

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YATAY ÖN ARAŞTIRMA DELGİ VERİLERİ İLE KAYACIN JEOMEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ MELEN BOĞAZ GEÇİŞ  
TÜNELİ ÖRNEĞİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Aydın BAKIR**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Jeoloji Mühendisliği Programı**

**NİSAN 2024**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YATAY ÖN ARAŞTIRMA DELGİ VERİLERİ İLE KAYACIN JEOMEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ MELEN BOĞAZ GEÇİŞ  
TÜNELİ ÖRNEĞİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Aydın BAKIR  
(505062201)**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Jeoloji Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. E. Vural YAVUZ**

**NİSAN 2024**



**ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL**

**CORRELATION OF GEOMECHANICAL PROPERTIES OF ROCK WITH  
HORIZONTAL PRE-DRILLING DATA MELEN BOSPHORUS CROSSING  
TUNNEL EXAMPLE**

**Ph.D. THESIS**

**Aydın BAKIR  
(505062201)**

**Department of Geological Engineering**

**Geological Engineering Programme**

**Thesis Advisor: Prof. Dr. E. Vural YAVUZ**

**APRIL 2024**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505062201 numaralı Doktora Öğrencisi Aydın BAKIR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YATAY ÖN ARAŞTIRMA DELGİ VERİLERİ İLE KAYACIN JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ MELEN BOĞAZ GEÇİŞ TUNELİ ÖRNEĞİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. E. Vural YAVUZ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Gönül TOZ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Hanifi ÇOPUR** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Fethi KADIOĞLU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. T. Ahmet ERTEK** .....  
İstanbul Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **02 Şubat 2024**  
**Savunma Tarihi** : **29 Nisan 2024**



*Eşime ve çocuklarıma,*



## ÖNSÖZ

Beni bu çalışmanın yapılmasına teşvik eden, araştırma konusunun seçiminden çalışmanın sonuçlandırılmasına kadar her aşamada desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerini paylaşan, değerli hocam Sn. Prof. Dr. E. Vural YAVUZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın yapılması sırasında gösterdikleri sabır, yakın ilgi ve yardımları dolayısıyla Sn. Prof. Dr. Hanifi ÇOPUR'a, Sn. Prof. Dr. Gönül TOZ'a teşekkür ediyorum. Melen projesinde birlikte çalıştığım, başta engin jeoloji bilgisinden her zaman istifade ettiğim, değerli Jeoloji Yük. Müh. İsmail ERİŞ'e ve diğer çalışma arkadaşlarıma, Devlet Su İşleri 14. Bölge Müdürlüğü Geoteknik Hizmetler ve Yeraltı Suları Şube Müdürü Sn. Serkan DAĞLIOĞLU'na ve diğer DSI çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Yine beni bu çalışmayı yapmaya sevk eden, değerli akademik bilgi ve deneyimlerini bana aktaran Sn. Prof. Dr. Turgut ÖZTAŞ'a, YAPI MERKEZİ AR-GE bölümünde kıymetli hocam Sn. Prof. Dr. Ergin ARIOĞLU'na, Sn. Dr. Burak GÖKÇE'ye derin teşekkürlerimi bildirmek isterim.

Ayrıca, bu çalışmanın çeşitli aşamalarındaki kıymetli yardımları için, Araştırma Görevlisi Mehmet KORKUT'a, Dr. Ali YÜKSEL'e doktora sürecinde verdikleri destekten dolayı Yapı Merkezi Slovenya Projesi Proje Müdürü Sn. Bahadır ORAL'a, Proje Müdür Yardımcıları Sn. Tarık KARTAL ve Sn. Timuçin ÖZBAYIR'a, tez metinlerinin gözden geçirilmesi ve İngilizce çevirilerinin kontrolleri konusunda ki yardımlarından dolayı Jeoloji Mühendisleri Sn. Erdoğan CULFA ve Sn. Cemrecan KOCA ile proje bünyesindeki diğer mesai arkadaşlarıma, böylesi akademik çalışmalara gösterdikleri sürekli teşvik ve destekleri için Yapı Merkezi İnşaat San. A.Ş. Hoding Başkan Vekili Sn. Köksal ANADOL'a, Yönetim Kurulu Başkanı Sn. Başar ARIOĞLU'na, teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında gösterdiği sonsuz sabır ve manevi desteği için eşime ve Oğullarım Can ile Ali Cem'e tüm kalbimle şükranlarımı sunarım.

Nisan 2024

Aydın BAKIR  
(Jeoloji Yüksek Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SEMBOLLER</b> .....	<b>xv</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xix</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xxvii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
<b>2. MELEN PROJESİ ve BOĞAZ GEÇİŞ TÜNELİ</b> .....	<b>5</b>
2.1 Giriş.....	5
2.2 Büyük Melen Sistemini Oluşturan Yapılar .....	6
<b>3. GENEL JEOLJİ</b> .....	<b>11</b>
3.1 Giriş.....	11
3.1.1 Bölgesel jeoloji .....	11
3.1.2 İstanbul Boğazının oluşumu.....	13
3.1.3.1 Dolayoba formasyonu .....	16
3.1.3.2 Kartal formasyonu.....	19
3.1.3.3 Damar kayaları.....	21
3.2 Tünel Güzergahının Belirlenmesi ve Jeolojik Araştırmaları.....	23
<b>4. JEOLJİK BİRİMLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ</b> .....	<b>27</b>
4.1 Giriş.....	27
4.2 Dolayoba Formasyonunun Dayanım ve Deformasyon Özellikleri .....	27
4.3 Kartal Formasyonunun Dayanım ve Deformasyon Özellikleri.....	29
4.4 Daykların Dayanım ve Deformasyon Özellikleri.....	30
4.5 Kaya Sınıfları .....	30
<b>5. DELGİLERİN YAPIMI VE KULLANILAN EKİPMANLAR</b> .....	<b>33</b>
5.1 Giriş.....	33
5.2 TBM Kazısı Ve Yatay Delgi Ekipmanı .....	33
5.3 Boğaz Geçiş Tünelinde Kullanılan TBM.....	34
5.4 Boğaz Geçiş Tünelinde Kullanılan Yatay Delgi Ekipmanları ve Özellikleri ..	37
5.4.1 Ön araştırma delgilerinin delme paterni ve yapım metodolojisi.....	38
5.4.2 Ön araştırma delgisinin konumlandırılması ve ayna kontrolü .....	41
<b>6. DELGİ VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ</b> .....	<b>45</b>
6.1 Delgi Verilerinin Değerlendirilmesine Yönelik Önceki Çalışmalar .....	45
6.1.1 Ön araştırma delgi verilerinin değerlendirilmesi .....	47
6.1.2 Ön araştırma delgi verilerine göre kaya koşullarının belirlenmesi .....	51
6.1.2.1 Sert kaya zonu (Diyabaz; Sağlam Kumtaşı) (A).....	53
6.1.2.2 Orta - sert kaya zonu (Kireçtaşı, Kili kireçtaşı) (B).....	53
6.1.2.3 Yumuşak kaya zonu (Çamurtaşı, Şeyl) (C).....	54

6.1.2.4 Çok yumuşak kaya zonu ( Fay, Ezik Zon, Ayrışmış Kaya) (D) .....	54
6.2 Kazı Ortamının Jeomekanik Karakteristikleri.....	59
6.3 Tünel Seviyesi RQD Değerleri İle Yatay Delgi Verilerinin Karşılaştırılması .	65
<b>7. SONUÇLAR VE DEğERLENDİRMELER .....</b>	<b>69</b>
7.1 Tartışma.....	72
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>73</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>79</b>
<b>ÖZGEÇMİş.....</b>	<b>83</b>



## KISALTMALAR

<b>DSİ</b>	: Devlet Su İşleri
<b>EPB</b>	: Earth Pressure Balance (Zemin Basıncı Dengeleme)
<b>FeO</b>	: Demir Oksit
<b>GPa</b>	: Gigapascal
<b>GSİ</b>	: Geological Strength Index (Jeolojik Dayanıklılık İndeksi)
<b>IAS</b>	: Instantaneous Advance Speed (Anlık İlerleme Hızı)
<b>İ.B.B.</b>	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
<b>İSKİ</b>	: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
<b>MPa</b>	: Megapascal
<b>MWD</b>	: Measuring While Drilling ((Delgi Sırasında Ölçüm)
<b>NATM</b>	: New Austrian Tunneling Method (Yeni Avusturya Tünel Metodu)
<b>PDA</b>	: Probe Drill A port (A portunda yapılan Yatay Ön araştırma delgisi)
<b>Q</b>	: Q-value
<b>RQD</b>	: Rock Quality Designation
<b>SP</b>	: Sözleşme Paketi
<b>TBM</b>	: Tunnel Boring Machine (TDM-Tünel Delme Makinası)
<b>TP</b>	: Itme Pressure (İtme Basıncı)
<b>TQ</b>	: Torque Pressure (Tork Basıncı)



## SEMBOLLER

$\sigma_{\phi}$	: Brezilyan Çekme Dayanımı
$c$	: Kohezyon
$\Phi$	: İçsel Sürtünme Açısı
$\sigma_u$	: Kayada Tek Eksenli Basınç Dayanımı
$E_s$	: Elastisite Modülü
$\nu$	: Poisson Sayısı
$kN$	: Kilo Newton
$kNm$	: Kilo Newton metre



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> : Büyük Melen sistemini oluşturan tünellerin ve şaftların büyüklükleri. .	<b>9</b>
<b>Çizelge 3.1</b> : Güzergah araştırmaları için yapılan sondajlar.....	<b>24</b>
<b>Çizelge 4.1</b> : Yumrulu Kireçtaşlarının (Dolayoba Formasyonu) istatistik sonuçları.	<b>28</b>
<b>Çizelge 4.2</b> : Mikritik Kireçtaşlarının (Dolayoba Formasyonu) istatistik sonuçları.	<b>28</b>
<b>Çizelge 4.3</b> : Resifal Kireçtaşlarının (Dolayoba Formasyonu) istatistik sonuçları. ..	<b>29</b>
<b>Çizelge 4.4</b> : Karbonatlı Şeyl-Çamurtaşlarının (Katal Formasyonu) istatistik sonuçları.....	<b>29</b>
<b>Çizelge 4.5</b> : Dişbazın istatistik sonuçları.....	<b>30</b>
<b>Çizelge 4.6</b> : Tünel güzergahında geçilen formasyonların farklı litolojilerine ait kaya sınıfları. ....	<b>31</b>
<b>Çizelge 4.7</b> : Boğaz Tüneli kazılarında alınan numuların basınç dayanımı test sonuçları (DSİ 2002; Bilgin hiç. 2016)'dan özetlenmiştir. ....	<b>31</b>
<b>Çizelge 5.1</b> : Kazı imalatında kullanılan TBM'in genel özellikleri.....	<b>36</b>
<b>Çizelge 5.2</b> : TBM üzerine montajı yapılan hidrolik delgi makinasının genel özellikleri. ....	<b>37</b>
<b>Çizelge 6.1</b> : Tüm tünel kazısı boyunca sert kaya olarak (A) tanımlanan ortama ait delme hızı, baskı, tork istatistik sonuçları.....	<b>53</b>
<b>Çizelge 6.2</b> : Tüm tünel kazısı boyunca orta-sert kaya (B) olarak tanımlanan ortamın delme hızı, baskı, tork istatistik sonuçları.....	<b>54</b>
<b>Çizelge 6.3</b> : Tüm tünel kazısı boyunca orta-zayıf kaya (C)olarak tanımlanan ortamın delme hızı, baskı, tork istatistik sonuçları.....	<b>54</b>
<b>Çizelge 6.4</b> : Tüm tünel kazısı boyunca zayıf-çok zayıf kaya (D) olarak tanımlanan ortamın delme hızı, baskı, tork istatistik sonuçları. ....	<b>54</b>
<b>Çizelge 6.5</b> : Düşey sondajlardan elde edilen tüm RQD değerlerinin istatistiksel değerlendirmesi.....	<b>59</b>
<b>Çizelge 6.6</b> : Tünel kazı aynasına (D) denk gelen RQD değerlerinin istatistiksel değerlendirmesi.....	<b>60</b>
<b>Çizelge 6.7</b> : Tünel çapının iki katına (2D) denk gelen kemer bölgesinde ki RQD değerlerinin istatistiksel değerlendirmesi. ....	<b>61</b>
<b>Çizelge 6.8</b> : Tünel kazı aynasına (D) denk gelen RQD değerleri ile yatay delgi verilerinin istatistiksel değerlendirmesi. ....	<b>63</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Melen Sistemi ve Boğaz Geçiş Tüneli yer bulduru haritası.....	5
Şekil 2.2 : Büyük Melen sistemini oluşturan proje paketleri (Url-1) .....	6
Şekil 2.3 : SP: 7 kapsamındaki alt proje paketinin kapsamındaki yapılar.....	7
Şekil 2.4 : Beykoz şaftı ile Boğaziçi Tüneli ve NATM tünelleri (DSİ-2009- sunum notları).....	8
Şekil 2.5 : Büyük Melen sistemini oluşturan sözleşme paketleri (DSİ-2009- sunum notları).....	9
Şekil 3.1 : İstanbul Grubu genel stratigrafi kesiti (Eriş, 2009 dan uyarlanmıştır)....	12
Şekil 3.2 : İki kıta arasında (Tarabya-Beykoz arasında) açılmış olan boğaz altı sondajları ve Boğaz çökel katmanları (Çağatay vd, 2000). .....	14
Şekil 3.3 : İstanbul Boğazı altındaki temel kaya yüzeyi morfolojisi (Bakır vd., 2012) .....	15
Şekil 3.4 : Tünel güzergah sondajları ve kazı öncesi jeolojik kesit (EK - A) (Bakır et.al, 2012). .....	16
Şekil 3.5 : Dolayoba Formasyonu'nun mercanlı kireçtaşı düzeyi (Özgül; 2005). ....	17
Şekil 3.6 : Dolayoba Formasyonu laminalı mikritik kireçtaşı düzeyi ve kıvrımlı yapısı (Özgül; 2005). .....	17
Şekil 3.7 : Dolayoba formasyonuna ait örneğin mikro görünümü (Büyütme:4x10). .....	18
Şekil 3.8 : Dolayoba formasyonu mikritik kireçtaşının polarize ışıkta görünümü (Büyütme :4x10). .....	19
Şekil 3.9 : Kartal formasyonunun Kireçtaşı-şeyl düzeyi (Yaklaşım tüneli girişi-İstinye -Dereçi). .....	20
Şekil 3.10 : Kartal formasyonuna ait şeylin ince kesit görünümü (Büyütme 10x10). .....	20
Şekil 3.11 : Kireçtaşlarını keserek yerleşen Diyabaz daykı (Baltalimanı yokuşu)....	21
Şekil 3.12 : Dolayoba Formasyonu resifal kireçtaşı düzeyi ve faylı diyabaz daykı (İstinye Burnu). .....	22
Şekil 3.13 : Diyabaz örneğinin mikroskopta görünümü (Büyütme: 4x10). .....	22
Şekil 3.14 : Tarabya burnu açıklarındaki aşınım çukurunun üç boyutlu modeli (Bakır vd.2021). .....	23
Şekil 3.15 : Tünelin üzerindeki örtü kalınlığı ve su kütlelerinin durumu (Bakır vd., 2012). .....	25
Şekil 3.16 : Boğaz geçiş tüneli için belirlenen I. ve II. Geçiş güzergahları (Bakır vd.2012). .....	25
Şekil 3.17 : Boğaz geçiş tüneli için belirlenen yeni güzergahtaki sondajların lokasyonları (Bakır vd.2012). .....	26
Şekil 5.1 : Kazıda kullanılan TBM'in fabrika ve sahada montajı .....	35
Şekil 5.2 : Pasa basınçlı TBM'in yapısı (Yüksel, 2014).....	37
Şekil 5.3 : Kazıda kullanılan TBM'deki delgi ekipmanlarının yerleşimi (Najder, 2009). .....	38
Şekil 5.4 : Delgi ekipmanları genel görünümü (Najder, 2009). .....	38

<b>Şekil 5.5 :</b> Büyük Melen Projesi'ndeki pratik delme paterni (Kesici kafadaki A-delikleri – mavi daireler; 'Arka pozisyonundaki' B-delikleri yeşil daireler; X –Delinmesi müsait olmayan delik yerleri).....	<b>39</b>
<b>Şekil 5.6 :</b> Yatay ön araştırma delgilerindeki bindirme zonu ve plan görünüşü.....	<b>40</b>
<b>Şekil 5.7 :</b> Ön araştırma delgilerinin uygulama paterni .....	<b>40</b>
<b>Şekil 5.8 :</b> Boğaziçi tüneline km:3+158 de delme işlemi tamamlandıktan sonra tünel aynasında gerçekleştirilen foto ve belgeleme çalışmalarından bir örnek. Foto (a & b) Sert- ayrılmış diyabaz ve önceki yatay delgi noktaları; Foto (c) Litoloji tanımlaması ve süreksizlik (J1-J2-J3) konumu; Foto (d)Kireçtaşı-diyabaz dokanağında kalsit damarı .....	<b>41</b>
<b>Şekil 5.9 :</b> Tünelde (Km:3+193,32) de kazı aynasının sol orta kesiminde görülen kireçtaşı, diyabaz daykı ve ezilme zonu (fay).....	<b>42</b>
<b>Şekil 5.10 :</b> Ön araştırma delgisinin pozisyonlanması ve tüneldeki konumunu .....	<b>43</b>
<b>Şekil 6.3 :</b> Ön araştırma delgi verilerinden farklı zonların ayırtlanması ve jeolojik modelin belirlenmesi.....	<b>49</b>
<b>Şekil 6.4 :</b> Perimetrik haritanın oluşturulması ve bu haritanın tünel güzergahında ait olduğu yere yerleştirilmesi.....	<b>50</b>
<b>Şekil 6.5 :</b> İstanbul Boğaziçi Tünelinde kazı aynası önündeki faya yaklaşım modeli ve fay zonu araştırması. ....	<b>50</b>
<b>Şekil 6.6 :</b> İstanbul Boğaziçi Tünelinde kazı aynası önündeki faya yaklaşım modeli ve fay zonu araştırması (Najder 2009 dan değiştirilerek) .....	<b>51</b>
<b>Şekil 6.7 :</b> İlerleme hızı, normal baskı ve normal tork değişimi aralıkları esas alınarak belirlenen litolojik zonlar (Bakır vd. 2011).....	<b>52</b>
<b>Şekil 6.8 :</b> Tünel kazısında geçilen formasyonların % dağılımı. ....	<b>55</b>
<b>Şekil 6.9 :</b> Tünel kazısında geçilen birimlerin % dağılımı. ....	<b>56</b>
<b>Şekil 6.10 :</b> Perimetrik haritanın oluşturulması ve yüzey jeolojisi verileri ile korelasyonu (EK B). ....	<b>57</b>
<b>Şekil 6.11 :</b> Kazı sonrası tünel boy kesiti (EK C). ....	<b>58</b>
<b>Şekil 6.12 :</b> Tünel güzergahında yapılan tüm sondajların RQD dağılımları. ....	<b>60</b>
<b>Şekil 6.13 :</b> Düşey sondaj kuyusu boyunca ölçülen RQD değerlerinin dağılımı. ....	<b>60</b>
<b>Şekil 6.14 :</b> BPMB 101 nolu sondajın 80 ve 81 nolu ön araştırma delgisi ile kesiştiği noktadaki ortalama anlık yatay delgi hızı. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 6.15 :</b> BPMB 101 nolu sondajın 80 ve 81 nolu ön araştırma delgisi ile kesiştiği noktada ki itme basıncına göre normalize edilmiş delgi penetrasyon oranı. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 6.16 :</b> BPMB 101 nolu sondajın 80 ve 81 nolu ön araştırma delgisi ile kesiştiği noktada ki tork basıncına göre normalize edilmiş delgi penetrasyon oranı. ....	<b>62</b>
<b>Şekil 6.17 :</b> Tork ve itme basıncına göre normalize edilmiş penetrasyon oranı ile RQD değerlerinin karşılaştırılması. ....	<b>64</b>
<b>Şekil 6.18 :</b> RQD ve anlık ilerleme hızları arasındaki ilişki. ....	<b>64</b>
<b>Şekil 6.19 :</b> İtme Basıncı ve Tork değerlerine göre normalize edilmiş anlık ilerleme hızları ile RQD değerleri arasındaki ilişki. ....	<b>65</b>
<b>Şekil 6.20 :</b> RQD ve ham anlık ilerleme hızları arasındaki ilişki. ....	<b>65</b>
<b>Şekil 6.21 :</b> Tünel aynası sağ ve sol tarafından yapılan iki delginin (PDA 013/121-PDA 013/122) değerlendirilmesiyle oluşturulan jeolojik model (plan görünüşü). ....	<b>67</b>
<b>Şekil A.1:</b> Tünel güzergahı boyunca açılan sondajlar ve kazı öncesi hazırlanan jeolojik kesit (EK A) (Bakır et.al, 2012).....	<b>80</b>
<b>Şekil B.1:</b> Perimetrik haritanın oluşturulması ve yüzey jeolojisi verileri ile	

	korelasyonu (Bakır et.al, 2012).....	81
<b>Şekil C.1:</b>	Perimetrik haritanın oluşturulması ve yüzey jeolojisi verileri ile korelasyonu (Bakır et.al, 2012).....	82





# YATAY ÖN ARAŞTIRMA DELGİ VERİLERİ İLE KAYACIN JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ MELEN BOĞAZ GEÇİŞ TÜNELİ ÖRNEĞİ

## ÖZET

TBM'in (Tunnel Boring Machine) kullanılacağı tünel projelerinde, jeolojik araştırmaların özenle ve detaylı bir şekilde gerçekleştirilmesi, TBM'in kazı sırasındaki performansını tahmin etmek için önemli veriler sağlar. Kazı öncesi elde edilen bulgular ve çıkarılan sonuçlar, teknik, ekonomik, morfolojik ve jeolojik faktörler nedeniyle mühendislik yaklaşımı açısından belirli sınırlamalara tabidir. Bu nedenle, çoğu kez araştırma aşamalarında belirlenemeyen yer ve boyut gibi bazı sorunlar, tünel kazısı sırasında karşımıza çıkabilir.

Kazı sırasında önerilen araştırmalardan biri, kazı aynası önünde yatay ön araştırma delgilerinin açılmasıdır. Açılan bu sondajlardan elde edilen veriler analiz edilerek, sondaj mesafesi kadar olan kazı ortamındaki jeolojik-hidrojeolojik koşullar ayrıntılı olarak belirlenebilmektedir. Yatay ön araştırma delgileri sırasında kaydedilen anlık delme hızı (Instantaneous Advance Speed – IAS), uygulanan baskı (Itme Pressure – TP) ve tork (Torque Pressure - TQ) değerlerindeki değişim oranlarının, geçilen formasyonların karakteristiklerini büyük oranda yansıttığı bilinmektedir.

Delgilerden elde edilen penetrasyon oranı, tork ve baskı gibi verilerinin doğru bir yaklaşımla analiz edilmesi ve ortam özelliklerini tam olarak yansıtması için makina ve operatörden kaynaklı hatalardan arındırılması gerekmektedir.

Kazı ortamının jeolojik ve hidrojeolojik koşullarına uygun EPB Hard Rock tipi TBM (Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine) kullanılarak kazılan tünelin çapı 6,15 metre, uzunluğu ise 3145 metredir. Projede kullanılan TBM'in kesici kafası ile kazı aynası arasındaki bir segment genişliği olan, 1,2 metrelik kesimde, ortalama her 36 metrede bir tekrarlanan ayrıntılı belgeleme çalışmaları (foto, video, ölçümler) yapılmıştır. Yapılan her bir delgi sonucunda; birim ilerleme için gerekli uç baskısı ve tork değişimleri ile gözlemsel bulgular değerlendirilerek geçilen litolojiler tanımlanmış, su gelirine yönelik gözlem ve değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca kazı odasına girilerek kazı aynasının görülebilen alanlarında fotoğraf çekimleri gerçekleştirilmiş, çatlak sistemleri ve tabaka konumları belirlenmeye çalışılmıştır.

Büyük Melen Projesi Boğaziçi tünelinin kazısı sürecinde gerçekleştirilen yatay ön araştırma delgi verileri üzerinde yapılan çalışmaların analizleri esas alınarak, RQD değerleri ile değişim trendleri arasında, bir yaklaşımda bulunulmuştur.

Bu kapsamda, delgi verileri normalize edilerek, güzergah araştırmaları için yapılan sondajların RQD (Rock Quality Designation) değerleri ile olan ilişkileri belirlenmiştir. Bu analizler sayesinde, tünel güzergahında yapılan düşey sondajlardan elde edilen RQD değerleri ile değişim trendleri ortaya konmuştur. Bu verilerden elde edilen trendler yardımı ile formasyon karakteristikleri ve yatay ön delgi performansı

arasındaki ilişkiler ortaya konulabilecektir. Ayrıca, daha fazla düşey sondaj ve yatay ön araştırma delgi verilerine dayanarak TBM performans tahmin modelleri geliştirmek de mümkün olacaktır.

Tünel güzergahı mühendislik jeolojisi modelinin oluşturulması aşamasında, bölgede daha önce yapılmış olan jeoloji ve mühendislik jeolojisi çalışmalarından, tünel güzergahı boyunca yapılmış ve proje eki olarak sunulmuş olan temel araştırma amaçlı sondaj ve deneysel çalışmalardan, kazı öncesi hazırlanmış olan tünel jeoteknik boy kesiti verilerinden ve ortalama 36 metre derinliğindeki tünel çapı kadar bindirmeli, tünel eksenine paralel konumlu ileri araştırma delgilerinden yararlanılmıştır.

Tünel güzergahı üzerinde gerçekleştirilen araştırmalar kapsamında, toplam uzunluğu 1692,15 metre olan 14 adet düşey sondaj kuyusu açılmıştır. Bu sondajlar aracılığıyla 1128 adet RQD değeri elde edilmiştir. Ortalama RQD değerleri hesaplanarak bir dağılım aralıkları belirlenmiştir. Aynı zamanda, yatay ön araştırma delgi verilerinin değerlendirilmesiyle birlikte, penetrasyon ve tork oranlarındaki değişimlerin kaya dayanımı ve jeolojik özellikleri doğru bir şekilde yansıttığına dair elde edilen veriler bu tez kapsamında incelenmiştir.

Tünel kazısı sırasında volkanik dayklardan alınan kaya numunelerin tek eksenli basınç dayanımları, 63 ila 120 MPa arasında değiştiği test edilmiştir. Hatta bazı numunelerde bu değer 200 MPa'a kadar olduğu görülmüştür. Bu bulgular, projenin güzergahındaki daykların, İstanbul'da daha önce yapılan projelerde test edilen dayklardan yaklaşık 2,25 kat daha sağlam olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Bu tür yüksek dayanımlı kayalar, TBM'nin (tünel açma makinesi) kesici kafasındaki kesici disklerin aşınmasını önemli ölçüde etkileyebilir. Daykların yüksek dayanımı, disklerin daha hızlı aşınmasına ve daha sık değiştirilmesine neden olmuştur. Bu durum, kazı süresini uzatmış ve maliyetleri arttırmıştır.

Tünel kazısı boyunca, yapılan yatay delgilerden alınan ve iki milyondan fazla noktadan oluşan veri setindeki veriler, delgi derinliğine bağlı değerlendirilerek, birim ilerleme için gerçekleşen baskı ve tork değerleri hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen veriler, gerekli dönüşümler yapıldıktan sonra, grafik haline getirilmiştir. Farklı zonların belirlenmesinde ilerleme hızı, normal baskı ve normal tork değişimi aralıkları esas alınmıştır.

Yapılan değerlendirmelerde, her kesim için belirlenmiş olan delgi anlık ilerleme hızları, itme ve tork basıncı değerlerine göre normalize edilmiş penetrasyon oranları ile RQD değerleri karşılaştırılmıştır. Değerlendirmeye alınan her bir kesimde, yatay ön araştırma delgilerinin verileri ortalama alınarak "delgi anlık ilerleme hızı" ortalaması hesaplanmıştır. Daha sonra, delgi anlık ilerleme hızları itme ve tork basıncı değerlerine göre normalize edilmiştir. Bu sayede, her bir kesim için itme ve tork basıncına göre delgi ilerleme hızı arasındaki ilişkiyi gösteren ortalama değerler elde edilmiştir.

Tüm parametreler, RQD'ye negatif bir korelasyon gösterir, yani kaya kalite göstergesi (RQD) ne kadar iyi olursa anlık ilerleme hızları ve normalize edilmiş penetrasyon oranları da o kadar düşük çıkmaktadır. Ancak sınırlı sayıda sondaj verisine dayanan bu korelasyon ifadelerinin geçerliliği daha fazla veri ilave edilmesi ile artacağı muhakkaktır. Ayrıca, delgi anlık ilerleme hızları için oluşturulan grafiklerin benzer bir seyir izlediği ve uyumlu olduğu görülmektedir. Bu da verilerin ortam koşullarını doğru şekilde yansıttığını ve güvenilirliğini teyit etmesi bakımından önemlidir.

Bulunan bu ilişkiler yardımıyla benzer jeolojik koşullarda yatay delgi verilerine

dayanarak belirli bir yaklaşımla daha güvenli kazı ortamlarının ön görüşünde bulunabilecektir. Ayrıca, benzer özellikteki formasyonlarda ve sondajlardan elde edilen jeomekanik büyüklükler kullanılarak TBM performans parametreleri belirli bir yaklaşıklık içerisinde tahmin edilebilecektir. Buna göre, kazı ortamının tariflenmesi açısından, RQD değerlerine göre yorumlanmış anlık ilerleme hızları ve normalize edilmiş penetrasyon oranlarının kullanılmasının doğru bir yaklaşım olduğu söylenebilir.

Çalışmada ortaya konulan trendler, RQD değerleri arttıkça anlık ilerleme hızının azaldığını göstermiştir. Bu çalışma daha fazla sondaj verileri içeren bir veritabanı ile istatistik analiz yapılarak, formasyon karakteristikleri ile yatay ön delgi performansı arasındaki ilişkileri ortaya koyacak şekilde ve yatay ön delgi verilerine dayanarak TBM performans tahmin modeli geliştirmek üzere devam ettirilmesi gerekmektedir.

Tünel hattı boyunca yapılan 14 adet araştırma sondajından elde edilen RQD değerleri ile düşey sondajların yapıldığı kesimlere isabet eden yatay ön araştırma delgi parametreleri birlikte değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, litolojik ve dayanım özelliklerinin karakterize edilmesinde başarılı sonuçlar vermiştir. Bu anlamda RQD ve kullanılan delgi anlık ilerleme hızlarının, kuvvetli bir ilişkisi olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde, penetrasyon oranına göre normalize edilmiş olan tork/anlık ilerleme hızı ve itme/anlık ilerleme hızı değişimlerinin de yüksek bir RQD korelasyonuna sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, kaya kalite göstergesi (RQD) ne kadar iyi olursa anlık ilerleme hızları ve normalize edilmiş penetrasyon oranlarının da o kadar düşük çıktığını göstermesi açısından önemlidir.

Yapılan değerlendirmede, yatay ön araştırma delgilerinden elde edilen anlık ilerleme hızlarındaki değişimin, kayanın sertliği (Dayanım), ortamın çatlaklılığı ve heterojenliği ile ilgili olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle başta RQD değerleri olmak üzere, tünel kazısında karşılaşılabilecek olan jeolojik birim ve yapıların geometrisi hakkında da ayrıntılı bilgi edinileceği sonucuna varmıştır.

Normalleştirilen veriler kullanılarak oluşturulan modellerdeki litolojik durum, değerlendirilerek ayna ilerisinde gerekli olabilecek sızdırmazlık veya konsolidasyon enjeksiyonlarına yönelik zonlar belirlenebilmiştir. Enjeksiyona tabi tutulacak zonun kalınlığı, geometrisi, su geliri, suyun kökeni (Mühendislik Jeolojisi Modeli) belirlenebilmiştir.

Jeolojik ortamın tariflenmesi, yatay delgi anlık hızları ile kullanılmasının doğru bir yaklaşım olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Ancak sınırlı sayıda sondaj verisine dayanan bu korelasyon ifadelerinin geçerliliği, daha fazla veri ilave edilmesi ile yapılacak yeni çalışmalarda artacağı muhakkaktır.



## **CORRELATION OF GEOMECHANICAL PROPERTIES OF ROCK WITH HORIZONTAL PRE-DRILLING DATA MELEN BOSPHORUS CROSSING TUNNEL EXAMPLE**

### **SUMMARY**

In tunnel projects where Tunnel Boring Machines (TBMs) are used, detailed geological investigations realised with an attention provides crucial data to predict the performance of the TBM during an excavation. Findings and results obtained before an excavation are subject to certain limitations in terms of engineering approaches due to technical, economic, morphological and geological factors. Therefore, some issues such as location and dimensions which can not be determined during research stages, may arise during tunnel excavations.

One of the recommended investigation method is the horizontal probe drillings performed in the tunnel excavation face. By analyzing the data obtained from these drilled holes, detailed geological-hydrogeological conditions covered the excavation route and located within the drilling range can be determined. It is known that the variations in parameters such as Instantaneous Advance Speed (IAS), Itme Pressure (TP), and Torque Pressure (TQ) recorded during the implementations of horizontal probe drillings reflect mostly the characteristics of the geological formations. The penetration rate obtained from the probe drills, as well as data such as torque and pressure, needs to be analyzed with precision by eliminating the errors related to machine and operator for an accurate reflection of the environmental characteristics.

The tunnel, excavated using an EPB Hard Rock type TBM (Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine) which is suitable for geological and hydrogeological conditions, has a diameter of 6.15 m and a length of 3145 m. In the project, detailed documentation activities (photos, videos, measurements) with a frequency of every 36 meters approximately in a 1.2-meter segment between the cutting head of the TBM and the excavation face were conducted. As a result of each drilling, observational findings were evaluated, and the lithologies traversed were identified by assessing the necessary itme pressure and torque variations for unit advancement. Moreover, observations and assessments related to water ingress were made. Additionally, photography of the visible areas by entering the excavation chamber for the determination of crack systems and layer positions.

An approach is presented based on the analysis of horizontal probe drilling data conducted during the excavation process of the Boğaziçi Tunnel in the Büyük Melen Project by focusing on Rock Quality Designation (RQD) values and their change trends.

In this scope, relationships between the RQD (Rock Quality Designation) values obtained from the vertical boreholes which were executed for investigation of the project route and the normalized data of the horizontal drillings were determined.

Through these analyses, the trends of change were identified using RQD values obtained from vertical boreholes along the tunnel route. The trends derived from these data can contribute to be understand of the relationships between formation characteristics and horizontal probe drillings performance. In addition, it is possible to develop the prediction models of performance of Tunnel Boring Machine (TBM) based on additional vertical drilling and horizontal probe drilling data.

During the design of the engineering geological model for the tunnel route, various sources were utilized including previous geological and engineering geological studies in the region, foundational research-oriented boreholes and experimental works directed along the tunnel route, geotechnical cross-sectional data prepared before excavation, and advanced investigation drillings positioned parallel to the tunnel axis at an average depth of 36 meters extending as much as the tunnel diameter.

As part of the investigation conducted along the tunnel route, a total of 14 vertical boreholes, with a cumulative length of 1692.15 meters, were drilled. Through these boreholes, 1128 Rock Quality Designation (RQD) values were obtained. Average RQD values were calculated, and distribution intervals were determined. Additionally, data obtained from the evaluation of the horizontal pre-investigation drillings along with the changes in penetration and torque ratios reflecting the rock strength and the geological features accurately were examined within the scope of this thesis.

These formations are intersected by diabase dykes and sills. The uniaxial compressive strengths of rock samples taken from volcanic dykes during tunnel excavation were tested to vary between 63 and 120 MPa. In fact, it has been observed that this value is up to 200 MPa in some samples. These findings align with the project's route. It is important because it shows that the dykes are approximately 2.25 times stronger than the dykes tested in previous projects in Istanbul. Such high-strength rocks can significantly affect the wearing out of the cutting discs in the cutter head of the TBM (tunnel boring machine). The high strength of the dykes has caused the discs to wear out faster and be replaced more frequently. This situation extended the excavation time and increased the costs.

