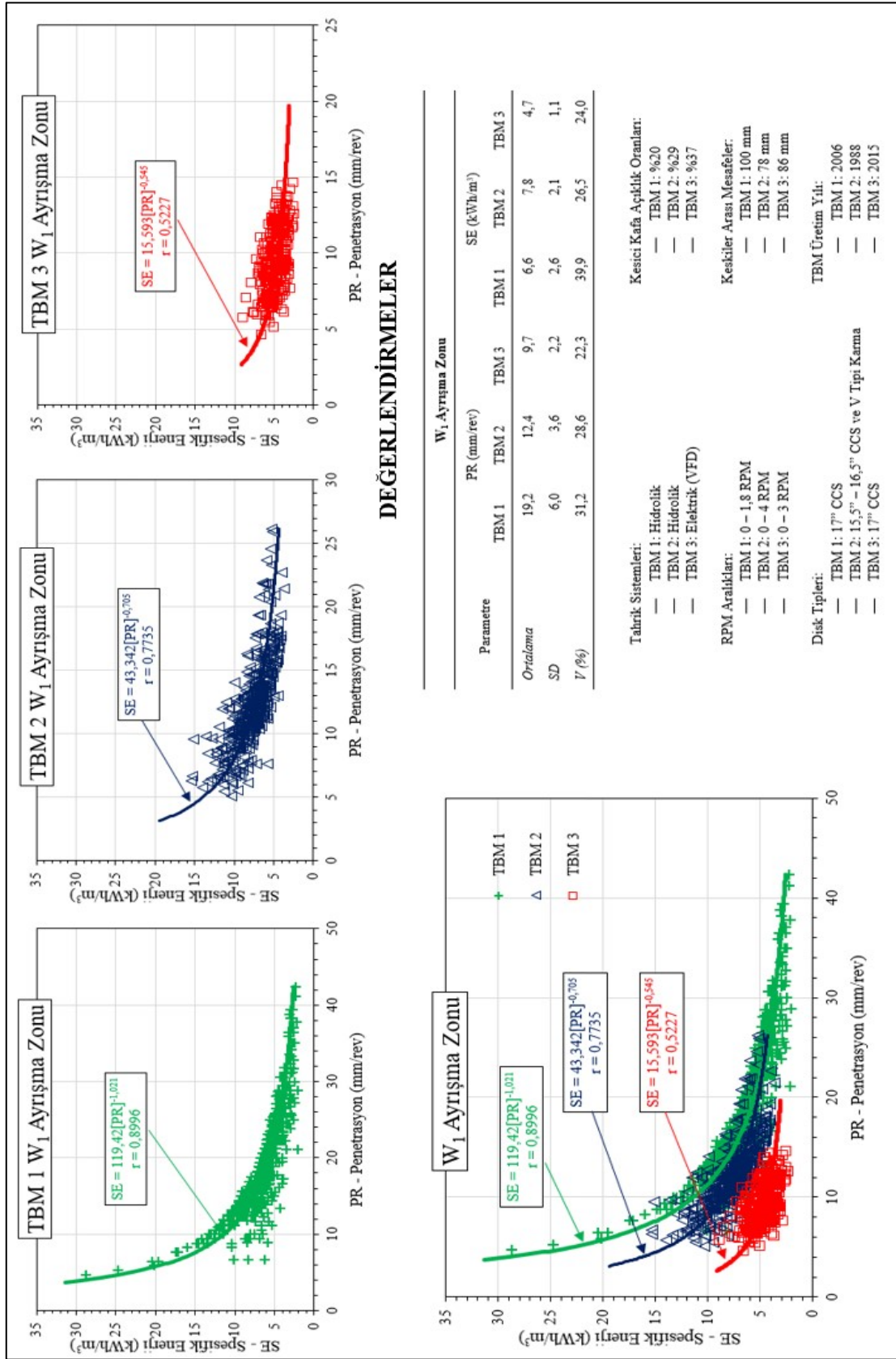
TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için  $W_1$  ayrışma zonu olarak sınıflandırılmış birimlerin kazılarında PR ve SE ilişkisini gösterir grafikler Şekil 4.8’de verilmiştir.

$W_1$  ayrışma zonu daha önceki kısımlarda anlatıldığı gibi sağlam, orta ve sert dayanıma sahip, bütünlüğünü koruyabilen, stabil, intakt kaya özelliği gösteren ayrışmamış veya çok az ayrışmış birimlerden oluşmaktadır. Şekilden görüldüğü üzere TBM’lerin kazılarını gerçekleştirmiş olduğu PR değeri ile SE arasında bir ilişki bulunmaktadır. Aynı zamanda her bir TBM’in aynı ayrışma zonunda ( $W_1$ ), başka bir deyişle benzer özellikteki birimlerin kazılarında farklı PR – SE trendlerine sahip olduğu görülebilmektedir. TBM 1 bu zonda en yüksek PR – SE trendine sahipken, TBM 2 ve TBM 3 sırasıyla onu takip etmektedir.

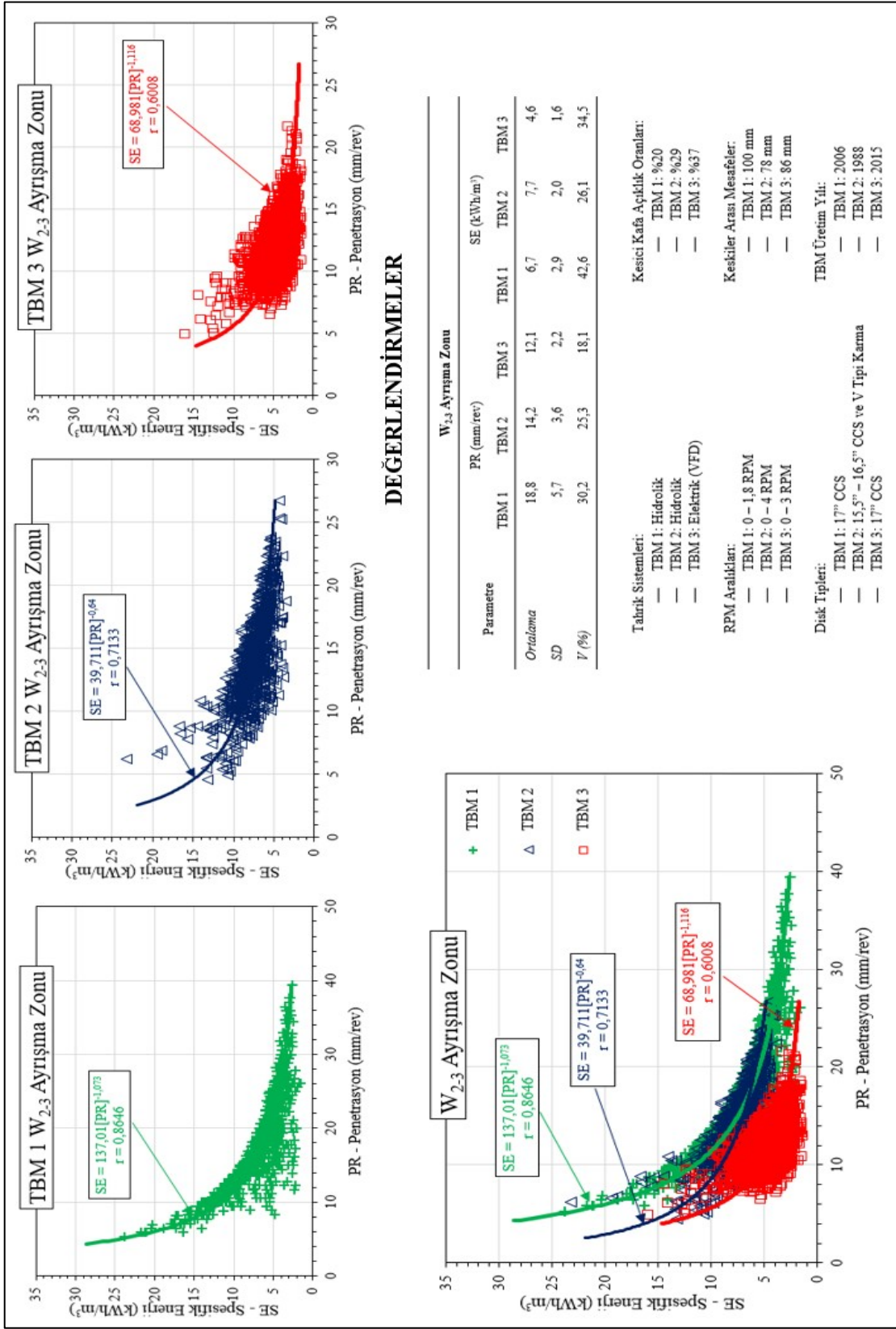
PR – SE ilişkisini etkileyebilecek etmenler kesici kafa tahrik sisteminin türü, kesici kafa dönüş hızı (RPM) aralıkları, kafa açıklık oranları, kesici kafada yer alan disk keskiler arası mesafeler ve kullanılan disk keski tipleri olarak sıralanabilir. TBM’lerde görülen farklılıklar bu perspektiften değerlendirildiğinde TBM 1’in 1,8 RPM’le sınırlı olan hidrolik tahrik sistemi ve TBM 2 ve TBM 3’e göre daha geniş bir keskiler arası mesafeye sahip olması sert/kaya zemin ortamı kazılarında gözlenen görece yüksek SE değerlerini açıklamaktadır. TBM 2 ve TBM 3’ün RPM aralıkları hemen hemen benzer olup, TBM 2 hidrolik bir tahrik sistemine sahipken TBM 3’de yeni bir elektrikli (VFD) tahrik sistemi bulunmaktadır. Ek olarak TBM 2, TBM 3’e göre daha dar bir keskiler arası mesafeye sahiptir. Nitekim TBM 2’nin önceki bölümlerde anlatıldığı üzere kesici kafa konusunda yaşamış olduğu aşınma problemi görece sert zemin/kayalardan oluşan  $W_1$  birimlerin kazılarında iki TBM arasındaki farklılığın başlıca sebebi olarak gösterilebilir.

Şekil 4.9’da her 3 TBM için ayrı ayrı ve toplu olarak  $W_{2-3}$  ayrışma/bozunma zonuna ait birimlerin kazılarında gözlenen SE ve PR parametrelerinin ilişkisini gösterir grafikler yer almaktadır.  $W_{2-3}$  ayrışma zonu içerisinde  $W_1$  ayrışma zonundakine benzer bir SE – PR ilişkisi her 3 TBM içinde görülebilmektedir. Ancak artan ayrışma derecesine bağlı olarak kazı ortamının dayanımının ve stabilitesinin azalması, bir başka deyişle kazılabilirliğin kolaylaşması sebebiyle  $W_{2-3}$  zonunda gözlenen SE – PR trendleri  $W_1$  zonundaki gözlemlere göre birbirine daha yakındır.





Şekil 4. 8: W<sub>1</sub> ayrışma zonu genelinde her üç EPB TBM'in SE – PR büyüklüklerinin regresyon analiz ve değerlendirilmesi.



**Şekil 4. 9:** W<sub>2.3</sub> ayrışma zonu genelinde her üç EPB TBM'in SE - PR büyüklüklerinin regresyon analiz ve değerlendirilmesi.

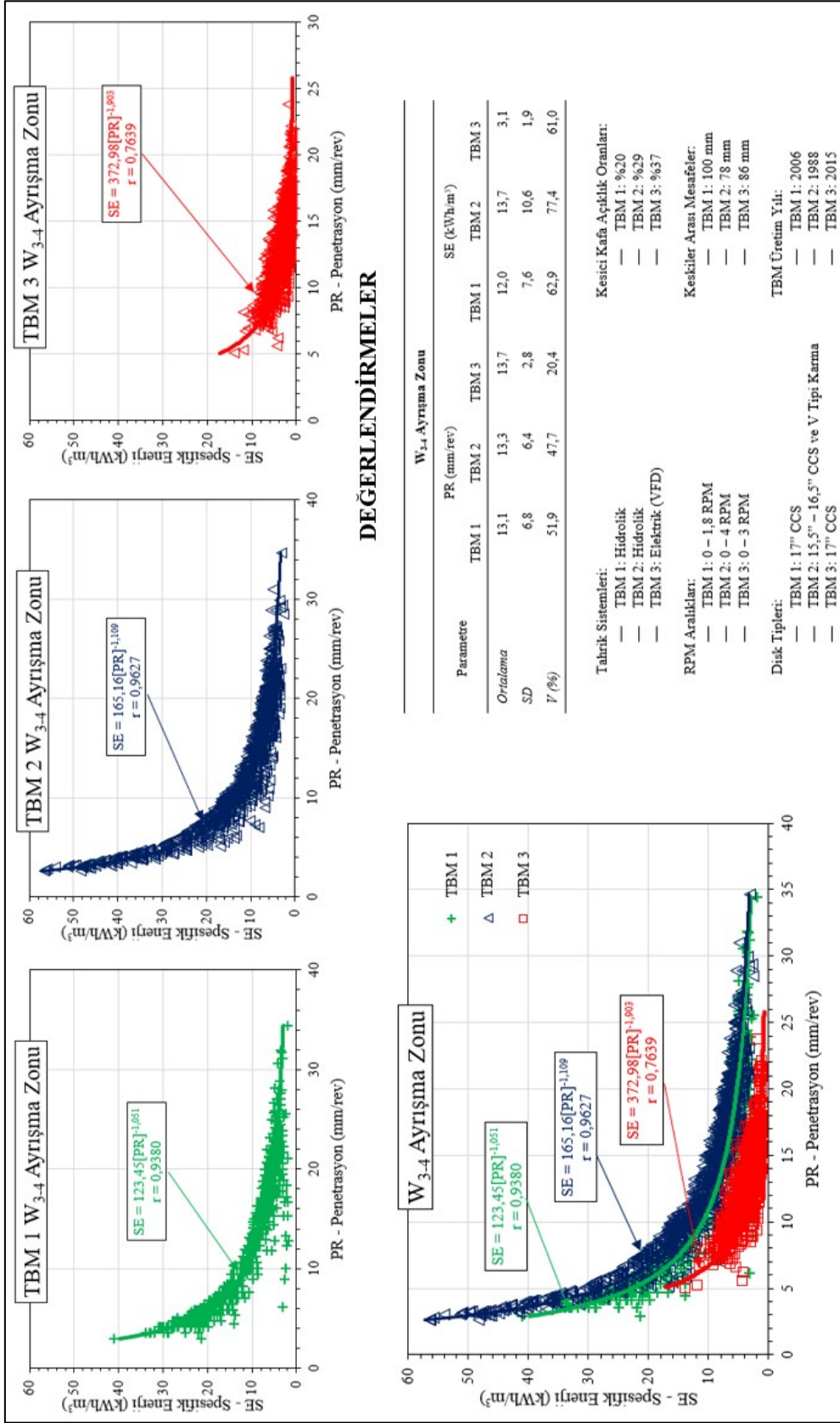
Özellikle 10 mm/rev ile 25 mm/rev arasında TBM 1 ve TBM 2'nin dağılımlarında üst üste binmeler gözlenmektedir. Bu anlamda TBM 3 diğer iki TBM'den ayrılmaktadır. TBM 3 için SE – PR dağılımı tıpkı  $W_1$  ayrışma zonunda olduğu gibi daha düşük bir seviyede kalmıştır. TBM 3'ün diğer TBM'lerden daha yeni olması, yüksek kesici kafa açıklık oranı, elektrikli tahrik sistemi gibi unsurlar bu farkın sebebi olarak gösterilebilir.

RPM aralığı, keski tipleri ve keski arası mesafe de SE – PR ilişkisini etkileyen önemli büyüklüklerdendir, ancak bu etkinin kazı materyalinin ayrışma/bozunmaya bağlı olarak kayaç özelliğini yitirmeye başlamasıyla azalan kesme dayanımı ve kolaylaşan kazılabilirliğinin etkisiyle  $W_{2-3}$  ayrışma zonunda  $W_1$  ayrışma zonuna göre daha az belirgin olması beklenmektedir. Nitekim TBM 3'e göre ortak noktaları daha fazla olan TBM 1 ve TBM 2'nin trendlerinin  $W_{2-3}$  zonunda  $W_1$  ayrışma zonuna göre daha fazla benzerlik gösteriyor olması bu yaklaşımı doğrulamaktadır (Bkz. Şekil 4.9).

Şekil 4.10'da  $W_{3-4}$  ayrışma zonu genelinde TBM'lerin SE – PR ilişkisini gösterir grafiklere yer verilmiştir.

İleri derecede bozunmuş/ayrışmış, stabil olmayan, çok düşük dayanımlı kaya ve zemin birimlerden oluşan ( $c < 80$  kPa,  $\Phi$  ( $^\circ$ )  $< 30^\circ$ )  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 arasında SE – PR ilişkisi açısından  $W_1$  ve  $W_{2-3}$  ayrışma zonlarında gözlenen trendlerde farklılıklar göze çarpmaktadır. Kazılabilirlik anlamında sağlam kaya ortamı ile zayıf/bozunmuş kaya ve zemin ortamlarının davranışının farklı olduğu göz önüne alındığında SE – PR açısından gözlenen farklılıklar beklenen şekilde gerçekleşmiştir.

TBM 1 için dezavantaj olarak kabul edilebilecek düşük RPM aralığı (0 – 1,8 RPM), yüksek keski arası mesafe (100 mm)  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda etkinliğini yitirmiştir. TBM 1 ve TBM 2 arasındaki trend farklılığının kaybolmasında ve hatta TBM 2'nin daha fazla zorlandığına dair değerler görülmesi de yukarıda bahsedilen gerekçeler ile açıklanabilmektedir. Öte yandan TBM 3'ün yüksek açıklık oranının (%37)  $W_{3-4}$  zonuna ait birimler içerisinde yapılan kazılarda büyük avantaj sağladığı ve diğer TBM'lere göre TBM 3'ün pozitif ayrışmasına neden olduğu da görülebilmektedir.



Şekil 4.10: W<sub>3,4</sub> ayrışma zonu genelinde her üç EPB TBM'in SE-PR büyüklüklerinin regresyon analiz ve değerlendirilmesi.

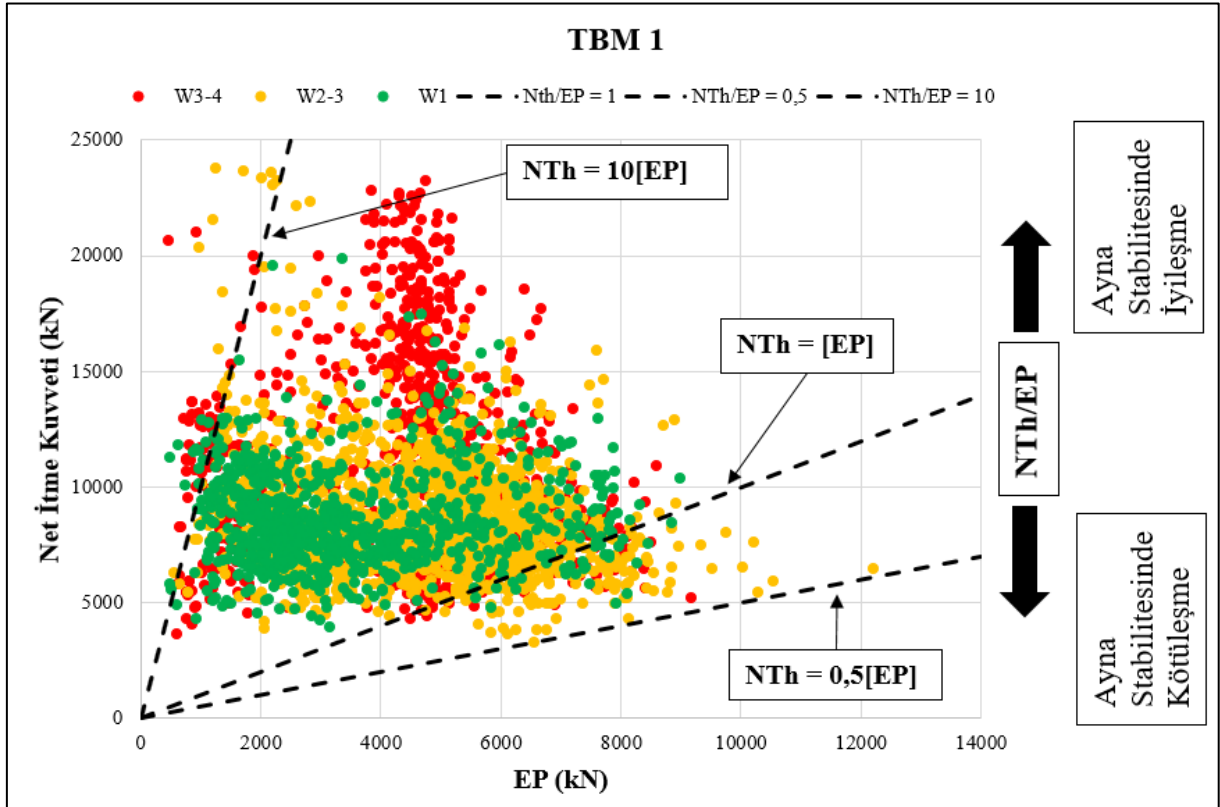
$W_{3-4}$  grubu içerisinde EPB TBM'lerle kazılması uygun olmayan suya doymuş kumlu – siltli birimlerin olduğu da unutulmamalıdır. TBM 1 ve TBM 2 yan yana hatlarda ve TBM 3'den farklı yönde kazı yapmışlardır. Her 3 TBM'de aynı formasyona ait (Çekmece F. Güngören Üyesi) suya doymuş kumlu birimlerde kazmış olsalar da önceki bölümlerde verilmiş olan tane boyut dağılımı analizleri incelendiğinde TBM 3'ün kazmış olduğu kumlu birimlerle TBM 1 ve TBM 2'nin kazmış olduğu kumlu birimlerin karakterlerinin farklı olduğu görülebilmektedir. TBM 3'ün geçmiş olduğu kumlu-siltli bölgeler EPB TBM yöntemlerinin sınırına yakın olsa da uluslararası literatüre göre (Bappler, 2006) yine de EPB TBM kullanımı açısından uygun kabul edilen bölgededir. TBM 1 ve TBM 2 ise EPB TBM'lerin ek önlemlere ihtiyaç duyduğu daha zorlu zemin koşullarıyla karşılaşmıştır. TBM 1 ve TBM 2'de SE – PR açısından  $W_{3-4}$  zonunda gözlenen aşırı değerler ( $SE > 25 \text{ kWh/m}^3$ ) de bunu doğrular niteliktedir. Bu tip değerler TBM 3'de gözlenmemiştir.

Yapılan analizler sonucunda tüm ayrışma zonlarında en düşük SE değeri ortalamalarına ( $W_1$  için  $4,7 \text{ kWh/m}^3$ ,  $W_{2-3}$  için  $4,6 \text{ kWh/m}^3$  ve  $W_{3-4}$  için  $3,1 \text{ kWh/m}^3$ ) TBM 3'ün sahip olduğu görülmüştür. Özellikle TBM 3'ün  $W_{3-4}$  ayrışma zonundaki performansı dikkat çekicidir. TBM 1 ve TBM 2  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda  $W_1$  ve  $W_{2-3}$  ayrışma zonlarında olduğundan daha yüksek SE değerlerine ulaşmışlardır. Oysa TBM 3  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda  $W_1$  ve  $W_{2-3}$  ayrışma zonlarında olduğundan daha düşük bir SE değeri ortalamasına sahiptir. TBM 1 ve TBM 2'nin  $W_{3-4}$  sınıflandırmasında kazdığı kumlu – siltli birimlerin TBM 3'ün aynı sınıflandırmada kazdıklarına göre daha problemlili olduğu kabul edilse bile TBM 3'ün özellikle göbek bölgesindeki yüksek açıklık oranının bozuk zeminlerin kazılarında çok ciddi avantajlar sağladığı da unutulmamalıdır.  $W_{3-4}$  zonunda birbirine çok yakın gerçekleşmiş olan ortalama PR değerleri (TBM 1 =  $13,1 \text{ mm/rev}$ , TBM 2 =  $13,3 \text{ mm/rev}$ , TBM 3 =  $13,7 \text{ mm/rev}$ ) de bu bulguyu doğrular niteliktedir.

### 4.3. NET İTME KUVVETİ [NTH] VE AYNA BASINCI [EP] İLİŞKİSİ

Şekil 4.11'de TBM 1 için ayna basıncı etkisinden arındırılmış olan net itme kuvveti (NTh; kN) ile ayna basıncı (EP; kN) ilişkisi her bir ayrışma zonu için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.  $[NTh/EP] = 1.0$  oranının altına düştüğünde, ayna stabilitesinde kötüleştirmeler gözlenebilmektedir (Tokgöz ve Binen, 2018). TBM 1 için bu oranın değişimi incelendiğinde, yapılan kazıların çok genelinin  $[NTh/EP] = 1.0 - 10$  aralığında gerçekleştiği görülmektedir. İdeal koşullar altında ayrışma derecesi arttıkça NTh/EP oranında düşüş gözlenmesi beklenirken TBM 1 için

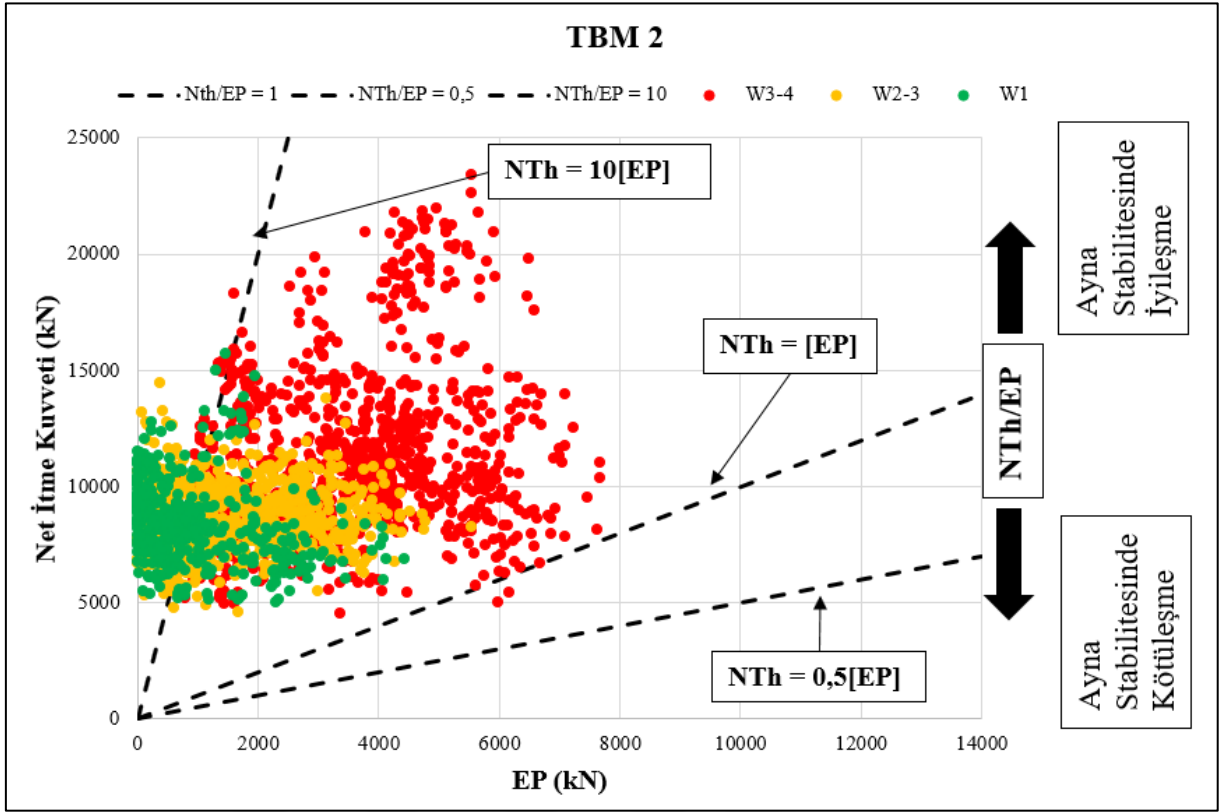
bu ayırım TBM 2 ve TBM 3 için olduğu kadar net bir şekilde görülebilmiştir. İtme kuvveti ve ayna basıncı arasındaki ilişkinin TBM ve kesici kafa tasarımına çok duyarlı olduğu da unutulmamalıdır. TBM 1'in açıklık oranının diğer TBM'lerden çok düşük olması ve RPM aralığının 1,8 ile sınırlanmış olması da itme kuvveti gereksinimini artıran etmenlerden sayılabilir.



Şekil 4. 11: TBM 1 için NTh – EP dağılımları.

Şekil 4.12'de TBM 2 için NTh/EP dağılımları ayırma zonları özelinde verilmiştir. TBM 1'de olduğu gibi TBM 2 içinde ayırma zonları ayırmamış, az ayırmıştan çok ayırmışa doğru gidildikçe NTh/EP oranında da düşüş gözlenmektedir. TBM 2'de  $W_1$  ayırma zonundan  $W_{3-4}$  ayırma zonuna doğru gidildikçe NTh/EP oranının  $>10$ 'dan 1'e doğru azaldığı görülebilmektedir.

Şekil 4.13'de ise TBM 3 için [NTh/EP] oranının ayırma zonlarına bağlı olarak dağılımları verilmiştir. TBM 2'deki duruma benzer olarak TBM 3'de de artan ayırma derecesiyle beraber NTh/EP oranında düşüş gözlenmiştir.

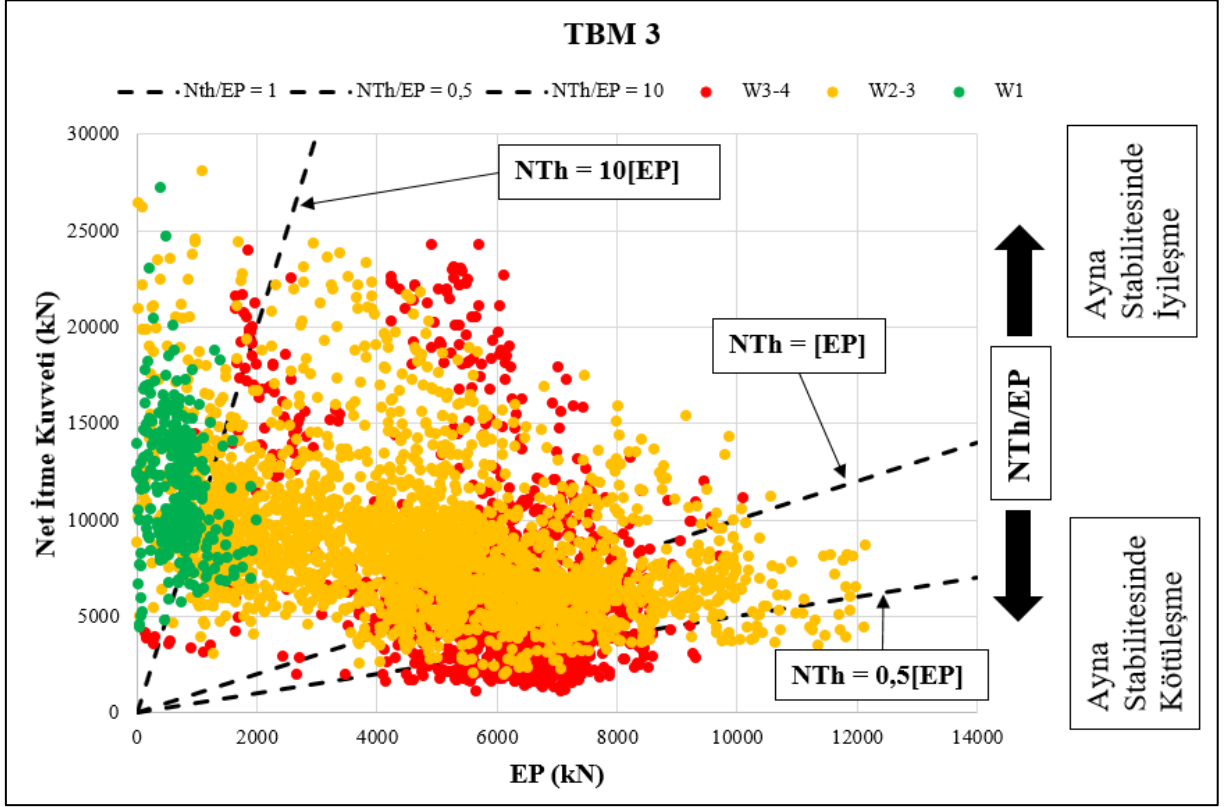


Şekil 4. 12: TBM 2 için NTh – EP dağılımları.

[NTh/EP] oranının TBM'ler için dağılımları incelendiğinde genel olarak ayrışma derecesinin artışının [NTh/EP] oranı azalttığı görülebilmektedir. Ancak TBM'lerin NTh/EP oranlarının değişimleri, başka bir deyişle ayrışma derecesine verdikleri tepkiler aynı zamanda TBM'lerin teknik özellikleriyle de ilişkilidir. [NTh/EP] oranlarının dağılım trendleri benzer olsa da seviyeleri TBM türüne ve kesici kafa tasarımına bağlı olarak farklılıklar göstermiştir.

[NTh/EP] dağılımlarından gözlenen başka bir önemli bulgu da ayrışma derecesinin TBM'ler itme kuvveti ve ayna stabilitesi davranışları üzerindeki etkisidir. Her 3 TBM için de W<sub>1</sub> ayrışma zonu [NTh/EP] >1.0 aralığında gözlenmiştir. Ancak W<sub>2-3</sub> ve W<sub>3-4</sub> ayrışma zonları için üst üste binen verilerin sayısında artış bulunmaktadır. Bu durum ayrışma derecesinin artmasıyla zemin ve/veya kaya ortamının ayna stabilitesi veya kazılabilirlik açısından davranışlarının benzeşmeye başladığını göstermektedir. Bu durum benzeşmelerin yüksek olduğu, ayrışma derecesi açısından geçişli kabul edilebilecek bu tip kaya/zemin ortamları için ayna basıncı tayinin ne kadar güç olabileceğini ve ayna basıncılarının tayin edilmesinde oldukça dikkatli davranılması gerektiğini göstermektedir.

[NTh/EP] dağılımlarında etkili olduğu düşünölen bir başka bulgu ise insan faktörüdür. Tıpkı TBM'lerin teknik özelliklerinde farklılıklar olduğu gibi TBM'lerle yapılan kazılarda da TBM ekiplerinin ve operatörlerinin etkili olduğu unutulmamalıdır. Ancak bu etkinin analiz edilmesi ve belirlenmesi oldukça güçtür.



Şekil 4. 13: TBM 3 için NTh – EP dağılımları.

[NTh/EP] oranı dağılımlarında ayrışma derecesinin etkisi proje öncesi yapılan geoteknik tahlillerde, ayna basınçlarının belirlenmesi ve değerlendirilmesi süreçlerinde ayrışma derecesinin de mutlaka göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymaktadır. Öte yandan [NTh/EP] oranını etkileyen faktörlerin çeşitliliği ve bu etkilerin TBM tasarımına göre değişkenliği, ayrışma açısından benzeşen geçişli bölgeler gibi etmenler [NTh/EP] oranıyla ilgili daha kapsamlı ve detaylı çalışmalar yapılması gerektiğini göstermektedir. Böylelikle [NTh/EP] oranı ayna stabilitesinin analizinde, itme kuvveti gereksinimlerinin değerlendirilmesinde, TBM sıkışma risklerinin incelenmesinde yol gösterici bir parametre olarak kullanılabilir.



