Bandırma (Balıkesir)–Osmaneli (Bilecik) YHT Projesinin Bursa Kesimin T10 Tünelinde Kesilen Kaya Kütlelerinin Özelliklerinin İncelenmesi

Elif Ağırgöçer

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2026

Investigation of the Engineering Geological Characteristics of Rock Masses Intersected by the T10 Tunnel on the Bursa Section of the Bandırma (Balıkesir)–Osmaneli (Bilecik) High-Speed Railway Project

Elif Ağırgöçer

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Geology Engineering

January 2026

Bandırma (Balıkesir)–Osmaneli (Bilecik) YHT Projesinin Bursa Kesimin T10 Tünelinde Kesilen Kaya Kütlelerinin Özelliklerinin İncelenmesi

Elif Ağırgöçer

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Uygulamalı Jeoloji Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Ali KAYABAŞI

Ocak 2026

ONAY

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Elif Ağırgöçer ’in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Bandırma (Balıkesir)–Osmaneli (Bilecik) YHT Projesinin Bursa Kesimin T10 Tünelinde Kesilen Kaya Kütlelerinin Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ali KAYABAŞI

İkinci Danışman : ---

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Ali KAYABAŞI

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Didem YASİN

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Emre Aytuğ ÖZSOY

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun …./…./2026 tarih ve ……..……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Ali KAYABAŞI danışmanlığında hazırlamış olduğum "Bandırma (Balıkesir) - Osmaneli (Bilecik) YHT Projesinin Bursa Kesimin T10 Tünelinde Kaya Kütlelerinin Özeliiklerinin İncelenmesi" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 07/01/2026

Elif Ağırgöçer

İmza

T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ KULLANIMI BEYAN FORMU

Bu tezi/projeyi hazırlarken aşağıdaki Üretken Yapay Zekâ (ÜYZ) araçlarından destek aldığımı beyan ederim:

Aşağıdaki ÜYZ araçlarını kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir)

☐Claude
☒ChatGPT
☐DeepSeek
☐Gemini
☐Copilot
☐Diğer (Belirtiniz): .....

ÜYZ araçlarını tezimin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir):

☐Metin oluşturma
☐Literatür tarama
☐Çeviri
☒Düzenleme/dil kontrolü
☐Veri işleme ve analizi
☐Veri görselleştirme
☐Görüntü üretme
☐Kaynakça düzenleme
☐Diğer (Belirtiniz): .....

Bu çalışmada ÜYZ kullanımı ***Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber***'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup ÜYZ araçlarından alınan destek etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir.

ÜYZ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Elif Ağırgöçer

07/01/2026

İmza

ÖZET

Günümüzde yüksek hızlı tren, tünel, yol vb. mühendislik proje çalışmalarının önemi artmaktadır. Bandırma -Osmaneli Yüksek Hızlı Tren Projesi tamamı elektrikli ve sinyalli yeni çift hatlı demiryolu yapımını içermektedir. Bursa'nın batısında TEKNOSAB, Karacabey istasyonlarından geçerek Bandırma'ya ulaşacaktır. Bu çalışma kapsamında, projenin T-10 tünel güzergâhında yer alan kaya kütleleri mühendislik jeolojisi açısından ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışma alanının Giriş Portalında Triyas yaşlı bazalt birimi bulunmaktadır. Bazalt zayıf-orta kaya kalitesindedir. Süreksizliklerin eğim açıları 15-30-45 derece açık-kapalı, seyrek, yer yer parçalı yapıda ve yüzeyleri pürüzlüdür. Bu birimler için yapılan değerlendirmeler laboratuvar deney sonuçları ve sondaj logları esas alınarak yapılmıştır. Sondajlardan elde edilen numuneler jeomekanik parametrelerin hesaplanmasında kullanılmıştır. Birim içerisinde yapılan süreksizlik ölçümlerinden eğim yönü/eğim açıları 126/20, 277/41 olarak elde edilmiştir. Kaya kütlesinin RMR ve GSI ortalama değerleri sırasıyla 32,9 ve 27 olarak hesaplanmıştır.

Çalışma alanının T-10 Tüneli Çıkış Portalında Triyas yaşlı spilitik bazalt ve çamurtaşı birimleri mostra verir. Süreksizliklerin eğim açıları 20-45 derece açık, kırıklı, kil dolgulu demir oksit sıvalıdır. Sondajdan elde edilen numuneler üzerinde yapılan laboratuvar ve arazi deney çalışmalarından yararlanılarak analizlerde kullanılmak üzere parametre hesap çalışması yapılmıştır. Birimlerin serbest basınç dayanımı deneyi sonuçları ve süreksizlik özellikleri göz önüne alınarak birime ait kaya kütlesi puanları belirlenmiş, ayrıca ortamdaki yeraltı suyu durumu saptanmıştır.

Kaya kalitesi değerlerine göre tünel güzergâhındaki birimlerin B2, B3, C2 ve C3 kaya sınıflandırma sistemi klaslarında olacağı öngörülmüştür. Çalışma alanındaki tünelde yapılan kazı aşamalarında destek olarak sırasıyla çelik hasır, çelik iksa, shotcrete, bulon enjeksiyon, boru süren gibi destek sistemleri uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bandırma-Osmaneli Yüksek Hızlı Tren Projesi, Çelik hasır, Çelik iksa, Spilitik bazalt

SUMMARY

Today, the importance of engineering project studies such as high-speed trains, tunnels, roads, etc. is increasing. Bandırma -Osmaneli High Speed Train Project is independent of the existing railway and includes the construction of a new double-track railway, all electric and signal. In the west of Bursa, TEKNOSAB will pass through Karacabey stations and reach Bandırma. n this study, studies were carried out in terms of the engineering geology of the rock masses in the T-10 tunnel of the project.

There is a Triassic-aged basalt unit in the entrance Portal of the study area. Basalt is of weak-medium rock quality. The dip angles of the discontinuities are 15-30-45 degrees open-closed, sparse, fragmented in places and rough surfaced. Evaluations for these units were made on the basis of laboratory test results and drilling logs. Samples obtained from the boreholes were used to calculate geomechanical parameters. The dip angles/dip angles of the discontinuity measurements made in the unit were obtained as 126/20, 277/41. The average RMR and GSI scores of the rock mass were stated as 32.9 and 27, respectively.

Triassic spilitic basalt and mudstone units are outcrops in the T-10 tunnel exit portal of the study area. The dip angles of the discontinuities are 20-45 degrees, open, fractured, clay-filled iron oxide plastered. Parameter calculation studies were carried out to be used in the analyzes by using laboratory and field test studies on the samples obtained from drilling. Considering the results of the free compressive strength test of the units, the engineering properties of the unit, the groundwater status and the rock quality of the environment were determined.

According to the rock quality values, it is predicted that the units on the tunnel route will be in the B2, B3, C2 and C3 rock classification system classes. During the excavation stages in the tunnel in the study area, support systems such as steel mesh, steel shoring, shotcrete, bolt injection, pipe pin were applied as support, respectively.

Keywords: Bandırma-Osmaneli high speed train project, Steel mesh, Steel shoring, Spilitic basalt

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Ali KAYABAŞI 'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda arşivlerini kullanma izni AYGM Demiryolları Yapım Dairesi Başkanı sayın Serkan UÇAR, AYGM YHT Yapım Şube Müdürü sayın Erkal KÖMÜRCÜ ve diğer çalışanlarına, çalışmanın her aşamasında görüşleri ile katkı sunarak öneri ve yardımlarını esirgemeyen, Proje Müdürü sayın Cemil ÜSTÜN'e, Jeoloji Mühendisi sayın Mustafa SAZLI' ya, Makine Yüksek Mühendisi Özlem POLAT'a, İnşaat Mühendisi Merve MOLLAOSMANOĞLU'na, diğer çalışma arkadaşlarıma ve çalışmalarımı yürütmemde beni destekleyen ALTINOK - TCDD TEKNİK İŞ ORTAKLIĞI yönetim kuruluna teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında beni yüreklendiren, maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen, evlatları olmaktan gurur duyduğum sevgili annem Emine AĞIRGÖÇER'e, babam Bülent AĞIRGÖÇER'e, hep yanımda olarak destekleyen eşim Deniz ÇAKMAK'a ve abim Semih AĞIRGÖÇER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……..…vii
SUMMARY …..…… ..viii
TEŞEKKÜR……. ix
İÇİNDEKİLER…….…….... x
ŞEKİLLER DİZİNİ……...……xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ..... xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
3. İNCELEME ALANIN JEOLOJİSİ 4
3.1.Bölgesel Jeoloji ve Stratigrafi 4
3.1.1.Sakarya Zonu 4
3.1.2.Kalabak Grubu 5
3.1.3.Karakaya Kompleksi 8
3.1.4.Yamaç Molozu 9
3.1.5.Alüvyon 9
3.2.Yapısal Jeoloji ve Tektonik 9
3.2.1.Depremselliği 10
3.3.Hidrojeoloji ve Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri 11
4. MATERYAL VE YÖNTEM 14
4.1.Tünelcilik ve Kullanılan Genel Terimler 14
4.2.Tünel Tipleri 15
4.3.Tünel Açma Yöntemleri 15
4.3.1.TBM (Tünel Delme Makinesi) ile Tünel Açma Yöntemi 16
4.3.2.Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi 16
5. İNCELEME ALANIN MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ 18
5.1.Giriş……18
5.2.Birimlerin Mühendislik Jeolojisi Özellikleri 18
5.3.Saha Çalışmaları 23
5.3.1.Sondaj Çalışmaları 23
5.3.2.Basınçlı Su Testi (BST) 30
5.4.Laboratuvar Deneyleri 34
6. BULGULAR VE TARTİŞMALAR 40

İÇİNDEKİLER

Sayfa

6.1.T-10 Tüneli Giriş Portalı 40
6.1.1.RMR Sınıflandırma Sistemleri 40
6.1.1.1.Kaya Dayanımı 41
6.1.1.2.Kaya Kalite Göstergesi (RQD) 42
6.1.1.3.Süreksizlik Aralığı 43
6.1.1.4.Süreksizliklerin Durumu 44
6.1.1.5.Yeraltı Suyu 44
6.1.1.6.Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme 44
6.1.2. Deformasyon Modülü Hesaplamaları 49
6.2.T-10 Tüneli Orta Kısım 49
6.2.1. RMR Sınıflandırma Sistemleri 49
6.2.1.1.Kaya Dayanımı 50
6.2.1.2.Kaya Kalite Göstergesi (RQD) 51
6.2.1.3.Süreksizlik Aralığı 52
6.2.1.4.Süreksizliklerin Durumu 53
6.2.1.5.Yeraltı Suyu 53
6.2.1.6.Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme 54
6.2.2.Deformasyon Modülü Hesaplamaları 59
6.3.T-10 Tüneli Çıkış Portalı 59
6.3.1.RMR Sınıflandırma Sistemleri 60
6.3.1.1.Kaya Dayanımı 61
6.3.1.2.Kaya Kalite Göstergesi (RQD) 61
6.3.1.3.Süreksizlik Aralığı 62
6.3.1.4.Süreksizliklerin Durumu 63
6.3.1.5.Yeraltı Suyu 63
6.3.1.6.Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme 64
6.3.2.Deformasyon Modülü Hesaplamaları 69
6.4.Tünel Kazı ve Tahkimat İşleri 69
6.4.1.B Kaya Sınıfı 71
6.4.1.1.B2 Kaya Sınıfı 72
6.4.1.2.B3 Destek Sınıfı 74
6.5.C Kaya Sınıfı 75
6.5.1.C2 Destek Sınıfı 76
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 78

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KAYNAKLAR DİZİNİ..... 80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

1.1.Bandırma- Osmaneli Yüksek Hızlı Tren Hattı (https://www.bbyoyht.com/) 1
1.2. a) İnceleme alanı yer buldur haritası (https://www.harita.gov.tr/) b) T-10 tünelin Google Earth görüntüsü 2
3.1. Türkiye Tektonik Birlikleri'nden Sakarya Zonu (Oktay ve Tüysüz, 1999) 4
3.2. Sakarya Zonuna ait temel birimlerin stratigrafik kesiti (Ölçeksiz) (AYGM, 2023) 7
3.3. İnceleme alanı ve çevresinde yer alan faylar (AYGM,2023) 11
4.1. Tünel En Kesit 15
4.2. TBM Makinesi 16
4.3. NATM yöntemi ile tahkimat elemanları (AYGM, 2023) 17
5.1. SK-1 sondajına ait karot sandık fotoğrafı 24
5.2. SK-2 sondajına ait karot sandık fotoğrafı 25
5.3. T-10 Tünelin kesitine göre birimler ve sondajlar 26
5.4. SK-4 sondajına ait karot sandık fotoğrafı 27
5.5. T-10 Tünelin kesitine göre birimler ve sondajlar 28
5.6. SK-7, SK-8, SK-9 ve SK-10 sondajlarına ait karot sandık fotoğrafı 30
6.1. RMR Sınıflamasında Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski, 1989) 41
6.2. RMR Sınıflamasında RQD Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski,1989) 42
6.3. RQD-Süreksizlik Aralığı arasındaki ilişki grafik (Bieniawski, 1989) 43
6.4. Süreksizlik aralığı-RMR Puanı grafik (Bieniawski, 1989) 43
6.5. Bazalt Birimine Ait Parametrelerini ait RocLab Programı (TCDD Teknik ,2024) 48
6.6. RMR Sınıflamasında Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski, 1989) 50
6.7.RMR Sınıflamasında RQD Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski, 1989) 51
6.8.RQD-Süreksizlik Aralığı arasındaki ilişki grafiği (Bieniawski, 1989) 52
6.9.Süreksizlik aralığı-RMR Puanı grafik (Bieniawski, 1989) 53
6.10. Spilitik Bazalt Birimine Ait Parametrelerini ait RocLab Programı (TCDD Teknik,2024) 58
6.11. T-10 tüneli Çıkış Portal Kesimi 60
6.12. RMR Sınıflamasında Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski, 1989) 61
6.13. RMR Sınıflamasında RQD Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski, 1989) 62
6.14.RQD-Süreksizlik Aralığı arasındaki ilişki grafiği (Bieniawski, 1989) 62
6.15. Süreksizlik aralığı-RMR Puanı grafik (Bieniawski, 1989) 63
6.16. Çamurtaşı Birimine Ait Parametrelerini ait RocLab Programı (TCDD Teknik ,2024) 68
6.17.Bazalt birimindeki demiroksit ve kalsit dolguları 72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

6.18. Çalışma alanın ilk kaplama 73
6.19. Çalışma alanı kemer beton uygulaması 75
6.20. Çalışma alanın çelik hasır uygulaması 77

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

5.1. Bazalt birimi kaya kütlesi tanımlama ölçütleri 19
5.2. Spilitik bazalt birimi kaya kütlesi tanımlama ölçütleri 21
5.3. Çamurtaşı birimi kaya kütlesi tanımlama ölçütleri 22
5.4. Sahada uygulanan BST Deneyleri 31
5.5. BST Deneyi Sonuçları 33
5.6.Laboratuvar Deney Sonuçları 35
6.1. RMR süreksizlik yönelimine göre düzeltme 44
6.2.Giriş Portal kesimi için yapılan RMR sınıflama parametreleri (Bazalt) 45
6.3.RMR Kaya sınıflamaları ve derecelendirme 46
6.4. Çalışma alanın Giriş Portalı için elde edilen jeomekanik parametreler 47
6.5. RMR Süreksizlik yönelimine göre düzeltme 54
6.6. Orta kısım için yapılan RMR Sınıflama Parametreleri (Spilitik Bazalt) 55
6.7. RMR Kaya sınıflamaları ve derecelendirme 56
6.8. Çalışma alanın Orta kesimi için elde edilen jeomekanik parametreler 57
6.9. RMR süreksizlik yönelimine göre düzeltme 64
6.10. Çıkış portal kesimi için yapılan RMR Sınıflama Parametreleri (Çamurtaşı) 65
6.11. RMR Kaya sınıflamaları ve derecelendirme 66
6.12. Çalışma alanın Çıkış Portalı için elde edilen jeomekanik parametreler 67
6.13. Destek Sınıflandırma (KTŞ, 2023) 70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
σ	Basınç Direnci
γ	Birim Hacim Ağırlık
UCS	Kayaç Malzemesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı
mi	Kayaç Malzemesine Ait Boyutsuz Malzeme Sabiti
D	Örselenme Faktörü
E	Elastisite Modülü
Ei	Sağlam kayanın elastik modülü
c	Kohezyon
Φ (o)	İçsel Sürtünme Açısı
μ,V	Poisson Oranı
P	Yenilme Yükü
σ c	Tek Eksenli Sıkışma

Kısaltmalar	**Açıklama**
BST	Basınçlı Su Testi
GSI	Jeolojik Dayanım İndisi
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
MPa	Mega Pascal
NATM	Avusturya Tünel Açma Metodu
RQD	Kaya Kütle Göstergesi
RMR	Jeomekanik Sınıflandırma
TBM	Tünel Açma Makinesi
YASS	Yeraltı Suyu Seviyesi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

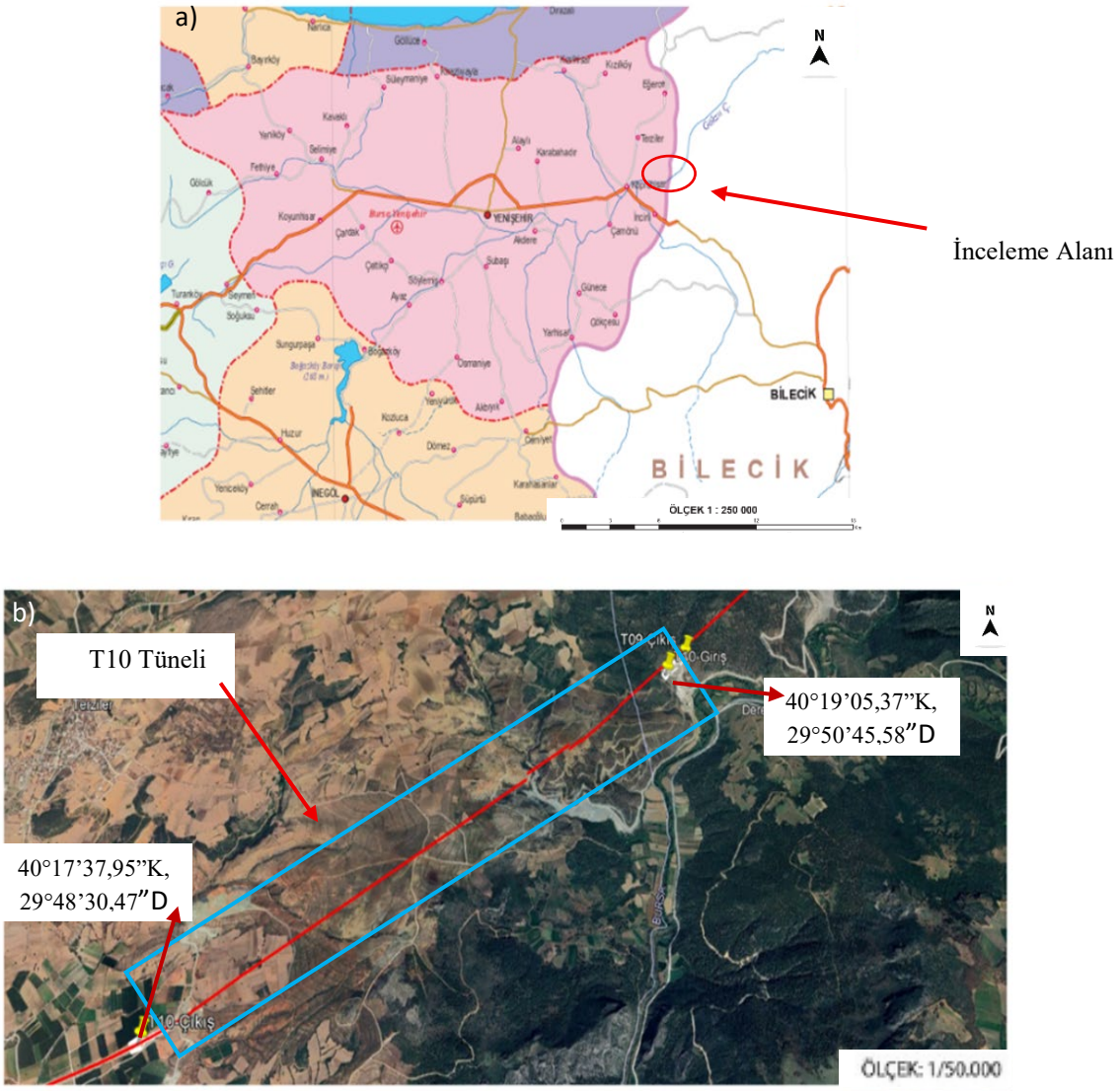
Bandırma -Osmaneli Yüksek Hızlı Tren Projesi kapsamında, 201 km uzunluğunda, tamamen elektrikli ve sinyalli yeni bir çift hatlı demiryolu inşası planlanmıştır. Projede 9 istasyon, 29 tünel, 15 viyadük, 35 köprü ve 99 altgeçit yer almaktadır (Şekil 1.1).

Bandırma–Osmaneli Yüksek Hızlı Tren Projesi kapsamında planlanan hat, Gürsu ve Yenişehir güzergâhını izleyerek Osmaneli mevkiinde inşa edilecek müselles hat aracılığıyla Ankara–İstanbul Yüksek Hızlı Tren hattına birleşecektir. Projenin tamamlanmasıyla birlikte Ankara–Bursa arasındaki ulaşım süresinin yaklaşık 2 saat 15 dakikaya, Bursa–İstanbul arasındaki ulaşım süresinin ise yaklaşık 1 saat 15 dakikaya düşürülmesi öngörülmektedir. Projede yıllık tahmini yolcu sayısının yaklaşık 29,9 milyon kişi olacağı öngörülmektedir. Güzergâhın, Bursa'nın batı kesiminde konumlanan Karacabey ilçesinden geçerek Bandırma'ya ulaşacak şekilde planlandığı belirtilmektedir.



Şekil 1.1.Bandırma- Osmaneli Yüksek Hızlı Tren Hattı (https://www.bbyoyht.com/)

T-10 Tüneli, Bursa şehrindeki Hayriye köyü yakınlarında bulunmaktadır. Tez konusu, Bandırma -Osmaneli Yüksek Hızlı Tren Projesi'nin Bursa Kesimi içerisinde bulunan Km: 19+553 ile Km: 23+500 arasındaki güzergâhta olan projeye ait T-10 Tüneli'ni kapsamaktadır (Şekil 1.2.).



Şekil 1.2. a) İnceleme alanı yer buldur haritası (https://www.harita.gov.tr/) b) T-10 tünelin Google Earth görüntüsü

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Batı Anadolu'da yapılan kapsamlı jeolojik çalışmalar uzun yıllardan beri devam etmektedir.

Bölgeye ilişkin ilk çalışmalar, 19. yüzyılın ortalarından 20. yüzyılın başlarına kadar uzanan dönemde Hamilton ve Strickland (1841), Tchihatcheff (1869), Washington (1894) ile Phillipson (1913) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu erken dönem çalışmaların, bilimsel ayrıntıdan ziyade arazi gözlemlerine ve keşif amaçlı gezilere dayandığı anlaşılmaktadır. Bölgenin jeolojik özelliklerinin sistematik ve ayrıntılı biçimde ele alınması ise 1950'li yıllar sonrasında mümkün olmuş; bu tarihten itibaren farklı araştırmacılar tarafından çok sayıda kapsamlı inceleme yapılmıştır.