Throughout the tunnel excavation, data obtained from horizontal drillings comprising over two million points were evaluated based on the drilling depth to calculation of the itme and torque values for unit advancement. The obtained data were represented graphically after realisation necessary transformations. The progress speed, normal itme, and normal torque change intervals were considered fundamentally to determine the different zones.

In the assessments, the penetration ratios normalized based on the average instantaneous advancement speeds, itme and torque determined for each section were compared with Rock Quality Designation (RQD) values. For the selected sections, average values were obtained by normalizing “instantaneous drilling advancement speeds” according to itme and torque pressures, using the averages of horizontal pre-investigation drilling data.

All parameters exhibit a negative correlation with RQD, meaning that the better the rock quality indicator (RQD) the lower the instantaneous advancement speeds and normalized penetration ratios. However, the validity of these correlation expressions created with limited number of borehole data will increase undoubtedly with the addition of more data. Moreover, it is observed that the graphs generated for instantaneous drilling advancement speeds follow a similar trend with a consistency. This is crucial in terms of that the data reflects the environmental conditions with an accuracy.

With the aid of these identified relationships, it is possible to make predictions about safer excavation environments using a specific approach based on horizontal drilling data under similar geological conditions. Additionally, it is feasible to predict TBM performance parameters with a certain level of approximation by utilizing geomechanical parameters obtained from similar formations and boreholes. Therefore, it can be stated that interpretation of instantaneous advancement speeds and normalized penetration ratios based on RQD values is a correct approach.

The trends identified in the study indicate a decrease in instantaneous advancement speed as RQD values increase. It is essential to continue the study with a larger database containing more borehole data, and conducting statistical analyses to elucidate the relationships between formation characteristics and horizontal drilling performance. Furthermore, the study should aim to develop a TBM performance prediction model based on horizontal drilling data.

The RQD values obtained from 14 exploration boreholes along the tunnel alignment were evaluated in conjunction with the horizontal drilling parameters corresponding to sections where vertical boreholes were carried out. The assessments provided successful results in characterizing of lithological and strength properties. In this regard, a strong correlation between RQD and the used drilling instantaneous advancement speeds was determined. Similarly, it is observed that there is a high degree of RQD correlation between the changes in torque/instantaneous advancement speed and time/instantaneous advancement speed normalized by penetration ratio. This observation is crucial as it indicates that the better the rock quality indicator (RQD), the lower the instantaneous advancement speeds and normalized penetration ratios.

The evaluation revealed that the variation in instantaneous advancement speeds obtained from horizontal pre-drilling is associated with rock hardness (strength), fracture density, and heterogeneity of the environment. Through the assessment of the collected data, it was concluded that the detailed information about the geometry of geological units and structures encountered during tunnel excavation including RQD values, could be obtained.

Lithological conditions in the models created by using normalized data allowed for the identification of zones where sealing or consolidation injections might be necessary in the further excavation faces. The thickness, geometry, water ingress, and the origin of water for the zones subject to injection (Engineering Geological Model) could be determined.

Geological environment description is crucial as it demonstrates the appropriateness of utilization of horizontal drilling instantaneous speeds. However, the validity of these correlation expressions based on a limited number of borehole data is expected to increase with additional data in future studies.



## 1. GİRİŞ

Tünellerde, yüzeysel ve sondaja dayalı yapılan araştırmalar, tünel açımı sırasında karşılaşılması olası problemleri tanımlamaya ve bunların yaklaşık yerlerini belirlemeye yönelik çok önemli bilgiler sunar. Ancak yapılan çalışmaların ayrıntısı ve yoğunluğu zamana ve ekonomik koşullara göre şekillenir. Kazı öncesi elde edilen bulgular ve varılan sonuçlar teknik, ekonomik, morfolojik ve jeolojik nedenlerle mühendislik yaklaşımının gereği olarak sınırlı tutulmaktadır. Çoğunlukla araştırma aşamalarında yerleri ve boyutları belirlenemeyen bazı problemler, tünel kazısı sırasında ortaya çıkmaktadır. Bu durumda yapılacak olan ek araştırmalar, sorunların en aza indirilmesi ve emniyetli kazı koşullarının sağlanması bakımından önem arz etmektedir. Olası riskleri azaltmak için, kazı sırasında önerilen araştırmalardan biri, kazı aynası önünde mekanik sondajların açılmasıdır. Açılan bu sondajlardan elde edilen veriler analiz edilerek, sondaj mesafesi kadar olan kazı ortamındaki jeolojik-hidrojeolojik koşullar ayrıntılı olarak belirlenebilmektedir.

Yatay ön araştırma delgileri sırasında kaydedilen anlık delme hızı (Instantaneous Advance Speed – IAS), uygulanan baskı (Itme Pressure – TP) ve tork (Torque Pressure - TQ) değerlerinde ki değişim oranlarının, geçilen formasyonların karakteristiklerini büyük oranda yansıttığı bilinmektedir. Delinmiş kaya kütlelerinin özelliklerini tahmin etmek için MWD (Measuring While Drilling- Delme Sırasında Ölçüm) tekniğini kullanmaya çalışırken, izlenen parametrelerin birbiriyle ve delinmiş kaya kütlesi koşullarıyla nasıl ilişkili olduğu hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olmak önemlidir.

Delgilerden elde edilen penetrasyon oranı, tork ve baskı gibi verilerinin doğru bir yaklaşımla analiz edilmesi ve ortam özelliklerini tam olarak yansıtmaları için makina ve operatörden kaynaklı hatalardan arındırılması gerekmektedir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle başta RQD (Rock Quality Designation) değerleri olmak üzere, tünel kazısında karşılaşılacak olan jeolojik birim ve yapıların geometrisi hakkında da ayrıntılı bilgi edinileceği bir gerçektir.

## 1.1 Tezin Amacı

Dört aşamada gerçekleştirilen Büyük İstanbul İçme Suyu 2. Merhale-Melen Projesinin, en kritik kesimi, Asya'dan ve Avrupa'ya geçişi sağlayan İstanbul Boğazı altında açılan tüneldir. Bu Tünel, sert kaya tipi kapalı modda ve maksimum 4 atmosfer basınç altında güvenli çalışabilen TBM (Tunnel Boring Machine) ile açılmıştır. Tünel kazısı; derinlikleri ortalama 36m olan yatay araştırma delgilerinden elde edilen sonuçlara göre yapılmıştır. Tünelin İstanbul Boğazı altında kalan kesiminde en az iki araştırma delgisi açılmış ve bu delgilerden elde edilen verilere göre mühendislik jeolojisi modelleri oluşturulmuştur. Delgilerin açılması sırasında TBM in kesici kafası ile kazı aynası arasındaki kazı odasında, ayrıntılı belgeleme çalışmaları (Tabaka ve çatlak sıklığı ölçümleri, ayna detay çizimleri, su boşalım noktaları, foto, video, çekimleri, pasa kontrolü, kaya ve su örneklerin alınması) yapılmıştır. Su geliri ve jeolojik sorunların çözümünde bu tür belgeleme çalışmalarının büyük yararı olmuştur. Yatay delgi sırasında, aynı anda bir santimetre ara ile otomatik olarak kaydedilen baskı, tork, uygulanan su basıncı ve gerçekleşen ilerleme hızı kayıtları tutulmuş ve tünel kırmızı kotuna endeksli ilerleme hızı; baskı; tork; su basıncı, jeolojik yapı ilişkili veri tabanı elde edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda TBM kazı aynasının önündeki yaklaşık 36m'lik zonda, olumsuz olabilecek jeolojik - hidrojeolojik koşulları belirlemeye ve güvenli kazı koşullarını sağlamaya yönelik karar ve uygulamalar için gerekli veri ve bilgilerin sağlanması amaçlanmıştır.

Bu amaçla, kapalı mod TBM ile açılan Boğaziçi (SP-7) tüneline jeolojik koşulları belirlemek, su gelirini, gaz oluşumunu, olası boşlukları saptamak amacıyla kazı aynası önünde, ortalama 36m uzunluğunda, 64 mm çaplı ön araştırma delgileri yapılarak, TBM'in kazı ilerlemesi devam etmiştir. Böylece, farklı özellikteki jeolojik ortamlar için istatistik analizler yapılmıştır. Bu analizler, kazı odasında elde edilen verilerle karşılaştırılmış, ilerleme hızı-baskı; ilerleme hızı-tork ve su basıncı değişimleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Delgi sonucu elde edilen tüm veriler ve grafiklerin değerlendirilmesi ile jeolojik modeller oluşturulmuştur. Bu modellerden hareketle zonların istatistik analizleri yapılarak, perimetrik haritalar üretilmiştir. Yapılmış olan yatay ön araştırma delgi verileri normalize edilerek RQD değerleri ile ilişkileri belirlenmiştir. Bu şekilde tünel güzergahında yapılmış olan düşey sondajlarından elde edilen RQD değerleri ile değişim trendleri ortaya konulmuştur.

Bu çalışma sonucu elde edilen jeolojik-hidrojeolojik ortam değerlendirmelerinin, İstanbul Boğazı boyunca değişik noktalarda, aynı yada benzer jeolojik şartlar dahilinde, farklı amaçlarla açılması öngörülecek tünel inşaatlarının projelendirme aşamasında, tünel inşaa yönteminin saptanması, makine parkının seçimi, yapım aşamasında karşılaşılabilecek sorunların öngörülmesi ve tüm bunlara bağlı olarak yapım maaliyetlerinin azaltılması açısından büyük önem arz ettiği ve fayda sağlayacağı düşünölmektedir. Benzer kazı ortamları için, bu çalışma kapsamında değerlendirilen yatay delgi verileri kullanılarak, TBM performans parametrelerinin belirli bir yaklaşımla tahmin edilebilecektir. Buna bağlı olarak TBM makinalarının fiyat ve performans ilişkilerinin daha doğru belirleneceği düşünölmektedir.

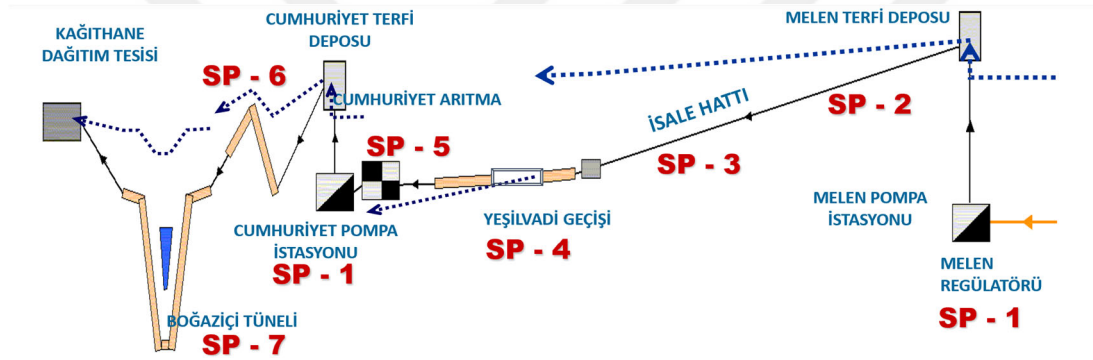






## 2.2 Büyük Melen Sistemini Oluşturan Yapılar

Büyük Melen Projesi, İstanbul'un büyüyen nüfusunun artan içme suyu talebini karşılamak için önemli bir girişimdir. Proje, şehre yeterli ve kaliteli içme suyu sağlamayı hedeflemekte olup, su kaynaklarının yönetimi ve sürdürülebilirliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. Proje alanı belirgin topografik özellikler ile tanımlanabilir. Bunların içinde en ilginç olanı Asya ve Avrupa kıtaları arasında yer alan ve proje alanını ikiye ayıran dar bir su geçişi görünümündeki İstanbul Boğazıdır. Melen Projesi, Boğaziçi'nin 180 km kadar doğusunda, Melen nehrinin Karadeniz sahilindeki nehir ağzına yakın bir mevkiden büyük ölçüde ham suyun alınıp, arıtılarak, buradan İSKİ su dağıtım şebekesine verileceği İstanbul (Avrupa yakası) Kağıthane'deki su dağıtım deposuna iletilmesi için yapılmış bir projedir (Şekil 2.2).



<u>İŞİN ADI</u>	<u>NİTELİĞİ</u>	<u>TAMAMLANMA TARİHİ</u>
SP-1	REGÜLATÖR-TERFİ MERKEZLERİ	EKİM 2007
SP-2	İSALE HATTI (70 km BORU Ø 2500 mm )	EKİM 2007
SP-3	İSALE HATTI (70 km BORU Ø 2500 mm )	MAYIS 2009
SP-4	İSALE (12 km TÜNEL + 5,5 km KONDÜVİ)	NİSAN 2010
SP-5	ARITMA TESİSİ (720 bin m <sup>3</sup> /gün)	MART 2008
SP-6	İSALE (10 km TÜNEL + 7 km BORU)	MAYIS 2009
SP-7	İSALE (5,5 km TÜNEL)	NİSAN 2010
SP-8	BORU TEMİNİ	EKİM 2007
SP-9	BORU TEMİNİ	2008
SP-10	BORU TEMİNİ	2008
SP-11	ENERJİ TEMİNİ	MART 2008

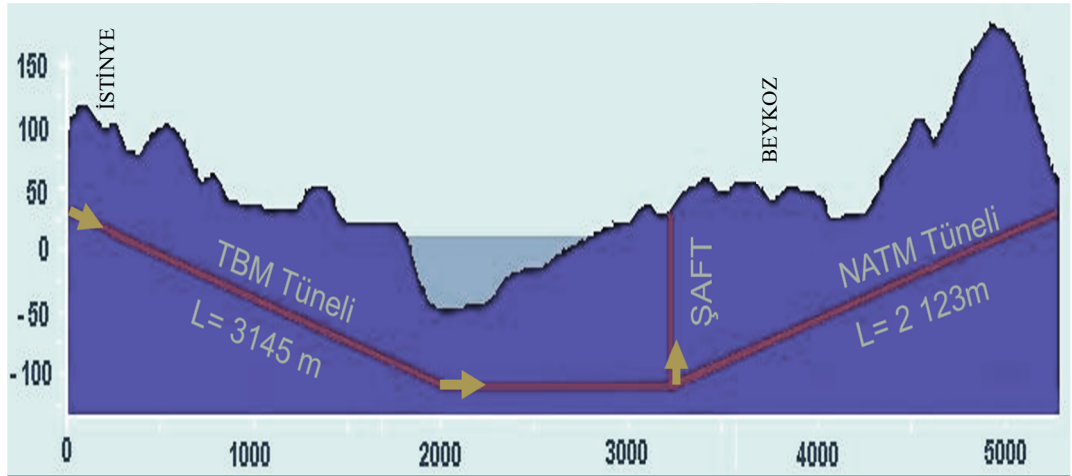
Şekil 2.2 : Büyük Melen sistemini oluşturan proje paketleri (Url-1).

Sistemin I. aşaması Melen nehri üzerinde bir su alma regülâtörü (baraj yapımı henüz tamamlanmamıştır) ile yüksek terfil bir pompa istasyonu, terfi hattı ve tepede terfi depoları ile devam etmektedir. Bu yapılarla birlikte, sözleşme paketinden toplam 11 adet alt proje olarak tanımlanan Büyük Melen Sistemi'nin 7. alt proje paketini oluşturan Boğaziçi Tüneli jeolojik ve teknik zorlukları nedeniyle, ayrı bir ünite olarak

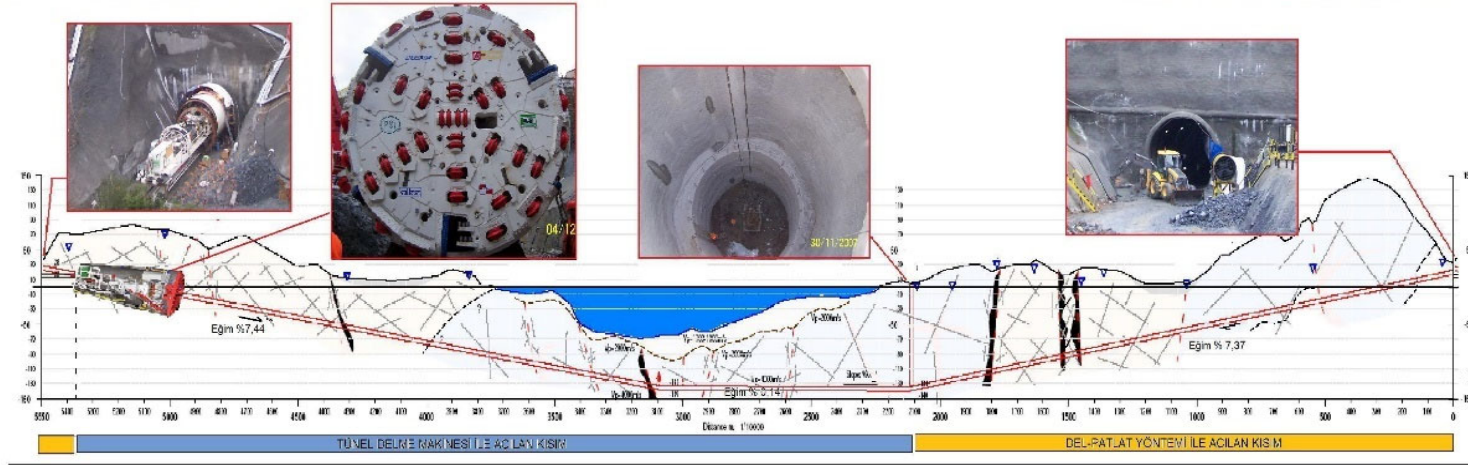
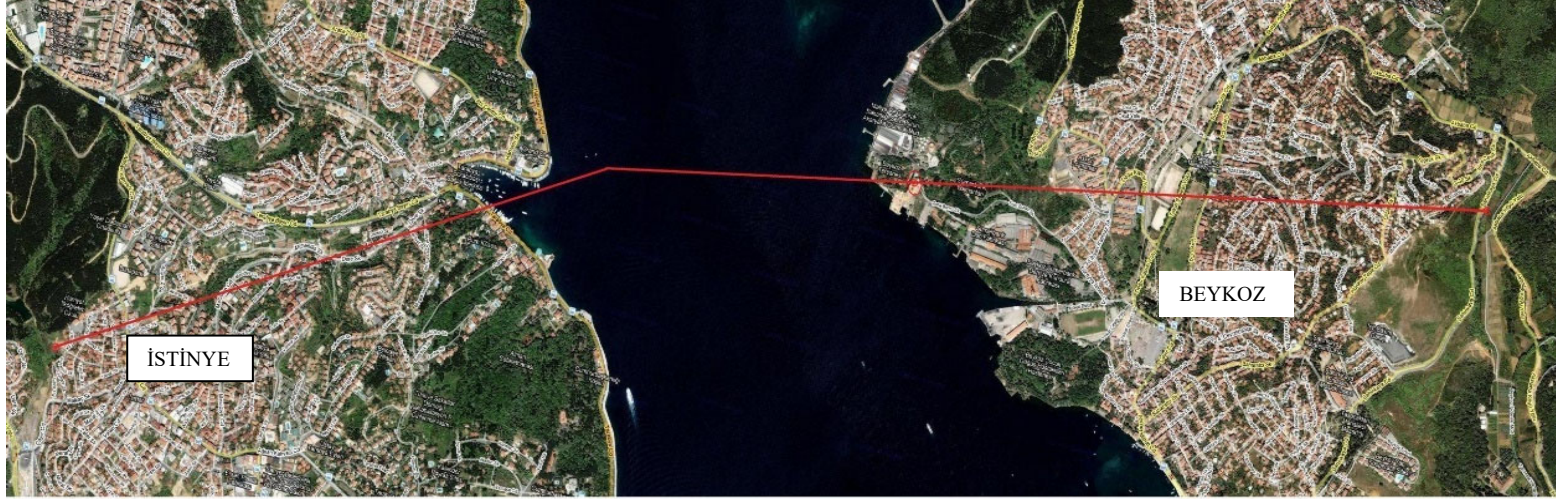
düşünülmüş ve inşa edilmiştir.

Büyük Melen Sistemi'nin Sözleşme No: 7 kapsamındaki alt proje paketini oluşturan Boğaziçi Tüneli inşaat aşamaları;

- Ortaçeşme (Beykoz) Giriş
  - Derbent (Sarıyer) Çıkış
  - Beykoz Şaftı; olmak üzere üç önemli yapıdan oluşmaktadır (Şekil 2.3)
- Boğaz geçişi; deniz seviyesinin yaklaşık 137 m altından geçen, 6,15 m çaplı 3145 m uzunluğunda olan TBM tünelinin üzerinde 14 atm basınç bulunmaktadır.
- Ortaçeşme Giriş Portalı; del patlat yöntemi ile 5,5 m çapında, 2123 m uzunluğunda ve %7,38 eğimle olan açılacak olan tünel yaklaşık -137 m kotunda Beykoz Şaftı ile birleştirilmiştir.
- Beykoz Şaftı; 8 m çapında ve 145 m derinliğinde olup su hattında yapılacak bakım, ulaşım ve su boşaltmak, inşaat sırasında Tünel Delme Makinesini dışarı çıkarmak maksadıyla inşaa edilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.3 : SP: 7 kapsamındaki alt proje paketinin kapsamındaki yapılar.

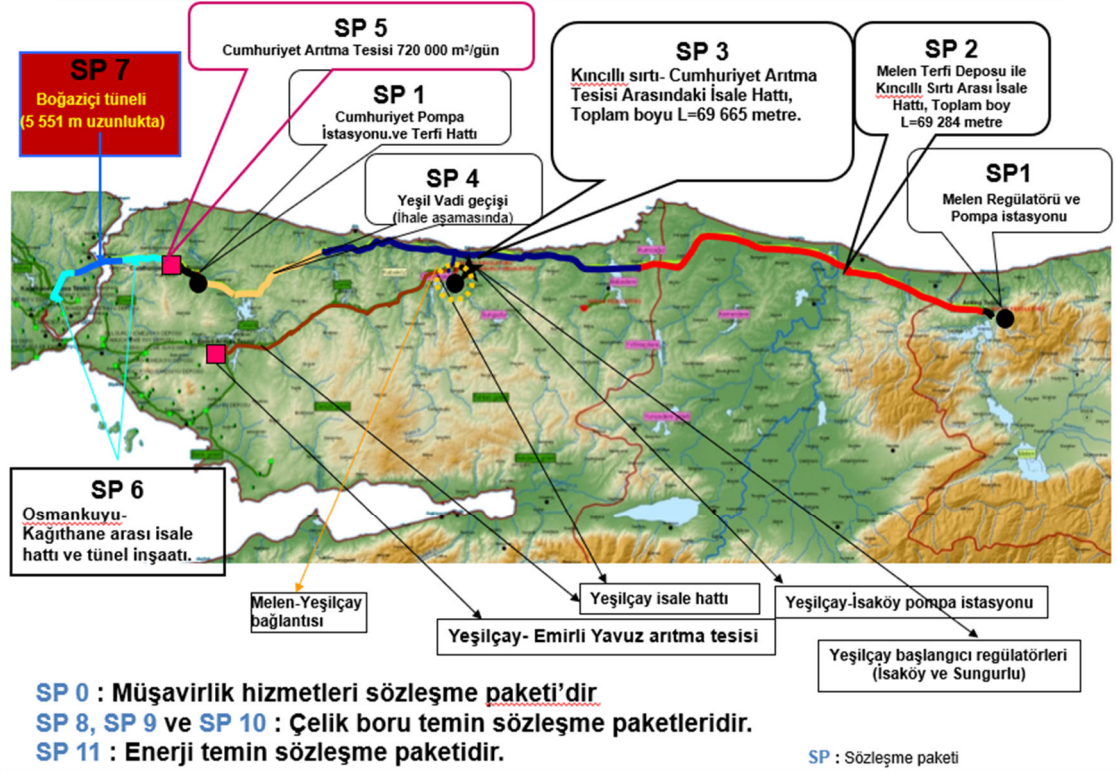


Şekil 2.4 : Beykoz şaftı ile Boğaziçi Tüneli ve NATM tünelleri (DSİ-2009- sunum notları)

Büyük Melen sistemini oluşturan tünellerin ve şaftların büyüklükleri'nin genel geometrik ve teknik özellikleri (Çizelge 2.1) de, tüm sözleşme paketleri ise Şekil 2.5'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1 : Büyük Melen sistemini oluşturan tünellerin ve şaftların büyüklükleri.**

Yapı Tipi	Yapı Uzunluğu (m)
Boğaziçi Tüneli bitmiş iç çapı	4 m
Deniz seviyesinden derinliği	137 m
Toplam uzunluğu	5551m
Asya yakası uzunluğu	2123 m
Boğaziçi su altı uzunluğu	1081 m
Avrupa yakası uzunluğu	2347 m
Beykoz Şaftı çapı	8 m
Beykoz Şaftı derinliği	145 m



**Şekil 2.5 : Büyük Melen sistemini oluşturan sözleşme paketleri (DSİ-2009- sunum notları).**



### **3. GENEL JEOLJİ**

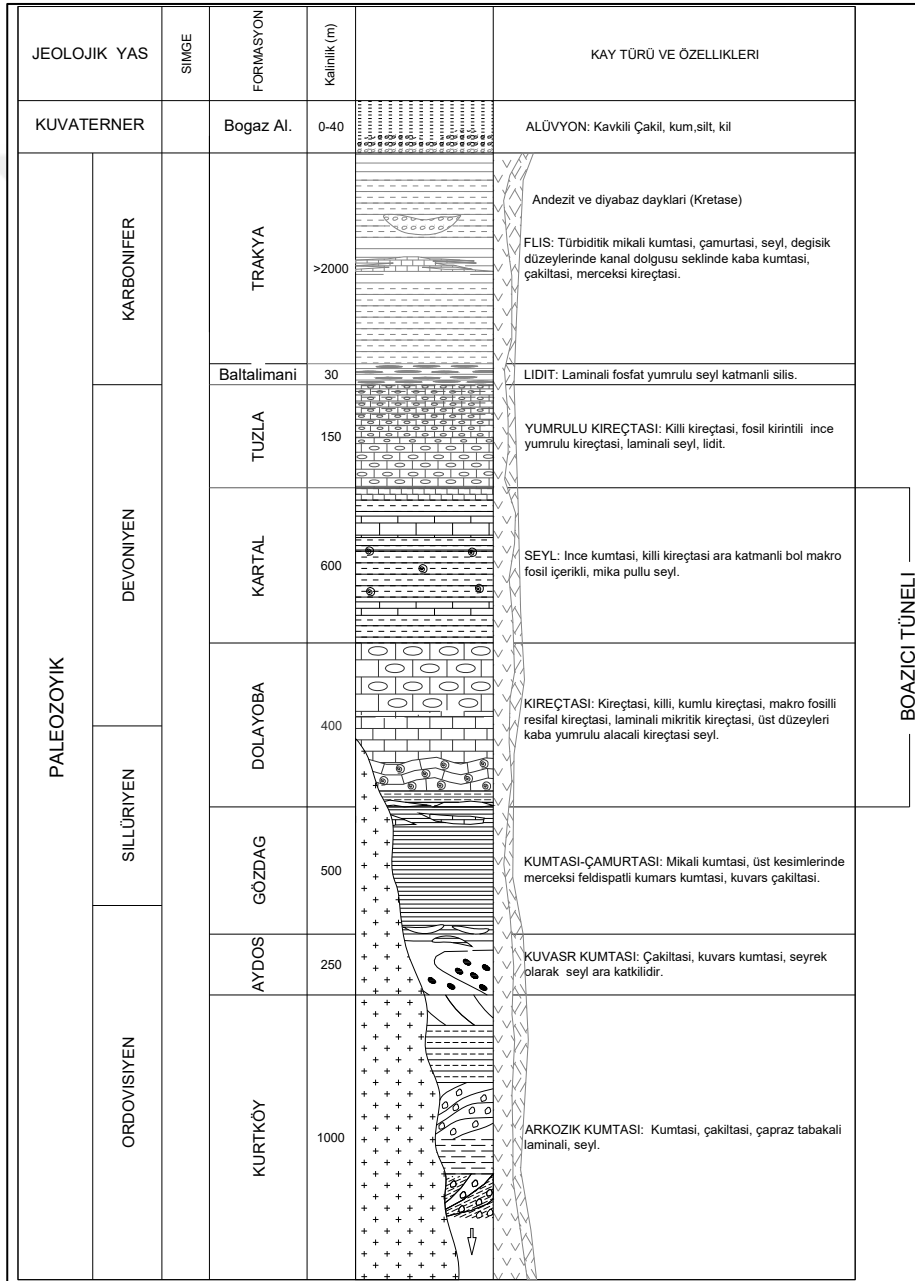
#### **3.1 Giriş**

İstanbul şehri, metamorfik “İstranca Grubu” ve metamorfik olmayan “İstanbul Grubu” olmak üzere iki ana stratigrafik birlik üzerinde yer almaktadır. İstranca Grubu kayaları, İstanbul’un batı ve kuzey kesimlerinde şist, kuvarsit ve magmatitler şeklinde görülmektedir. İstanbul Grubu ise boğaz’ın her iki yakasında Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı sedimanter kaya birimlerini içermektedir. Bu kaya birimlerinin sınır ilişkileri, jeolojik zaman bazında, uyumsuz, çoğunlukla da tektonik kökenlidir.

##### **3.1.1 Bölgesel jeoloji**

İstanbul Boğazı'nın her iki yakasında da Ordovisiyen-Karbonifer zaman aralığında çökelmiş İstanbul Grubu olarak bilinen sedimanter kaya birimleri bulunur. Bu birimler, Boğaz'ın jeolojik geçmişinin temelini oluşturur ve bölgenin jeoteknik özelliklerini belirlemede önemli rol oynar. Stratigrafik dizilimin en alt kısmında, mor-kızıl renkli, tabanı görülmeyen (olasılıkla Prekambriyen temel üzerinde uyumsuz) Kurtköy Formasyonu (Alt Ordovisiyen) yer alır. Bu formasyon, karasal çakıltaşı, kumtaşı (arkoz) ve çamurtaşı araldanmasından oluşmaktadır. Kurtköy Formasyonu'nun üzerinde, uyumlu olarak plaj-kıyı ortamında depolanmış Aydos Formasyonu (Alt Ordovisiyen) bulunur. Bu formasyon, kirli beyaz renkli, çapraz tabakalı, çakıltaşı-kumtaşı araldanmalı kuvarsitlerden oluşmaktadır. Aydos Formasyonu'nun üzerinde transgresyon ile birlikte uyumlu olarak, lagün-sığ denizel koşullarda depolanmış Gözdağ Formasyonu (Üst Ordovisiyen-Alt Silüriyen) yer alır. Bu formasyon, kirli beyaz renkli kuvarslı feldspatlı arenit ara düzeyli, merceksi geometride, gri-yeşil renkli, laminalı çamurtaşlarından oluşmaktadır. Gözdağ Formasyonu'nun üzerinde yanal-düşey geçişli resif ortamında depolanmış, genelde masif-tabakalı kireçtaşlarından oluşan Dolayoba Formasyonu (Üst Silüriyen-Alt Devoniyen) bulunur. Dolayoba Formasyonu üzerinde giderek derinleşen denizel ortam koşullarında (şelf) çökelmiş gri, siyahımsı gri renkli, fosilli, laminalı çamurtaşları üste doğru kireçtaşları ile araldanmalı Kartal Formasyonu (Orta Devoniyen) uyumlu olarak görülür. Tüm bu formasyonlar üzerinde, derinleşen denizel koşullar altında çökelmiş

“yumrulu kireçtaşlarından” oluşan Üst Devoniyen Tuzla Formasyonu izlenir. Tuzla Formasyonu'nun üzerinde giderek derinleşen denizel ortamda depolanmış, siyah renkli, laminalı, fosfat yumrulu radyolaritli çörtlerden oluşan (lidit) Baltalimanı Formasyonu (Alt Karbonifer; Vizien) bulunur. Karbonifer başlangıcına değin tektonik duraylık gösteren havza, Erken Karbonifer'le birlikte, filiş türü türbiditik kumtaşı-şeyil ardışığı ile temsil edilen türbiditik akıntıların etkin olduğu, duraysız ortam koşullarında çökelmiş olan, yer yer kireçtaşı mercekleri içeren Trakya Formasyonu (Karbonifer) ile son bulur (Şekil 3.1) (Özgül vd.,2005, Eriş, 2009, Bakır 2012).



Şekil 3.1 : İstanbul Grubu genel stratigrafi kesiti (Eriş, 2009 dan uyarlanmıştır).

### 3.1.2 İstanbul Boğazının oluşumu

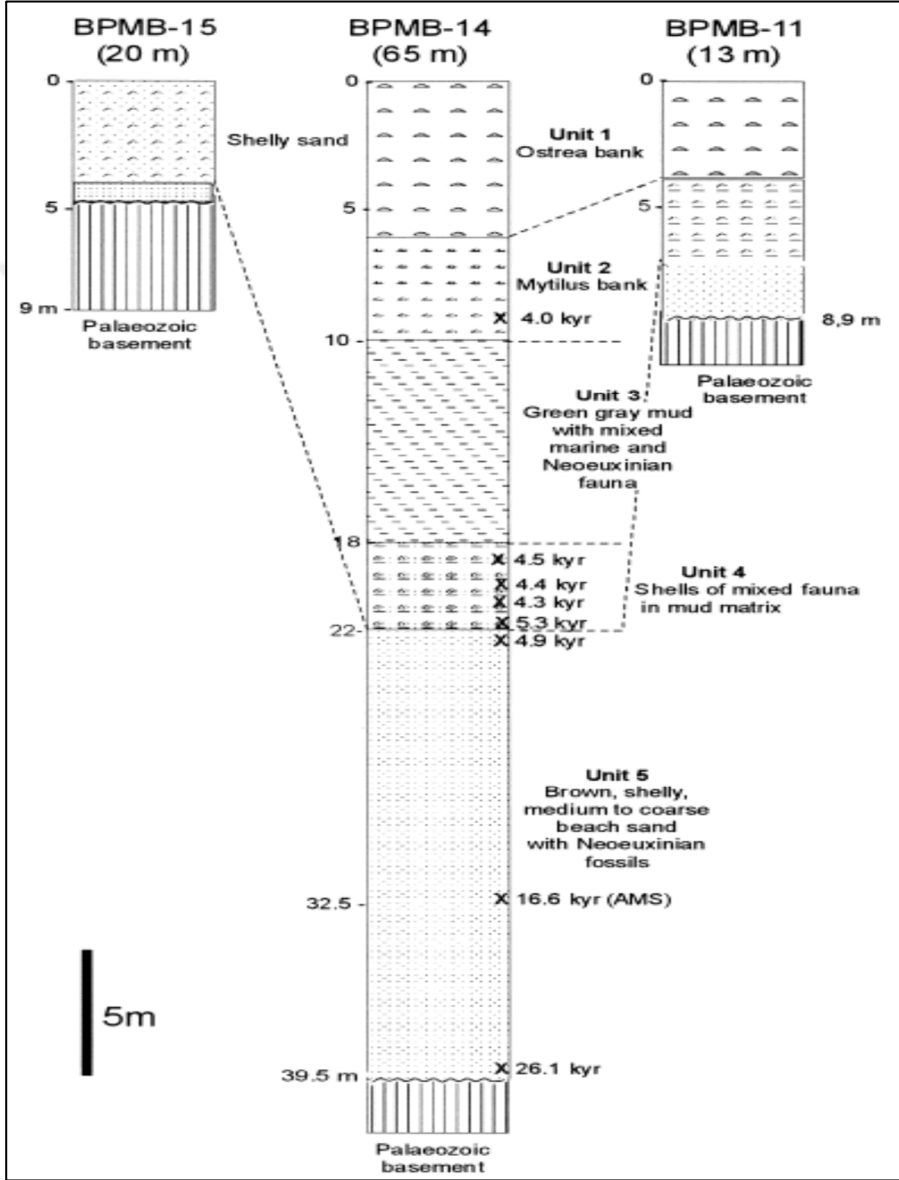
İstanbul Boğazı'nın bir akarsu vadisinin tektonik etkinlikler denetiminde evrimleştiği düşüncesi günümüzde geniş ölçüde kabul görmektedir. Evrim sırasında boğaz kanallarının içerisinde kalıcı bir çökel istifi depolanmıştır. Son yıllarda yapılan batimetrik, sismik ve karotlu mekanik sondaj çalışmaları, bu çökellerin nicelik ve nitelikleri hakkında epey bilgi vermektedir. Boğaz tabanındaki çökelenin başlıca iki kaynağı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, karadan akarsularla taşınan ve kıyı erozyonu ile ortamı besleyen çökeller, ikincisi de daha önce boğaz kanalı içerisinde birikmiş çökellerin, akıntı ile sürüklenmesi ve akıntı hızının azaldığı yerlerde birikmesi ile oluşan çökellerdir (Bakır vd., 2012).