#### 4.4. ZEMİN KOŞULLANDIRMA BÜYÜKLÜKLERİ (FİR – FER) VE KAZI PERFORMANS BÜYÜKLÜKLERİ İLİŞKİSİ

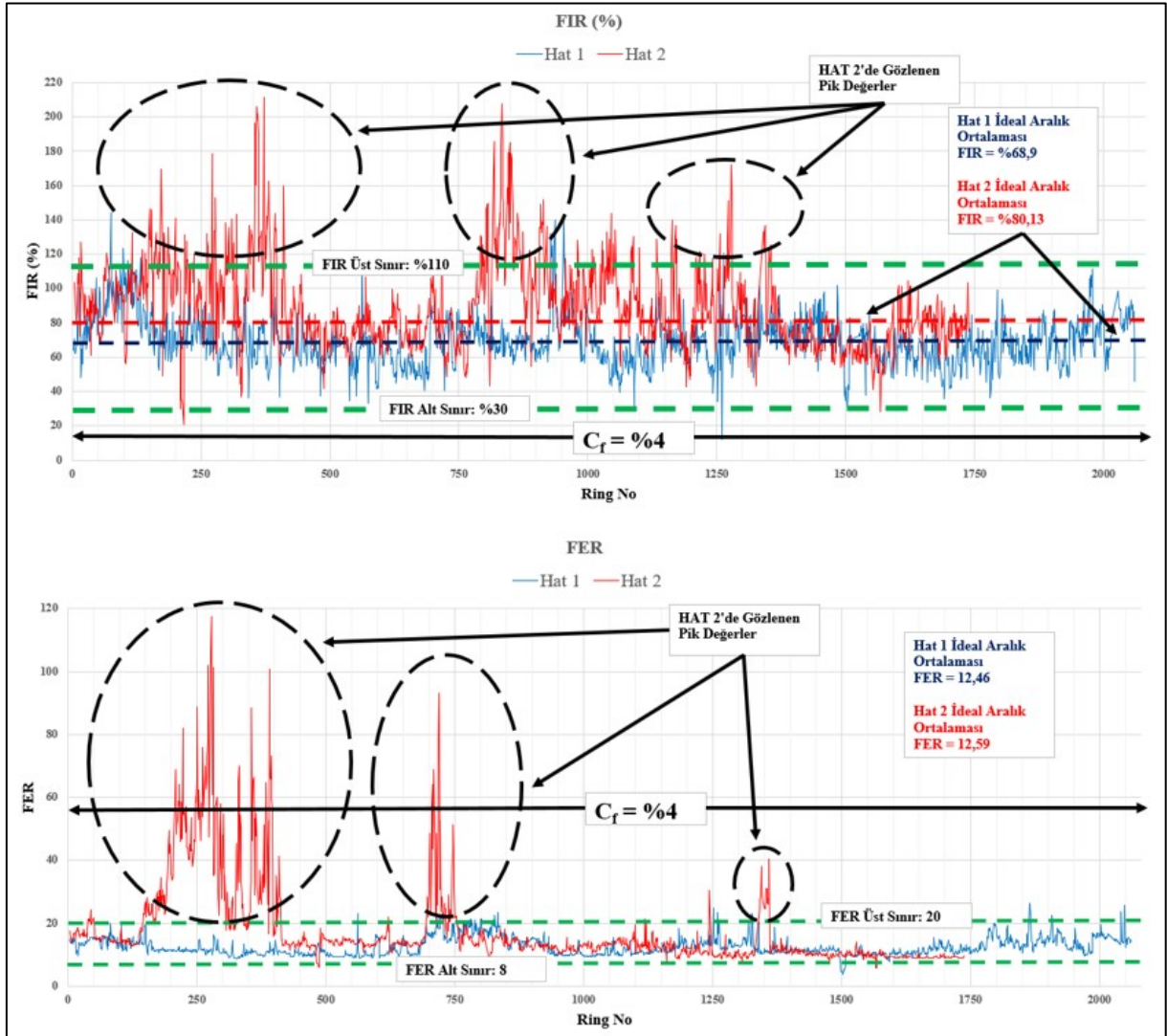
TBM 1 ve TBM 2 daha önceki bölümlerde de açıklandığı üzere sırasıyla 2005 ve 1998 yapımı olan daha önce farklı projelerde kullanılmış ve Mahmutbey – Mecidiyeköy projesi öncesinde kapsamlı revizyondan geçmiştir. Bu revizyonlar esnasında TBM'lerin zemin koşullandırma sistemlerinde, özellikle de elektronik aksamalarında bazı güncellemeler yapılmıştır. Fakat bu güncellemeler TBM'lerin görece eski olan haberleşme (PLC) sistemleriyle tam olarak entegre edilememiştir. Bu sebeple TBM 1 ve TBM 2 için teknik sebeplerden ötürü zemin koşullandırma parametrelerine ait veriler elde edilememiştir. Öte yandan TBM 3 için böyle bir sorunla karşılaşılmamıştır. Bu bölümde yalnızca TBM 3 için zemin koşullandırma parametrelerinin değişimleri ve bunların kazı performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

TBM 3 için öncelikle olarak Hat 1 ve Hat 2 olarak FIR ve FER değerlerinin değişimi güzergâh boyunca ringlere bağlı olarak (tüm ayrışma grupları dahil) grafik üzerinde incelenmiştir (Şekil 4.14). Kazılar boyunca hem Hat 1'de hem de Hat 2'de köpük katkı oranını ifade eden  $C_f$  değerinin %4 olarak sabit tutulduğu görülmüştür. FIR ve FER için literatürde ve kimyasal üretici firmaların tavsiyelerinde belirtilmiş olan ideal aralık değerleri (FIR = %30 – %110; FER = %8 – %20) grafikler üzerinde kesikli çizgilerle tanımlanmıştır.

Hat 1 de gerçekleşen FIR ve FER kullanımlarının literatürde belirtilmiş olan ideal aralık içerisinde kaldığı görülmektedir. Hat 2'de ise hem FER değerlerinde hem de FIR değerlerinde anomali olarak kabul edilebilecek yüksek mertebeler göze çarpmaktadır. Bu yüksek mertebeler normal kullanım sırasında meydana gelemeyecek, kazı ve zemin koşullandırma sisteminin doğasına aykırı değerlerdir. Bu sebeple bu değerlerin TBM'in zemin koşullandırma sisteminde veya zemin koşullandırma sistemine etki edebilecek diğer bileşenlerinde olası bir arızaya işaret ettiği düşünülmüştür.

Konuyla ilgili olarak Hat 2 için düzenlenmiş olan vardiya raporları taranmış, Hat 2'de yer alan ilk istasyon olan Kazım Karabekir İstasyonu'nda (Ring No: 809) yapılan bakım ve kontrollerde TBM kesici kafa ve ana tahrik rulmanı arasında kalan ve TBM kesici kafa bölümünün sızdırmazlığını sağlayan conta ve aşınma plakasında hasar tespit edilmiştir. Bu hasar daha sonra Akşemsettin İstasyonu'nda (ring No: 1330) yapılan bakım çalışmalarında giderilmiştir. Vardiya raporlarından elde edilen bilgiler ışığında kazı odasının sızdırmazlığını

sağlayan, ayna basıncının korunmasıyla doğrudan ilgili bu arızanın 0 ila 809. ringler arasında bir noktada gerçekleştiği ve 1330. Ring ilerlemesinden sonra ise giderildiği anlaşılmaktadır. Böyle bir arızanın varlığı ana rulmana su veya sulu malzeme girme riski olan bölgelerde çok yüksek FER değerleri kullanılmasını açıklayabilir. Ancak raporlarda bu konuyu daha ayrıntılı izah edecek bilgilere rastlanılmamıştır.



**Şekil 4. 14:** Ringlere bağlı olarak Hat 1 ve Hat 2 için FIR ve FER kullanımları.

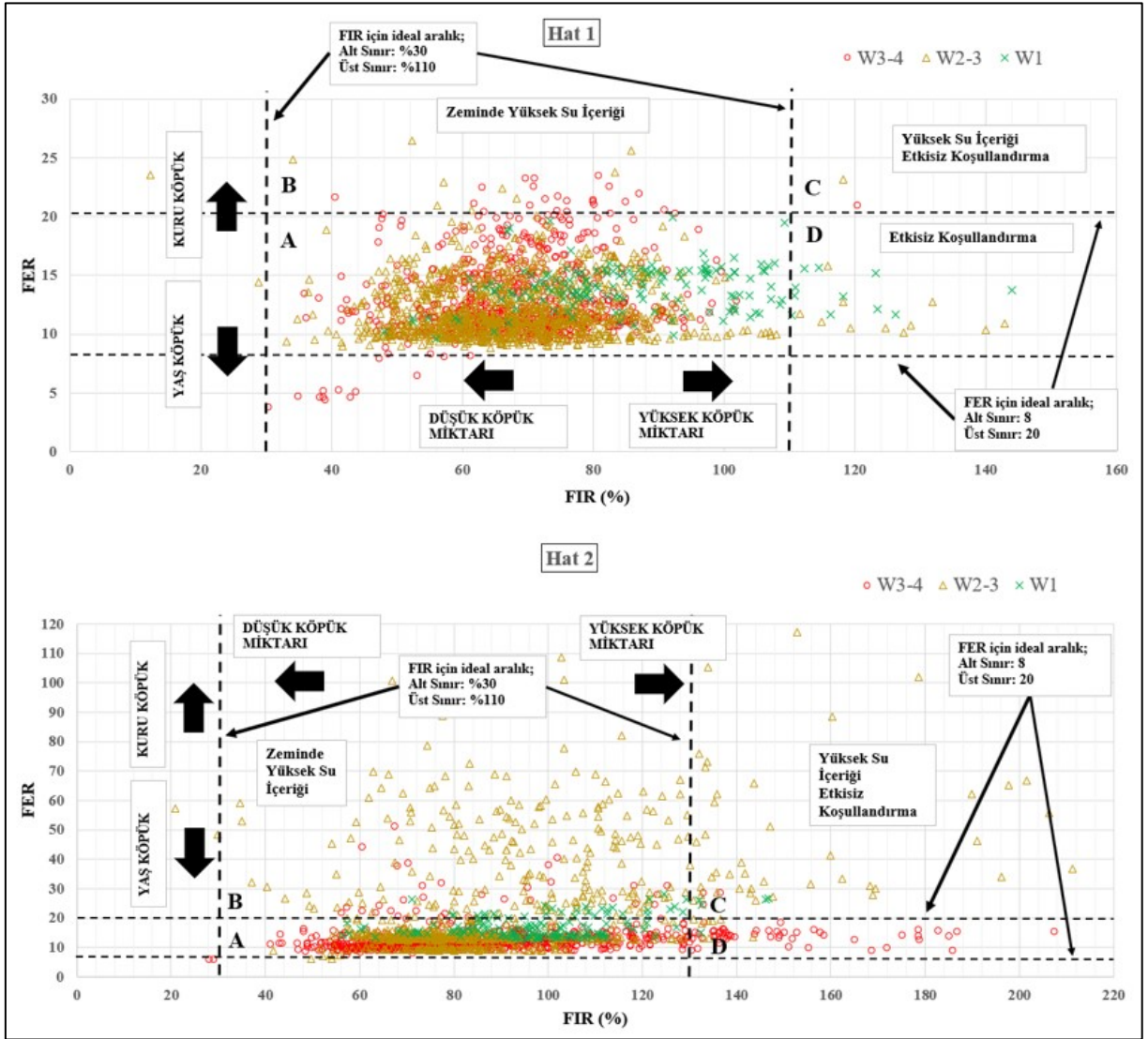
FIR ve FER kullanımlarına yönelik yapılan incelemelerde Hat 1 ve Hat 2'de aynı cins kimyasalların farklı üreticilerden temin edildiği, başka bir deyişle farklı marka kimyasallar kullanıldığı anlaşılmıştır. Bu farklı marka kimyasalların etkisinin mevcut arızadan bağımsız olarak objektif bir şekilde değerlendirilebilmesi için tanımlanmış olan ideal FIR ve FER aralığı içerisinde kalan değerlerin ortalamasına bakılmıştır. Hat 1'de ideal aralık içerisindeki

ortalama FIR kullanımını %68,9 iken Hat 2’de bu değer %80,13 olarak tespit edilmiştir. Başka bir deyişle FIR değerlerinde Hat 2’de %16,2’lik bir artış gözlenmiştir.  $C_f$  değerinin her iki hat için %4’te sabit tutulduğu dikkate alındığında bu artış farklı marka kimyasalların etkisiyle ilgili olabilir. Öte yandan Hat 1’in TBM ekibinin ilk kazdığı hat olduğu ve Hat 2’nin ise ikinci kazılan hat olduğu unutulmamalıdır. Hat 1 bir anlamda TBM ekibi için zemini ve güzergahı öğrendikleri hattır. Dolayısı ile bu bilgidan yola çıkarak Hat 2’de FIR kullanımlarında bazı düzeltmeler yapılmış olması ve bunun da %16,2’lik artış olarak gözlenmesi de muhtemeldir.

İdeal aralıkta yer alan FER değerlerinin ortalaması Hat 1 için 12,46 ve Hat 2 için ise 12,59 olarak belirlenmiştir. FER değerleri literatürde ve kimyasal üretici firmaların tavsiyelerinde yer alan standart kullanım değerlerini (FER: 10 – 14) tam olarak karşılamaktadır. Buna ek olarak Hat 1 ve Hat 2 için ideal aralıkta yer alan FER değerlerinin ortalamalarında önem arz edecek bir farklılığa rastlanmamıştır.

FER ve FIR kullanımlarının daha önceden tanımlanmış olan 3 farklı ayrışma zonu ( $W_1$ ,  $W_{2-3}$  ve  $W_{3-4}$ ) için değişimlerini gösteren grafikler Şekil 4.15’de verilmiştir. FER ve FIR için ideal kullanım aralıkları (FIR = %30 – %110; FER = 8 – 20) grafik üzerinde kesikli çizgilerle tanımlanmıştır. İdeal FER ve FIR sınırları içerisinde kalan bölge A bölgesi olarak tanımlanmıştır. Yüksek FER ve ideal FIR değerleri B bölgesi olarak, yüksek FER ve yüksek FIR değerleri C bölgesi olarak ve ideal FER ve yüksek FIR değerleri ise D bölgesi olarak tanımlanmıştır.

A bölgesindeki değerler normal işleyiş kapsamında değerlendirilmiştir. A bölgesinden B bölgesine geçişlerde daha kuru bir köpüğe ihtiyaç duyulduğu şeklinde yorumlanabilir ve dolayısıyla zeminde su varlığından bahsedilebilir.

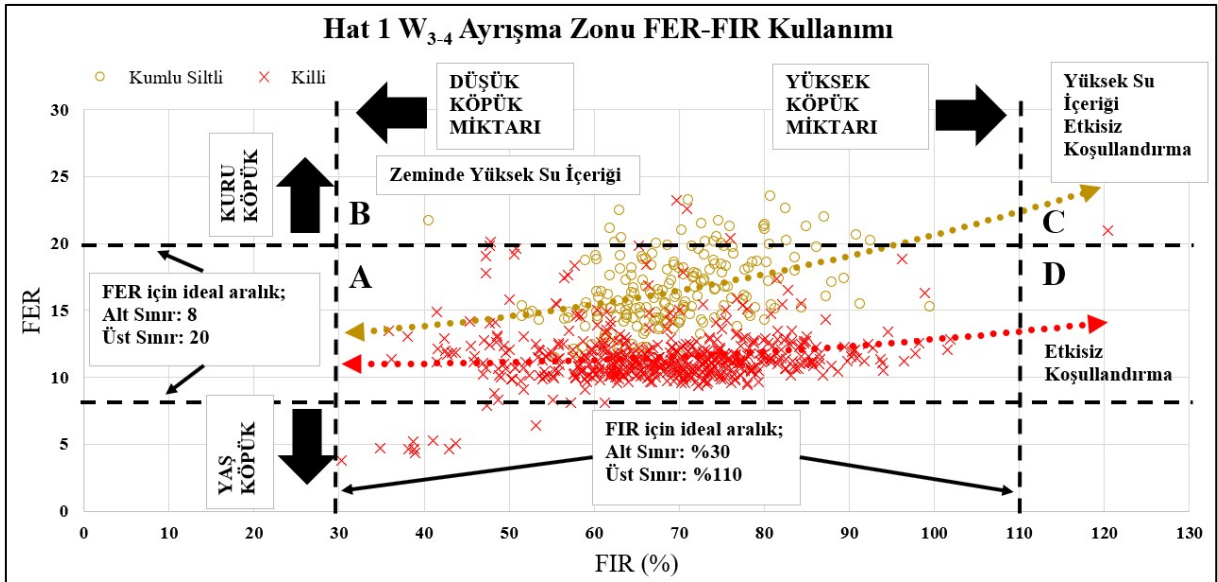


**Şekil 4. 15:** Hat 1 ve Hat 2 için ayırma zonlarına göre FIR ve FER değerlerinin dağılımı.

C bölgesindeki değerler hem FER hem de FIR aralığının zemini koşullandırmada başarılı olamadığı, zeminde su gelirin fazla olduğu ve kullanılan koşullandırıcının etkisiz kaldığı bir bölge olarak yorumlanmaktadır. Bu tip durumlarda ya ek su tutucu polimer takviyesi uygulanmalı ya da  $C_f$  değerinde artışa gidilerek köpüğün miktarından ziyade etki gücü artırılmaya çalışılmalıdır. D bölgesi ise FER değerlerinin ideal aralıkta ancak FIR değerlerinin ideal aralığın dışına taşıdığı bölgedir. Genellikle kil içeriği yüksek ve topaklanma riski barındıran zeminlerin veya kazıldıktan sonra bu tip zeminler gibi davranan kayaç birimlerin kazılarında (Thewes) kimyasalın türünün veya etki gücünün yetersiz kalması sonucu FIR değerlerinde artışa gidilerek yüksek köpük miktarıyla bu durum telafi edilmek istenmektedir.

Ayrışma zonlarına bağlı olarak Hat 1 ve Hat 2 için FIR ve FER kullanımları bu bölgelere bağlı olarak yorumlanmıştır.

Hat 1 için dağılımların çoğunlukla ideal kullanım aralıkları içerisinde yer aldığı görülmektedir. Hat 1’de  $W_1$  olarak sınıflandırılmış bölgelerin kazılarında FER değerleri genellikle 12-14 bandında seyretmiştir.  $W_{2-3}$  ayrışma grubu için yaygın bir dağılım göstermiştir.  $W_{2-3}$  grubunda ayrılmış/bozunmuş kumtaşları ve bu kumtaşlarının kırık çatlaklarında su gelirleri, yine aynı ayrılma grubunda yer alan ve kazıldıktan sonra killi zemin gibi davranan kil ve silt taşları olduğu dikkate alındığında bu geniş yayılım ayrışma grubunun karakteri ile örtüşmektedir. Hat 1 için  $W_{3-4}$  ayrışma grubunda ise hem A bölgesinden B bölgesine doğru hem de A bölgesinden D bölgesine doğru iki farklı trend gözlenmektedir.  $W_{3-4}$  ayrışma grubundan kumlu-siltli suya doymun zemin birimler ve oldukça zayıf/ayrışmış killi birimler yer almaktadır. Bu iki farklı birimin zemin koşullandırma davranışları ve gereksinimleri de beklenildiği üzere trendleri doğrular şekilde farklılık göstermektedir. Suya doymun kumlu ve siltli birimler daha kuru bir köpük kullanımı gerektirirken kil düzeyi yüksek birimler daha yaş ve yüksek miktarda köpük kullanımı gerektirmektedir. Bu eğilimler Şekil 4.16’da detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 4. 16: Hat 1  $W_{3-4}$  ayrışma zonu FIR ve FER kullanımını detaylı dağılımı.

Şekil 4.15 incelendiğinde Hat 2’de de ayrışma zonları açısından Hat 1’dekine benzer trendler gözlenmiştir. Fakat daha önceki kısımlarda açıklanmış olan teknik arızalar sebebiyle bu dağılımların arkasındaki ayrışma zonlarına ait etkiler sağlıklı olarak ele alınamamaktadır.

Şekil 4.16'da  $W_{3-4}$  ayrışma grubu içerisinde yer alan kumlu ve siltli birimler ile kil düzeyi yüksek birimler ayrı ayrı incelenmiştir. Kumlu ve siltli birimler killi birimlerden daha yüksek FER değerleri (daha kuru köpük) ile kazılmıştır ve genel trend A bölgesinden önce B bölgesine ve daha sonra su tutucu polimer takviyesinin gerektiği D bölgesine doğru olmuştur. Kil düzeyi yüksek birimlerin ise görece olarak düşük FER değerleri (yaş köpük) ile kazıldığı ve genel trendlerinin A bölgesinden C bölgesine doğru olduğu görülmektedir. Bu geçişten sonra artık  $C_f$  değerinde bir artış veya etkili bir dispersif etki (kil topağını dağıtıcı) sağlayacak bir kimyasal ajanın kullanımı gerekmektedir.

**Tablo 4. 2:** Zemin koşullandırma ve TBM kazı parametrelerinin tek değişkenli doğrusal regresyon analizi.

	RPM	Tork (kNm)	İtme K. (kN)	AR (mm/dk)	Ort. EPB (bar)	PR (mm/rev)	SE (kWh/m <sup>3</sup> )	NTh (kN)	Tork/NTh	EP (kN)	NTh/EP	FER	Köpük (l/dk)	FIR (%)
FER	0,53	0,75	0,83	0,82	0,06	0,82	0,82	0,82	0,75	0,06	0,79	1		
Köpük (l/dk)	0,55	0,82	0,78	0,82	0,26	0,84	0,83	0,77	0,73	0,26	0,74	0,67	1	
FIR (%)	0,22	0,38	0,28	0,52	0,26	0,48	0,24	0,30	0,33	0,26	0,32	0,44	0,71	1

Tablo 4.2'de TBM 3 Hat 1  $W_{3-4}$  ayrışma zonu için FIR, FER, köpük tüketimi (l/dk) gibi parametrelerle TBM kazı parametrelerinin ikili korelasyonlarının bir tablosu yer almaktadır. Korelasyon mertebeleri incelendiğinde, köpüğün kimyasal ve reolojik işlevini belirleyen (ıslaklık, kuruluk) FER değerinin Tork, İtme Kuvveti, İlerleme Hızı, Penetrasyon, Spesifik Enerji, Tork/Net İtme Kuvveti gibi kazı performansı ve hızını ifade eden parametrelerle  $r > 0,70$  değeri üzerinde, iyi derecede bir ilişkinin varlığına işaret etmektedir. Köpük tüketimi (l/dk) ise ağırlık olarak Tork, AR, PR, SE gibi kazı hızı ve kolaylığını tanımlayan parametrelerle ilişkili gözlenmiştir. FIR değeri ise, tek değişkenli doğrusal korelasyonlarda

FER ve köpük tüketimi kadar anlamlı ve kestirim gücü yüksek ilişkiler elde edilememiş olsa da çoklu regresyon analizlerinde bağlı değişkenin kestirim gücünü iyileştirici yönde etki edebileceği unutulmamalıdır.

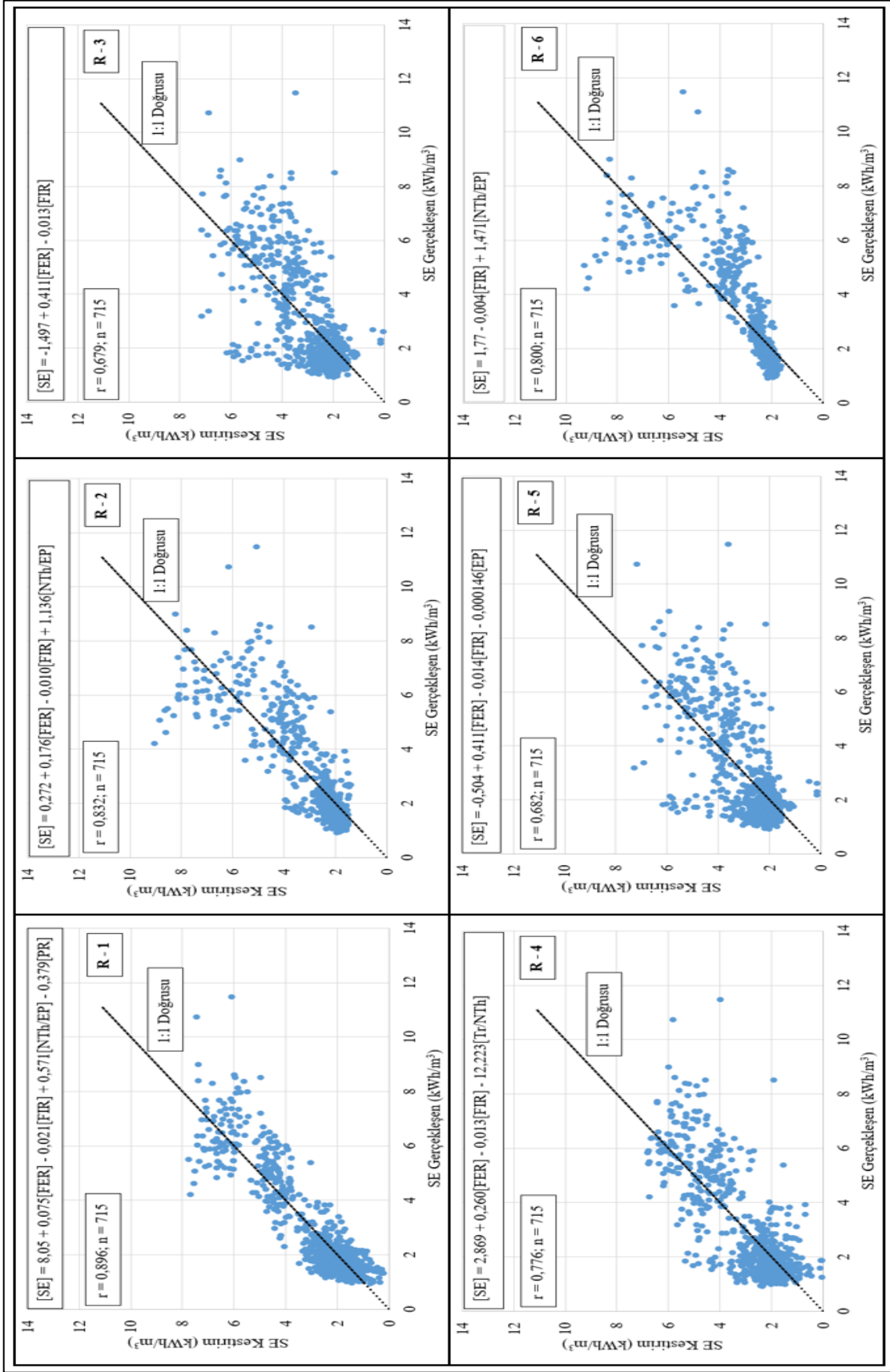
TBM 1 Hat 1 için  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda zemin koşullandırma parametreleri ve TBM kazı parametreleri arasındaki ilişki çoklu regresyon analizleri kullanılarak incelenmiştir (Şekil 4). Zemin koşullandırma parametrelerinin kazı performansı üzerindeki etkisinin en güçlü şekilde gözlenebileceği koşulların zemin koşullandırmaya en çok ihtiyaç duyulan  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda gerçekleşeceği ön görülmüştür. TBM 3 Hat 2 kazı verileri önceki kısımlarda bahsedilmiş teknik arızaların etkisinden uzak durmak için analizlere dahil edilmemiştir.

Yapılan çok regresyon analizlerinde kazı performansındaki iyileşmenin kriteri olarak hem torku hem de ilerleme hızı ve RPM'i içeren spesifik enerji (SE) parametresi tercih edilmiştir. Zemin koşullandırmanın kazı performansı üzerindeki olası etkisi zorlu zemin koşulları altında torku azaltıcı, ilerleme hızını ise artırıcı etki göstermelidir. Başka bir ifadeyle zemin koşullandırmanın başarılı olarak uygulandığı durumda spesifik enerji değerinde orantılı bir azalma görülmesi beklenmektedir.

Çoklu regresyon analizinde denkleme dahil edilecek olan parametreler olarak ise proje öncesi projeksiyonu yapılabilen FER ve FIR değerleri seçilmiştir. Ek olarak spesifik enerji değerini etkileyebileceği düşünülen Net İtme Kuvveti (NTh), Ayna Basıncı (EP), Penetrasyon (PR) gibi parametrelerde farklı analizlerde denenmiş ve kestirim güçleri değerlendirilmiştir. Net İtme Kuvveti ve Ayna Basıncı (EP) parametrelerinin ayna stabilitesini ne derece temsil ettiğine daha önceki bölümlerde değinilmiştir.

Şekil 4 genel olarak incelendiğinde yapılan 6 farklı analizin hepsinde zemin koşullandırma parametreleri ile kestirilen spesifik enerji (SE) ile gerçekleşen (SE) değerleri arasında çok güçlü bir ilişkinin olduğu gözlenmektedir. En anlamlı ilişki ise  $r=0,894$  olan ve

$$[SE] = 8,05 - 0,379[PR] + 0,571[NTh/EP] + 0,075[FER] - 0,021[FIR] \rightarrow r = 0,894$$



Şekil 4. 17: TBM 3 Hat 1 W<sub>3-4</sub> ayrışma zonu için çoklu regresyon analizleri.



dört adet bağımsız değişkenli regresyon bağıntısından (çok değişkenli fonksiyonel kestirimden) elde edilmiştir. Bu denklemde FER ve FIR parametreleri zemin koşullandırmanın etkisini, [NTh/EP] oranı ayna stabilitesi koşullarını ve penetrasyonda TBM'in kazı ilerletilme hızını temsil etmektedir. Ancak daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi penetrasyon ile spesifik enerji arasında hali hazırda güçlü bir ilişki olduğu bilindiğinden penetrasyon parametresi denklemden çıkarılarak yeniden analiz gerçekleştirilmiştir (Bkz. Bölüm 4.2, Şekil 4.8, 4.9, 4.10).

$$[SE] = 0,272 + 0,176[FER] - 0,010[FIR] + 1,136[NTh/EP] \rightarrow r = 0,830$$

denklemini sağlayarak gerçekleştirilen üç bağımsız değişkenli çoklu regresyon analizinde yine anlamlı sayılabilecek  $r=0,830$  bir regresyon bağıntısı elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde zemin koşullandırma parametreleri ve NTh/EP oranıyla spesifik enerji arasında anlamlı bir ilişki ve kestirim gücü görülmektedir.

[NTh/EP] oranı da denklemden çıkarılarak sadece FER ve FIR ile yapılan regresyon analizinin sonucunda ise;

$$[SE] = -1,497 + 0,411[FER] - 0,013[FIR] \rightarrow r = 0,698$$

olarak elde edilmiştir. Bu çoklu regresyon analizlerinin anlamlılık testleri ise grup varyans analizlerinden ANOVA test tekniği ile ayrıca değerlendirilerek Tablo 4.3'te sunulmuştur.

**Tablo 4. 3:** ANOVA test istatistikleri ve değerlendirmesi

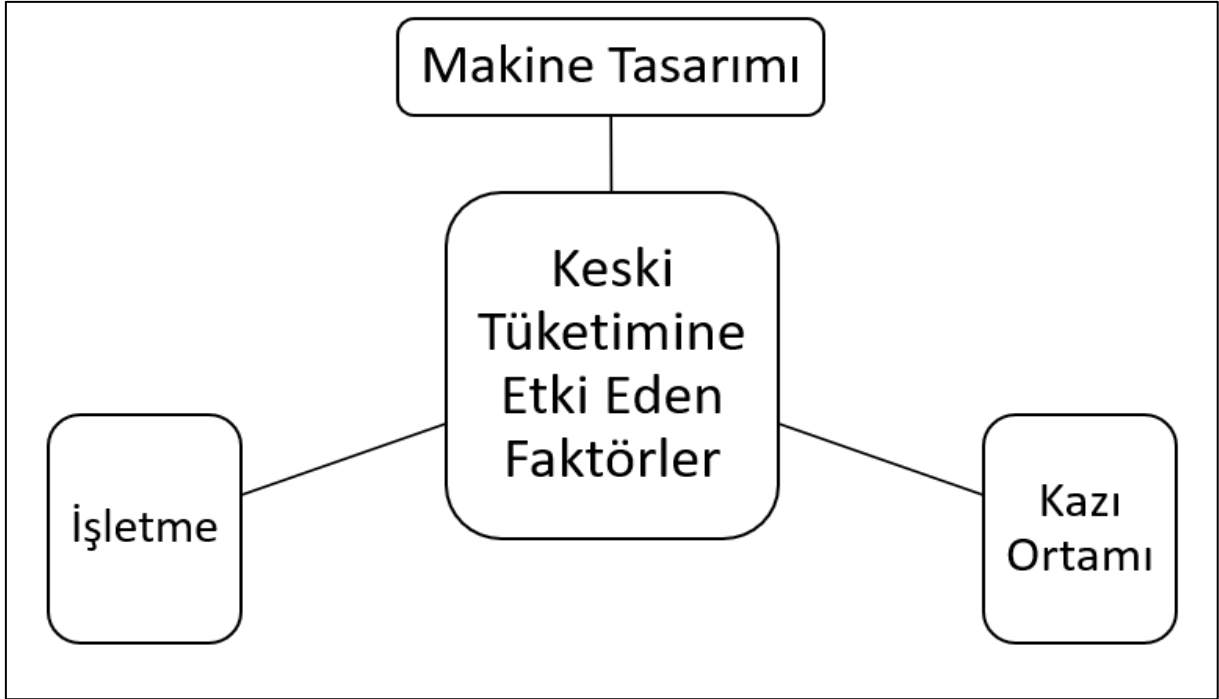
Bağımsız Değişkenler	R-1		R-2		R-3		R-4		R-5		R-6	
	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
FER	5,4	1,0E-07	10,9	1,7E-25	24,6	2,9E-97	15,1	4,5E-45	24,7	7,7E-98	-	-
FIR (%)	-7,6	8,6E-14	-3,1	1,8E-03	-2,9	4,2E-03	-3,3	8,7E-04	-3,0	2,4E-03	-1,18	0,0235
NTh/EP	11,8	2,4E-29	23,1	2,7E-88	-	-	-	-	-	-	35,55	5,5E-160
PR (mm/rev)	-20,0	8,8E-71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tr/NTh	-	-	-	-	-	-	-15,85	1,03E-48	-	-	-	-
EP (kN)	-	-	-	-	-	-	-	-	-2,40	0,02	-	-
R-1 → [SE] = 8,05 + 0,075[FER] - 0,021[FIR] + 0,571[NTh/EP] - 0,379[PR] <b>r = 0,896</b>												
R-2 → [SE] = 0,272 + 0,176[FER] - 0,010[FIR] + 1,136[NTh/EP] <b>r = 0,832</b>												
R-3 → [SE] = -1,497 + 0,411[FER] - 0,013[FIR] <b>r = 0,679</b>												
R-4 → [SE] = 2,869 + 0,260[FER] - 0,013[FIR] - 12,223[Tr/NTh] <b>r = 0,776</b>												
R-5 → [SE] = -0,504 + 0,411[FER] - 0,014[FIR] - 0,000146[EP] <b>r = 0,682</b>												
R-6 → [SE] = 1,77 - 0,004[FIR] + 1,471[NTh/EP] <b>r = 0,800</b>												
Açıklamalar: FER (%) = Köpük Genleşme Oranı; FIR (%) = Köpük Enjeksiyon Oranı; NTh/EP = Net İtme Kuvveti ve Ayna Basıncı Oranı; PR = Penetrasyon (mm/rev); Tr/NTh = Tork/Net İtme Kuvveti Oranı; EP = Ayna Basıncı (kN)												
<b>DEĞERLENDİRME NOTLARI:</b>												
Yukarıda denenen çoklu regresyon bağıntılarının (R-1, 2, 3, 4, 5 ve 6) anlamlılığını test etmek için Anova test istatistiği kapsamında, <i>t</i> ve <i>p</i> değerleri kullanılmıştır. Anova, gruplar arası bir varyans analizi olup, bağımsız değişkenlerin kendi aralarında nasıl etkileşime girdiklerini ve bu etkileşimlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini analiz etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.												
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yukarıdaki 6 adet çoklu regresyon bağıntısının <i>p</i> değerlerinden de anlaşılacağı üzere, <math>p &lt; 0,05</math> olup, istatistiksel olarak anlamlıdır. <i>F</i> testi olarak da bilinen bu testte, düşük <i>p</i>-değerleri, sıfır hipotezine (H<sub>0</sub>: Çoklu-doğrusal bir ilişki var olmayıp, anlamlı değildir. !) karşı daha fazla kanıt sağlayarak, reddedilmektedir. Nitekim, [NTh/EP], [Tr/NTh] FIR, FER bağımsız değişkenleri, SE (kWh/m<sup>3</sup>) kestiriminde, denenen çoklu regresyon modeline yeterince açıklayıcı yönde anlamlılık kazandırmıştır.</li> <li>• <i>t</i> testlerinin değerlendirilmesine gelince; yukarıdaki hesaplanan <i>t</i> değerlerin, %95 güven aralığında standart <i>df</i> normal dağılımının tablo değerlerinden büyük olması, korelasyon katsayısının tahkiki için gerekli ve yeter koşul olarak bilinmektedir. Nitekim tüm hesaplanan <i>t</i> değerleri, <i>df</i> tablo değerlerinden daha yüksek bulunmuştur.</li> </ul>												

#### 4.5. AYRIŞMA ZONLARI VE KESKİ TÜKETİMİ İLİŞKİSİ

TBM'ler ile yapılan kazılarda kazı aynası ile fiziksel temasa giren disk keski ekipmanların zaman içerisinde aşınma, kırılma, rulman kilitlenmesi gibi sorunlar sebebiyle işlevini yerine getiremez hale gelmeleri sonucu değiştirilmeleri gerekmektedir. EPB TBM'ler için bu bakım faaliyetleri ayna stabilitesiyle ilgili kaygılar sebebiyle her zaman mümkün olamamakta, bazı durumlarda hiperbarik müdahaleler gerekebilmekte veya disk değişim ya da bakım faaliyetleri için ayna basıncının kaldırılması yüzeyde deformasyonlara neden olabilmektedir. Bu gibi risklerden ötürü EPB TBM'ler için kesici kafa bakım faaliyetlerinin iyi bir şekilde planlanması önem arz etmektedir. Aksi takdirde yıpranmış keski EPB TBM'lerin anlık kazı performanslarını düşürebilmekte veya kesici kafa ve keski ile ilgili arıza/bakım faaliyetleri EPB TBM'lerin genel performanslarını ve makineden faydalanma oranlarını aşağıya çekebilmektedir.