Şengör ve Yılmaz (1981) çalışmalarına göre Kretase–Paleosen yaşlı ofiyolitik bir melanj topluluğunu Arkotdağ Formasyonu adı altında tanımlamış; söz konusu birimin oluşumunu, Rodop-Pontid bloğu altında kuzeye doğru dalımlı bir dalma-batma sistemine bağlı olarak gelişen bir hendek ortamında meydana gelen eş zamanlı sedimanter ve tektonik süreçlerle açıklamıştır. Gelibolu'dan Ilgaz Masifi'ne kadar izlenebilen bu ofiyolitik kenetlenme kuşağı, bu çalışmada İntra-Pontid Kenet Zonu olarak adlandırılmakta ve Rodop-Pontid bloğu ile Sakarya Kıtası arasındaki temel tektonik sınırı temsil etmektedir.

Yiğitbaş ve Tunç (2020), "Biga Yarımadası'nda Sakarya Zonunun Prekambriyen Metamorfik Kayaları; Geç Ediyakaran Gondwanaland Aktif Kıta Kenarı" adlı çalışmalarına göre Kalabak Grubu, Sazak ve Torasan formasyonlarını kapsayan bir litostratigrafik topluluk olup, söz konusu birimler Devoniyen yaşlı Çamlık metagranodiyoriti tarafından kesilmek amacıyla alışma alanını da içeren yayın haline getirmiştir.

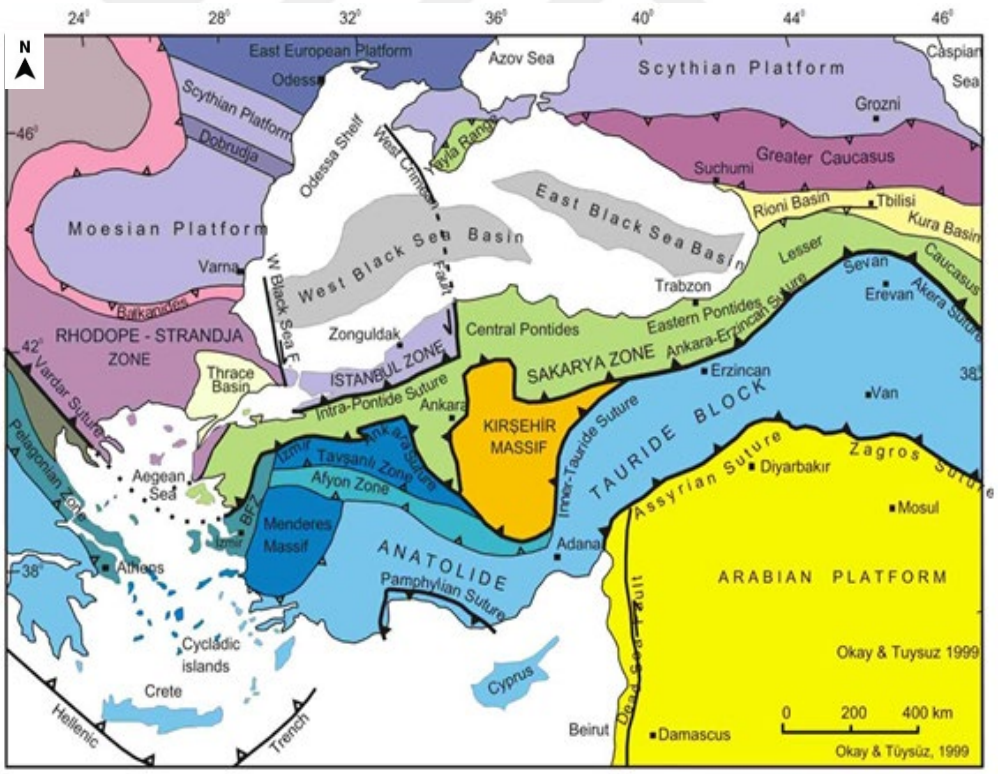
Yazıcı (2020), "İznik-Mekece Arasında Jeomorfolojik Gözlemler" başlıkşı çalışmasında İznik Gölü'nün doğusu ile Mekece arasında yer almakta olup KAFZ denetiminde gelişmiş bir graben sistemi içerisinde bulunmakta olan dağlık alanların, platoların vb. yerlerin jeomorfolojik gelişimin ileri gençlik evresinde olduğunu göstermekte olan makaledir.

3. İNCELEME ALANIN JEOLOJİSİ

3.1. Bölgesel Jeoloji ve Stratigrafi

3.1.1. Sakarya Zonu

İnceleme alanı, literatürde Sakarya Zonu olarak tanımlanan tektono-stratigrafik kuşak içinde konumlanmaktadır (Şengör ve Yılmaz, 1981; Okay, 1989) (Şekil 3.1.). Sakarya Zonundaki en yaşlı kayaçları, Uludağ ve Kazdağı masiflerinde görülen yüksek dereceli metamorfik litolojilerden meydana geldiği belirtilmiştir. Bu kayaçların, KD-GB doğrultusunda uzandığı ve yeşilşist–mavişist fasiyesinde metamorfizmaya uğramış Kalabak Grubu ile tektonik dokanakla sınırlandığı saptanmıştır.



Şekil 3.1. Türkiye Tektonik Birlikleri'nden Sakarya Zonu (Oktay ve Tüysüz, 1999)

Metamorfik temel kayaçların üzerinde, uyumsuz bir dokanakla Karbonifer–Permiyen karbonatları ve daha üstte Permiyen–Triyas yaşlı Karakaya Kompleksi yer almaktadır. Sakarya Zonu örtü birimlerinin, alttaki temel kayaçlar üzerine açısal uyumsuzlukla yerleştiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.2.).

3.1.2. Kalabak Grubu

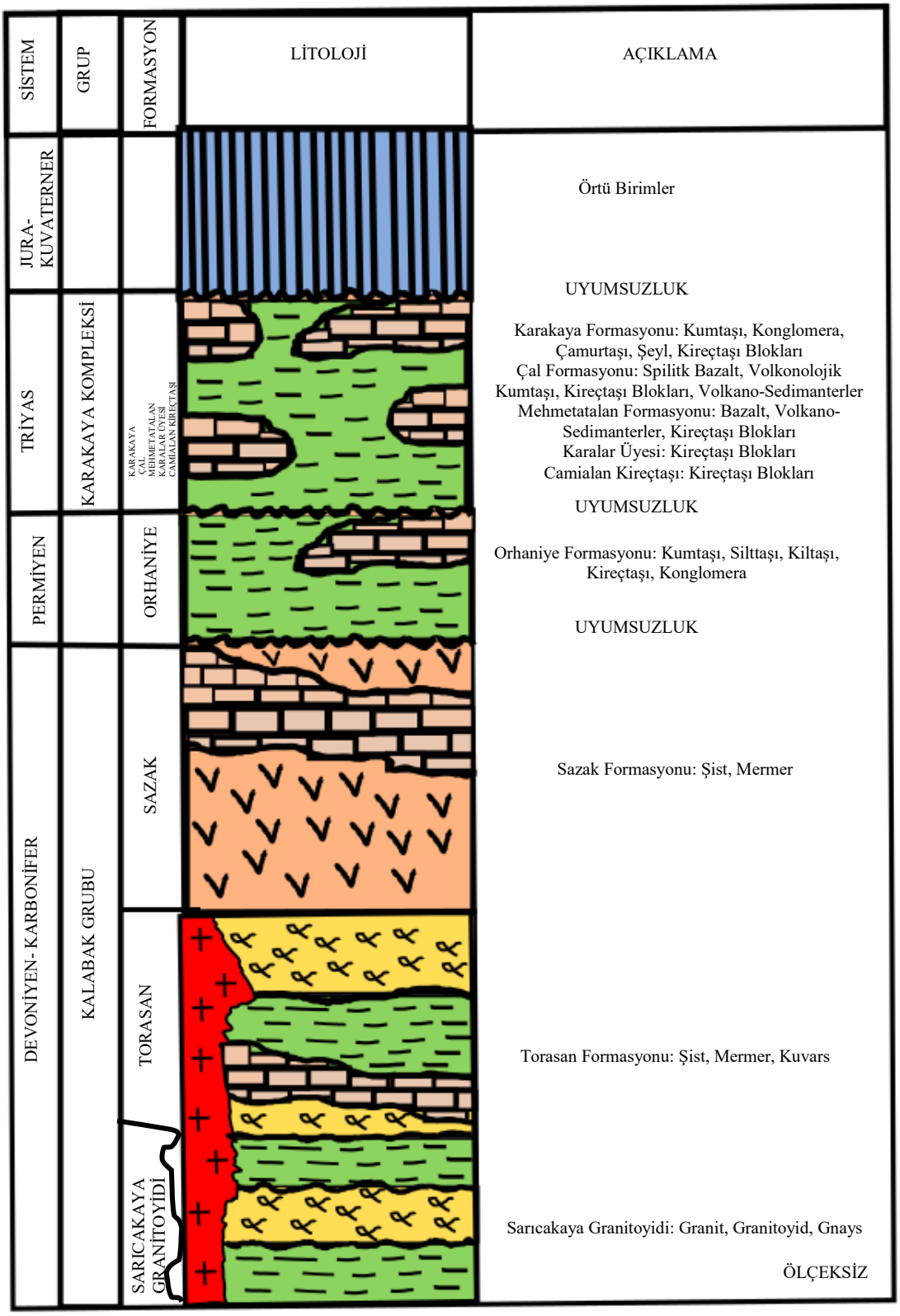
Sakarya Zonu boyunca geniş alanlarda yüzeylenen Kalabak Grubu'nun, kıtasal ve olası okyanusal kökenli litolojilerden oluştuğu ve yeşilşist ile yer yer mavişist fasiyesinde metamorfizmaya uğradığı gözlenmiştir (Duru vd., 2012). Adını en iyi gözlendiği Kalabak bölgesinden alan bu grup, alt seviyelerde kıtasal kökenli metamorfitlerden oluşan Torasan Formasyonu ve üst seviyelerde volkanik kökenli metamorfitlerden oluşan Sazak Formasyonu şeklinde iki alt birime ayrılmıştır (Duru vd., 2007, 2009, 2012).

Torasan Formasyonu'nu stratigrafik açıdan, Permiyen yaşlı Orhaniye Formasyonu, Triyas yaşlı Karakaya Kompleksi ve daha üstte Jura yaşlı Bayırköy Formasyonu açısal uyumsuz bir dokanakla takip etmektedir. Formasyon içerisinde yer yer ara seviyeler hâlinde mermer bantlarının geliştiği gözlenmiştir. Pelitik kökenli fillat, kuvars-mikaşist, kuvarsşist, turmalin–sillimanit–biyotit gnays, andaluzit-mikaşist ve mermer litolojilerinden oluşan Torasan Formasyonu'nun genel olarak ince taneli, belirgin yapraklanmalı ve kıvrımlı bir iç yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, formasyonda bulunan grafit şistlerin hem yanal hem de düşey doğrultuda fillat ve şist litolojilerine geçişli bir karakter sunduğu tespit edilmiştir.

Birim içerisinde yaygın olarak gelişmiş kuvarsit damarları ile pirit kristallerinin varlığı, formasyonun ayırt edici petrografik özellikleri arasında değerlendirilmektedir. Torasan Formasyonunun görünür kalınlığının 500–750 m aralığında değiştiği saptanmıştır. Ayrıca formasyonun, içinde yer alan Sazak Formasyonu ile tektonik dokanak ilişkisi gösterdiği ve bölgedeki Devoniyen–Karbonifer yaşlı granitoyid sokulumları tarafından kesildiği ortaya konulmuştur.

Torasan Formasyonu ile Sazak Formasyonu üzerine Orhaniye Formasyonunun uyumsuz olarak geldiği belirlenmiştir. Orhaniye Formasyonu; sarımsı, pembemsi, beyazımsı ve grimsi tonlarda gözlenen, genel olarak iri taneli, kuvars ve feldspatça zengin, yer yer orta–kalın tabakalı kumtaşları ile bunlara eşlik eden karbonatlı kumtaşları, killi kireçtaşları, şeyl, silttaşı ve kiltaşı ardalanmasından oluşmaktadır.

Formasyonun alt kesimleri sığ deniz çökelleriyle temsil edilirken, üst bölümlerde platform tipi karbonatlara doğru geçişli bir fasiyes gelişimli bir sedimantolojik karakter sergilediği gözlemlenmiştir. Birimin yaklaşık kalınlığının 150–200 m aralığında olduğu stratigrafik ölçümlere dayanılarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Sakarya Zonuna ait temel birimlerin stratigrafik kesiti (Ölçeksiz) (AYGM, 2023)

3.1.3. Karakaya Kompleksi

Triyas yaşlı Karakaya Kompleksi'nin, düşük dereceli metamorfizmaya uğramış çakıltaşı, kumtaşı, kuvarsit, silttaşı, şeyl, çamurtaşı, radyolarit, spilitik bazalt, diyabaz ve metaspilit litolojilerinden oluştuğu belirlenmiştir. Karmaşık yapılı bu birimin formasyon ölçeğinde farklı litolojiler içerdiği, çoğunlukla tektonik dokanaklarla sınırlandığı ve düzenli stratigrafik istiflenmelerin bulunmadığı saptanmıştır.

Kompleks; kırıntılı istiflerden oluşan Karakaya Formasyonu, bordo renkli spilitik bazaltlardan oluşan Çal Formasyonu, yeşil bazalt, piroklastik ve volkanosedimenter birimlerden oluşan Mehmetalan Formasyonu ve üst seviyelerde pelajik–yarı pelajik rekristalize kireçtaşlarından oluşan Camialan Kireçtaşı olarak alt birimlere ayrılmıştır.

Çal Formasyonu, Hayriye köyü ve çevresinde gözlemlenmiştir. Mor–kahverengi spilitik bazaltlar, yeşil diyabazlar, tüf–lapilli, aglomera, volkanojenik kumtaşı ve silttaşı örneğin litolojiler ile pelajik kireçtaşı ve çamurtaşı seviyelerine rastlanmıştır. İstif içerisinde Permiyen ve Karbonifer yaşlı kireçtaşı bloklarının bulunduğu tespit edilmiştir.

Mehmetalan Formasyonu; tabakalı bazalt, volkanoklastik kayaçlar ve diyabazlardan oluşmaktadır. Birimin renkleri genellikle yeşil, yer yer gri ve siyaha yakın tonlarda gözlenmiş; rekristalize kireçtaşı ve kumtaşı–kiltaşı ara seviyeleri tanımlanmıştır. Kaotik yapıda olan bu formasyonun çok düşük dereceli metamorfizmadan etkilendiği veya ilksel yapısını koruduğu belirlenmiştir. Diğer Karakaya Kompleksi birimleriyle çoğunlukla tektonik dokanaklı ilişkiler sunduğu ve yanal devamlılığının düşük olduğu tespit edilmiştir. Karalar Üyesi kireçtaşlarından elde edilen veriler doğrultusunda, birimin Erken Triyas yaşlı olduğu değerlendirilmiştir (Pehlivan vd., 2014).

Bayırköy Formasyonu, Yeniyörük, Orhaniye, İlyasça ve Balçıkhisar köyleri çevresinde yaygın olarak yüzeylenmektedir. Konglomera, kumtaşı, silttaşı, kiltaşı ve killi kireçtaşlarından oluşan birimin renkleri kırmızı, sarı, kahverengi ve bej tonlarında değişmektedir. Detritik kayaçlar kalın–orta tabakalı, pelitikler ise ince–orta tabakalıdır. Üst seviyelerde yaygın ammonit, belemnit ve brachiopod fosilleri içeren yumrulu kireçtaşları gözlemlenmiş; bu fasiyesin Ammonitico Rosso olarak tanımlandığı belirtilmiştir. Kalınlık bakımından yanalda önemli değişimler sunan istif, karasal konglomeralarla başlayıp lagünal–sığ denizel ve giderek derinleşen transgresif fasiyeslerle sonlanmaktadır.

3.1.4. Yamaç Molozu

Yüksek topoğrafyaya sahip alanların yamaç ve eteklerinde, çoğunlukla tutturulmamış veya düşük tutturulma derecesine sahip, köşeli çakıl, blok, kum ve kil bileşimli sedimanter birikintiler tanımlanmıştır. Bu tür birikintiler, mühendislik jeolojisi açısından yamaç molozu olarak sınıflandırılmıştır.

3.1.5. Alüvyon

Akarsu yataklarında, vadi tabanlarında ve alüvyal ovalarda gelişen; çakıl, kum, silt ve çamur bileşimli, tutturulmamış veya yer yer az tutturulmuş çökeller, alüvyon birimi olarak tanımlanmıştır. Sakarya Nehri ve Yenişehir ovaları boyunca geniş alanlara yayılan bu birimin, ovayı dolduran sedimanter malzemelerden oluştuğu belirlenmiştir.

3.2. Yapısal Jeoloji ve Tektonik

İnceleme alanı ve yakın çevresinde, Sakarya Zonu, İntra-Pontid Sütur Zonu, İzmir–Ankara Zonu ve Tavşanlı Zonu olmak üzere dört ana tektono-stratigrafik birim tanımlanmıştır. Bölgede, kuzeyden güneye uzanan bindirmeli yapılar ile KD-GB ve D–B normal faylar ve doğrultu atımlı fayların yaygın olduğu tespit edilmiştir. Geç Miyosen–Pliyosen yaşlı birimleri kesen ana fayların, bindirme yönleri açısından yerel farklılıklar gösterdiği rapor edilmiştir (Okay, 2011).

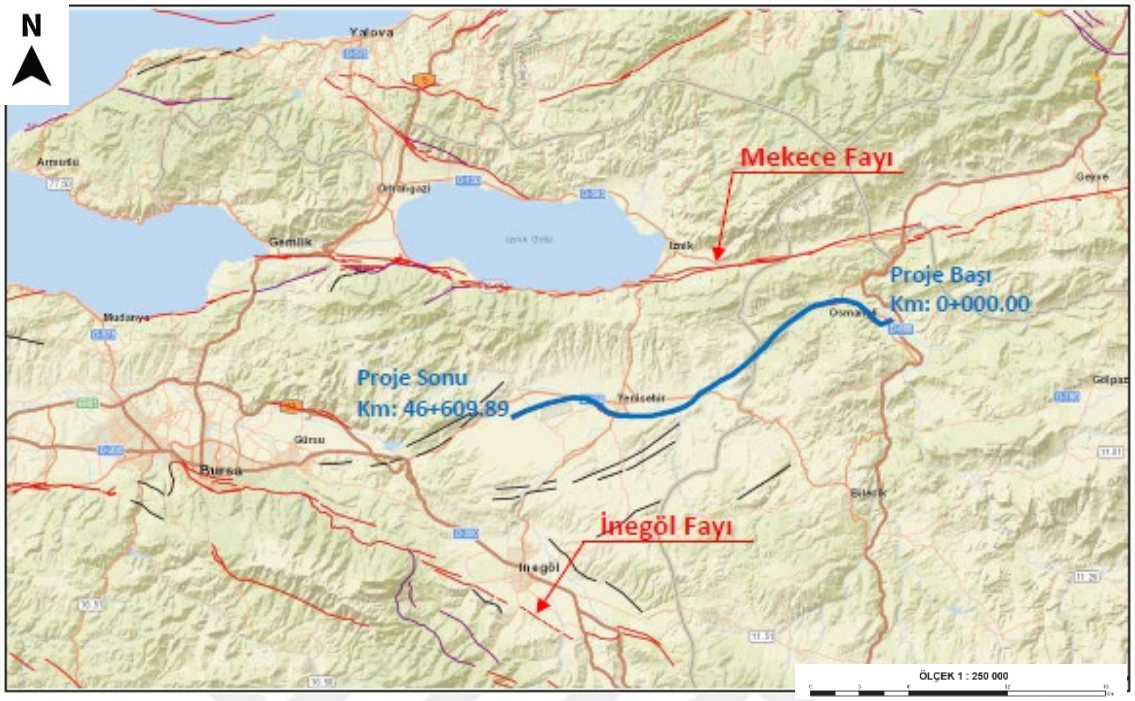
Kalabak Grubu ile Karakaya Kompleksi arasında gözlenen ofiyolitik kayaçların, Jura öncesi Tetis Okyanusu'na ait jeolojik oluşumlar olduğu belirlenmiştir. Bu kayaçların, iki aşamalı tektonik dilimlenme süreci ile yerleştiği ve Erken Kretase döneminde Anatolid–Torid Bloğu'nun pasif kıta kenarı konumunda bulunduğu anlaşılmıştır. Geç Kretase'de Neo-Tetis Okyanusu'nun kapanması ve Paleosen'de Sakarya Kıtası ile Anatolid–Torid Bloğu'nun çarpışması sonucunda, Alpin orojenezi ve bölgesel deformasyonun geliştiği ortaya konulmuştur (Okay, 2011).

3.2.1. Depremselliği

Bursa ili, yüksek nüfus yoğunluğu ve sanayi faaliyetlerinin gelişmiş olması nedeniyle Türkiye'nin önemli ekonomik merkezlerinden biri konumundadır. Ancak bu özellikler, kenti deprem tehlikesi bakımından oldukça hassas hale getirmektedir. Bölge, sağ yanal doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fay Zonunun etkisi altındadır. Karlıova yakınlarından başlayan bu fay zonu, Anadolu'nun kuzey kesimini boydan boya kat ederek Marmara Denizi'ne ulaşmakta ve burada kuzey, orta ve güney olmak üzere üç kola ayrılmaktadır.

Kuzey Kolu; Sapanca, Gölcük ve Çınarcık hattını izleyerek Marmara Denizi'nin üzerinden Saros Körfezine kadar devam etmektedir. Orta Kolu; Geyve, Mekece, İznik Gölü Güneyi ve Gemlik Körfezi hattı boyunca uzanmaktadır. Güney Kolu ise Geyve ilçesinden başlayarak Yenişehir ilçesi ve Bursa ili üzerinden Biga Yarımadasına ulaşmaktadır. Bursa ili ve T-10 Tüneli güzergâhı hem kuzey hem de orta kolun etkisi altında bulunmaktadır.

Çalışma alanının güney-güneydoğu, İnegöl ilçesi çevresinde KB–GD doğrultulu aktif, Holosen yaşlı normal faylar içeren İnegöl Fay Zonu uzanmaktadır (Emre vd., 2011). Bu fay zonu boyunca, özellikle Kınık Köyü'nün kuzeydoğusunda yer yer traverten oluşumlarının geliştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca İznik ilçesinin güneyinde, doğu–batı (D-B) ve devamında kuzeydoğu–güneybatı (KD-GB) doğrultusunda uzanan İznik–Mekece Fayı'nın, Kuzey Anadolu Fay Zonunun güney kolunu oluşturduğu bildirilmiştir (Emre vd., 2011). Çalışma alanı ve çevresinde yer alan fayların haritası Şekil 3.3 'de verilmiştir.



Şekil 3.3. İnceleme alanı ve çevresinde yer alan faylar (AYGM,2023)

3.3. Hidrojeoloji ve Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri

Bursa Havzası'nda, sürekli ve mevsimlik akarsuların varlığıyla zengin bir yüzey suyu ağı oluşturulmuştur. Havza içerisindeki pek çok dere, sulama kanalı ve kurutma kanalları aracılığıyla Nilüfer Çayına yönlendirilmiştir. Nilüfer Çayının havzası dışında doğması ve yine havza dışına doğru ilerlemesi nedeniyle, havza alanı hidrolojik olarak su bölüm hattı ile sınırlandırılmıştır. Bu hat, kuzeyinde Dürdane deresi ve Demirtaş deresi arasında yer alan topografik yükseltiden başlatılmış; güneyinde Çakmakkaya deresi ve Çubuklu deresi arasında sonlandırılmıştır. Su bölüm hattının batıda kalan alanda Nilüfer Çayı ile Dürdane deresi, Cilimboz deresi ve Kayaoğlanı deresi konumlanmıştır.