Günümüzde İstanbul Boğazı'nın tabanının şekillenmesinde, Erinç (1977, 1980) tarafından belirtilen yaygın açınım, sediment sürüklenmeleri ve buna bağlı kütle hareketleri etkilidir. Gökaşan ve diğerleri (1993, 1995, 1997, 2000, 2002, 2003) tarafından yapılan çalışmalara göre, aşınmaya uğramış çökel miktarı yaklaşık  $2 \times 10^6$  m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Bu aşınmış çökel taban morfolojisini oluştururken, akıntının güneyden kuzeye doğru ilerlediği görülmektedir.

Son yıllarda sismik kesitler üzerinde yapılan bilimsel çalışmalarda, genç fay olarak yorumlanan bazı süreksizliklerin, büyük ölçüde yatay-düşey doğrultulardaki ölçek farklılıklarından kaynaklandığı öne sürülmüştür (Şengör vd., 2002). Bu görüşe göre, söz konusu yapılar şiddetli erozyon (aşınma) sonucu oluşan çökeller içerisindeki kaymalar (heyelan) ve oturmalar olarak yorumlanmalıdır. Bu bulgular, bölgenin jeolojik geçmişi ve aktif tektonik rejimi hakkındaki anlayışımızı önemli ölçüde etkileyebilir.

Tarabya-Beykoz sondajları, Melen İçmesuyu Projesi kapsamında bölgenin jeolojik tarihi ve çökelme hızlarını incelemek için önemli bilgiler sunmaktadır. Elde edilen bulgular, bölgenin jeolojik evriminin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunacak çalışmaların yapılmasını sağlamıştır. Bu anlamda, Çağatay vd. (2000) tarafından Melen İçmesuyu Projesi kapsamında Tarabya-Beykoz arasında yapılan 3 sondajın verileri incelendiğinde, paleozoik temelin üzerinde yer alan çökellerin en fazla 39,5 metre kalınlığa sahip olduğu görülmüştür. Bu çökeller litolojik özelliklerine göre 5 birime ayrılmıştır (Şekil 3.2). En altta ki katman "günümüzden önce" (G.Ö.) 26,1-16,6 bin yıl öncesine tarihlenen tatlı su kökenli (karasal), orta-iri taneli, kavkılı kum

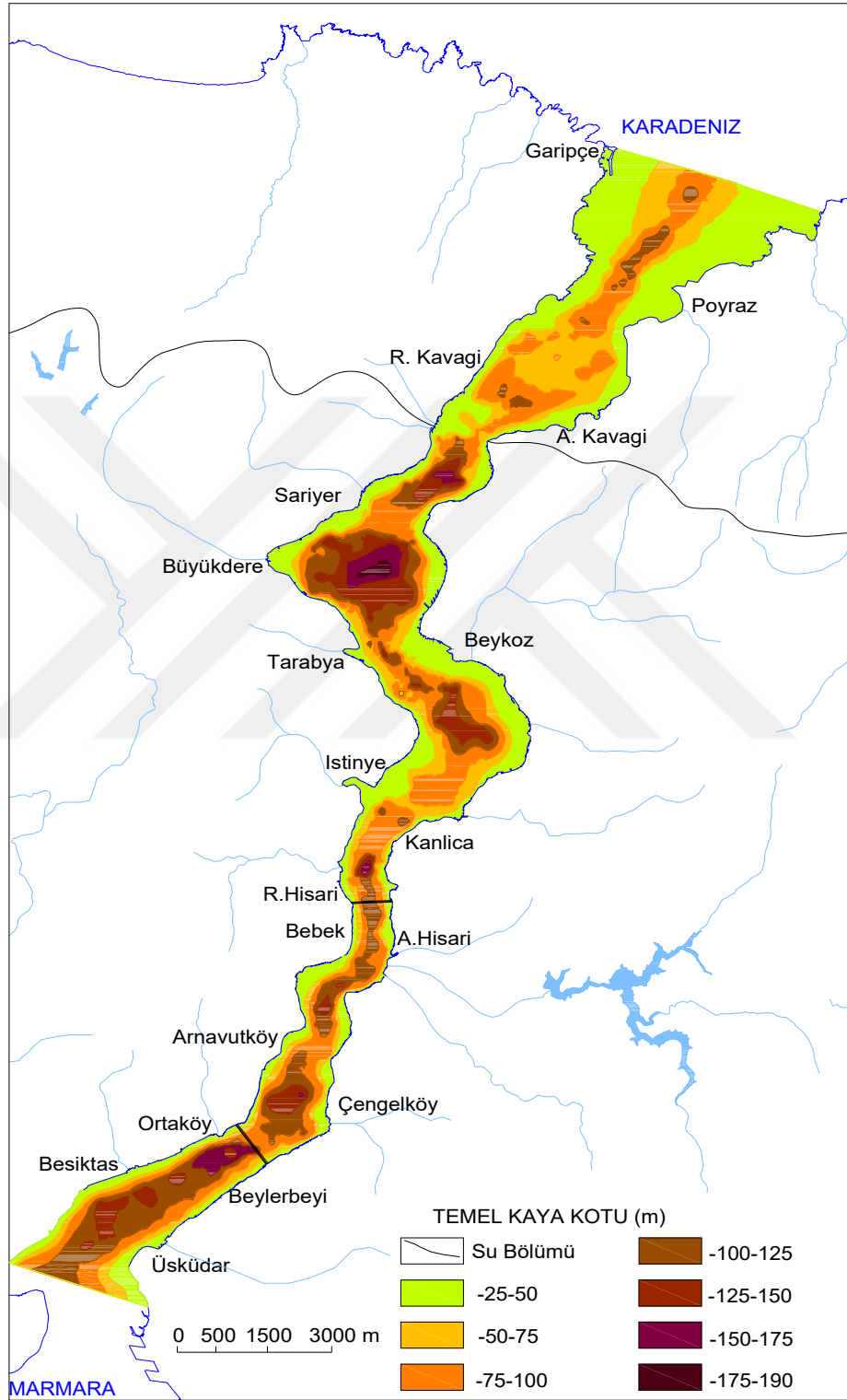
bulunur. Bu birimdeki çökeltme hızı 2,10 m/bin yıldır. İkinci katman, G.Ö. 4,3-5,3 bin yıl öncesine tarihlenen denizel kökenli kavrıklı çamurdan oluşur. Çökeltme hızı 3,5 m/bin yıldır. Üçüncü katman, Denizel ve karasal kökenli gri-yeşil çamurdan oluşur. Çökeltme hızı 0,97 m/bin yıldır. G.Ö. 4 bin yıl öncesine tarihlenen, dördüncü katman ise denizel kökenli fosil içeren çökellerden oluşur. Çökeltme hızı ise 0,74 m/bin yıl olarak tarihlenmiştir.



**Şekil 3.2 :** İki kıta arasında (Tarabya-Beykoz arasında) açılmış olan boğaz altı sondajları ve Boğaz çökel katmanları (Çağatay vd, 2000).

İstanbul Boğazının temel kaya topoğrafyası incelendiğinde; Sarıyer-Beykoz arasında temel kaya yüzeyinin -190m kotlarına kadar indiği, -150m ye ulaşan çukurların Ortaköy-Beylerbeyi ile Çengelköy-Kuruçeşme arasında bulunduğu ve kuzeyde

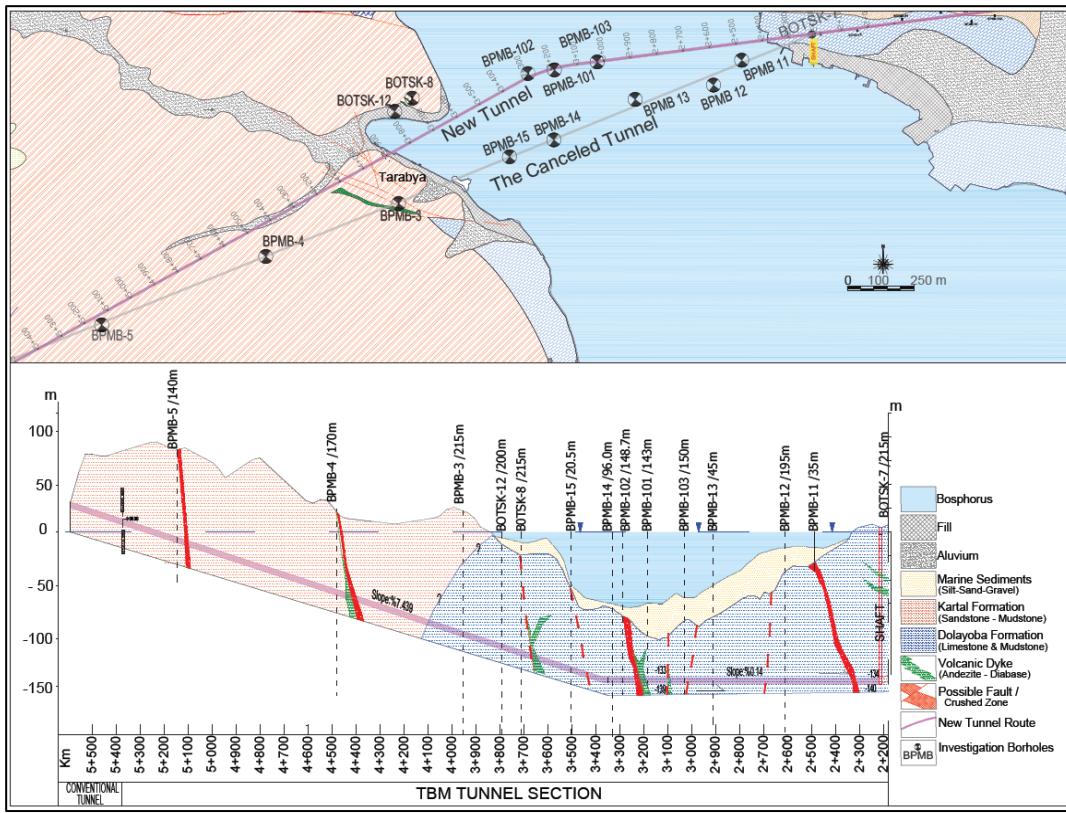
Anadolu Kavağı-Rumeli Kavağı arasında karadaki su bölüm çizgisinin boğaz altında da devam ettiği, bu kesimde temel kayanın -25 ile -50m arasında değişen derinliklerde olduğu görölmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : İstanbul Boğazı altındaki temel kaya yüzeyi morfolojisi (Bakır vd., 2012).

### 3.1.3 Boğaz geçiş tüneli ve yakın dolayının jeolojik durumu

Tünel güzergahının geçtiği kesimde, İstanbul Boğazının her iki yakası ile Boğazın altında, Paleozoyik yaşlı birimler yer almaktadır. Bunlar; mavimsi gri, siyahımsı gri renkli şeyl ara katkılı kireçtaşı, resifal kireçtaşı katmanlarından oluşan Dolayoba Formasyonu ile bunun üzerinde gri, açık kahve renkli silttaşı-kumtaşı ara düzeyli, bol fosilli, karbonatlı şeyl - çamurtaşlarından oluşan Kartal Formasyonu'dur. Bu kaya birimleri, içersinde bir kaç santimetreden onlarca metreyi aşan kalınlıkta ve farklı özellikte, çok sayıda volkanik kökenli diyabaz dayk ve silleri ile kesilmiş durumdadır. Bu birimler boğaz altında gevşek çökeller ile örtülüdür (Şekil 3.4; EK - A).



Şekil 3.4 : Tünel güzergah sondajları ve kazı öncesi jeolojik kesit (EK - A) (Bakır et.al, 2012).

#### 3.1.3.1 Dolayoba formasyonu

Tünelin Derbent şantiyesi girişinden itibaren Beykoz Şaftı'na kadar olan 2100 metrelik kesimde, toplam 1200 metre geçilmiştir. Bu kesimde çoğunlukla kireçtaşı formasyonu bulunmaktadır, farklı düzeylerde ince kil içermektedir. Üst kesimde yumrulu kireçtaşı düzeyi yer almaktadır. Penck (1919) tarafından incelenen "Kalkerli Pendik Fasiyesi" olarak adlandırılan formasyon, Paeckelmann (1938) tarafından Kartal-Pendik Halysitesli kireçtaşları olarak tanımlanmıştır. Haas (1968), bu seriyi "Akviran Serisi"

olarak adlandırmış ve Tavşantepe, Bağlarbaşı Cumaköy, Çakıllı Dere, Pelitli ve Kireçhane birimlerine ayırmıştır. Kaya (1973), istifin alt bölümünü Dolayoba Kireçtaşı, üst bölümünü ise İstinye Formasyonu olarak adlandırmıştır. Önalın (1981), Dolayoba, Sedefadası, İstinye ve Kaynarca formasyonları olarak 4 formasyona ayırmıştır. Özgül vd. (2005), bu formasyonu "Pelitli Formasyonu" olarak adlandırarak, haritalama ve yanal izleme açısından karışıklıkları önlemeyi amaçlamıştır (Şekil 3.5; Şekil 3.6).



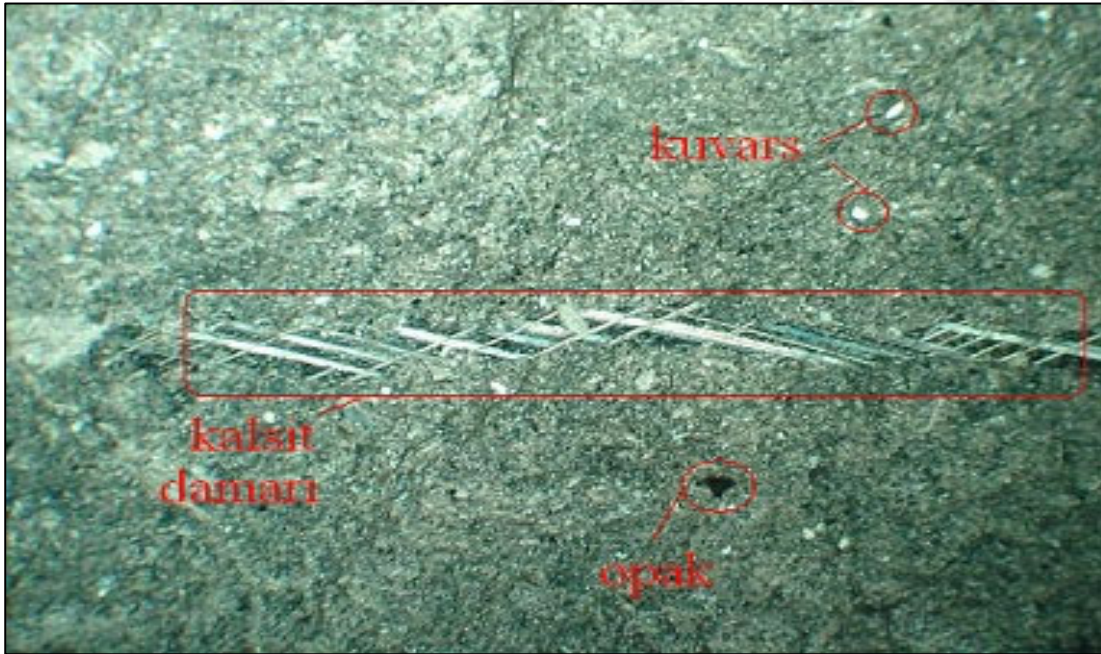
**Şekil 3.5 :** Dolayoba Formasyonu'nun mercanlı kireçtaşı düzeyi (Özgül; 2005).



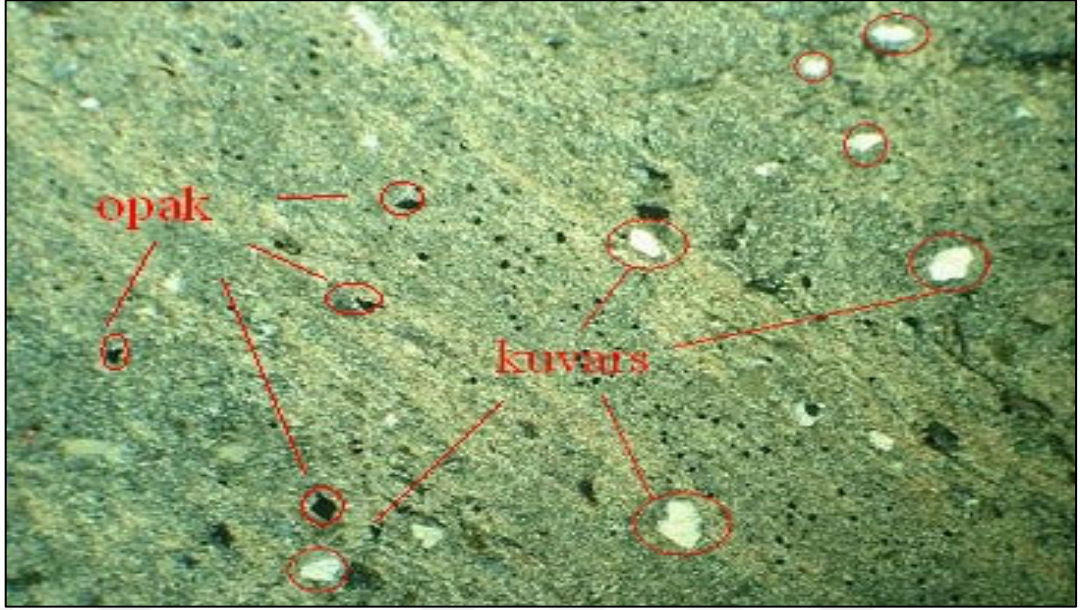
**Şekil 3.6 :** Dolayoba Formasyonu laminalı mikritik kireçtaşı düzeyi ve kıvrımlı yapısı (Özgül; 2005).

Dolayoba Formasyonunu oluşturan karbonat istifi ince (5–10 cm) katmanlı kireçtaşı arakatkılı boz, sarımsı kahverengi kireçli şeyillerle başlar. Üzerine bol makro fosilli (Halysites), açıklı koyulu pembemsi-mor renkli resifal kireçtaşı birimi gelir. Birim, üste doğru ince-orta katmanlı, kavkılı, laminalı mikritik kireçtaşı ve ince kumlu-killi kireçtaşı arakatkısı giderek artan kireçli şeyil, kumlu, killi kireçtaşı ardalanması şeklinde devam eder.

Proje güzergahı çalışmaları sırasında, Dolayoba formasyonuna ait kireçtaşı örneğinin ince kesit değerlendirmesinde, çatlak ve damar dolgusu olarak iri taneli ikincil kalsitlere rastlanmıştır (Şekil 3.7). İçeriğinde %5'in altında kuvars ve %1'in altında muskovit görülmüştür. Fosil kırıntıları içermektedir. Aynı formasyona ait incelenmiş diğer bir kaya örneği de silt-kiltaşıdır (Şekil 3.8). Bu örneğin kuvars ve serizit bakımından zengin olduğu görülmüştür. Kuvarslar 0.1-0.2mm. boyunda, tabii ışıkta renksiz, berrak ve lekesiz, polarize ışıkta gri-sarımsı renklidir. Köşeli-yarı köşeli kuvarsların dışındaki taneler 0.1mm.nin çok altındadır. Bazı çatlak ve boşluklarda kalsit gelişmiştir; bunlar opak, 0.1mm.nin altında, köşeli-yarı yuvarlak şekilli taneler halinde görülmektedir.



Şekil 3.7 : Dolayoba formasyonuna ait örneğin mikro görünümü (Büyütme:4x10).



**Şekil 3.8 :** Dolayoba formasyonu mikritik kireçtaşının polarize ışıkta görünümü (Büyütme :4x10).

### 3.1.3.2 Kartal formasyonu

Tünelin Derbent şantiyesi girişinden itibaren yaklaşık 2100 metrelik kesiminde geçilen Kartal Formasyonu, genellikle mikali şeyillerden oluşmaktadır. Özellikle üst düzeylerinde ise kireçtaşı arakatlıdır (Şekil 3.9). Taze halde koyu kahverengi, yer yer koyu yeşilimsi, ayrılmış halde ise açık kahverengi renge sahip ince-orta katmanlı ve bol mika içeren şeyillerden oluşan bu kaya türü, İstanbul'un Anadolu yakasında geniş alanlara yayılmıştır. Bu birim, Penck (1919) tarafından "Bosporianiche Fazies" ve Paeckelmann (1938) tarafından "Pendik Schichten" gibi farklı adlar altında incelenmiştir. Haas (1968) tarafından yapılan ilk kaya-stratigrafi temelli incelemede, bu istif "Marmara Serisi" içinde "Kartal Formasyonu, Kurtdoğmuş Formasyonu ve Dede Formasyonu" olmak üzere üç birime ayrılmıştır. Kaya (1973), "Pendik Gurubu" olarak adlandırdığı bu istifi, "Kartal Formasyonu", "Kozyatağı Formasyonu" ve "İçerenköy Şeyili" olmak üzere üç formasyona ayırmıştır. Önalın (1982), Kaya (1973)'nin formasyon adlarını kullanmış, ancak daha sonraki çalışmasında Kartal Formasyonu adını tüm istifi kapsayacak şekilde genişleterek korumuş ve Kozyatağı ile İçerenköy birimlerini Kartal Formasyonu içinde üyeler olarak incelemiştir.

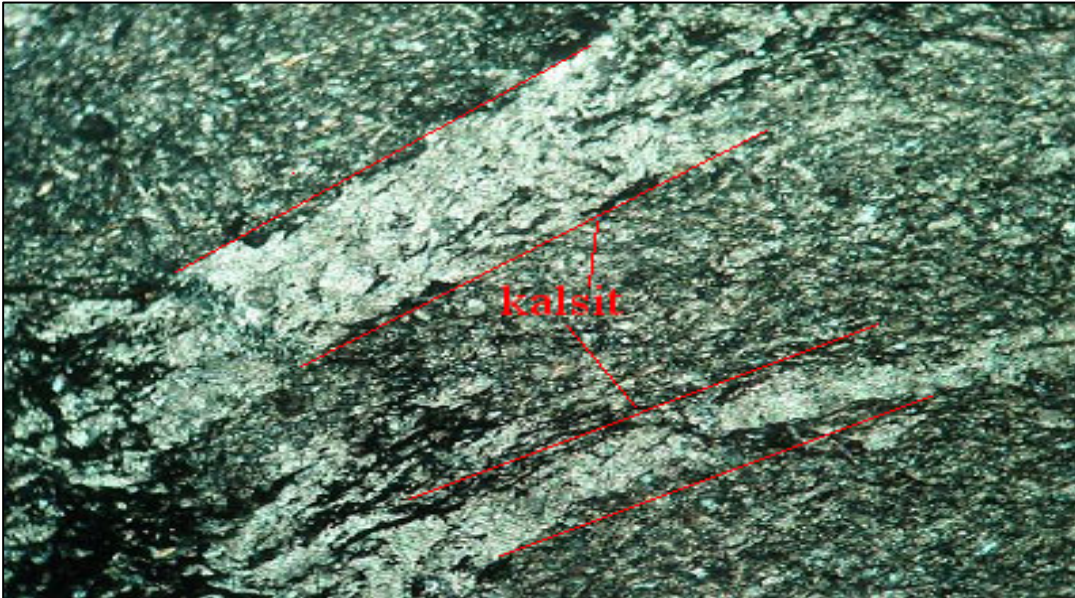
Kartal Formasyonu Dolayoba Kireçtaşı'nın yumrulu kireçtaşı katmanlarını uyumlu olarak üstler. Ayrıca Tuzla Formasyonu tarafından uyumlu üstlenir. Formasyonun harita üzerinden hesaplanan kalınlığı 600 metreyi bulur. Çok çeşitli ve zengin

makrofosil içeriği nedeniyle, sahada diğer kırıntılı kaya istiflerinden, kolayca ayırt edilebilir. Zengin fosil kapsamına göre formasyonun Erken Devonyen ve Erken Devonyen - Orta Devonyen geçişini temsil ettiği bilinmektedir.



**Şekil 3.9 :** Kartal formasyonunun Kireçtaşı-şeyl düzeyi (Yaklaşım tüneli girişi-İstinye -Dereiçi).

Proje güzergahı çalışmaları sırasında, Kartal Formasyonuna ait kaya örneğinin ince kesit değerlendirmesinde, muskovit, serizit, kuvars ve kalsit olarak görülmüştür (Şekil 3.10). Kalsit genellikle laminalar şeklinde izlenmektedir. Opak oluşumlar yaygındır ve bunlar muhtemelen demir oksit ve mangandır.

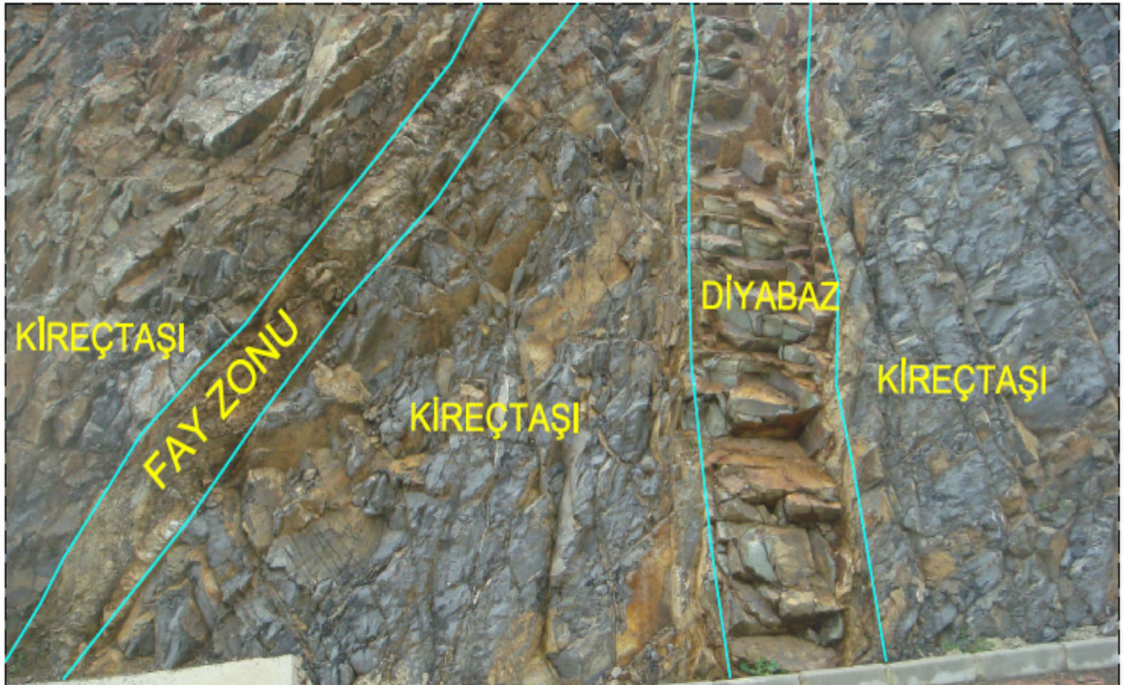


**Şekil 3.10 :** Kartal formasyonuna ait şeylin ince kesit görünümü (Büyütme 10x10).

### 3.1.3.3 Damar kayaları

İstanbul dolayında, özellikle Paleozoyik yaşta, kaya birimleri içerisinde bir kaç santimetreden onlarca metreyi aşan kalınlıkta ve farklı özellikte çok sayıda volkanik damar kayaları izlenir. İleri derecede ayrılmış (kaolinleşmiş) ince dokulu sarımsı kahverengi damarların yanında, yeşilimsi gri renkli, porfirik dokulu ayrılmamış, sert ve sağlam diyabaz ve iri plajiyoklas kristalli andezit daykları da görülür. Damar kayaları çoğunlukla, egemen eklem takımlarına koşut gelişmiştir. Bunun yanında sil şekilli olanlar, tansiyon faylarına yerleşmiş olanlar da yaygındır (Şekil 3.11). Taze olanları yüksek dayanımlı, sert, çok sert, aşındırıcı özelliği yüksek kaya niteliğindedir. Belirgin üç süreksizlik takımı içerir. Süreksizlikler sık, devamlı ve kil-FeO-kuvars dolguludur.

İnceleme alanında kalınlıkları birkaç santimetre ile birkaç 10 metre arasında değişen diyabaz dayklarına rastlanmıştır. İstanbul genelinde, en kalını İstanbul metrosu Şişli-Levent arasında Şişli mezarlığı altında yaklaşık 120 metre olarak kesilmiştir. Boğaz tüneline ise; geçilen en kalın diyabaz dayk 70 metredir. Damar kayaların yaşları ve birbirleriyle ilişkileri konusunda ayrıntılı bir araştırma olmamakla birlikte, bunların Üst Kretase yaşlı volkanizma ile ilişkili ve yaşıt olduğu düşünülmektedir (Şekil 3.12).

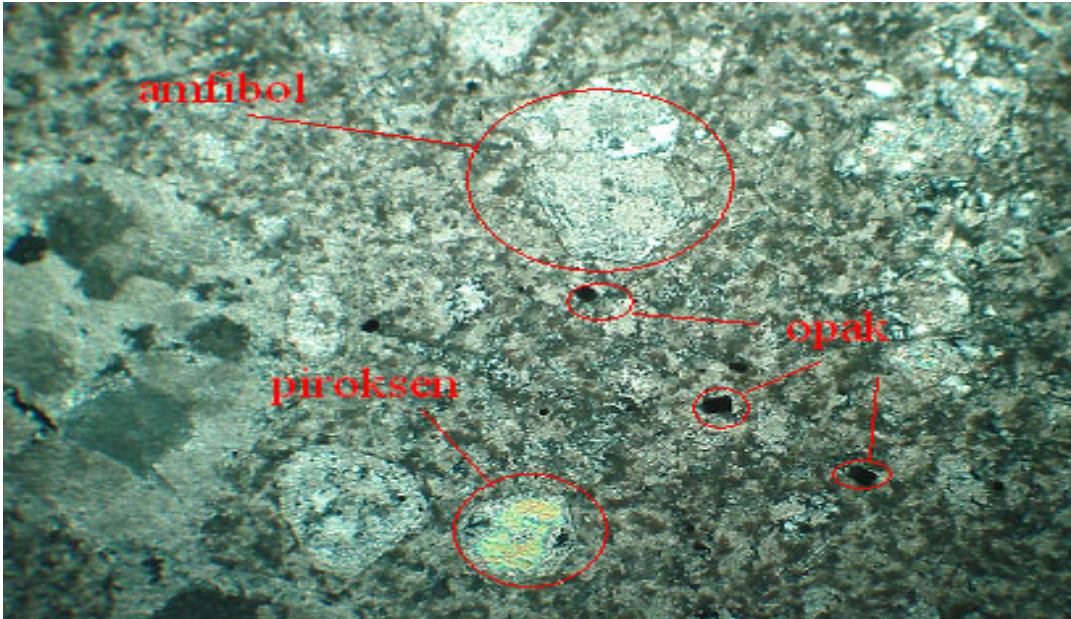


Şekil 3.11 : Kireçtaşlarını keserek yerleşen Diyabaz dayk (Baltalimanı yokuşu).



**Şekil 3.12 :** Dolayoba Formasyonu resifal kireçtaşı düzeyi ve faylı diyabaz daykı (İstinye Burnu).

Proje güzergahı çalışmaları sırasında, Diyabazdan alınan kaya örneğinin ince kesitinde kısmen altere olduğu görülmüştür. Karbonatlaşma çok yaygın, sferolitik kuvarslar gelişmiştir. Köşeli, kare kesitli opaklar bulunmaktadır, bunlar muhtemelen pirit veya manyetittir. Kalsitleşmiş amfibol fenokristalleri görülmektedir (Şekil 3.13). Aşırı alterasyon nedeniyle killeşme başlamıştır. Killer sarımsı kahverengi renklere izlenmektedir.

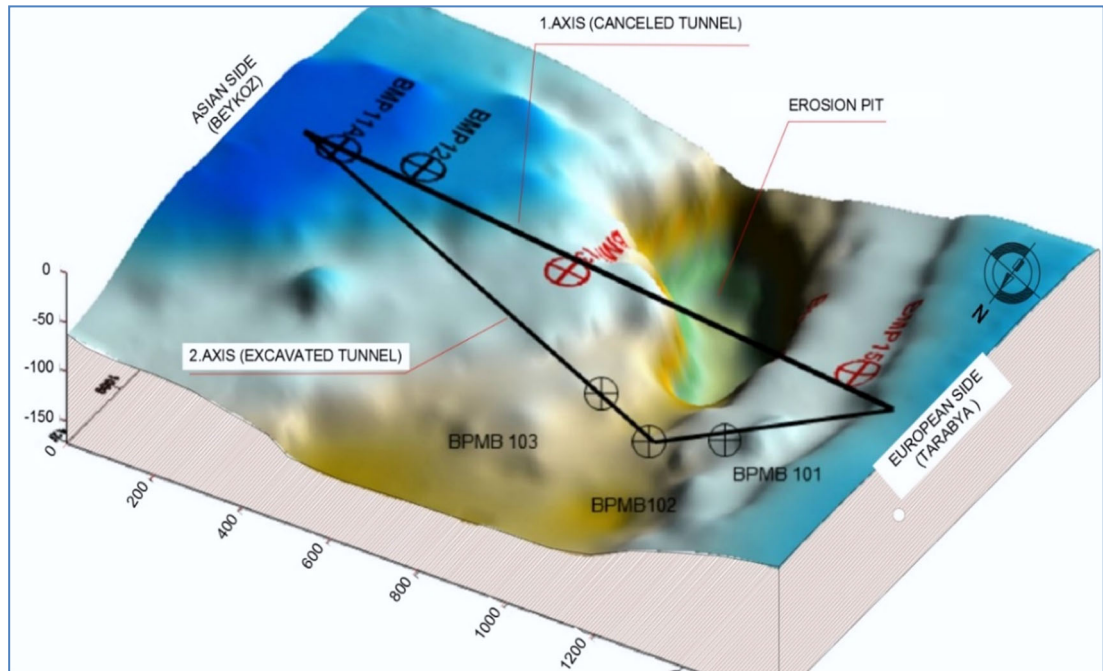


**Şekil 3.13 :** Diyabaz örneğinin mikroskopta görünümü (Büyütme: 4x10).

### 3.2 Tünel Güzergahının Belirlenmesi ve Jeolojik Araştırmaları

Büyük İstanbul İçmesuyu II. Merhale Projesi kapsamında Melen Sistemi - SP no:7 tüneli için Boğaz geçişine yönelik ilk güzergah belirleme ve jeolojik araştırmalar 1993-1995 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların ışığında 1997 yılında yapılan ilk ihalede, bir Alman firmasının da bulunduğu konsorsiyum teklif vermiş ve ihaleyi kazanmıştır. Ancak, beklenen jeolojik riskler ve belirsizlikler nedeniyle yapılan ihale iptal edilmiştir.