Disk keski ve sıyrıcılar aynı zamanda TBM'ler için birer sarf tüketim malzemesi olarak kabul edilir ve önemli maliyet kalemlerinden birisidir. Kesici kafa bakım ve müdahale için gerçekleşen doğrudan veya dolaylı zaman kayıpları ise TBM'lerin genel performanslarını

etkileyerek dolaylı birer maliyet haline gelmektedir. Yukarıda belirtilen sebeplerden ötürü ayırma zonları ile disk keski tüketimi arasındaki ilişkiler bu bölüm altında incelenmiştir.



**Şekil 4. 18:** Kesici kafa ekipmanlarının tüketimine etki eden faktörler.

Keski ve sıyrıcı tüketimini etkileyen çok sayıda faktör bulunmaktadır. Bu faktörler; makineyle ilgili faktörler, işletmeyle ilgili faktörler ve kazı ortamıyla ilgili faktörler olarak 3 ana grup altında toplanabilir (Şekil 4.18). Makineyle ilgili faktörler kesici kafa tasarımı, keski sayısı, keski arası mesafe, keski boyutları, keski tipleri, sıyrıcı tipleri, sıyrıcı ebatları, sıyrıcı adetleri, sıyrıcı yerleşimleri gibi mekanik tasarımla ilgilidir. İşletmeyle ilgili faktörler, kesici kafa bakım ve kontrol sıklığı, TBM operatörünün becerileri, bakım faaliyetlerinin ne kadar iyi yürütüldüğü, zemin koşullandırmanın doğru yapılıp yapılmadığı gibi işletmeyle ve insan faktörüyle ilgilidir. Üçüncü ana grup olan kazı ortamıyla ilgili faktörler ise kazı ortamının cinsi, dayanımı, aşındırıcılığı, ayırma derecesi gibi kazı ortamına ait mekanik ve fiziksel özelliklerle ilgilidir.

Tablo 4.4’de her 3 TBM’e ait disk ve sıyrıcı tüketimleri verilmiştir. TBM 3 6877 metre ile projede en çok kazı yapan TBM olmuştur. TBM 1 5390 metre ve TBM 2 ise 3850 metre toplam kazı gerçekleştirmiştir. TBM 3 beklenildiği gibi 635 disk değişimi ile aynı zamanda projenin en çok disk tüketen TBM’i olmuştur. TBM 2 533 disk değişimi ile ikinci ve TBM 1 ise 482 disk değişimi ile üçüncü sırada yer almaktadır. Disk tüketimi değerleri kazı mesafesi

ile düzeltildiğinde TBM 1 ve TBM 3 sırasıyla 11,18 m/disk ve 10,82 m/disk ile birbirlerine çok yakın ve proje öncesi projeksiyonlarla uyumlu bir performans grafiği sergilemiştir.

**Tablo 4. 4:** TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için gerçekleşmiş disk ve sıyrıcı tüketimi verileri

	TBM 1	TBM 2	TBM 3
Kazı Mesafesi (m)	5390	3850	6877
Değişen Disk Adedi	482	533	635
Değişen Sıyrıcı Adedi	1075	720	756
Disk Başına Mesafe (m)	11,18	7,22	10,82
Sıyrıcı Başına Mesafe (m)	5,01	5,34	9,09

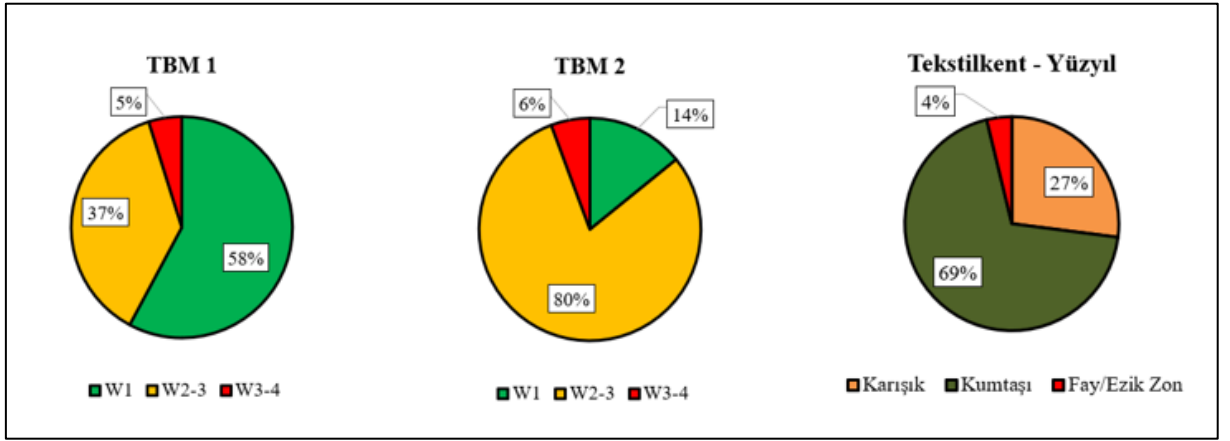
Öte yandan TBM 2 için disk başına kazılan mesafe değeri 7,22 m/disk olarak tespit edilmiştir. Bu rakam diğer TBM'lerden yaklaşık 4 m/disk kadar düşüktür. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere TBM 2 W<sub>3-4</sub> ayrışma zonu kapsamında yer alan suya doymun kumlu bölgenin kazıları sırasında aşınmaya bağlı olarak ciddi bir kesici kafa hasarıyla karşılaşmıştır. Bu hasarı onarmak ayna stabilitesi ile ilgili kaygılar sebebiyle ilk istasyon olan Karadeniz İstasyonu'na kadar mümkün olamamıştır. Karadeniz İstasyonu'nda dahi istasyonun kapalı tip istasyon (NATM) olması ve yeterli alan bulunmaması sebebiyle kapsamlı bir kesici kafa bakımı gerçekleştirilememiştir. Dahası bir sonraki istasyon olan Tekstilkent İstasyonu'nda TBM 2'nin kesici kafası yeni bir kesici kafa ile komple değiştirilmek zorunda kalmıştır. Dolayısıyla TBM 2 yaklaşık 1000 metrelik bir mesafeyi hasarlı bir kesici kafa ile geçmek zorunda kalmıştır. Yalnızca bu 1000 metrelik kısımda değişen disk sayısı 227'dir. Başka bir deyişle bu 1000 metrelik kısımda sadece 101 adet disk normal aşınma sebebiyle değişmiş, 43 adet disk kütleşme, 48 adet disk kırılma, 5 adet disk hub ve rulman hasarı ve 23 adet disk de diğer sebepler olan çatlak, çentikleşme veya önlem amaçlı nedenlerle değiştirilmiştir.

Disk tüketiminin ayrışma zonlarıyla olan ilişkisinin ortaya çıkarılabilmesi için makine ve işletmeyle ilgili nedenlerin normalize edilebilmesi gerekmektedir. Sağlıklı analizlerin yapılabilmesi için özellikle TBM 2'de kesici kafa hasarının olduğu bölüm ayrı tutulmalıdır.

Bu sebeple TBM 1 ve TBM 2'nin yanyana hatları kazdığı Tekstilkent – Yüzyıl istasyonları arasındaki bölüm ile TBM 2 ve TBM 3'ün yanyana hatları kazdığı Göztepe – Mahmutbey İstasyonları arasındaki bölüm inceleme yapma imkânı sağlamaktadır.

İstasyonları arasındaki bölüm inceleme yapma imkânı sağlamaktadır.

Tekstilkent ve Yüzyıl istasyonları arasındaki bölüm için ayrışma zonlarının TBM 1 ve TBM 2 için yüzdelerle dağılımlarıyla bu bölgedeki litolojik birimlerin yüzdelerle dağılım grafiği Şekil 4.19'da verilmiştir. Şekil 4.19 incelendiğinde TBM 1 ve TBM 2'nin %69 oranında kumtaşı, %27 oranında karışık zemin olarak ifade edilen kumtaşı, kıltaşı/silttaşı ve %4 oranında da fay/ezik zon gibi birimlerden geçtiği anlaşılmaktadır. Ayrışma zonlarının dağılımları incelendiğinde ise TBM 1'in %58 oranında  $W_1$ , %37 oranında  $W_{2-3}$  ve %5 oranında  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda kazdığı TBM 2'nin ise %14 oranında  $W_1$ , %80 oranında  $W_{2-3}$  ve %6 oranında  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda kazdığı görülmektedir. Dolayısıyla bölgede ağırlıklı olarak yer alan kumtaşları TBM 1 güzergahında daha az ayrılmış/bozunmuş veya ayrılmamış/bozunmamış iken TBM 2 güzergahında ise daha çok ayrılmış/bozunmuş durumdadır.



**Şekil 4. 19:** Tekstilkent – Yüzyıl İstasyonları arası ayrışma zonlarının ve litolojik birimlerin yüzdelerle dağılımları

Tablo 4.5'de Tekstilkent ve Yüzyıl İstasyonları arasındaki bölümde TBM 1 ve TBM 2 için disk tüketimlerine ilişkin değerlendirmeler yer almaktadır.

**Tablo 4. 5:** Tekstil Kent – Yüzyıl İstasyonları arası TBM 1 ve TBM 2 için disk tüketimi verilerinin karşılaştırma tablosu

	Ort. RPM	Ort. Penetrasyon	Ort.Tork (kN.m)	Ort. İtme K. (kN)	Değişen Disk (Adet)	Değişen Sıyırıcı (Adet)
TBM 1	1,7	16,2	2837	11446	87	308
TBM 2	2,3	14,8	2521	10631	106	89
	Toplam Mesafe (m)	Toplam CH Turu	m/Disk	Tur/Disk	m/Sıyırıcı	Tur/Sıyırıcı
TBM 1	1020	63079	11,7	725,0	3,3	204,8
TBM 2	988	66745	9,3	629,7	11,1	749,9

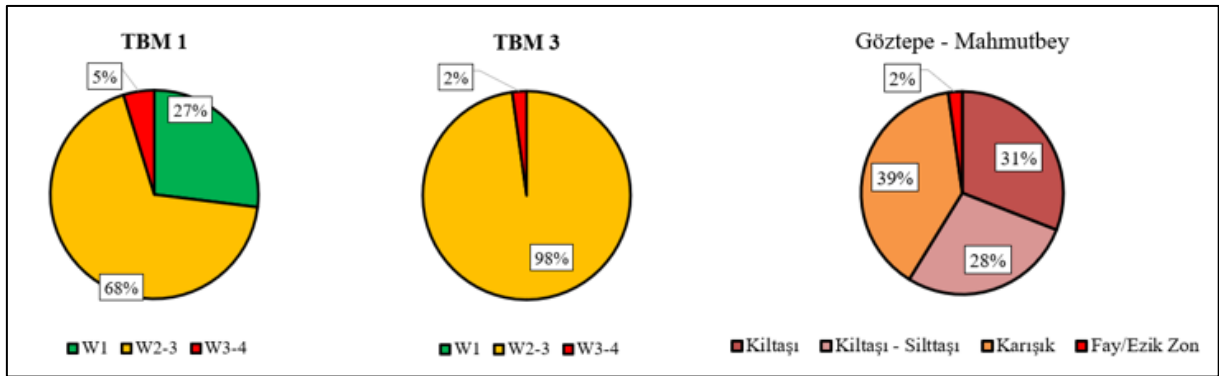
Tablo 4.5’de verilen bilgiler ışığında inceleme bölgesinde TBM 1 87 adet disk ve 308 adet sıyırıcı değişimi gerçekleştirildiği anlaşılırken TBM 2 için 106 adet disk ve 89 adet sıyırıcı değişimi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle TBM 1 için m/disk tüketimi 11,7 m olurken TBM 2 için bu sayı 9,3 m/disk olmuştur. TBM 1 TBM 2’ye göre ağırlıklı olarak  $W_1$  ayrışma zonu içerisinde kazı yaptığından disk tüketiminin TBM 2’den düşük çıkması şaşırıcı gibi görülebilir. Ancak TBM 1’in tamamen 17” CCS tipi disklerle sahip olduğu TBM 2’nin ise sadece çevrede 16,5” CCS disk kullandığı ve ayna disklerinin 15” CCS ve V tipi disklerin bir karışımından oluştuğu unutulmamalıdır. Disk ebatlarının büyümesi ve CCS tipi disk kullanımı disklerin hem aşınma dayanımını hem de yük alma kapasitesini artırdığından ortaya çıkan sonuçlar tutarlıdır.

Yine Tablo 4.5’den elde edilen bir başka ilginç bulgu ise sıyırıcı tüketimlerinde gözlenmiştir ve ayrışma zonlarının etkisi açısından önem arz etmektedir. TBM 1 ve TBM 2 arasında sıyırıcı ömrü açısından büyük farklar gözlenmiştir. TBM 1 için sıyırıcı başına kazılan metre 3,3 m iken TBM 2 için bu sayı 11,1 m olmuştur. Sıyırıcı başına toplam kesici kafa turu açısından bakıldığında ise TBM 1 204,8 tur/sıyırıcı değerini alırken TBM 2 için bu değer

749,9 sıyrıcıdır. TBM 1'in bu kesici kafa tahrik sistemiyle ilgili limitlerden ötürü bu bölgede ortalama RPM değeri 1,7 olurken TBM 2 için bu değer 2,3 RPM'dir. Düşük RPM ortalaması TBM 1'in kazı hızıyla düzeltiğinde penetrasyon değerinin 16,2 mm/rev'e çıkmasına sebep olmuştur. TBM 2 için ise bu değer 14,8'dir. TBM 1 için 15 mm/rev değeri üzerine sıkça çıktığı anlaşılan yüksek penetrasyon değeri kazılar sırasında disk ve sıyrıcılar arasındaki mesafeyi riskli bir biçimde yaklaştırmaktadır. Disk aşınma durumları da göz önüne alındığında muhtemelen TBM 1'in sıyrıcıları kazılar sırasında sağlam kazı aynasına temas etmektedir. Bu da TBM 1'e ait olan sıyrıcıların ağırlıklı olarak W<sub>1</sub> ayrışma zonunda sınıflandırılmış kumtaşlarında oldukça kısa sürede aşınması veya kırılması sonucunu doğurmuştur.

Şekil 4.20'de TBM 1 ve TBM 3 için Göztepe – Mahmutbey arasında yapılan kazılarda karşılaşılan litolojik birimlerin ve ayrışma zonlarının yüzdelik dağılımları verilmiştir.

TBM 1 için W<sub>1</sub> ayrışma zonu %27'lik bir orana sahiptir. W<sub>2-3</sub> ayrışma zonu ise %68 ve W<sub>3-4</sub> ayrışma zonu ise %5'lik paylara sahiptir. Öte yandan TBM 3 için W<sub>3-4</sub> ayrışma zonunun payı %2 iken W<sub>2-3</sub> ayrışma zonunun payı %98 olmuştur. Litolojik birimlere bakıldığında ise bölgede ağırlıklı olarak kıltaşlarının ve siltaşlarının yer aldığı görülmektedir.



**Şekil 4. 20:** Göztepe – Mahmutbey İstasyonları arası ayrışma zonlarının ve litolojik birimlerin yüzdelik dağılımları.

Tablo 4.6'da Göztepe – Mahmutbey İstasyonları arasındaki bölgede TBM 1 ve TBM 3'e ait disk tüketimi değerlendirmelerinin bir özeti sunulmuştur.

Tablo 4.6 incelendiğinde TBM 1 için toplam değişen disk sayısının 74 ve toplam değişen sıyrıcı sayısının 181 olduğu görülmektedir. TBM 3 için ise toplam değişen disk sayısı 109 ve toplam değişen sıyrıcı sayısı ise 176 olmuştur.

**Tablo 4. 6:** Göztepe – Mahmutbey İstasyonları arası TBM 1 ve TBM 2 için disk tüketimi verilerinin karşılaştırma tablosu

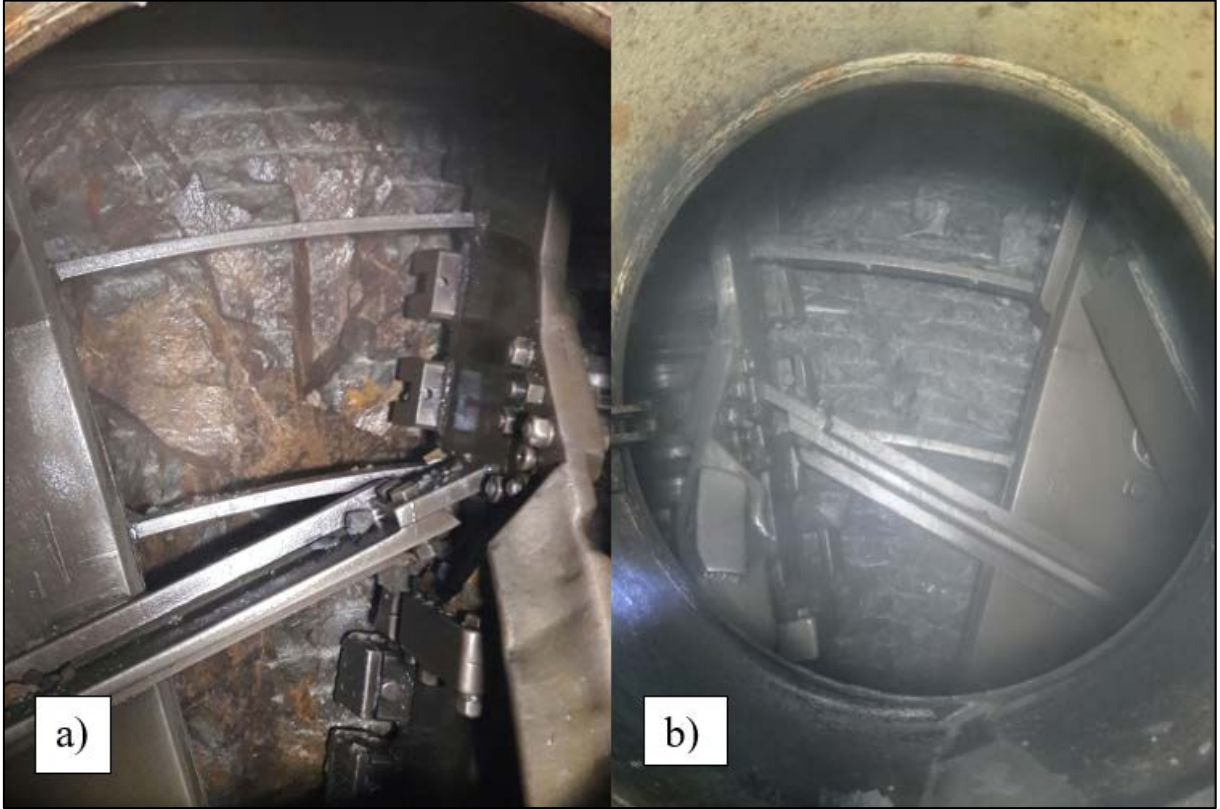
	Ortalama RPM	Ortalama Penetrasyon	Ortalama Tork (kN.m)	Ortalama. İtme Kuvveti Thrust (kN)	Değişen Disk (Adet)	Değişen Sıyırıcı (Adet)
TBM 1	1,71	23,1	2616	14767	74	181
TBM 3	2,7	12,2	1237	15753	109	176
	Toplam Mesafe (m)	Toplam CH Turu	(m/Disk)	(Tur/Disk)	(m/Sıyırıcı)	Tur/Sıyırıcı
TBM 1	1164	50385	15,7	680,8	6,4	278,4
TBM 3	1131	92373	10,3	847,0	6,4	524,8

Disk tüketimi açısından değerlendirildiğinde TBM 1'in disk başına kazı mesafesi 15,7 metre iken TBM 3 için bu sayı 10,3 metre olmuştur. Aradaki yaklaşık 1,5 katlık bu fark TBM'lerin RPM'leri ile ilişkilidir. TBM 1 ortalama 1,71 RPM'de kalırken TBM 3 bu bölgede kazılarını ortalama 2,7 RPM'de gerçekleştirmiştir. Disk başına kesici kafa turu değerleri de bu etkiyi doğrular niteliktedir. Başka bir ifadeyle TBM 1 aynı sayıda kesici kafa turuyla TBM 3'e göre daha fazla ilerleme yapmıştır. Bu da ortalama penetrasyon değerlerinde görülebilmektedir. TBM 1 23,1 mm/rev gibi bir ortalama penetrasyon gerçekleştirmişken TBM 3 için bu değer 12,2 mm/rev gibi daha normal bir değerdir. Burada önemli olan bir önceki incelemedeki Tekstil Kent – Yüzyıl İstasyonları arasındaki farklı olarak TBM 1'in yüksek penetrasyonun disk ve sıyırıcı tüketimine etki etmemiş olmasıdır. Bunun da başlıca sebebi bölgede aşındırıcı özelliği ve yüksek dayanımı olan kumtaşlarının yer almamasıdır.

Öte yandan sıyırıcı tüketimleri tekrar incelendiğinde TBM 1 ve TBM 3 için metre başına sıyırıcı tüketimi 6,4 m/sıyırıcı ile aynı gibi görünse de sıyırıcı başına kesici kafa turu değerlerine bakıldığında arada %50'ye yakın bir fark yer almaktadır. TBM 3 sıyırıcı başına 524,8 kesici kafa turu atarken TBM 1 için bu sayı 278,4 olmuştur. Yüksek penetrasyon değeri beklendiği şekilde sıyırıcı tüketimini arttırmıştır.



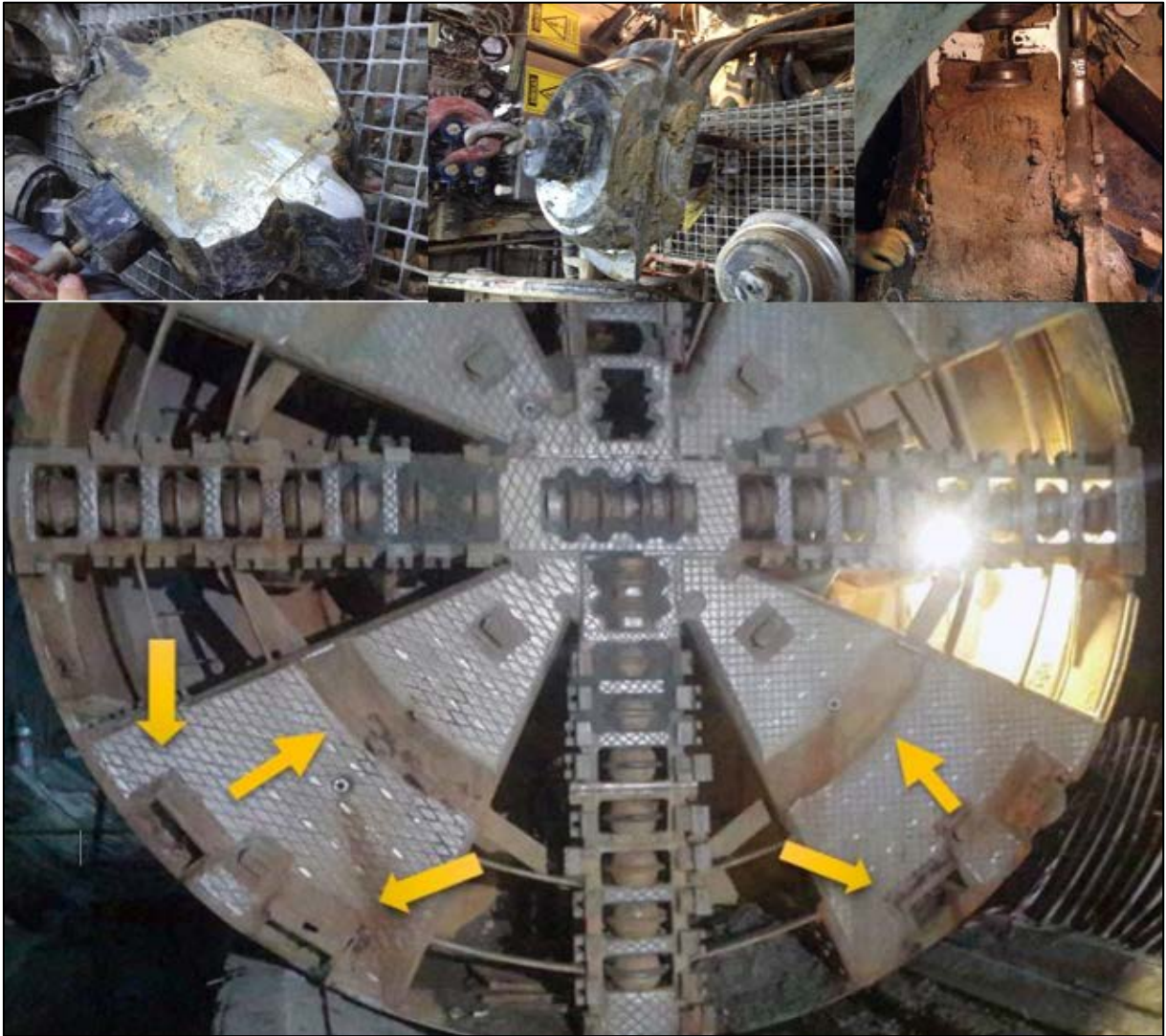
Disk ve sıyrıcı tüketimleriyle ilgili olarak ayrışma zonlarının etkisinden ziyade litolojik birimlerin ne olduğu daha fazla önem arz etmektedir. Örnek olarak  $W_1$  olarak sınıflandırılmış sağlam kireçtaşı ile yine  $W_1$  olarak sınıflandırılmış kuvars içeriği yüksek kumtaşı arasında keski tüketimi açısından büyük farklılıklar olması doğaldır. Yine bu noktadan yola çıkarak  $W_1$  ayrışma derecesine sahip bir kumtaşının  $W_{2-3}$  ayrışma derecesi gözlenen bölümlerinin keski tüketimi açısından benzer bir davranış sergilemesi beklenmektedir.  $W_{2-3}$  ayrışmaya bağlı olarak gelişen bloklu ve girintili çıkıntılı homojen olmayan ayna yüzeylerinin (Şekil 4.21) kazılar esnasında disklere gelen ani yükleri (impact) artıracığı ve titreşim seviyesini yükselteceği, kırılma, çatlama, hub hasarı ve bağlantı elemanlarında hasara sebep olarak dolaylı yoldan keski tüketimini olumsuz etkileyeceği unutulmamalıdır.



**Şekil 4. 21:** Homojen olmayan ayna yüzeyi (a) ve homojen ayna yüzeyi (b).

$W_{3-4}$  ayrışma durumu için de yukarıda yapılan hipoteze benzer bir durum geçerlidir.  $W_{3-4}$  olarak sınıflandırılabilen gevşek killer kesici kafa ekipmanları üzerinde tahrip edici bir etki göstermezken  $W_{3-4}$  ayrışma grubuna ait olan kuvars içeriği yüksek kumlu bölgeler oldukça yıkıcı etkilere sahip olabilir. Özellikle EPB TBM'ler için ayna basıncı etkisi de dikkate alındığında bu durum oldukça tehlikeli olabilmektedir.

TBM 2 Yenimahalle – Mahmutbey İstasyonları arasındaki kazılarında  $W_{3-4}$  olarak sınıflandırılmış suya doymun kumlu bir bölgeden geçmiş ve hem kesici kafada hem de kesici kafa ekipmanlarında projenin devamını da etkileyebilecek ciddi hasarlarla karşılaşmıştır. Ayna basıncı etkisiyle birlikte aşırı artan ve 8 saati geçen kazı süreleri rapor edilmiştir. TBM'in ilerletilemeden kum içerisinde kesici kafanın çok uzun süreler dönmesi sonucu gerçekleşen bu hasarla ilgili görseller Şekil 4.22'de verilmiştir.



**Şekil 4. 22:** TBM 2 için  $W_{3-4}$  ayrışma zonuna ait kumlu bölgede gerçekleşen kesici kafa hasarları  
Şekil 4.22 incelendiğinde disklerin neredeyse rulmana kadar tamamen aşınıp eridiği görülmektedir. Aynı zamanda disklerdeki tek taraflı aşınma disklerin kum içerisinde yeterli dönme kuvvetine ( $F_R$ ) maruz kalmadığına ve çalışmadığına işaret etmektedir. Kesici kafa üzerindeki aşınmalar sıyırıcıların da bir süre sonra aşınarak işlevini kaybetmiş olduğunu

gösterirken sıyrıcıların devre dışı kalmasıyla kesici kafa gövde bölümünde ve disk yataklarında çok ciddi aşınmalar gerçekleşmiştir. Suyu doygun kumlu bölgede gerçekleşen bu hasarlara olası ayna stabilitesi kaygıları ve riskleri nedeniyle zamanında ve yeterli şekilde müdahale edilememiş ve hasarın derecesi hızla artmıştır.

Kesici kafa disk yataklarında gerçekleşen bu gibi hasarlar disk yataklarının değiştirilmesini gerektirmektedir. Disk yataklarının pozisyonu ve konumlandırılması (açısı) çok hassas bir işlem olduğundan yer altı koşullarında sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi oldukça güçtür. Genellikle bu gibi hasarların onarılmasında kesici kafa ana rulmandan sökülerek yerde teraziye alınmalı ve disk yataklarının değişimi bu şekilde gerçekleştirilmelidir.

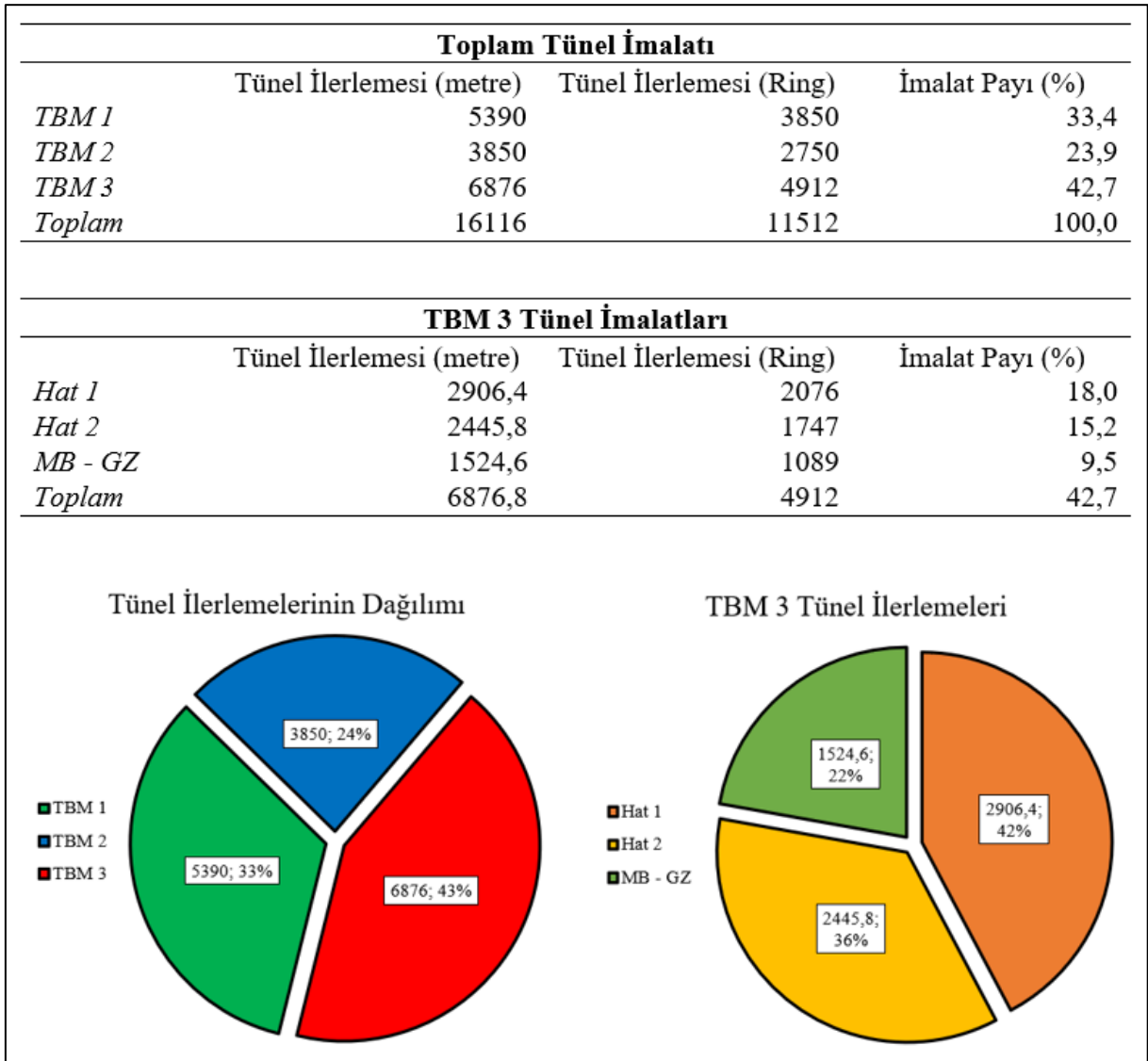
Disk yataklarında oluşabilecek açılmalık bozukluklar disklerin aynayla temasında oluşan normal kuvvetin ( $F_N$ ) aynaya dik oluşmamasına sebep olacak ve disklerde yük dengesizliği sebebiyle kronik kırılma ve kitleme problemleri gelişebilecektir.