Nilüfer Çayı, Bursa Ovası'nın başlıca akarsuyu olarak tanımlanmıştır. Keles ilçesinin yaklaşık 10–15 km kuzeyde, Topel Dağından doğduğu ve 25,35 kilometrelik kısmının havza içerisinde Menderesler çizerek aktığı belirlenmiştir. Bu akarsu, ovayı terk etmeden önce önemli bir drenaj rolü üstlenmektedir. Bursa ilinin batısında, Uludağ'ın eteklerinde yer alan aktif fay hatları boyunca yüzeye çıkan sıcak sularla çeşitli doğal kaynakların oluştuğu gözlemlenmiştir.

Bölgedeki yeraltı suyu, yağışların doğrudan infiltrasyonu, yüzey akışı ile taşınan suların zemine sızması ve çevredeki karbonat kayaçlarından gerçekleşen yanal girişlerle beslenmektedir. Güneyde yer alan alüvyon konilerinin yüksek geçirgenliği, beslenme sürecinde önemli katkı sağlamaktadır (DSİ, 1973).

Alüvyon kalınlığı ve akifer verimi bölgesel olarak farklılık göstermektedir:

- Orta ve doğu kesimlerde, alüvyon kalınlığının 140–200 metre arasında değiştiği ve bu bölgelerde artezyen veriminin 20–35 lt/s arasında olduğu tespit edilmiştir.

- Kuzey ve kuzeydoğu kesimlerde, alüvyonun yaklaşık 100 metre kalınlığında olduğu, malzemenin ince taneli, derecelenmesi bozuk ve porozitesinin düşük olması nedeniyle yeraltı suyu işletmesine elverişli olmadığı belirtilmiştir. Bu alanlarda kuyu verimlerinin 10 lt/s'yi geçmediği bildirilmiştir.

- Batı ve kuzeybatı kesimlerde, alüvyon kalınlığının 150–200 metreye ulaştığı ve bu alanların ovanın en verimli kesimleri olduğu vurgulanmıştır.

Yamaç molozu ve akarsu yelpazesi tarafından oluşturulan alanlarda, alüvyon kalınlığı sırasıyla 100 m ve 20 m olarak ölçülmüş; bu bölgede açılacak kuyularda ortalama 50 lt/s debi elde edilebildiği ve dinamik seviyeye yaklaşık 10–15 metre derinlikte ulaşılabildiği ifade edilmiştir (DSİ, 1973).

Çalışma alanı kapsamında Permiyen öncesine ait Dereyörük Formasyonunda yer alan foliasyonlu metamorfik kayaçlar ile bunlara eşlik eden mermerlerin kırık ve çatlaklarında sınırlı miktarda yeraltı suyu bulunduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu birimlerin genel olarak akifer özelliği göstermediği ve geçirimsiz karakterde olduğu ifade edilmiştir (Doyuran vd., 2000). Neojen yaşlı konglomera, kiltaşı, silttaşı ve marnların ise az miktarda su taşıyor olmalarına rağmen akifer niteliği taşımadığı belirtilmiştir (Doyuran vd., 2000).

Yenişehir Ovası'nda akifer özelliği gösteren birimlerin Kuvaterner yaşlı alüvyonlar olduğu bildirilmiştir. Bu alüvyonların hidrolik iletkenliğinin 5–79 m/gün arasında değiştiği, iletkenlik katsayısının kuzeyde 5–10 m/gün örneğin düşük değerlerde olduğu ve güneye doğru artarak Kocasu Nehri civarında 65–75 m/gün seviyelerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu değişimin, kuzeyde killi ve siltli, güneyde ise kumlu ve çakıllı malzemeden oluşan litolojik yapıyla ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.

Yenişehir–Osmaneli güzergahı boyunca yeraltı su seviyelerinin yüksek olduğu kesimlere rastlanmaktadır. Güzergahın başlangıç noktası olan Osmaneli bölümünde Sakarya Nehri geçilmekte olup, bu kesimde yeraltı su seviyelerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Güzergahın dağlık araziye girdiği ve T-10 Tüneli çıkışına kadar bu morfolojik özelliklerin sürdüğü tespit edilmiştir. Km: 23+500 sonrasında ise güzergahın Yenişehir Ovası içerisinde ilerlediği kesimlerde genel olarak yüksek yeraltı su seviyeleri kaydedilmiştir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

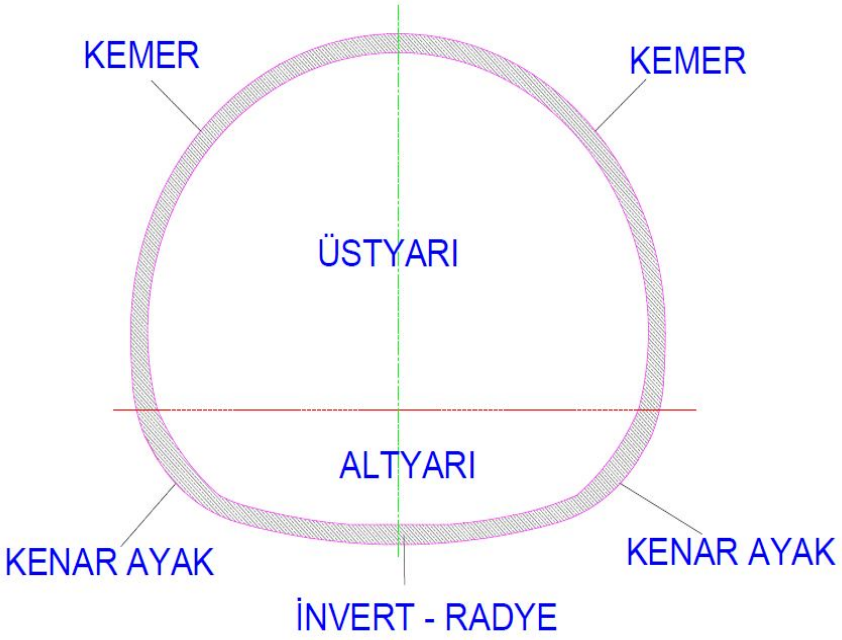
4.1. Tünelcilik ve Kullanılan Genel Terimler

Günümüzde, özellikle büyük kentlerdeki hızlı nüfus artışıyla birlikte ulaşım sorunları ön plana çıkarılmıştır. Bu sorunların çözümünde en etkili mühendislik yapılarından biri olarak tünellerden yararlanılmaktadır. Tüneller; farklı jeolojik birimler içerisinde yeraltı kazılarıyla oluşturulan ve genellikle iki çıkış noktası bulunan mühendislik yapılarıdır (Köse vd., 2007).

Madencilik faaliyetlerinde olduğu gibi, tünel açımında da uygulanacak yöntemin güvenli, maliyet açısından ekonomik ve teknolojiye uygun olması gerekmektedir. Bu doğrultuda, araştırmalar, deneysel çalışmalar ve ölçümler yürütülmekte; yeni şartlara bağlı olarak tekniklerin geliştirilmesine önem verilmektedir.

Tünel Açma teknolojisinde gözlemlenen ilerlemeler sayesinde, yeni yöntemlerle birlikte çeşitli makineler, araçlar ve ekipmanların kullanımı mümkün hâle getirilmiştir. Yüksek maliyetli tünel yapım işlerinde, yapı kaynaklı olası durumlar ve özellikle şehir içi projelerde dikkat edilmesi gereken zaman etkisi, mühendislik açısından yeni metotlara olan ihtiyacı artırmıştır. Bu neden ile, mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği uygulamalarının önemi gittikçe artmaktadır (Kun, 2010).

Bir tünelde, en kesite bakıldığı zaman tünel boşluğunun alt kısmına invert veya radye olarak tanımlanırken yan kısımlarına ise ayak, üst kısmına kemer olarak adlandırılmaktadır (Şekil 4.1.).



4.2. Tünel Tipleri

- **Kare Kesitli:** Genellikle otoyol ve denizaltı tünellerinde, aç-kapa tünellerde tercih edilir.

- **Eliptik:** Kanalizasyonlarda veya su iletim tünellerinde tercih edilir.

- **Dairesel kesitli:** TBM ve Kalkan (shield) tünellerde tercih edilir.

- **At Nalı Kesitli:** Kaya kütlelerinde açılan tünellerde tercih edilir. Tünel tavanında beton kaplama sayesinde sıkışma dayanımı karşılanmış olur**.**

T-10 tüneli tünel tip olarak at nalı kesitli tünelde yer almaktadır.

4.3. Tünel Açma Yöntemleri

Tüneller genel olarak tanımda da olduğu gibi Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ve TBM ile Tünel Açma Yöntemi olmak üzere iki yöntem bulunmaktadır.

4.3.1. TBM (Tünel Delme Makinesi) ile Tünel Açma Yöntemi

Kazı işleminin gerçekleştirilebilmesi için Tünel Açma Makinesi (TBM) üzerinde yer alan itme silindirleri beton segmentlere dayanmakta, ardından kesici kafa aynaya doğru itilerek dönmeye başlamaktadır (Şekil 4.2.). Beton segmentlerin yerleştirilmesi için gerekli açıklığın elde edilmesinden sonra kazı işlemi durdurulmaktadır. Sonrasında, TBM üzerindeki basınçlı erektörler yardımıyla beton segmentler tünel çeperine yerleştirilmekte ve cıvatalar (bulonlar) aracılığıyla birbirine monte edilmektedir. Son aşamada, kazı yüzeyi ile segmentler arasına beton enjeksiyonu yapılarak tahkimat işlemleri tamamlanmaktadır.



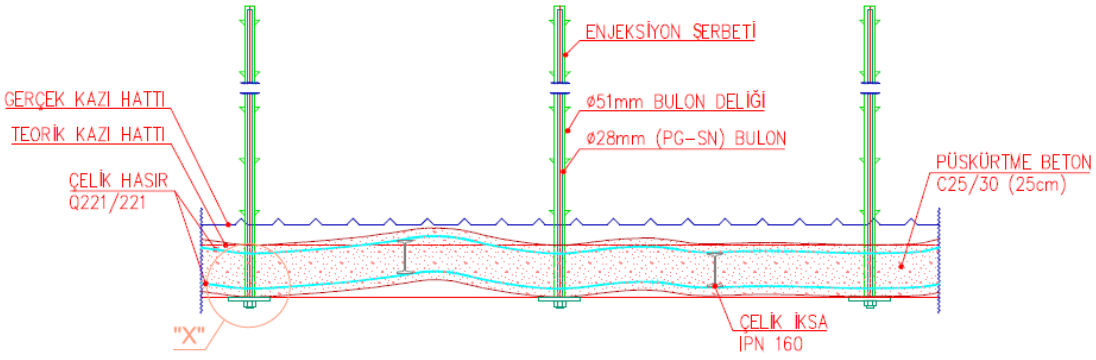
4.3.2. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi

Tünelcilik alanında modern tasarım ve popüler olan yöntemlerden biri, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) olarak adlandırılmaktadır. Bu yaklaşımda, kazı sonrasında ortaya çıkan yüklerin önemli bir bölümünün çevrede yer alan kaya kütlesi tarafından taşınması sağlanmakta ve böylece doğal kaya dayanımının aktif bir bileşen olarak tasarıma dâhil edilmesi hedeflenmektedir.

NATM'nin temel felsefesi, kazı işlemine bağlı olarak oluşabilecek ek gerilme ve deformasyonların kontrollü biçimde izlenmesi, yönetilmesi ve söz konusu süreçlerin kaya kütlesinin uzun vadeli kararlılığını koruyacak şekilde yönlendirilmesine dayanmaktadır.

Yöntemin ana amacı, kazı sonrası ortamın mevcut dayanım özelliklerinin mümkün olduğunca muhafaza edilmesi ve çevreleyen kayaçların kendi kendine yeterli bir taşıyıcı sistem geliştirmesine imkân tanınmasıdır. Bu kapsamda, kayacın yük taşıma kapasitesi aktif hâle getirilerek kazı ile yük altına giren ortamın, kendi dayanım özellikleri aracılığıyla yük taşıyan bir ortama dönüştürülmesi amaçlanmaktadır (Köse vd., 2007).

T-10 Tüneli'nde gerçekleştirilen kazı çalışmaları, NATM esasları çerçevesinde delme–patlatma yöntemi kullanılarak yürütülmüştür. Kazı aşamasını takiben sırasıyla iksa uygulamaları, çelik hasır yerleştirilmesi, yaklaşık 25 cm kalınlığında ön püskürtme beton imalatı, ankraj elemanlarının uygulanması ve son aşamada 25 cm kalınlığında final püskürtme beton kaplaması gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3.2.). NATM kapsamında, tünel zemininin mühendislik özelliklerine uygun oranlarda donatı, geçici destek elemanları ve kalıcı kaplama malzemeleri kullanılmaktadır. Ayrıca, kaplama basınçları ile zemin–destek etkileşiminin izlenmesi yöntemin temel bileşenlerinden biridir. Uygulamanın nispeten yavaş ilerlemesine karşın, tünel çevresinde oluşabilecek deplasmanların ve destek ihtiyacının minimum seviyede tutulması sayesinde ekonomik ve güvenilir bir çözüm elde edilmektedir (Şekil 4.3.).



5. İNCELEME ALANIN MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

5.1. Giriş

İnceleme alanının Osmaneli- Yenişehir arası T-10 Tünelinde üst seviyelerinde İnegöl formasyonuna ait çamurtaşı birimleri görülürken alt seviyelerinde ise Çal formasyonuna ait spilitik bazalt ve Mehmetalan formasyonuna ait bazalt birimleri kesilmiştir. Bununla birlikte sondaj ve arazi deney çalışmaları yapılarak zemin-kaya birimlerine ait mühendislik jeolojisi ve jeomekanik parametreler ortaya çıkartılmıştır.

Çalışma alanında gözlemlenen Mehmetalan Formasyonuna ait bazalt birimleri, Çal Formasyonuna ait spilit bazalt birimleri ve çamurtaşı birimi üzerinde tabaka ve çatlak ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca bu birimlerin dayanım, ayrışma ve süreksizlik gibi mühendislik özellikleri, sondaj ve arazi deneyleri ile desteklenerek incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda oluşan verileri tezde kullanılmak üzere mühendislik parametreleri hesaplanmıştır.

5.2. Birimlerin Mühendislik Jeolojisi Özellikleri

İnceleme alanındaki bazalt birimi, genel olarak orta-zayıf dayanımlı, yeşilimsi gri renkli, az ile orta derecede ayrışmış, yüzeye yakın kısımlarının ise çok ayrışmış olduğu gözlemlenmiştir. Yer yer demir oksit sıvamaları bulunduğu ve birimin zayıf-orta kaya kalitesine sahip olduğu elde edilmektedir (Çizelge 5.1.).

Süreksizlikler; 15°, 30° ve 45° eğim açıları ile açık-kapalı, seyrek ve parçalı yapıda tanımlanmıştır. Yüzeylerinin genellikle pürüzlü olduğu, süreksizlik aralıklarının <60 mm olduğu ve açıklıkların 60–200 mm arasında değiştiği tespit edilmiştir. Süreksizliklerin devamlılığı ise düşük ile orta seviyelerinde sınıflandırılmıştır.

Genellikle kuru olduğu gözlemlenen süreksizlik yüzeylerinde, bazı kesimlerde su akış izlerine rastlanmıştır. Güzergâhta yapılan süreksizlik ölçümlerinden eğim yönü/eğim açıları 126/20 ve eğim yönü/eğim açıları 277/41 olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.1. Bazalt birimi kaya kütlesi tanımlama ölçütleri

Kaya kütlesinin tanımlama ölçütleri		Özellikler
Jeolojik tanımlama		Bazalt
Rengi		Gri
Tane boyu		İnce – Çok İnce Taneli
Doku ve yapı		Masif
Süreksizlikler	Süreksizlik türleri	Eklem
	Süreksizlik durumu	Açık dolgulu – kapalı
	Süreksizlik aralığı	<60 mm
	Süreksizlik açıklığı	Orta geniş (60–200 mm)
	Dolgu malzemesi	-
	Pürüzlülük ve dalgalılık	Pürüzlü – dalgalı
	Süreksizlik yönelimi	126/20, 277/41 (Doğrultu/Eğim)
	Süreksizlik devamlılığı	Düşük, Orta
	Süreksizlik takım sayısı	2
	Su sızıntıları	Genellikle kuru, bazı yüzeylerde su akış izleri gözlemlenmiştir.
	Blok boyutu	Orta
Ayrışma		Az-orta (Yüzeye Yakın kesimler)
Dayanım		Orta-Zayıf, yer yer çok zayıf
İkincil Özellikler		Demir oksit sıvamaları

Çalışma alanındaki spilitik bazalt birimi sarımsı yeşil ve yeşilimsi gri renklerde, az ayrışmış, sert ve dayanımlı–orta dayanımlı özellikler göstermektedir. Birim, kırıklı yapıda olup süreksizliklerin varlığı belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Süreksizlik yüzeylerinde kil dolgular ve demir oksit sıvalar tespit edilmiştir (Çizelge 5.2.).

Süreksizlik aralıkları genellikle 60 mm'den küçük olup, açıklıklar orta genişlikte 60–200 mm olarak ölçülmüştür. Yüzey morfolojisi pürüzlü–dalgalı karakterde olup, süreksizliklerin devamlılığı 1–3 m ile 3–10 m arasında değişmektedir. Süreksizlik yüzeyleri çoğunlukla kuru gözlemlenmiş, ancak bazı kesimlerde su akma izlerine rastlanmıştır.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen süreksizlik ölçümlerinde, eğim yönü/eğim açıları 126/20 ve eğim yönü/eğim açıları 277/41 değerlerine ait süreksizlikler kaydedilmiştir. Bu veriler, birimin mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmesinde temel parametreler arasında yer almaktadır.

Çizelge 5.2. Spilitik bazalt birimi kaya kütlesi tanımlama ölçütleri

Kaya kütlesinin tanımlama ölçütleri		Özellikler
Jeolojik tanımlama		Spilitik bazalt
Rengi		Yeşil, yeşilimsi gri
Tane boyu		İnce – Çok ince taneli
Doku ve yapı		Şekilsiz
Süreksizlikler	Süreksizlik türleri	Eklem
	Süreksizlik durumu	Açık dolgulu – kapalı
	Süreksizlik aralığı	<60 mm
	Süreksizlik açıklığı	Orta geniş (60–200 mm)
	Dolgu malzemesi	-
	Pürüzlülük ve dalgalılık	Pürüzlü – dalgalı
	Süreksizlik yönelimi	126/20, 277/41 (Doğrultu/Eğim)
	Süreksizlik devamlılığı	Düşük, Orta
	Süreksizlik takım sayısı	İki
	Su sızıntıları	Süreksizlik yüzeyi kuru
	Blok boyutu	Orta
Ayrışma		Az-orta
Dayanım		Orta
İkincil özellikler		Demir oksit sıvamaları

Çamurtaşı, kırmızımsı–kahverengi tonlarda gözlenen, az–orta derecede ayrışmış, seyrek kırıklı ve yer yer çakıllı seviyeler içeren bir litolojik karakter sunmaktadır. Orta-zayıf dayanımlı olan bu birimde gözlemlenen süreksizlikler, 20°–30° açıklıkta, kil dolgulu ve kaygan özelliklidir (Çizelge 5.3.).

Süreksizlik aralıkları, orta derecede yakın ile dar aralıkta (6–60 mm) olup yüzey morfolojileri pürüzlü ve dalgalı olarak belirlenmiştir. Süreksizlik açıklıkları orta ile geniş aralıkta (20–200 mm) değişmekte; süreksizliklerin devamlılığı ise çok düşük ile düşük düzeyde gözlemlenmiştir. Süreksizlik yüzeyleri kuru olmakla birlikte, bazı kesimlerde su akma izlerine rastlanmıştır.

Çizelge 5.3. Çamurtaşı birimi kaya kütlesi tanımlama ölçütleri

Kaya kütlesinin tanımlama ölçütleri		Özellikler
Jeolojik tanımlama		Çamurtşı
Rengi		Kırmızımsı kahverenkli
Tane boyu		İnce – Çok ince
Doku ve yapı		Masif
Süreksizlikler	Süreksizlik türleri	Eklem
	Süreksizlik durumu	Açık dolgulu – Kapalı
	Süreksizlik aralığı	Orta derecede yakın – Dar
	Süreksizlik açıklığı	Orta geniş
	Dolgu malzemesi	-
	Pürüzlülük ve dalgalılık	Pürüzlü – dalgalı
	Süreksizlik yönelimi	-
	Süreksizlik devamlılığı	Düşük (1–3 m)
	Süreksizlik takım sayısı	2
	Su sızıntıları	Suyun aktığını gösteren bazı belirtiler var.
	Blok boyutu	Orta
Ayrışma		Az-orta
Dayanım		Orta – zayıf dayanımlı
İkincil Özellikler		-

5.3. Saha Çalışmaları

5.3.1. Sondaj Çalışmaları

T-10 Tünel'inde, rotary-sulu sondaj yöntemiyle toplamda 1087 metre derinliğe ulaşan 10 adet jeoteknik sondaj gerçekleştirilmiştir. Sondajlardan elde edilen karot numuneleri üzerinde litolojik ayrımlar yapılmış. Farklı stratigrafik birimleri temsil eden kayaç örnekleri seçilmiştir. Süreksizliklerin oryantasyonu, açıklığı, dolgu tipi ve yoğunluğu analiz edilerek Toplam Karot Oranı (TCR), Sağlam Karot Oranı (SCR) ve Kaya Kalite Göstergesi (RQD) parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca, alterasyon zonları, ayrışma dereceleri ve dolgu kalınlıklarının derinlikle olan varyasyonu değerlendirilerek zayıf zonlar tanımlanmıştır.

T-10 tüneli kapsamında belirlenen 10 adet sondaj ve arazi deneyleri çalışması bu kapsamda yapılmıştır. Aşağıda ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

5.3.1.1. SK-1 Sondajı

SK-1 numaralı sondajın ilk 1,80 metresinde yamaç molozuna rastlanmıştır. 1,80 ile 35,00 metreler arasındaki derinlikte ise Spilitik Bazalt birimi kesilmiştir. Bu bazalt birimi, genel olarak grimsi kahverengi renkte olup; orta zayıf, zayıf ve çok zayıf dayanımlı seviyelerden oluşmaktadır (Şekil 5.1.).

Sondaj boyunca orta derecede, çok ve tamamen ayrışmış zonlar kesilmiştir. Birimin kırıklı, çatlaklı ve yer yer parçalı yapıda olduğu; ayrıca zayıf-orta kaya kalitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Süreksizliklerin eğim açıları 15°, 30° ve 45° olarak ölçülmüş ve yüzeylerinin pürüzlü olduğu belirlenmiştir.

Mühendislik parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla, sondaj karotları üzerinde karot kurtarma yüzdesi (TCR) ve kaya kalitesi tanımlayıcısı (RQD) değerleri hesaplanmıştır:

- **TCR (%70):** Karotlu sondaj sırasında elde edilen toplam karot uzunluğunun, sondajın o kesimdeki toplam derinliğine oranı alınarak hesaplanmıştır.

- **RQD (%37):** Aynı karot kesiminde, yalnızca 10 cm'den uzun sağlam kaya parçalarının toplam uzunluğu dikkate alınarak, bu değerlerin toplam karot boyuna oranı üzerinden belirlenmiştir.



Şekil 5.1. SK-1 sondajına ait karot sandık fotoğrafı

Elde edilen bu parametreler, kaya biriminin mühendislik jeolojisi açısından düşük-orta kalite aralığında olduğunu göstermektedir.