Sismik verilere göre, çukurun en derin noktası -175 metre derinliğindedir. Bu haritalardan, Boğaz tabanındaki aşınma izlerinin Üsküdar-Kabataş hattından Karadeniz'e kadar kesintisiz devam ettiği ve yer yer derin çukurlar oluşturduğu, Marmara Denizi çıkışından itibaren ise yaklaşık -50 metrelik batimetrik konturu izleyen bir iç kanalın, şelf ve düzlüklerin var olduğu anlaşılmaktadır. 1997-2002 yıllarında gerçekleştirilen yeni araştırmalarla, tünel eksenini tünel kazı kotu üzerinde yeterli kalınlıkta anakayanın bulunduğu şimdiki güzergaha kaydırılmıştır. Bu güzergahla 2002 yılında yapılan ihaleyi MOSMETROSTROY-STFA-ALKE konsorsiyumu kazanmıştır. Dünyada, ilk defa iki kıtayı birleştiren bu tünelin kazı işlerine 2008 yılının ilk aylarında başlanmıştır.



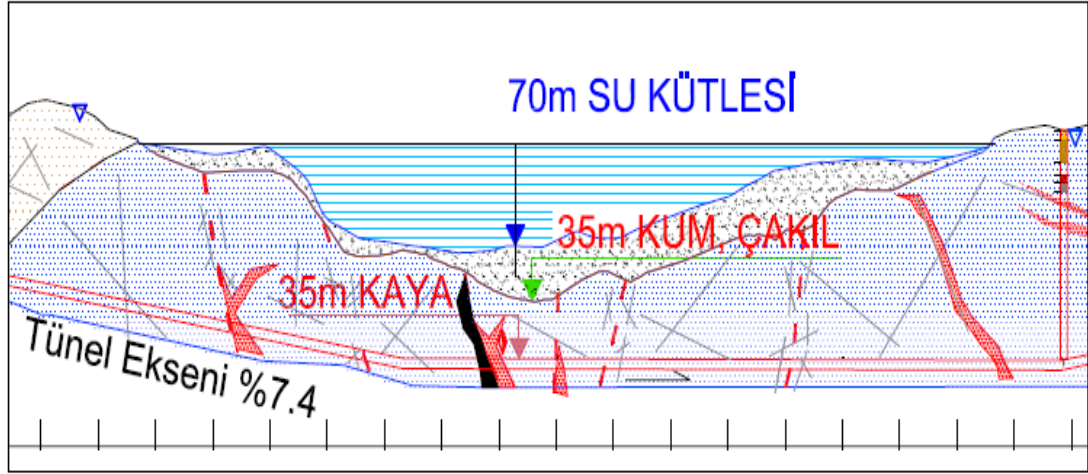
Şekil 3.14 : Tarabya burnu açıklarındaki aşınım çukurunun üç boyutlu modeli (Bakır vd.2021).

Güzergah araştırmaları sırasında, batimetri çalışmalarıyla belirlenen Boğaz'ın dip konturlarında alt akıntılarının oluşturduğu kanyonlar ve çöküntü birikimlerinin bulunduğu tespit edilmiştir (şekil 3.14). Alt akıntılarının neden olduğu kanyonlar ve çöküntü birikimlerini içeren bir erozyon çukurunun tespiti üzerine, tünelin ilk belirlenen rotası yaklaşık 200 metre daha kuzeye kaydırılmıştır. Bu bölgelerden biri Tarabya Burnu açıklarında yer almaktadır. Tarabya Burnu açıklarında ki bu erozyon çukurundan dolayı, Boğaziçi Tüneli'nin rotasını değiştirilmiş ve tünelin doğrudan kaya içinde kazılacak şekilde yeni güzergah belirlenmiştir. Yeni belirlenen güzergahta suyun derinliği maksimum 70 metre olarak ölçülmüştür.

Güzergahın jeolojik modelinin ortaya konulması konusundaki çalışmalara ışık tutması ve jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, güzergah üzerinde farklı dönlemlerde güzergah etütleri gerekleştirilmiştir. İlk belirlenen güzergah için, Ağustos 1997 – Aralık 1997 arasında, 11 adet, yeni belirlenen güzergah için ise 2002 yılında 3 adet olmak üzere toplam 14 adet düşey araştırma sondajı yapılmıştır (izelge 3.1). Sondaj loglarına göre, tünelin, en derin noktası deniz seviyesinden 135 m. derinlikte geçilmiştir. Bu noktada tünel tavanı üzerinde 30 m kalınlığında ana kaya ve 35 m denizel alüvyon (siltli, killi kavrılı çakıl-kum) bulunmaktadır (şekil 3.15).

**Çizelge 3.1 : Güzergah araştırmaları için yapılan sondajlar.**

Sondaj No	Koordinatlar	Deniz tabanı altındaki derinlik (m)	Deniz tabanı kotu (m)	Deniz seviyesinden kuyu derinliği (m)	Platformun denizden yüksekliği (m)
BPMB 101	334,10 E 4 556 815,80 N	77,50	-65,50	143,00	2,20
BPMB 102	234,82 E 4 556 814,30 N	80,50	-68,20	148,70	2,20
BPMB 103	494,31 E 4 556 857,38 N	94,75	-56,00	150,75	2,20
BPMB 11	422,037 E 4 556 863 N	47,70	-12,70	60,40	2,20
BPMB 12	421,931 E 4 556 769 N	128,00	-16,80	144,80	2,20
BPMB 13	421,637 E 4 556 715 N	45,00	-42,00	87,00	2,20
BPMB 14	421,332 E 4 556 562 N	91,00	-65,00	156,00	2,20
BPMB 15	421,166 E 4 556 500 N	20,50	-65,00	85,50	2,20



Şekil 3.15 : Tünelin üzerindeki örtü kalınlığı ve su kütlesinin durumu (Bakır vd., 2012).

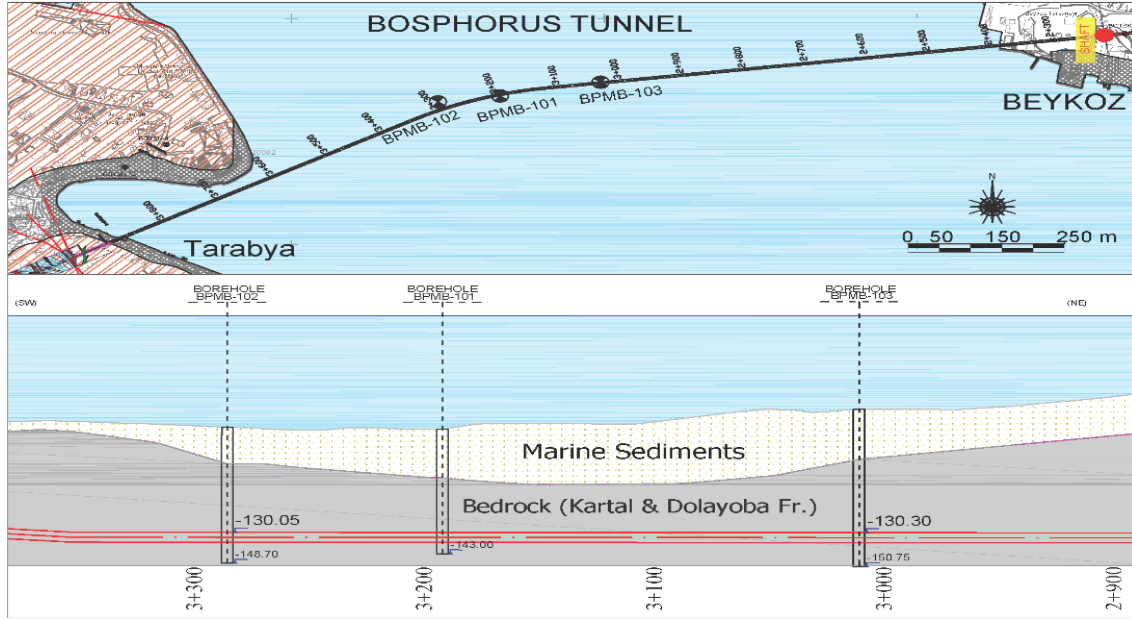
BPMB 101, BPMB 102 ve BPMB 103 olarak adlandırılmış toplam sekiz adet sondaj yaptırmıştır. İşveren olan DSİ tarafından, araştırması yaptırılan ilk tünel güzergahı boyunca BPMB 11, BPMB 12, BPMB13, BPMB 14 ve BPMB 15 olarak adlandırılan karotlu sondajlar yaptırmıştır. Bu sondajlar, öngörülen tünel güzergahından, 200 metreden daha uzaktadır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 : Boğaz geçiş tüneli için belirlenen I. ve II. Geçiş güzergahları (Bakır vd.2012).

İlk güzergah boyunca yapılan sondaj ve batimetri çalışmalarından sonra belirlenen güzergahta, alt akıntının aşındırarak oluşturduğu kanyonlar ve çökel birikimler içeren bir erozyon çukurunun tespit edilmiştir. Bu nedenle, Boğaziçi tüneli için belirlenen ilk güzergah yaklaşık 200 metre daha kuzeye kaydırılmıştı. Kaydırılan ve belirlenen

ikinci güzergahta da BPMB 101, BPMB 102 ve BPMB 103 olarak adlandırılmış olan sondajlar yapılmıştır ( Şekil 3.17).



Şekil 3.17 : Boğaz geçiş tüneli için belirlenen yeni güzergahtaki sondajların lokasyonları (Bakır vd.2012).

## 4. JEOLJİK BİRİMLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

### 4.1 Giriş

İstinye-Beykoz arasında, İstanbul Boğazı'nın altında, mavimsi gri-siyahımsı gri renkli farklı tabaka kalınlıklı ve farklı fasiyelerdeki kireçtaşlarından oluşan Dolayoba Formasyonu ile bunun üzerinde gri-açık kahve renkli silttaşı-kumtaşı aradüzeyle lamine çamurtaşları (Şeyl), grimsi siyah renkli bol fosilli karbonatlı-lamine çamurtaşlarından (karbonatlı şeyl) oluşan Kartal Formasyonu bulunur. Bu birimler kalınlıkları, yer yer birkaç 10 metreyi bulan, diyabaz dayk ve silleri ile kesilmiş durumdadır.

Tünelin Avrupa yakasındaki şantiye alanı olan Derbent şantiyesi girişinden 2100 metre boyunca Kartal Formasyonu'na; bundan sonraki Beykoz Şaftına kadar olan 1200 mlik kesiminde ise Dolayoba Formasyonu'na ait birimler geçilmiştir.

Aşağıda bu kaya türlerinin mühendislik özellikleri ve kaya sınıfları, güzergahta açılmış olan sondajlardan ve İstanbulun değişik kesimlerinde, yapılmış olan, mühendislik amaçlı çalışmalardan yararlanılarak, istatistik sonuçları, devam eden alt başlıklarda ki Çizelgelerde sunulmuştur.

### 4.2 Dolayoba Formasyonunun Dayanım ve Deformasyon Özellikleri

Bolca fosil kırıntıları içeren Dolayoba Formasyonu, çok çatlaklı yer yer kıvrımlı, aşırı kırıklı bir yapıdadır. Bu formasyonun kireçtaşı örneklerinin ince kesitlerinde çatlak ve damar dolgusu olarak iri taneli ikincil kalsit yığılımları ile %5'in altında kuvars ve %1'in altında muskovit görülmüştür. Bazı örneklerin kuvars ve serizit bakımından zengin olduğu görülmüştür. Kuvarslar 0.1-0.2mm. boyunda, doğal ışıktaki renksiz, berrak ve lekesiz, polarize ışıktaki gri-sarımsı renklerde izlenmektedir. Köşeli-yarı köşeli kuvarsın dışındaki taneler 0.1mm.nin çok altındadır. Bazı çatlak ve boşluklar sekonder kalsit ile dolmuştur.

Dolayoba formasyonuna ait yumrulu kireçtaşlarının istatistik sonuçları (Çizelge 4.1)

de verilmiştir. Buna göre; yumrulu kireçtaşlarının ortalama Tek Eksenli Basınç Dayanımı ( $\sigma_u$ ) 33MPa; Kohezyonu (c) 3,7MPa; İçsel Sürtünme Açısı ( $\Phi$ ) 66°; Elastisite Modülü (Es) 5,2GPa; Poisson Sayısı ( $\nu$ ) 0,31 alınabilir (Eriş, 2009, Bakır vd., 2012).

**Çizelge 4.1 : Yumrulu Kireçtaşlarının (Dolayoba Formasyonu) istatistik sonuçları.**

İstatistik	Brezilyan Çekme Dayanımı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı	Kayada Üç Eksenli Sıkışma		E <sub>s</sub>	$\nu$
	$\sigma_c$	$\sigma_u$	$\Phi$	c		
	(MPa)	(MPa)	(°)	(MPa)	(GPa)	-
Minimum	2,68	6,66	58,97	0,34	1,78	0,03
Maximum	11,56	61,99	71,87	11,9	16,18	0,49
Ortalama	6,3	33,6	65,8	3,7	5,2	0,31
Standart Sapma	3,0951	14,017	5,105	3,981	3,5034	0,151

Dolayoba formasyonuna ait mikritik kireçtaşlarının deney sonuçları (Çizelge 4.2) de verilmiştir. Buna göre; yumrulu kireçtaşlarının ortalama Tek Eksenli Basınç Dayanımı ( $\sigma_u$ ) 65MPa; Kohezyonu (c) 7,3 MPa; İçsel sürtünme Açısı ( $\Phi$ ) 63°; Elastisite Modülü (Es) 15,3 GPa; Poisson Sayısı ( $\nu$ ) 0,28 alınabilir.

**Çizelge 4.2 : Mikritik Kireçtaşlarının (Dolayoba Formasyonu) istatistik sonuçları.**

İstatistik	Brezilyan Çekme Dayanımı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı	Kayada Üç Eksenli Sıkışma		E <sub>s</sub>	$\nu$
	$\sigma_c$	$\sigma_u$	$\Phi$	c		
	(MPa)	(MPa)	(°)	(MPa)	(GPa)	-
Minimum	12,43	41,28	61,03	5,64	6,56	0,15
Maximum	19,31	84,74	64,48	8,98	21,81	0,44
Ortalama	15,4	64,7	62,9	7,3	15,3	0,28
Standart Sapma	3,5	21,9	1,75	1,8	7,9	0,15

Dolayoba formasyonuna ait resifal kireçtaşlarının deney sonuçları (Çizelge 4.3) de verilmiştir. Buna göre; resifal kireçtaşlarının ortalama Tek Eksenli Basınç Dayanımı ( $\sigma_u$ ) 61MPa; Kohezyonu (c) 10,5 MPa; İçsel Sürtünme Açısı ( $\Phi$ ) 61°; Elastisite Modülü (Es) 14 GPa; Poisson Sayısı ( $\nu$ ) 0,25 alınabilir.

**Çizelge 4.3 : Resifal Kireçtaşlarının (Dolayoba Formasyonu) istatistik sonuçları.**

İstatistik	Brezilyan Çekme Dayanımı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı	Kayada Üç Eksenli Sıkışma		E <sub>s</sub>	ν
	σ <sub>ç</sub>	σ <sub>u</sub>	Φ	c		
	(MPa)	(MPa)	(°)	(MPa)	(GPa)	-
Minimum	4,42	33,87	50,89	4,05	5,94	0,07
Maximum	8,08	74,97	67,22	16,22	34,53	0,44
Ortalama	6,1	61,0	60,4	10,5	14,1	0,25
Standart Sapma	1,6	15,9	6,2	4,7	10,6	0,15

### 4.3 Kartal Formasyonunun Dayanım ve Deformasyon Özellikleri

Tünelin Avrupa yakasındaki şantiye alanı olan Derbent şantiyesi girişinden yaklaşık 2100 metrelik kesiminde geçilen Kartal Formasyonuna ait örneklerin ince kesitlerinde muskovit, serizit, kuvars ve kalsit görülmüştür. Kalsit genellikle laminalar şeklinde izlenmektedir. Opak mineraller yaygın olarak izlenmektedir. Bunlar muhtemelen demir oksit ve mangandır. Genelde %50 altında RQD değerlerine sahip olan formasyon kaya sınıflamalarında (RMR; Q; GSI) orta ve zayıf kaya kalitesi aralığında kalmaktadır (Eriş, 2009, Bakır vd., 2012).

Kartal formasyonunununa ait deneylerin istatistik sonuçları (Çizelge 4.4) de bir araya getirilmiştir. Buna göre; karbonatlı şeyl ve çamurtaşlarının ortalama Tek Eksenli Basınç Dayanımı (σ<sub>u</sub>) 32MPa; Kohezyonu (c) 4,5MPa; İçsel Sürtünme Açısı (Φ)56°; Elastisite Modülü (E<sub>s</sub>) 5,3GPa; Poisson Sayısı (ν) 0,32 alınabilir.

**Çizelge 4.4 : Karbonatlı Şeyl-Çamurtaşlarının (Kartal Formasyonu) istatistik sonuçları.**

İstatistik	Brezilyan Çekme Dayanımı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı	Kayada Üç Eksenli Sıkışma		E <sub>s</sub>	ν
	σ <sub>ç</sub>	σ <sub>u</sub>	Φ	c		
	(MPa)	(MPa)	(°)	(MPa)	(GPa)	-
Minimum	2,14	4,66	39,96	2,15	0,8	0,13
Maximum	12,21	64,25	62,96	8,71	16,34	0,6
Ortalama	5,2	32,4	55,7	4,5	5,3	0,32
Standart Sapma	2,4	17,9	6,9	1,8	3,8	0,13

#### 4.4 Daykların Dayanım ve Deformasyon Özellikleri

İstanbul dolayında, özellikle Paleozoyik yaşta, kaya birimleri içersinde bir kaç santimetreden onlarca metreyi aşan kalınlıkta ve farklı özellikte çok sayıda volkanik damar kayaları izlenir. İleri derecede ayrışmış (kaolinleşmiş) ince dokulu sarımsı kahverengi damarların yanında, yeşilimsi gri renkli, porfirik dokulu ayrışmamış, sert ve sağlam diyabaz ve iri plajiyoklas kristalli andezit daykları da görülür. Damar kayaları çoğunlukla, egemen eklem takımlarına koşut gelişmiştir. Bunun yanında sil şekilli olanlar, tansiyon faylarına yerleşmiş olanlar da yaygındır. Ayrışmamış olanları yüksek dayanımlı, sert, çok sert, aşındırıcı özelliği yüksek kaya niteliğindedir. Belirgin üç süreksizlik takımı içerir. Süreksizlikler sık, devamlı ve kil-FeO-kuvars dolguludur.

**Çizelge 4.5 : Diyabazın istatistik sonuçları.**

İstatistik	Brezilyan Çekme Dayanımı	Tek Eksenli Basınç Dayanımı	Kayada Üç Eksenli Sıkışma		E <sub>s</sub>	ν
	σ <sub>ç</sub>	σ <sub>u</sub>	Φ	c		
	(MPa)	(MPa)	(°)	(MPa)	(GPa)	-
Minimum	5,63	30,95	50,31	5,33	3,25	0,3
Maximum	10,88	63,76	53,29	5,9	6,39	0,44
Ortalama	7,83	45,9	51,74	5,69	4,55	0,357
Standart Sapma	2,7263	16,603	1,4936	0,3109	1,638	0,0737

Proje çalışmalarında elde edilen verilere göre, diyabaz dayklarının ortalama Tek Eksenli Basınç Dayanımı (σ<sub>u</sub>) 46 MPa; kohezyonu (c) 5,7 MPa; içsel sürtünme Açısı (Φ) 52°; elastisite modülü (E<sub>s</sub>) 4,6 GPa; poisson sayısı (ν) 0,36 alınabilir (Çizelge 4.5) (Eriş, 2009, Bakır vd., 2012).

#### 4.5 Kaya Sınıfları

Eriş (2009), Bakır vd. (2012) tarafından farklı çalışmalardan derlenen ve İstanbul'un çeşitli proje ve uygulamalarında kullanılan Paleozoyik yaşlı Dolayoba ve Kartal formasyonları ile diyabaz dayklarına ait kaya sınıflamalarına ilişkin RMR, Q, GSI değerleri ve istatistik sonuçları bulunmaktadır. Yazar yaptığı derleme çalışmasında, elde edilen sonuçları Çizelge halinde her litolojik birimler bazında bir araya getirmiştir (Çizelge 4.6).

**Çizelge 4.6 :** Tünel güzergahında geçilen formasyonların farklı litolojilerine ait kaya sınıfları.

Kaya Sınıfı									Açıklama
RMR			Q			GSI			
Max	Min	Ort	Max	Min	Ort	Max	Min	Ort	
68	51	66	8,26	1,25	6,61	63	46	61	Resifal Kireçtaşı (Dolayoba Formasyonu)
61	42	50	3,79	0,46	1,12	56	37	45	Mikritik Kireçtaşı (Dolayoba Formasyonu)
64	36	57	5,29	0,24	2,43	59	31	52	Yumrulu Kireçtaşı (Dolayoba Formasyonu)
63	23	53	4,74	0,06	1,56	58	18	48	Kireçtaşı (Kartal Formasyonu)
59	42	50	3,04	0,46	1,12	54	37	45	Karbonatlı Şeyl (Kartal Formasyonu)
71	63	69	11,52	4,74	9,23	66	58	64	Diyabaz

Proje öncesi güzergah çalışmaları sırasında hazırlanan “Jeoteknik Veri Raporu –(DSİ-2005) ve kazı sonrası yapılmış testlere (Bilgin vd., 2016) göre belirtilen kaynaklardan özetlenerek alınmış, tünel kazısından alınan jeolojik birimlerin ortalama basınç dirençlerinin sonuçları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.7 :** Boğaz Tüneli kazılarında alınan numunelerin basınç dayanımı test sonuçları (DSİ 2002; Bilgin hiç. 2016)’dan özetlenmiştir.

Kaya Tipi	Tek Eksenli Basınç dayanımı UCS (MPa)			Test Sayısı	
	Min. Değer	Max Değer	Ortalama Değer		
*(Bilgin vd. 2016)’dan özetlenmiştir.	Dayk (Andezit ve Diyabaz)	63	120	102.5	5
	Meta Silttaşı/Silttaşı	43	117	76	31
	İnce Daneli Kumtaşı	101	132	116	2
** Jeoteknik Veri Raporu –(DSİ-2005)	Kireçtaşı	10.1	64.6	34	20
	Çamurtaşı (Silttaşı-Kilttaşı)	9.4	60.9	27	12

Tünel kazısı sırasında volkanik dayklardan alınan kaya numuneleri, 63 ila 120 MPa arasında değişen basınç dayanımları göstermiştir. Hatta bazı numunelerde bu değer 200 MPa’ya kadar ulaşmıştır. Bu bulgular, projenin güzergahındaki daykların, İstanbul’da daha önce yapılan projelerde test edilen dayklardan yaklaşık 2,25 kat daha sağlam olduğunu gösteriyor. Bu yüksek dayanıklılık, TBM’nin (tünel açma makinesi) kesici kafasındaki kesici disklerin aşınmasını önemli ölçüde etkileyebilir. Daykların sertliği, disklerin daha hızlı aşınmasına ve daha sık değiştirilmesine neden olabilir. Bu durum, kazı süresini uzatmıştır.



## **5. DELGİLERİN YAPIMI VE KULLANILAN EKİPMANLAR**

### **5.1 Giriş**

Tünel güzergahı mühendislik jeolojisi modelinin oluşturulması aşamasında, bölgede daha önce yapılmış olan jeoloji ve mühendislik jeolojisi çalışmalarından, tünel güzergahı boyunca yapılmış ve proje eki olarak sunulmuş olan temel araştırma amaçlı sondaj ve deneysel çalışmalardan, kazı öncesi hazırlanmış olan tünel jeoteknik boy kesiti verilerinden ve ortalama 36 metre derinliğindeki tünel çapı kadar bindirmeli, tünel eksenine paralel konumlu ileri araştırma delgilerinden yararlanılmıştır. Kazı ortamının jeolojik ve hidrojeolojik koşullarına uygun EPB Hard Rock tipi TBM (Earh Pressure Balance Tunnel Boring Machine) kullanılarak kazılan tünelin çapı 6,15 m, uzunluğu ise 3145 m olarak gerçekleştirilmiştir.

Tünel kazısı boyunca, toplam boyu 5053m olan 140 adet, yatay ön araştıma delgisi yapılmıştır. Ortalama boyu 36.00 m olan delgilerin en kısası 2.37m, en uzununu ise 45.06m olarak ölçülmüştür. Tünelin, 70m derinlikteki boğaz suyunun altına denk gelen, 1000 metrelik kritik kesimi (km:3+450–km:2+450) olası jeolojik-hidrojeolojik kökenli riskleri irdelemek ve daha güvenli kazı koşullarını sağlamak amacıyla, en az iki, gerektiğindeyse daha fazla sayıda, delgi ile geçilmiştir.

### **5.2 TBM Kazısı Ve Yatay Delgi Ekipmanı**

Tünel Delme Makineleri (TBM), proje gereksinimlerine göre, genelde farklı tiplerde ve özelliklerde , modellere sahiptir. Her proje için, üretici firma tarafından belirtilen proje parametrelerine göre özel olarak tasarlanan Tünel Delme Makineleri kullanılır. TBM ile gerçekleştirilecek bir tünel projesinde, doğru TBM seçimi, çeşitli riskleri önceden tahmin edebilmek için dikkatlice planlanmalıdır. TBM’ler jeolojik ve hidrojeolojik koşullara bağlı olarak, bazen sadece kazıcı uçlardan, bazen de zeminin çökmesini veya benzer sebeplerden ötürü inşaata zarar vermesini önlemek amacıyla “kalkan (shild)”lı olarak imal edilir. Bu kalkanlar, tünel açma işleminden sonra yerleştirilecek olan iksa sistemi kurulana kadar, zemine geçici tahkimat desteği

sağlamak, çalışma sahasındaki çalışanları ve ekipmanı korumak amacıyla kullanılır.

Genel iş programının düzgün bir şekilde devam etmesi, maliyet ve süre optimizasyonlarının titizlikle planlanması, risklerin en aza indirilmesi açısından kritiktir. Bu hususların yanı sıra, TBM seçiminde takip edilecek aşamalar şu şekilde özetlenebilir (Yüksel, 2014).

- Tünel kazı aynası stabilite durumu ve çevresel etkilerinin (oturma, yeraltı suyu değişimleri) incelenmesi,
- Tünel inşaatı iş programı genel çerçevesinin, “maliyet-“süre” optimizasyonu dikkate alınarak oluşturulması,
- Kazı makinesi seçimine etki eden proje koşullarının tanımlanması ve değerlendirilmesi.

### **5.3 Boğaz Geçiş Tünelinde Kullanılan TBM**

İstanbul boğaz geçişini oluşturan Boğaziçi Tünelinin kazı ortamının jeolojik ve hidrojeolojik koşullarına uygun Pasa Basınç Dengeleyici Tünel Açma Makinesi (Earth Pressure Balance / Tunnel Boring Machine, EPB/TBM) kullanılarak yapılan tünel kazı işlerine ait yapım şeklini tarif etmektedir. Şekil 5.1’de TBM’in kesici kafa ve diskleri gösterilmektedir.

Her biri projeye özel olarak tasarlanan TBM’ler, farklı tiplerde ve özelliklerde çeşitli modellere sahiptir. Bu modeller standart değildir; tamamen kullanılacak işin özelliğine ve kapsamına bağlı olarak değişir. Dolayısıyla, her proje için kullanılacak TBM’ler, üretici firma tarafından projenin belirlenen parametreleri dikkate alınarak özel olarak tasarlanır.

Tünel Açma Makinalarının kesici kafa tasarımında, kayanın mekanik özellikleri ile kaya kütlesi sınıflamaları önemli parametreler olarak kullanılır. Özellikle sert kaya ortamlarında, TBM’in kazı verimi, dik keskinin arasına uygulanan baskı kuvveti, kesme derinliği ve kaya sertliği gibi faktörlere büyük ölçüde bağlıdır. Ayrıca, yeraltı suyunun varlığı TBM’ler için çeşitli olumsuz etkiler yaratabilir ve bu durum kazı verimini önemli ölçüde düşürebilir.

Güzergahın geometrik özellikleri de tünelin maliyet kontrolünde önemli bir rol oynar. Tünelde karşılaşılan geoteknik riskler, kaya kütlelerinin özellikleri, kazı öncesi ve

sonrası gerilme durumu, hareketli yeraltı suyu ve kazı boyutları ile doğrudan ilişkilidir. Temel bir nokta, "Kaya kütlesi özellikleri" ve bu özellikleri etkileyen faktörlerin etkileşimi sonucu ortaya çıkan sistem büyüklüğü ve kazı/destek uygulamalarının sistem davranışıdır.



**Şekil 5.1 :** Kazıda kullanılan TBM'in fabrika ve sahada montajı.

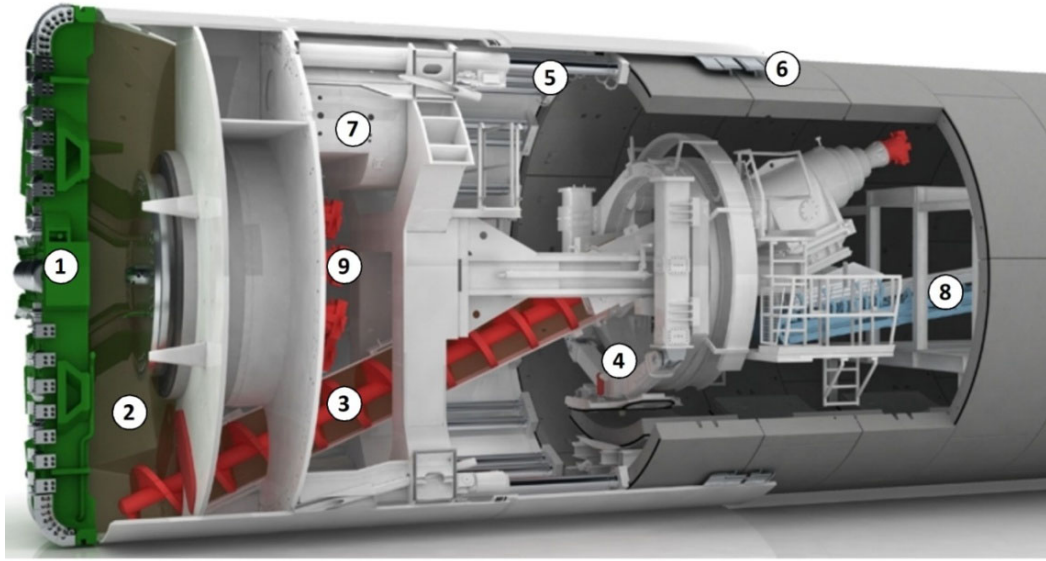
İstanbul Boğaz geçişini oluşturan Boğaziçi Tünelinin kazı ortamının jeolojik ve hidrojeolojik koşullarına uygun EPB Hard Rock tipi TBM (Earh Pressure Balance Tunnel Boring Machine) kullanılarak kazı yapılmıştır. Almanya'da yaklaşık 10 ayda imal edilen 157 m uzunluğundaki TBM, 2 ay süren nakliyenin ardından Avrupa yakasında İstinyede bulunan Derbent şantiyesine ulaşmış ve yaklaşık 2 ayda montajı yapılmıştır. Kazı imalatında kullanılan TBM'in teknik özellikleri Çizelge 5.1'de görülmektedir.

Pasa basınçlı makinelerde (EPB-TBM) aynanın dengede tutulması bizzat kazılan malzeme ile sağlanmaktadır. Diğer bir deyişle, makinenin öne doğru ilerlemesi için yapılan itme kuvveti aynada basınç oluştururken, basıncın dengede tutulması için ise kazı haznesindeki malzeme burgulu taşıyıcı (konveyör) ile kontrollü biçimde dışarı alınmaktadır (Şekil 5.2). Bu makineler siltli killerden bloklu, çakıllı zeminlere ve hatta çok çatlaklı kaya ortamlara kadar oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Zemin özelliklerinin elverişli olması durumunda bir açık tip kalkanlı kazı makinesi gibi, "basıncsız durumda" da çalışabilmektedirler.

Proje kapsamında Toprak Basınç Dengeleyici Tünel Açma Makinesi (EPB/TBM) kullanılmıştır. EPB/TBM'ler, çalışma sırasında zemindeki yer altı sularının oluşturduğu basınca göre kazılan noktalara hava ve zemin basıncı uygulayarak, içeriye su girmesini engelleyen ve boşalan toprağın yerine su dolmasıyla oluşabilecek zemin çökmesini önlemek amacıyla tasarlanmış hidrolik mekanizmalarla çalışan bir makineler grubunu ifade eder. Sistem içerisinde, delme, kazı toprağının atılması, tünel iç kaplamasının montajı, enjeksiyon ve delgi gibi işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli ekipmanlar yerleştirilmiştir.

**Çizelge 5.1 : Kazı imalatında kullanılan TBM'in genel özellikleri.**

Genel Özellikler		Değer	Birim
Shield (Kalkan) Tipi	EPB / Hard Rock TBM		
Maksimum statik ayna su basıncı		13.5	[bar]
max. earth pressure /Maksimum toprak basıncı		0	[bar]
Front shield diameter /Ön kalkan çapı		6110	[mm]
Front shield diameter with hard facing / Sert kaplamalı ön kalkan çapı		6120	[mm]
Centre shield diameter /Merkez kalkan çapı		6095	[mm]
<b>İtme cylinders /İtme silindirleri</b>			
Quantity /Miktar		20	[units]
Diameter Piston /Piston çapı		280	[mm]
Diameter Rod /Rod çapı		240	[mm]
Pressure /Basınç		400	[bar]
Installed Advance Force/Kurulu ilerleme kuvveti		49260	[kN]
<b>Helezon konveyör</b>			
Type / Tipi	screw spiral with shaft/ Helezonik		
Diameter / Çapı		700	[mm]
Electrical power /Elektrik gücü		315	[kW]
Max. torque /Maksimum Tork		140	[kNm]
Infinitely adjustable Speed /Hızı (ayarlanabilir) /		0 - 30	[rpm]
Max. capacity (theoretical)/ Maksimum kapasite (Teorik)	100% filling	400	[m <sup>3</sup> /h]
Capacity / Kapasite		280	[m <sup>3</sup> /h]
Discharge gate / Boşaltma ağızı		1	[unit]
<b>Conveyor belt / Konveyör bant</b>			
Drive /Sürücü	elektrik	17.5	[kW]
Belt length /Bant uzunluğu		9.5	[m]
Belt width /Bant genişliği		800	[mm]
Speed /Hızı		2.5	[m/s]
Max. capacity		450	[m <sup>3</sup> /h]



- |                    |                               |                           |
|--------------------|-------------------------------|---------------------------|
| ① Kesici Kafa      | ④ Segment Yerleştirme Ünitesi | ⑦ Basınç Odası (Man Lock) |
| ② Kazı Odası       | ⑤ İtme Silindirleri           | ⑧ Bantlı Konveyör         |
| ③ Burgulu Konveyör | ⑥ Segment Arkası Enjeksiyonu  | ⑨ Kesici Kafa Motorları   |

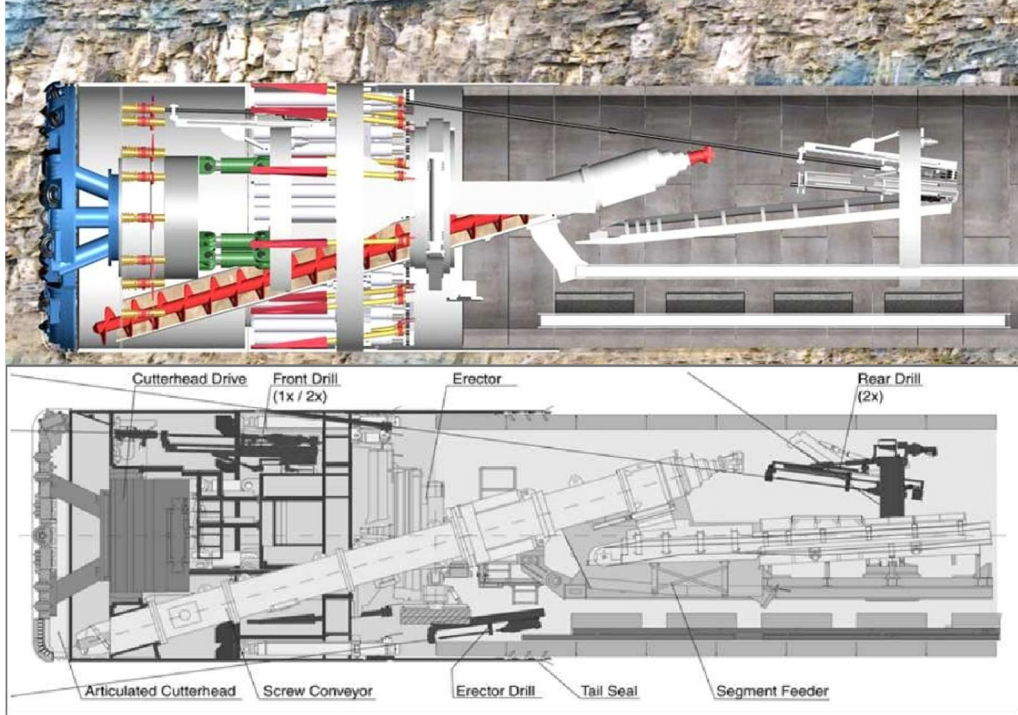
Şekil 5.2 : Pasa basınçlı TBM'in yapısı (Yüksel, 2014).