TBM 2'nin durumunda söz konusu hasardan sonra varılan ilk istasyon NATM tipi kapalı istasyon olduğundan yukarıda bahsedilen işlemi gerçekleştirecek alan bulunamamış ve TBM 2 bir sonraki istasyon olan Tekstilkent İstasyonu'na kadar sadece geçici bir tamirat işlemi ile ulaşmaya çalışmıştır. Hasarlı bir kesici kafayla ağırlıklı olarak  $W_1$  ve  $W_{2-3}$  kumtaşlarından oluşan (yaklaşık 1000 metre) mesafeyi kat ederken 227 adet disk değiştirilmiştir. Bu 227 adet diskin sadece 108 adedi normal aşınma sebebiyle değişmiştir. Başka bir deyişle 119 adet diskin büyük bir bölümü  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda gelişen kesici kafa hasarı ve sonrasında gelen  $W_1 - W_{2-3}$  ayrışma zonuna ait kumtaşlarının yıpratıcı etkisi altında kırılma, kütleşme, göbek ve rulman hasarı gibi sebeplerle değişmiştir. Ek olarak kesici kafa bağlantı kollarında aşırı yük ve yük dengesizliği dolayısıyla mekanik yıpranmalar ve yorulma hasarları gelişmiştir.

Tekstilkent İstasyonu'nda yapılan incelemelerde TBM 2 kesici kafada gelişen hasarın artık geri döndürülemez boyutta olduğuna karar verilmiş ve kesici kafa yine İstanbul'da tünel kazılarında kullanılmış aynı çapta, marka ve modelde bir EPB TBM'in kesici kafasıyla değiştirilmiştir. Meydana gelen bu durum ciddi zaman kayıplarına neden olarak projenin tüm seyrini değiştirmiş, ayrışma derecesinin kesici kafa ve kesici kafa ekipmanları üzerinde oluşturabileceği doğrudan ve dolaylı etkiler için de iyi bir örnek de teşkil etmektedir.

#### 4.6. TBM'LERİN İMALAT PERFORMANSLARI

Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi'nin delme tünellerinin açılmasında kullanılan TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için vardiyalık, günlük ve aylık raporlardan elde edilen imalat verileri derlenmiştir. Derlenen imalat verilerden aylık ortalama tünel ilerlemeleri, aylık en iyi tünel ilerlemeleri, günlük ortalama tünel ilerlemeleri ve günlük en iyi tünel ilerlemeleri gibi istatistikler elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Proje boyunca delme tüneller için toplam ekonomik girdiyi oluşturan toplam tünel ilerlemesinin aylara bağlı olarak gelişimi ve TBM 1, TBM 2 ve TBM 3'ün bu toplam ilerlemedeki payları ortaya koyulmuştur.



Şekil 4. 23: Tünel imalatlarının TBM'ler arasındaki dağılımı.

Aynı zamanda duraklamalar, arızalar, istasyon geçişleri, montaj/demontaj ve nakliye işlemleri, lojistik faaliyetlerden kaynaklanan imalat azalışları da ayrıca incelenmiştir. TBM'ler için makinadan faydalanma hesaplamaları yapılmış ve karşılaştırmalı olarak neden – sonuç ilişkileri ile birlikte değerlendirilmiştir.

TBM 1, TBM 2 ve TBM 3'ün proje boyunca gerçekleştirmiş olduğu tünel ilerlemelerinin, başka bir deyişle imalatların verileri ve grafiksel gösterimleri Şekil 4.23'de verilmiştir.

TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 proje boyunca sırasıyla 5390 metre (3850 ring), 3850 metre (2750 ring) ve 6876 metre (4912 ring) tünel ilerlemesi gerçekleştirmiştir. Toplam tünel ilerlemesi ise 16116 metre (11512 ring) olarak gerçekleşmiştir. TBM 1, TBM 2 ve TBM 3'ün gerçekleştirmiş oldukları ilerlemelerin toplam imalat içindeki yüzdelik payları ise sırasıyla %33, %24 ve %43 olarak belirlenmiştir.

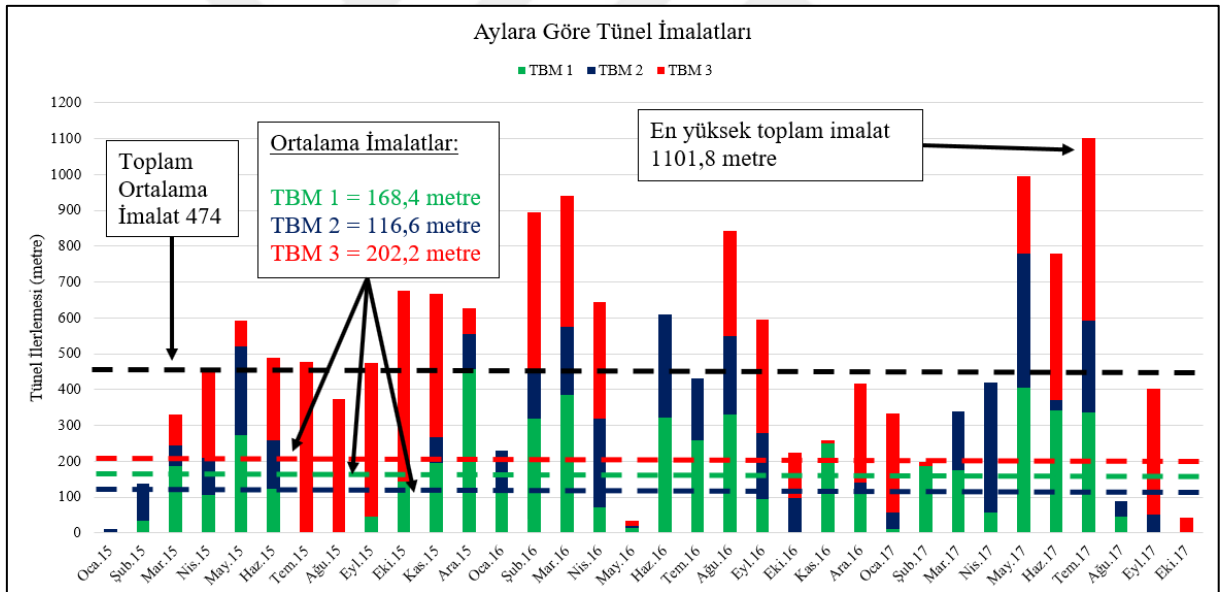
TBM 3 kazılarına Yenimahalle – Veysel Karani istasyonları arasında Hat 1'de başlamıştır. Bu kısımda istasyonlar TBM geçişine hazır olmadığı için zaman kaybetmemek adına proje yönetimi tarafından TBM 3'ün istasyonları da kazarak geçmesine karar verilmiştir. Böylelikle TBM 3 Yenimahalle – Veysel Karani İstasyonları arasında Hat 1'de 2906 metre (2076 ring) tünel ilerlemesi gerçekleştirmiştir. Bunu akabinde sökülüp taşınmış ve Yenimahalle İstasyonu'nda yeniden birleştirilerek aynı güzergahı Hat 2 üzerinde kazmıştır. Fakat bu kez Hat 1'de olduğu gibi istasyonları kazarak değil istasyon geçişi yaparak geçmiştir. Sonuç olarak Hat 2'de TBM 3, 2445 metre (1747 ring) tünel ilerlemesi gerçekleştirmiştir. Hat 1 ve Hat 2'deki metraj da görülen Hat 1'de kazılarak geçilen istasyonlardan (Kazım Karabekir ve Akşemsettin İstasyonları) kaynaklanmaktadır.

TBM 3 kazılarının tamamlanmasının ardından proje yönetimi projenin bitiş süresini kısaltmak amacıyla TBM 3'ün Mahmutbey – Göztepe arasındaki kısmı Hat 2 üzerinde kazmasına karar vermiştir. Başka bir deyişle TBM 2 ve TBM 3 aynı hat üzerinde birbirlerine doğru kazı yapar duruma gelmiştir. TBM 3'ün Hat 2 üzerinde Mahmutbey – Göztepe İstasyonları arasında yapmış olduğu kazıların toplam mesafesi ise 1524 metre (1089 ring) olarak gerçekleşmiştir. TBM 3 tüm imalatlar içerisindeki %43'lük payı ile projenin en çok imalat gerçekleştirmiş olan TBM'i olmuştur. TBM 3'ün Yenimahalle – Veysel Karani İstasyonları arasında Hat 1'deki kazılarının tüm imalatlar içerisindeki payı %18, aynı güzergahtaki Hat 2'deki kazılarının tüm imalatlar içerisindeki payı %15,2 ve son olarak Yenimahalle – Mahmutbey

kısımında Hat 2’de gerçekleştirmiş olduğu kazıların tüm imalatlar içerisindeki payı ise %9,5 olmuştur.

Projede ilk TBM kazısının ve tünel imalatının başladığı tarih Ocak 2015’tir. İlk önce TBM 2 kazıya başlamış, ardından Şubat 2015’te TBM 1 tünel kazılarına başlamıştır. TBM 3 ise Mart 2015 tarihinde kazılarına başlamıştır. Kazılarını ilk tamamlayan TBM, Ağustos 2017 tarihinde TBM 1 olmuştur. TBM 1, Eylül 2017 tarihinde TBM 2 ve Ekim 2017 tarihinde ise TBM 3 izlemiştir.

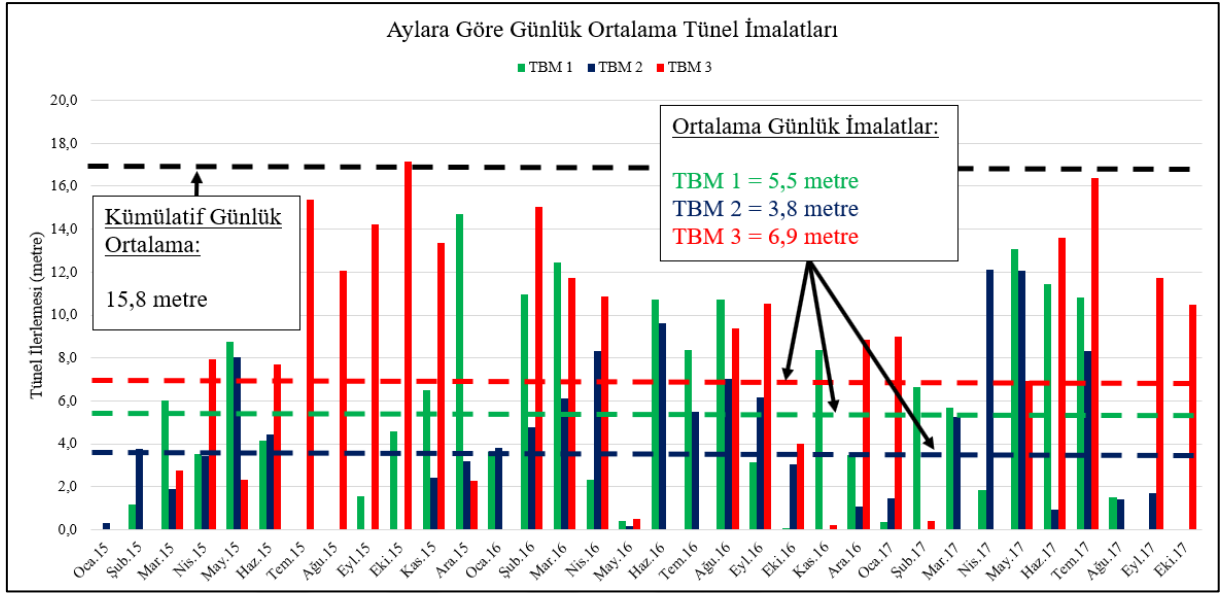
Şekil 4.24’de her 3 TBM’in de Ocak 2015 – Ekim 2017 tarihleri arasında gerçekleştirmiş oldukları imatları gösteren sütun grafik verilmiştir. En yüksek aylık toplam tünel imalatı değeri olan 1101,8 metreye Temmuz 2017 tarihinde ulaşılmıştır. Bu tarihte TBM 1 336 metre, TBM 2 257,6 metre, TBM 3 ise 508,2 metre tünel imalatı gerçekleştirmiştir.



**Şekil 4. 24:** Aylara göre tünel imalat miktarları.

Aylık ortalama tünel imalatı değerleri metre bazında ve arıza/duraklamalar ile çalışılmayan/tatil olan günler dahil olarak hesaplanmaktadır. Hesaplamalar her bir TBM için TBM’in ilk kazıya başladığı ay ile tüm kazılarını bitirdiği ay aralığı olarak yapılmıştır. Proje boyunca gerçekleşen aylık toplam tünel imalatlarının ortalaması 474 metredir. TBM 1 için aylık ortalama tünel imalatı değeri 168,4 metre iken bu sayı TBM 2 için 116,6 metre olmuştur. TBM 3 ise diğer TBM’lere göre 202,2 metre ile daha yüksek bir aylık ortalama tünel imalatı değerine erişmiştir. Gerçekleşmiş olan aylık tünel imalatı ortalamaları proje

öncesi projeksiyonları olan TBM başına 8, 10, 12 metre günlük ortalama ilerleme üzerinden belirlenmiş TBM başına aylık ortalama 240, 300 ve 360 metre tünel imalatı tahminlerinin altında kalmıştır.



**Şekil 4. 25:** Aylara göre günlük ortalama tünel imalatları.

Şekil 4.25'te her bir TBM için gerçekleştirilmiş olan günlük ortalama tünel ilerlemeleri aylar bazında verilmiştir. Kümülatif günlük ortalama ilerleme 15,8 metre olarak gerçekleşmiştir. Bütün aylar bazında TBM 1'in günlük ortalama ilerlemesi 5,5 metre, TBM 2'nin günlük ortalama ilerlemesi 3,8 metre ve TBM 3'ün günlük ortalama ilerlemesi ise 6,9 metredir.

Tablo 4.7'de her bir TBM bazında ve kümülatif bazda "En İyi Aylık İlerleme", "En İyi Günlük İlerleme", "Ortalama Aylık İlerleme" ve "Ortalama Günlük İlerleme" değerleri verilmiştir.

Yine aylık ortalamaların belirlenmesinde olduğu gibi günlük ortalamaların belirlenmesinde de duraklama/arızalar ile tatil günleri de hesaplamalara dahil edilmiştir. TBM'lerin ortalamalar bazında ilerleme performanslarının projeksiyonlardan düşük gözlenmesi (günlük ortalama 8, 10 ve 12 metre) çoğunlukla TBM'lerin çeşitli sebepler ile kazı faaliyetinde bulunmadığı zaman dilimlerinin fazlalığından kaynaklanmaktadır. Her bir TBM için anlık ilerleme hızı AR, proje ortalaması olarak 29 mm/dk olduğu önceki bölümlerde anlatılmıştır. Anlık ilerleme hızı ortalamaları aynı olan 3 TBM için makro ölçek olarak kabul edilebilecek günlük ve aylık

ortalamalardaki büyük farklılıklar TBM'lerin makinadan faydalanma ve kullanım verimleri ile açıklanmalıdır.

**Tablo 4. 7:** Aylık ve günlük bazda en iyi ve ortalama tüneller ilerlemesi değerleri.

TBM adı	En İyi Aylık İlerleme (m)	En İyi Günlük İlerleme (m)	Ortalama Aylık İlerleme (m)	Ortalama Günlük İlerleme (m)
TBM 1	456	40,6	168,4	5,5
TBM 2	373	32,2	116,6	3,8
TBM 3	532	30,8	202,2	6,9
Toplam	1101,8	N/A	474	15,8

Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi İstanbul gibi yoğun nüfusa sahip bir şehirde ve şehrin merkezi kabul edilebilecek bir lokasyonda yer almaktadır. Projenin gerçekleştirilme aşamasında ortaya çıkan lojistik problemler, tüneller ve istasyonların yapımı sırasında oluşan yüzey deformasyonları, tüneller kazıları sırasında ortaya çıkan çok yüksek miktardaki pasanın döküm sahalarına transferi sırasında karşılaşılan güçlükler çok ciddi zaman ve imalat kayıplarına sebep olabilmektedir. Tablo 4.8'de Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesi'nde yukarıda bahsedilen sorunlar sebebiyle gerçekleşen ve TBM'lerden kaynaklanmayan imalat kayıpları özetlenmiştir.

Tablo 4.8'de görüldüğü gibi TBM 1 için 304 gün, TBM 2 için 364 gün ve TBM 3 için 374 günlük oldukça yüksek bir kayıp zaman söz konusudur. Diğer iki TBM'den daha fazla imalat gerçekleştiren TBM 3 için en büyük kayıp zaman istasyon ve montaj/demontaj işlerinde gözlenmiştir. TBM 1 ve TBM 2 için ise yüzey deformasyonu kaynaklı kayıplar dikkat çekicidir. Ek olarak hafriyat lojistiği kaynaklı problemler TBM 1 ve TBM 2 için 20 ve 25 gün olarak gözlenirken TBM 3 için bu rakam 51 gün olmuştur.



**Tablo 4. 8:** TBM'lerden kaynaklanmayan zaman kayıpları.

TBM Adı	İstasyon Geçişi ve Montaj/Demontaj Sebebiyle Kayıplar	Yüzeyde Deformasyon Sebebiyle Kayıplar (gün)	Hafriyat Döküm Problemi Sebebiyle Kayıplar (gün)	Toplam Kayıp Süre (gün)
<i>TBM 1</i>	164 gün (4 istasyon)	115	25	304
<i>TBM 2</i>	188 gün (3 istasyon)	156	20	364
<i>TBM 3</i>	318 gün (3 istasyon ve 2 montaj/demontaj)	5	51	374

İstasyon geçişleri TBM'lerin kazı yapmadan, genellikle betondan hazırlanmış bir kızaklama üzerinde ilerletildiği ve istasyonun bir ucundan diğerine götürüldüğü işlere verilen isimdir. İstasyon geçişlerinin süresi istasyonun uzunluğuna ve istasyonda yapılacak bakım/onarım işlemlerine bağlı olarak çok büyük değişiklikler gösterse de geçmiş tecrübelerden yola çıkılarak bir metro projesinde istasyon geçişleri için 30 günlük bir süre yeterli kabul edilmektedir. TBM montaj/demontaj işleri ise genellikle 45 gün gibi bir sürede tamamlanabilmektedir. Ancak bu sürelerin gerçekleşebilmesi için TBM'lerin istasyona ulaştıklarında istasyonların TBM'lerin geçişine hazır olması, başka bir deyişle istasyondaki inşaat işlerinin ve beton kızak işlerinin tamamlanmış olması gerekmektedir. Aksi takdirde TBM bu işlerin tamamlanmasını beklemek zorunda kalacaktır. TBM 1, TBM 2 ve TBM 3'te görülen yüksek istasyon geçişi kayıpları istasyonların TBM geçişine hazır olmamasından ve TBM'lerin istasyon hazırlıklarını beklemesinden kaynaklanmaktadır. Metro projesi gibi entegre ve kapsamlı projelerde farklı birim ve işlerin birbiri üzerinde olan etkisi de bu sayede anlaşılmaktadır.

TBM 1 ve TBM 2 için gözlenen yüzey deformasyonu sebepli kayıplar TBM'lerin stabil olmayan zemin koşullarda yüzeyden yapılan okumalarda gözlenen riskli durumlar nedeniyle ek inceleme ve önlemler (enjeksiyon, tahliye, yol kapama v.b) sonucu oluşan zaman kayıplarıdır. Geoteknik ve ölçüm ekipleri tarafından yüzeyde veya üst yapılarda riskli bir durum tespit edildiğinde TBM kazı faaliyetleri geçici olarak durdurulabilmektedir. Nitekim Yenimahalle – Karadeniz İstasyonları arasında  $W_{3-4}$  olarak sınıflandırılmış suya doygun kumlu bölgenin kazılarında TBM ilerlemeleri kontrollü olarak yapılmış, kazı faaliyetleri

yüzeiden enjeksiyon çalışmaları ile desteklenmiştir. TBM 1 ve TBM 2 için bu sınıfta yer alan kayıpların büyük bir kısmı bu bölgenin kazıları sırasında gerçekleşmiştir.

Şehir içi tünel projelerinde ortaya çıkan yüksek miktarda (6,5 m kazı çapına sahip TBM'ler için kazı başına ortalama  $55 \text{ m}^3 - 60 \text{ m}^3$ ) suya doymun hafriyatın şantiyelerde yer alan geçici döküm sahalarından şehir dışındaki kalıcı döküm sahalarına nakledilmesi en büyük lojistik problemlerden birini teşkil etmektedir. Şehir içinde yer alan şantiyelerdeki alan kısıtlaması geçici döküm sahalarının kapasitelerinin düşük kalmasına neden olmaktadır. Hafriyat kamyonları için şehir içi trafik kısıtlamaları, trafik yoğunluğu, kalıcı döküm sahalarının yoğunluğu, hava ve yağış durumuna bağlı olarak kalıcı döküm sahalarının kapatılması gibi durumlar sebebiyle kalıcı döküm transfer faaliyetleri aksadığında şantiyelerde yer alan geçici döküm sahalarının kapasiteleri hızla dolmaktadır. Geçici döküm sahasının kapasitesi dolduğunda ise kazı faaliyetlerine zorunlu olarak ara verilmek durumundadır. Tablo 4.7'de görülen döküm sahası kaynaklı duraklamaların da temel sebebi budur.

**Tablo 4. 9:** TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için makinadan faydalanma (utilization) değerleri.

TBM Adı	Genel Makinadan Faydalanma	Normalize Edilmiş Makinadan faydalanma
TBM 1	% 17,9	% 26
TBM 2	% 11,7	% 18,3
TBM 3	% 18	% 27,6

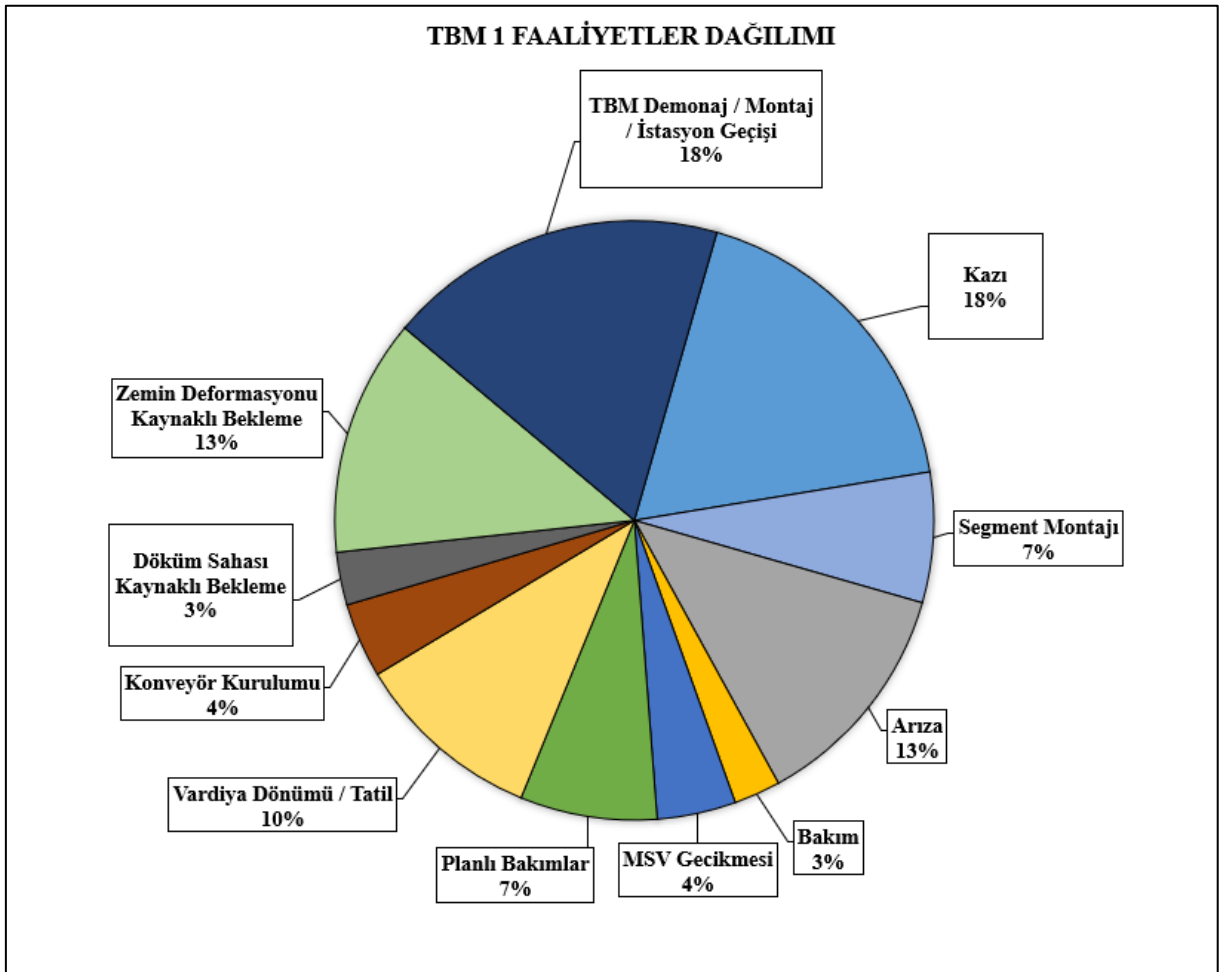
$$\text{Genel makinadan faydalanma (utilization)}(\%) = (\text{Kazı faaliyetleri (dk)} / \text{Toplam süre (dk)}) \times 100$$

$$\text{Normalize edilmiş makinadan faydalanma (\%)} = (\text{Kazı faaliyetleri (dk)} / (\text{Toplam süre (dk)} - \text{Deformasyon ve İstasyon geçişi kaynaklı Süreler (dk)})) \times 100$$

Tablo 4.9'da TBM'ler için TBM'den faydalanma oranını (utilization) değerleri verilmiştir. Genel makinadan faydalanma değeri yukarıda bahsedilen istasyon geçişleri, yüzey deformasyonu kaynaklı beklemler gibi kayıpları da kapsarken normalize edilmiş makinadan faydalanma değerinin hesaplanmasında istasyon geçişleri ve yüzey deformasyonu kaynaklı kayıplar gibi TBM işletmesiyle doğrudan ilgili olmayan kayıplar hesaplamaya dahil

edilmemiştir. Döküm sahası sebebiyle gerçekleşen kayıplar ise şehir tünelciliğinin bir parçası olduğundan her iki hesaplamada da yer almaktadır.

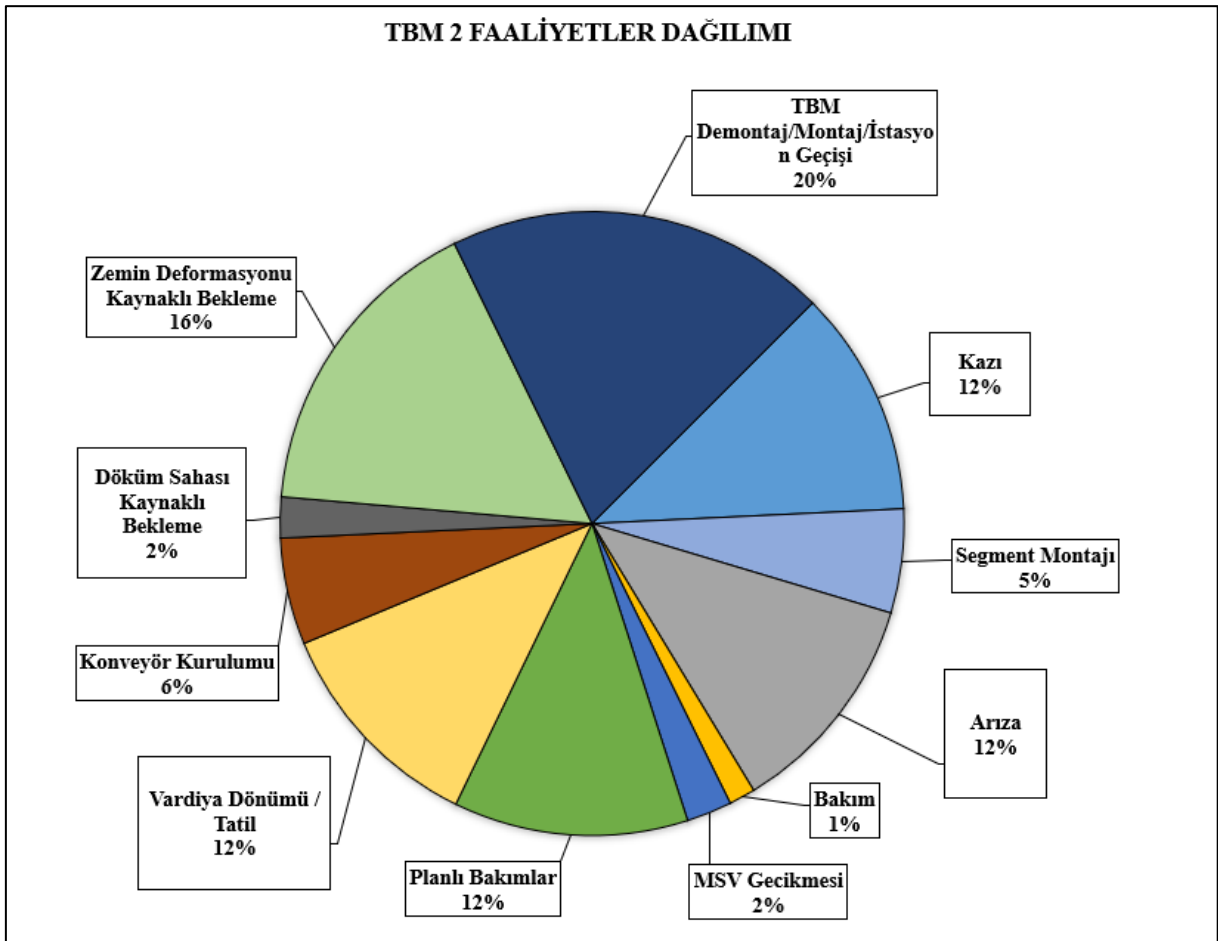
Tablo 4.9’da görüldüğü gibi her 3 TBM’inde genel makinadan faydalanma değerleri %20’nin altında kalmıştır. Öte yandan makinadan faydalanma değeri TBM kaynaklı olmayan kayıplar çıkarılarak normalize edildiğinde TBM 1 için %26, TBM 2 için %18,3 ve TBM 3 için %27,6 değerlerine ulaşılmıştır.



**Şekil 4. 26:** TBM 1 için gerçekleştirilen imalat faaliyetlerinin yüzdeleri dağılımları.

TBM’lerden kaynaklanan başlıca bakım/arıza, disk değişimi, lojistik faaliyetler gibi kayıplar da ayrıca incelenmiştir. Üretim ve vardiya raporlarından derlenen verilerle her bir TBM için gerçekleştirilen faaliyetlerin dağılımları Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de yer alan pasta grafiklerde verilmiştir.

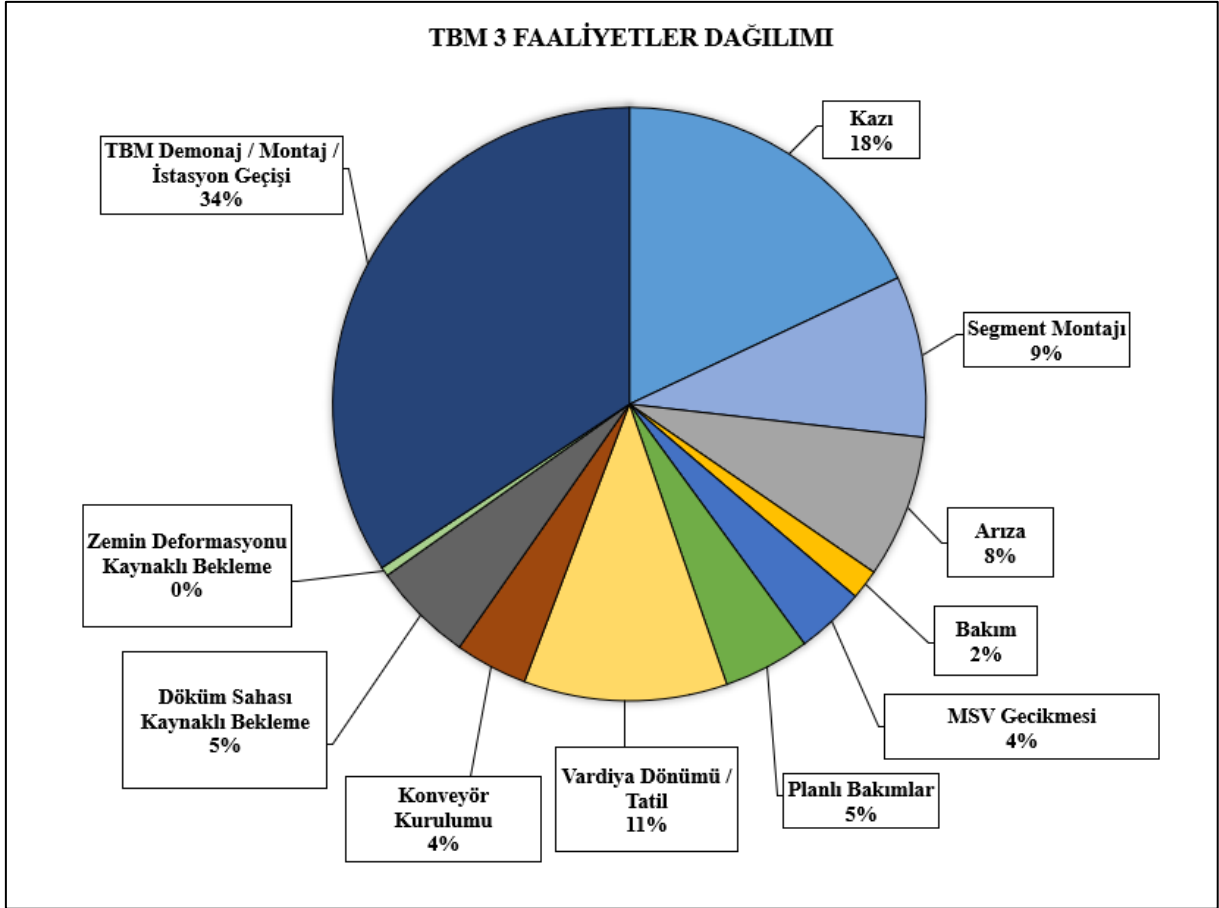
Şekil 4.26 incelendiğinde TBM 1 için gerçekleştirilmiş olan faaliyetlerin %18'inin kazı faaliyeti olduğu görülmektedir. Kazı faaliyetleri yine %18'lik orana sahip olan TBM istasyon geçişi faaliyetleri ile en yüksek orana sahip olan faaliyetlerdir. Arıza faaliyetlerinin oranı toplam süre içerisinde %13'lük bir yer kaplamaktadır. Bakım ve planlı bakım faaliyetleri birlikte %10'luk bir orana sahip olmuştur. Çalışılmayan sürelerden olan vardiya dönümleri ve tatillerin payı toplam içerisinde %10'dur. Döküm sahası kaynaklı beklemlerin oranı %3 iken yüzeyde gerçekleşen veya gerçekleşme riski olan deformasyonlardan ötürü açığa çıkan sürelerin toplama oranı %13 olarak gözlenmiştir.