5.3.1.2. SK-2 Sondajı

SK-2 numaralı sondajda, yüzeyden itibaren ilk 3,00 m derinlikte yamaç molozu birimi kesilmiştir. Moloz içerisinde iri bloklar, köşeli çakıllar ve zayıf derecede tutturulmuş ince taneli malzeme gözlenmiştir. Bu seviyede gerçekleştirilen Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonucunda N= 45 değeri ölçülmüş, ayrıca N> 50 değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yamaç molozunun sıkı ve bloklu yapısı nedeniyle sondaj ilerlemesini güçleştiren bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir.

3,00–35,00 m derinlik aralığında bazalt birimi kesilmiştir. Özellikle 3,00–14,00 m arasında orta–çok ayrışmış zonların yer aldığı belirlenmiştir. Ayrışmanın yoğun olduğu bu kesimlerde kaya dokusu bozulmuş, renk değişimleri meydana gelmiş ve dayanım değerlerinde belirgin düşüş gözlenmiştir. Daha derin seviyelerde ise ayrışmanın azaldığı ve kaya bütünlüğünün kısmen korunduğu tespit edilmiştir.

Bazalt birimi genel olarak kahverengimsi gri renkte olup, mineral ayrışması sonucu yüzeylerde demir oksit (FeO) sıvanmaları dikkati çekmektedir. Dayanım özellikleri bakımından birimin, zonlara bağlı olarak orta zayıf, zayıf ve çok zayıf seviyeler gösterdiği saptanmıştır. İleri derecede ayrışmış zonlarda kaya dokusu tamamen parçalanmış, kohezyon azalmış ve yer yer bloklu–parçalı bir yapı gelişmiştir.

Sondaj boyunca orta derecede, çok ve tamamen ayrışmış zonlar kesilmiştir. Bu durum, bazaltın yüzeyden itibaren farklı derecelerde ayrışmaya maruz kaldığını ve özellikle üst kesimlerde ayrışmanın yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Ayrışmanın fazla olduğu zonlarda kaya kalitesi düşük, daha sağlam zonlarda ise orta–iyi seviyelere kadar çıkmıştır.

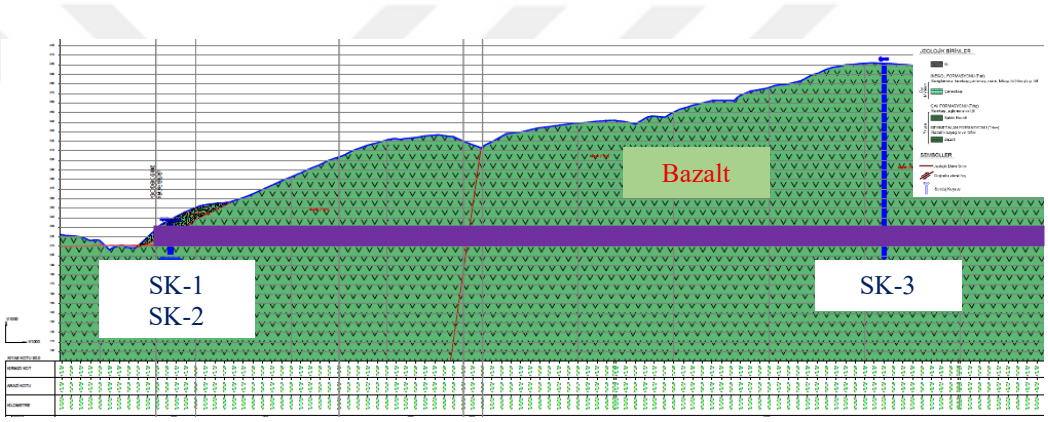
Yapısal özellikler incelendiğinde, bazalt biriminin genel olarak kırıklı, çatlaklı ve parçalı bir karakter sunduğu görülmektedir. Bu yapısal bozulma, mühendislik jeolojisi açısından kayacın dayanım ve deformasyon davranışlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Çatlak ve kırıkların süreksizlik düzlemleri boyunca yaygın olduğu, bu nedenle kaya kütlesinin bloklu bir davranış sergilediği belirlenmiştir (Şekil 5.2.).



Şekil 5.2. SK-2 sondajına ait karot sandık fotoğrafı

30°–45° eğim açılarıyla geliştiği, çoğunlukla açık karakterli ve pürüzlü yüzeylere sahip olduğu, yüzeylerin ayrışma ürünleri ile FeO sıvanmaları içerdiği saptanmıştır. Bu süreksizliklerin, kaya kütlesinin mühendislik parametrelerini zayıflatan başlıca faktörlerden biri olduğu; özellikle üst seviyelerde yoğunluklarının artması nedeniyle kaya dayanımının daha düşük değerlere indiği belirlenmiştir.

SK-3 numaralı sondajında kesilen bazalt birimleri, genel olarak grimsi kahverengi tonlarda olup mühendislik özellikleri bakımından değişkenlik göstermektedir. Birim; orta zayıf, zayıf ve çok zayıf dayanımlı zonlardan oluşmakta, ayrıca orta derecede, çok ve tamamen ayrışmış seviyeler içermektedir (Şekil 5.3.)



Şekil 5.3. T-10 Tünelin kesitine göre birimler ve sondajlar

Kaya kütlesi, yapısal özellikleri açısından kırıklı, çatlaklı ve parçalı bir dokuya sahiptir. Bu nedenle süreksizliklerin yoğunluğu artmakta, kaya kalitesi ise zayıf–orta dayanımlı nitelikte değerlendirilmektedir.

5.3.1.3. SK-4 Sondajı

SK-4 numaralı sondajda yüzeyden itibaren ilk 10,00 m'e kadar kumtaşı ve kiltaşı ardalanmasının kesildiği belirlenmiştir. Bu ardalanma, sarımsı, kahverengi ve alacalı renk tonlarında olup, tamamen ayrışmış ve ileri derecede parçalanmış bir yapıya sahiptir. Düşük dayanım ve zayıf kohezyon özellikleri olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 5.4.).

İri taneli kumtaşı seviyelerinin, düşük angaje olan kapasitesine sahip ince taneli kiltaşı tabakalarıyla ardalanmalı bir yapı sunduğu gözlemlenmiştir. Bu ardalanma içerisinde özellikle kiltaşı düzeylerinde doğal ayrışma ürünlerinin ve kil dolgularının süreksizlik yüzeylerini doldurduğu tespit edilmiştir. Süreksizliklerin kayma dayanımını önemli ölçüde düşürmüş ve kayacın bütünlüğünü zayıflatmıştır.

Sondajın 10,50 m'den sonrası spilitik bazalt birimi kesilmiştir. Çal Formasyonuna ait spilitik bazalt yeşil- gri renk tonlarına sahip olup mineralojik ayrışma sonucunda yüzeylerde beyaz kuvars damarlı yapı geliştiği belirlenmiştir. Dayanım özellikleri bakımından birimin orta derecede, çok ve tamamen ayrışmış zonların yaygın olduğu gözlenmiştir.

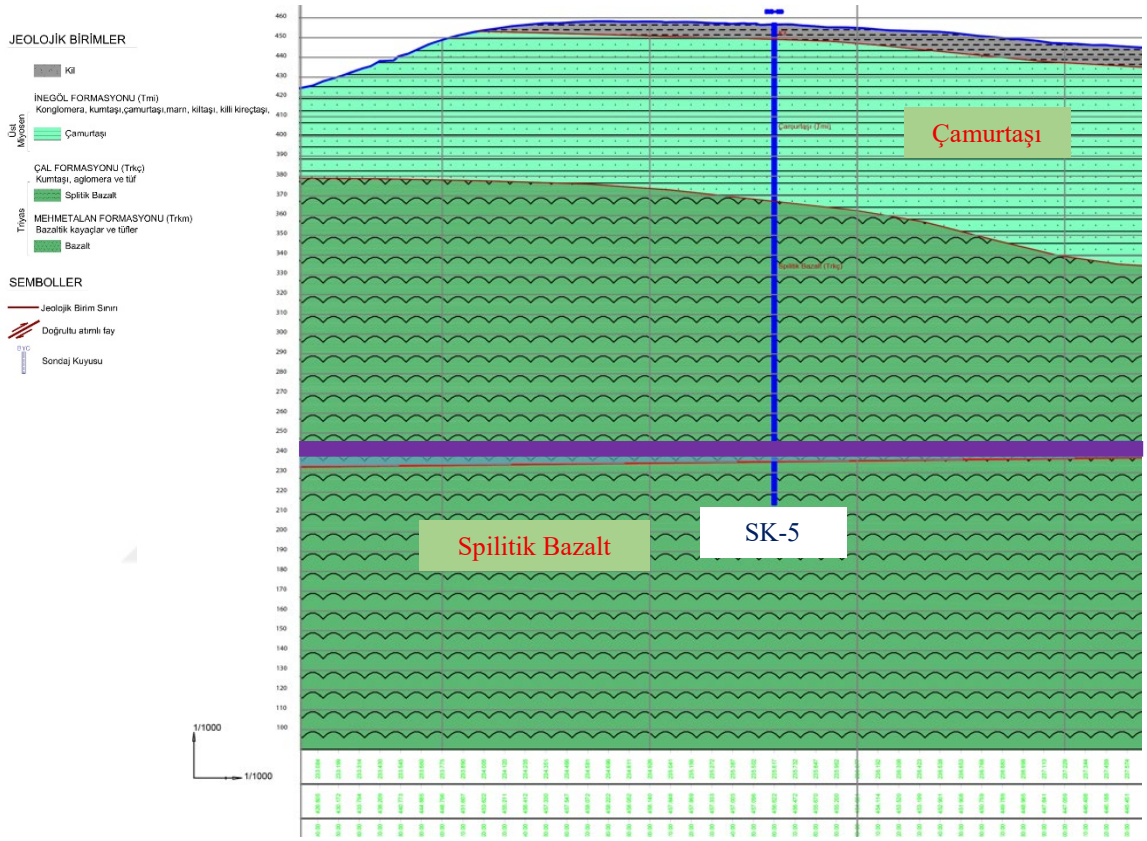


Şekil 5.4. SK-4 sondajına ait karot sandık fotoğrafı

Yapısal özelliklerine bakıldığı zaman kaya kütlesinin kırıklı, çatlaklı ve parçalı özellik gösterdiği saptanmıştır. Süreksizliklerin genel olarak 15°–30°–45° eğim değerleriyle konumlandığı, kırık yüzeylerinin ise pürüzlü karakterde olduğu belirlenmiştir. Bazı süreksizlik yüzeylerinde FeO sıvanmalarının bulunduğu gözlenmiştir.

Kaya kalitesi bakımından, RQD değerlerinin %50'nin üzerinde olduğu, ancak yoğun ayrışma ve süreksizliklerden dolayı birimin zayıf–orta kaya kalitesinde sınıflandırıldığı belirlenmiştir. Karot bütünlüğüne bakıldığında, düşük olduğu ve parçalanmış numunelerin olduğu gözlenmiştir.

SK-5 numaralı sondaj 243 m derinliğindedir. İlk 90m'si İnegöl Formasyonuna ait olan çakıllı kumlu silt ve çamurtaşı, sondaj sonuna kadar ise spilitik bazalt rastlanmıştır. Kahverenkli, sarımsı ve grimsi yeşil tonlarda olup orta–yüksek katı kıvamlı, düşük dayanımlı ve belirgin ayrışma etkisi altında bulunan birimlerdir. Çamurtaşı seviyeleri, iri çakıllı ve kil dolgulu süreksizliklerle olmuştur. Kaya kütlesi yapısal açıdan kırıklı, çatlaklı ve parçalı bir dokuya sahiptir (Şekil 5.5.).



Şekil 5.5. T-10 Tünelin kesitine göre birimler ve sondajlar

Ayrışma derecesi bakımından tamamen ayrışmış ve az–orta derecede ayrışmış seviyeler gözlenmiştir. Çal Formasyonundaki spilitik bazalt, grimsi yeşil tonlarda, sert–çok sert karakterli olup yoğun çatlaklı bir yapı sergilemektedir.

SK-6 numaralı sondajda yüzeyden itibaren zayıf mühendislik özellikleri sergileyen birimler açığa çıkarılmıştır. Kesit boyunca sarımsı–kahverengi–alacalı renklerde kumtaşı–kiltaşı ardalanması gözlenmiş, bu birimlerin genellikle çok–tamamen ayrışmış, düşük dayanımlı ve parçalanmış yapıda olduğu belirlenmiştir. Özellikle kiltaşı seviyelerinde, kırık yüzeylerinin kil dolgulu ve kaygan özellikler taşıması, kaya kütlesinin kalite açısından olumsuz değerlendirilmesine yol açmıştır. 111,5 m ile 135,0 m arasında grimsi–siyahımsı renkli bazaltlar gözlenmiştir ve bu seviyelerin orta derecede–tamamen ayrışmış, çok zayıf–orta dayanımlı özellikler göstermiştir. Bazaltların kırıklı, çok çatlaklı dokuya ait olduğu incelenmiştir. Sondaj boyunca ara seviyelerde kumtaşı, kiltaşı ve kireçtaşı bantlarının da varlığı saptanmıştır.

Genel değerlendirmede, yüksek ayrışma derecesi, kil dolgulu süreksizlikler ve parçalanmış doku nedeniyle kaya kütlesi düşük mühendislik kalitesinde tanımlanmıştır. Bu özellikler, tünel kazıları ve benzeri yeraltı mühendislik uygulamaları açısından önemli sınırlayıcı unsurlar oluşturmaktadır.

SK-7, SK-8, SK-9 ve SK-10 numaralı sondajlarda kesilen spilitik bazalt birimlerinin genel olarak yeşilimsi–gri renkli, orta dayanımlı, çatlaklı–çok çatlaklı, sert–çok sert özellikler gösterdikleri belirlenmiştir. Birimlerin içerisinde yer yer siyah kil ara seviyeleri gözlenmiş olup ayrışma derecelerinin genellikle düşük düzeyde olduğu saptanmıştır. Mühendislik jeolojisi açısından değerlendirildiğinde, bu bazaltların yüksek süreksizlik yoğunluğu nedeniyle kaya kütlesi kalitesinin orta düzeyde sınıflandırılabileceği düşünülmektedir (Şekil 5.6.).



Şekil 5.6. SK-7, SK-8, SK-9 ve SK-10 sondajlarına ait karot sandık fotoğrafı

SK-7, SK-8, SK-9 ve SK-10 numaralı sondajlarda spilitik bazaltların üzerinde kesilen çamurtaşı birimlerinin kızılımsı–kahverenkli tonlarda, az sert, orta zayıf–zayıf dayanımlı oldukları tespit edilmiştir. Bu birimlerin yer yer kırıklı bir yapıya sahip oldukları, süreksizliklerin 20–50° açıyla açıldıkları, kil dolgulu ve kaygan yapıda sundukları gözlenmiştir. Ayrıca az–orta derecede ayrışmış oldukları belirlenmiştir. Mühendislik özellikleri bakımından değerlendirildiğinde, bu çamurtaşılarının düşük dayanım değerleri ve kaygan süreksizlik dolguları nedeniyle zemin–yapı etkileşiminde potansiyel stabilite sorunları yaratabileceği öngörülmektedir.

5.3.2. Basınçlı Su Testi (BST)

Tünel güzergâhı boyunca gerçekleştirilen sondaj çalışmalarında, jeolojik birimlerin yeraltı suyu ile etkisi altında olduğu ve geçirgen olmasını belirlemek amacıyla Basınçlı Su Testleri (BST) uygulanmıştır. Deneyler tünel tavan kotunun yaklaşık 10 metre üzerinde olacak şekilde planlanmış ve yürütülmüştür (Çizelge 5.4.).

Çizelge 5.4. Sahada uygulanan BST Deneyleri

Sondaj No	BST Adet	BST Derinlik (m)	Sondaj Amacı	Gerçekleşen Derinlik (m)
SK-4	10	62,00 – 82,00	Tünel	102
SK-7	5	59,00 – 69,00	Tünel	99
SK-8	5	31,00 – 41,00	Tünel	70

BST uygulaması, seçilen basınç seviyelerinde enjeksiyon yapılarak her kademe için su alım miktarının ölçülmesine dayalı bir permeabilite değerlendirme yöntemidir. Bu formüllere dayanarak Lugeon değerini geçirimlilik açısından değerlendirilmiştir.

$$Lu = \frac{Q\ X\ 10}{Peff\ X\ L} \tag{5.1.}$$

- Lu: 10 atm basınca uyarlanan lugeon değeri
- Peff: Deneyde uygulanan gerçek basınç (kg/ cm²)
- L: Kademe Boyu(m)

$$Q = \frac{En\ yüksek\ su\ kaçağı(L)}{Dakika} \tag{5.2.}$$

- Q: Debi (L/dk)

$$Peff = Pm + \left(\frac{H}{10}\right) - Pc \tag{5.3.}$$

- Pm: Manometrede okunan basınç (kg/ cm²)
- H: Yeraltısuyu tablasından manometreye kadar olan uzaklık (m)
- Pc: Yük kaybı (borularda bağlantı elemanlarında, vanalarda)

Kaya kütlesinin hidrojeolojik davranışının nicel olarak ifade edilmesine olanak sağlamaktadır. Düşük Lugeon değerleri (Lu <1), kaya kütlesinin çok az su geçirgen veya neredeyse su geçirmez olduğunu; 1 < Lu < 5 aralığındaki değerler düşük geçirgen, 5 < Lu < 10 aralığındaki değerler orta geçirgen, 10 < Lu < 20 aralığındaki değerler yüksek geçirgen, Lu > 20 değerleri ise çok yüksek geçirgen veya çatlaklı-kırıklı kaya ortamlarını göstermektedir.

Çalışma alanında yapılan BST uygulamaları sonucunda elde edilen Lugeon değerlerinin genel olarak 1–8 Lu aralığında değiştiği belirlenmiş, bu durum kaya kütlesinin genel olarak az ila orta derecede geçirgen özellikte olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle spilitik bazalt ve çamurtaşı seviyelerinde düşük değerler, kırıklı ve bazalt kesimlerinde ise yer yer yüksek değerler belirlenmiştir. Bu sonuçlar, tünel tasarımında drenaj, su yalıtımı ve destek sistemlerinin boyutlandırılmasında doğrudan kullanılmıştır (Çizelge 5.5.).

Çizelge 5.5. BST Deneyi Sonuçları

Sondaj No	**Derinlik (m)**	**Basınç (bar)**	**Lugeon (LU)**	**Debi (lt/dk)**	**Geçirimlilik**
SK-1	4	5	1,2	0,02	Çok düşük geçirgenlik
SK-1	6	5	1,6	0,04	Düşük geçirgenlik
SK-1	8	5	2,1	0,05	Düşük geçirgenlik
SK-1	10	5	3,5	0,08	Orta geçirgenlik
SK-2	4	5	0,8	0,01	Çok düşük geçirgenlik
SK-2	6	5	1,3	0,03	Düşük geçirgenlik
SK-2	8	5	1,7	0,04	Düşük geçirgenlik
SK-2	12	5	2,2	0,06	Orta geçirgenlik
SK-3	6	5	0,9	0,02	Çok düşük geçirgenlik
SK-3	12	5	1,4	0,03	Düşük geçirgenlik
SK-3	20	5	2,8	0,07	Orta geçirgenlik
SK-3	30	5	4,5	0,11	Yüksek geçirgenlik eğilimi
SK-4	10	5	1,5	0,03	Düşük geçirgenlik
SK-4	15	5	2	0,05	Orta geçirgenlik
SK-5	8	5	1,8	0,04	Düşük geçirgenlik
SK-6	12	5	2,2	0,06	Orta geçirgenlik
SK-7	20	5	2,7	0,07	Orta geçirgenlik
SK-8	18	5	3,1	0,09	Orta–yüksek geçirgenlik
SK-9	25	5	4,2	0,1	Yüksek geçirgenlik
SK-10	30	5	4,6	0,12	Yüksek geçirgenlik

5.4. Laboratuvar Deneyleri

T-10 Tüneli için sahada gerçekleştirilen sondaj çalışmalarında, tünel etkilenme zonuna ait kesimlerden alınan kaya karot numuneleri üzerinde çeşitli laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda nokta yükleme, tek eksenli ve üç eksenli basınç deneylerinin yanı sıra elastisite modülü ve Poisson oranı deneyleri de uygulanmıştır. Deneylerin genel değerlendirmesi, deney türleri başlıkları altında aşağıda sırasıyla sunulmuştur (Çizelge 5.6.).

- **Nokta Yükleme Deneyi: 10 adet k**arot numunelerinden uzunluğu 10 cm olan örnekler üzerinde noktasal yük uygulanarak kayanın yenildiği basınç değeri belirlenmiştir. Elde edilen değer, $q_u = 12 \times I_s$eşitliği yardımıyla serbest basınç dayanımına dönüştürülmüş ve ampirik parametre hesaplamalarında kullanılmıştır.

- **Tek Eksenli Basınç Deneyi:** Silindirik kaya numunelerin kontrollü şekilde yük verilerek numunenin serbest basınç mukavemeti değerleri belirlenmiştir. Aynı numuneler üzerinde elastisite modülü ve Poisson oranı deneyleri de uygulanarak ilgili parametreler belirlenmiştir.

- **Üç Eksenli Basınç Deneyi:** 10 cm uzunluğunda silindir numuneleri üzerinde yapılan Üç Eksenli Basınç deneyleri sonucunda Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açıları belirlenmiştir.