#### 5.4 Boğaz Geçiş Tünelinde Kullanılan Yatay Delgi Ekipmanları ve Özellikleri

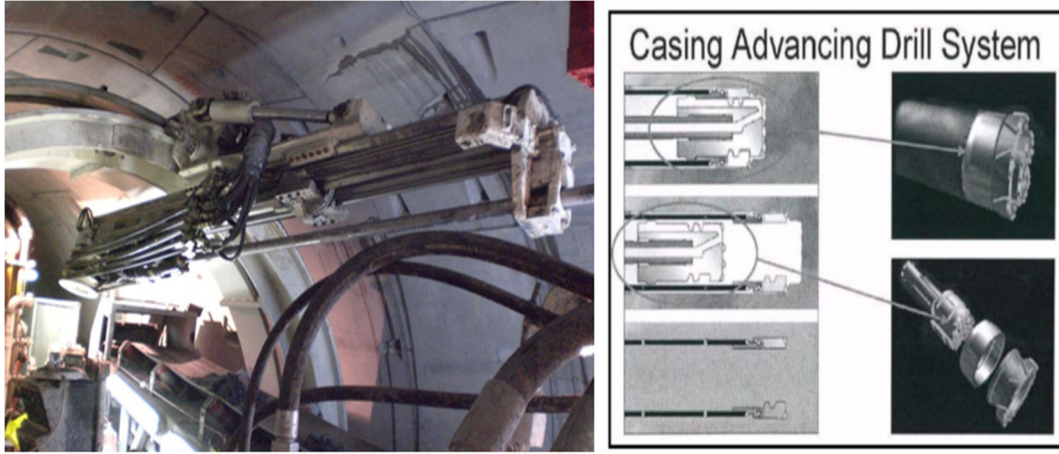
TBM üzerinde, iki adet Atlas Copco 1838ME tipi hidrolik delgi makinesi monte edilmiştir (Şekil 5.3, Şekil 5.4). Bunlardan biri kesici kafaya (cutter head) yakın şekilde montajı yapılmış olan (front drill) delgi makinasıdır. Diğeri ise, 7,5° dışa doğru, şemsiye (rear drill) enjeksiyonu yapabilecek şekilde, Gantry (delgi makinesi platformu) üzerine montajı yapılmış delgi makinesidir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2 : TBM üzerine montajı yapılan hidrolik delgi makinasının genel özellikleri.

Rotary percussive rock drill /Döner darbeli kaya matkabı		
Drilling force / Delme kuvveti	19	[kN]
Pull out force /Çekme kuvveti	30	[kN]
Drill stroke / Delgi darbesi	1910	[mm]
Total length / Toplam uzunluk	3375	[mm]
	1	[unit]
Type / Tip	Cop 1838ME07	
Impact Power / Darbe gücü	18	[kW]
Rotation Speed / Dönme hızı	0-210	[rpm]
Rotation Torque, max / Dönme Torku, maks	740	[Nm]
Delgi çapı	64 - 89	[mm]



Şekil 5.3 : Kazıda kullanılan TBM'deki delgi ekipmanlarının yerleşimi (Najder, 2009).



Şekil 5.4 : Delgi ekipmanları genel görünümü (Najder, 2009).

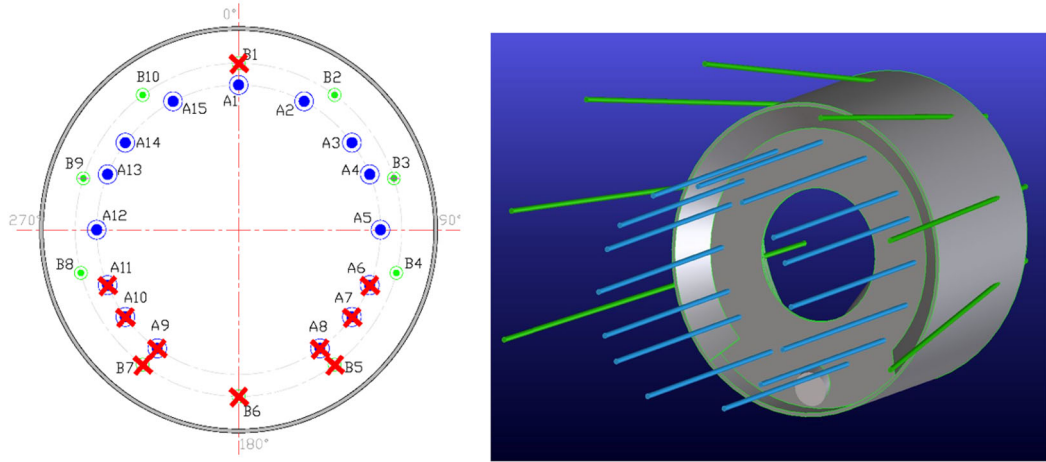
#### 5.4.1 Ön araştırma delgilerinin delme paterni ve yapım metodolojisi

Tünel aynasının ilerisine doğru yapılan yatay delgiler, tünel araştırmalarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. TBM ile kazı yapılmadan önce şartnamesine uygun olarak ön araştırma delgisi yapılarak kazı aynasının önündeki zemin etüt edilmiştir. Yapılan yatay delgilerle, TBM kazı aynasının önündeki ortalama 36m'lik zonda, aşağıda belirtilen olumsuz koşulları belirlemeye ve güvenli kazı koşullarını sağlamaya yönelik karar ve uygulamalar için gerekli veri ve bilgilerin sağlanması amaçlanmıştır.

Bu anlamda kazı sırasında güvenli kazı zonunda;

- Tünel kazı aynası önündeki kaya-zemin koşullarının belirlenmesi, su geliri ve kazılabilirlikle ilgili bilgi edinilmesi,
- Duraysız, ezilmiş, yumuşak zemin ve fay zonlarının belirlenmesi,
- Akıcı ve /veya şişen zeminler nedeniyle, tünel aynasında karşılaşılabilecek muhtemel göçmelerin yerlerinin ve boyutlarının saptanması,
- Kazı aynası önünde karşılaşılabilecek olası karstik ve benzeri boşlukların belirlenmesi sağlanmıştır.

Ön araştırma delgileri; tünel delme makinasının (TBM) kesici kafası önünde tünel eksenine paralel olarak dönen-darbeleri biçimde açılmıştır. Boğaziçi tüneline kullanılan ön araştırma delgisi sisteminde her bir tij uzunluğu 180cm olup gerektiğinde karot da alınabilmekteydi.

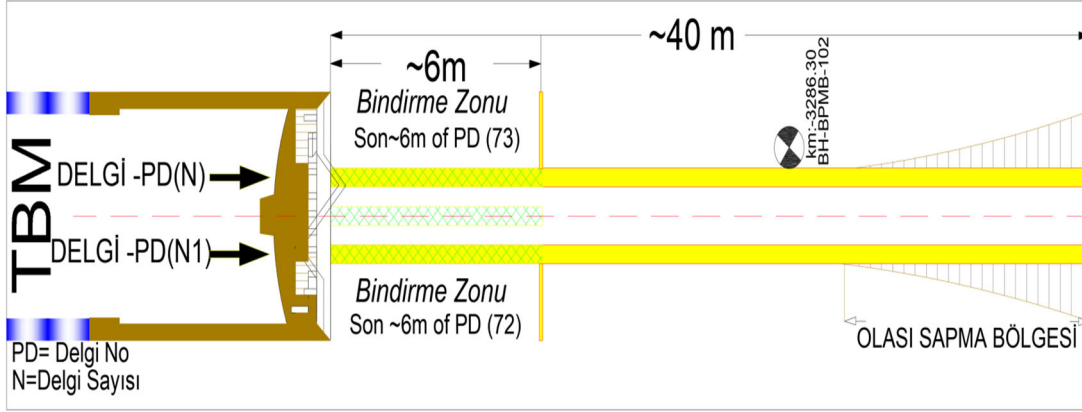


**Şekil 5.5 :** Büyük Melen Projesi'ndeki pratik delme paterni (Kesici kafadaki A-delikleri – mavi daireler; 'Arka pozisyonundaki' B-delikleri yeşil daireler; X – Delinmesi müsait olmayan delik yerleri).

Delgiler, tünelin üst yarısında açılacak şekilde planlandığında delme ve izleme kolaylığı sağlanmaktadır. Şekil 5.5'de de görüleceği gibi, tünelin alt yarısında gösterilmiş olan ve kırmızı renkli (X) işareti ile gösterilen delgiler uygulama sırasında, alt yarıda biriken su ve kaya parçalarından dolayı, çok zor açılabilirdiğinden bu noktalarda delgi yapılmamıştır. A-portları olarak gösterilen ön araştırma delgilerinin uzunluğu, ortalama 36 metre olup en az tünel çapı kadar bindirmeli olacak şekilde planlanmıştır. Bu şekilde, olası sapmalar en aza indirgenmiş, güvenli kazı mesafesi olarak bırakılan bindirme zonu net belirlenebilmiştir. Tünel kazı aynası önündeki

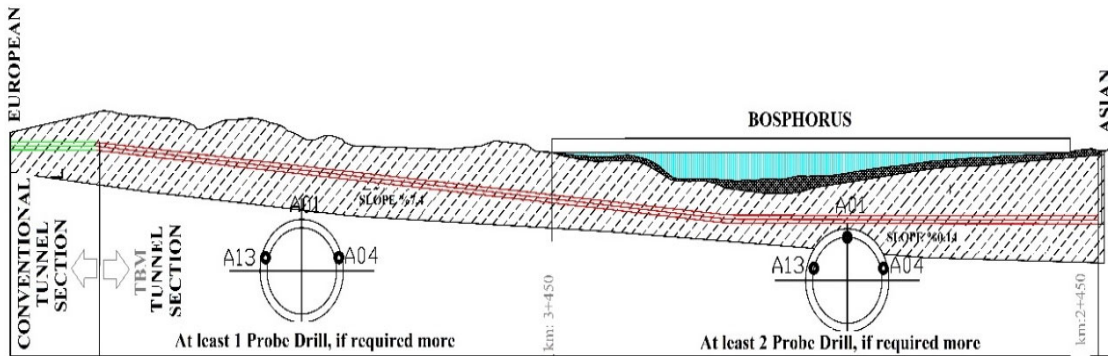
jeolojik-hidrojeolojik belirsizliklerin bulunduğu kesimlerde en az iki, gerektiğinde daha fazla sayıda ön araştırma delgisi açılmıştır.

Delgilerin bindirme boyları ise en az bir tünel çapı ( $D=6m$ ) kadar olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu şekildeki yapılan uygulama ile bir önce açılmış olan yatay ön araştırma delgilerinin, son 6 metresi bindirme zonuna denk gelecek şekilde tekrar delinerek, olası doğrultu sapmaları en aza indirgenmiştir (Şekil 5.6).



**Şekil 5.6 :** Yatay ön araştırma delgilerindeki bindirme zonu ve plan görünüşü.

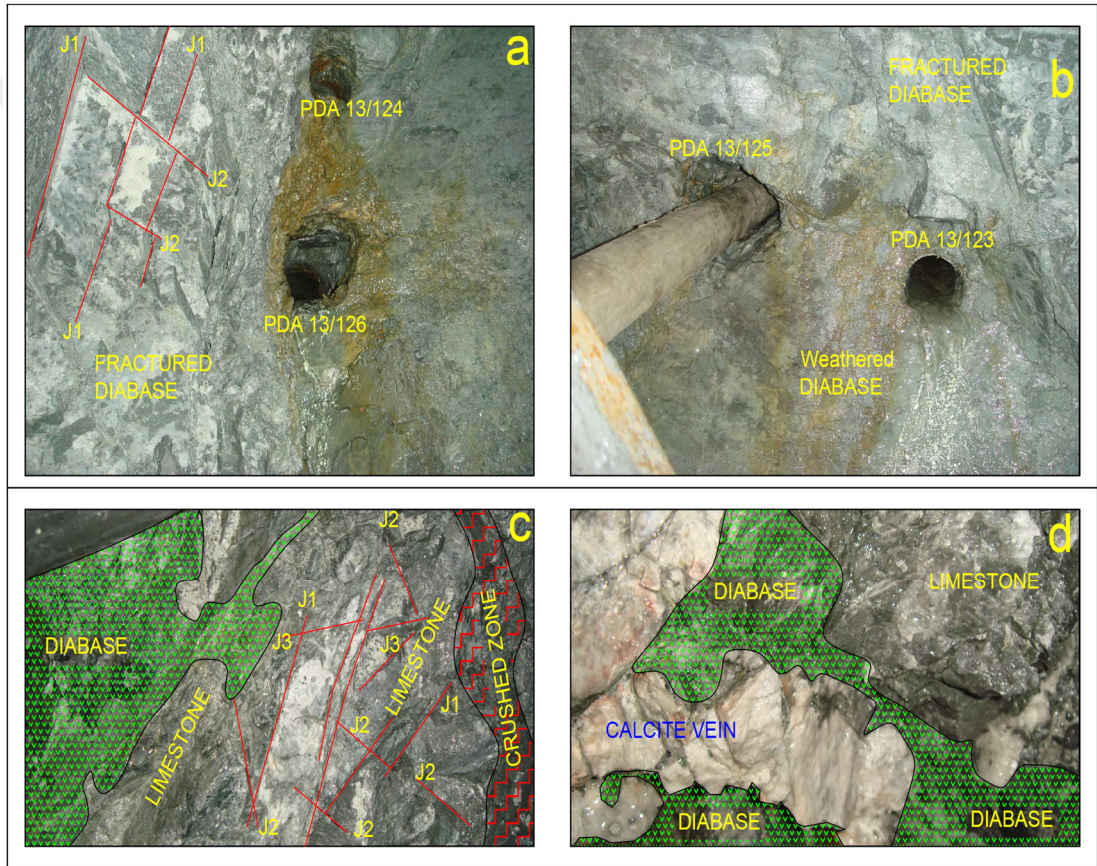
Tünel kazısı boyunca, toplam boyu 5053m olan 140 adet, yatay ön araştırma delgisi yapılmıştır. Ortalama boyu 36.00 m olan delgilerin en kısıası 2.37m, en uzununu ise 45.06m olarak ölçülmüştür. Tünelin, 70m derinlikteki boğaz suyunun altına denk gelen, 1000 metrelik kritik kesimi (km:3+450–km:2+450) olası jeolojik-hidrojeolojik kökenli riskleri irdelemek ve daha güvenli kazı koşullarını sağlamak amacıyla, en az iki, Boğazın en derin kesimlerine yaklaştıkça olası kritik jeolojik – hidrojeolojik koşulların kestirimi için daha fazla sayıda, delgi ile geçilmiştir (Şekil 5.7).



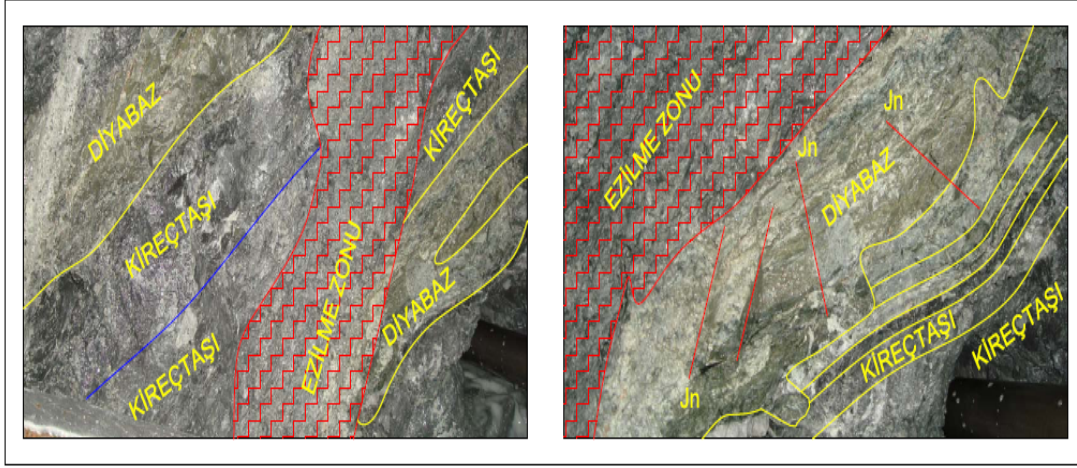
**Şekil 5.7 :** Ön araştırma delgilerinin uygulama paterni.

#### 5.4.2 Ön araştırma delgisinin konumlandırılması ve ayna kontrolü

TBM in kesici kafası ile kazı aynası arasındaki bir segment genişliği olan, 1,2 metrelik kesimde, ortalama her 36 metrede bir tekrarlanan ayrıntılı belgeleme çalışmaları (foto, video, ölçümler) yapılmıştır. Yapılan her bir delgi sonucunda; birim ilerleme için gerekli uç baskısı ve tork değişimleri ile gözlemsel bulgular değerlendirilerek geçilen litolojiler tanımlanmış, su gelirine yönelik gözlem ve değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca kazı odasına girilerek kazı aynasının görülebilen alanlarında fotoğraf çekimleri gerçekleştirilmiş, çatlak sistemleri ve tabaka konumları belirlenmeye çalışılmıştır (Şekil 5.8, Şekil 5.9).



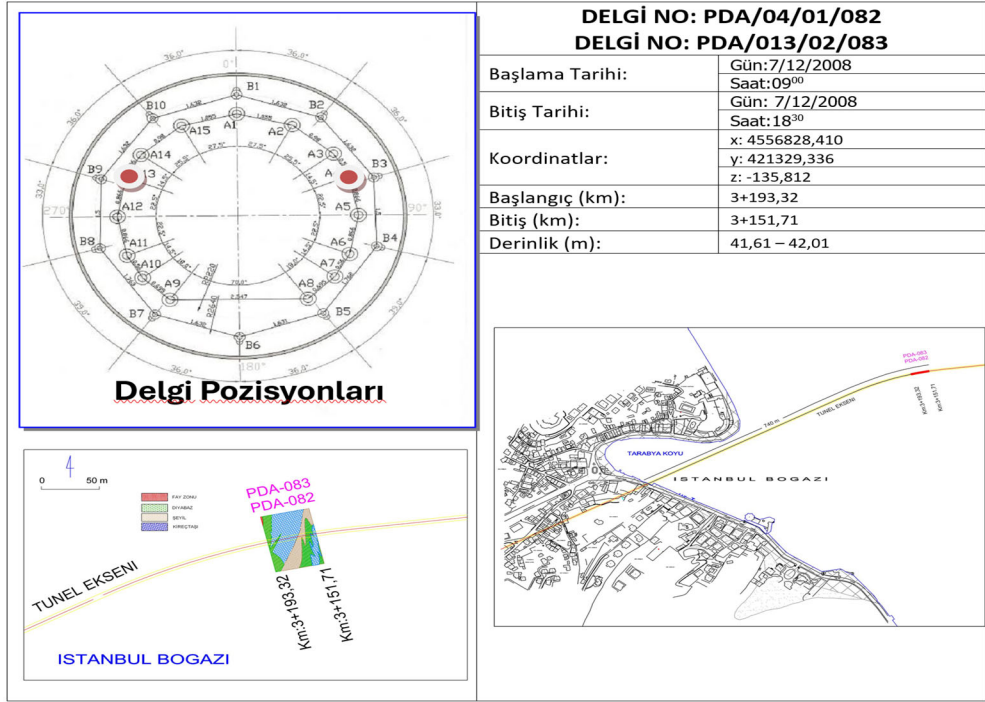
**Şekil 5.8 :** Boğaziçi tüneline km:3+158 de delme işlemi tamamlandıktan sonra tünel aynasında gerçekleştirilen foto ve belgeleme çalışmalarından bir örnek. Foto (a & b) Sert- ayrışmış diyabaz ve önceki yatay delgi noktaları; Foto (c) Litoloji tanımlaması ve süreksizlik (J1-J2-J3) konumu; Foto (d)Kireçtaşı-diyabaz dokanağında kalsit damarı.



**Şekil 5.9 :** Tünelde (Km:3+193,32) de kazı aynasının sol orta kesiminde görülen kireçtaşı, diyabaz daykısı ve ezilme zonu (fay).

Ön araştırma delgilerine başlamadan önce ve delgiler sırasında;

- Delginin açılmasının başlangıç ve bitiş saati,
- Delik numarası,
- Deliğin konumu, koordinatları ve uzunluğu,
- Delgi bitinin tipi ve çapı, (Şekil 5.10)
- Delgi operatörünün sondaj ilerlemesi sırasında yaptığı gözlemler: delgi hızı, bitin torku, baskı, su basıncı ve diğer gözlemsel kayıtlar,
- Suyun veya çamurun delme işlemi sırasındaki miktarı, renk değişmelerinin izlenmesi,
- İlgili Mühendisin delgi sırasında geçilen formasyonun (ların) özellikleri ile ilgili yorumları ve tarifleri,
- Olası boşlukların, maden damarlarının, dolu veya boş çatlakların, yumuşak veya ezilmiş zonların bulunduğu yerler ve özellikleri gibi veriler de kaydedilerek bir bütün olarak jeolojik – hidrojeolojik koşullar değerlendirilmiştir.



Şekil 5.10 : Ön araştırma delgisinin pozisyonlanması ve tüneldeki konumunu.



## **6. DELGİ VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Tünel güzergahı üzerinde gerçekleştirilen araştırmalar kapsamında, toplam uzunluğu 1692,15 metre olan 14 adet düşey sondaj kuyusu açılmıştır. Bu sondajlar aracılığıyla 1128 adet RQD değeri elde edilmiştir. Ortalama RQD değerleri hesaplanarak bir dağılım aralıkları belirlenmiştir. Aynı zamanda, yatay ön araştırma delgi verilerinin değerlendirilmesiyle birlikte, penetrasyon ve tork oranlarındaki değişimlerin kaya dayanımı ve jeolojik özellikleri doğru bir şekilde yansıttığına dair elde edilen veriler bu bölümde detaylı bir şekilde incelenmiştir.

### **6.1 Delgi Verilerinin Değerlendirilmesine Yönelik Önceki Çalışmalar**

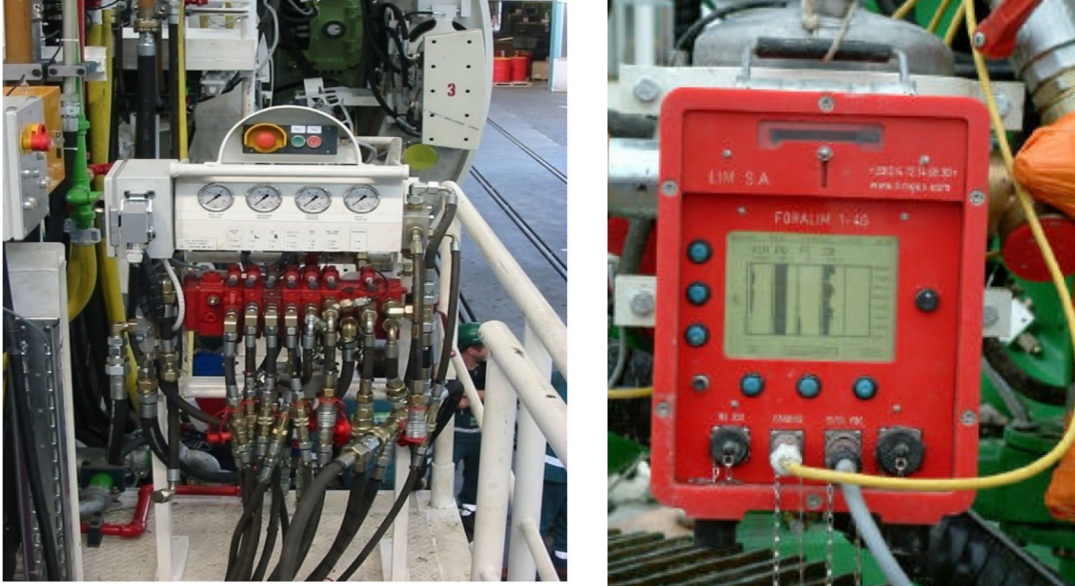
TBM ilerleme hızının proje tasarım aşamasında doğru bir şekilde tahmin edilmesi oldukça kritiktir. Yapılan birçok çalışmada, TBM ilerleme hızı ile ilgili tahminler, masif kayanın Tek Eksenli Basınç Dayanımı, elastisite modülü, sertlik ve aşındırıcılık gibi mekanik özellikleri kullanılarak penetrasyon, itme kuvveti ve tork gibi kazı parametrelerinin tahmin edilmesine odaklanmıştır (Yüksel, 2014). TBM (Tunnel Boring Machine) kazı performansının kestirimi için kazı sırasında yapılan delgilerden elde edilen veriler lde önemli bilgiler sağlamaktadır.

Delgi verilerinden elde edilen sonuçlarında değerlendirildiği bir çok çalışma bulunmaktadır. Bu anlamda, Yatay ön araştırma delgileri verilerinin değerlendirilmesi, kazı ortamının tariflenmesi konusunda önemli bir rol oynamaktadır. Penetrasyon ve tork oranlarındaki değişimlerin, kaya dayanımı ve ortamın jeolojisi hakkında doğru bilgiler sağladığına dair birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan elde edilen verilere dayanarak, jeolojik ve hidrojeolojik koşulların tahmin edilip yorumlanması oldukça eski bir uygulamadır. Bu konudaki en eski uygulamalardan biri Ghosh, 2015’de belirttiği çalışma, 1911’de Schlumberger tarafından petrol sondajları sırasında gerçekleştirilmiş çalışmadır.

Hjelme (2010) yaptığı bir çalışmada, kazı sırasında ölçülen verilerin jeolojik yapı ve süreksizlikleri içeren kaya kütle özellikleri ve davranışını yansıttığını belirtmiştir. Schunnesson (1996 & 1998) ise, yatay ön araştırma delgileri sırasında kaydedilen ham

verilerin delgi makinası ve operatör kaynaklı hatalardan arındırılması gerektiğini vurgulamıştır. Normalize edilmiş tork, tork değerlerindeki değişimler ile normalize edilmiş penetrasyon oranı ve penetrasyon oranındaki değişimlerin kaya türünü doğrudan sınıflandırmak için kullanılabileceğini saptamıştır (Schunnesson,1997, Scoble at. al., 1989).

Brown ve Phillips (1977) yaptıkları çalışmada, delgi makinalarının performans ölçümlerinin sürekli olarak kaydedilebilme işleminin çeşitli yöntemlerle yapılabileceğini ve bunun da tünelticilik araştırmalarında hayli yararlı olabileceğini belirtmişlerdir. Bu anlamda, Boğaziçi tüneline yapılmış olan yatay ön araştırma (yatay ön araştırma delgileri) delgi verilerinin kaydedilmesinde FORALIM 1-4G model (data logger) veri kayıt cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.1).



**Şekil 6.1** : Boğaziçi tüneline kullanılan delgi kayıt cihazı ve kontrol paneli.

Bakır ve Yavuz (2021) yaptığı çalışmada, yatay delgi verilerinden elde edilen ilerleme hızlarındaki değişimleri değerlendirmiştir. Normalize edilmiş anlık ilerleme hızı (Instantaneous Advance Speed – IAS) değerlerinin, tünel güzergahında yapılmış olan 14 adet düşey sondajın tünel kazı seviyesindeki RQD değerleri arasındaki ilişkileri ortaya konulmuştur. Elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle, başta RQD değerleri olmak üzere, tünel kazısında karşılaşılabilecek olan jeolojik birim ve yapıların geometrisi hakkında ayrıntılı bilgiye ulaşılabileceği sonucuna varılmıştır. Ortaya konulan ilişkiler, RQD değerleri arttıkça anlık ilerleme hızının azaldığını göstermiştir. Benzer şekilde yapılan diğer çalışmalarda (Schmidt, 1972; Schunnesson (1996 & 1998);

Bilgin and Kahraman, 2003; Bilgin and Ateş, 2016; Bilgin et al, 2016) kayanın Tek Eksenli Basınç Dayanımı, nokta yük dayanımı, RQD (Rock Quality Designation) vb. gibi dayanım parametreleri ile kaya kütlelerinin in-situ özelliklerinin delgi verileri yardımıyla öngörülmesine yönelik başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

### **6.1.1 Ön araştırma delgi verilerinin değerlendirilmesi**

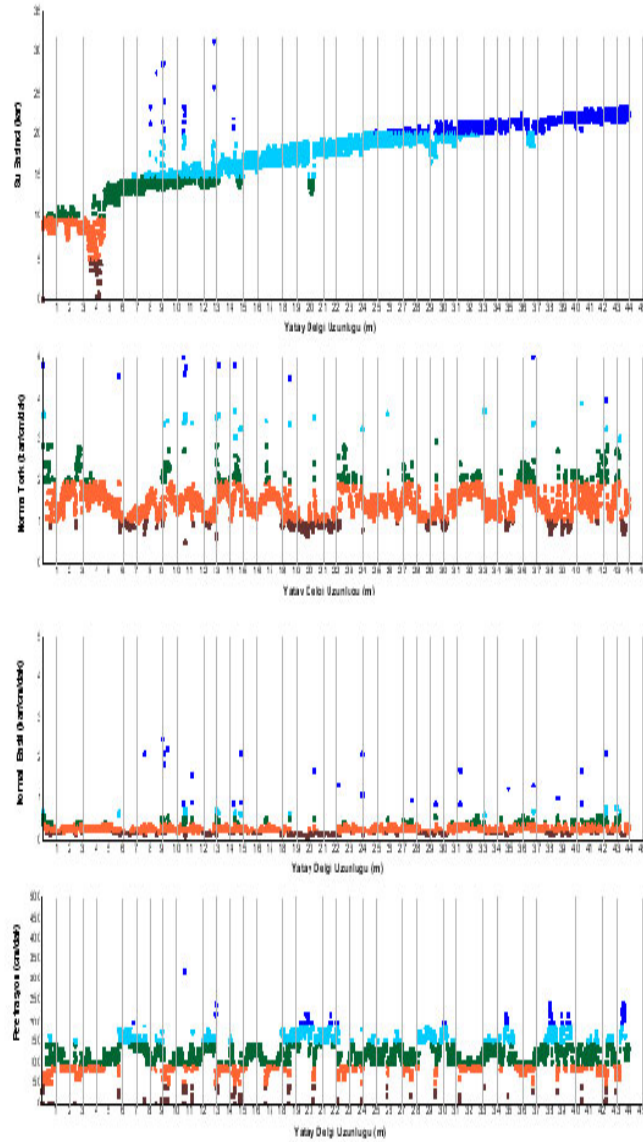
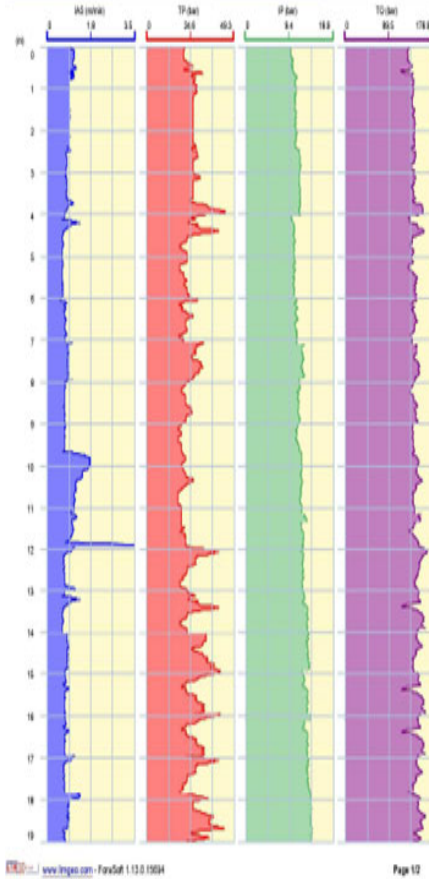
Ön araştırma delgileri sırasında toplanan bilgiler, tünel kazı aynasından sonraki yaklaşık 40m'lik kesimin jeolojik özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Önceden yapılan kazılardan ve ön araştırma delgilerinden elde edilen veriler, mevcut jeolojik bilgilerle birleştirilerek, tünelin ilerisindeki zeminin kalitesi ve su durumu hakkında bilgiler sağlamaktadır.

Elde edilen delgi kayıtlarından, 1 cm ilerleme için gerekli baskı ve tork değerleri hesaplanmıştır. Delgi sırasında elde edilen baskı ve tork değerleri, penetrasyona (delme hızı) bölünerek birim ilerlemeler için normalize edilmiş baskı ve tork değerleri elde edilmiştir (Şekil 6.2). Bu veriler kullanılarak derinliğe bağlı penetrasyon, baskı, tork ve su basıncı değişim grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafikler, geçilen ortamı homojenlik zonları, faylar ve ezik kısımlar ile karakterize etmekte olup, su gelirine yönelik değerlendirmeler ve yorumlar yapmamıza yardımcı olmaktadır.

Bu veriler, farklı kaya zonları ile faylar ve ezilmiş kısımları tanımlamak için kullanılmıştır. Alınan kaya örneklerinden hazırlanan ince kesitler ve gerçekleştirilen petrografik çalışmalar ile elde edilen sonuçlar, bir önceki araştırma delgisine ait bilgilerle birleştirilerek su geliri ve jeolojik durum üzerine odaklanacak şekilde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kullanılarak, tünel seviyesi jeo-mühendislik modelleri oluşturulmuştur. Bu veriler, kazı aynası önündeki ortalama 36 metrelik kesimde güvenli bir kazı ortamının değerlendirilmesine önemli bir katkı sağlamıştır. Elde edilen bilgiler, kazı sırasında alınacak önlemlerin belirlenmesi ve gerekli iyileştirmelerin yapılması konusunda yol gösterici olmuştur. Bu sayede, kazı sürecinin güvenli bir şekilde devam edip veya etmemesi konusunda kararlar alınabilmektedir.