**Şekil 4. 27:** TBM 2 için gerçekleştirilen imalat faaliyetlerinin yüzdeler dağılımları.

Şekil 4.27'de TBM 2'ye ait faaliyetlerin sürelerinin pasta grafiği verilmiştir. Kazı faaliyetlerinin toplam içerisindeki oranı TBM 2 için %12 olmuştur. Arızaların oranı ise yine %12'dir. İstasyon geçişleri TBM 2 için %20 ile en yüksek oranda gerçekleşen faaliyet olmuştur. Bakım ve planlı bakım faaliyetlerinin toplamı %13 olarak gözlenmektedir. Çalışılmayan süreler olan vardiya dönümleri ve tatiller toplam içerisinde %12'lik bir paya

sahiptir. Deformasyon kaynaklı beklemler olarak sınıflandırılan süreler %16'lık bir orana ulaşmıştır ve bu oran aktif olarak kazı yapılan süreden fazladır.



**Şekil 4. 28:** TBM 3 için gerçekleştirilen imalat faaliyetlerinin yüzdeler dağılımları.

Şekil 4.28'de TBM 3 için proje boyunca gerçekleşen faaliyetlerin yüzdeler dağılımına yer verilmiştir. TBM 3 daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere en çok istasyonda bekleyen TBM olmuş ve proje boyunca iki montaj/demontaj işlemi görerek lokasyon değiştirmiştir. İstasyon geçişi ve montaj/demontaj gibi faaliyetlerin toplam içerisindeki payının %34 gibi yüksek bir değere ulaşması bu noktada şaşırtıcı değildir. TBM 3'ün aktif kazı faaliyetlerinin toplamdaki payı ise %18 olarak belirlenmiştir. Arızaların oranı %8'de kalırken planlı bakım ve bakım faaliyetlerinin toplamı %7 olarak saptanmıştır. Çalışılmayan süreler olan vardiya dönümü ve tatillerin toplam süreye oranı TBM 3 için %11'dir. Hafriyat döküm sahası kaynaklı problemlerden dolayı oluşan beklemlerin toplam süreye oranı ise %5 olmuştur. TBM 3 yüzey deformasyonu kaynaklı beklemlerin oranı açısından %1'in altındadır.

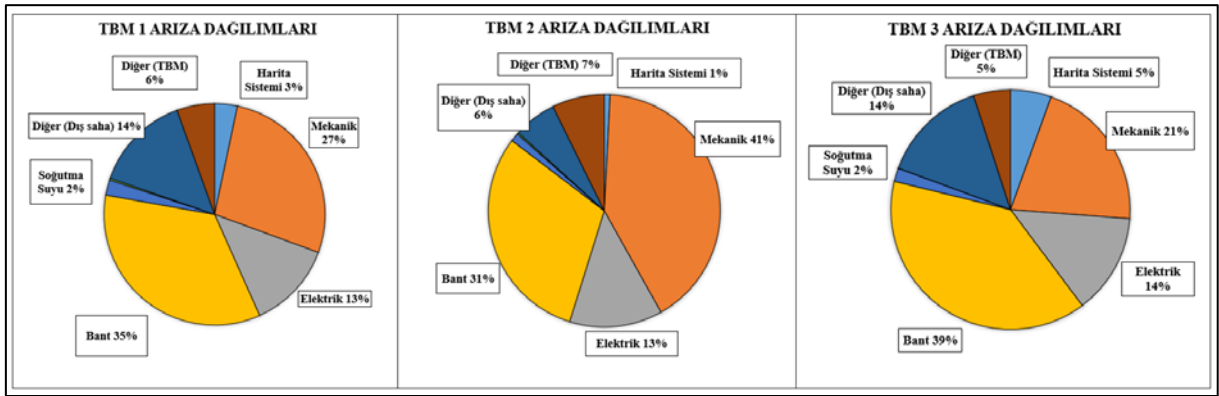
TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için faaliyet süreleri karşılaştırıldığında bazı önemli değerlendirmeler yapılabilmektedir. Projenin daha önceden kullanılmış ve revize edilmiş TBM'leri olan TBM 1 ve TBM 2'nin arıza oranları sırasıyla %13 ve %12'dir. Projenin yeni ve kullanılmamış TBM'i olan TBM 3'te ise bu oran %8'e düşmüştür. Başka bir deyişle yeni olan TBM'in eski olan TBM'lere göre arıza oranı %5 mertebesinde düşük gerçekleşmiştir. Planlı bakım ve bakım faaliyetleri incelendiğinde yine benzer bir tablo göze çarpmaktadır. TBM 1 ve TBM 2'nin planlı bakım ve bakım faaliyetlerinin oranları sırasıyla %10 ve %13 olmuştur. Öte yandan TBM 3 için bu değer %7'dir. En yaşlı TBM'den en yeniye doğru (TBM 2 > TBM 1 > TBM 3) bakım gereksinimi de kademeli olarak düşmektedir (%13 > %10 > %7).

Yine önemli kabul edilebilecek bir başka değerlendirme de TBM'lerin kazı ağırlıkları ve hafriyat kaynaklı kayıpları arasında gözlenmektedir. En çok kazı faaliyeti gerçekleştiren olan TBM 3 (%18) aynı zamanda döküm sahası kaynaklı beklemelerden (%5) en çok etkilenen TBM olmuştur. En az kazı faaliyet oranına (%12) sahip TBM 2 için bu değer %2, kazı faaliyet oranı %18 olan TBM 1 için ise %3'tür. Kazıların arıza, bakım veya başka sebeplerle duraksaması TBM'ler için ayrılmış olan geçici döküm sahalarının boşaltılması için de aynı zamanda bir fırsat yaratmaktadır.

Yüzey deformasyonlarla ilgili beklentiler TBM 1 ve TBM 2 için sırasıyla %13 ve %16 olarak gerçekleşirken TBM 3 için bu değer %1'in altında kalmıştır. Bu durumun iki farklı sebebi bulunmaktadır. Bunlardan ilki TBM 1 ve TBM 2'nin Yenimahalle – Karadeniz İstasyonları arasında geçmiş oldukları  $W_{3-4}$  olarak sınıflandırılmış suya doygun kumlu bölgenin EPB TBM'lerle ek önlemler olmadan kazılmaya çok uygun olmamasıdır. Bu nedenle bu bölgenin kazılarında yüzeyden enjeksiyon ve yoğun deformasyon ölçümleri gibi vakit kaybına sebep olan ek faaliyetler gerçekleştirilmiştir. TBM 3 bu tür bir litolojiden geçmemiştir. Bir diğer önemli neden ise TBM 1 ve 2'nin yan yana hatlarda önlü arkalı kazı yapmasıdır. Özellikle stabilite risklerinin olduğu bölgelerde TBM'lerin birbirlerinin kazı etki alanlarına girmemesi için arada belli bir mesafenin korunması gerekmektedir. Önde olan TBM herhangi bir sebeple kazı faaliyetini durdurduğunda arkadaki TBM'de aradaki mesafenin korunması için beklemeye alınmaktadır. Son olarak Mahmutbey – Göztepe İstasyonları arasında kalan kısmın kazılarında TBM 3 ve TBM 1 birbirlerini yan yana hatlarda karşılıklı geçmişlerdir. Bu geçiş esnasında yine kazı etki zonu prensibi dolayısıyla TBM 1 durdurulmuş ve TBM 3 kazıya

aralıksız devam etmiştir. Burada gerçekleşen bekleme TBM 1'e yüzey deformasyonu sınıflandırılmasında kaydedilmiştir.

TBM'lerin genel performans ve verimliliklerinin daha iyi anlaşılması için üretim ve vardiya raporlarında yer alan arıza kayıtları detaylı olarak incelenmiştir. TBM'ler için arıza durumu olarak girilen sürelerin hangi tip arızaya/duraklamaya karşılık geldiği de üretim ve vardiya raporlarında sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmadan yola çıkılarak faaliyet dağılımlarında olduğu gibi arıza grubunun içerisinde de arıza türlerinin süre bazında dağılımlarını görmek mümkün olmaktadır. Şekil 4.29'da bu dağılımlar pasta grafikler olarak verilmiştir.



Şekil 4. 29: TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için arıza dağılımları.

Şekil 4.29 incelendiğinde şüphesiz ki ortaya çıkan en önemli ayrışmalardan bir tanesi TBM'lerin arıza dağılımları içerisindeki mekanik arızaların paylarıdır. TBM 1 için mekanik arızaların toplam arızalar içerisindeki oranı %27 olurken TBM 2 için bu oran %41 ve TBM 3 için ise bu oran %21 olmuştur. En yaşlı TBM'den en genç olana gidildikçe (TBM 2 yapım yılı 1998, TBM 1 yapım yılı 2006, TBM 3 yapım yılı 2015) TBM'lerin mekanik arıza oranları da doğru orantılı olarak azalmıştır (TBM 2 %41, TBM 1 %27, TBM 3 %21).

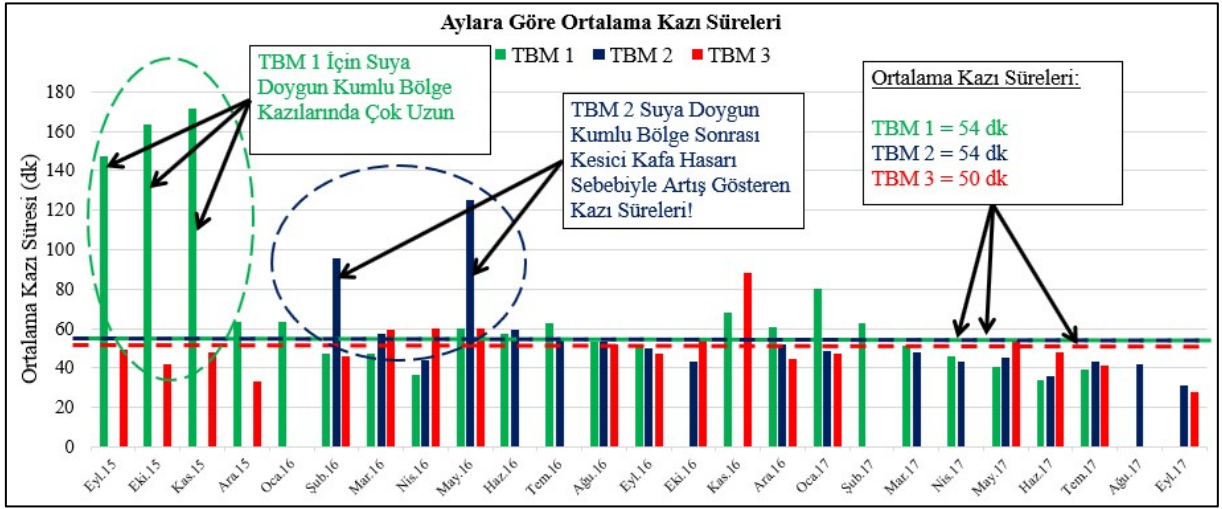
Her 3 TBM için de TBM bant konveyörü ve tünel bant konveyörü ile ilgili arızaların toplam arızalar içerisindeki birbirlerine yakın değerlerde (TBM 1 %35, TBM 2 %31, TBM 3 %39) gözlenmiştir. Her TBM'in farklı model bir kaset ve bant sistemi göz önüne alındığında TBM'lerde meydana gelen arıza kaynaklı duraklamaların yaklaşık üçte birinin bant arızalarından kaynaklandığı ve bant arızalarının konveyör tipi ve modelinden bağımsız olduğu görülmektedir.

Bir başka önemli ayrıntı ise TBM'lerin harita/ölçüm sistemlerinde gözlenmektedir. TBM'lerin her birinde farklı üreticiler tarafından geliştirilmiş farklı özellikte ölçüm ve navigasyon sistemleri yer almaktadır. TBM 3 en yeni ve en sofistike ölçüm sistemine sahiptir. TBM 2 ise en eski ve ekipman olarak en güncel olmayan ölçüm sistemine sahiptir. Ancak ilginç bir şekilde TBM 2 ölçüm/harita sistemi kaynaklı arızaların en az görüldüğü TBM olurken (%1) TBM 3 ise bu tip arızaların ve duraklamaların en yoğun gözlemlendiği (%5) TBM olmuştur. Bu durum değerlendirildiğinde ölçüm sistemlerinin kullanım kolaylığının ve pratikliğinin sistemin güncel olmasından daha avantajlı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Ölçüm sistemi elektronik olarak karmaşıklıkça veya ölçüm aletinin ileri taşınması ve koordinatların güncellenmesi gibi ölçüm güncelleme işleri yeterince pratik (kullanıcı dostu) olmadığında ölçüm sistemi kaynaklı duraklamalarda artış gözlenebilmektedir.

TBM'lerin arıza sürelerinin kazı verimleri üzerine etkisinin incelenmesinde başvurulan bir başka önemli parametre de metre başına düşen arıza süresidir. Bir başka ifadeyle arıza süreleri ile yapılan tünel ilerlemeleri kıyaslanabilmektedir. Böylelikle arıza süreleri yapılan tünel imalatının miktarı ile normalize edilebilmektedir ve kazı süresinin yanıtıcı etkisinden arındırılabilir.

Kazı süresinin yanıtıcı etkisinin anlaşılması için aylara göre kazı sürelerinin ortalamaları Şekil 4.30'da sütun grafikler ile gösterilmiştir. Şantiye kayıtlarında verilerin düzenlenmeye başladığı tarih Eylül 2015'tir ve bundan önceki veriler grafiğe dahil edilmemiştir. Yenimahalle – Mahmutbey İstasyonları arasında TBM 1 ve TBM 2'nin kazmış olduğu  $W_{3-4}$  ayrışma zonu olarak sınıflandırılmış suya doymun kumlu bölgede gözlenen anomali olarak tariflenebilecek kazı süreleri TBM 1 ve TBM 2 için ortalamaların dışında tutulmuş ancak etkisinin anlaşılması amacıyla grafik üzerinde gösterimi yapılmıştır. Ek olarak ay içerisinde 30 altında kazının gerçekleştirildiği aylar istatistiksel olarak yanıtıcı etkilerden arındırmak için veri grubundan hariç tutulmuştur. TBM 2'nin yine bu problemlili bölgenin kazıları sırasında almış olduğu kesici kafa hasarının etkisi ise yine grafik üzerinde işlenmiştir.

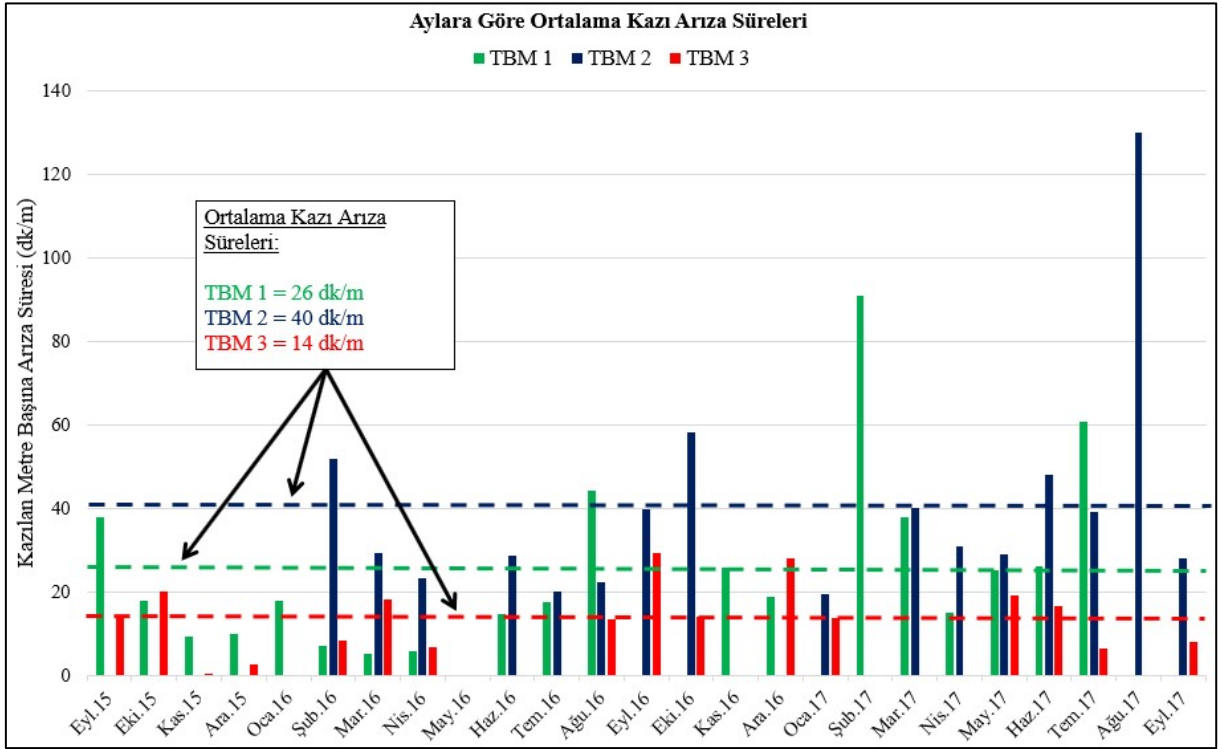




**Şekil 4. 30:** Aylara göre ortalama kazı sürelerinin dağılımı.

Şekil 4.30 incelendiğinde TBM 1 için suya doymun kumlu bölge kazılarında 140 dakika üzerine çıkan kazı sürelerine eriştiği görülmektedir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere ek önlemler olmadan EPB TBM ile kazılmaya elverişli olmayan bu bölgenin kazılarında ayna stabilitesi kaygıları ağır basmıştır. TBM kazı performanslarında ciddi düşüşler gözlenmiştir. TBM 2'nin Şubat ve Mayıs 2016 aylarında karşılaştığı yüksek kazı süreleri de yine suya doymun kumlu bölgede yaşamış olduğu kesici kafa hasarıyla ilişkilidir. Mayıs 2016 tarihinden sonra istasyona çıkararak bakım gören TBM 2 için kazı süreleri bu tarihten sonra normale dönmüştür.

Her 3 TBM için ortalama kazı süreleri, birbirine çok yakın ve literatürde de kabul gören değerler olan sırasıyla 54, 54 ve 50 dk olarak tespit edilmiştir. TBM'lerin anlık kazı hızı olan 29 mm/dk değeriyle karşılaştırıldığında sonuçlar tutarlı olmaktadır.



**Şekil 4. 31:** Metre başı arıza sürelerinin aylara göre dağılımları.

Şekil 4.31’de ise kazılan her 1 metre başına düşen arıza sürelerinin aylara göre dağılımı ve genel ortalaması verilmiştir. TBM 3 14 dk/m olan genel metre başına arıza ortalaması 3 TBM içerisinde arıza kayıpları açısından en iyi performans gösteren TBM olmuştur. TBM 1 için bu değer 26 m/dk iken TBM 2 için ise 40 m/dk’ye kadar çıkmıştır. Bir diğer ifadeyle TBM yaşı gençleştikçe arıza kayıplarında da doğru orantılı bir düşme gözlenmiştir.

Projede Ocak 2015 tarihinde başlayan kazılar, Ekim 2017 tarihinde son bulmuş ve toplam süre 34 ay olarak gerçekleşmiştir. Tablo 4.7’de verilmiş olan değerlerden anlaşıldığı üzere TBM’lerle ilgili olmayan sebeplerden gerçekleşen duraklamalar projenin ilerleme hızı ve bitiş tarihini belirleyen en önemli etken olmuştur.

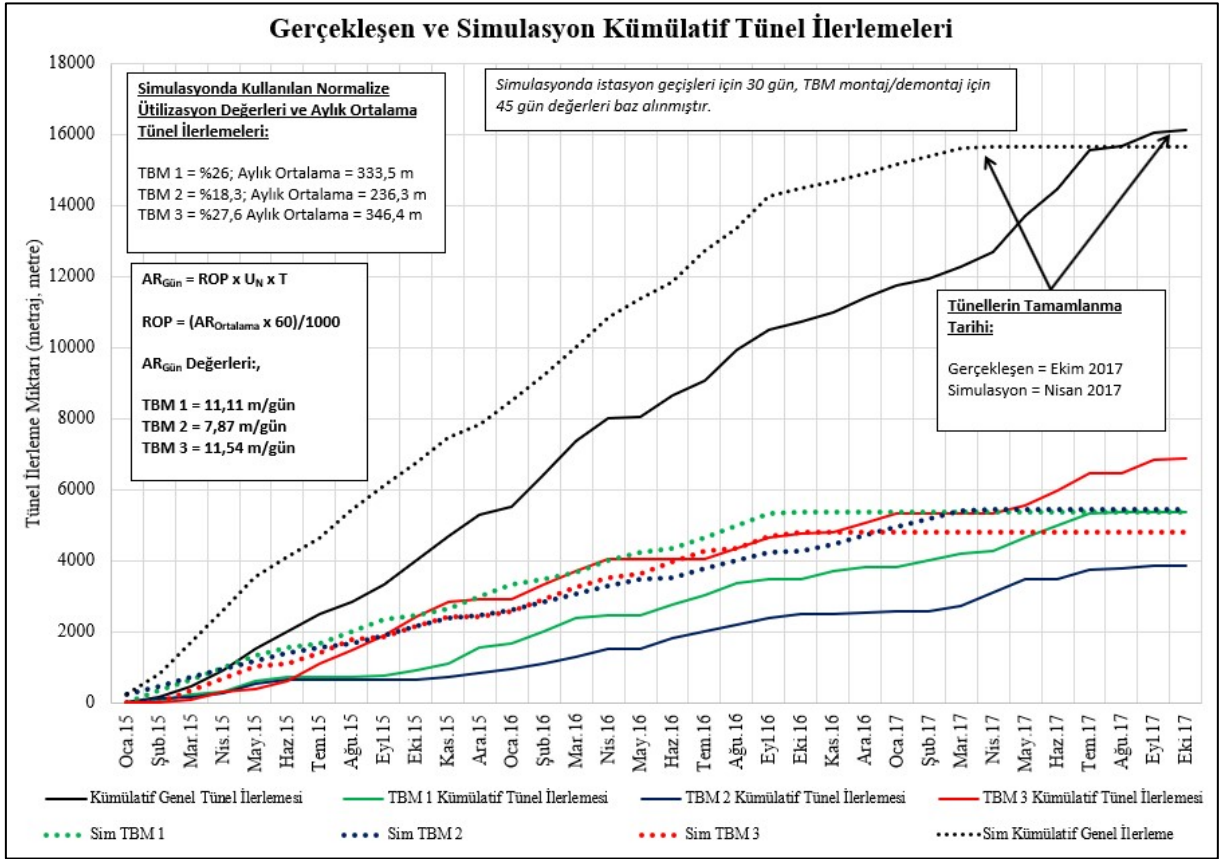
TBM’lerle ilgili olmayan kayıp süreler TBM 1 için 304 gün, TBM 2 için 364 gün ve TBM 3 için 374 gün olmuştur. TBM’lerle ilgili olmayan kayıp süreler için herhangi bir standart olmadığı gibi projeden projeye büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Metro projelerinde istasyon geçişleri ve istasyondaki bakım faaliyetleri için toplam 30 gün ve TBM montaj/demontaj işlemleri için 45 günlük süreler yeterli kabul edilmektedir.

TBM'lerin kazı performansına bağılı olarak projenin nasıl şekillenebileceğinin kestirilmesi amacıyla normalize edilmiş makinadan faydalanma değerlerini baz alan bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon çalışmasında Farrokh (2013) tarafından önerilmiş olan makinadan faydalanma değerine bağılı  $AR_{Gün}$  değerinin belirlenmesi yaklaşımı kullanılmıştır. Her bir TBM için o TBM'e ait normalize edilmiş makinadan faydalanma değeri ( $U_N$ ) kullanılarak ayrı ayrı belirlenen  $AR_{Gün}$  değerleri daha sonra aylık ortalama ilerleme miktarlarına çevrilmiştir.

Her bir TBM için gerçekleşen kazı başlama tarihleri simülasyonda da kazı başlama tarihi olarak alınmıştır. Yüzey deformasyonları ve hafriyat döküm sahası problemleri ile ilgili olan zaman kayıpları simülasyona dahil edilmemiştir. İstasyon geçişleri ve montaj/demontaj süreleri sırasıyla 30 gün ve 45 gün olarak alınmıştır.

Simulasyon da tüm istasyonların TBM'lerin geçişlerine hazır oldukları varsayılmıştır. Bu nedenle gerçekleşenden farklı olarak simülasyonda kullanılan senaryo da TBM 3 Hat 1'de istasyonları kazarak geçmemiş, istasyon geçişi yapmıştır. Yine benzer şekilde simülasyonda kullanılan senaryoda TBM 2 Hat 2'nin tamamını tek başına kazmıştır. Böylelikle TBM'lerle ilgili olmayan ancak TBM tünelleri ilerlemesi üzerinde etkisi olan kayıpların etkisi normalize edilmeye çalışılmış ve projenin sadece TBM performansına bağılı olarak ilerleyişi irdelenmeye çalışılmıştır.

Yukarıda bahsedilen gerçekleşen ve simule edilen kümülatif tüneller ilerlemeleri her bir TBM için ayrı ayrı ve toplam olarak Şekil 4.32'de gösterilmiştir.



**Şekil 4. 32:** Gerçekleşen ve simüle edilen kümülatif tünel ilerlemeleri

Gerçekleşen durumda TBM 1 kazılarına Şubat 2015'te başlamış, TBM 2 kazılarına Ocak 2015'de başlamış ve TBM 3 ise kazılarına Mart 2015 tarihinde başlamıştır. Yine gerçekleşen durumda TBM 1'in kazıları Ağustos 2017 tarihinde sona ermiş, TBM 2'nin kazıları Eylül 2017 tarihinde sona ermiş ve TBM 3'ün kazıları ise Ekim 2017 tarihinde sona ermiştir. Her 3 TBM genelinde Ocak 2015'te başlayan kazılar Ekim 2017 tarihinde toplamda 34 aylık bir sürenin sonunda sona ermiştir. Şekil 4.32'de verilen grafikte gerçekleşen senaryoda her bir TBM için ve kümülatif olarak tünel ilerlemelerinin çizgi grafikleri incelendiğinde gözlenebilen yatay seyirler TBM'lerin çeşitli sebeplerle karşılaştıkları duraklamalar sonucu ortaya çıkmıştır. TBM'lerin yatay seyirlerinin kümülatif ilerlemeye olan etkisi de görülebilmektedir. Gerçekleşen kümülatif ilerlemelerde gözlenen yatay seyirler her 3 TBM'in de kazı yapmadığı/durakladığı dönemleri ifade etmektedir.

Simule edilen senaryoda ise TBM 1, TBM 2 ve TBM 3 için gerçekleşen senaryodaki aynı tarihte kazılarına başlatılmıştır. TBM'lerle ilgili olmayan beklemelerin ve duraklamaların düşüldüğü bu senaryoda normalize edilmiş makinadan faydalanma değerleri (TBM 1 için

%26, TBM 2 için %18,3 ve TBM 3 için %27,6) kullanılmıştır. Simule edilen senaryoda TBM 1 kazılarını Ekim 2016 tarihinde, TBM 2 kazılarını Nisan 2017 tarihinde ve TBM 3 ise kazılarını Ekim 2016 tarihinde tamamlamıştır. Simule edilen senaryoda kümülatifte kazılar Ocak 2015'te başlamış ve Nisan 2017 tarihinde ise sona ermiştir. Simule edilen senaryoda projenin tünel kazıları 28 ay gibi bir sürede tamamlanmıştır.

Simule edilen senaryoda toplam süre gerçekleşen süreden 6 ay daha kısadır. Bu 6 aylık süre TBM'lerle ilgili olmayan bekleme ve duraklamaların TBM'lerin üzerindeki etkisi olarak kabul edilebilir. Bir başka önemli bulgu da gerçekleşen senaryoda TBM'lerle ilgili olmayan duraklama ve bekleme sürelerinin TBM 1 için 304 gün, TBM 2 için 364 gün ve TBM 3 için 374 gün olmasına rağmen bu sürelerin etkisinin doğrudan baz alınmaması gerektiğidir. Nitekim yaklaşık 1 seneye ulaşan bu gerçekleşmiş süreler simule edilen senaryoda sadece 6 aylık bir etki yaratabilmektedir.

Yapılan simülasyon çalışmasının Şekil 4.32'de gösterilen çizgi grafikleri incelendiğinde ve gerçekleşen senaryodaki durumla karşılaştırıldığında yatay seyirlerin simule edilen senaryoda çok daha az olduğu görülmektedir. Özellikle kümülatif ilerleme çizgisi için hiç yatay seyir gerçekleşmemiştir. Kümülatif tünel ilerlemesinde yatay seyrin olmaması hakedişe bağlı olan proje gelirleri ve proje finansmanı açısından önemli bir etkiye sahiptir. Projenin ekonomik gelişimi ve ayrışma zonlarının bu ekonomik gelişim üzerindeki etkisi ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak incelenecektir.

#### **4.7. AYRIŞMA ZONLARININ PROJE EKONOMİSİNE ETKİLERİ**

Farklı ayrışma zonlarının TBM'lerin kazı ekonomisinin üzerindeki etkisi incelenmesi bu tezin kapsamında yer alan başlıklardan birisidir. Ayrışma zonlarının ekonomik olarak değerlendirilebilmesi için ise bir ekonomik modele gereksinim duyulmaktadır. Aynı zamanda ülkemizdeki gibi yüksek enflasyonun olduğu yerlerde yapılan projelerde zamana bağlı olarak maliyetlerin ve proje karlılığının enflasyon etkisi altında değerlendirilmesi gerekmektedir.

TBM ile gerçekleştirilen tünel projeleri belli bir ilk yatırım maliyeti olan, dinamik işletme maliyetler (metraja ve süreye bağlı) içeren projelerdir. Tünel projelerinin gelirleri ise genellikle metraja bağlı hakediş esasına dayanmaktadır. Hakediş gelirin değeri proje ihale aşamasında belirlenmekte ve proje süresince sabit kalmaktadır. Diğer taraftan maliyetler ise enflasyon baskısı altında ciddi değişimler gösterebilmektedir. Bu etkilerin anlaşılması için

öncelikle TBM ile tünelticilikte söz konusu olan maliyetlerin ve türlerinin anlaşılması gerekmektedir.

Tablo 4.10’da bir metro projesi için TBM ile açılan delme tünellere ilişkin maliyet kalemleri örneklendirilmiştir.

**Tablo 4. 10:** Bir TBM tünel projesi için maliyet türleri ve örnekleri.

<b>İlk Yatırım Maliyetleri</b>	<b>Metraja Bağlı Maliyetler</b>	<b>Zamana Bağlı Maliyetler</b>
TBM Alımı	TBM Boru ve Konsol	Personel Giderleri
TBM Kiralama	TBM OG Kablo	İş Makinesi-Araç Kiraları
TBM Revizyon	TBM Haberleşme Kablo	Şantiye Elektrik Tüketimi
TBM Montaj/demontaj Nakliye	TBM Aydınlatma Kablo	Arazi veya Yer Kira Sözleşmeleri
TBM Yedek Parça MSV veya Lokomotif	TBM Fan Tüp	
Chiller Sistemleri	TBM Tünel Bandı	
Vinç Alımı	TBM Tünel Ray	
İş makineleri	MSV Mazot	
Bant Kaset Konveyör	Destek Sistemler Bakım-Onarım Giderleri	
Jet Fanlar	Hafriyat Uzaklaştırma	
Grout Santrali	Segment Ring ve Sevk Maliyetleri	
Saha İnşaatı	Grout	
Trafo ve Enerji Kurulumu	TBM Elektrik Tüketimi	
Su Depo ve Pompaj İstasyonu	TBM Su Tüketimi	
Yatakhane Kamp Alanı	TBM Köpük Tüketimi	
Ofisler ve İdari Bölümler	TBM Disk Tüketimi	
Ambar Kurulumu	TBM Kuyruk Gres Tüketimi	
Segment Üretim Atölyesi	TBM Gres EP1-2 Tüketimi	
Atölye Kurulumu	TBM Sızdırmazlık Gres	
	TBM Bakım-Onarım Giderleri	
	TBM Hidrolik Yağ (46-68)	

Tablo 4.10 incelendiğinde TBM projeleri için maliyetlerin önemli bir kısmının ilk yatırım maliyetlerinden oluştuğu görülmektedir. Diğer tünelticilik yöntemleri ile karşılaştırıldığında TBM ile tünel açma modelinin daha yüksek bir ilk yatırım gerektirdiği bilinmektedir. Bir başka maliyet başlığı ise metraja bağlı olan maliyetlerdir. Bunlar TBM’in ilerlemesi esnasında tüketilen veya yerleştirilen/kurulan malzemelerden oluşmaktadır. Üçüncü bir maliyet kalemi

ise zamana bağı olan maliyetlerdir. Bu tür maliyetlerin başında personel maaş ve giderleri, şantiye elektrik tüketimleri, kiralanmış olan iş makineleri ve ekipmanlar gelmektedir.

TBM projelerinin ekonomik olarak değerlendirilmesi için zamana ve metraja bağı maliyetlerin arasındaki ilişkinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Metraja bağı maliyetler tünel ilerlemesi durduğunda kaybolmaktadır. Başka bir deyişle herhangi bir tünel ilerlemesi yapılmadığında ring kurulumu, hafriyatın uzaklaştırılması, köpük veya disk tüketimi, kablo, ray, boru döşeme gibi faaliyetlerde durduğundan metraja bağı maliyetler ortadan kalkmaktadır. Ancak personel giderleri, yapılmış olan kira sözleşmeleri gibi zamana bağı maliyetler TBM kazı yapmasa da geçerlidir. Örnek olarak bir TBM istasyon geçişi yaparken metraja bağı maliyetler dikkate alınmazken zamana bağı maliyetler etkin olmaya devam etmektedir.

Hakediş esasına dayanan bir TBM tünel projesi için proje gelirleri metraja bağı olarak gerçekleştirilen tünel ilerlemelerine karşılık alınan hakediş gelirlerinden oluşmaktadır. Hakediş gelirleri ihale sürecinde belirlenmiş olan bir TL/m oranı esas alınarak yapılan ilerleme (metre) karşılığı aylık olarak ödenmektedir. Hakediş gelirleri proje boyunca sabit kalmaktadır.

Bu bilgiler ışığında bir TBM tünel projesinin maliyetleri Denklem 4.1'deki gibi hesaplanabilir.

$$C(t) = O_c(t) + I_c \quad (4.1)$$

Burada  $C(t)$  toplam maliyet fonksiyonudur.  $O_c(t)$ , işletme giderlerin zamana bağı fonksiyonudur.  $I_c$  ise ilk yatırım maliyetlerini ifade eden sabittir.

$$O_c(t) = A_c(t) + T_c(t) \quad (4.2)$$

İşletme giderlerin fonksiyonu  $O_c(t)$ , metraja bağı işletme giderlerin fonksiyonu olan  $A_c(t)$  ve zamana bağı işletme giderlerin fonksiyonu olan  $T_c(t)$ 'nin toplamı olarak ifade edilebilir.

$$A_c(t) = \sum_1^i a_i \times M_k(t) \quad (4.3)$$

$$M_k(t) = mt \quad (4.4)$$

Denklem 4.3'de  $A_C(t)$ , metraja bağlı işletme giderlerin fonksiyonudur.  $M_k(t)$  ise aylık kümülatif tünel ilerlemesinin fonksiyonudur. Böylelikle metraja bağlı işletme giderler, her bir metraja bağlı birim maliyet kaleminin ( $a_i$ ) toplamının ( $\sum_1^i a_i$ ) aylık kümülatif metraj ile çarpımı olarak ifade edilmektedir.

$$T_C(t) = \sum_1^i b_i \times t \quad (4.5)$$

$T_C(t)$  zamana bağlı işletme giderlerin fonksiyonudur. Her bir zamana bağlı işletme gider kaleminin birim maliyetinin ( $b_i$ ) toplamının ( $\sum_1^i b_i$ )  $t$  değişkeni ile çarpılması ile aylık bazda elde edilmektedir.