Çizelge 5.6. Laboratuvar Deney Sonuçları

No	Sondaj No	Numune Derinlik (m)	γn (gr/cm³)	qu = P/A (N/mm²)	ES (GPa)	Is50 (MPa)	φ (°)
1	SK-1	10,50–11,00	2,3				
2	SK-1	12,00–12,50	2,05				
3	SK-1	17,80–18,00	2,69				
4	SK-1	21,50–21,70	0,57				
5	SK-1	23,00–23,30	2,97			33,7	
6	SK-1	24,00–24,20	0,86				
7	SK-1	27,50–27,80	2,88	2,9			
8	SK-1	31,90–32,20	2,79	7,08			
1	SK-2	14,70–15,00	2,57	4,75			
2	SK-2	15,00–15,20	2,23				
3	SK-2	18,30–18,60	2,56	16,18			
4	SK-2	20,60–20,80	1,43				
5	SK-2	25,10–25,40	3,09				
6	SK-2	26,60–26,90	0,22				
7	SK-2	27,30–27,60	2,52	10,88			
8	SK-2	31,40–31,70	2,6				
9	SK-2	32,60–32,80	2,65	25,04			
1	SK-4	45,00–45,50	2,45	81,4	51,24	0,29	
2	SK-4	48,10–49,00		34,6	1,8		
3	SK-4	49,20–49,40	2,44	60,07	23,07	0,28	
4	SK-4	52,30–52,60	2,57	115,65	47,2	0,11	
5	SK-4	58,00–58,40	2,25				
6	SK-4	61,50–61,90	2,52	63,43	29,53	0,2	
7	SK-4	63,50–63,80	2,45	59,13	28,84	0,27	
8	SK-4	67,50–67,80	2,45	15,99	2,56	0,1	
9	SK-4	70,40–71,00					
10	SK-4	74,00–74,40	2,37	33,35	9,37	0,4	
11	SK-4	77,10–77,40	2,51	90,25	61,73	0,35	
12	SK-4	80,60–80,80	2,61	75,7	54	1,8	
13	SK-4	84,20–84,50	2,6	24,22	7,36	0,11	
14	SK-4	89,50–90,00	2,49	10,51			
15	SK-4	92,50–92,80	2,42	4,93			

Çizelge 5.6. Laboratuvar Deney Sonuçları (Devamı)

No	Sondaj No	Numune Derinlik (m)	γn (gr/cm³)	qu = P/A (N/mm²)	ES (GPa)	Is50 (MPa)	φ (°)
1	SK-5	86,20–86,80	1,89	6,3			
2	SK-5	91,10–91,30	2,03	4,21			
3	SK-5	103,70–104,00	2,42	7,27			
4	SK-5	111,50–111,80	2,17	0,73			
5	SK-5	134,00–134,20	2,43	11,22			
6	SK-5	145,70–146,10	2,29	10,41			
7	SK-5	157,00–157,40	2,5	38,64			
8	SK-5	167,00–167,80		64,4	8		
9	SK-5	172,60–173,00	2,75	62,61			
10	SK-5	184,50–184,70	2,24	21,82			
11	SK-5	188,30–188,60	2,44	36,52	8,26	0,15	
12	SK-5	191,10–191,30	2,46	46,92			
13	SK-5	193,10–193,40	2,45	67,68	18,68	0,1	
14	SK-5	198,00–198,50	2,63	84,06			
15	SK-5	201,00–201,50	2,53	41,41			
16	SK-5	202,00–202,60		42,4	2,9		
17	SK-5	204,10–204,40	2,74	62,67			
18	SK-5	207,50–208,00	2,66	53,1	10,64	0,1	
19	SK-5	209,50–209,70	2,75	167,58	31,55	0,13	
20	SK-5	210,40–210,70	2,68	172,41	39,75	0,16	
21	SK-5	212,30–212,70	2,5	53,44	13,16	0,13	
22	SK-5	214,00–214,60		63	2		
23	SK-5	215,00–215,60	2,66	20,32			
24	SK-5	216,00–216,50	2,71	120,34	38,07	0,2	
25	SK-5	219,20–219,60	2,6	125,06	13,1	0,16	
26	SK-5	224,50–224,80	2,44	56,91	12,18	0,21	
27	SK-5	226,50–226,80	2,72	136,46	20,9	0,1	
28	SK-5	228,50–229,00	2,53	39,49			
1	SK-6	63,00–63,20	1,97	1,49			
2	SK-6	75,30–75,50	2,09	1			
3	SK-6	85,30–85,50	2,23	0,67			

Çizelge 5.6. Laboratuvar Deney Sonuçları (Devamı)

No	Sondaj No	Numune Derinlik (m)	γn (gr/cm³)	qu = P/A (N/mm²)	ES (GPa)	Is50 (MPa)	φ (°)
4	SK-6	92,00–92,50	2,16	5,08			
5	SK-6	100,00–100,30	2,34	8,47			
6	SK-6	103,00–103,40	2,21	4,47			
7	SK-6	105,20–105,50	2,19	9,99			
8	SK-6	138,10–138,30	2,55	1,96			
9	SK-6	157,00–157,25	2,7	4,47			
10	SK-6	163,70–164,00		1,24			
11	SK-6	169,00–169,20	2,98				
12	SK-6	174,30–174,50	2,7	1,62			
13	SK-6	179,30–179,50	2,54	0,36			
14	SK-6	182,00–182,50	2,73	17,74			
15	SK-6	184,00–184,10		0,37			
16	SK-6	185,80–186,00		0,55			
17	SK-6	202,20–202,30		0,62			
18	SK-6	211,50–211,75		0,19			
19	SK-6	218,50–218,70		0,82			
20	SK-6	221,40–221,65		1,05			
1	SK-7	24,00–24,50	2,11	2,51			
2	SK-7	29,00–29,50	2,11	1,08			
3	SK-7	37,00–37,50	2,43	2,34			
4	SK-7	42,00–42,50	2,15	0,98			
5	SK-7	46,00–46,50	2,13	1,71			
6	SK-7	50,00–50,50	2,07	0,81			
7	SK-7	54,50–54,90	2,13	0,7			
8	SK-7	57,00–57,30	2,11	0,69			
9	SK-7	59,20–59,60	2,63	3,92			
10	SK-7	61,00–61,20		0,12			
11	SK-7	64,70–64,90		0,37			
12	SK-7	65,30–65,60	2,85	0,71			
13	SK-7	66,50–66,80	2,28	0,43			
14	SK-7	68,20–68,60	2,74	0,71			
15	SK-7	69,40–69,70		1,04			

Çizelge 5.6. Laboratuvar Deney Sonuçları (Devamı)

No	Sondaj No	Numune Derinlik (m)	γn (gr/cm³)	qu = P/A (N/mm²)	ES (GPa)	Is50 (MPa)	φ (°)
16	SK-7	70,70–71,00		0,52			
17	SK-7	73,10–73,50	2,74	1,01			
18	SK-7	74,00–74,30	2,99	3,04			
19	SK-7	77,30–78,00	2,74	2,69			
20	SK-7	80,00–80,40		4,87			
1	SK-8	15,70–16,00	2,06	4,78			0,18
2	SK-8	17,40–18,00	2,05	0,8			
3	SK-8	22,00–22,30	2,21	4,29			
4	SK-8	25,00–25,30	2,1	2,68			
5	SK-8	28,20–28,50	2,05	3,7			
6	SK-8	31,00–31,30	2,03	1,44			
7	SK-8	33,00–33,50	2,15	3,78			
8	SK-8	35,20–35,50	2,36	4,88			
9	SK-8	37,00–37,30	2,36	24,02	6,47	0,31	
10	SK-8	41,00–41,50		68,7	1		
11	SK-8	42,80–43,00	2,63	53,97	15,8	0,11	
12	SK-8	45,30–45,50	2,54	3,73			
13	SK-8	49,00–49,50		64	1		
14	SK-8	51,00–51,30	2,54	6,25	3,67	0,1	
15	SK-8	59,70–59,90	2,51	9,94			
16	SK-8	60,80–61,00	2,63	58,54	16,5	0,1	
17	SK-8	62,70–62,90	2,47	47,47			
18	SK-8	65,60–65,80	2,56	17,37			
19	SK-8	66,30–66,50	2,64	55,88	15,2	0,23	
20	SK-8	67,60–67,90	2,6	40,69	7,45	0,14	
21	SK-8	68,50–68,80	2,62	17,35			
1	SK-9	10,00–10,30		0,06			
2	SK-9	12,50–13,00		0,11			
3	SK-9	14,70–15,00	1,8	1,49			
4	SK-9	16,50–16,80		0,11			
5	SK-9	19,00–19,40	1,87	1,87			
6	SK-9	26,40–26,60	2,6	1,66			

Çizelge 5.6. Laboratuvar Deney Sonuçları (Devamı)

No	**Sondaj No**	**Numune Derinlik (m)**	**γn (gr/cm³)**	**qu = P/A (N/mm²)**	**ES (GPa)**	**Is50 (MPa)**	**φ (°)**
7	SK-9	31,00–31,80	2,43	11,64			
8	SK-9	32,70–32,90	2,4	11,22			
9	SK-9	33,00–33,50	2,42	28,82			
10	SK-9	36,00–36,50	2,55	8,5			
11	SK-9	38,00–38,50	2,26	7,42			
1	SK-10	10,00–10,20	1,86	0,4			
2	SK-10	12,70–13,00	1,78	0,94			
3	SK-10	15,30–15,60	1,86	0,79			
4	SK-10	20,10–20,30	1,76	0,64			
5	SK-10	23,00–23,30	2,12	3,77			
6	SK-10	26,30–26,50	1,94	1,75			
7	SK-10	29,30–29,60	1,96	5,23			
8	SK-10	32,00–32,30	1,89	3,51			
9	SK-10	33,00–33,50	2,24	31,81	2,74		
10	SK-10	34,00–34,40	2,25	8,31	1,87	0,1	
11	SK-10	36,00–36,30	2,5	22,04	22,1	0,19	
12	SK-10	37,30–37,50	2,24	2,95			

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. T-10 Tüneli Giriş Portalı

Tez konusu olan T-10 Tüneli giriş portalı (Km:19+558 – Km: 19+600) kaya kütlesi mukavemet parametreleri, SK-1 ve SK-2 numaralı sondajlardan elde edilen jeomekanik veriler, arazi gözlemleri ve laboratuvar deney sonuçları esas alınarak hesaplanmıştır. Parametrelerin belirlenmesinde, saha koşullarını yansıtacak şekilde çeşitli deney dayalı düzeltme faktörleri uygulanmıştır.

- **Kaya kütle sınıflamaları:** Jeomekanik özelliklerin mühendislik tasarımına aktarılabilmesi için uluslararası kabul görmüş sınıflama sistemleri kullanılmıştır. Bu sistemler; kaya dayanımı, süreksizlik özellikleri, yeraltı suyu koşulları ve saha gözlemleri temel alınarak uygulanmıştır.

- **Düzeltme faktörleri:** Laboratuvar ortamında elde edilen Tek Eksenli Basınç Dayanımı (σci), Elastisite Modülü (Ei) ve poisson oranı (ν) gibi parametrelerin, arazi koşullarına uyarlanabilmesi amacıyla yönelim faktörü, süreksizlik yoğunluğu, ayrışma derecesi, ölçek etkisi ve gerilme durumu gibi kriterlere dayalı düzeltmeler yapılmıştır.

- **Mukavemet parametresi hesap yöntemleri:** Düzeltme faktörleri ile yenilenen değerler kullanılarak Mohr–Coulomb Parametreleri, Hoek–Brown Parametreleri ve Elastomekanik Parametreler belirlenmiştir.

6.1.1. RMR Sınıflandırma Sistemleri

Tünel hesaplarında kullanılacak jeomekanik parametreleri, Bieniawski tarafından geliştirilen RMR89 Kaya Kütle Sınıflama Sistemine göre belirlenmiştir.

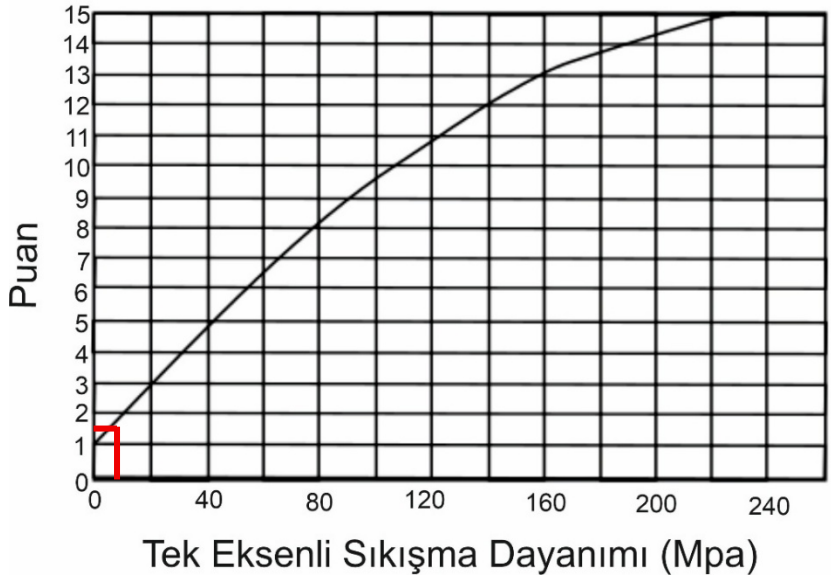
6.1.1.1. Kaya Dayanımı

Sondajlardan elde edilen kaya numunelerde yapılan Nokta Yükleme Deneyleri ve Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyleri sonuçlarından yararlanarak oluşturulmuştur. Nokta yükleme deneylerinden elde edilen değerler, uluslararası literatürde önerilen ampirik bağıntı kullanılarak tek eksenli basınç dayanımı değerine dönüştürülmüştür. Bu kapsamda, aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır:

$$\sigma_c = k \times I_{s(50)} \tag{6.1.}$$

- σ_c: Tek eksenli basınç dayanımı (MPa),
- $I_{s(50)}$: 50 mm standart numune boyutuna indirgenmiş nokta yükleme indeksi,
- k: Kaya türüne bağlı olarak 20–25 arasında değişen ampirik katsayıdır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda, tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin ortalaması 5 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değere karşılık gelen puan, RMR89 tek eksenli basınç dayanımı grafiğinden 1,5 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.1.).



Şekil 6.1. RMR Sınıflamasında Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski, 1989)

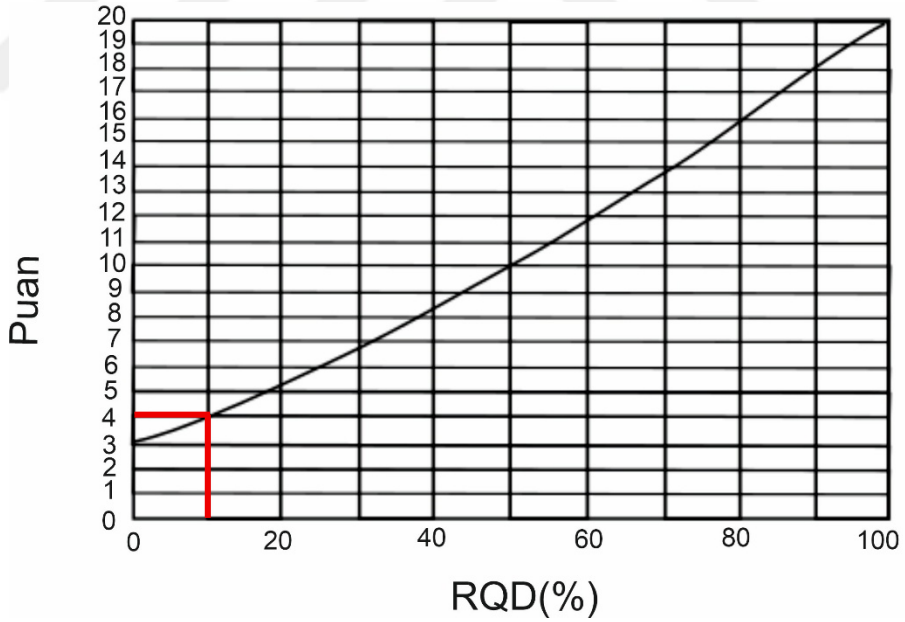
6.1.1.2. Kaya Kalite Göstergesi (RQD)

SK-1 ve SK-2 numaralı sondajlardan elde edilen karotlar üzerinde RQD, 10 cm'den daha uzun karot parçalarının toplam uzunluğunun, karotlama boyuna oranı şeklinde hesaplanmaktadır. Hesaplamada kullanılan bağıntı aşağıda verilmiştir:

$$RQD = \frac{\sum L_{i\geq 10\ \mathrm{cm}}}{L_{toplam}} \times 100 \qquad (6.2.)$$

- $L_{i\geq 10\ \mathrm{cm}}$: 10 cm'den uzun karot parçalarının toplam uzunluğu,
- L_{toplam}: Sondaj karotu toplam uzunluğu.

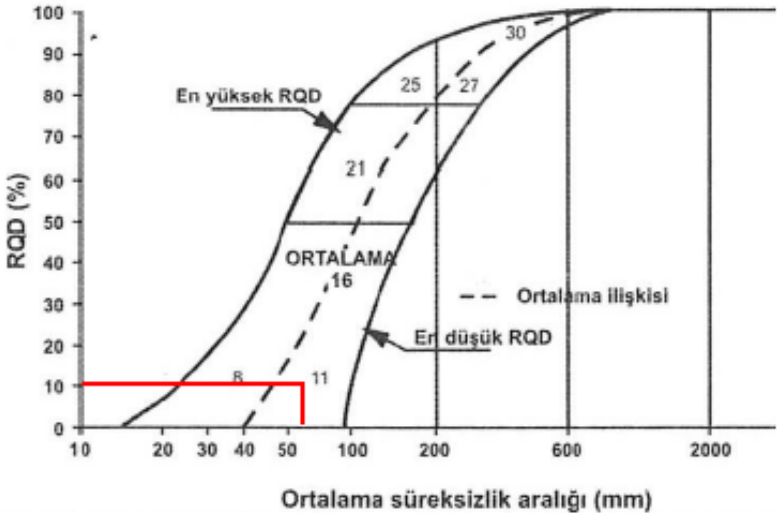
Yapılan değerlendirmeler sonucunda, SK-1 ve SK-2 sondajlarından elde edilen ortalama RQD değeri 10 olarak bulunmuştur. Bu değere karşılık gelen puan, RMR89 sistemine ait RQD–puan grafiğinden 3 olarak seçilmiştir (Şekil 6.2.).



Şekil 6.2. RMR Sınıflamasında RQD Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski,1989)

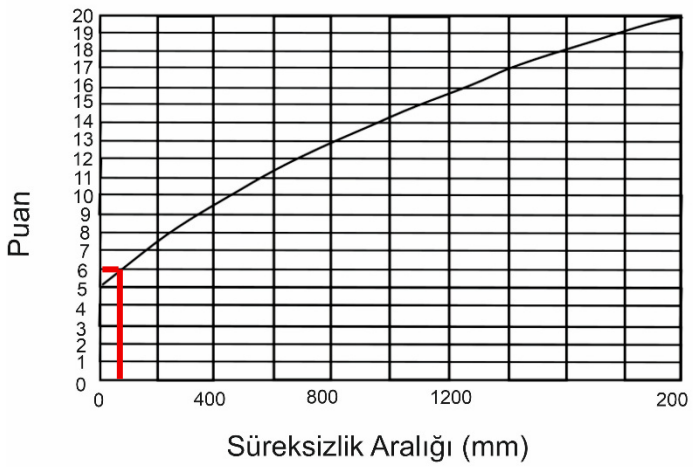
6.1.1.3. Süreksizlik Aralığı

Sondajlardan ve arazi gözlemlerinden elde edilen süreksizlik aralığı değerleri, RQD sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmiş olup ilgili değerler RQD–süreksizlik aralığı ilişkisini gösteren grafikten belirtilmiştir (Şekil 6.3.).



Şekil 6.3. RQD-Süreksizlik Aralığı arasındaki ilişki grafik (Bieniawski, 1989)

Ortalama 10 olarak hesaplanan RQD değerine karşılık gelen süreksizlik aralığı, RQD–süreksizlik aralığı grafiğine göre 60 mm olarak belirlenmiştir. Bu değere karşılık gelen RMR puanı 6 olarak grafikten bulunmuştur (Şekil 6.4.).



Şekil 6.4. Süreksizlik aralığı-RMR Puanı grafik (Bieniawski, 1989)

6.1.1.4. Süreksizliklerin Durumu

Saha gözlemleri ve sondaj çalışmalarından yararlanılarak bazalt biriminin mühendislik jeolojisi özellikleri; dayanım, ayrışma derecesi ve süreksizlik parametreleri kapsamında değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar doğrultusunda süreksizlik özellikleri için; süreksizlik uzunluğu 3–10 m (2 puan), açıklığı 1–5 mm (1 puan), yüzey pürüzlülüğü düz (1 puan), dolgu durumu <5 mm kalınlığında yumuşak dolgu (2 puan) ve kaya ayrışma derecesi çok ayrışmış (1 puan) olarak belirlenmiştir. Bu değerler esas alındığında, RMR puanı toplam 7 olarak hesaplanmıştır.

6.1.1.5. Yeraltı Suyu

Sondajlarda gerçekleştirilen Basınçlı Su Testi (BST) sonuçlarına göre birim geçirimli olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, kaya kütlesi için "damlama" koşulu esas alınmıştır.

6.1.1.6. Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme

Bazalt biriminin maruz kaldığı tektonizma nedeniyle, kısa mesafelerde tabaka doğrultusu ve eğiminin sık sık değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, tünel arazi üst kotunda ölçülen süreksizlik düzlemlerinin tünel seviyesiyle doğrudan ilişkilendirilmesini güçleştirmiştir. Dolayısıyla, süreksizliklerin düzeltme katsayısında "orta" koşulu kabul edilmiştir (Çizelge 6.1.).

Çizelge 6.1. RMR süreksizlik yönelimine göre düzeltme

Eklemlerin doğrultusu ve eğimi		Çok Uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puan	**Tüneller**	0	-2	**-5**	-10	-12

Çizelge 6.2.Giriş Portal kesimi için yapılan RMR sınıflama parametreleri (Bazalt)

A. SINIFLANDIRMA PARAMETRELERI VE PUANLAR								
Parametre			Değer aralığı					
1	Sağlam Kaya Malzemesinin Dayanımı	Nokta Yük Dayanım İndeksi	> 10 MPa	4- 10 MPa	2- 4 MPa	1- 2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım	
		Tek Eksenli Basınç Dayanımı	> 250 MPa	100- 250 MPa	50- 100 MPa	25- 50 MPa	5- 25 MPa	1- 5 MPa / <1 MPa
	Puan		15	12	7	4	2	1 / 0
2	Sondaj Karot Kalitesi (RQD)		90%- 100%	75%- 90%	50%- 75%	25%- 50%	<%25	
	Puan		20	17	13	8	3	
3	Süreksizliklerin Aralığı		> 2 m	0,6- 2 m	200- 600 mm	60- 200 mm	<60 mm	
	Puan		20	15	10	8	5	
4	Süreksizliklerin Durumu		Çok pürüzlü yüzeyler Süreksiz Ayrılma yok Taze eklem yüzeyi	Az pürüzlü yüzey Ayrılma <1 m Az ayrışmış eklem yüzeyi	Az pürüzlü yüzey Ayrılma <1 mm İleri derecede ayrışmış eklem yüzeyi	Sürtünme izli yüzeyler veya Fay dolgusu <5 mm veya Ayırma 1-5 mm Sürekli Eklemler	Yumuşak fay dolgusu > 5 mm Kalınlıkta veya Ayırma <5 mm Sürekli Eklemler	
	Puan		30	25	20	10	0	
5	Yeraltı suyu	Tünelin 10 m'lik kısmından gelen su(l/dk)	Hiç kimse	<10	10- 25	25- 125	> 125	
		Eklemdeki su basıncı/ En büyük asal gerilim oranı	0	< 0.1	0.1- 0.2	0.2- 0.5	> 0.5	
		Genel koşullar	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Akan	
		Puan	15	10	7	4	0	
B. SÜREKSIZLIK YÖNELIMİNE GÖRE DÜZELTME								
Doğrultu ve eğim yönleri			Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil	
Puanlar		Tüneller	0	-2	-5	-10	-12	
		Temeller	0	-2	-7	-15	-25	
		Şevler	0	-5	-25	-50	-60	
C. KAYA SINIFI VE PUANLARI								
Puan			100- 81	80- 61	60- 41	40- 21	<21	
Sınıf numarası			I	II	III	IV	V	
Tanımlama			Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya	
D. KAYA SINIFLARININ BAZI ÖZELLİKLERİ								
Sınıf numarası			I	II	III	V	V	
Ortalama desteksiz kalabilme süresi			15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	2,5 m açıklık için 10 saat	1 m açıklık için 30 dakika	
Kaya kütlesinin kohezyonu (kPa)			> 400	300- 400	200- 300	100- 200	<100	
Kaya kütlesinin sürtünme açısı (º)			> 45	35- 45	25- 35	15- 25	<15	
E. SÜREKSİZLİK DURUMUNUN PUANLANDIRMASI İÇİN ÖNERİLEN REHBER								
Süreksizlik uzunluğu Puan			<1m 6	1- 3 m 4	3- 10 m 2	10- 20 m 1	> 20 m 0	
Süreksizlik açıklığı Puan			Yok 6	<0,1 mm 5	0,1- 1,0 mm 4	1- 5 mm 1	> 5mm 0	
Pürüz Puan			Çok pürüzlü 6	Pürüzlü 5	Az pürüzlü 3	Düz 1	Kaygan 0	
Dolgu Puan			Yok 6	Sert dolgu <5mm 4	Sert dolgu >5mm 2	Yumuşak dolgu <5mm 2	Yumuşak dolgu >5mm 0	
Ayrışma Puan			Ayrışmamış 6	Az ayrışmış 5	Orta derecede ayrışmış 3	Çok ayrışmış 1	Tümüyle Ayrışmış 0	
F. TÜNELCİLİKTE SÜREKSİZLİK EĞİM VE DOĞRULTUSUNUN ETKİSİ								
Tünel eksenine dik doğrultu					Tünel eksenine paralel doğrultu			
Eğim yönüne ilerleme 45-90º			Eğim yönüne ilerleme 20-45º		Eğim 45-90º		Eğim 20-45º	
Çok Uygun			Uygun		Hiç uygun değil		Orta	
Eğime karşı yönüne ilerleme 45-90º			Eğim karşı yönüne ilerleme 20-45º		Doğrultuya bakılmaksızın eğim 0-20º			
Orta			Uygun değil		Orta			

Çalışma Alanı Giriş Portal Kesimi için RMR değeri hesaplamak için Çizelge 6.2. deki puanlar esas alınmıştır.