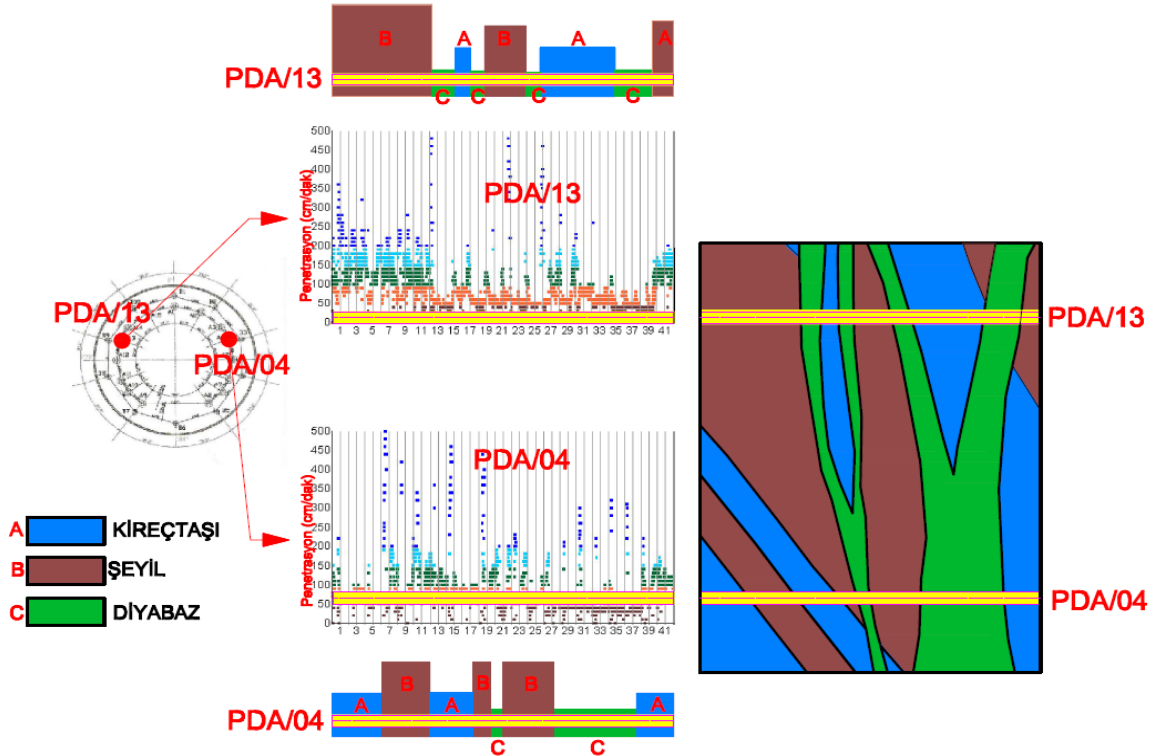
Site  
MELEN 7  
İSTANBULClient  
MCMETROSTROYDate: 20110908 11:58:30  
2 pages

Parameter	Value	Unit	Start Date	End Date
Borehole	PD A13 077		16/11/2008 16:45:00	
File	1154A80256		16/11/2008 20:45:00	
Top	0.00 m		Angle X	0.55°
Bottom	41.47 m		Angle Y	0.00°
Total Volume	0.00 l		Volume Z	0.00 l
Scale	1:100		Drill Rig	PD156002



Şekil 6.2 : Veri kaydedici cihazın oluşturduğu grafik ile normalize edilen verilerin grafikleri.

Delgi sonucu elde edilen tüm veriler ve grafiklerin değerlendirilmesi ile jeolojik modeller oluşturulmuştur. Bu modellerden hareketle zonların istatistik analizleri yapılarak perimetrik haritalar üretilmiştir. Ortalama her 36 metre için oluşturulan bu harita parçaları, tünel eksenine ait oldukları konuma yerleştirilmiştir (Şekil 6.3, Şekil 6.4). Bu şekilde, tünel eksenini boyunca, ortalama 36 m'lik anoların birleştirilmesiyle tünel açılım haritası (Perimetri haritası) elde edilmiştir. Bütün bu veriler ve önceki sondaj bilgileri ile kazı sırasındaki ayna jeolojisi çalışmaları kullanılarak SP-7 Boğaziçi Tüneli'nin kazı sonrası jeolojik boy kesiti oluşturulmuştur (Şekil 6.10, Şekil 6.11, EK - B, EK - C).



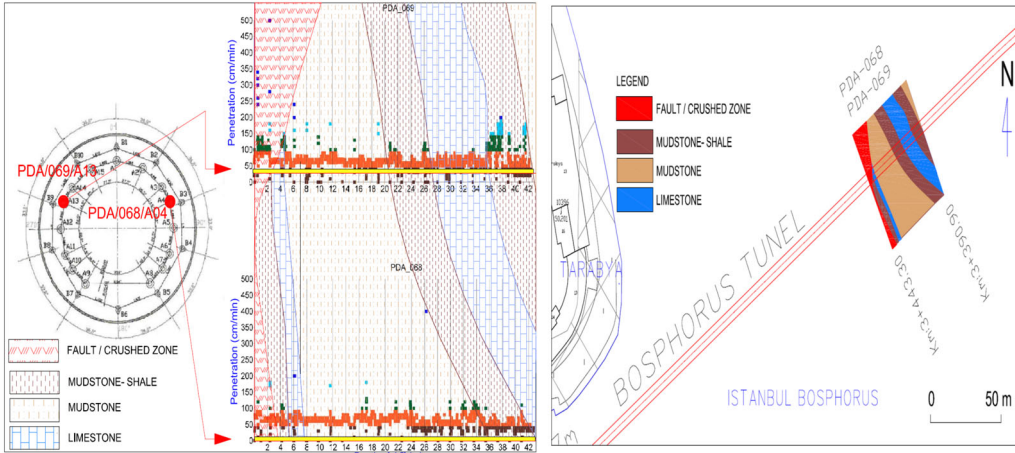
Şekil 6.3 : Ön araştırma delgi verilerinden farklı zonların ayırtlanması ve jeolojik modelin belirlenmesi.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda sondaj mesafesi kadar olan kazı ortamındaki kaya kütlelerinin özellikleri ve kazı ortamının davranışları belirlenmiştir. Delgi parametrelerinin değişimleri, delinen kaya kütlelerinin özellikleri ve kazı ortamının davranışları arasındaki ilişkiler analiz edilmiş, bu temelde kazılan jeolojik ortamlar, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de gösterilen çizimlerde olduğu gibi tüm tünel boyunca sınıflandırılmıştır.

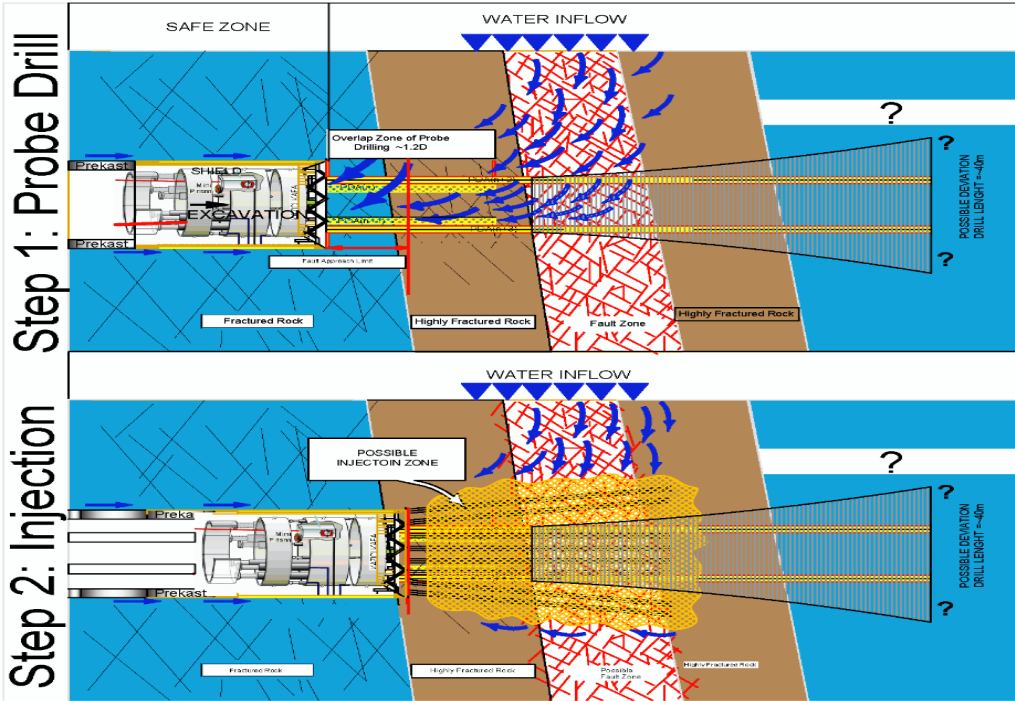
Böylece, sondaj mesafesi kadar olan kazı ortamındaki;

- Zemin koşullarının belirlenmesi, su geliri ve kazılabilirlikle ilgili bilgi edinilmesi,
- Duraysız, ezilmiş, yumuşak zemin ve fay zonlarının belirlenmesi,
- Akıcı ve /veya şişen zeminler nedeniyle, tünel aynasında karşılaşılabilecek muhtemel göçmelerin yerlerinin ve boyutlarının saptanması vb. gibi,

kazı aynası önünde karşılaşılabilecek olası karstik ve benzeri boşlukların belirlenmesi amaçlanmıştır (Şekil 6.5). Böylece sızdırmazlık veya konsolidasyon enjeksiyonuna tabi tutulacak zonun kalınlığı, geometrisi, su geliri, suyun kökeni (Mühendislik Jeolojisi Modeli) belirlenebilmiştir (Bakır vd.,2011).



Şekil 6.4 : Perimetrik haritanın oluşturulması ve bu haritanın tünel güzergahında ait olduğu yere yerleştirilmesi.

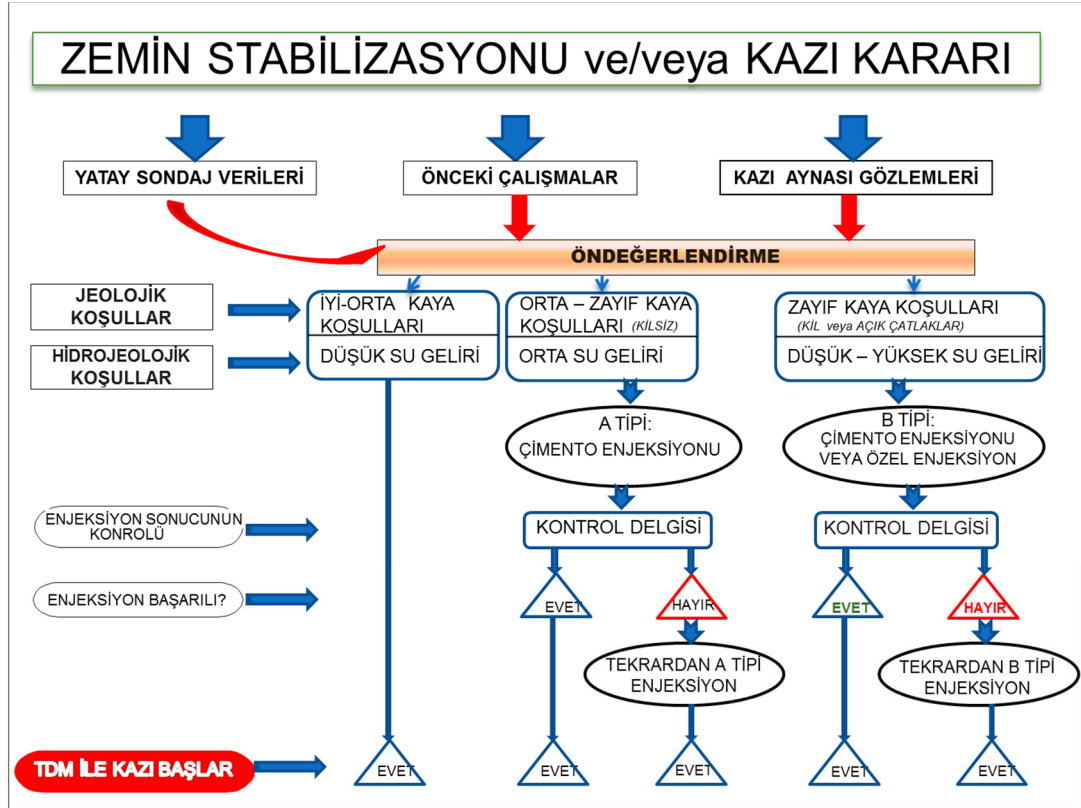


Şekil 6.5 : İstanbul Boğaziçi Tünelinde kazı aynası önündeki faya yaklaşım modeli ve fay zonu araştırması.

İleri delgilerden elde edilen bilgilerden hareketle yapılacak olan zemin stabilizasyonu (sızdırmazlık veya konsolidasyon enjeksiyonu) ile amaç:

- Kesici kafa önünde olası, orta ve yüksek, su gelirini durdurmak,
- Kazı alanının stabilitesini sağlamak,
- Karstik boşlukları doldurmak,
- Duraysız, ezilmiş, yumuşak zemin ve fay zonlarını güçlendirmek ve dayanımını arttırmak olarak belirlenmiştir.

Boğaziçi Tünelinde enjeksiyon ve/veya kazı kararlarını oluşturmaya yönelik akış şemasına göre kazı veya enjeksiyon kararı verilerek prosedür tamamlanmıştır (Şekil 6.6).



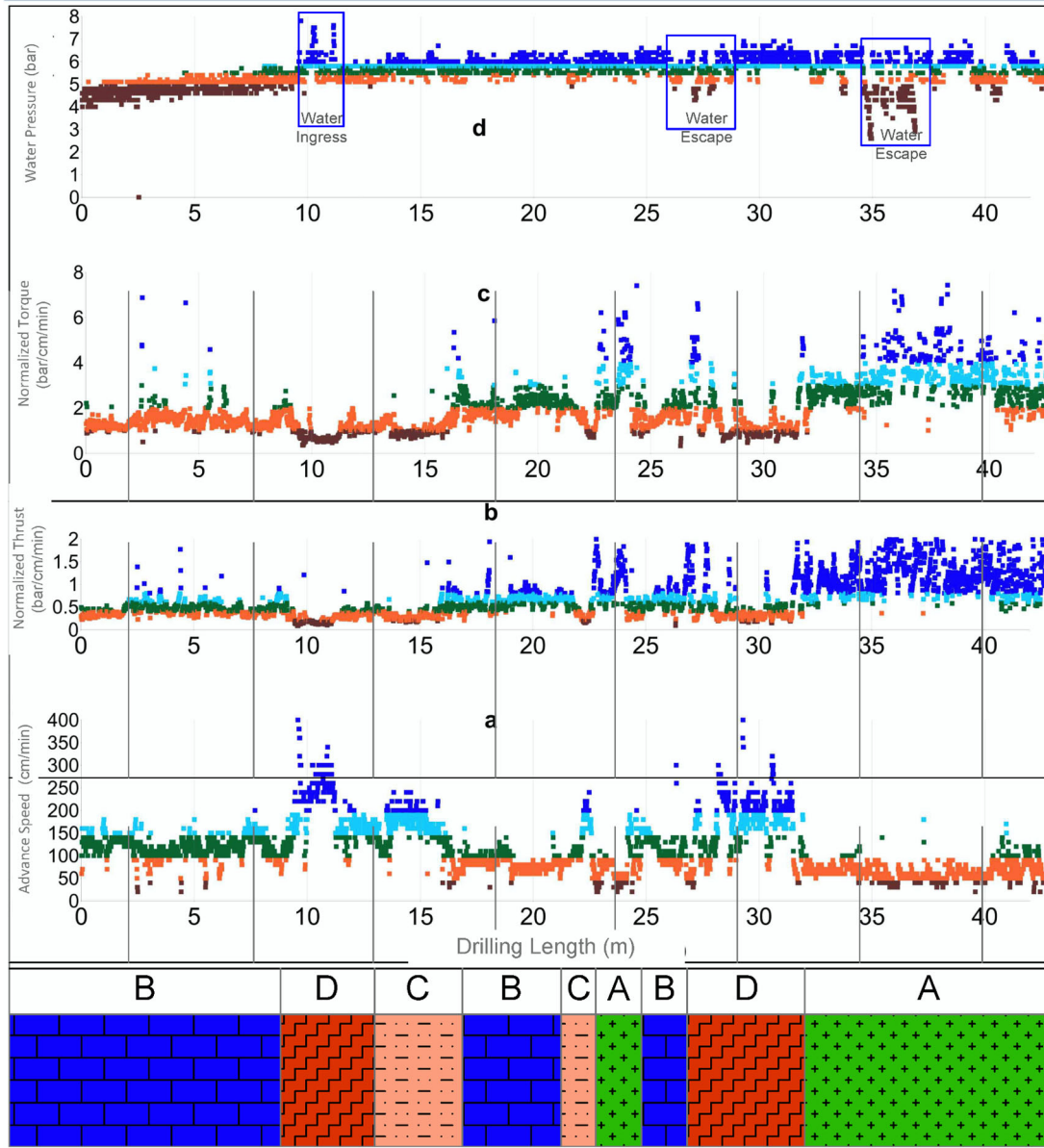
Şekil 6.6 : İstanbul Boğaziçi Tünelinde kazı aynası önündeki faya yaklaşım modeli ve fay zonu araştırması (Najder 2009 dan değiştirilerek)

### 6.1.2 Ön araştırma delgi verilerine göre kaya koşullarının belirlenmesi

Delme işlemi sırasında ölçüm “Measurement While Drilling (MWD) system” olarak da adlandırılan “Sondaj İzleme Sistemi” ile 1 cm aralıklarla, delme hızı (Instantaneous Advance Speed – IAS), uygulanan baskı (Tool Pressure - TP), tork basıncı (Torque Pressure - TQ) ve Su Basıncı (Injection Pressure of the Drilling Liquid- water -IP) değişimleri dijital olarak, bir veri kayıt cihazı ile kayıt edilmiştir.

Tünel kazısı boyunca, yapılan yatay delgilerden alınan ve iki milyondan fazla noktadan oluşan veri setindeki veriler, delgi derinliğine bağlı değerlendirilerek, birim ilerleme için (1cm) gerçekleşen baskı ve tork değerleri hesaplanmıştır. Bu şekilde elde edilen veriler, gerekli dönüşümler yapıldıktan sonra, grafik haline getirilmiştir. Farklı zonların belirlenmesinde ilerleme hızı, normal baskı ve normal tork değişimi aralıkları esas alınmıştır. Kazı öncesi her delgiden alınan ham datalar Şekil 6.7 de görüleceği

gibi normalize edildikten sonra zonlara bölünerek ayna önünde karşılaşılabilecek kaya durumuna bir yaklaşım sergilenmiştir.



**Şekil 6.7 :** İlerleme hızı, normal baskı ve normal tork değişimi aralıkları esas alınarak belirlenen litolojik zonlar (Bakır vd. 2011).

Şekil 6.7’de görüleceği gibi, delginin yaklaşık 9 -10 metreleri arasında, su basıncının yükseldiği anlamına gelmektedir. Bu kesimde yeraltı suyunun ortama doğru girişi olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Ayrıca delginin 27-30’uncu metreleri ile 35 – 37’inci metrelerinde ise delgi suyunun ortam boyunca kaçtığı görülmektedir. Bu da, o bölgelerde çatlaklı, zayıf bir ortamın olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Kısaca bakıldığında su girişinin 9-10m arası yeraltı suyu katılımı olduğunu dolayı su basıncı yükselmiştir. Devamında 27-30 m ile 35-37 m’leri arasında ise su kaçağından dolayı, su basıncının azaldığı görülmektedir. Tüm bu değerlendirmelere bakıldığında ilerleme

hızı, baskı ve tork ile birlikte delgi işleminde kullanılan su basıncının .çok önemli bir veri olduğu görülmesi açısından iyi bir örnektir.

Şekil 6.7 'daki delgi grafiği üzerinde, tüm tünel boyunca yapılan delgilerin değerlendirmelerinde kullanılan yöntemle, kazı aynasının ilerisinde ki jeolojik-hidrojeolojik kriterler belirlenmiştir. Bu kriterlere göre çizilen tünel perimetrik haritası Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 'de görülmektedir.

Grafiklerdeki farklı ilerleme hızlarının gerçekleştiği zonlar:

- Sert kaya Zonu (Çatlaklı Diyabaz; Kumtaşı) (A)
- Orta-sert kaya Zonu (Kireçtaşı, Kili kireçtaşı) (B)
- Orta-zayıf kaya Zonu (Çamurtaşı, Şeyl) (C)
- Zayıf, çok zayıf kaya (fay ezilmiş zon, aşırı çatlaklı veya ayrılmış kaya) Zonu (D) olarak tanımlanmıştır (Bakır vd., 2012).

#### 6.1.2.1 Sert kaya zonu (Diyabaz; Sağlam Kumtaşı) (A)

Sert kaya (A) olarak tanımlanan birimlerin (Çizelge 6.1) İstatistik sonuçlarına bakıldığında; ortalama delme hızının 60cm/dak olduğunu, buna karşılık gelen normalize edilmiş baskı ortalamasının 1,1 bar/cm/min ve normal torkun ise 3.1 bar/cm/min olduğu gözükmektedir. Tünel kazısında yapılan belgeleme çalışmalarına (pasa kontrolü, kazı aynası gözlemleri) göre Şekil 6.7'de A olarak gösterilen birim çatlaklı diyabaz ve/veya sağlam kumtaşı olarak değerlendirilmiştir.

**Çizelge 6.1 :** Tüm tünel kazısı boyunca sert kaya olarak (A) tanımlanan ortama ait delme hızı, baskı, tork istatistik sonuçları.

Açıklama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Delme Hızı (cm/dak)	10	80	60	17,7
Normalize Baskı (bar/cm/min)	0,15	14	1,1	0. 63
Normalize Tork (bar/cm/min)	0,1	25,5	3,1	2,55

#### 6.1.2.2 Orta - sert kaya zonu (Kireçtaşı, Kili kireçtaşı) (B)

Orta-sert kaya (B) olarak tanımlanan birimlerin (Çizelge 6.2) istatistik sonuçlarına bakıldığında; ortalama delme hızının 118 cm/min olduğunu, buna karşılık gelen normalize edilmiş baskı ortalamasının 0,66 bar/cm/min ve normal torkun ise 1.5 bar/cm/min. olduğu gözükmektedir. Tünel kazısında yapılan belgeleme çalışmalarına (pasa kontrolü, kazı aynası gözlemleri) göre, Şekil 6.7'de B olarak gösterilen birim

kireçtaşı, killi kireçtaşı olarak değerlendirilmiştir.

**Çizelge 6.2 :** Tüm tünel kazısı boyunca orta-sert kaya (B) olarak tanımlanan ortamın delme hızı, baskı, tork istatistik sonuçları.

Açıklama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Delme Hızı (cm/dak)	90	170	118	28
Normalize Baskı (bar/cm/min)	0,11	8,4	0,66	0,26
Normalize Tork (bar/cm/min)	0,6	2,4	1,5	1,85

### 6.1.2.3 Yumuşak kaya zonu ( Çamurtaşı, Şeyl) (C)

Orta-zayıf kaya (C) olarak tanımlanan birimlerin (Çizelge 6.3) istatistik sonuçlarına bakıldığında; ortalama delme hızının 146 cm/min olduğunu, buna karşılık gelen normalize edilmiş baskı ortalamasının 0,55 bar/cm/min ve normal torkun ise 1.3 bar/cm/min. olduğu gözükmemektedir. Tünel kazısında yapılan belgeleme çalışmalarına (pasa kontrolü, kazı aynası gözlemleri) göre, Şekil 6.7’de C olarak gösterilen birim çamurtaşı-şeyil olarak değerlendirilmiştir.

**Çizelge 6.3 :** Tüm tünel kazısı boyunca orta-zayıf kaya (C)olarak tanımlanan ortamın delme hızı, baskı, tork istatistik sonuçları.

Açıklama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Delme Hızı (cm/dak)	100	250	146	47
Normalize Baskı (bar/cm/min)	0,2	1,4	0,55	0,14
Normalize Tork (bar/cm/min)	0,8	1,8	1,3	1,85

### 6.1.2.4 Çok yumuşak kaya zonu ( Fay, Ezik Zon, Ayrışmış Kaya) (D)

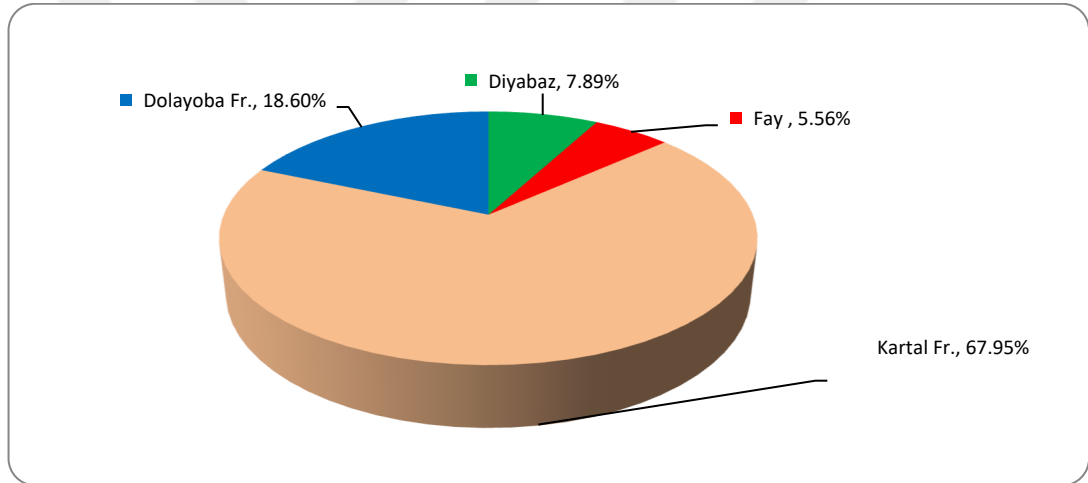
Çok yumuşak kaya (D) olarak tanımlanan birimlerin (Çizelge 6.4) istatistik sonuçlarına bakıldığında; ortalama delme hızının 327 cm/min olduğunu, buna karşılık gelen normalize edilmiş ortalamasının 0,8 bar/cm/min ve normal torkun ise 1.2 bar/cm/min. olduğu gözükmemektedir. Tünel kazısında yapılan belgeleme çalışmalarına (pasa kontrolü, kazı aynası gözlemleri) göre, Şekil 6.7’de D olarak gösterilen birim fay - ezilmiş zon, aşırı çatlaklı, ayrışmış kaya olarak değerlendirilmiştir.

**Çizelge 6.4 :** Tüm tünel kazısı boyunca zayıf-çok zayıf kaya (D) olarak tanımlanan ortamın delme hızı, baskı, tork istatistik sonuçları.

Açıklama	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Delme Hızı (cm/dak)	250	920	327	62
Normalize Baskı (bar/cm/min)	0,12	1,4	0,8	0,42
Normalize Tork (bar/cm/min)	0,1	2,2	1,2	1,85

Toplam 3145m lik tünel kazısı boyunca anakaya olarak Paleozoyik yaşı Dolayoba ve Kartal formasyonları geçilmiştir. Bunlar; mavimsi gri, siyahımsı gri renkli farklı tabaka kalınlıklı ve farklı fasiyeslerdeki kireçtaşlarından oluşan Dolayoba formasyonu ile bunun üzerinde uyumlu olarak gelen mikalı şeyillerden oluşmuş Kartal formasyonlarıdır. Bu kaya birimleri, bir kaç santimetreden onlarca metreyi aşan kalınlıkta ve farklı özellikte, çok sayıda volkanik kökenli diyabaz dayk ve silleri ile kesilmiş durumdadır.

Kazı sonrası yapılan değerlendirmelerde, Tünel kazısının %68'inde Kartal formasyonu, %19'unda Dolayoba formasyonu, yaklaşık %8'inde Diyabaz-Andezit daykları ile yaklaşık %5 oranında ise fay – ezik zonlar kesilmiştir. Boyutları bir-iki metre ile en kalını 75m civarı olan, ortalama 70 metrede bir bu dayklarla karşılaşılmıştır (şekil 6.8).

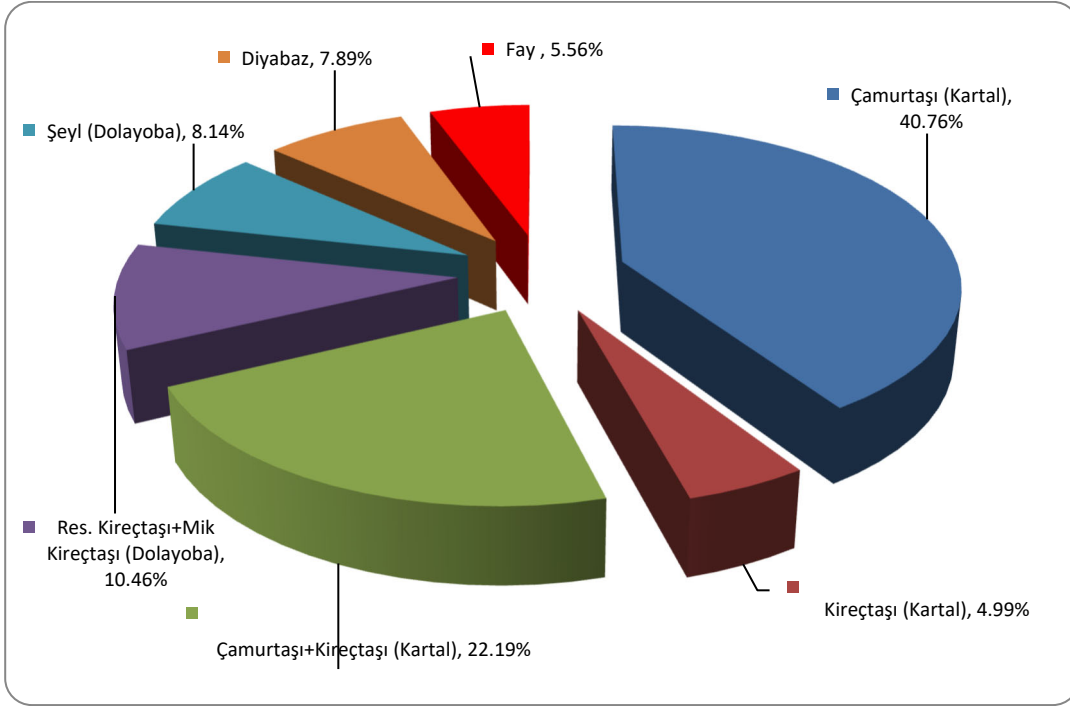


**şekil 6.8 :** Tünel kazısında geçilen formasyonların % dağılımı.

Tünelde geçilen litolojiler ve bunların tünel eksenini boyunca uzunlukları hesaplanarak çizelgeler oluşturulmuş ve pay diyagramları çizilmiştir. Buna göre; toplam 3145m'lik tünel boyunca 2138 m (%68) Kartal formasyonu, 598 m (%19) Dolayoba formasyonu, 250 m (%8) Diyabaz ve yaklaşık 160 m (%6) fay zonu geçilmiştir. Diyabazdan alınan kaya örneğinin ince kesitinde kısmen altere olduğu görülmüştür. Aşırı alterasyon nedeniyle killeşme başlamıştır. Killer sarımsı kahverengi renklerde izlenmektedir. Tünel boyunca formasyon ayırımı yapılmaksızın geçilen litolojilerin dağılımı da şekil 6.9'da görülmektedir.

Özellikle TBM in kesici kafası ile kazı duvarı arasındaki 1,2 metrelik kesimde ortalama her 30 metrede tekrarlanan ayrıntılı belgeleme çalışmalarının (foto, video,

ölçümler) büyük yarararı olmuştur. Bu yolla elde edilen tünel açılımı (perimetrik harita) yardımı ile tünel mühendislik jeolojisi boy kesit modeli üretilmiştir (Şekil 6.10; Şekil 6.11).



Şekil 6.9 : Tünel kazısında geçilen birimlerin % dağılımı.





## 6.2 Kazı Ortamının Jeomekanik Karakteristikleri

Kaya kalite göstergesi (RQD), delgisi yapılan ortamın çatlaklılığı konusunda bilgi sağlayan önemli bir parametredir. Bu anlamda, proje güzergahında yapılan araştırma sondajlarından alınan karotlar, her manevra için, ayrı ayrı incelenerek RQD büyüklükleri belirlenmiştir. RQD (Rock Quality Designation), değerleri sırasıyla tüm sondaj kuyusu boyunca (Çizelge 6.5), tünel kemer bölgesi olarak tanımlanan tünel çapının iki katı olan zonda (Çizelge 6.8) ve tünel aynasında ki (Çizelge 6.7) RQD değerleri ise ayrı ayrı istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Buna göre, tünel güzergahında yapılmış olan ve değerlendirmeye alınan 14 düşey sondaj kuyusu boyunca 1128 adet RQD değeri ölçülmüştür.

**Çizelge 6.5 :** Düşey sondajlardan elde edilen tüm RQD değerlerinin istatistiksel değerlendirmesi.

Sondaj Adı	Veri sayısı	Düşey sondajların RQD dağılımları			
		Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart sapma
BPMB-102	51	0	98	38	29.34
BPMB-101	41	0	85	28	25.32
BPMB-103	47	0	93	32	25.31
BPMB-14	37	0	80	26	24.37
BPMB-4	130	0	95	24	29.38
BPMB-3	176	0	90	17	21.3
BPMB-12	77	23	90	69	13.56
BOTSK-12	116	0	100	41	36.35
BOTSK-8	140	0	100	19	27.16
BOTSK-7	121	0	100	49	34.57
BPMB-5	136	0	68	13	17.59
BPMB-15	12	6	85	45	20.28
BPMB-13	22	7	93	60	25.02
BPMB-11	22	0	74	22	23.19

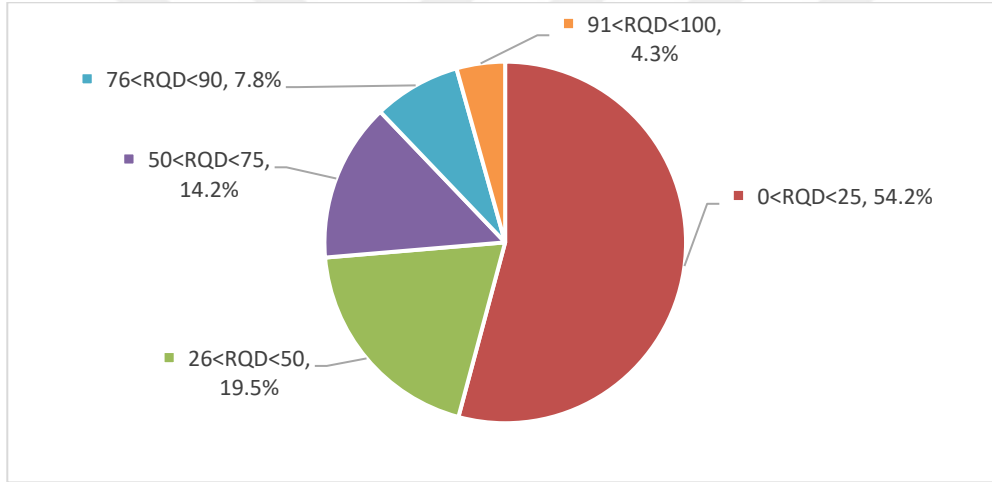
Tünel seviyesindeki RQD değerleri belirlenirken, daha sağlıklı bir değerlendirme yapabilmek için sondajların tüneli kestiği uzunluğa (tünel çapı: 6,15 m) ek olarak tünel üst kotunun yaklaşık 1 metre yukarısı ve tünel alt kotunun 1 metre aşağısı da dahil edilerek yaklaşık 7-8 metrelik sondaj uzunluğunun RQD değerlerinin ortalaması alınmıştır. Buna göre, tünel seviyesini kesen 11 adet düşey sondaj logu incelenmiş ve 67 adet RQD değeri belirlenmiştir. RQD değerlerinin % 0-98 arasında değiştiği, ortalama değerinin ise % 29 olduğu bulunmuştur. Tünel seviyesindeki RQD değerlerinin standart sapması ise 27,48 dir (Çizelge 6.6).