$A_C(t)$  ve  $T_C(t)$  eşitlikleri Denklem 4.2'de verilen ve tüm işletme giderlerin fonksiyonu olan  $O_C(t)$  içine yerleştirildiğinde Denklem 4.6'daki eşitlik elde edilmektedir.

$$O_C(t) = A_C(t) + T_C(t)$$

$$O_C(t) = \left( \sum_1^i a_i \times M_k(t) \right) + \left( \sum_1^i b_i \times t \right)$$

$$O_C(t) = \left( \sum_1^i a_i \times mt \right) + \left( \sum_1^i b_i \times t \right) \quad (4.6)$$

Tüm maliyetlerin fonksiyonunu ifade eden  $C(t)$  ise Denklem 4.7'deki gibi hesaplanabilir.

$$C(t) = O_C(t) + I_C$$

$$C(t) = \left( \sum_1^i a_i \times mt \right) + \left( \sum_1^i b_i \times t \right) + I_C \quad (4.7)$$

Enflasyonun genel maliyetler üzerindeki artış etkisi,  $C(t)$  fonksiyonu içerisindeki işletme giderleri temel alan  $O_C(t)$  fonksiyonun bileşik faiz hesaplaması (Denklem 4.8) ile düzeltilmesiyle modele eklenmiştir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$ENF = [Anapara \times (1 + \text{Yıllık Enf. Oranı})^{Yıl}] - Anapara \quad (4.8)$$

$$C'(t) = [O_C(t) \times (1 + \text{Yıllık Enf. Oranı})^{t \times 0,08333}] + I_C \quad (4.9)$$



Burada  $C'(t)$ ,  $C(t)$  fonksiyonunun enflasyon etkisi ile düzeltilmiş halidir. Enflasyondan oluşan kayıpların fonksiyonu ise  $E(t)$  olarak ifade edilmiştir ve aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$E(t) = C'(t) - C(t)$$

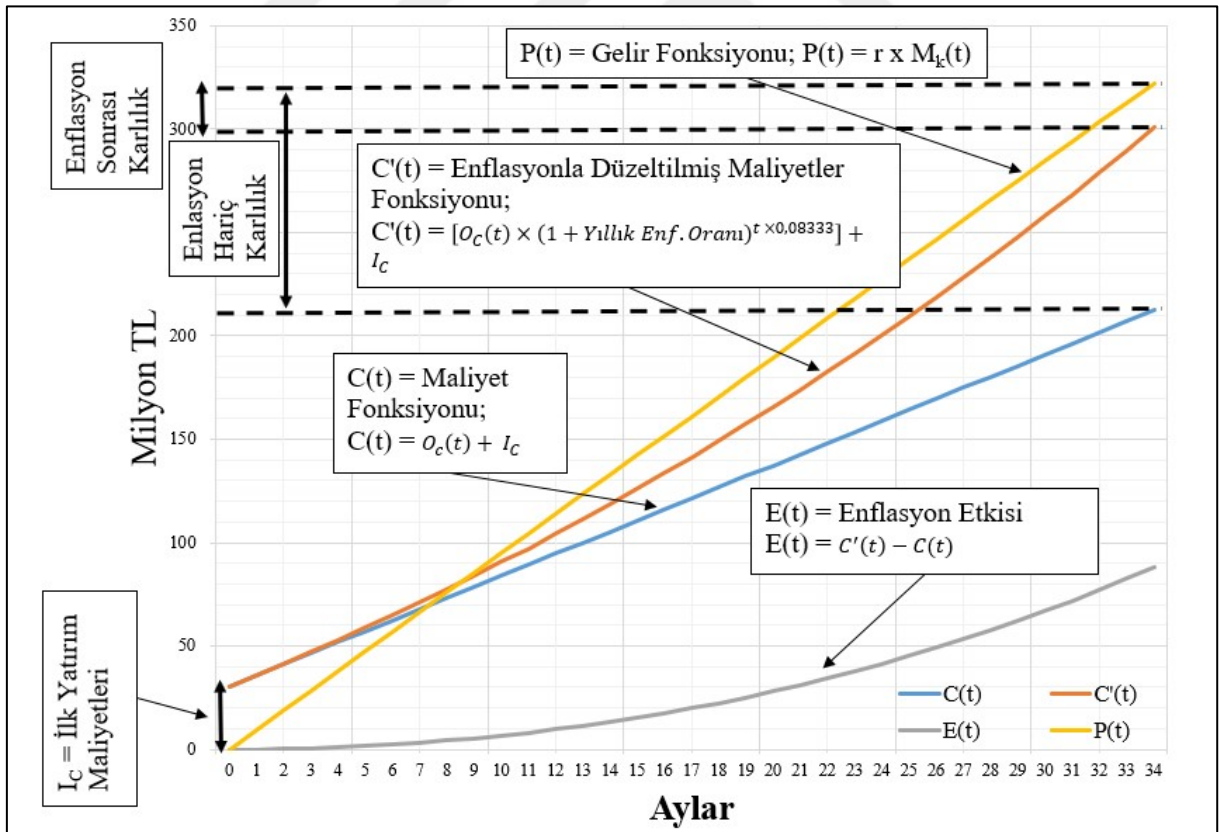
$$E(t) = ([O_C(t) \times (1 + \text{Yıllık Enf. Oranı})^{t \times 0,08333}] + I_C) - (O_C + I_C) \quad (4.10)$$

Proje gelirleri olan hakediş gelirleri de metrajla bağlıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P(t) = r \times M_k(t)$$

$$P(t) = r \times mt \quad (4.11)$$

Burada  $P(t)$  proje hakediş gelirlerinin zamana bağlı fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Hakediş oranı “ $r$ ” (TL/m)’dir.  $M_k(t)$  ise aylık kümülâtif tünel ilerlemesinin fonksiyonudur.

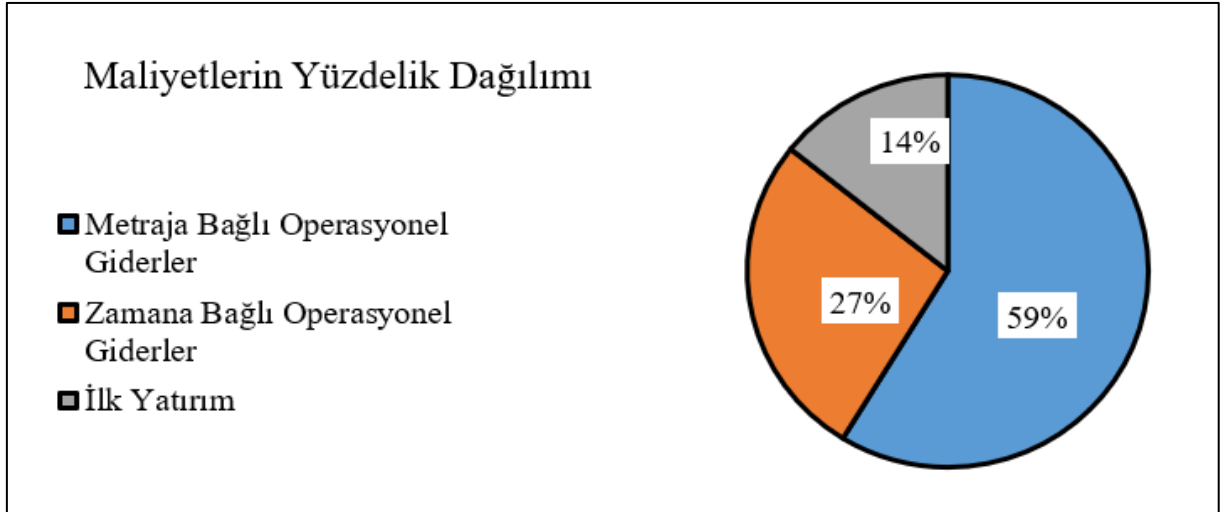


Şekil 4. 33: Bir EPBM tünel projesi için bazı ekonomik göstergelerin aylara bağlı sayısal analiz modeli.

Yukarıda verilmiş olan fonksiyonel yaklaşımlarla zamana bağlı olarak tünel projesindeki ekonomik unsurların kümülâtif olarak gelişimini gözlemek ve bu gelişimde yaşanan değişimleri irdelemek mümkündür. Şekil 4.33’de gelir, maliyet, enflasyonla düzeltilmiş maliyet ve enflasyon kaybını ifade eden fonksiyonların grafiksel gösterimi verilmiştir.

Böyle bir ekonomik modelin tez kapsamında yer alan Mahmutbey – Mecidiyeköy projesine uygulanabilmesi ve daha sonra esas amaç olan ayrışma/bozunma zonlarının ekonomik etkilerinin belirlenebilmesi için projeye ait maliyet kalemlerinin tek tek belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple piyasa ve fiyat araştırması yapılmış ve mümkün olduğunca gerçek değerlere yakın veriler elde edilmeye çalışılmıştır. Maliyet kalemlerinin çeşitliliği göz önüne alındığında projenin gerçek maliyet durumunun tespit edilmesi oldukça zor olmakla beraber yapılan çalışmalar neticesinde gerçek değerlere olabildiğince yakınsanmaya çalışılmıştır. Bu anlamda yapılan çalışmalar projenin gerçek finansal değerlerini veya kârlılığını yansıtmamakla beraber, burada sadece projenin ekonomik unsurlarının gelişimi temsil edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda derlenmiş maliyetlerin yüzdeler olarak dağılımına ise Şekil 4.34’de yer verilmiştir.

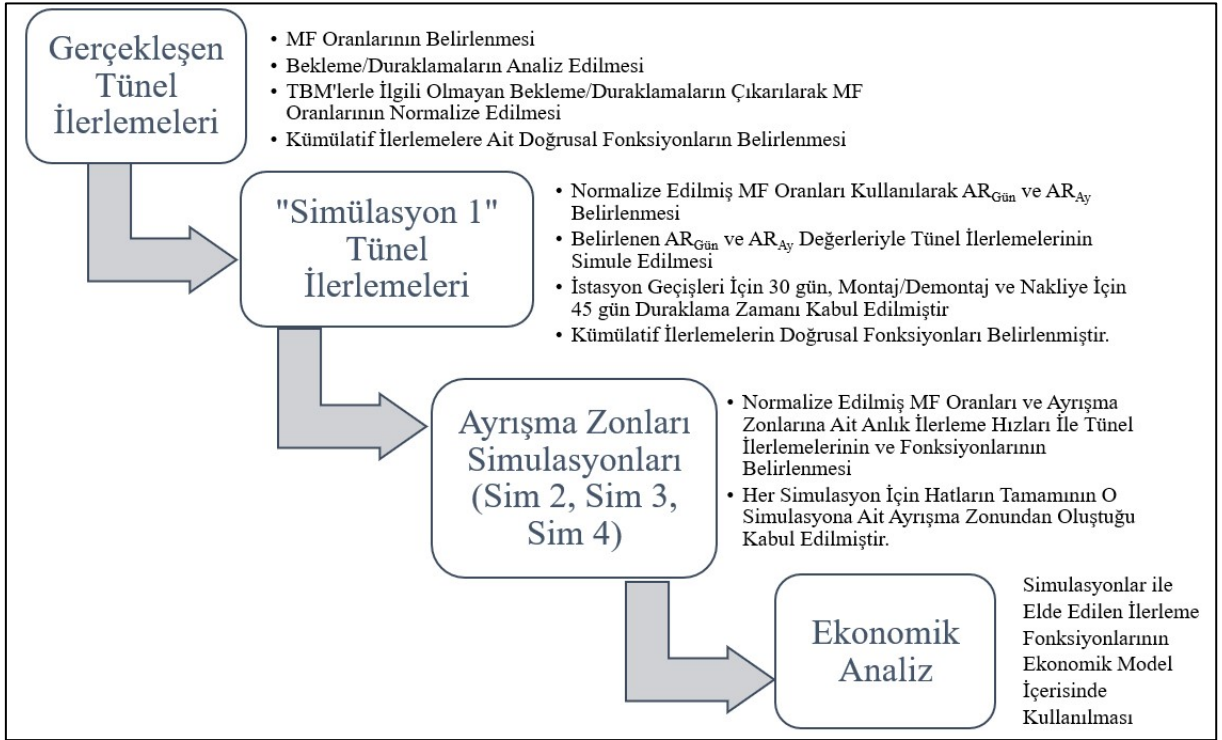


**Şekil 4. 34:** Maliyetlerin yüzde olarak dağılımı

Şekil 4.34’de görüldüğü üzere, ilk yatırım maliyetleri projenin tüm maliyetleri içerisinde %14’lük bir yer tutmaktadır. Bu değer ilk başta düşük gibi görünse de projede kullanılan üç TBM’den ikisinin daha önceden kullanılmış ve sadece bakım/revizyon işlemi görmüş TBM’ler olduğu unutulmamalıdır. Ayrıca projede kullanılan ve ilk yatırım olarak kabul

edilmesi gereken ekipman alımlarının büyük bir kısmı da yine firma envanterinde daha önceki projelerden yer aldığından ilk yatırım maliyetleri de buna göre düzenlenmiştir. Maliyetler arasında en büyük pay, metraja bağlı olan maliyetlere (%59) aittir. Ancak personel maaşları, elektrik tüketimi, kira sözleşmeleri gibi zamana bağlı olan maliyetler de %27 gibi azımsanamayacak bir paya sahiptir. Zamana bağlı olan maliyetlerin en büyük etkisi ise tünel ilerlemesinden bağımsız olmalarıdır. Tünel ilerlemesi herhangi bir sebeple durduğunda dahi zamana bağlı olan maliyetler işlemeye devam etmekte ve zarara sebebiyet verebilmektedir.

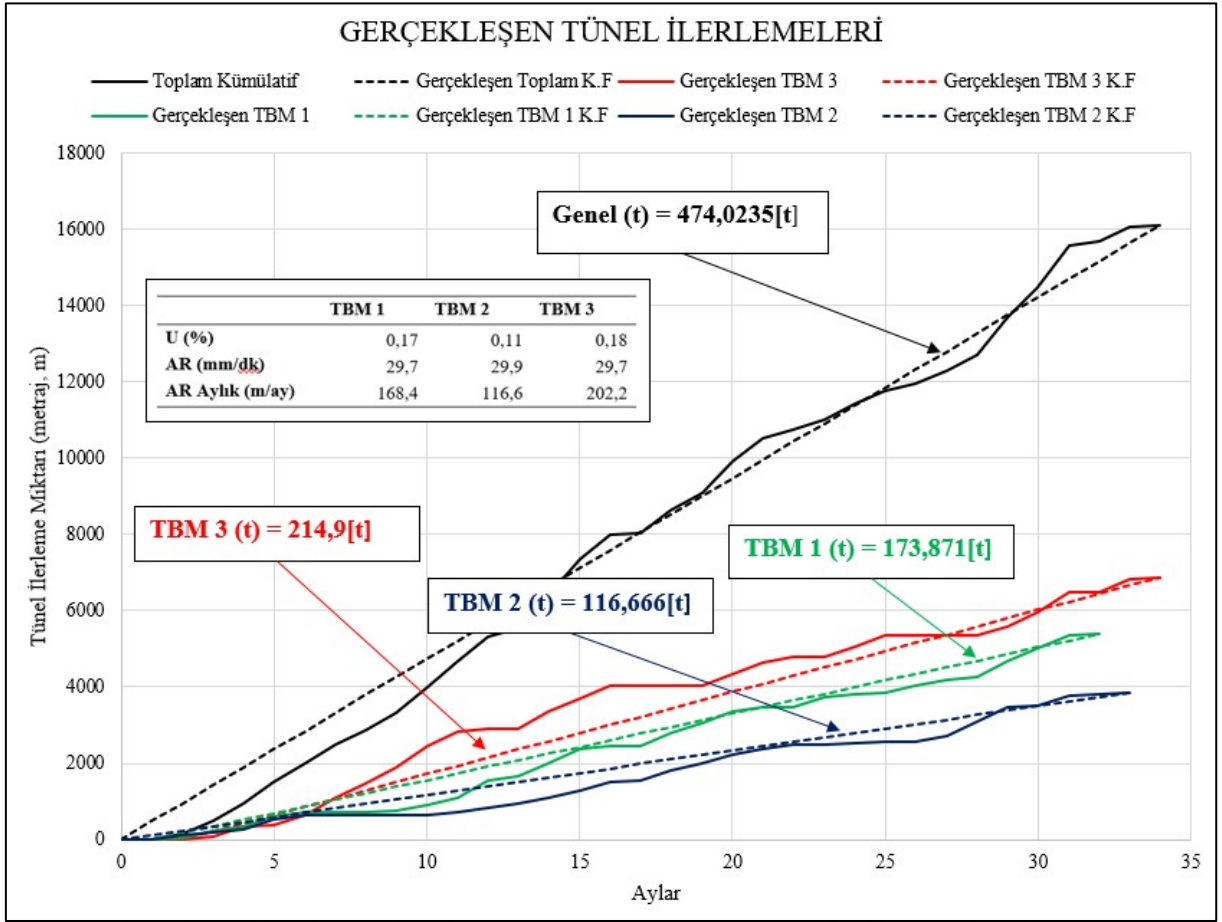
Ekonomik analizler için izlenen akım şeması Şekil 4.35'te verilmiştir. Öncelikle projede gerçekleşen günlük ve aylık tünel ilerlemeleri verileri aylar bazında derlenmiştir ve kümülatif tünel ilerlemelerinin doğrusal fonksiyonları bulunmuştur. Önceki bölümlerde açıklandığı üzere makineden faydalanma oranı (MF) değerleri her bir TBM için ayrı ayrı tespit edilmiştir ve bekleme/duraklamaların sebepleri incelenmiştir. İstasyon bekleme, deformasyon kaynaklı bekleme gibi TBM'lerin performansı ile doğrudan ilgili olmayan duraklama ve bekleme süreleri elimine edilerek makineden faydalanma oranları (MF) normalize edilmiştir.  $AR_{Gün}$  (Günlük İlerleme) ve  $AR_{Ay}$  (Aylık İlerleme) parametreleri normalize edilmiş MF oranlarıyla her bir TBM için yeniden belirlenmiştir. Daha sonra ise türetilen  $AR_{Gün}$  ve  $AR_{Ay}$  değerleri kullanılarak tünel ilerlemeleri simüle edilmiştir (Simülasyon 1). Her bir istasyon geçişi için 30 gün ve TBM montaj/demontaj, nakliye işlemleri için ise 45 günlük bekleme yerleştirilmiştir. Böylelikle TBM'lerle ilgili olmayan duraklama ve bekleme etkisinin elimine edildiği yeni kümülatif tünel ilerlemesi verileri oluşturulmuş ve bu verilerin doğrusal fonksiyonları saptanmıştır.



**Şekil 4. 35:** Ekonomik analiz için akım şeması.

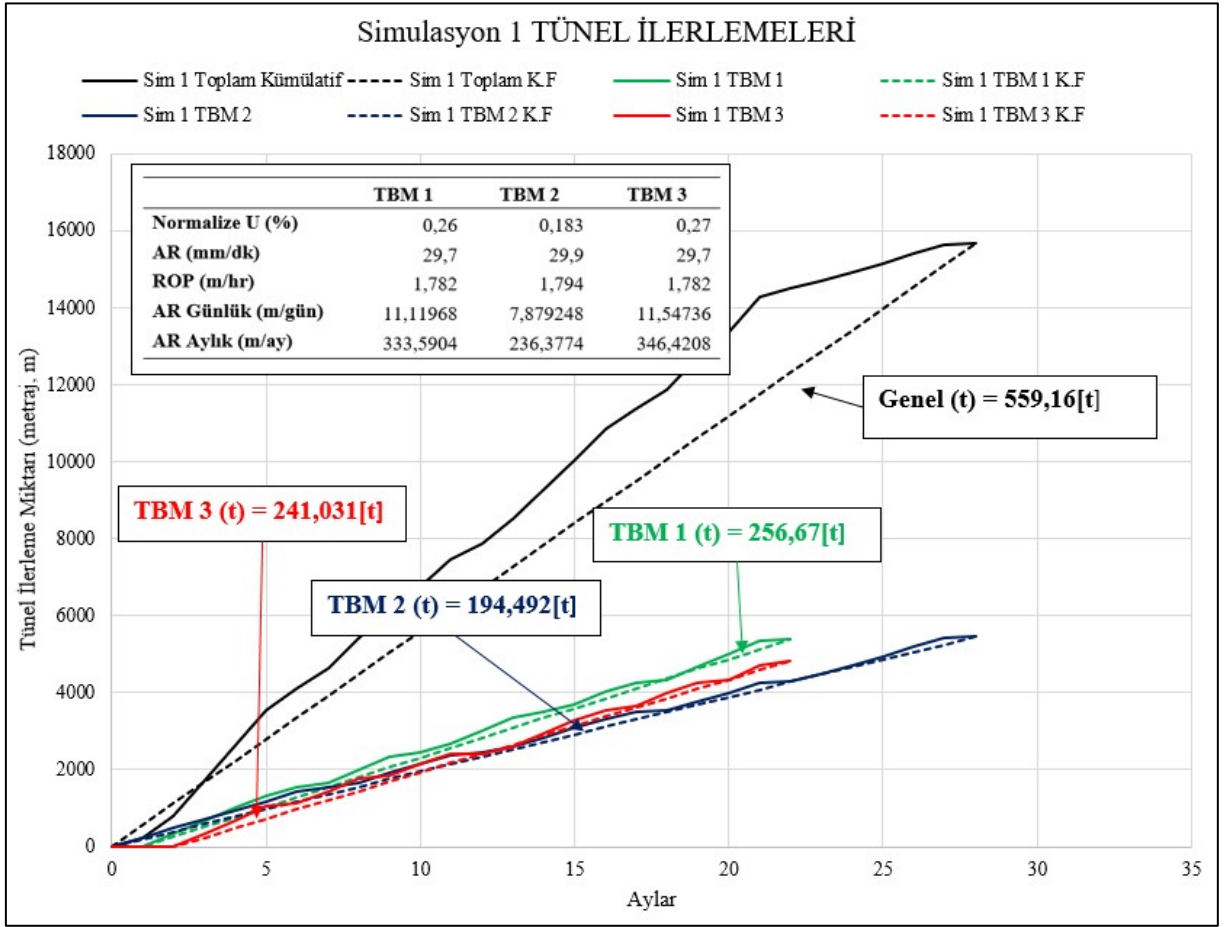
Esas ulaşılmak istenen sonuç ayrışma zonlarının ekonomi üzerindeki etkisi olduğundan her bir ayrışma zonu için 3 yeni simülasyon (Simülasyon 2, Simülasyon 3 ve Simülasyon 4) yukarıda anlatılan yöntemle gerçekleştirilmiştir. Farklı olarak bu kez her bir ayrışma zonu için gerçekleştirilen senaryolarda TBM'lerin kazdıkları hattın tamamının simülasyonu yapılan ayrışma zonuna ait olduğu varsayımında bulunulmuştur.  $AR_{Gün}$  ve  $AR_{Ay}$  değerlerinin belirlenmesinde ise genel ortalama AR (Anlık İlerleme Hızı) değeri yerine her bir TBM'in simülasyonu yapılan ayrışma zonundaki ortalama AR (Anlık İlerleme Hızı) değeri kullanılmıştır. Elde edilen ilerleme verilerinden her bir TBM için ve genel durum için ayrı ayrı kümülatif tünel ilerlemelerinin doğrusal fonksiyonları türetilmiştir. Elde edilen tünel ilerlemelerine ait fonksiyonlar ekonomik model içerisine yerleştirilerek projenin gerçekleşen durumundaki ve simülasyon durumlarındaki ekonomik gelişimi temsil edilmiştir.

Şekil 4.36 ve 4.37'de her 3 TBM ve genel durum için gerçekleşen kümülatif tünel ilerlemeleri ile yine her 3 TBM ve genel durum için TBM'lerle ilgili olmayan duraklama ve beklemlerin elimine edildiği ve normalize edilmiş makineden faydalanma oranları (Normalize U%) kullanıldığı Simülasyon 1'e ait kümülatif tünel ilerlemeleri verilmiştir.



**Şekil 4. 36:** Gerçekleşen kümülatif tünel ilerlemeleri ve fonksiyonları

Gerçekleşen durum ile TBM'lerle ilgili olmayan beklemelerin elimine edildiği Simülasyon 1 arasında göze çarpan en büyük farklardan biri projenin tamamlanma süresidir. Gerçekleşen durumda proje toplam süresi 34 ay olarak gerçekleşirken Simülasyon 1'de bu süre 28 ay olmuştur. Daha da önemlisi gerçekleşen durumdan farklı olarak TBM 1 ve TBM 3, 22 ay gibi bir sürede kazılarını tamamlamış, TBM 2 ise TBM 1 ve TBM 3'ten 6 ay sonra, 28 aylık sürenin sonunda kazılarını tamamlayabilmiştir. Gerçekleşen durumla Simülasyon 1 arasındaki farklardan bir başkası da TBM'lerin güzergâhları olmuştur. Gerçekleşen durumda TBM 2'nin hattının bir kısmını yaşanan gecikmeleri bertaraf etmek için TBM 3'ün kazmasına karar verilmişken, Simülasyon 1'de projenin orijinal tasarımı baz alınmıştır. TBM 2'nin diğer TBM'lere göre daha düşük olan makineden faydalanma oranı da aynı mesafeyi kazdığı TBM 1'le TBM 2 arasındaki 6 aylık süre farkını doğurmuştur.



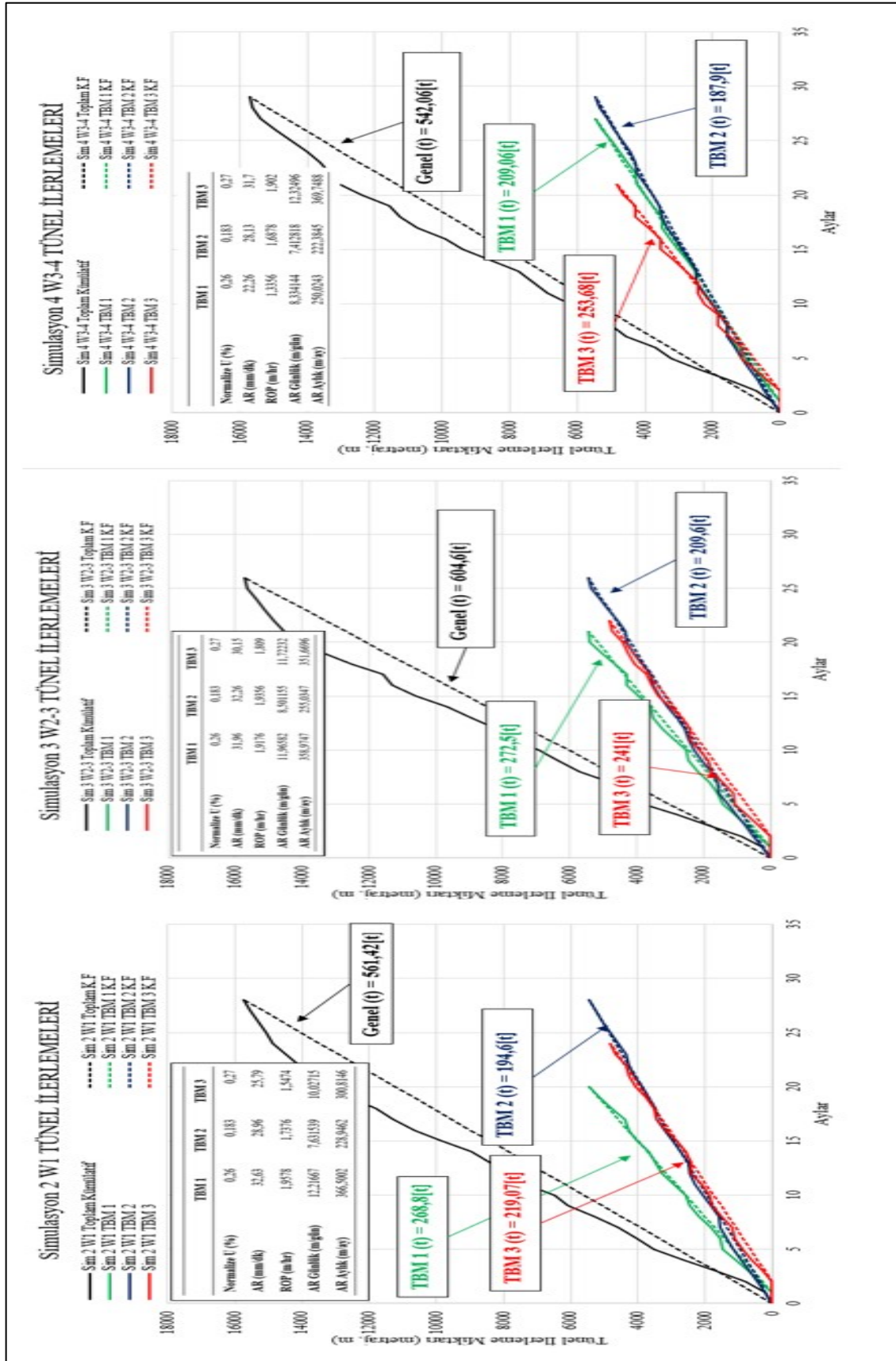
**Şekil 4. 37:** Simülasyon 1 kümülatif tünel ilerlemeleri ve fonksiyonları.

Tezin kapsamındaki esas amaçlardan birisi ayrışma zonlarının kazı ekonomisi üzerindeki etkisinin tespit edilmeye çalışmasıdır. Bu sebeple farklı ayrışma zonlarının etkisinin belirlenebilmesi için Simülasyon 1'deki çalışmanın aynısı her bir TBM için tüm kazı güzergahının analizi yapılacak olan ayrışma zonundan oluştuğu kabulü yapılarak tekrarlanmıştır. Böylelikle  $W_1$ ,  $W_{2-3}$ , ve  $W_{3-4}$  ayrışma zonları için sırasıyla Simülasyon 2, Simülasyon 3 ve Simülasyon 4 olmak üzere 3 farklı senaryo geliştirilmiştir. Bu senaryolarda Simülasyon 1'de olduğu gibi projenin orijinal kazı planı kullanılmış ve istasyon geçişleri için 30 gün, montaj/demontaj ve nakliye işlemleri için ise 45 günlük bekllemeler eklenmiştir. Ayrışma zonları için geliştirilen simülasyonlarda yine Simülasyon 1'de olduğu gibi TBM'lerle ilgili olmayan bekleme ve duraklamaların etkisini bertaraf etmek için normalize edilmiş makineden faydalanma oranları kullanılmıştır.  $AR_{Gün}$  ve  $AR_{Ay}$  değerlerinin belirlenmesinde ise Simülasyon 1'den farklı olarak her bir TBM'in analizi yapılmak istenen ayrışma zonuna ait olan ortalama anlık ilerleme hızları kullanılmıştır. Böylelikle ayrışma zonlarının etkisi kümülatif tünel ilerlemelerine yansıtılmıştır (Şekil 4.38).

Şekil 4.38 incelendiğinde  $W_1$  ayrışma zonu için kazıların tamamlanma sürelerinin TBM 1 20 ay, TBM 2 için 28 ay ve TBM 3 24 ay olarak gerçekleştiği anlaşılmaktadır. TBM 2'nin kazılarına en erken başlayan (1. Ay) TBM olduğu ve TBM 2'nin (2. Ay), TBM 3'ün ise (3. Ay) sırasıyla 1'er ay daha geç kazıya başladığı da unutulmamalıdır. Tamamlanma süresi ilerleyen kısımlarda gerçekleştirilecek olan ekonomik analizlerde süreye bağlı olarak proje ekonomisine olumsuz etki yapan enflasyon ve zamana bağlı maliyetler açısından önem arz etmektedir.

$W_1$  ayrışma zonu için öne çıkan bir başka durum ise kümülatif tünel ilerlemelerinde görülmektedir. TBM 1, TBM 2 ve TBM 3'ten pozitif anlamda ayrılmıştır.

$W_{2-3}$  ayrışma zonuna ait olan Simülasyon 3 incelendiğinde TBM 2 ve TBM 3'ün kazılarını kümülatif ilerleme fonksiyonlarının eğimlerinin benzeştiği görülebilmektedir. TBM 1 için  $W_1$ 'dekine benzer bir performans söz konusudur. Simülasyon 2'deki kadar belirgin olmasa da TBM 1 yine pozitif olarak diğerlerinden ayrılmaktadır. Tamamlanma sürelerine bakıldığında ise TBM 1, 2, ve 3 için 21, 26 ve 22 ay rakamları görülmektedir. TBM 2 kazılara en erken başlayan ve kazılarını en geç tamamlayan TBM olmuştur. TBM 1 ve TBM 3 ise birbirlerine yakın bir seyir izlemiştir.



**Şekil 4. 38:** Ayrışma zonları için geliştirilmiş simülasyonlara ait kümülatif tünel ilerlemeleri.



$W_{3-4}$  ayrışma zonunda kazılarını en erken tamamlayan TBM 21 ay ile TBM 3 olmuştur. TBM 1 ve TBM 2 ise sırasıyla 27 ve 29 ayda kazılarını tamamlamışlardır. Çok bozunmuş ve ayrışmış, stabilite açısından sorun teşkil edebilen bu tür kazı materyallerinde TBM 3 diğer TBM'lere göre daha pozitif bir seyir izlemiştir. Öte yandan TBM 1'in diğer ayrışma zonlarına göre performansında ciddi bir düşüş gözlenmiştir. TBM 2 ise  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda  $W_{2-3}$  ile çok benzer bir ilerleme kaydetmiştir.