RMR = 1,5+3+6+2+1+1+2+1+4-5= 16,5 olarak hesaplanmıştır.

GSI hesaplarken YASS' ni tamamen kuru sayarsak;

GSI = RMR-5 = 1,5+4+6+15 (YASS Kuru) +2+1+1+2+1-5=28,5 olarak hesaplanmıştır.

Tez konusundaki Giriş Portal Kesimi için jeomekanik parametre yukardaki formül ile hesaplandığında bazalt biriminin zayıf kaya olduğu bulgusu elde edilmiştir (Çizelge 6.3.).

Çizelge 6.3.RMR Kaya sınıflamaları ve derecelendirme

Derecelenme	Sınıflama No	Tanımlama
100-81	I	Çok İyi Kaya
80-61	II	İyi Kaya
60-41	III	Orta Kaya
40-21	**IV**	**Zayıf Kaya**
<21	V	Çok Zayıf Kaya

Giriş portal kesiminde gerçekleştirilen sondajlardan alınan silindirik numuneler üzerinde yapılan testler sonucunda, Tek Eksenli Basınç Dayanımı değeri ortalama 5 MPa olarak belirlenmiştir. Elastisite modülü değeri, bazalt birimi için 6000 MPa olarak bulunmuştur. Kaya malzeme sabiti (mi) ise 15 olarak kabul edilmiştir (Çizelge 6.4.).

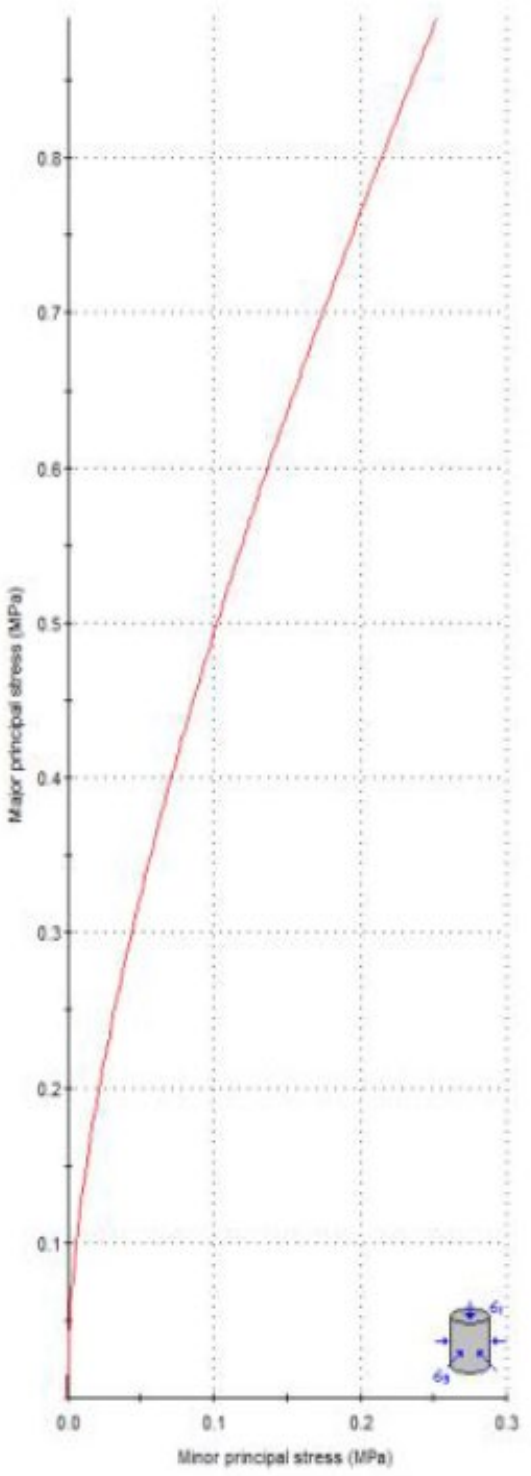
Tünel kazı yönteminin delme-patlatma yöntemi ile gerçekleştirileceği varsayılmış, bu doğrultuda örselenme faktörü (D) değeri 0,6 olarak seçilmiştir. İnceleme alanında tünel üzerindeki örtü kalınlığı 25,0 metre olarak hesaplanmıştır.

Sondajlardan elde edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda, birim hacim ağırlık değerlerinin ortalaması 2,40–2,50 g/cm³ aralığında belirlenmiş olup, hesaplamalarda bu değerler kullanılmıştır.

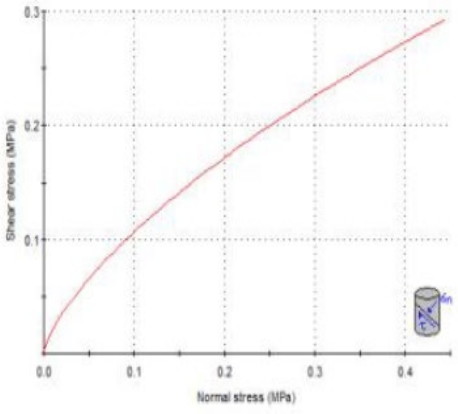
Çizelge 6.4. Çalışma alanın Giriş Portalı için elde edilen jeomekanik parametreler

Litoloji	**σ ci (MPa)**	**GSI**	**mi**	**D**	**Ei (MPa)**	**ɣ (kN/m^³)**	**h (m)**	**c (kPa)**	**Φ (◦)**	**E (MPa)**
Bazalt	5	28,5	15	0,6	6000	22	25	0,045	30,15	223,15

Mühendislik parametre hesaplarında kullanılan veriler RocLab programına girilerek hesaplarda kullanılacak olan parametreler belirlenmiştir (Şekil 6.5.).



Hoek-Brown Classification
İntact uniazial comp. Strength (sigci) =5MPa
GSI=28,5 mi=15 Disturbance factor(D)= 0,6
Intact Modulus (Ei)= 6000MPa
Hoek-Brown Criterion
Mb =0.391 s=4,87 a=0,525
Mohr-Coulomb Fit
Cohension =0,045 MPa Friction Angle 30,51 deg
Rock Mass Parameters
Tensile Strength =-0,001 MPa
Unisxial Compressive Strength =0,027 MPa
Global Strength =0,365 MPa
Deformarion Modulus =223,15 MPa



Şekil 6.5. Bazalt Birimine Ait Parametrelerini ait RocLab Programı
(TCDD Teknik ,2024)

6.1.2. Deformasyon Modülü Hesaplamaları

Hoek ve Diederichs'in 2006 yılında önermiş olduğu deformasyon modülü eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

$$Em=Ei\times(0.02+1+e(60+15D-GSI)/111-2D) \quad (6.3.)$$

- Em: Kaya kütlesinin deformasyon modülü (MPa)
- E_i: Kayaç malzemesinin elastisite modülü (MPa)
- D: Örselenme faktörü (0–1 arasında)
- GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi

Elde edilen GSI değeri 28,5, elastisite modülü 6000 MPa ve örselenme faktörü 0,6 olarak alınmıştır. Bu değerler eşitlikte yerine konulduğunda, deformasyon modülü

E_m = 223,15 MPa olarak hesaplanmıştır.

6.2. T-10 Tüneli Orta Kısım

6.2.1. RMR Sınıflandırma Sistemleri

Çalışma alanın orta kısmında spilitik bazalt birimi içerisinde geçeceği belirlenmiştir. Bu kesimde tünel tavanı ile topoğrafya arasındaki ortalama örtü kalınlığı yaklaşık 85 metre olarak ölçülmüştür.

Birimin tabaka yapısının kıvrımlı olduğu ve süreksizlik aralıklarının orta derecede geniş açıklıklı nitelik gösterdiği tespit edilmiştir. Süreksizlik açıklıkları genellikle kapalı–boşluklu olup tabaka kalınlıklarının 10–60 cm arasında değiştiği belirlenmiştir. Süreksizlik düzlemlerinin genel olarak açık karakterde olduğu, açık çatlakların ise kil–silt ara seviyeli ve demir oksit sıvamalı olduğu gözlenmiştir.

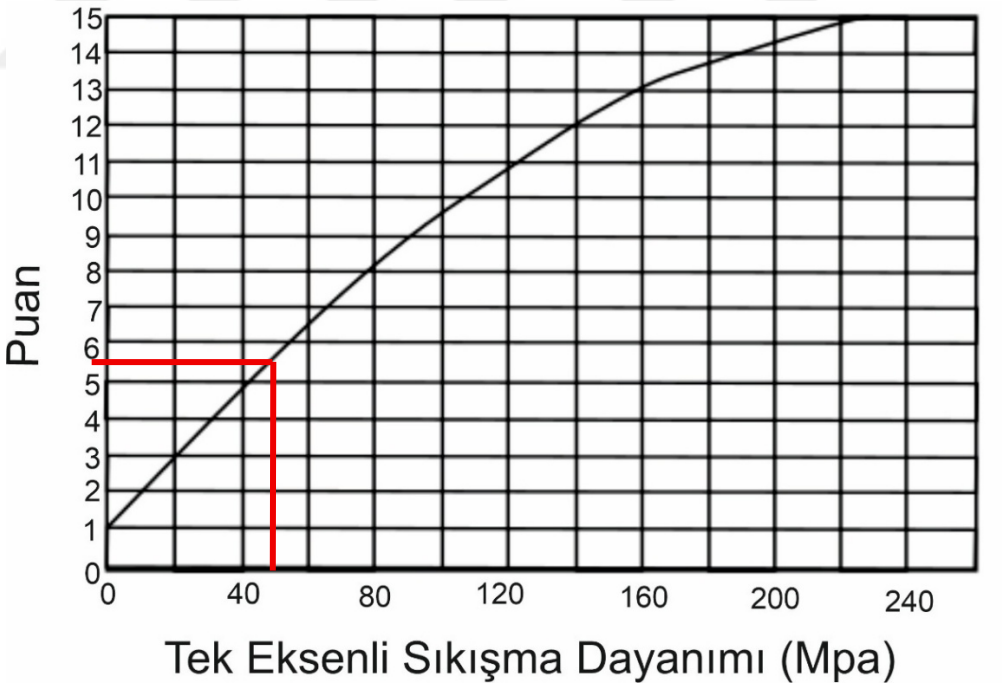
6.2.1.1. Kaya Dayanımı

Çalışma alanın orta kısmında gerçekleştirilen sondaj çalışmalarından elde edilen kaya numuneleri üüzerinde yapılan testler; Nokta Yükleme ve Tek Eksenli Basınç Dayanımı deneylerinden yararlanılmıştır.

$$\sigma_c = k \times I_{s(50)} \tag{6.4.}$$

- σ_c: Tek eksenli basınç dayanımı (MPa),
- $I_{s(50)}$: 50 mm standart numune boyutuna indirgenmiş nokta yükleme indeksi,
- k: Kaya türüne bağlı olarak 20–25 arasında değişen ampirik katsayıdır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda, tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin ortalaması 52,9 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, RMR tek eksenli basınç dayanımı grafiği esas alınarak değerlendirilmiş ve 7,4 puan olarak seçilmiştir (Şekil 6.6.).



Şekil 6.6. RMR Sınıflamasında Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski, 1989)

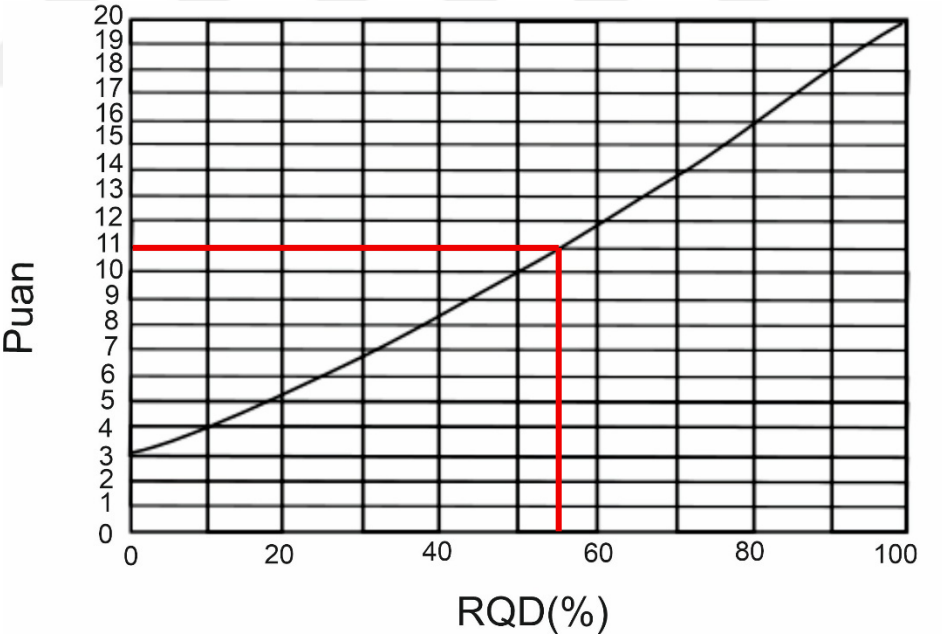
6.2.1.2. Kaya Kalite Göstergesi (RQD)

Hesaplamalarda kullanılacak RQD değerleri, tünel güzergâhı ile portal kesimlerinde gerçekleştirilen sondaj çalışmalarından veriler oluşturulmuştur. Özellikle tez çalışmasının orta kesiminde yapılan sondajlardan alınan silindirik numunelerine ait RQD değerleri değerlendirmeye alınmıştır.

$$RQD = \frac{\sum L_{i\geq 10\ \mathrm{cm}}}{L_{toplam}} \times 100 \qquad (6.5.)$$

- $L_{i\geq 10\ \mathrm{cm}}$: 10 cm'den uzun karot parçalarının toplam uzunluğu,
- L_{toplam}: Sondaj karotu toplam uzunluğu.

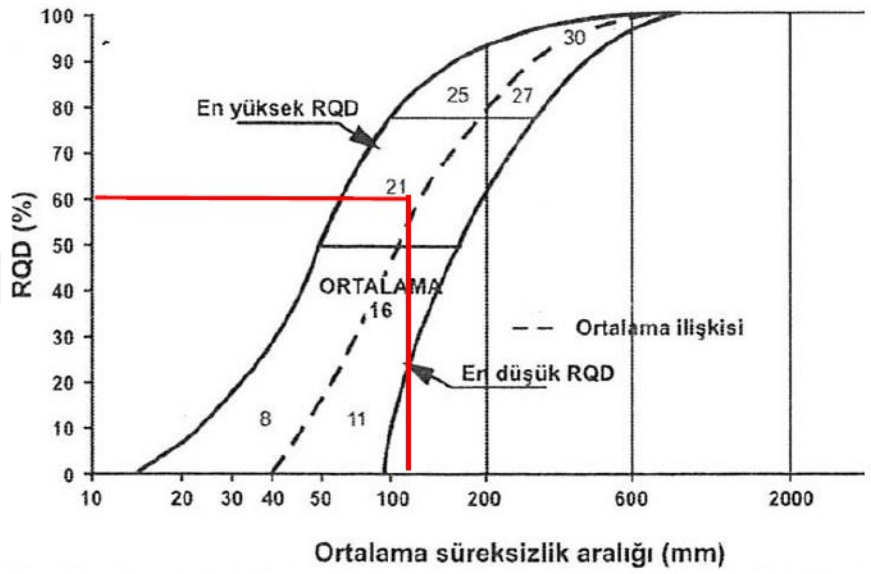
Hesaplamalar sonucunda, sondajlardan elde edilen ortalama RQD değeri 60 olarak belirlenmiş; bu değer, RMR sisteminde yer alan RQD puanı grafiği esas alınarak değerlendirilmiş ve 11 puan olarak seçilmiştir (Şekil 6.7.).



Şekil 6.7.RMR Sınıflamasında RQD Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski, 1989)

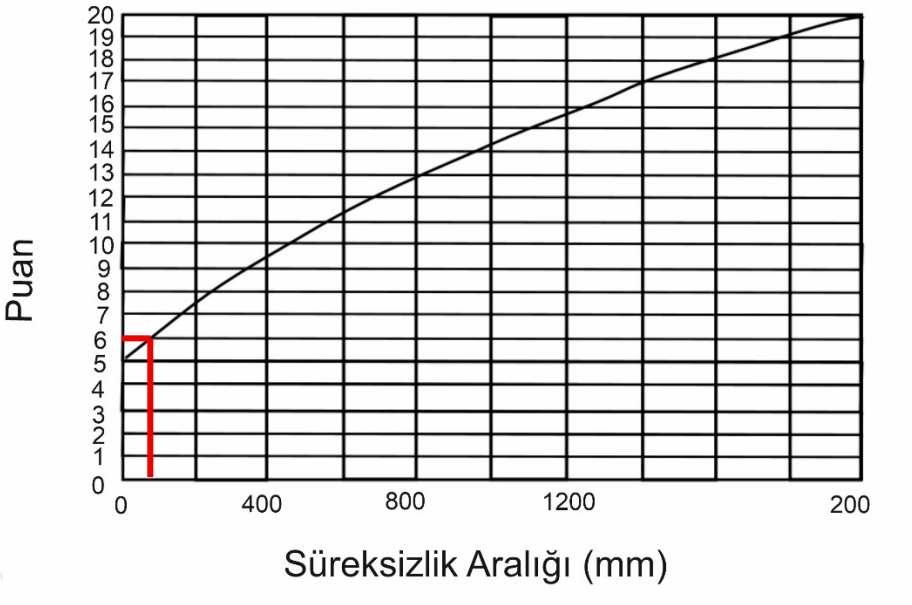
6.2.1.3. Süreksizlik Aralığı

Sondajlardan ve arazi gözlemlerinden elde edilen süreksizlik aralığı değerleri, RQD sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmiş olup ilgili değerler RQD–süreksizlik aralığı ilişkisini gösteren grafikten belirtilmiştir (Şekil 6.8.).



Şekil 6.8.RQD-Süreksizlik Aralığı arasındaki ilişki grafiği (Bieniawski, 1989)

Ortalama 60 olarak hesaplanan kaya kalite gösterisi değerine göre, süreksizlik aralığı 120 mm olarak belirlenmiştir. Bu değerlere bağlı olarak yapılan değerlendirmede, RMR sistemine göre 6 puan bulunmuştur (Şekil 6.9.).



Şekil 6.9.Süreksizlik aralığı-RMR Puanı grafik (Bieniawski, 1989)

6.2.1.4. Süreksizliklerin Durumu

Saha gözlemleri ve sondaj çalışmalarından elde edilen veriler doğrultusunda, spilitik bazalt biriminin dayanım, ayrışma ve süreksizlik özellikleri gibi mühendislik jeolojisi parametreleri belirlenmiştir. Bu kapsamda yapılan değerlendirmelerde, süreksizlik uzunluğu 1–3 m (4 puan), Süreksizlik Açıklığı 4 puan, yüzey pürüzlülüğü 3 puan, dolgu türü 4 puan ve ayrışma derecesi 5 puan olarak değerlendirilmiştir. Bu parametrelerin toplamı sonucunda, spilitik bazalt birimi için RMR süreksizlik durumu puanı 20 olarak hesaplanmıştır.

6.2.1.5. Yeraltı Suyu

Sondaj çalışmalarında yapılan BST (Basınçlı Su Testi) uygulamaları sonucunda, kesilen kaya biriminin yerinde su içeriği değerlendirilmiş ve bu kapsamda birimin nemli koşullarda bulunduğu sonucuna varılmıştır.

6.2.1.6. Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme

Spilitik bazalt biriminin maruz kaldığı yoğun tektonik deformasyon sonucunda, oldukça kısa mesafeler içerisinde tabaka doğrultusu ve eğim değerlerinde belirgin değişimlerin meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durum nedeniyle, tünel güzergâhının arazi üst kotunda ölçülen süreksizlik düzlemlerinin, tünel seviyesindeki süreksizliklerle doğrudan ilişkilendirilmesinin sağlıklı sonuçlar vermeyeceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle, süreksizlik yönelimlerinin tünel eksenine göre düzeltilmesinde "orta" koşulunun kabul edilmesi uygun bulunmuştur (Çizelge 6.5.).

Çizelge 6.5. RMR Süreksizlik yönelimine göre düzeltme

Eklemlerin doğrultu ve eğimi		Çok Uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puan	**Tüneller**	0	-2	**-5**	-10	-12

Çizelge 6.6. Orta kısım için yapılan RMR Sınıflama Parametreleri (Spilitik Bazalt)

A. SINIFLANDIRMA PARAMETRELERI VE PUANLAR									
Parametre			Değer aralığı						
1	Sağlam Kaya Malzemesinin Dayanımı	Nokta Yük Dayanım İndeksi	> 10 MPa	4- 10 MPa	2- 4 MPa	1- 2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım		
		Tek Eksenli Basınç Dayanımı	> 250 MPa	100- 250 MPa	50- 100 MPa	25- 50 MPa	5- 25 MPa	1- 5 MPa	<1 MPa
	Puan		15	12	7	4	2	1	0
2	Sondaj Karot Kalitesi (RQD)		90%- 100%	75%- 90%	50%- 75%	25%- 50%	<%25		
	Puan		20	17	13	8	3		
3	Süreksizliklerin Aralığı		> 2 m	0,6- 2 m	200- 600 mm	60- 200 mm	<60 mm		
	Puan		20	15	10	8	5		
4	Süreksizliklerin Durumu		Çok pürüzlü yüzeyler Süreksiz Ayrılma yok Taze eklem yüzeyi	Az pürüzlü yüzey Ayrılma <1 m Az ayrışmış eklem yüzeyi	Az pürüzlü yüzey Ayrılma <1 mm İleri derecede ayrışmış eklem yüzeyi	Sürtünme izli yüzeyler veya Fay dolgusu <5 mm veya Ayırma 1-5 mm Sürekli Eklemler	Yumuşak fay dolgusu > 5 mm Kalınlıkta veya Ayırma <5 mm Sürekli Eklemler		
	Puan		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu	Tünelin 10 m'lik kısmından gelen su(l/dk)	Hiç kimse	<10	10- 25	25- 125	> 125		
		Eklemdeki su basıncı/ En büyük asal gerilim oranı	0	< 0.1	0.1- 0.2	0.2- 0.5	> 0.5		
		Genel koşullar	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Akan		
		Puan	15	10	7	4	0		
B. SÜREKSIZLIK YÖNELIMINE GÖRE DÜZELTME									
Doğrultu ve eğim yönleri			Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil		
Puanlar		Tüneller	0	-2	-5	-10	-12		
		Temeller	0	-2	-7	-15	-25		
		Şevler	0	-5	-25	-50	-60		
C. KAYA SINIFI VE PUANLARI									
Puan			100- 81	80- 61	60- 41	40- 21	<21		
Sınıf numarası			I	II	III	IV	V		
Tanımlama			Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya		
D. KAYA SINIFLARININ BAZI ÖZELLİKLERİ									
Sınıf numarası			I	II	III	V	V		
Ortalama desteksiz kalabilme süresi			15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	2,5 m açıklık için 10 saat	1 m açıklık için 30 dakika		
Kaya kütlesinin kohezyonu (kPa)			> 400	300- 400	200- 300	100- 200	<100		
Kaya kütlesinin sürtünme açısı (º)			> 45	35- 45	25- 35	15- 25	<15		
E. SÜREKSİZLİK DURUMUNUN PUANLANDIRMASI İÇİN ÖNERİLEN REHBER									
Süreksizlik uzunluğu Puan			<1m 6	1- 3 m 4	3- 10 m 2	10- 20 m 1	> 20 m 0		
Süreksizlik açıklığı Puan			Yok 6	<0,1 mm 5	0,1- 1,0 mm 4	1- 5 mm 1	> 5mm 0		
Pürüz Puan			Çok pürüzlü 6	Pürüzlü 5	Az pürüzlü 3	Düz 1	Kaygan 0		
Dolgu Puan			Yok 6	Sert dolgu <5mm 4	Sert dolgu >5mm 2	Yumuşak dolgu <5mm 2	Yumuşak dolgu >5mm 0		
Ayrışma Puan			Ayrışmamış 6	Az ayrışmış 5	Orta derecede ayrışmış 3	Çok ayrışmış 1	Tümüyle Ayrışmış 0		

F. TÜNELCİLİKTE SÜREKSİZLİK EĞİM VE DOĞRULTUSUNUN ETKİSİ			
Tünel eksenine dik doğrultu		Tünel eksenine paralel doğrultu	
Eğim yönüne ilerleme 45-90º	Eğim yönüne ilerleme 20-45º	Eğim 45-90º	Eğim 20-45º
Çok Uygun	Uygun	Hiç uygun değil	Orta
Eğime karşı yönüne ilerleme 45-90º	Eğim karşı yönüne ilerleme 20-45º	Doğrultuya bakılmaksızın eğim 0-20º	
Orta	Uygun değil	Orta	

Çalışma Alanı Orta Kesimi için RMR değeri hesaplamak için Çizelge 6.6. daki puanlar esas alınmıştır.