Deer (1963)'e göre RQD dağılımları incelendiğinde, güzergah genelini oluşturan kaya

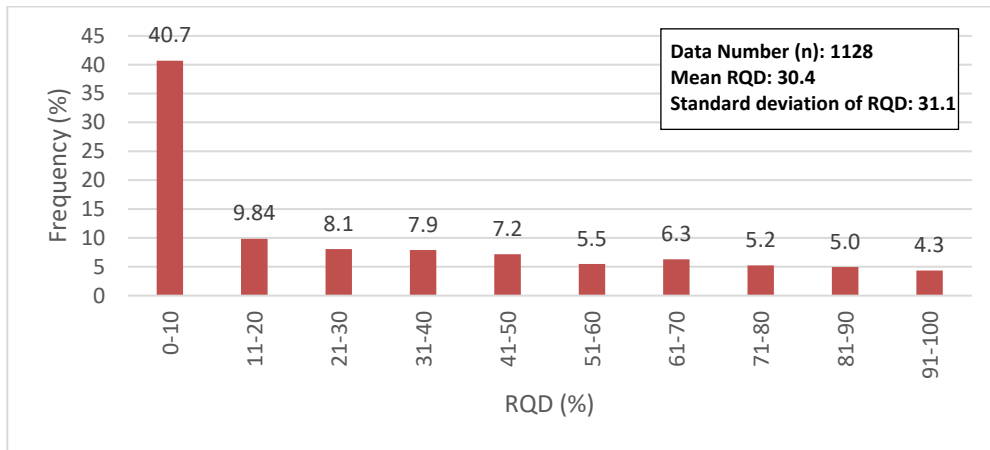
birimlerinin %54,2'sinin çok zayıf (very poor), %19,5'inin zayıf olduğu ve geri kalan %26,3'ünün ise “orta-iyi-çok iyi” kaya kalitesinde olduğu görülmüştür (Şekil 6.12).

**Çizelge 6.6 :** Tünel kazı aynasına (D) denk gelen RQD değerlerinin istatistiksel değerlendirmesi.

RQD	BPMB-102	BPMB-101	BPMB-103	BPMB-14	BPMB-4	BPMB-3	BPMB-12	BOTSK-12	BOTSK-8	BOTSK-7	BPMB-5
Veri sayısı (n)	5	8	5	5	7	5	5	6	6	5	10
Minimum değer	38	7	0	0	0	13	74	0	0	0	0
Maksimum değer	98	75	15	63	46	65	90	30	25	10	65
Ortalama değer	70	40	6	26	17	48	79	11	11	4	7
Standart sapma	26.33	27.48	7.70	32.81	16.42	20.31	6.56	12.81	10.68	5.48	20.55
Varyasyon katsayısı (%)	38	68	138	125	95	43	8	118	99	137	316



**Şekil 6.12 :** Tünel güzergahında yapılan tüm sondajların RQD dağılımları.



**Şekil 6.13 :** Düşey sondaj kuyusu boyunca ölçülen RQD değerlerinin dağılımı.

RQD verilerinin istatistiksel dağılımları yakından incelendiğinde, değerlerin 0 % - 100 % arasında değiştiği, genel ortalamanın ise 30.4% olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.13).

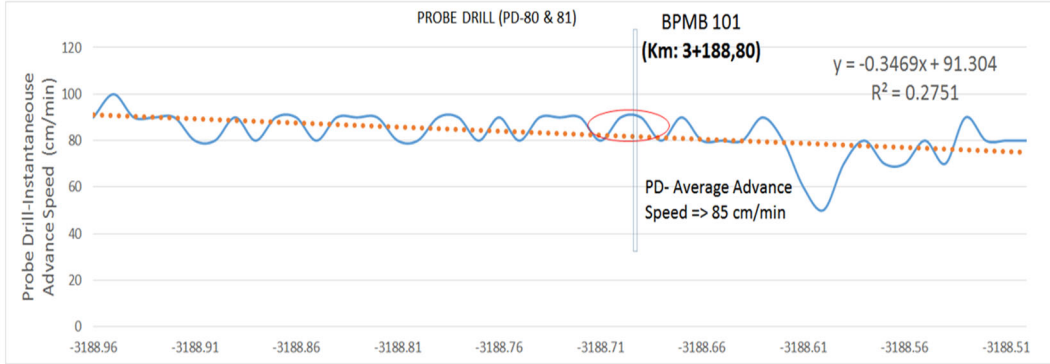
Tünel seviyesinin alt kotuna kadar inen sondajlardan elde edilen RQD değerlerine bakıldığında ise, tünel çapının iki katı olan kemerlenme bölgesinde ki (2D Tünel çapı) sondaj kesimleri boyunca ölçülen 113 adet RQD değerinin 0 % - 90 % arasında değiştiği, ortalamansa 35% olduğu görülmektedir (Çizelge 6.7). tünel seviyesi ve kemerlenme bölgesi için elde edilen standart sapma değerleri de 5.48 ile 27.48 arasında değişmektedir.

**Çizelge 6.7 :** Tünel çapının iki katına (2D) denk gelen kemer bölgesinde ki RQD değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi.

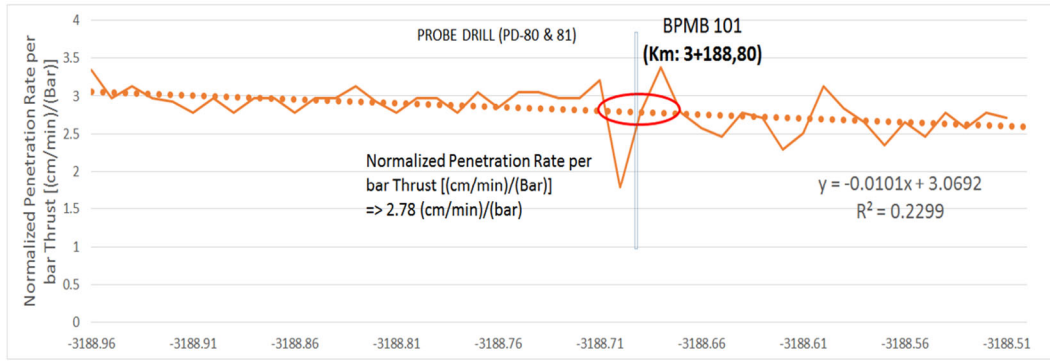
RQD	BPMB-102	BPMB-101	BPMB-103	BPMB-14	BPMB-4	BPMB-3	BPMB-12	BOTSK-12	BOTSK-8	BOTSK-7	BPMB-5
Veri sayısı (n)	11	12	9	9	9	9	8	8	11	12	15
Minimum değer	0	0	27	0	0	32	63	0	0	0	0
Maksimum değer	70	70	75	64	81	90	87	50	50	60	64
Ortalama değer	32	24	53	18	44	59	73	10	13	8	16
Standart sapma	23.61	24.06	17.54	23.06	35.30	20.90	8.31	16.90	16.41	18.13	22
Varyasyon katsayısı (%)	75	100	33	127	80	35	11	169	128	218	138

Yatay ön araştırma delgi verilerinden elde edilen Anlık ilerleme hızı (Instantaneous Advance Speed – IAS) değerlerinin sırasıyla tork ve baskı değerlerine bölünmesi ile normalize edilerek kullanılmıştır. Bunun için, değerlendirmeye alınan ve yatay ön araştırma delgilerinde ölçülen anlık ilerleme hızları, tork ve baskı değerlerinin ortalama değerleri alınarak işlenebilir hale getirilmiştir. Tünel hattı boyunca yapılan düşey araştırma sondajından elde edilen RQD ile düşey sondajların yapıldığı kesimlere isabet eden yatay ön araştırma delgi parametreleri birlikte değerlendirmeye alınmıştır. Yatay ön araştırma delgi verileri ile düşey sondajlardan elde edilen RQD verilerinin karşılaştırmaları Şekil 6.14, Şekil 6.15, Şekil 6.16 daki örnek baz alınarak, tüm kesimler için tek tek yapılmıştır. Bu örnek uygulama, BPMB 101 nolu sondajın, tünel seviyesinde kesiştiği yatay ön araştırma (yatay ön araştırma delgileri) delgileri PDA - 80 ve PDA-81 baz alınarak yapılmıştır. Her iki yatay ön araştırma delgisi verilerinin ortalamaları alınarak belirlenen delgi anlık ilerleme hızlarının ortalaması ise 85 cm/min olarak ölçülmüştür (Şekil 6.14). Buna göre, anlık delgi ilerleme hızlarının itme ve tork basıncı değerlerine göre normalize edilmesiyle elde edilen ortalama

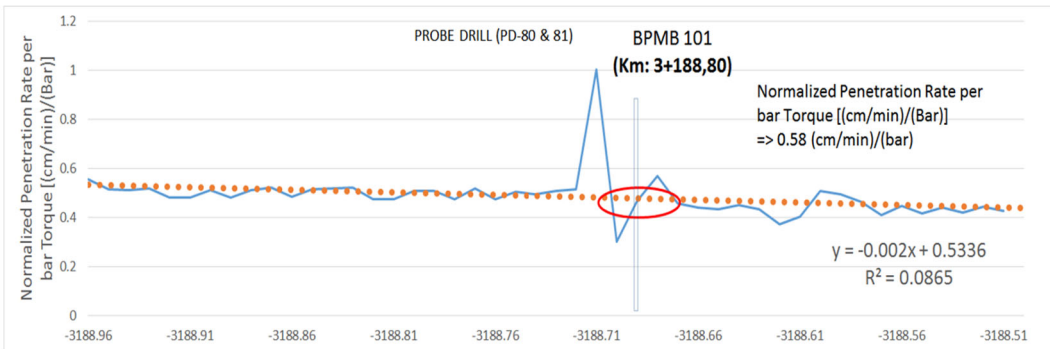
değerler ise sırasıyla “Normalized Penetration Rate per bar Itme 2.78 [(cm/min)/(Bar)]” ve “Normalized Penetration Rate per bar Torque 0.58 [(cm/min)/(Bar)]” olarak ölçülmüştür (Şekil 6.15, Şekil 6.16).



Şekil 6.14 : BPMB 101 nolu sondajın 80 ve 81 nolu ön araştırma delgisi ile kesiştiği noktadaki ortalama anlık yatay delgi hızı.



Şekil 6.15 : BPMB 101 nolu sondajın 80 ve 81 nolu ön araştırma delgisi ile kesiştiği noktada ki itme basıncına göre normalize edilmiş delgi penetrasyon oranı.



Şekil 6.16 : BPMB 101 nolu sondajın 80 ve 81 nolu ön araştırma delgisi ilekesiştği noktada ki tork basıncına göre normalize edilmiş delgi penetrasyon oranı.

Yapılan değerlendirmelerde, her kesim için belirlenmiş olan delgi anlık ilerleme hızları, itme ve tork basıncı değerlerine göre normalize edilmiş penetrasyon oranları ile RQD değerleri karşılaştırılmıştır. Değerlendirmeye alınan kesimlerde ki, yatay ön

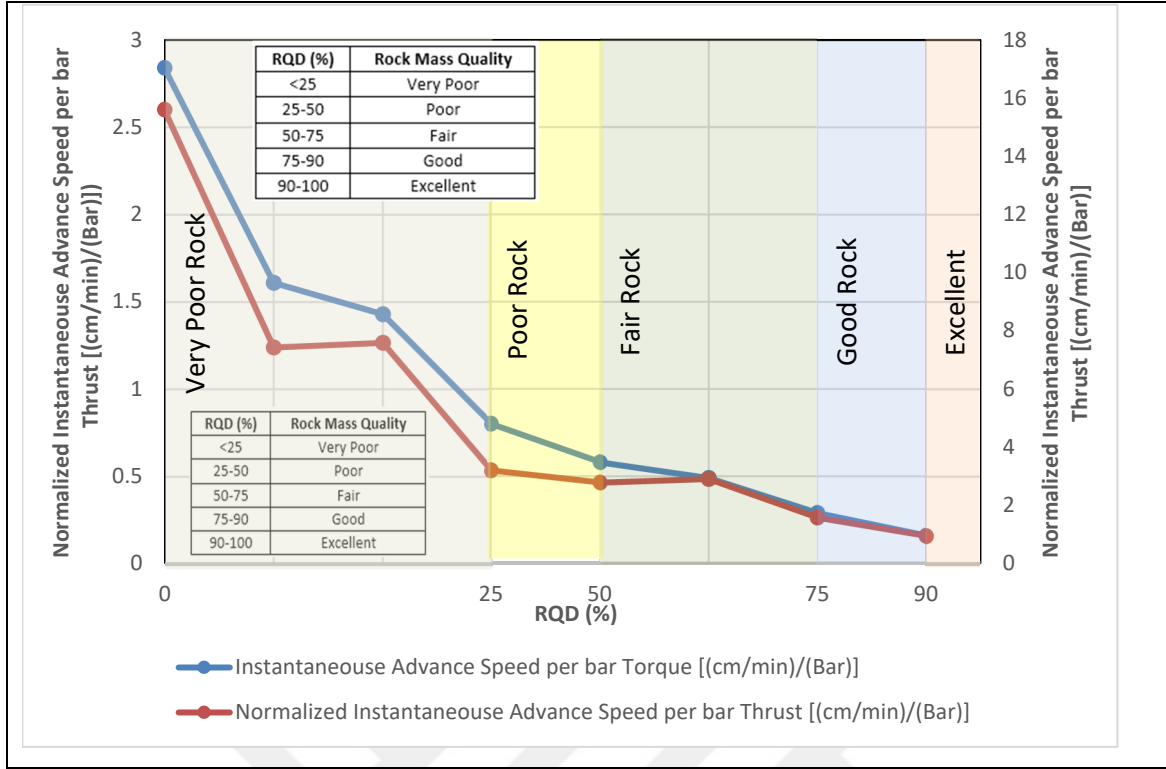
araştırma delgi verilerinin ortalamaları alınarak belirlenen “delgi anlık ilerleme hız” ortalamaları ile anlık delgi ilerleme hızlarının itme ve tork basıncı değerlerine göre normalize edilmesiyle elde edilen ortalama değerler Çizelge 6.8’da toplu olarak verilmiştir.

**Çizelge 6.8 : Tünel kazı aynasına (D) denk gelen RQD değerleri ile yatay delgi verilerinin istatistiksel değerlendirmesi.**

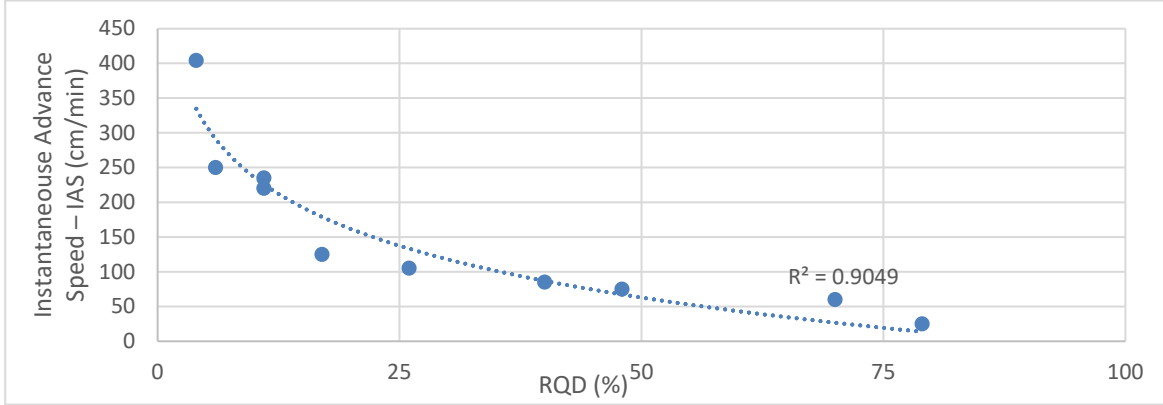
Değerlendirilen ön araştırma delgi adı	Değerlendirilen düşey sondaj adı	Tünel seviyesindeki ortalama RQD (%)	Delgi anlık ilerleme hızı (cm/min)	Baskıya göre normalize edilmiş penetrasyon [(cm/min)/(Bar)]	Torka göre normalize edilmiş penetrasyon [(cm/min)/(Bar)]	RQD
PDA 139	BOTSK-7	4	404	15.60	2.84	
PDA 90-91	BPMB-103	6	250	7.44	1.61	Çok zayıf
PDA 54	BOTSK-8	11	220	7.60	1.43	kaya
PDA 15	BPMB-4	17	125	3.20	0.8	
PDA 80-81	BPMB-101	40	85	2.78	0.58	Zayıf
PDA 45	BPMB-3	48	75	2.91	0.49	kaya
PDA 74-75	BPMB-102	70	60	1.58	0.29	Orta kaya
PDA 113-114	BPMB-12	79	25	0.95	0.16	İyi kaya

Çizelge 6.8’da da görüleceği gibi, anlık ilerleme hızlarının 25 cm/min ile 404 cm/min değiştiği, anlık delgi ilerleme hızlarının itme ve tork basıncı değerlerine göre normalize edilen “Normalized Penetration Rate per bar Itme” değerlerinin 0.95 – 15.60 [(cm/min)/(Bar)] ” ile “Normalized Penetration Rate per bar Torque 0.16 – 2.84 [(cm/min)/(Bar)]” değiştiği gözlenmiştir (Şekil 6.15).

RQD ve kullanılan delgi parametreleri arasında kuvvetli bir korelasyon vardır. RQD değerleri ile yatay ön araştırma delgilerinden elde edilen anlık ilerleme hızları kullanılarak jeolojik ortamlarla ilgili bir öngöründe bulunulmuştur. Şekil 6.17 de görüleceği gibi, tork ve itme basınç değişimlerine göre normalize edilmiş penetrasyon hızı değişiminin de yüksek bir RQD korelasyonuna sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, yapılmış olan literatür çalışmalarıyla uyumlu sonuçlar göstermektedir. Tüm parametreler, RQD'ye negatif bir korelasyon gösterir, yani kaya kalite göstergesi (RQD) ne kadar iyi olursa anlık ilerleme hızları ve normalize edilmiş penetrasyon oranlarında o kadar düşük çıkmaktadır. Ancak sınırlı sayıda sondaj verisine dayanan bu korelasyon ifadelerinin geçerliği daha fazla veri ilave edilmesi ile artacağı muhakkaktır. Ayrıca, delgi anlık ilerleme hızları için oluşturulan grafiklerin benzer bir seyir izlediği ve uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 6.18). Bu da verilerin ortam koşullarını doğru şekilde yansıttığını ve güvenilirliğini teyit etmesi bakımından önemlidir.



Şekil 6.17 : Tork ve itme basıncına göre normalize edilmiş penetrasyon oranı ile RQD değerlerinin karşılaştırılması.

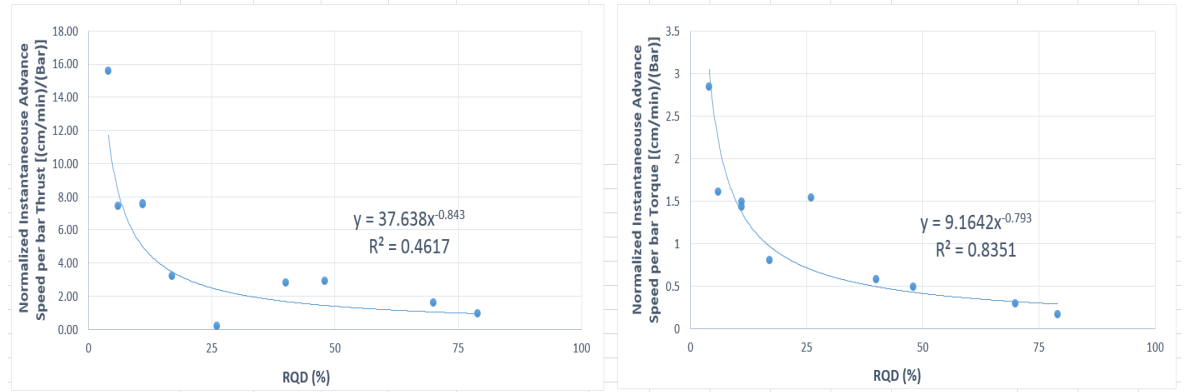


Şekil 6.18 : RQD ve anlık ilerleme hızları arasındaki ilişki.

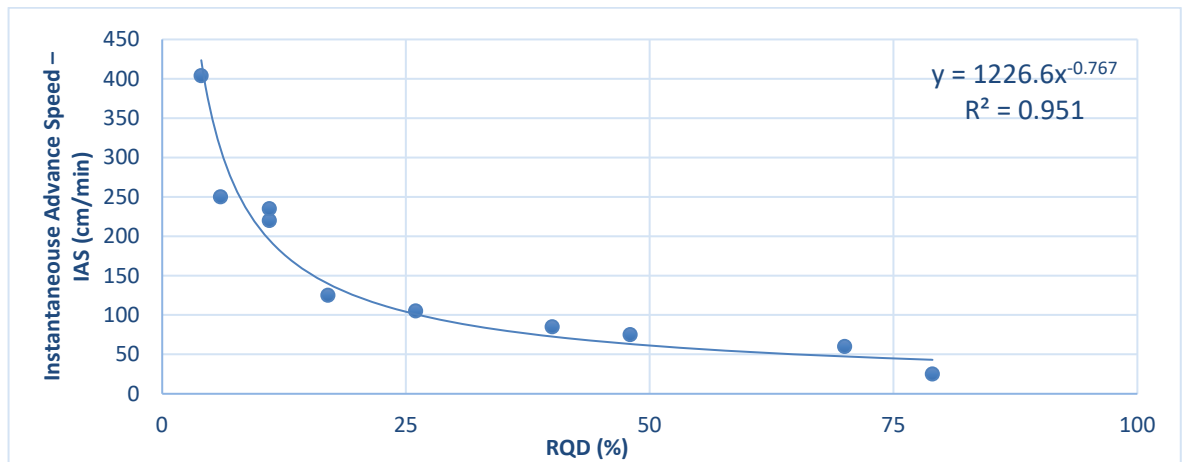
Bulunan bu ilişkiler yardımıyla benzer jeolojik koşullarda yatay delgi verilerine dayanarak belirli bir yaklaşımla daha güvenli kazı ortamlarının ön görüşünde bulunabilecektir. Ayrıca, benzer özellikteki formasyonlarda ve sondajlardan elde edilen jeomekanik büyüklükler kullanılarak TBM performans parametreleri belirli bir yaklaşıklık içerisinde tahmin edilebilecektir. Buna göre, kazı ortamının tariflenmesi açısından, RQD değerlerine göre yorumlanmış anlık ilerleme hızları ve normalize edilmiş penetrasyon oranlarının kullanılmasının doğru bir yaklaşım olduğu söylenebilir.

### 6.3 Tünel Seviyesi RQD Değerleri İle Yatay Delgi Verilerinin Karşılaştırılması

Penetrasyon ve tork oranlarındaki değişimlerin kaya dayanımı ve ortamın jeolojisini doğru şekilde yansıttığına dair bir çok çalışma vardır. Scoble at. al (1989) tork değerlerinin kaya dayanımına bağlı olarak arttığını, Schunnesson (1997) ise, normalize edilmiş tork, tork değerlerindeki değişimler ile, normalize edilmiş penetrasyon oranı ve penetrasyon oranındaki değişimlerin kaya türünü doğrudan sınıflandırmak için kullanılabileceğini saptamıştır. Bu anlamda, öncelikli olarak anlık ilerleme hızlarının itme ve tork basıncı değerlerine göre normalize edilmiş değerlerinin RQD ile birlikte grafikleri çizilmiş (Şekil 6.19, Şekil 6.20) ve aralarındaki ilişkiyi belirlemek için power regresyon analizi kullanılmıştır. Farklı RQD değerleriyle Anlık İlerleme Hızı ( $R^2=0.91$ ), Tork ( $R^2: 0,83$ ) ve Baskı ( $R^2=0.46$ ) değerlerine göre normalize edilmiş anlık ilerleme hızlarının aralarındaki ilişkinin var olup olmadığını test etmek amacıyla determinasyon katsayıları ( $R^2$ ) hesaplanmıştır.



Şekil 6.19 : İtme Basıncı ve Tork değerlerine göre normalize edilmiş anlık ilerleme hızları ile RQD değerleri arasındaki ilişki.



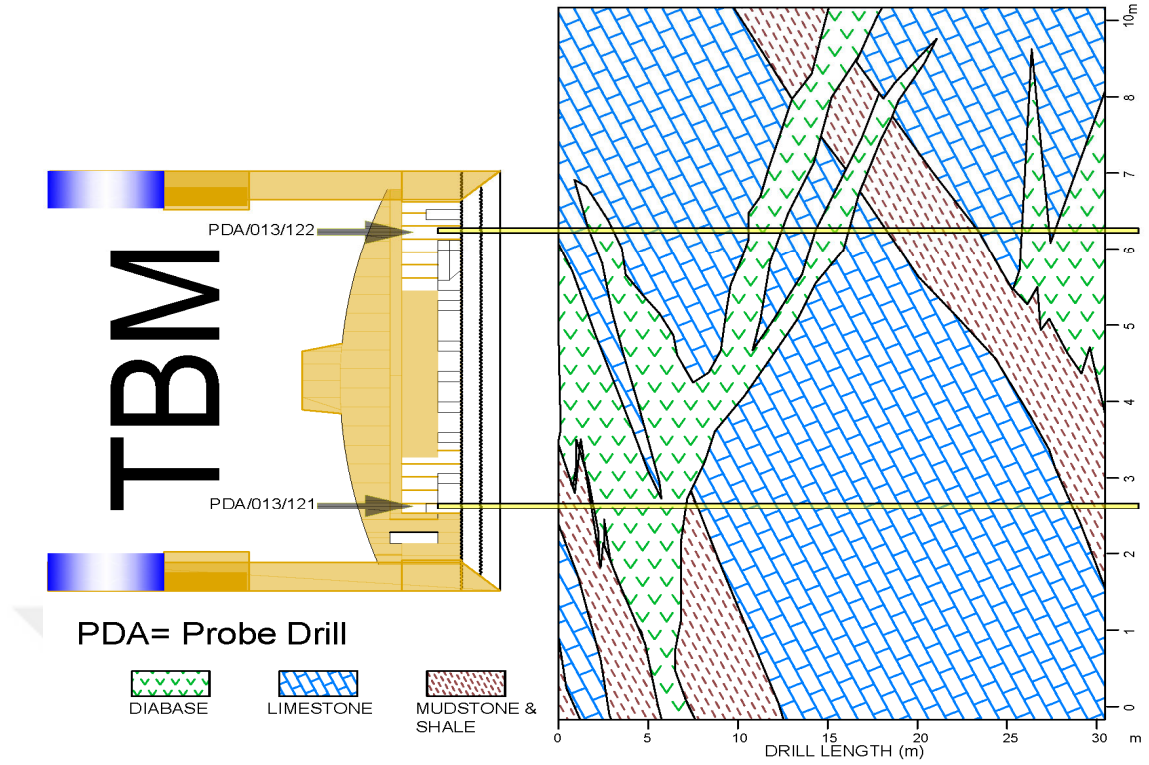
Şekil 6.20 : RQD ve ham anlık ilerleme hızları arasındaki ilişki.

Yapılan hesaplamalar göz önünde bulundurulduğunda, yatay delgi anlık ilerleme hızları ve tork'a göre normalize edilmiş anlık ilerleme hızlarının RQD değerleriyle korelasyon değerleri sırasıyla  $R^2=0.91$  ve  $R^2=0.83$  olarak elde edilmiştir (Şekil 6.19). Bu durum, anlık ilerleme hızı ile tork basıncının ortamın jeolojik durumundan güçlü bir şekilde etkilendiğini ve ortam jeolojisini iyi yansıttığını göstermesi açısından önemlidir.

Delgi operatörü tarafından kontrol edilen ve bağımlı bir değişken olarak değerlendirilen "İtme Basıncı" genellikle ortamın jeolojisini yansıtmaması açısından bir gösterge olarak değerlendirilmez. Yapılan bir çok çalışmada bunu destekler biçimde sonuçlara varılmıştır (Schunnesson, 1998, Beattie, 2009). Bununla birlikte, Scoble at. al (1989) itme (itme) basıncının uygulanan kuvvetle arttığını bulmuşlar, yumuşak zon ve kaya geçişlerinde söz konusu itme (itme) basıncının azaldığı ve daha sert ve masif kaya geçişlerinde ise arttığı sonucuna varmışlardır. Bu çalışma kapsamında ise normalize edilen itme basıncının  $R^2$  değeri 0.46 bulunmuştur. Bulunan bu değer, anlık ilerleme hızı ve normalize edilen tork basıncına göre daha düşük bir korelasyon değerine sahiptir. Bu durum, yapılmış olan literatür çalışmalarıyla uyumlu sonuçlar göstermektedir. Bu anlamda, itme basıncı büyük ölçüde operatöre bağımlı olmakla birlikte, jeolojik ortamların ve kaya türlerinin bir göstergesi olarak kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmalıdır .

Tüm parametreler, RQD'ye negatif bir korelasyon gösterir. Yani kaya kalite göstergesi (RQD) ne kadar yüksek olursa anlık ilerleme hızları ve normalize edilmiş penetrasyon oranları da o kadar düşük çıkmaktadır. Ancak sınırlı sayıda sondaj verisine dayanan bu korelasyon ifadelerinin geçerliğinin daha fazla veri ilave edilmesi ile artacağı muhakkaktır. Ayrıca, delgi anlık ilerleme hızları için oluşturulan grafiklerin benzer bir seyir izlediği ve uyumlu olduğu görülmektedir. Bu da verilerin ortam koşullarını doğru şekilde yansıttığını ve güvenilirliğini teyit etmesi bakımından önemlidir.

RQD ve anlık hız değerlerine göre yapılan sınıflandırmadan yola çıkarak, tünel kazısının 383 m'lik kesimine denk gelen, 22 adet yatay ön araştırma delgisine ait 38.260 adet veri değerlendirilmiş ve tünel kazısı boyunca, geçilen ortamların oranları belirlenmiştir (Şekil 6.21).



**Şekil 6.21 :** Tünel aynası sağ ve sol tarafından yapılan iki delginin (PDA 013/121- PDA 013/122) değerlendirilmesiyle oluşturulan jeolojik model (plan görünüşü).

Buna göre, tünel kazısında geçilen zonlar;

- Good-Excelent Rock Zone olarak tanımlanan birimlerde ortalama anlık ilerleme hızları yaklaşık 25 cm/dak bulunmuştur. Bu kesim, tünel güzergahının yaklaşık % 1'ini oluşturmaktadır.
- Fair Rock Zone olarak tanımlanan birimlerde ortalama anlık ilerleme hızları yaklaşık 60 cm/dak bulunmuştur. Bu kesim, tünel güzergahının yaklaşık % 57'sini oluşturmaktadır.
- Poor Rock Zone olarak tanımlanan birimlerde ortalama anlık ilerleme hızları yaklaşık 87 cm/dak bulunmuştur. Bu kesim, tünel güzergahının yaklaşık % 39'unu oluşturmaktadır.
- Very Poor Rock Or Crushed Zone olarak tanımlanan birimlerde ortalama anlık ilerleme hızları yaklaşık 180 cm/dak bulunmuştur. Bu kesim, tünel güzergahının yaklaşık % 3'ünü oluşturmaktadır.



## 7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, ön araştırma delgileri sırasında, her bir santimetre ara ile kaydedilen baskı, tork, su basıncı ve gerçekleşen ilerleme hızı kayıtlarından yararlanarak mühendislik jeolojisi modelleri çizilmiştir. Çizilen modeller değerlendirilerek, delgi mesafesi kadar olan kesimde ki zayıf zemin koşulları, fay ve / veya ezilme zonları, çatlak yapısı, boşluk ve yeraltısuyunun varlığı gibi jeolojik-hidrojeolojik koşulların ayrıntılı olarak belirlenebileceği görülmüştür. Ayrıca, veriler kullanılarak farklı özellikteki zonlar için istatistik analizler yapılmıştır. Yapılan analizler de, tork ve baskı değerleri ilerleme hızına bölünerek normalleştirilmiştir. Normalleştirilen veriler kullanılarak oluşturulan modellerdeki litolojik durum, kazı aynası ve pas kontrolerinde yapılan gözlem ve ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Böylece sızdırmazlık veya konsolidasyon enjeksiyonuna tabi tutulacak zonun kalınlığı, geometrisi, su geliri, suyun kökeni (Mühendislik Jeolojisi Modeli) belirlenebilmiştir. Ayrıca, farklı litolojiler ve fay zonları için ilerleme ilerleme hızı, baskı, tork ve su basıncı değişimleri arasındaki ilişkiler ortaya çıkarılmıştır. Yapılan değerlendirmede, yatay delgi delme hızı değişiminin kayanın sertliği (Dayanım), ortamın çatlaklılığı ve heterojenliği ile ilgili olduğu anlaşılmıştır.

İnceleme alanında, Erken Silüriyen –Devoniyen yaşlı İstanbul Zonuna ait kireçtaşları (Dolayoba formasyonu) ile yer yer kireçtaşı arakatkılı şeyller (Kartal formasyonu) bulunmaktadır. Bu formasyonlar yer diyabaz dayk vesilleri ile kesilmiş durumdadır. Birimler aşırı kıvrımlı, kırıklı ve faylanmış durumdadır. Formasyonlar arası dokanaklar genelde tektoniktir. Tünel açılımı sırasında pek çok kıvrım, fay, ezilme zonu ve diyabaz daykları ile karşılaşmıştır. Tünel kazısı sırasında volkanik dayklardan alınan kaya numuneleri, 63 ila 120 MPa arasında değişen basınç dayanımları göstermiştir. Hatta bazı numunelerde bu değer 200 MPa'ya kadar ulaşmıştır. Bu bulgular, projenin güzergahındaki daykların, İstanbul'da daha önce yapılan projelerde test edilen dayklardan yaklaşık 2,25 kat daha sağlam olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Bu yüksek dayanıklılık, TBM'nin (tünel açma makinesi) kesici kafasındaki kesici

disklerin aşınmasını önemli ölçüde etkileyebilir. Daykların sertliği, disklerin daha hızlı aşınmasına ve daha sık değiştirilmesine neden olabilir. Bu durum, kazı süresini uzatmış ve maliyetleri arttırmıştır.

Toplam 3145m lik tünel boyunca geçilen litolojilerin kalınlıkları ve % dağılımları: 2138 m (%68) Kartal formasyonu, 598m (%19) dolayoba formasyonu, 250m (%8) Diyabaz ve yaklaşık 160m (%6) fay zonu olarak gerçekleşmiştir.

Araştırma delgilerinin açılması sırasında kazı odasına girilerek mühendislik amaçlı ayrıntılı belgeleme çalışmaları yapılmış, foto ve video çekimleri gerçekleştirilmiştir. Böylece her 36m lik ano için çok amaçlı bir veri dosyası elde edilmiştir.

Tünel güzergahı mühendislik jeolojisi modelinin oluşturulması aşamasında, bölgede daha önce yapılmış olan jeoloji ve mühendislik jeolojisi çalışmalarından, tünel güzergahı boyunca yapılmış ve proje eki olarak sunulmuş olan temel araştırma amaçlı sondaj ve deneysel çalışmalardan, kazı öncesi hazırlanmış olan tünel jeoteknik boy kesiti verilerinden ve ortalama 36 metre derinliğindeki tünel çapı kadar bindirmeli, tünel eksenine paralel konumlu ileri araştırma delgilerinden yararlanılmıştır. Ortalama 36 m lik anolar şeklinde hazırlanan yatay araştırma delgisi açılımları kullanılarak, tünel açılım haritası (perimetri haritası) elde edilmiştir.

Bu araştıma çalışmasında tünel güzergahında yapılmış olan 14 adet düşey sondajın tünel kazı seviyesinde bulunan formasyonların RQD değerleri ile yatay delgi verilerinin değişim trendleri ortaya konulmuştur.

Tünel hattı boyunca yapılan 14 adet araştırma sondajından elde edilen RQD değerleri ile düşey sondajların yapıldığı kesimlere isabet eden yatay ön araştırma delgi parametreleri birlikte değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, litolojik ve dayanım özelliklerinin karakterize edilmesinde başarılı sonuçlar vermiştir. Bu anlamda RQD ve kullanılan delgi anlık ilerleme hızlarının, kuvvetli bir ilişkisi olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde, penetrasyon oranına göre normalize edilmiş olan tork/anlık ilerleme hızı ve itme/anlık ilerleme hızı değişimlerine de yüksek bir RQD korelasyonuna sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, kaya kalite göstergesi (RQD) ne kadar iyi olursa anlık ilerleme hızları ve normalize edilmiş penetrasyon oranlarının da o kadar düşük çıktığını göstermesi açısından önemlidir.