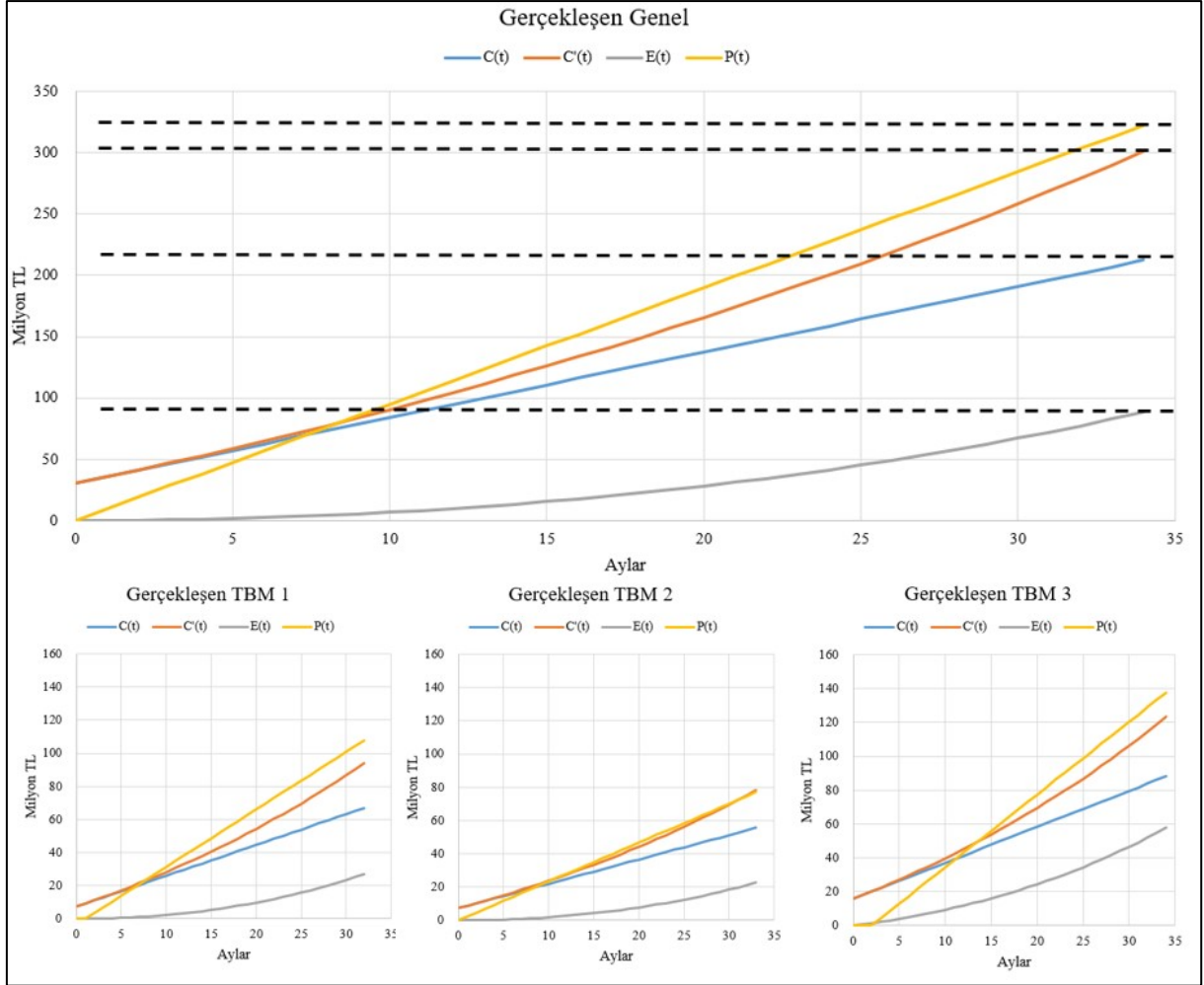
Şekil 4.38 genel olarak ayrışma zonları ile TBM'lerin ilerleme performansları arasındaki trendleri göstermektedir. TBM 1 için en avantajlı olduğu durum  $W_1$  ayrışma zonunda gözlenmiştir. Öte yandan  $W_{2-3}$  ayrışma zonunda her ne kadar  $W_1$ 'dekine benzer bir performans sergilemiş olsa da problemlili kabul edilebilecek, yüksek ayna destek basıncı gerektiren  $W_{3-4}$  gibi çok ayrışmış zonlarda TBM 1'in performansında düşüş gözlenmiştir. Bunun başlıca sebebinin TBM 1'in düşük kafa açıklık oranı olduğu düşünülmektedir.

TBM 2 her bir ayrışma zonunda kümülatif ilerleme anlamında benzer bir performans göstermiş olsa da kümülatif ilerleme fonksiyonunun eğiminin en yüksek olduğu ayrışma zonu  $W_{2-3}$  ayrışma zonu olmuştur. TBM 2'nin kümülatif ilerlemelerini etkileyen en önemli etmenlerden biri de düşük makineden faydalanma oranı olarak gösterilebilir. Projenin en yaşlı TBM'i olan TBM 2 her ne kadar her bir ayrışma zonunda istikrarlı bir performans sergilemiş olsa da arıza ve bakım gibi makineden faydalanma oranını düşüren faktörler bu istikrarın olumlu etkisini gölgelemiştir.

TBM 3'ün performansı ayrışma derecesiyle ters orantılı olarak gözlenmiştir. Ayrışma derecesi arttıkça, başka bir deyişle kaya/zemin ortamın kalitesi düştükçe TBM 3'ün kümülatif ilerleme fonksiyonunun eğimi yükselmiştir. TBM 3'ün kazılarını en kısa sürede tamamladığı zon  $W_{3-4}$  ayrışma zonu olmuştur (21 Ay). Bu durum TBM 3'ün kesici kafa tasarımı, yüksek açıklık oranı, VFD tahrik sistemi gibi teknik özellikleriyle açıklanmaktadır.

Elde edilen kümülatif tünel ilerlemeleri fonksiyonları yukarıda verilmiş olan ekonomik modele yerleştirilmiştir. Ekonomik modelin oluşturulmasında TBM'lere ait gider kalemlerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda gelir kalemi olan hakediş gelirlerinin belirlenebilmesi için de hakediş miktarı bilinmelidir. Projeye ait bu tür bilgiler müteahhit firmanın ticari gizliliği kapsamında olduğundan tez çalışmalarında piyasa araştırması ve geçmiş tecrübelerle dayanılarak detaylı bir maliyet çalışması yapılmıştır.

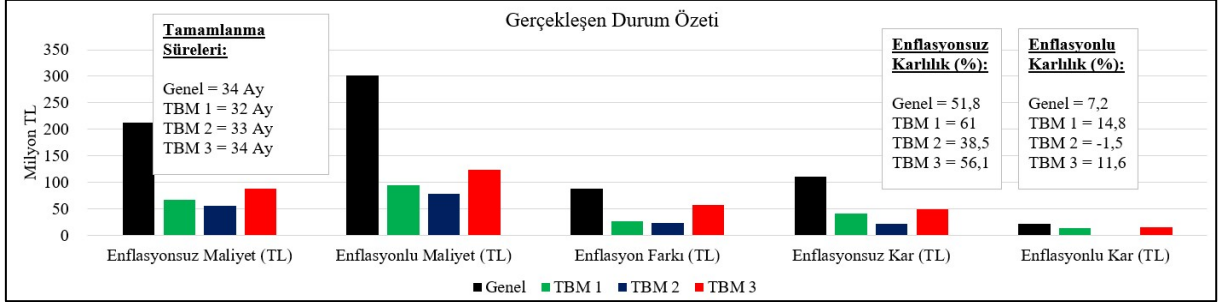
Hipotetik olarak geliştirilen metraj maliyetine %50'lik bir kâr marjı eklenerek de hakediş oranı ( $r$ ; TL/m) saptanmıştır. Burada amaç ekonomik modelin çıktılarının daha iyi anlaşılabilmesi için para birimine dayalı bir platform elde etmektir.



**Şekil 4. 39:** Gerçekleşen durum için ekonomik göstergelerin değişimi.

Şehir tünelleri ve mekanize tünel projeleri her ne kadar genellikle kısa vadeli (5 yıl) projeler olarak öne çıksa da Türkiye gibi enflasyon ve kurun değişimlerinin yüksek olduğu ülkelerde enflasyon ve kurun kısa vade de bile etkisi yüksek olabilmektedir. Bu etki özellikle projenin tamamlanma süresinin uzamasıyla beraber artmaktadır. Projenin süresinin kısalması veya uzamasında en büyük etkenlerden biri TBM'lerin performansı olduğu için yapılan ekonomik analizlerin enflasyon etkisiyle beraber değerlendirilmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu nedenle tüm analizlerde %15'lik bir yıllık enflasyon değeri kullanılmıştır.

Şekil 4.39'da projenin gerçekleşen durumu için ekonomik göstergelerin değişimleri görülebilmektedir.



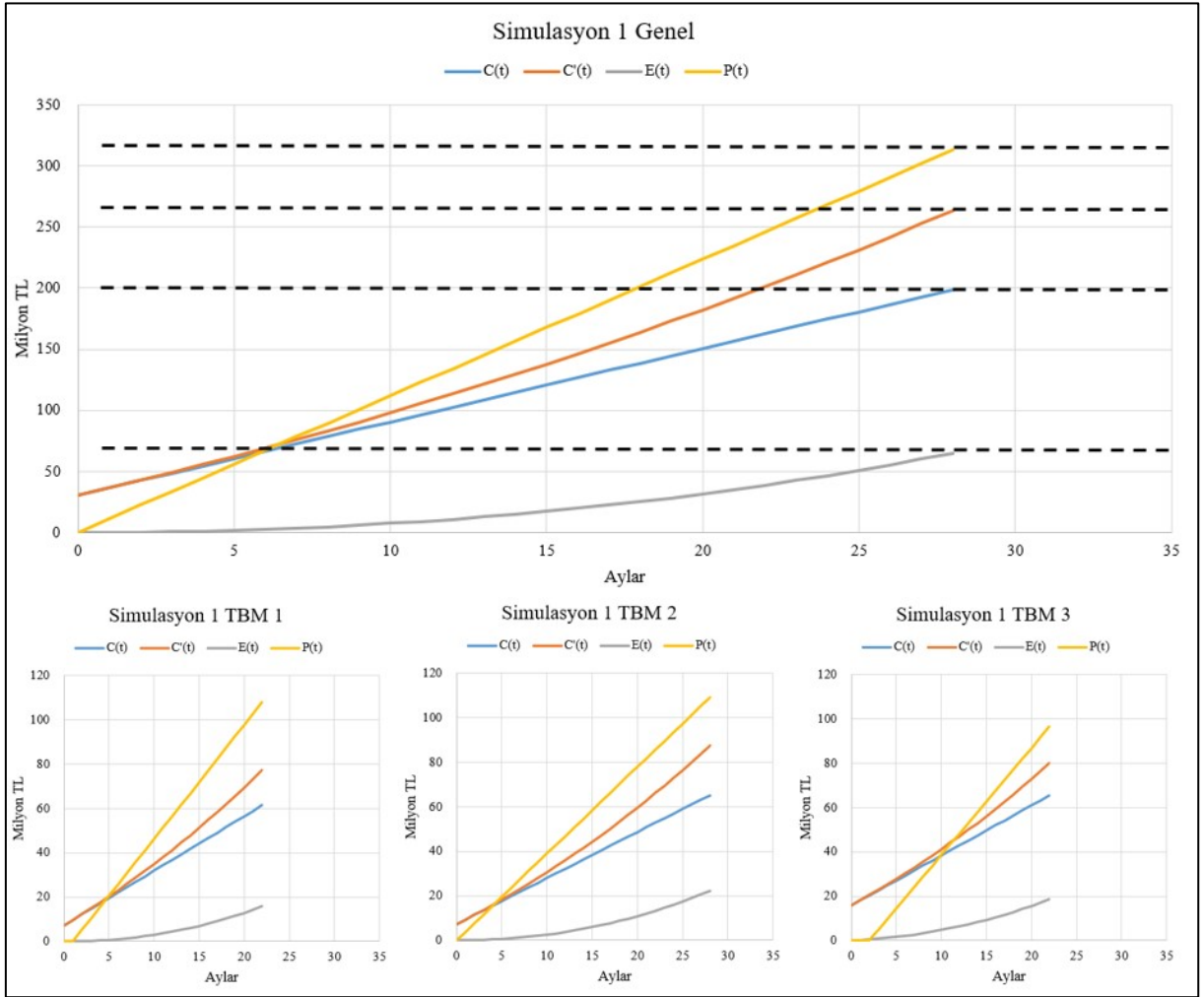
**Şekil 4. 40:** Gerçekleşen durum için özet ekonomik veriler.

Genel durum için TBM 1, TBM 2 ve TBM 3'ün kümülatif tünel ilerlemelerinin doğrusal fonksiyonu kullanılmıştır ve ilk yatırım maliyetleri ile zamana bağlı ortak giderler (personel maaşları, iş makineleri, vb) toplam olarak hesaplanmaya dahil edilmiştir. Şekil 4.40'da verilen özet ekonomik veriler grafiğinde de görüldüğü üzere proje tamamlanma süresi 34 aydır. Genele bakıldığında 100 M TL seviyesinde olan kar düzeyi enflasyon etkisi altında 21,6 M TL'ye düşmüştür. Başka bir ifadeyle %51 olan kârlılık enflasyon etkisi altında eriyerek %7'ye inmiştir.

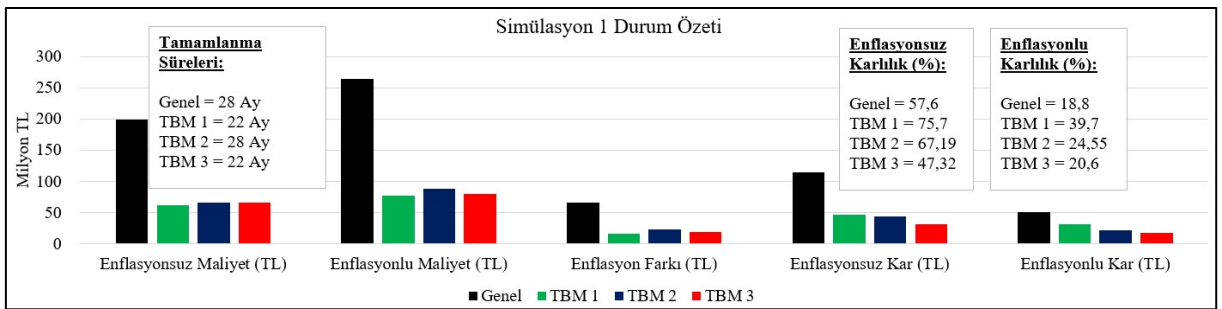
Benzer şekilde kazılarını 33 ayda tamamlayan ve enflasyon etkisi dikkate alınmadığında %38,5 kârlılık seviyesine sahip olan TBM 2, enflasyon etkisi dikkate alındığında karlılığını tamamen kaybetmektedir.

Gerçekleşen durumda karlılığı en yüksek olan TBM, TBM 1 olurken TBM 3 karlılığı en yüksek ikinci TBM olmuştur. TBM 1 ve TBM 3 arasında %3,2'lik bir kârlılık farkı bulunmaktadır. TBM 3'ün yeni satın alınmış bir TBM olarak ilk yatırım maliyetinin TBM 1'den çok daha yüksek olduğu da unutulmamalıdır.

Gerçekleşen durum için TBM'lerle ilgili olmayan bekleme ve duraklamalar metraja bağlı maliyetleri etkilemese de, zamana bağlı maliyetleri işletmeye devam etmiş ve proje süresini uzatarak proje ekonomisini enflasyona karşı daha duyarlı bir hale getirmiştir. Bu etkinin daha iyi anlaşılabilmesi için simülasyon 1 için geçerli olan senaryo ekonomik modelde kullanılmıştır. Simülasyon 1 için gerçekleşen durumla aynı maliyetler, getiri ve enflasyon (%15) koşulları altında ekonomik göstergelerin değişimleri Şekil 4.41'de, özet ekonomik göstergelere ise Şekil 4.42'de yer verilmiştir.



Şekil 4. 41: Simülasyon 1 için ekonomik göstergelerin değişimi.

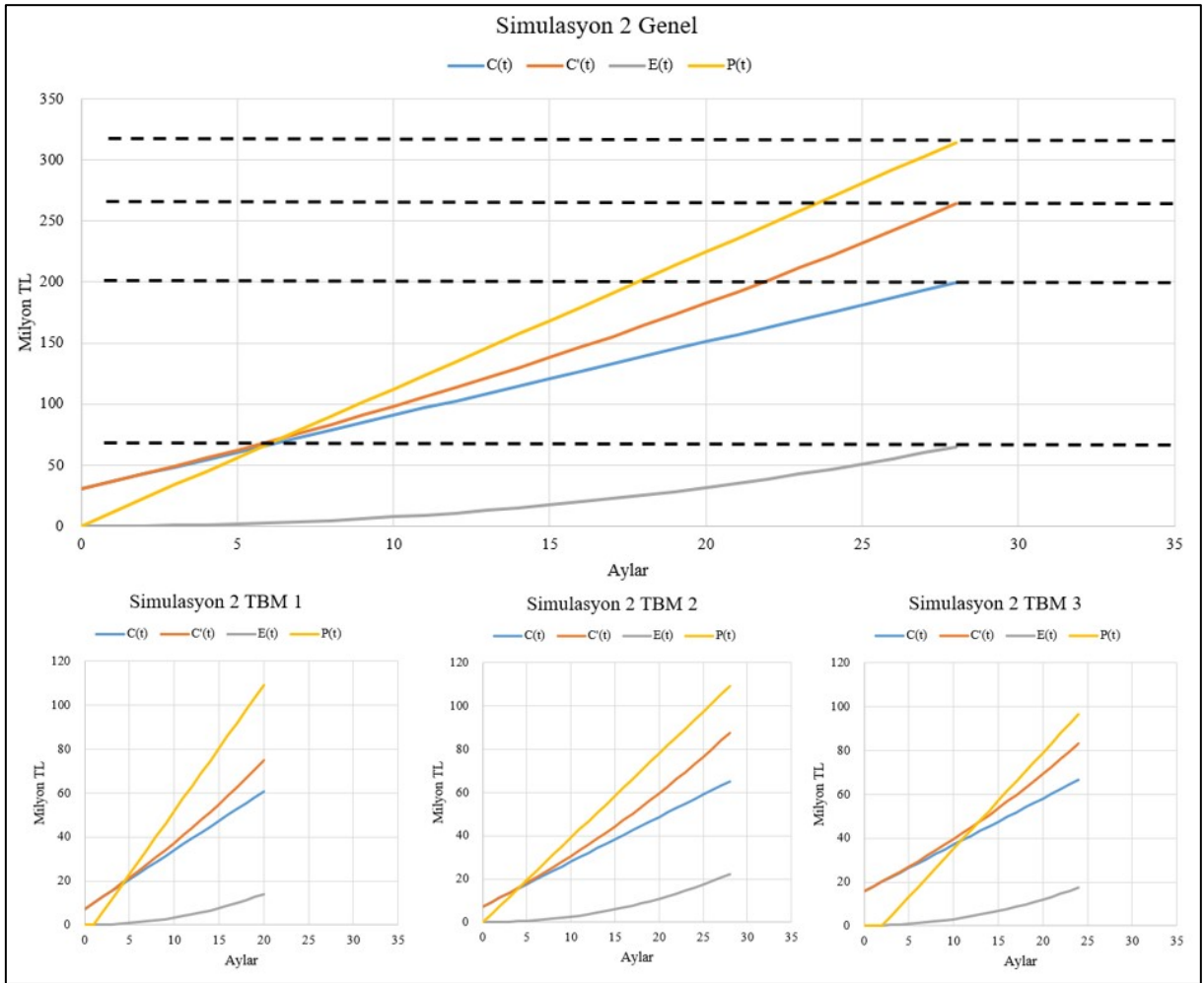


Şekil 4. 42: Simülasyon 1 için özet ekonomik veriler.

Şekil 4.41 ve 4.42'den de görüldüğü üzere proje tamamlanma süreleri TBM'lerle ilgili olmayan duraklama ve beklentiler elimine edildiğinde ciddi oranda düşerek, TBM 1 için 22 ay, TBM 2 için 28 ay, TBM 3 için 22 ay ve proje genelinde ise 28 ay olarak gerçekleşmiştir. Genele bakıldığında bu süre gerçekleşen durumdan (34 ay) 6 ay daha kısadır. Bu skümülatif bazda enflasyon farkı da 88 M TL'den 64 M TL'ye düşmüştür. Genel kârlılık ise %57,6'dan

enflasyon etkisi altında %18,8'e gerilemiş olsa da gerçekleşen durumdaki gibi %10 seviyesinin altına inmeyerek daha makul bir düzeyde kalmıştır.

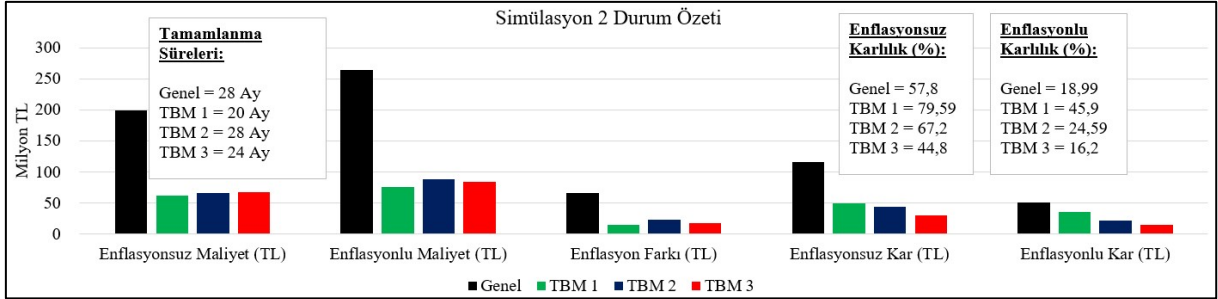
Bir başka önemli bulgu ise TBM'lerin kârlılıklarında görülmüştür. TBM'lerle ilgili olmayan duraklama ve beklentiler elimine edildiğinde her 3 TBM'de %20 üzerinde bir kârlılık oranı elde etmeyi başarmıştır. Özellikle TBM 1'in ilk yatırım maliyetinin de düşük olması sebebiyle enflasyon etkisi altında da %39,7 gibi bir karlılığa ulaşabilmiştir. TBM 3'ün ilk bakışta %20,6 kârlılık oranıyla geride kalmasının sebebi ise, ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasıyla açıklanabilir.



**Şekil 4. 43:** Simülasyon 2 ( $W_1$ ) için ekonomik göstergelerin değişimi.

Simülasyon 2, Simülasyon 3 ve Simülasyon 4 sırasıyla  $W_1$ ,  $W_{2-3}$  ve  $W_{3-4}$  ayrışma zonlarının proje ekonomisi üzerine olan etkilerinin gözlemlenmesi için geliştirilmiştir. Şekil 4.43'de  $W_1$

ayırışma zonu için gerçekleştirilmiş olan Simülasyon 2'ye ait ekonomik göstergelerin değişimi ve Şekil 4.44'de ise yine Simülasyon 2'ye ait özet ekonomik verilerin grafiği sunulmuştur.

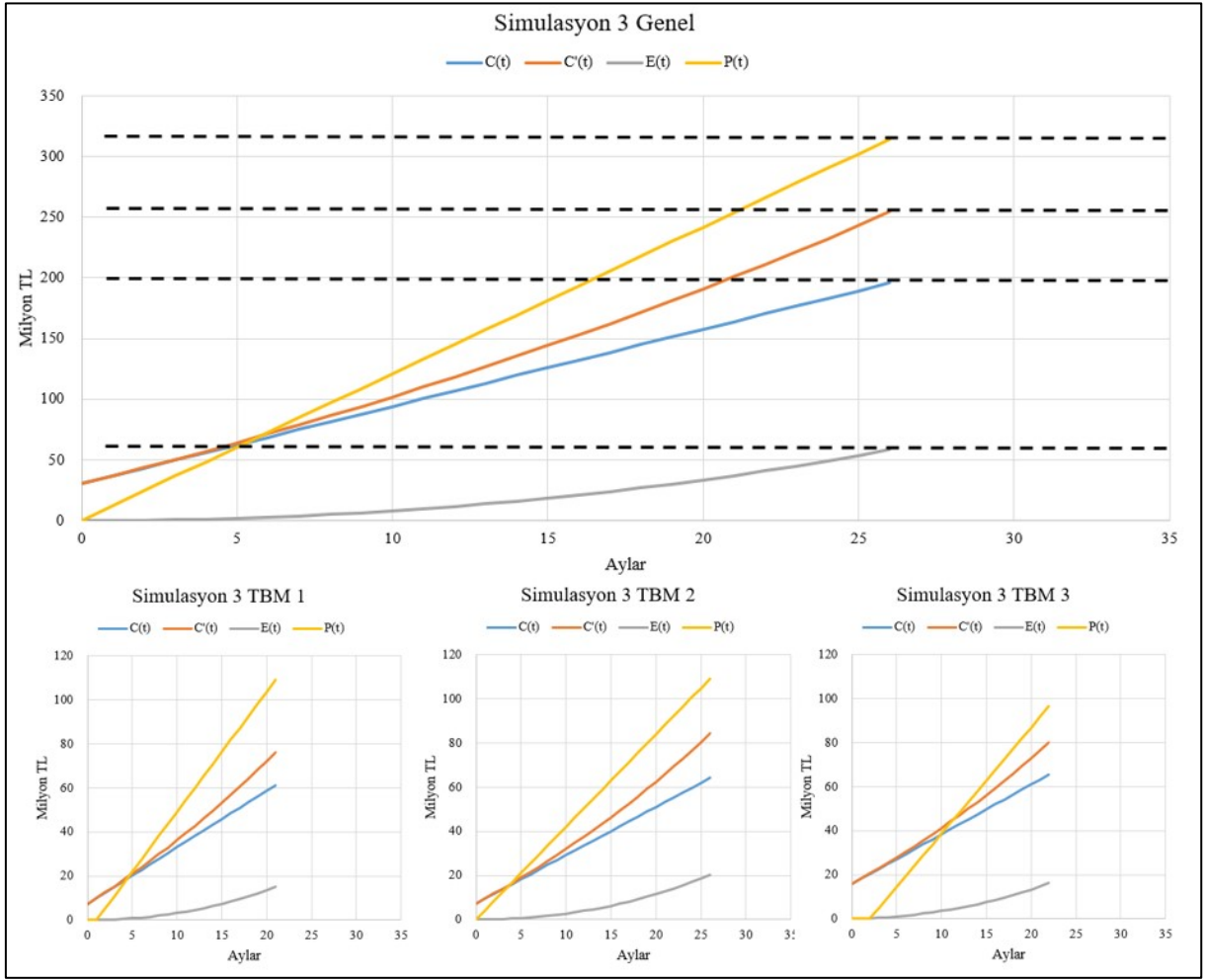


**Şekil 4. 44:** Simülasyon 2 için özet ekonomik veriler.

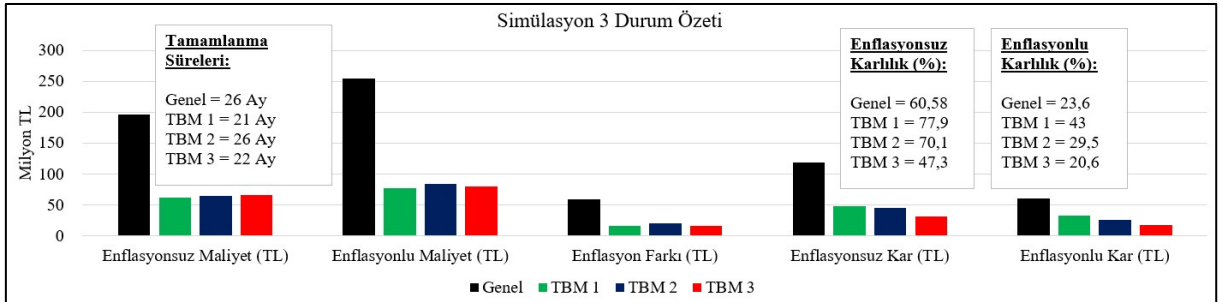
Şekil 4.43 ve 4.44 incelendiğinde, Simülasyon 1 ile Simülasyon 2 için proje tamamlanma süresi 28 ay ile aynı kalmıştır. Ancak  $W_1$  ayırışma zonu bazında en büyük değişiklik, TBM 1 için proje tamamlanma süresinin 20 aya düşmesiyle dikkat çekmektedir. Enflasyon öncesi ve sonrası kârlılık düzeyleri de  $W_1$  ayırışma zonu için Simülasyon 1'de olduğu gibi %57 ve %18 olarak gözlenmiştir. TBM 2'nin kârlılık durumunda herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum TBM 3 için incelendiğinde  $W_1$  ayırışma zonunun etkisi ortaya çıkmaktadır. TBM 3 enflasyon sonrası kârlılığı Simülasyon 1'e oranla %4 civarında azalarak %16,2'ye düşmüştür.  $W_1$  ayırışma zonu için enflasyon etkisi altında kârlılığı en yüksek olan TBM 1 (%45,9) olurken TBM 2 (%24,5) ise ikinci sırada yer almıştır.

Şekil 4.45 ve 4.46'da ise  $W_{2-3}$  ayırışma zonunu kapsayan Simülasyon 3'ün ekonomik göstergelerinin değişimi ve özet ekonomik veriler grafiği yer verilmiştir.

$W_{2-3}$  ayırışma zonunun kazı ekonomisi üzerinde etki analizinde, proje tamamlanma süresinin  $W_1$  ayırışma zonuna göre kısaldığı ve genel proje tamamlanma süresinin 28 aydan 26 aya düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi ise TBM 2'nin  $W_{2-3}$  ayırışma zonundaki performansının  $W_1$  ayırışma zonuna göre iyileşmesidir. TBM 2  $W_1$  ayırışma zonunda kazılarını 28 ayda tamamlarken  $W_{2-3}$  ayırışma zonunda bu süre 26 aya düşerek, projenin genel tamamlanma süresini de öne çekilmiştir. 2 aylık bu kısalma projeyi enflasyon etkisine daha dayanıklı hale getirmiş ve enflasyon etkisi altındaki genel kârlılık oranı  $W_1$  ayırışma zonuna göre artarak %18'den %23'e çıkmıştır. Enflasyon etkisi ise  $W_1$  ayırışma zonuna kıyasla azalarak 65 Milyon TL'den 58 Milyon TL'ye düşmüştür.



Şekil 4. 45: Simülasyon 3 ( $W_{2-3}$ ) için ekonomik göstergelerin değişimi.



Şekil 4. 46: Simülasyon 3 için özet ekonomik veriler.

$W_{2-3}$  ayırışma zonunda performansı artan bir diğer TBM ise TBM 3 olmuştur.  $W_1$  ayırışma zonunda enflasyon sonrası kârlılık oranı %16'ya düşen TBM 3,  $W_{2-3}$  ayırışma zonunda yeniden %20 kârlılık seviyesini yakalayabilmiştir.

$W_{2-3}$  ayırışma zonunda gözlenen bir başka bulgu da TBM 1 ve TBM 2'nin enflasyon öncesi ve sonrası kârlılıklarındaki farklıdır. TBM 1 ve TBM 2 enflasyon dikkate alınmadığı durumda

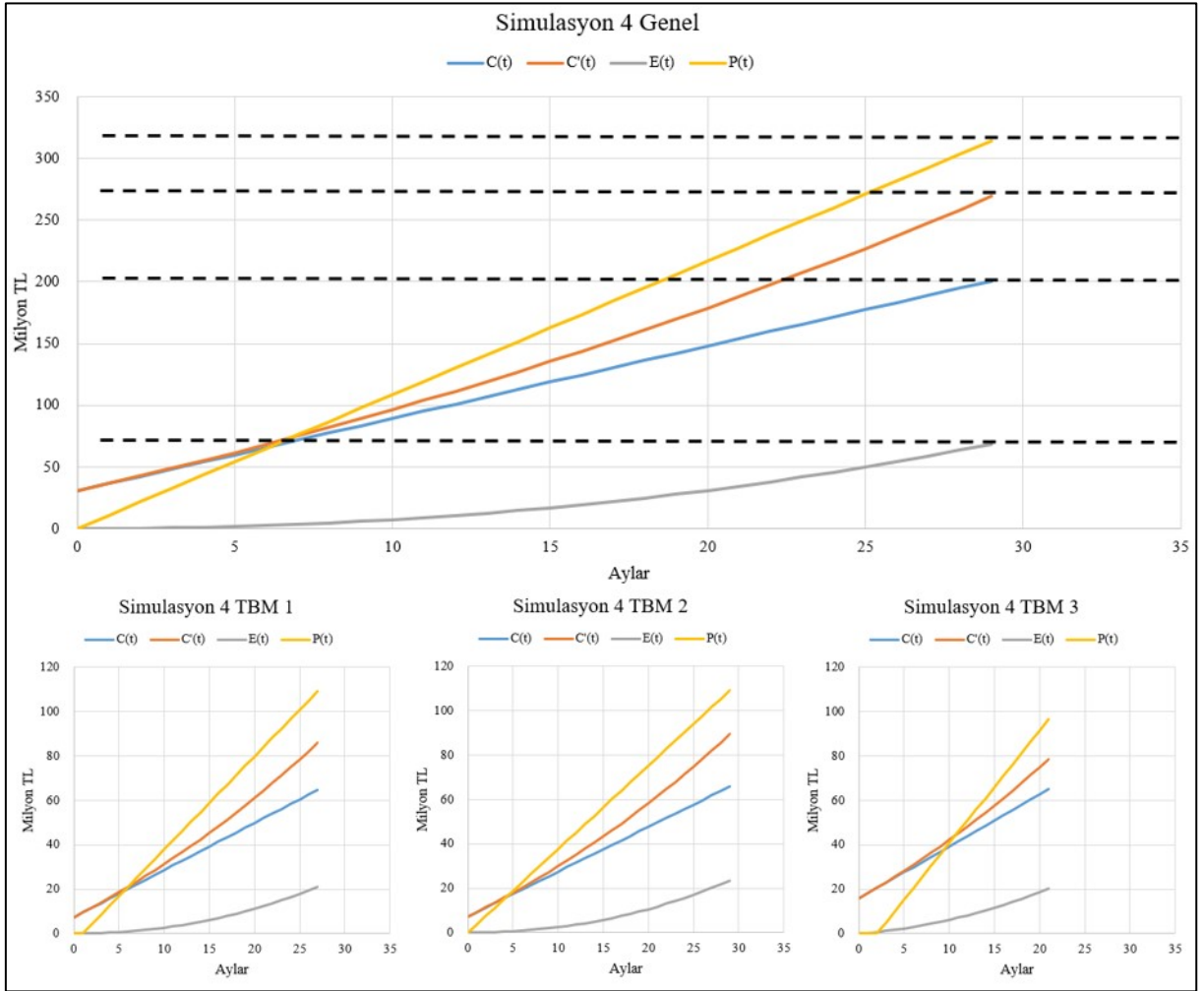
sırasıyla  $W_1$  için %77,59 ve %67,2 kârlılık oranlarına sahipken bu oranlar  $W_{2-3}$  için %77,9 ve %70,1 olarak gerçekleşmiştir. Enflasyon dikkate alınmadığı takdirde TBM 1 ve TBM 2 için makasın  $W_{2-3}$  ayrışma zonunda iyice kapandığı söylenebilir. Ancak TBM 1 ve TBM 2 arasında gerçekleşen tamamlanma süreleri farkı enflasyon sonrası kârlılıkları ciddi şekilde etkilemektedir. Enflasyon sonrası kârlılıklar  $W_1$  için TBM 1 = %45,9 ve TBM 2 = %24,5 olarak gerçekleşirken  $W_{2-3}$  için TBM 1 = %43 ve TBM 2 = %29,5 olmuştur. TBM 2  $W_{2-3}$  zonunda enflasyon dikkate alınmadığında kârlılık olarak TBM 1 ile aynı performansı sergilemiş gibi görünse de enflasyon etkisi dikkate alındığında kârlılıklar arasında %13,5'lük bir fark oluşmaktadır.

TBM 1 için hem  $W_1$  hem de  $W_{2-3}$  ayrışma zonlarında Simülasyon 1'e göre önemli ölçüde performans artışı gözlenmiştir. TBM 1 için Simülasyon 1'de enflasyon öncesi kârlılık %75,7, enflasyon sonrası kârlılık ise %39,7 olarak belirlenmişti. Hattın tamamının  $W_1$  ayrışma zonundan oluştuğu Simülasyon 2'de bu değerler sırasıyla %79,5 ve %45,9 iken hattın tamamının  $W_{2-3}$  ayrışma zonundan oluştuğu Simülasyon 3'te ise sırasıyla %77,9 ve %43'tür. Proje tamamlanma süresi tarafından kontrol edilen enflasyon etkisi dikkate alınmadığı durumda  $W_1$  ayrışma zonu için %3,8 ve  $W_{2-3}$  ayrışma zonu için ise %2,2'lik bir kârlılık artışı gözlenmiştir. Enflasyon etkisi de dikkate alındığında  $W_1$  için TBM 1'in karlılığındaki artış oranı %6,2 ve  $W_{2-3}$  için %3,3 olmuştur.