RMR = 7,4+11+6+4+4+3+4+5+10-5 = 49,4 olarak hesaplanmıştır.

GSI hesaplarken YASS' ni tamamen kuru sayarsak;

GSI = RMR-5 = 7,4+11+6+15(YASS Kuru) +4+4+3+4+5-5 = 54,4 olarak hesaplanmıştır.

Tez konusundaki Orta Kesimi için jeomekanik parametre yukardaki formül ile hesaplandığında bazalt biriminin zayıf kaya olduğu bulgusu elde edilmiştir (Çizelge 6.7.).

Çizelge 6.7. RMR Kaya sınıflamaları ve derecelendirme

Derecelenme	Sınıflama No	Tanımlama
100-81	I	Çok İyi Kaya
80-61	II	İyi Kaya
60-41	**III**	**Orta Kaya**
40-21	IV	Zayıf Kaya
<21	V	Çok Zayıf Kaya

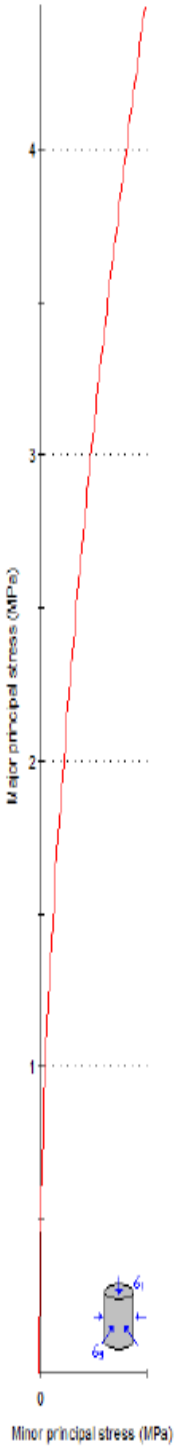
Çalışma alanının orta kesiminde gerçekleştirilen sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan testler sonucunda, Tek Eksenli Basınç Dayanımı değeri ortalama 52,9 MPa olarak belirlenmiştir. Aynı kesime ait dilatometre deneylerinden elde edilen elastisite modülü (E) değeri, spilitik bazalt birimi için 29000 MPa olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, malzeme sabiti (m_i) değeri spilitik bazalt birimi için 20 olarak alınmıştır. Bu parametreler, tünel kesiminde Hoek–Brown yenilme ölçütü kapsamında yapılan jeomekanik parametre hesaplamalarında kullanılmıştır (Çizelge 6.8.).

Sondaj çalışmalarından elde edilen numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, birim hacim ağırlık değerlerinin ortalaması 2,40 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Bu değer, spilitik bazalt biriminin mühendislik parametrelerinin hesaplanmasında yoğunluk girdisi olarak kullanılmıştır.

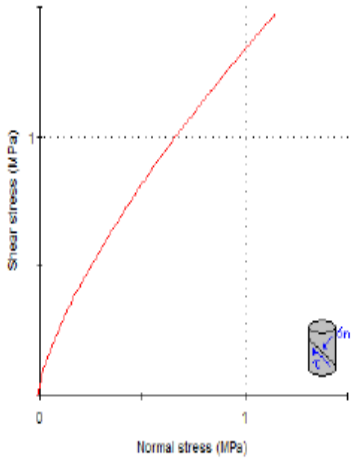
Çizelge 6.8. Çalışma alanın Orta kesimi için elde edilen jeomekanik parametreler

Litoloji	**σ ci (MPa)**	**GSI**	**mi**	**D**	**Ei (MPa)**	**ɣ (kN/m^³)**	**h (m)**	**c (kPa)**	**Φ (◦)**	**E (MPa)**
Spilitik Bazalt	52,9	54,4	20	0,6	29000	25	85	0,566	53,94	4835,10

Çalışma alanında kesilen spilitik bazalt biriminin kalınlığı yaklaşık 25 metre olarak belirlenmiştir. Mühendislik parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan veriler, RocLab yazılımına girilerek değerlendirilmiş ve bu kapsamda hesaplamalarda kullanılacak jeomekanik parametreler elde edilmiştir (Şekil 6.10.).



Hoek-Brown Classification
İntact uniazial comp. Strength (sigci) =12,6MPa
GSI=42,9 mi=20 Disturbance factor(D)= 0
Intact Modulus (Ei) =12000MPa
Hoek-Brown Criterion
Mb =2,602 s=0,0018 a=0,509
Mohr-Coulomb Fit
Cohension =0,199 MPa Friction Angle= 49,59 deg
Rock Mass Parameters
Tensile Strength =-0,009 MPa
Unisxial Compressive Strength =0,495 MPa
Global Strength =2,648 MPa
Deformarion Modulus =2333,17 MPa



Şekil 6.10. Spilitik Bazalt Birimine Ait Parametrelerini ait RocLab Programı (TCDD Teknik,2024)

6.2.2. Deformasyon Modülü Hesaplamaları

Hoek ve Diederichs'in 2006 ortaya çıkan deformasyon modülü eşitliği aşağıdaki formüle göre uygulanmıştır.

$$Em=Ei\times(0.02+1+e(60+15D-GSI)/111-2D) \quad (6.6.)$$

- Em: Kaya kütlesinin deformasyon modülü (MPa)
- E_i: Kayaç malzemesinin elastisite modülü (MPa)
- D: Örselenme faktörü (0–1 arasında)
- GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi

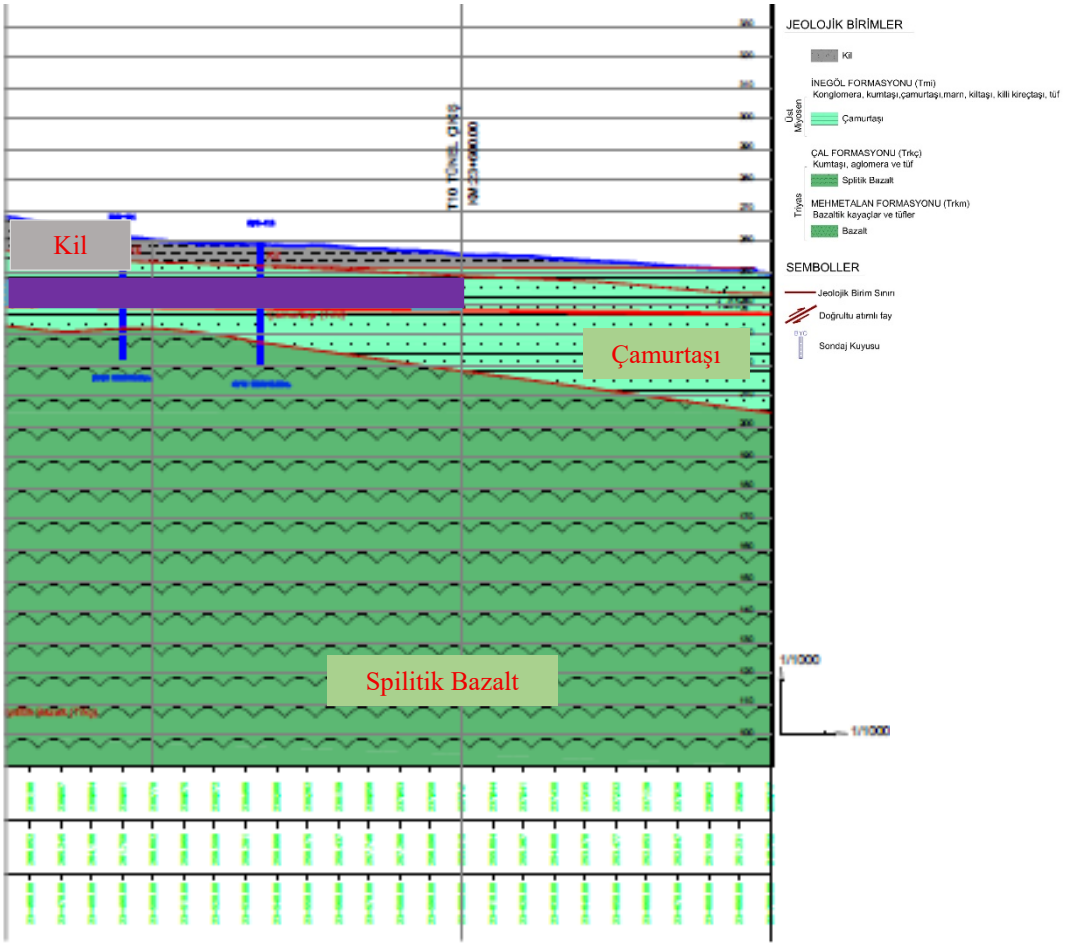
Elde edilen GSI değeri 54,4 elastisite modülü 29000 MPa ve örselenme faktörü 0,6 olarak alınmıştır. Bu değerler eşitlikte yerine konulduğunda, deformasyon modülü

E_m = 4835,10 MPa olarak hesaplanmıştır.

6.3. T-10 Tüneli Çıkış Portalı

Çalışma alanı olan T-10 Tüneli çıkış portalı Km:23+450 – Km: 23+600 arasında yer alan kısmı kapsamaktadır. Tünelin çıkış portal kesimi çamurtaşı birimi içerisinde bulunmaktadır (Şekil 6.11.). Bu kesimde, tünel tavanı ile mevcut topoğrafya arasındaki ortalama örtü kalınlığı yaklaşık 15 metre olarak belirlenmiştir.

Tabaka yapısı kıvrımlı bir karakter sergilemekte olup, süreksizlik aralıkları oldukça dar (<60 mm) ve süreksizlik açıklıkları kapalı–boşluklu (>5 mm) özellik göstermektedir. Tabaka kalınlıkları 10–60 santimetre arasında değişmektedir. Süreksizlik düzlemleri ise genel olarak açık çatlaklarda kil–silt ara seviyeleri ile demir oksit sıvamaları gözlenmiştir.



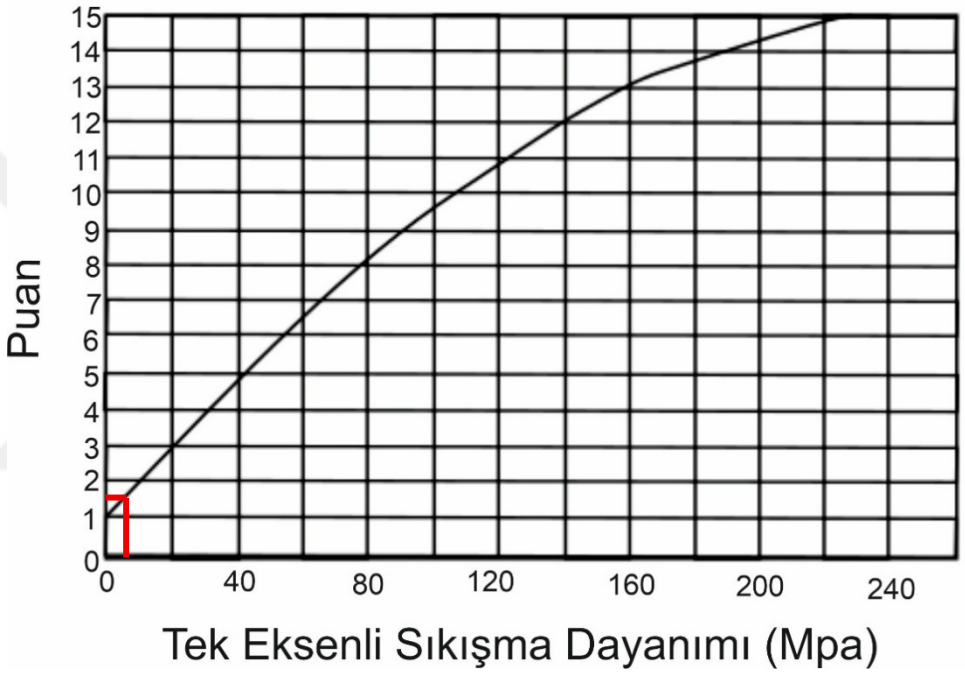
Şekil 6.11. T-10 tüneli Çıkış Portal Kesimi

6.3.1. RMR Sınıflandırma Sistemleri

1973'ten 1989'a kadar tüneller, maden işletmeleri ile ilgili toplam 351 farklı uygulamadan derlenen veriler ve kazanılan deneyimler çerçevesinde sistem son şeklini almıştır (Bieniawski, 1989). Bu sınıflamada 5 parametre kullanılır. Bunlar; kayanın dayanımı veya nokta yük dayanım indeksi, RQD değeri, YASS miktarı ve konumu, süreksizlik durumu ve süreksizlik aralığıdır. Buradan temel parametreler elde edilmektedir. Daha sonra değerlendirmeler tünel, yamaç veya bir temel durumuyla ilgili olup olmamasına bağlı olarak, eklemlerin doğrultu ve eğim yönlerine göre düzeltilir (Ulusay ve Sönmez, 2002).

6.3.1.1. Kaya Dayanımı

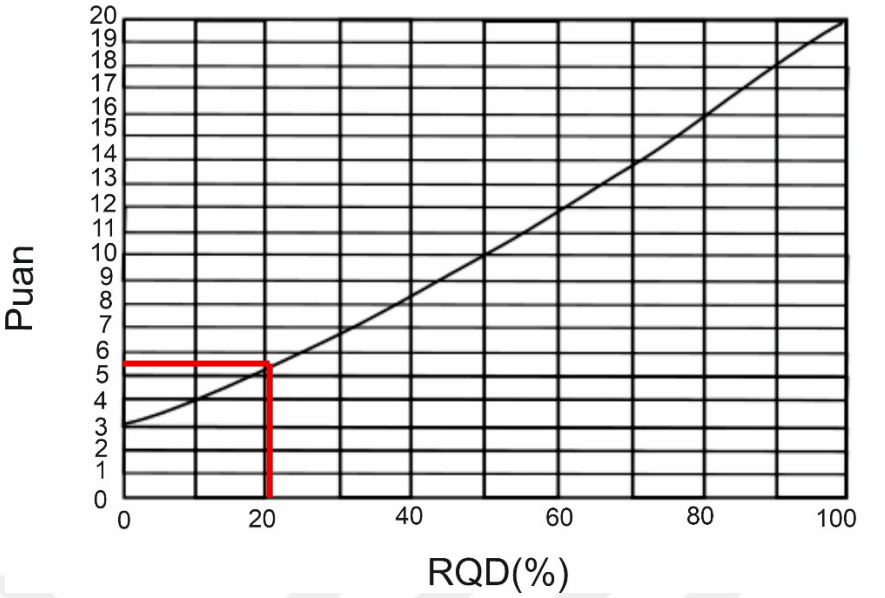
Çıkış portal kesimi için yapılan değerlendirmelerde, SK-9 ve SK-10 sondajlardan elde edilen numunelerinde yapılan laboratuvar deneylerinde Nokta Yükleme deneyleri ve Tek Eksenli Basınç Dayanımı sonuçlarından yararlanılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, tek eksenli basınç dayanımı ortalama 1,9 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, RMR sistemine ait tek eksenli basınç dayanımı grafiği kullanılarak değerlendirilmiş ve buna karşılık gelen 1 puan seçilmiştir (Şekil 6.12.).



Şekil 6.12. RMR Sınıflamasında Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski, 1989)

6.3.1.2. Kaya Kalite Göstergesi (RQD)

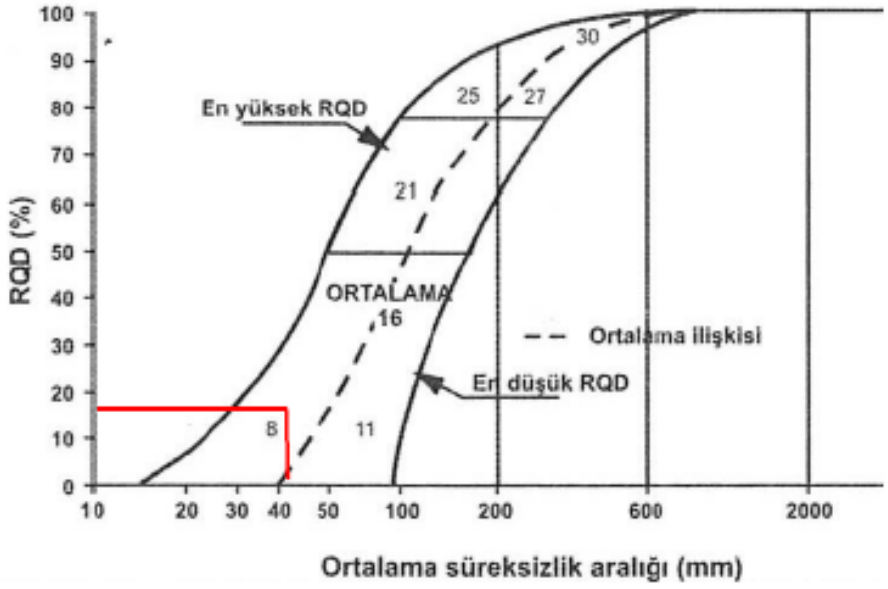
Tünel güzergâhı ve portal kesimlerinde gerçekleştirilen sondaj çalışmalarından elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Çıkış portal kesimine yapılan sondajlardan alınan karot örneklerinin değerleri belirlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, sondajlardan elde edilen ortalama RQD değeri 15 olarak bulunmuştur. Bu değer, RMR sistemine ait RQD puanlama grafiği esas alınarak değerlendirilmiş ve buna karşılık gelen 5,5 puan seçilmiştir (Şekil 6.13.).



Şekil 6.13. RMR Sınıflamasında RQD Parametresi Puan Grafiği (Bieniawski, 1989)

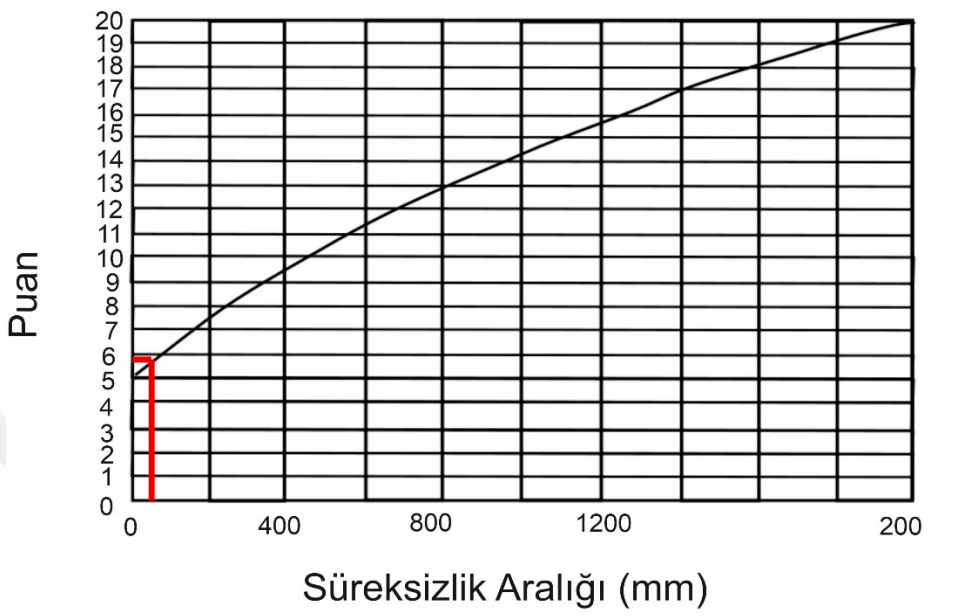
6.3.1.3. Süreksizlik Aralığı

Sondajlardan ve arazi gözlemlerinden elde edilen süreksizlik aralığı değerleri, RQD sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmiş olup ilgili değerler RQD–süreksizlik aralığı ilişkisini gösteren grafikten belirtilmiştir (Şekil 6.14.).



Şekil 6.14.RQD-Süreksizlik Aralığı arasındaki ilişki grafiği (Bieniawski, 1989)

Ortalama 15 olarak hesaplanan RQD değerine bağlı olarak, kaya kütlesinde süreksizlik aralığı 40 mm olarak belirlenmiştir. Buna dayanarak RMR puanı, sistemin süreksizlik aralığı grafiğinden 5 puan olarak elde edilmiştir (Şekil 6.15.).



Şekil 6.15. Süreksizlik aralığı-RMR Puanı grafik (Bieniawski, 1989)

6.3.1.4. Süreksizliklerin Durumu

Saha gözlemleri ile sondaj çalışmalarından elde edilen veriler doğrultusunda, çamurtaşı biriminin dayanım, ayrışma derecesi ve süreksizlik özellikleri gibi jeomekanik parametreleri belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmelerde, süreksizliklerin uzunluğu 3–10 m aralığında olup bu özellik 2 puan olarak değerlendirilmiştir. Süreksizlik açıklığının> 5 mm olması 0 puan, süreksizlik yüzeyinin düz olması 1 puan, yumuşak dolgunun> 5 mm kalınlıkta bulunması 0 puan ve kaya biriminin tümüyle ayrışmış nitelikte olması 0 puan olarak dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin toplamı sonucunda, çamurtaşı biriminin süreksizlik durumu için RMR puanı 3 olarak hesaplanmıştır.

6.3.1.5. Yeraltı Suyu

Arazide yapılan deneylerde BST sonuçlarına göre birim geçirimli olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, kaya kütlesi için “damlama” koşulu kabul edilmiştir.

6.3.1.6. Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme

Çamurtaşı biriminin geçirdiği yoğun tektonizmaya bağlı olarak çok kısa mesafelerde tabaka doğrultu ve eğiminin sıklıkla değiştiği gözlenmiştir. Bu sebeple tünel arazi üst kotunda ölçülen süreksizlik düzlemlerinin tünel seviyesi ile ilişkilendirilmesinin sağlıklı bir sonuca ulaşılamayacağı öngörülmüştür. Bu nedenle süreksizliğe göre düzeltmede "orta" koşulu kabul edilmiştir (Çizelge 6.9.).