Yapılan değerlendirmede, yatay ön araştırma delgilerinden elde edilen anlık ilerleme hızlarındaki değişimin, kayanın sertliği (dayanım), ortamın çatlaklılığı ve

heterojenliği ile ilgili olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle başta RQD değerleri olmak üzere, tünel kazısında karşılaşılacak olan jeolojik birim ve yapıların geometrisi hakkında da ayrıntılı bilgi edinileceği sonucuna varmıştır.

Normalleştirilen veriler kullanılarak oluşturulan modellerdeki litolojik durum, değerlendirilerek ayna ilerisinde gerekli olabilecek sızdırmazlık veya konsolidasyon enjeksiyonlarına yönelik zonlar belirlenebilmiştir. Enjeksiyona tabi tutulacak zonuun kalınlığı, geometrisi, su geliri, suyun kokeni (Mühendislik Jeolojisi Modeli) belirlenebilmiştir.

Jeolojik ortamın tariflenmesi açısından, yatay delgi anlık hızları ile kullanılmasının doğru bir yaklaşım olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Ancak sınırlı sayıda sondaj verisine dayanan bu korelasyon ifadelerinin geğerliliği, daha fazla veri ilave edilmesi ile yapılacak yeni alışmalarada artacağı muhakkaktır.

Çalışmada ortaya konulan trendler, RQD değerleri arttıka anlık ilerleme hızının azaldığını göstermiştir. Bu alışma daha fazla sondaj verileri içeren bir veritabanı ile istatistik analiz yapılarak, formasyon karaktersitikleri ile yatay ön delgi performansı arasındaki ilişkiler ortaya konulacak şekilde ve yatay ön delgi verilerine dayanarak TBM performans tahmin modeli geliştirmek üzere devam ettirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca, farklı litolojiler ve fay zonları için ilerleme hızı, baskı, tork ve su basıncı değerimleri arasındaki ilişkiler ortaya çıkarılmıştır. Yapılan değerlendirmede, ön araştırma delgi hızı değeriminin kayanın sertliği (Dayanım), ortamın çatlaklılığı ve heterojenliği ile ilgili olduğu anlaşılmıştır.

Jeolojik ortamın tariflenmesi açısından, yatay delgi anlık hızları ile kullanılmasının doğru bir yaklaşım olduğu gösterilmiştir. Ancak sınırlı sayıda sondaj verisine dayanan bu korelasyon ifadelerinin geğerliliği, daha fazla veri ilave edilmesi ile yapılacak yeni çalışmalarda artacaktır.

Yatay delgi anlık ilerleme hızları ve tork'a göre normalize edilmiş anlık ilerleme hızlarının RQD değerleriyle korelasyon değerleri sırasıyla  $R^2=0.91$  ve  $R^2=0.83$  olarak elde edilmiştir. Bu durum, anlık ilerleme hızı ile tork basıncının ortamın jeolojik durumundan güçlü bir şekilde etkilendiğini ve ortam jeolojisini iyi yansıttığını göstermesi açısından önemlidir.

Anlık ilerleme hızlarının itme ve tork basıncı değerlerine göre normalize edilmiş değerlerinin RQD ile birlikte grafikleri çizilmiş ve aralarındaki ilişkiyi belirlemek için

power regresyon analizi kullanılmıştır. Farklı RQD değerleriyle Anlık İlerleme Hızı ( $R^2=0.91$ ), Tork ( $R^2: 0,83$ ) ve Baskı ( $R^2=0.46$ ) değerlerine göre normalize edilmiş anlık ilerleme hızlarının aralarındaki ilişkinin var olup olmadığını test etmek amacıyla determinasyon katsayıları ( $R^2$ ) hesaplanmıştır.

Çalışmada ortaya konulan trendler, RQD değerleri arttıkça anlık ilerleme hızının azaldığını göstermiştir. Bu çalışma daha fazla sondaj verileri içeren bir veritabanı ile istatistik analiz yapılarak, formasyon karakteristikleri ile yatay ön delgi performansı arasındaki ilişkileri ortaya koyacak şekilde ve yatay ön delgi verilerine dayanarak TBM performans tahmin modeli geliştirmek üzere devam ettirilmesi gerekmektedir.

## 7.1 Tartışma

Özellikle TBM ile açılacak tünellerde, tünel aynasının önündeki jeolojik ve hidrojeolojik koşulların tahmin edilebilmesi önemlidir. Bu amaçla yapılan yatay delgi sonuçları doğru yorumlanmalıdır. Bu çalışmada, bir dizi yatay ön araştırma delgileri verisi ile vertical sondajlardan elde edilen RQD değerleri birlikte değerlendirilmiş ve aralarındaki ilişkiler yorumlanmıştır. Analizlerde, delgi parametrelerinin değişimleri ile delinen kaya kütlelerinin özellikleri ve kazı ortamının davranışları belirlenmiştir. Bu ilişkilerden yola çıkarak kazılan jeolojik ortamlar sınıflandırılmıştır. Yapılan çalışmada, inşaat ortamının tariflenmesi açısından, RQD değerlerine göre yorumlanmış anlık ilerleme hızları ve normalize edilmiş penetrasyon oranlarının kullanılmasının doğru bir yaklaşım olduğu söylenebilir. Ancak sınırlı sayıda sondaj verisine dayanan bu korelasyon ifadelerinin geçerliliği, daha fazla veri ile yapılacak yeni çalışmalarla doğrulanmalıdır.

Bunlara ek olarak, bu çalışma sonucu elde edilen ortam değerlendirmelerinin, İstanbul Boğazı boyunca değişik noktalarda, aynı yada benzer jeolojik şartlar dahilinde, farklı amaçlarla açılması öngörülecek tünel inşaatlarının projelendirme aşamasında, tünel inşaa yönteminin saptanması, makine parkının seçimi, yapım aşamasında karşılaşılabilecek sorunların öngörülmesi ve tüm bunlara bağlı olarak yapım maliyetlerinin azaltılması açısından büyük önem arz ettiği ve fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Benzer kazı ortamları için, bu tez kapsamında saptanan yatay delgi verileri kullanılarak, TBM performans parametrelerinin belirli bir yaklaşımla tahmin edilebilecektir. Buna bağlı olarak TBM makinalarının fiyat ve performans ilişkilerinin daha doğru belirleneceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Bakır A, Eris I, Daglioglu S.** (2011). Probe drilling in Bosphorus Tunnel (SP-7), *In: proceedings for Atilla Yalcin Symposium, ITU*, pp. 72-82. İstanbul.
- Bakır A, Eris, I, Daglioglu, S.** (2012). Interrelationships between TBM performance and probe drill data in Melen Water Tunnel (SP-7) in İstanbul. *In. Proceedings, Geomechanic, symposium for Mahir Vardar, ITU*, pp. 91-103. İstanbul.
- Bakır, A., Yavuz, V.** 2021 The Role of Yatay ön araştırma delgileri Data in Tunnel Excavations: A Case Study from İstanbul Bosphorus Tunnel. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR) (2021) Volume 57, No 1, pp 112-129.*
- Bilgin, N., Ates, U.** (2016). Probe drilling ahead of two TBMs in difficult ground conditions in Turkey. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (7), pp. 2763–2772.
- Bilgin, N., Kahraman, S.** (2003). Drillability prediction in rotary blast hole drilling, *18th International Mining Congress and Exhibition of Turkey*, pp. 177-182, Antalya.
- Brown, E.T. and Phillips, H.R., (1977).** Recording Drilling Performance for Tunnelling Site Investigations, *Construction Industry Research, and Information Association, Publication No: 81*, London.
- Çağatay, M.N., Görür, N., Algan, A., Eastoe, C.J., Tchapylyga, A., Ongan, D., Kuhn, T., Kuşçu, İ.** (2000). Late Glacial-Holocene palaeoceanography of the Black Sea and Marmara Sea: timing of connections with the Mediterranean and Black Sea. *Marine Geology* 167, pp.191–206.
- Deere, D.U. (1963).** Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mech. and Eng. Geol.* 1, pp.18.
- Devlet Su İşleri. (DSİ)** (2005). Melen Projesi Deniz Geçisi Jeoteknik Veri Raporu. *Yayınlanmamış.*
- Devlet Su İşleri. (DSİ).** (2005). Büyük İstanbul İçme Suyu 2. Merhale Sözleşme Paketi, Melen Müh. ve Müsavirlik O.G., *Yayınlanmamış.*
- Devlet Su İşleri. (DSİ).** (2009). Proje sunum notları. *Yayınlanmamış.*
- Eriñç, S., (1977).** İstanbul Boğazı ve Çevresi (Doğal Ortam: Ekiler ve Olanaklar), *İstanbul Üniversitesi, Coğrafya Enstitüsü Dergisi, Sayı: 20–21, s. 123*, İstanbul.
- Eriñç, S., (1980).** Jeokoloji Açısından İstanbul Yöresi, *İstanbul Üniversitesi Coğrafya Enstitüsü Dergisi, Sayı: 23, s:279-290*, İstanbul.
- Eriş, İ., (2009).** Kadıköy Kartal Metrosu; Pendik Kaynaraca Uzantısı, Jeolojik-Jeoteknik Araştırma Raporu. *SİAL, Yayınlanmamış.*

- Fish, B. G.** (1968). The basic variables in rotary drilling, *Mine & Quarry Engineering*, 27, pp. 74-81.
- Fish, B.G.** (1961). The Basic Variables in Rotary Drilling, *Mine and Quarry Engineering*, Vol. 27, No. 1, pp. 29-34 and No. 2, pp. 74-81.
- Ghosh, R.** (2015). Rock Mass Characterisation Using Drill Performance Monitoring Problems, Analysis Challenges and Limitations, *Division of Operation and Maintenance Engineering Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering Luleå University of Technology Luleå, Sweden*
- Ghosh, R. H. Schunnesson, H., Kumar, U.,** (2016). Evaluation of operating life length of rotary tricone bits using Measurement While Drilling data. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 83, pp. 41-48.
- Ghosh, R. Schunnesson, H. and Kumar, U.** (2014). Evaluation of Rock Mass Characteristics Using Measurement While Drilling in Boliden Minerals Aitik Copper Mine, Sweden. *In the proceedings of the 22nd Mine Planning & Equipment Selection (MPES) Conference, Dresden, Germany, 14th - 19th October 2013, volume-1, pp. 81-91.*
- Gökaşan, E., Demirbağ, E., Oktay, F.Y. and Doğan, E.** (1993). İstanbul Boğazı Oluşumu Üzerine Yeni Gözlemler. *Türkiye Kuvatları Workshop Bildiri Özleri*, pp.63-68.
- Gökaşan, E.** (1993). İstanbul Boğazı güneyinin (Anadolu-Rumeli Hisarları ve Üsküdar-Kabataş arası) jeolojisi ve jeofiziği. *İ.Ü. Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, yayınlanmamış yüksek lisans tezi*, pp.115.
- Gökaşan, E., Demirbağ, E., Oktay, F.Y., Ecevitöglü, B., Doğan, E., Fettahoğlu, M.K. and Şimşek, M.** (1995). İstanbul Boğazı Oluşumunun Sığ Sismik Verilen Yardımı ile Tartışılması. *Jeofizik*, v. 9 No.1-2, ISSN 0259-1472, pp.280-284.
- Gökaşan, E., Demirbağ, E., Oktay, F.Y., Ecevitöglü, B., Şimşek, M. and Yüce, H.** (1997). On the Origin of the Bosphorous. *Marine Geology*, 140, pp.183-199.
- Gökaşan, E.** (2000). IV.Bölüm: Marmara Denizi'nin jeolojik özellikleri, Marmara Denizi'nin jeolojik oşinografisi (*Editörler: E. Doğan ve A. Kurter*), 177-393, ISBN 975-404-579-8, *Umur Matbaacılık*.
- Gökaşan, E., Alpar, B., Gazioğlu, C., Yücel, Z.Y., Tok, B., Doğan, E. and Güneysu, C.** (2000). Active tectonics of the İzmit Gulf (NE Marmara Sea): from high resolution seismic and multi-beam bathymetry data. *Marine Geology*, 175, pp.1-4, pp.271-294
- Gökaşan, E., Alpar, B., Gazioğlu, C., Yücel, Z.Y., Ersoy, Ş., Gündoğdu, O., Yaltırak, C. and Tok, B.** (2002). Evidence of NW extension of the North Anatolian Fault Zone in the Marmara Sea; a new interpretation of the Marmara Sea (İzmit) earthquake on 17 August 1999, *Geo-Marine Letters*, 21, pp.183-199.

- Gökaşan, E., Ustaömer, T., Gazioğlu, C., Yücel, Z.Y., Öztürk, K., Tur, H., Ecevitöglu, B., Tok, B.** (2003). Morphotectonic evolution of the Marmara Sea inferred from multi-beam bathymetric and seismic data. *Geo-Marine Letters*, 23/1, pp.19-33.
- Gökaşan, E., Algan, O., Ecevitöglu, B., Tur, H., Türker, A., Meriç, E., Özturan, M., Birkan, H., Şimşek, M., Tok, B., Sarı, E., Ertek, A., Erginal, E., Caner, H., Elmas, K.E.** (2003). İstanbul Boğazı Multi-Beam Batimetri Hakkında ilk not (The First Note for The Multi-Beam Bathymetry Of The Strait Of İstanbul). İstanbul Boğazı'nda son 30 bin yıl içinde depolanan sediment istifinin stratigrafisi. *Jeoloji Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi İstanbulun Jeolojisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı*.
- Haas W.** (1968). Das Alt-Paläozoikum von Bithynien (Nordwest Türkei). Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, *Abhandlungen 131*, pp.178-242.
- Hjelme, G.J.** (2010). Drill parameter analysis in the Løren tunnel: Normalization and interpretation of automatically collected. *Master Thesis in Geosciences, University Of Oslo*. Norveç.
- Honer, P.C. and Sherrell, F.W.** (1977). The application of air-flush rotary percussion drilling techniques in site investigation. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrology 10*, pp. 207-220.
- İ.B.B.** (2001). İstanbul Avrupa yakası Güneyi 1/5.000 ölçekli imar planına esas jeoloji-jeoteknik etüd raporu (Bayındırlık Onaylı). *İBB Zemin ve Deprem İnceleme Müd.*, İstanbul
- İ.B.B.** (2003). İstanbul Avrupa yakası Kuzeyi 1/5.000 ölçekli imar planına esas jeoloji-jeoteknik etüd raporu (Bayındırlık Onaylı). *İBB Zemin ve Deprem İnceleme Müd.* İstanbul
- İ.B.B.** (2007). Yerleşim Amaçlı Mikrobölgeleme Rapor Ve Haritalarının Hazırlanması – Avrupa Yakası Projesi (Güney), *İBB Zemin ve Deprem İnceleme Müd.* İstanbul
- İMP (İstanbul Metropolitan Planlama).** (2007). İstanbul Büyükşehir Alanı Yerbilimleri Araştırmaları Sentez ve Önerileri. *1/100.000 Ölçekli Çevre Düzeni Planı*. İstanbul
- Kadkhodaei-Ilkchi, A., Ramos, F., and Hatherly, P.** (2010). Rock recognition from MWD: A comparative study of Boosting, Neural Networks and Fuzzy Logics" *IEE Geoscience and remote sensing letter, Vol.7, No.4*
- Kaya, O.** (1973). The Devonian and Lower Carboniferous stratigraphy of the İstinye, Bostancı and Büyükada subareas, in **Kaya, O.** (ed.), Paleozoic of İstanbul. *Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Kitaplar Serisi 40*, pp. 1-36.
- Kaya, O.** (1978). İstanbul Ordovisiyen ve Silüriyeni, *Yerbilimleri, HÜ Yerbilimleri Enst. Yayın organı*, 4, pp.1–22.
- Kaya, O., Mamet B.** (1971). Biostratigraphy of the Visean Cebecikoy Limestone near İstanbul, Turkey. *The Journal of Foraminiferal Research 1*, pp. 77-80.

- Müftüoğlu, Y.V.** (1987) Delme Parametrelerinin Otomatik Kayıt Yöntemleri ve Uygulamaları, *Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 10. Kongresi*, pp.253-270, Ankara.
- Najder, T.** (2009). Working procedure from Bosphorus Tunnel (SP-7) project, “*Method Statement of Probe Drilling and Pre-grouting*” (unpublished), Istanbul.
- Önalın, M.** (1982), Pendik bölgesi ile adaların jeolojisi ve sedimentler özellikleri. *İstanbul Üniversitesi, Yerbilimleri fakültesi, Jeoloji bölümü, Doçentlik Tezi*, 156 sayfa.
- Özgül, N. (Düzenleyen), Öner, K. vd.** (2005). İstanbul İli Temel Jeolojik Özellikleri. *İBB Planlama ve İmar Dairesi Zemin ve Deprem İnceleme Müdürlüğü*, İstanbul.
- Paeckelmann, W.** (1938). Neuem Beitrage zur Kenntnis der Geologs, Palaeontlogie und Petrograpgie der umgegend von Konstantinopel. *Abh. D. Preuss Geol. Lands*, pp. 186 page.
- Paone, J., Madson, D.** (1966). Drillability Studies: Impregnated Diamond Bits, *U.S. Bureau of Mines Report of Investigations, RI 6776*, pp. 16.
- Pearse, G.** (1985) Hydraulic rock drills. *Mining Magazine, March*,
- Penck, W.** (1919). Grundzüge der Geologie des Bosphorus, *Veröffentl. d. Institutes f. Meereskunde Berlin, N.F., Reihe A*, pp. 4- 72.
- Pfister, P.** (1985). Recording drilling parameters in ground engineering. *GeodriUing (October)*, pp. 8-13.
- Rabia, H.** (1985). A unified prediction model for percussive and rotary drilling, *Mining Science and Technology*,2, s. 207–216.
- Rostami, J. ve Ozdemir, L.** (1993). A New model for performance prediction of hard rock TBMs, *Proceedings of RETC'93*, (pp.793-809). Boston MA, June 13-17.
- Schmidt, R.L.** (1972). Drillability Studies: Percussive Drilling in the Field. *U.S. Bureau of Mines Report of Investigations, RI 7684*, pp.31.
- Schunnesson, H.** (1996). RQD predictions are based on drill performance parameters. *International Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 11, pp. 345-351.
- Schunnesson, H.** (1998). Rock Characterisation Using Percussive Drilling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No. 6*, pp. 711-725, Great Britain
- Scoble, M.J. and Peck, J.** (1987). A technique for ground characterization using automated production drill monitoring. *Int. Journal of Surface Mining 1*: pp. 41-54.
- Scoble. M.J., Peck.J, and Hendricks.C.** (1989). Correlation between rotary drill performance parameters and borehole geophysical logging. *Mining Science and Technology*.8: pp. 301 – 312
- Segui, J. & Higgins, M.** (2002). Blast design using measurement while drilling parameters. *International Journal of Blasting and Fragmentation (Fragblast)*, 6, pp. 287-299.

- Sinkala, T.** (1989). Hole deviation in percussive drilling and control measures. *Ph.D. thesis 74D, Lulea University of Technology, Sweden.*
- Smith, B.** (2002). Improvements in Blast Fragmentation Using Measurement While Drilling Parameters, *International Journal of Blasting and Fragmentation (Fragblast)*, 6 (3-4), pp. 301-310.
- Şengör, A.M.C. - Çağatay, M.N., Sakıncı, M., Görür, N.** (2002). The Geology of the Specific Area of the Bosphorus Tunnel. *Avrasya JV. İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul* (yazarların izni ile)
- Thuro, K.** (1997). Drillability prediction- Geological influences in hard rock drill and blast Tunnelling, *GeolRundsch* 86, pp. 426-438.
- TMMOB,** (2002). İstanbul'un Jeolojisi Sempozyumu. *JMO İstanbul Şubesi, İstanbul.*
- Yaşar, S. Yılmaz, A. O., Çapık, M.,** (2015). Effects of Rotational Speed and Bit Load on Laboratory Scale Drillability, *8th Drilling-Blasting Symposium, İstanbul*
- Yurtsever, A.** (1996). İstanbul Yarımadasının (1/50.000 ölçekli haritasının) jeolojisi. *MTA Rap. No. 9989, Ankara.*
- Yüksel, A.** (2014). TBM makinelerinde kayaç özellikleri ve makro süreksizliklerin kazı performansına etkilerinin araştırılması. Doktora Tezi., *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- Yüzer, E., Eriş, İ., Bakır, A., Aydoğan, S.** (2007). İstanbul'un Heyelanları. *İstanbul'un Jeolojisi Sempozyumu III. İstanbul.*
- Yüzer, E., Eriş, İ., Bakır, A., Aydoğan, S.,** (2008). Bölgesel Ve Kentsel Planlamada Yerbilimi Çalışmalarının Önemi, *Eroskay Uygulamalı Jeoloji Kolokiyumu, İstanbul Üniversitesi. İstanbul.*
- Yüzer, E., Eriş, İ., Bakır, A., Aydoğan, S., Küçükmehtemoğlu, M.,** (2007). Water Resources of Metropolitan City of Istanbul and Their Protection, *International Workshop The Importance of Ecological Belts Surrounding Metropolitan Cities. İstanbul.*
- Url-1** <<http://www.dsi.gov.tr>>, erişim tarihi 29.06.2010



## **EKLER**

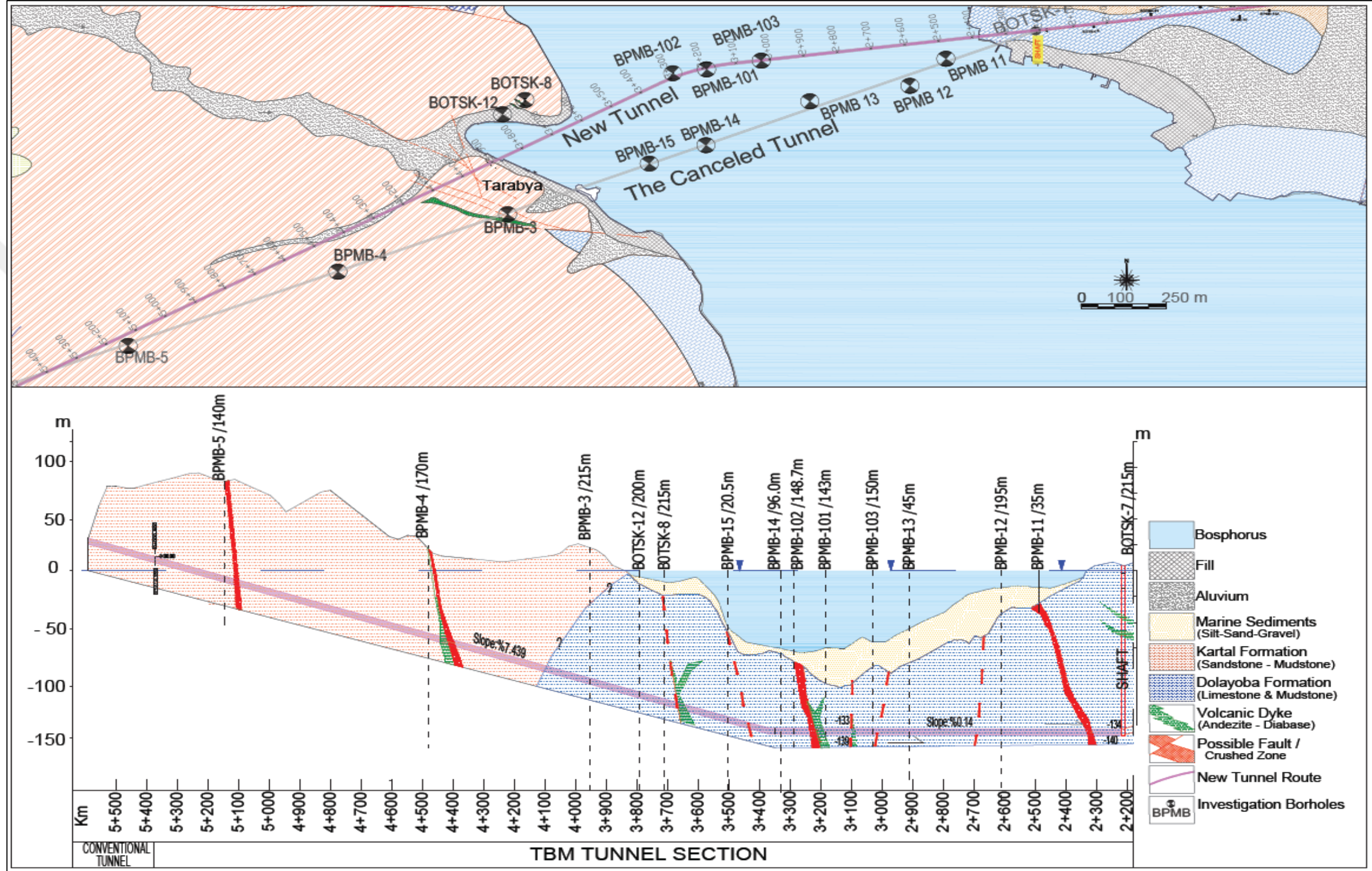
**EK A:** Tünel güzergahı boyunca açılan sondajlar ve kazı öncesi hazırlanan jeolojik kesit.

**EK B:** Perimtrik haritanın oluşturulması ve yüzey jeolojisi verileri ile korelasyonu.

**EK C:** Kazı sonrası tünel boy kesiti.



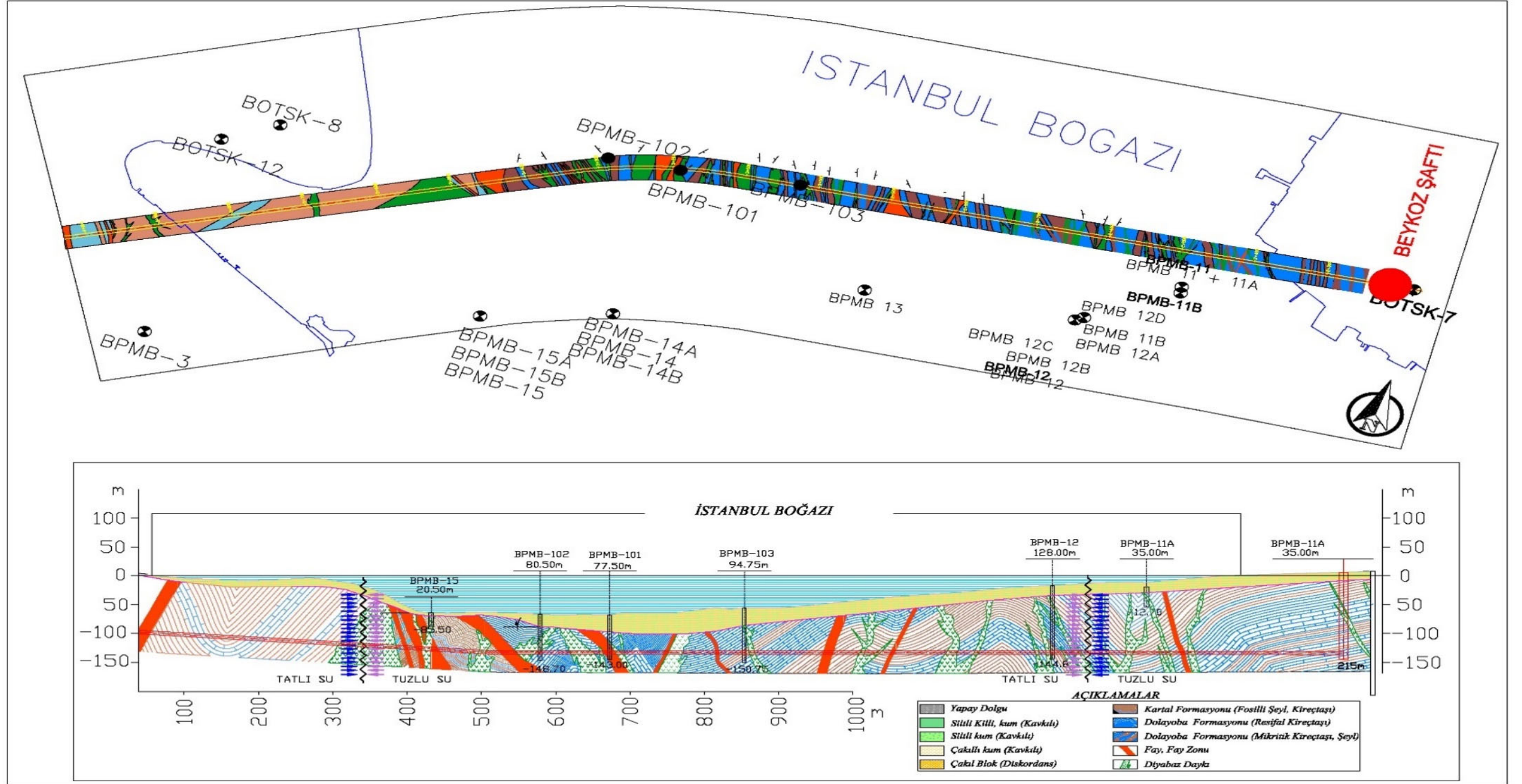
EK A:



Şekil A.1: Tünel güzergahı boyunca açılan sondajlar ve kazı öncesi hazırlanan jeolojik kesit (EK A) (Bakır et.al, 2012).



EK C.:



Şekil C.1: Perimetrik haritanın oluşturulması ve yüzey jeolojisi verileri ile korelasyonu (Bakır et.al, 2012).

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Aydın BAKIR

### ÖĞRENİM DURUMU:

**Lisans:** İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 2002

**Yüksek Lisans:** İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği ABD  
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 2006

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Temmuz 2003 – Eylül 2003 arasında Maden Tetkik Arama Enstitüsü (MTA) geçici işçi statüsünde Yüksek Lisans tez çalışması için 2 ay süre ile Biga Yarımadası Jeolojisi - Hidrojeolojisinin İncelenmesi.
- Eylül 2003 - Temmuz 2005 yılları arasında EMAY Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Tic. Ltd. Şti.de Karadeniz Otoyolu tünelleri başta olmak üzere bir çok projenini jeolojik çalışmaları ve tasarımlarında görev aldı.
- Temmuz 2008 yılları arasında İ.B.B. BİMTAŞ (İstanbul Metropolitan Planlama ve Kentsel Tasarım Merkezi) bünyesinde;
  - 1/25.000 Ölçekli Trakya (Edirne-Kırklareli-Tekirdağ) nazım imar plana altlık olacak jeolojik-Hidrojeolojik çalışmaların yapılması ve yapılan çalışmalardan elde edilen verilerin CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ortamına aktarılması.
  - 1/25.000 Ölçekli İstanbul İl Genelinin Jeoloji – Hidrojeoloji – Hidroloji - Morfoloji – Maden ve Enerji Kaynakları ile Yerleşime Uygunluk Çalışmalarında Kullanılacak Mühendislik Jeolojisi verilerinin derlenip CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) ortamına aktarılması ve haritalarının hazırlanması.
  - 1/25.000 Ölçekli Nazım İmar Planı Analiz Çalışmaları verilerinin CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) ortamına aktarılması.
  - İstanbul'un İçmesuyu Havzalarının ve Su Kaynaklarının Korunmasına yönelik çalışmaların yapılması ve verilerin CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) ortamına aktarılması.
  - 1/100.000 Ölçekli İstanbul Çevre Düzeni Planı Analiz ve Sentez Çalışmaları

- Spot uydu verisinden elde edilen Sayısal Yükseklik Modelinden (SEM), Arc GIS ortamında eğim, bakı, eşyükselti, drenaj ağı haritalarının Üretilmesi ve analizlerde kullanılması
- Temmuz 2008 – Kasım 2013 yılları arasında Moskovskiy Metrostroy Açık A.Ş. Türkiye Şubesinde;
  - Büyük İstanbul İçmesuyu II. Merhale Projesi Melen Sistemi - SP no:7 tüneli Boğaz geçişi (6,1m Çaplı 3,5 km uzunluğunda İçmesuyu tüneli İnşaatı) jeolojik-jeoteknik sorumlusu.
  - Büyük İstanbul İçmesuyu II. Merhale Projesi Melen Sistemi - SP no:7 tüneli Boğaz geçişi TDM (Tünel Delme Makinesi) kazılarında, ön araştırma delgileri ile kazı koşullarının belirlenmesi konularında çalışmalar yaptı.
- Kasım 2013 – (Halen devam ediyor) – Yapı Merkezi İnşaat – Jeoloji / Geoteknik Müdür olarak devam ettiği şirkette çeşitli projelerin tasarım ve uygulama aşamalarında görev almaya devam ediyor.

#### **DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

**Bakır, A., Yavuz, V.** 2021 The Role of Yatay ön araştırma delgileri Data in Tunnel Excavations: A Case Study from Istanbul Bosphorus Tunnel. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR) (2021) Volume 57, No 1, pp 112-129.*

#### **DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

Culfa, E., **Bakır, A.**, Confidenti, R.,(2014). Directional research drillings erformed with gyro probe in Tunnel T2 on the2nd railway track Divača-Koper. *14th International Tunnelling and Underground Structures Conference. Slovenia.*

Sirk, K., Ayvacı, Y., **Bakır, A.**, (2014). Grouting works in tunnel T2 on the 2nd railway track Divača-Koper. *14th International Tunnelling and Underground Structures Conference. Slovenia*

**Bakır, A.**, Eriş, İ., Dağlıoğlu, S. (2012). Melen Sistemi İstanbul Boğaziçi (Sp-7) Tünelinde Yatay Sondaj Verileri İle TDM Kazı Hızının Kestirimi. *Prof. Dr. Mahir VARDAR Jeomekanik, Tünelcilik ve Kaya Yapılarının Tasarımı Özel Oturumları, İstanbul.*

**Bakır, A.**, Eriş, İ., Dağlıoğlu, S., (2011). İstanbul Boğaziçi (Sp-7) Tünelinde Klavuz Delgi Kontrollü Kazı Yöntemi, *Atilla YALÇIN Sondaj Çalıştayı, İstanbul.*

Yüzer, E., Eriş, İ., **Bakır, A.**, (2010). Kentsel Planlamada Yerbilimi Çalışmaları İstanbul ili örneği, *TMMOB 2. İstanbul Kent Sempozyumu, İstanbul.*

Yüzer, E., Eriş, İ., **Bakır, A.**, (2009). Türk – Kore Ortak Girişimi (TKJV) Kazlıçeşme-Göztepe arası Boğaz altı Tüneli kesim ile Karayolu Güzergâhı ve Dolayında

Yapılmış Olan Jeolojik-Jeoteknik Araştırmaların Ön Değerlendirme Raporu (yayınlanmadı), *İstanbul*.

Eriş, İ., **Bakır, A.** Tsalagov,K. Dağlıoğlu, S. (2009). İstanbul Boğaziçi (Sp-7) Tünelinde Kılavuz Delgisi Kontrollü Kazı Yöntemi - İstanbul'un *Yüzey Ve Yüzeysel Jeoloji Verilerinin Etkin Paylaşımı Çalıştayı, İstanbul*.

Yüzer, E., Eriş, İ., **Bakır, A.**, Aydoğan, S. (2008). Bölgesel Ve Kentsel Planlamada Yerbilimi Çalışmalarının Önemi - Poster Sunu. *Eroskay Uygulamalı Jeoloji Kollokyumu, İstanbul*.

Yüzer, E., Eriş, İ., **Bakır, A.**, Aydoğan, S. (2007); İstanbul'un Heyelanları. *İstanbul'un Jeolojisi Sempozyumu-III, İstanbul*.

Yüzer, E., Eriş, İ., Küçükmehtemoğlu, M., **Bakır, A.**, Aydoğan, S. (2007); Water Resources Of Istanbul and Their Protection. *Balkan Environmental Association" (B.EN.A), İstanbul*.

Küçükmehtemoğlu, M. and **Bakır, A.** (2007). Preservation of Surface Water Resources: Determination and Evaluation of Various Stream-buffer Zones. *47th European Congress of the Regional Science Association, 29 Ağustos - 2 Eylül 2007, Paris, Fransa*.

**Bakır, A.**, (2005); Hıdırlar Ilıcası (Çanakkale – Yenice) ve Dolayının Termal Hidrojeolojisi -*Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul*.

**Bakır, A.**, (2002); Marmara Adası Mermerlerinin Mühendislik Jeolojisi –*Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul*.