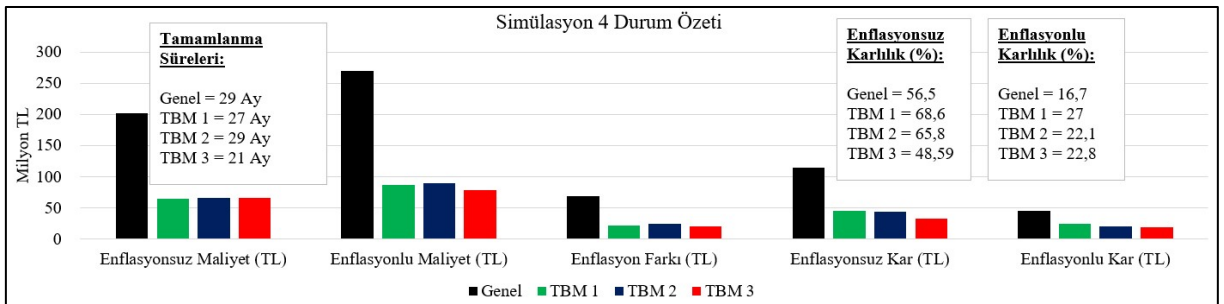
Şekil 4.47 ve 4.48'de  $W_{3-4}$  ayrışma zonuna ait ekonomik analizler için Simülasyon 4'e ait ekonomik göstergelerin değişimleri ve özet ekonomik veriler grafiği verilmiştir.

Şekil 4.47 ve 4.48 incelendiğinde genel proje tamamlanma süresinin  $W_{3-4}$  için 29 aya çıktığı görülmektedir.  $W_{2-3}$  ayrışma zonunda 28 aydan 26 aya düşen proje tamamlanma süresi  $W_{3-4}$  ayrışma zonu için farklı bir davranış sergileyerek artmıştır. Özellikle TBM 1 özelinde bakıldığında daha önce  $W_1$  için 20 ay ve  $W_{2-3}$  için 21 ay olan kazılarını tamamlama süresi  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda 27 aya yükselmiştir. Ayrışma derecesindeki artışa karşı TBM 1'in bu kadar duyarlı olmasının sebebi olarak kesici kafa tasarımı, düşük açıklık oranı ve 1,8 RPM'le limitli tahrik sistemi gösterilebilir.





Şekil 4. 47: Simülasyon 4 ( $W_{3-4}$ ) için ekonomik göstergelerin değişimi.



Şekil 4. 48: Simülasyon 4 için özet ekonomik veriler.

Benzer şekilde TBM 2  $W_1$  ayrışma zonunda kazılarını 28 ay,  $W_{2-3}$  ayrışma zonunda 26 ay ve  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda ise 29 ayda tamamlamıştır. TBM 2 için proje tamamlanma süresi açısından en uygun zon  $W_{2-3}$  ayrışma zonu olarak görülmüştür. TBM 2 ayrışma derecesinin artışıdan TBM 1 kadar yoğun şekilde etkilenmemiştir.

TBM 3 için proje tamamlanma süreleri ayrışma derecesinin artmasıyla beraber azalmıştır. TBM 3  $W_1$  ayrışma zonunda 24 ay,  $W_{2-3}$  ayrışma zonunda 22 ay ve  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda ise 21 aylık sürelerde kazılarını tamamlamıştır. Benzer şekilde TBM 3'ün enflasyon sonrası karlılığı da  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda %22,8 ile en yüksek değerine ulaşmıştır. İlk yatırım maliyetlerinin yüksekliği de göz önüne alındığı %22,8'lik kârlılık değeri daha anlamlı hale gelmektedir. Buradan yola çıkarak aynı zamanda TBM 3'ün  $W_{3-4}$  gibi aşırı ayrışmış/bozunmuş kaya/zemin ortamlarına daha uygun olduğu yorumu da yapılabilir.

Projenin enflasyon etkisi altında genel kârlılık düzeyi ise  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda %16,7 ile ayrışma zonları arasında en düşük değeri almıştır.  $W_1$  ayrışma zonunda projenin enflasyonun etkisi altındaki genel karlılığı %18,9 ve  $W_{2-3}$  ayrışma zonunda ise %23,6'dır. Enflasyon sonrası kârlılık açısından  $W_{2-3}$  ayrışma zonu en avantajlı konumda bulunurken oldukça ayrışmış/bozunmuş ve problemlili kaya/zemin ortamları olarak kabul edilebilecek  $W_{3-4}$  ayrışma zonlarına ait birimler proje ekonomisi ve karlılığı üzerinde yıkıcı etki göstermiştir.

Yapılan ekonomik analizler sonucu yapılabilecek bir başka yorum ise  $W_{2-3}$  ayrışma zonunun EPB TBM'lerle kazılabilirlik açısından daha ekonomik olduğudur.  $W_1$  gibi ayrışmamış veya çok az ayrışmış sağlam kabul edilebilecek kaya ortamları EPB TBM'lerin kesici kafa tasarımları veya tahrik sistemleri için zorlayıcı olabilmektedir.  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda ise aşırı ayrışmaya bağlı olarak ayna stabilitesi problemleri ve yüksek ayna basıncı kullanma gerekliliği, topaklanma gibi adezyon problemleri zorlayıcı unsurlar olarak öne çıkmakta ve TBM ilerleme hızlarını düşürerek uzun vadede kazı ekonomisini olumsuz etkilemektedir.  $W_{2-3}$  gibi orta derece de ayrışmış kazı ortamlarında ise ayna stabilitesine bağlı kaygılar ve riskler  $W_{3-4}$  ayrışma zonlarında olduğu kadar yüksek düzeyde olmamakta, görece olarak daha düşük ayna basınçlarının uygulanması mümkün olmakta ve topaklanma, tıkanma, sarma, blokaj gibi problemlerle daha az karşılaşmaktadır. Öte yandan  $W_1$  ayrışma zonlarında gözlenen kaya ortamları gibi yüksek dayanımlar söz konusu olmadığından kazı hızında düşüşler veya disk/kesici kafa bakımı gibi tünel ilerlemesi performansını olumsuz etkileyebilecek durumlarla  $W_{2-3}$  ayrışma zonunda genellikle karşılaşılmamaktadır.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma kapsamında yapılan tüm analiz ve bulgular bir bütün olarak değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Tez kapsamında Mahmutbey – Mecidiyeköy Metro Projesine ait jeolojik ve jeoteknik etütler titizlikle incelenmiş, projede kullanılan 3 farklı EPBM'in teknik özellikleri değerlendirilmiş ve EPBM'lerin kazıları sırasında elde edilen kazı performans verileri ile vardiya/üretim raporları bir bütün halinde derlenmiştir.
- Delme tünellerin güzergâhında yer alan Trakya Formasyonu, Çekmece Formasyonu Güngören Üyesi ve Çekmece Formasyonu Çukurçeşme Üyesine ait birimler litolojik olarak değerlendirilmiştir. Hem proje geoteknik etüt çalışmaları hem de tünellerin kazıları sırasında yapılan gözlemler neticesinde litolojik birimlerin yanı sıra ayrışma derecelerinin de kazı performansı ve ekonomisi üzerinde etkin rol oynadığı düşünülmüştür. Buradan yola çıkarak tünel güzergahı üzerinde yer alan jeolojik birimler ayrışma derecelerine göre gruplandırılmış ve veri setine eklenmiştir.
- Her 3 EPBM için de ringlere bağlı olarak kazı performans parametrelerinin değişimi ve temel istatistiksel analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir TBM için RPM (rev/dk), Tork (kNm), İtme Kuvveti (kN), Ayna Basıncı (bar), İlerleme Hızı (mm/dk), Penetrasyon (mm/rev), Spesifik Enerji (kWh/m<sup>3</sup>), Net İtme Kuvveti (kN) gibi parametrelerin kazılar boyunca ve ayrışma zonları özelinde ortalama değerleri, standart sapmaları, değişkenlik katsayıları (%V) %95 güven aralıklarıyla beraber analiz edilmiştir. Elde edilen bulgularda TBM'lerin teknik özelliklerinin, kullanım durumlarının (yaşlarının), tahrik sistemlerinin, kafa açıklık oranlarının beklenildiği şekilde performans parametreleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür.
- TBM'lerin spesifik enerji ve penetrasyon ilişkileri her bir ayrışma zonu ( $W_1$ ,  $W_{2-3}$ ,  $W_{3-4}$ ) için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Ayrışma/bozunma derecesinin her 3 EPB-TBM için , spesifik enerji – penetrasyon ilişkisini belirleyen ve denetleyen önemli bir fiziko-kimyasal büyüklük olduğu belirlenmiştir. Ayrışma zonlarına bağlı olarak SE (kWh/m<sup>3</sup>) büyüklüğünün tahminine yönelik yapılan fonksiyonel kestirimlerde (regresyon analizlerinde), spesifik enerji ve penetrasyon büyüklükleri arasında güçlü ve anlamlı üssel (tek değişkenli, non-linear) bağıntılar elde edilmiştir. İstanbul'un ayrışmış ve

geçiş kayacı olarak değerlendirilebilecek gevşek ve zayıf çökel istiflerinde en verimli kazı, %37 gibi en yüksek kafa açıklığına sahip ve makina faydalanma değerleri  $U = \%18$  (normalize edilmiş  $U = \%27,6$ ) olan TBM 3 ile gerçekleştirilmiştir.

- Ayırışma derecesinin EPBM'ler açısından bir başka önemli etkisi de ayna stabilitesi açısından ortaya çıkmaktadır. Artan ayırışma derecesine bağlı olarak ayna stabilitesi zayıflamakta ve kaybolmaktadır. Bu etkinin irdelenebilmesi için toplam itme kuvveti içerisinde ayna basıncına ayrılan kısım (EP) ile ayna basıncından arındırılmış itme kuvveti (NTh) oranı kullanılmıştır. NTh ve EP değerleri her bir TBM için ayırışma zonları bazında değerlendirildiğinde  $W_1$ ,  $W_{2-3}$  ve  $W_{3-4}$  ayırışma zonları güçlü ilişki sergilemiştir.  $W_1$  ayırışma zonu  $NTh/EP = 10$  doğrusu üzerinde kümelenirken,  $W_{2-3}$  ayırışma zonu  $NTh/EP = 10$  ve  $NTh/EP = 1$  doğruları arasında kümelenmiştir.  $W_{3-4}$  ayırışma zonu ise stabilize problemlerine işaret eden  $NTh/EP = 1$  doğrusu altında yoğunlaşmıştır. Gözlenen bu güçlü ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesi için ileride daha kapsamlı çalışmalar yapılması planlanmaktadır.
- Zemin şartlandırma parametreleri olan  $C_f$ , FER ve FIR (%) büyüklükleri, özellikle ileri derecede ayırışmış/bozunmuşluğun temsil edildiği  $W_{3-4}$  derecesinde belirginleşmiştir. Nitekim, çoklu regresyon analizlerinden elde edilen anlamlı ve güçlü fonksiyonel bağıntı ve kestirimler, artan ayırışma derecesinde zemin şartlandırmanın önemini ve kazı performansına etkisini sayısal olarak desteklemektedir. Özellikle  $W_{3-4}$  ile ileri derece ayırışmış kiltaşlarında kazı sırasında artan ince taneli kil ve kil boyutu ( $> 2\mu m$ ) malzeme yüzdesinin, kazı ilerleme hızını düşürerek (TBM 1 için ilerleme hızında  $W_1$  ayırışma zonuna kıyasla %31,7'lik bir azalma gözlenmiştir) kazı performansını üzerinde olumsuz etkiye sahip olmaktadır.
- TBM 3'ün kazmış olduğu killi birimlerde gerçekleştirilen regresyon analizlerinde en iyi kestirim  $[SE] = 8,05 - 0,379[PR] + 0,571[NTh/EP] + 0,075[FER] - 0,021[FIR] \rightarrow r = 0,894$  bağıntısı ile elde edilmiştir. Burada spesifik enerji [SE] kazı verimini temsil ederken penetrasyon [PR] TBM ilerleme hızı ve kesici kafa dönüş hızını ifade etmektedir. [NTh/EP] olarak gösterilen Net İtme Kuvveti'nin Ayna Basıncı'na oranı ise ayna stabilitesi durumunu denkleme eklemektedir. FER oranı köpüğün işlevselliğini FIR (%) ise kullanım miktarını belirtmektedir.
- Zemin şartlandırmanın ayırışma zonlarıyla ilişkisi incelenirken elde edilen bir başka önemli sonuç ise  $W_{3-4}$  gibi aşırı ayırışmış zemin/kaya ortamlarının değerlendirilmesinde

litolojinin de mutlaka göz önünde bulundurulması gerekliliğidir. Yapılan analizlerde  $W_{3-4}$  ayrışma zonuna ait killi birimlerin davranışları ile yine  $W_{3-4}$  ayrışma zonuna ait iri taneli (siltli – kumlu) birimlerinin davranışlarının farklı olduğu görülmüştür. Özellikle tane boyutunun artması ile zemin ortamı EPBM'ler için uygun kabul edilen tasarım sınırlarının dışına çıkabilmekte ve kazı performanslarında ciddi düşüşler gözlenebilmektedir. Bu sebeple killi birimlerin analizlerinin siltli ve kumlu birimlerden ayrı tutulması gerekmektedir.

- Öte yandan TBM kesici kafa tasarımına ve teknik özelliklerine bağlı olarak ayrışma derecesinin artmasıyla beraber TBM 3'ün kazı performansında artışlar gözlenmiştir. Kafa açıklık oranı %37 olan TBM 3  $W_1$  ayrışma zonunda 29,8 mm/dk ilerleme hızına sahipken,  $W_{2-3}$  ayrışma zonunda 25,79 mm/dk ortalama ilerleme hızı elde etmiştir.  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda ise TBM 3 ortalama ilerleme hızı 31,7 mm/dk'ye çıkmıştır. TBM 3 için yüksek kafa açıklık oranının orta ayrılmış/bloklı kazı ortamlarında stabilite kaygıları doğurduğu ve ilerleme hızını yavaşlattığı düşünülmektedir. Bu dezavantajlı durum aşırı ayrılmış bölge olan  $W_{3-4}$ 'e geçildiğinde ise avantaja dönüşmekte ve kazı ilerleme hızlarında  $W_{2-3}$  ayrışma zonuna göre %22,9'luk bir artış izlenebilmektedir.
- TBM'ler ve TBM kullanılan projeler için oldukça önemli olan keski tüketimi de ayrışma zonları açısından tez kapsamında ele alınmıştır. Elde edilen bulgular incelendiğinde ayrışma derecesi ile keski tüketimi arasında TBM'lerin kesici kafa tasarımlarına bağlı olarak farklı ilişkiler ortaya çıkmıştır. Ayrışma derecesine bağlı olarak gelişen parçalı ayna koşullarının önemli bir etken olduğu gözlemiştir. Yine orta dereceli ayrışma/bozunma sonucu gelişen heterojen ayna yüzeyinin kesici kafa ve kesici kafa ekipmanları üzerinde tahrip edici etkisi olduğu saptanmıştır.
- Proje kapsamında gerçekleşen tünel ilerlemeleri, arızalar/duraklamalar ile birlikte değerlendirilmiştir ve makineden faydalanma oranları saptanmıştır. Böylelikle proje gelişiminin analizi yapılmış ve TBM'lerle ilgili olan ve TBM'lerle ilgili olmayan duraklama/beklemeler ayrılmıştır. Ayrışma zonlarının etkisinin belirlenmesi için makineden faydalanma oranları normalize edilmiş ve kümülatif tünel ilerlemeleri yeniden hesaplanmıştır.
- Makineden faydalanma oranlarına bakıldığında TBM 3 %18 ile en iyi durumda olurken TBM 1 %17,9 ile ikinci sırada TBM 2 ise %11,7 ile en sonda yer almıştır. Bu makineden faydalanma oranları TBM'lerle ilgili olmayan bekleme ve duraklamaların

çıkartılıp normalize edilmesiyle tekrar hesaplandığında TBM 3 %27,6 değerini almış, TBM 1 %26 ve TBM 2 ise %18,3 değerine ulaşmıştır. Bu durum şehir tünelticiliğinde sadece TBM kazı performansının değil projeye ilgili güçlüklerinde etkisini ortaya koymaktadır.

- Tez kapsamında enflasyon etkisini de dikkate alacak şekilde hazırlanan ekonomik modelde hem gerçekleşen durum hem de ayrışma zonlarına göre düzenlenen kümülatif tünel ilerlemeleri kullanılarak ayrışma zonlarının maliyetlere ve hakediş gelirlerinin değişimine etkisi irdelenmiştir. Yapılan değerlendirmelerde ayrışma zonlarına bağlı olarak proje süresinde değişimler gözlenmiştir. Bu değişimlerin, özellikle enflasyon etkisi ile birlikte değerlendirildiğinde çok daha anlamlı olduğu ortaya çıkmıştır.
- Ekonomik değerlendirmeler sonucunda orta ayrışmış olan  $W_{2-3}$  ayrışma zonunun EPB TBM'ler için en ekonomik olan ayrışma zonu olduğu belirlenmiştir. Bu ayrışma zonunda kazılabilirlik  $W_1$  ayrışma zonuna göre daha rahatken  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda görülen stabilite, tıkanma, blokaj gibi problemler bulunmamaktadır.
- Ekonomik açıdan EPBM'ler en çok  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda zorlanmıştır. Düşen kazı hızına bağlı olarak artan tamamlanma süresi özellikle enflasyon etkisi altında proje ekonomisini olumsuz etkilemiştir. Bu olumsuz etkinin  $W_{3-4}$  ayrışma zonunun ileri derecede ayrışma sonucu kazı materyalinin kaya özelliğini %30 – %50'sini yitirerek artan ince taneli malzemedan kaynaklanması ile açıklanabilmektedir. TBM 1 için  $W_{3-4}$  ayrışma zonunda proje tamamlanma süresinin  $W_{2-3}$  ayrışma zonuna kıyasla 6 ay uzaması dikkat çekici bir bulgudur.
- $W_1$  ayrışma zonu kesici kafa tasarımına oldukça duyarlıdır. Sert ve yüksek dayanımlı kaya birimlerinin kazılarına elverişli olmayan EPBM'ler için zorlayıcı olabilmekte, özellikle arıza ve bekleme sürelerini artırarak proje ekonomisini olumsuz etkileyebilmektedir. TBM 3 için %4 oranında azalan karlılık göstergesi bu duruma örnek olarak gösterilebilir.
- Gerçekleştirilen tüm ekonomik analizlerde enflasyon etkisinin karlılık üzerinde çok büyük bir etken olduğu görülmüştür. Özellikle proje tamamlanma süresinin artmasıyla beraber enflasyonun kümülatif bazda etkisi yıkıcı hale gelmekte ve bazı durumlarda ön görülen karlılığı tamamen ortadan kaldırabilmektedir. Yapılan çalışmalarda en erken proje tamamlanma süresinin elde edildiği ve en karlı durum olan  $W_{2-3}$  ayrışma zonuna

ait Simülasyon 3’de enflasyonsuz ön görülen genel karlılık %60,58 iken enflasyon etkisi dikkate alındığında genel karlılık %23,6’ya düşmektedir.

- İstanbul gibi karmaşık, değişken litolojilerin bulunduğu zorlu jeolojik ortam ve koşullarda gerçekleştirilecek EPB tünelticilik faaliyetlerinde, kazı materyallerinin ayrışma/bozunma derecelerinin de dikkate alınmasının; daha verimli bir makine seçimi yanında tünellerin jeoteknik açıdan daha emniyetli ve hızlı olarak ilerleyebilmesi ve özellikle projenin ekonomikliğinin belirlenmesi ve denetlenmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- ANON, (1995). The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Q J Eng Geol* 28:207–242.
- Aksu, F., (2010). Zemin şartlandırmanın pasa basınçlı (EPB) TBM'in performansına etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.
- Avunduk E, Copur H (2018). Empirical modelling for predicting excavation performance of EPB TBM based on soil properties. *Tunnelling and Underground Space Technology* 71:340-353.
- Ateş, U., (2013). A comparative study on the relationships between design parameters of TBMs with two current examples of large section TBMs, Istanbul Technical University Graduate School of Science, Engineering and Technology (MSc Thesis), İstanbul, Turkey.
- Ateş, U., Bilgin, N., Çopur, H., (2014). Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects, *Tunnelling and Underground Space Technology* 40 (2014) 46–63.
- Ateş, U., Binen, I.S., Acun, S., Murteza, M., Çelik, Y., (2016). EPB tunneling challenges in sandy ground, 2nd International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DiGs İstanbul), İstanbul, Turkey.
- Ateş, U., Binen, I.S., Acun, S., Çelik, Y., (2017). TBM performance and challenges faced during excavation of Mecidiyekoy - Mahmutbey metro line, International Tunneling Symposium in Turkey: Challenges of Tunneling (TunnelTurkey, İstanbul) İstanbul, 02–03 December 2017.
- Balcı, C., Tumac, D., (2012). Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter, *Tunnelling and Underground Space Technology* 30 (2012) 183–193.
- Bappler, K. (2006). Full face tunnel boring machines, Herrenknecht AG. ITA/AITES – Training Course Tunnel Engineering, Seoul.
- Becket, D., (1980). Brunel's Britain. Newton Abbot: David & Charles. ISBN 0-7153-7973-9.
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Tumac, D., Akgul, M., and Yuksel, A. (2008). The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in İstanbul Kozyatagi-Kadikoy metro tunnels. World Tunnel Congress 2008 – Underground Facilities for Better Environment and Safety, Agra, India, Sept. 22-24.



- Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., (2014). Mechanical excavation in mining and civil industries, Taylor & Francis Group, International Standard Book Number-13: 978-1-4665-8475-4.
- Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., (2016). TBM Excavation in Difficult Ground Conditions, Wilhelm Ernst & Sohn, , International Standard Book Number-978-3-433-03150-6
- Bilgin, N., (2015). Mecidiyeköy-Mahmutbey Metro Hattı EPB Ayna Basıncı Hesapları, Teknik Rapor, Gülermak-Kolin-Kalyon Metro Yapım Ortaklığı, İstanbul, Türkiye.
- Bilgin, N., Acun, S., Ates, U., Murteza, M., Celik, Y., (2017). The factors affecting the performance of three different TBMs in a complex geology in Istanbul, Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 – Surface challenges – Underground solutions. Bergen, Norway.
- Bilgin, N., (2018). Ümraniye – Ataşehir – Göztepe Metro Hattı EPB Ayna Basıncı Hesapları, Teknik Rapor, Gülermak-Nurol-Makyol Metro Yapım Ortaklığı, İstanbul, Türkiye.
- Binen, I.S., Ates, U., Acun, S., Copur, H., Celik, Y., (2018). Effects of Cutter Types on Cutter Consumption and TBM Performance in Different and Complex Geological Conditions. ITA - AITES WORLD TUNNEL CONGRESS 21 - 26 April 2018 Dubai International Convention & Exhibition Centre, UAE.
- Budach, C., Thewes, M., 2015. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research. Tunnell. Underground Space Technol. 50, 296–304.
- Çınar, T., Kuşku, İ., Dalgıç, S., (2017). Relations Between Surface Deformations and Geotechnical Properties of Soil Within the Mecidiyekoy – Mahmutbey Subway TBM Routes. International Tunneling Symposium in Turkey: Challenges of Tunneling (TunnelTurkey, Istanbul) Istanbul, 02–03 December 2017.
- Çopur, H., Aydın, H., Bilgin, N., Balcı, C., Tumac, C., Dayanc, C., (2014). Predicting performance of EPB TBMs by using a stochastic model implemented into a deterministic model, Tunnelling and Underground Space Technology 42 (2014) 1–14.
- Das, B.M., (2013). Principles of geotechnical engineering, Cengage Learning, International Standard Book Number – 9781133108672
- EFNARC., (2005). Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock,
- Einstein, H., and Bobet, A. (1997). Mechanized tunnelling in squeezing rock–From basic thoughts to continuous tunnelling. Tunnels for people, ITA World Tunnel Congress ‘97, Vienna
- Farrokh, E., 2013. Study of utilization factor and advance rate of hard rock TBMs, The Pennsylvania State University The Graduate School Department of Energy and Mineral Engineering, PHD Thesis.
- Gonzalez, C., Arroyo, M., Gens, A., (2016). Thrust and torque components on mixed-face EPB drives, Tunnelling and Underground Space Technology 57 (2016) 47–54.

- Guglielmetti, V. (2008). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*: Taylor & Francis.
- Herrenknecht, M., and Rehm, U. (2003). *Mixshield Technology. Soft Ground and Hard Rock Mechanical Tunneling Technology Seminar*, Colorado School of Mines Campus.
- Hollman, F.S., Thewes, M., (2013). Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling, *Tunnelling and Underground Space Technology* 37 (2013) 96–106.
- Japan Society Of Civil Engineers (JSCE). (2007). *Standard Specifications for Tunneling - Shield Tunnels*.
- Kara, F., Binen, I.S., Ateş, U., (2018). Evaluation of TBM Performance in Varying Lithology During Construction of Mahmutbey-Mecidiyekoy Metro, *Proceedings of the 4th International Underground Excavations Symposium, Istanbul, Turkey*.
- Kara, F., (2017). Performance analysis of TBM in different geological conditions for Mahmutbey–Mecidiyekoy (Istanbul) metro Project, *Aksaray University Graduate Sciences Geological Engineering Master Thesis, Aksaray, Turkey*.
- Ketin, İ., (2016). *Genel Jeoloji Yerbilimlerine Giriş*, İTÜ Vakfı Yayınları, ISBN: 9789757463092.
- Langmaack, L., 2002. *Advanced technology of soil conditioning in EPB Shield Tunnelling*, Chemical Eng., TBM Project Manager, MBT International, Zürich (CH), p16.
- Langmaack, L., Lee, K.F., (2016). Difficult ground conditions? Use the right chemicals! Chances–limits–requirements, *Tunnelling and Underground Space Technology* xxx (2016) xxx–xxx.
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., and Herrenknecht, M. (2008). *Hardrock tunnel boring machines*: Ernst & Sohn.
- Milligan, G., (2000). *Lubrication and soil conditioning in tunneling, pipe jacking and microtunneling, A State-Of-The-Art Review*, Geotechnical Consulting Group Technical Notes by Director Dr George Milligan.
- Mohammed, J., (2017). Numerical modelling for circle tunnel under static and dynamic loads for different depth, *Research Journal of Mining* Volume 1 (2017) Issue 1 Pages 1-11.
- Namlı, M., Bilgin, N., (2017). A model to predict daily advance rates of EPB-TBMs in a complex geology in Istanbul, *Tunnelling and Underground Space Technology* 62 (2017) 43–52.
- Önalp, A., Arel, E., (2013). *Geoteknik bilgisi 1 zeminler ve mekaniği çözümlü problemlerle*, Birsen Yayınevi, ISBN: 978-975-511-304-5.
- Peila, D., 2014. Soil conditioning for EPB shield tunnelling. *KSCE J. Civil Eng.* 18 (3), 831–836

- Polat, F., (2014). Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Hattı, Depo Bakım Sahası ve Depo Bağlantı Hatları İnşaat İşleri, Yenimahalle – Mahmutbey İstasyonları Arası Jeolojik ve Jeoteknik Etütü Raporu, İstanbul. Yayınlanmış Rapor.
- Polat, F., (2015). Mecidiyeköy – Mahmutbey Metro Hattı, Depo Bakım Sahası ve Depo Bağlantı Hatları İnşaat İşleri, Yenimahalle – Alibeyköy İstasyonları Arası Jeolojik ve Jeoteknik Etütü Raporu, İstanbul. Yayınlanmış Rapor.
- Rostami, J., Chang, S.-H., (2017). A Closer Look at the Design of Cutterheads for Hard Rock Tunnel-Boring Machines, *Engineering* 3 (2017) 892–904.
- Rostami, J., (2016). Performance prediction of hard rock Tunnel Boring Machines (TBMs) in difficult ground, *Tunnelling and Underground Space Technology* 57 (2016) 173–182.
- Shah, R., (2017). A numerical study on backfilling of the tail void with two-component grout based on laboratory tests, Politecnico Di Torino, Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Ph.D. Thesis, Torino, Italy.
- Shi, H., Yang, H., Gong, G., and Wang, L., (2011). Determination of the cutterhead torque for EPB shield tunneling machine. *Automation in Construction*, 20(8), 1087-1095
- Shirlaw, J. N., (2016). Pressurised TBM tunnelling in mixed face conditions resulting from tropical weathering of igneous rock, *Tunnel. Underg. Space Technol.* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.018>
- Slinchenko, D. (2010). Control of ground settlement in EPB tunneling Retrieved 01.10.2012, from [http://www.lovat.com/pdfs\\_powerpoints/ArticlesPapers/Control\\_of\\_ground\\_settlement\\_in\\_EPB\\_tunnelling.pdf](http://www.lovat.com/pdfs_powerpoints/ArticlesPapers/Control_of_ground_settlement_in_EPB_tunnelling.pdf)
- Song, X., Liu, J., and Guo, W. (2010). A Cutter Head Torque Forecast Model Based on Multivariate Nonlinear Regression for EPB Shield Tunneling. 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence
- Thewes, M., Hollman, F., (2016). Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs, *Tunnelling and Underground Space Technology* xxx (2016) xxx–xxx.
- Tokgöz, N., Binen, I.S., (2018). Performance analysis and evaluation of two different EPBMs excavating the same formation – variable lithology conditions, 4th International Underground Excavations Symposium, (Eds: Bilgin, N., Çopur, H., Tümaç, D.) 13-14 September 2018, pp:179-192, İstanbul, Turkey.
- Tokgöz, N., (2016). An assessment method for fine-grained sedimentary materials excavated by EPB TBM, *Geomechanics and Tunnelling* 9 (2016), No. 4, p. 326 – 337.
- Tokgöz, N., Binen, I.S., Avunduk, E., (2015). An evaluation of fine grained sedimentary materials in terms of geotechnical parameters which define and control excavation performance of EPB TBM's, *Tunnelling and Underground Space Technology* 47 (2015) 211–221.

Tokgöz, N., Binen, I.S., Kuruyer, V., (2013). An evaluation of fine grained sedimentary soils of waste water tunnels in terms of geotechnical parameters defining and controlling excavation performance, Proceedings of the 3th International Symposium on Underground Excavations for Transportation, Istanbul, Turkey.

URL-1.,[https://www.dfdurofelguera.com/catalogo\\_tedesa/obras/Fotos%20Back-Ups/Back-Up%20Tunel%20de%20GUADARRAMA.jpg](https://www.dfdurofelguera.com/catalogo_tedesa/obras/Fotos%20Back-Ups/Back-Up%20Tunel%20de%20GUADARRAMA.jpg), [Ziyaret Tarihi: 06.03.2019].

URL-2.,<http://tunnel.ita-aites.org/en/how-to-go-underground/construction-methods/mechanized-tunnelling/main-beam-tbms>, [Ziyaret Tarihi: 06.03.2019].

URL-3.,  
<http://www.wikizeroo.net/index.php?q=aHR0cHM6Ly90ci53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvUExD>

Ündül, Ö., Tuğrul, A., (2011). The influence of weathering on the engineering properties of dunites, Rock Mechanics and Rock Engineering, DOI: 10.1007/s00603-011-0174-1

Vardar, M., (2018). Mühendislik jeolojisi ve jeomekaniğinin tünelticilikteki rolü ve önemi-tünel geotekniği. Proceedings of the 4th International Underground Excavations Symposium, 13-14 September, pp:13-26, Istanbul, Turkey.

Vergara, I. M., Saroglou, C., (2017). Prediction of TBM performance in mixed-face ground conditions, Tunnelling and Underground Space Technology 69 (2017) 116–124.

Zhou, H., Gao, Y., Zhang, C., Yang, F., Hu, M., Liu, H., Jiang, Y., (2018). A 3D model of coupled hydro-mechanical simulation of double shield TBM excavation, Tunnelling and Underground Space Technology 71 (2018) 1–14.

**EKLER**



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	İrfan Serkan BİNEN
Doğum Yeri	FATİH
Doğum Tarihi	10.08.1988
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	+90 554 362 88 94
E-Posta Adresi	serkanbinen@gmail.com
Web Adresi	<a href="https://www.linkedin.com/in/irfan-serkan-binen-83016a83">linkedin.com/in/irfan-serkan-binen-83016a83</a>



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Maden Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı	06.06.2012

Yüksek Lisans	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	
Mezuniyet Yılı	Tarih girmek için tıklayın veya dokununuz.

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Anabilim Dalı Adı
Programı	Program Adı

Makale ve Bildiriler	
Ates, U., Copur, H., Mamaghani, A. S., Avunduk, E., Binen, I. S., 2019. Investigation of Vibration Patterns Occured During TBM Excavation and Rock Cutting Tests. Proceedings of Rock Dynamics Summit in Okinawa – Okinawa, Japan	
Ates, U., Binen, I. S., Kara, F., Akca, M., Turker, B., Cinar, T., Acilioglu, T., 2019. The Relations Between Surface Settlements and TBM Excavation Parameters. Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art: Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019), May 3-9, 2019, Naples, Italy	

- Tokgoz, I.S. Binen., 2018. Performance Analysis and Evaluation of Two Different EPBMs Excavating the Same Formation-Variable Lithological Conditions. Proceedings of 4th International Symposium on Underground Excavations – Chamber of Mining Engineers of Turkey & Turkish Tunneling Society; Istanbul, Turkey
- F. Kara, I.S. Binen, U. Ates., 2018. Evaluation of TBM Performance in Varying Lithology During Construction of Mahmutbey-Mecidiyekoy Metro Proceedings of 4th International Symposium on Underground Excavations – Chamber of Mining Engineers of Turkey & Turkish Tunneling Society; Istanbul, Turkey
- I.S. Binen, U. Ates, S. Acun, H. Copur, Y. Celik., 2018. Effects of Cutter Types on Cutter Consumption and TBM Performance in Different and Complex Geological Conditions, ITA – AITES World Tunneling Congress; Dubai, United Arab Emirates
- U. Ates, I.S. Binen, S. Acun, Y. Celik., 2017. TBM Performance and Challenges Faced During Excavation of Mecidiyekoy – Mahmutbey Metro Line, International Tunneling Symposium in Turkey: Challenges of Tunneling; Istanbul, Turkey)
- U. Ates, I.S. Binen, S. Acun, M. Murteza, Y. Celik., 2016. EPB Tunneling Challenges in Sandy Ground, 2nd International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds; Istanbul, Turkey
- N.Tokgoz, I.S. Binen, E. Avunduk., 2015. An Evaluation of Fine Grained Sedimentary Materials in Terms of Geotechnical Parameters Which Define and Control Excavation Performance of EPB TBM's, Tunnelling and Underground Space Technology
- N. Tokgoz, I.S. Binen, V. Kuruyer., 2013. An Evaluation of Fine Grained Sedimentary Soils of Waste Water Tunnels in Terms of Geotechnical Parameters Defining and Controlling Excavation Performance, Proceedings of 3rd International Symposium on Underground Excavations for Transportation – Chamber of Mining Engineers of Turkey & Turkish Tunneling Society; Istanbul, Turkey
- I.S. Binen, V. Kuruyer., 2013. TBM Application in Buyukcekmece Waste Water Tunnel Project, Proceedings of 3rd International Symposium on Underground Excavations for Transportation – Chamber of Mining Engineers of Turkey & Turkish Tunneling Society; Istanbul, Turkey)
- A. Bascetin, S. Tuylu, Z. Sertabipoglu, D. Adıguzel, I.S. Binen., 2012. The Study of Geotechnical parameters for Paste Technologies – A General Review, SME 2012 – Society for Mining, Metallurgy and Exploration; Seattle, USA