Çizelge 6.9. RMR süreksizlik yönelimine göre düzeltme

Eklemlerin doğrultu ve eğimi		Çok Uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puan	**Tüneller**	0	-2	**-5**	-10	-12

Çizelge 6.10. Çıkış portal kesimi için yapılan RMR Sınıflama Parametreleri (Çamurtaşı)

A. SINIFLANDIRMA PARAMETRELERI VE PUANLAR									
Parametre			Değer aralığı						
1	Sağlam Kaya Malzemesinin Dayanımı	Nokta Yük Dayanım İndeksi	> 10 MPa	4- 10 MPa	2- 4 MPa	1- 2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım		
		Tek Eksenli Basınç Dayanımı	> 250 MPa	100- 250 MPa	50- 100 MPa	25- 50 MPa	5- 25 MPa	1- 5 MPa	<1 MPa
	Puan		15	12	7	4	2	1	0
2	Sondaj Karot Kalitesi (RQD)		90%- 100%	75%- 90%	50%- 75%	25%- 50%	<%25		
	Puan		20	17	13	8	3		
3	Süreksizliklerin Aralığı		> 2 m	0,6- 2 m	200- 600 mm	60- 200 mm	<60 mm		
	Puan		20	15	10	8	5		
4	Süreksizliklerin Durumu		Çok pürüzlü yüzeyler Süreksiz Ayrılma yok Taze eklem yüzeyi	Az pürüzlü yüzey Ayrılma <1 m Az ayrışmış eklem yüzeyi	Az pürüzlü yüzey Ayrılma <1 mm İleri derecede ayrışmış eklem yüzeyi	Sürtünme izli yüzeyler veya Fay dolgusu <5 mm veya Ayırma 1-5 mm Sürekli Eklemler	Yumuşak fay dolgusu > 5 mm Kalınlıkta veya Ayırma <5 mm Sürekli Eklemler		
	Puan		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu	Tünelin 10 m'lik kısmından gelen su(l/dk)	Hiç kimse	<10	10- 25	25- 125	> 125		
		Eklemdeki su basıncı/ En büyük asal gerilim oranı	0	< 0.1	0.1- 0.2	0.2- 0.5	> 0.5		
		Genel koşullar	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Akan		
		Puan	15	10	7	4	0		
B. SÜREKSIZLIK YÖNELIMİNE GÖRE DÜZELTME									
Doğrultu ve eğim yönleri			Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil		
Puanlar		Tüneller	0	-2	-5	-10	-12		
		Temeller	0	-2	-7	-15	-25		
		Şevler	0	-5	-25	-50	-60		
C. KAYA SINIFI VE PUANLARI									
Puan			100- 81	80- 61	60- 41	40- 21	<21		
Sınıf numarası			I	II	III	IV	V		
Tanımlama			Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya		
D. KAYA SINIFLARININ BAZI ÖZELLİKLERİ									
Sınıf numarası			I	II	III	V	V		
Ortalama desteksiz kalabilme süresi			15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	2,5 m açıklık için 10 saat	1 m açıklık için 30 dakika		
Kaya kütlesinin kohezyonu (kPa)			> 400	300- 400	200- 300	100- 200	<100		
Kaya kütlesinin sürtünme açısı (°)			> 45	35- 45	25- 35	15- 25	<15		
E. SÜREKSİZLİK DURUMUNUN PUANLANDIRMASI İÇİN ÖNERİLEN REHBER									
Süreksizlik uzunluğu Puan			<1m 6	1- 3 m 4	3- 10 m 2	10- 20 m 1	> 20 m 0		
Süreksizlik açıklığı Puan			Yok 6	<0,1 mm 5	0,1- 1,0 mm 4	1- 5 mm 1	> 5mm 0		
Pürüz Puan			Çok pürüzlü 6	Pürüzlü 5	Az pürüzlü 3	Düz 1	Kaygan 0		
Dolgu Puan			Yok 6	Sert dolgu <5mm 4	Sert dolgu >5mm 2	Yumuşak dolgu <5mm 2	Yumuşak dolgu >5mm 0		
Ayrışma Puan			Ayrışmamış 6	Az ayrışmış 5	Orta derecede ayrışmış 3	Çok ayrışmış 1	Tümüyle Ayrışmış 0		
F. TÜNELCİLİKTE SÜREKSİZLİK EĞİM VE DOĞRULTUSUNUN ETKİSİ									
Tünel eksenine dik doğrultu					Tünel eksenine paralel doğrultu				
Eğim yönüne ilerleme 45-90°			Eğim yönüne ilerleme 20-45°		Eğim 45-90°		Eğim 20-45°		
Çok Uygun			Uygun		Hiç uygun değil		Orta		
Eğime karşı yönüne ilerleme 45-90°			Eğim karşı yönüne ilerleme 20-45°		Doğrultuya bakılmaksızın eğim 0-20°				
Orta			Uygun değil		Orta				

Çalışma Alanı Çıkış Portalı Kesimi için RMR değeri hesaplamak için Çizelge 6.10. deki puanlar esas alınmıştır.

RMR = 1+5,5+5+2+0+1+0+1+4-5= 14,5 olarak hesaplanmıştır.

GSI hesaplarken YASS' ni tamamen kuru sayarsak;

GSI = RMR-5 = 1+5,5+5+15(YASS Kuru) +2+0+1+0+0-5=24,5 olarak hesaplanmıştır.

Tez konusundaki Çıkış Portal Kesimi için jeomekanik parametre yukardaki formül ile hesaplandığında bazalt biriminin zayıf kaya olduğu bulgusu elde edilmiştir (Çizelge 6.11.).

Çizelge 6.11. RMR Kaya sınıflamaları ve derecelendirme

Derecelenme	Sınıflama No	Tanımlama
100-81	I	Çok İyi Kaya
80-61	II	İyi Kaya
60-41	III	Orta Kaya
40-21	**IV**	**Zayıf Kaya**
<21	V	Çok Zayıf Kaya

Çıkış portal kesiminde gerçekleştirilen sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan testler sonucunda, Tek Eksenli Basınç Dayanımı değeri ortalaması 1,9 MPa olarak belirlenmiştir. Aynı birime ait dilatometre deneylerinden elde edilen elastisite modülü (E) değeri 5000 MPa, kayaç sabiti (m_i) ise çamurtaşı birimi için 4 olarak alınmıştır. Bu veriler, çıkış portal kesiminde yer alan çamurtaşı biriminin Hoek–Brown yenilme ölçütü kapsamındaki hesaplamalarda temel mühendislik parametreleri olarak kullanılmıştır (Çizelge 6.12.).

Tünel veya açık kazılarda kazı tipine bağlı olarak değişen örselenme faktörü (D) değeri, T-10 Tüneli portalları için "mekanik kazı" yöntemi esas alınarak belirlenmiştir. Bu

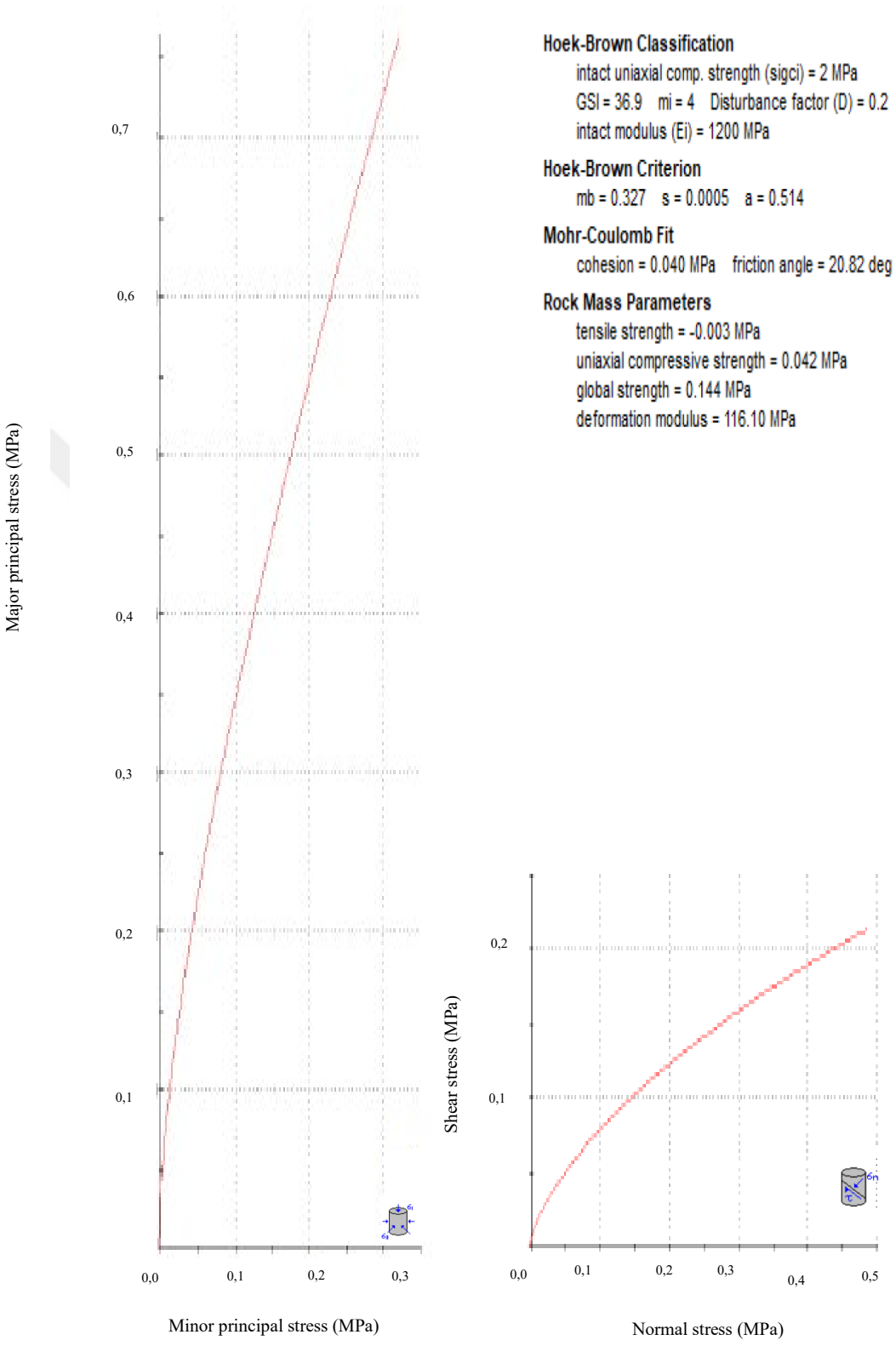
doğrultuda, söz konusu kesimler için örselenme faktörü D = 0,2 olarak kabul edilmiş ve hesaplamalarda bu değer kullanılmıştır.

Sondaj çalışmalarından elde edilen numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda, birim hacim ağırlık değerlerinin ortalaması 1,90 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Bu değer, mühendislik parametrelerinin hesaplamalarında temel yoğunluk girdisi olarak kullanılmıştır.

Çizelge 6.12. Çalışma alanın Çıkış Portalı için elde edilen jeomekanik parametreler

Litoloji	**σ ci (MPa)**	**GSI**	**mi**	**D**	**Ei (MPa)**	**ɣ (kN/m^³)**	**h (m)**	**c (kPa)**	**Φ (◦)**	**E (MPa)**
Çamurtaşı	1,9	24,5	4	0,2	5000	20	15	0,019	24,47	231,9

T-10 Tüneli Çıkış Portalında kesilen çamurtaşı biriminin kalınlığı yaklaşık 25 metre olarak belirlenmiştir. Mühendislik parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan veriler, RocLab yazılımına girilerek değerlendirilmiş ve bu kapsamda hesaplamalarda kullanılacak jeomekanik parametreler oluşturulmuştur (Şekil 6.16.).



Şekil 6.16. Çamurtaşı Birimine Ait Parametrelerini ait RocLab Programı (TCDD Teknik ,2024)

6.3.2. Deformasyon Modülü Hesaplamaları

Hoek ve Diederichs'in 2006 ortaya çıkan deformasyon modülü eşitliği aşağıdaki formüle göre uygulanmıştır.

$$Em=Ei\times(0.02+1+e(60+15D-GSI)/111-2D) \quad (6.7.)$$

- Em: Kaya kütlesinin deformasyon modülü (MPa)
- E_i: Kayaç malzemesinin elastisite modülü (MPa)
- D: Örselenme faktörü (0–1 arasında)
- GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi

Elde edilen GSI değeri 24,5 elastisite modülü 5000 MPa ve örselenme faktörü 0,2 olarak alınmıştır. Bu değerler eşitlikte yerine konulduğunda, deformasyon modülü

E_m = 231,9 MPa olarak hesaplanmıştır.

6.4. TÜNEL KAZI VE TAHKİMAT İŞLERİ

Destekleme ve kazı yöntemlerinin tasarlanabilmesi için kaya kütlesinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla tünel içerisinde gerçekleştirilen ayrıntılı jeolojik haritalama çalışmalarıyla süreksizliklerin konum, doğrultu ve eğim özellikleri; eklem, çatlak ve fay zonlarının dağılımı; süreksizlik aralıkları, açıklıkları ve dolgu malzemesi özellikleri; ayrışma ve bozulma dereceleri, kayaçların tek eksenli basınç dayanımları ve etkileri tespit edilmektedir (Çizelge 6.13.).

Çizelge 6.13. Destek Sınıflandırma (KTŞ, 2023).

Sınıf	Tipik Jeomekanik Durum	Uygulama Notu
A1	İyi–çok iyi kaya; süreksizlikler kapalı/iyi kilitli; yüksek RMR/Q	Minimum destek; kısa püskürtme beton gerekebilir
A2	İyi–orta kaya; sınırlı ayrışma, orta eklem aralığı	Hafif destek; tel hasır + ince püskürtme beton
B1	Orta–zayıf; bloklu/brittle davranış; süreksizlik sürekliliği artmış	Püskürtme beton + selektif bulon
B2	Zayıf; çok eklemli/çok gevrek; yerel blok düşmeleri	Püskürtme beton + düzenli kaya bulonu
B3	Taneli/bloklu; kesitte stabilite sorunları belirgin	Daha kalın püskürtme beton + sık bulonlama
C1	Baskılı; sıkışma eğilimi, yüksek deformasyon riski	Kalın püskürtme beton, çelik iksa, sistematik bulon
C2	Çok baskılı; makaslama/sürünme belirgin	Ağır destek; çelik çerçeve + invert erken
C3	Çok zayıf; yüksek deformasyon, su etkisi olası	Aşamalı kazı; yoğun enstrümantasyon ve yakın izleme
C4	Akıcı/zayıf zemin davranışı (örn. çok zayıf kil/gevşek yelpaze)	Tam yüzey kaplama, kapalı tahkimat; kısa adımlı ilerleme
C5	Şişen/ekspansif	Şişmeye dayanıklı kaplama; invert ve tahkimat takviyesi zorunlu

Elde edilen veriler ışığında, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) kapsamında kaya kütlesi sınıflaması yapılmakta ve buna bağlı olarak uygun destekleme sınıfları belirlenmektedir. Bu sınıflandırma sürecinde kaya kütlesinin deformasyon modülü, kohezyon değerleri, içsel sürtünme açısı gibi jeomekanik parametreler de dikkate alınmaktadır. Bu jeomekanik parametrik değerlere göre çalışma alanın destek ve kazı yöntemi belirlenmiştir. Kaya kalitesi değerlerine göre tünel güzergâhındaki formasyonların B2, B3 ve C2 kaya sınıflandırma sistemi klaslarında olacağı öngörülmüştür.

6.4.1. B Kaya Sınıfı

B kaya sınıfı "Gevrek Kaya Kütleleri" olarak tanımlanmaktadır. "B" olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı, yapısal kenetlenme ve/veya çekme mukavemeti azlığından ötürü hızlı gevşeme ve ayrışmaya yatkındır. Destek yapımının gecikmesi halinde artan çökmeler meydana gelir. B kaya sınıfı kendi içinde B1 (gevrek), B2 (çok gevrek) ve B3 (aneli) olmak üzere üç altsınıfa ayrılır.

Çalışma alanında yapılan sondajlar, arazi incelemeleri ve laboratuvar deneyleri sonucunda, tünel ekseni boyunca değişen litolojik birimlerin mühendislik özelliklerinin farklılık gösterdiği belirlenmişti. Kaya kütleleri ve bu kütleler için öngörülen destek sınıfları ayrı ayrı tanımlanmıştır. Güzergâh boyunca spilitik bazalt, bazalt ve çamurtaşı birimlerinin hâkim olduğu saptanmış, bu birimlerin her birinin farklı deformasyon davranışı ve dayanım özellikleri sergilediği görülmüştür.

Tez konusunun giriş portalında yapılan sondajlarda litolojinin büyük ölçüde spilitik bazalt ve bazalt birimlerinden oluştuğu belirlenmiştir. Bu kayaçlar genellikle yeşilimsi-gri tonlu, orta derecede ayrışmış, orta–yüksek dayanımlı, sert–çok sert, çatlaklı–çok çatlaklı niteliktedir. Süreksizlik yüzeylerinde ince kil, demiroksit ve kalsit dolguları gözlenmiştir (Şekil 6.17.).



Şekil 6.17.Bazalt birimindeki demiroksit ve kalsit dolguları

Spilitik bazalt ve bazalt birimleri, yüksek dayanımlı olmasına rağmen süreksizliklerin sıklığı ve patlatma etkisiyle yerel gevşeme eğilimi göstermektedir. Bu birimlerde elastik deformasyon davranışı baskın olup, deformasyonlar küçük ve kısa süreli gelişmektedir. Bu nedenle, kaya kütlesi "gevrek kaya kütlesi" özelliği taşımakta ve B sınıfı kapsamında değerlendirilmektedir.

6.4.1.1. B2 Kaya Sınıfı

"Çok gevrek" kaya kütlesi olarak adlandırılır. Tünel desteklemesinin zamanında yapılması halinde deformasyonlar hızla azalırlar. Zamanında destekleme yapılmaması veya destekleme elemanlarının yetersiz olması halinde derinlere ulaşan gevşemeler ve buna bağlı olarak kopmalar meydana gelir. Bozuşmuş veya ayrışmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışının kaya kütlesinin mukavemeti üzerinde etkisi bulunmaktadır. Kazı tünel kesitine bağlı olarak bölünür.

İlerleme adımı uzunluğu, desteksiz durma süresi ve desteksiz açıklığına bağlı olarak belirlenir. İlerleme adımı üst yarı kazısında 1,5-2,0 m alt yarıda ise 3.0- 3.5 m'den fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlatma ile yapılır. Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik destekleme gereklidir. Gerektiğinde tavanda süren kullanılacaktır. Süren için delme ve benzeri işlemlerin aynadaki veya tavandaki kaya kütlesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenecektir.

Destek elemanı püskürtme beton uygulanır. Püskürtme betonla birlikte kaya bulonları, iksalar ve çelik hasır kullanılır (İlk kaplama) (Şekil 6.18.). Tüm deformasyonu kontrollü bir şekilde kaya ile tahkimat arasında tam anlamıyla senkronizasyon sağlanır. Böylece yapılan tahkimat ile gerilmeler zemine aktarılır ve zemin kendi kendine taşınması sağlanır. Deformasyon tamamen durdurulması hedeflenmektedir ve ikinci kaplama (kemer yapılan inşaat) sayesinde sorun yaratmayacak ve bakım gerektirmeyecek tünel inşası yapılır. Su etkisinin önemsiz olduğu bu kesimlerde yalnızca süreksizliklerden gelen sınırlı sızıntılar gözlenmiş, bu nedenle drenaj sistemleri lokal olarak tercih edilmiştir.



Şekil 6.18. Çalışma alanın ilk kaplama

6.4.1.2. B3 Destek Sınıfı

Taneli Kaya Kütlesi olarak adlandırılır. Bölünmüş kazıda kaya kütlesinde dökülmeler meydana gelir. Kohezyonun az ve az çimentolamaşma kazının stabilitesinde yetersizliğe neden olur.

Spilitik bazalt ve bazalt birimleri genel olarak yüksek stabiliteye sahip olup, patlatma sonrası lokal dökülmeler dışında önemli deformasyon davranışı göstermemektedir. Dolayısıyla tünelin giriş portal kesimi, stabil ve elastik davranışlı kaya kütlesi özelliği taşımakta ve B1 destek sınıfı koşullarına uygun kazı-destekleme yaklaşımı gerektirmektedir. Bu kapsamda kazı sonrası desteklemenin zamanında uygulanmasıyla deformasyonların hızla azaldığı ve tünel çevresinde kalıcı bir stabilite sağlandığı belirlenmiştir.

Ayrışmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışının kaya kütlesinin dayanımı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Kazı ile ilerleyebilmek için kaya kütlesini iyileştirici, desteksiz durma süresini artırıcı önlemler alınmalıdır. İlerleme adımı uzunluğu üst yarı kazısında 1.25-1.50 metre, alt yarıda ise 3 metreden fazla olmayacaktır. Taban kazısı ve altyarı betonu dökülmesi gerekli olabilir. Üstyarı ve yan duvarlarda, aynada ve aynanın ilerletilmesinden önce monte edilecek sistematik destekleme gerekmektedir.

Jeolojik şartlara göre, üst yarı aynasından 75-100 metreden daha geride olmamak üzere, yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerektiği belirlenmiştir (Şekil 6.19.).



Şekil 6.19. Çalışma alanı kemer beton uygulaması

6.5. C Kaya Sınıfı

C kaya sınıfı "Baskılı Kaya Kütleleri olarak tanımlanmaktadır. "C" olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı genellikle, kaya basıncının yeniden dağılımı süreci veya deplasman sınırlamaları sonunda oluşan gerilmelerin kaya dayanımından daha büyük olduğunu göstermektedir.

Kaya kütlesinin aşırı gerilmelere maruz kalması ile kabuk atma, burkulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zafiyet mekanizmalın oluşur.

Kaya kütlesinin plastisite ve viskozitesi, zamana bağlı belirgin deformasyon davranışı göstermesine ve sonuçta büyük deformasyonlara yol açar. Kaya zati ağırlık yüklerinin aktif hale geçmesi ve önemli miktarda gevşeme basıncı, sadece büyük deformasyonlara izin verildiğinde meydana gelir.

Kaya kütlesine zarar verecek derecedeki gevşeme ve ayrışma, kaya dayanımında büyük miktarda azalmaya yol açar. Açılan boşluktaki büyük deformasyonlar ve uzun dönemde zamana bağlı deplasman davranışı, zeminin elastik olmayan, plastik ve viskoz davranışına bağlıdır.

Çatlamaya veya dökülmeye eğilimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenleri olan kaya kütleleri bu gruba girer.

Kaya kütlesinin düşük özellikleri nedeniyle kohezyon miktarına veya gevşeme basıncını takiben aşırı gerilmelere bağlı olarak, elastik veya plastik aşırı gerilme oluşur. C kaya sınıfı kendi içinde C1 (dağ atma), C2 (baskılı), C3 (çok baskılı), C4 (akıcı) ve C5 (şişen) olmak üzere beş tipe ayrılır.

İnceleme alanın çıkış portalında yapılan sondaj verileri ve arazi gözlemleri, bu kesimde litolojinin büyük oranda çamurtaşı biriminden oluştuğunu göstermektedir. Bu birim, kızılımsı-kahverenkli, orta–zayıf dayanımlı, seyrek kırıklı ve kil dolgulu süreksizliklere sahip bir yapıya sahiptir. Tabaka doğrultusu ve eğimi kısa mesafelerde değişmekte, bu da süreksizlik sürekliliğini azaltarak kaya kütlesinin homojenliğini zayıflatmaktadır.

Çamurtaşı birimi, suya duyarlı yapısı, düşük kohezyonu ve ayrışma eğilimi nedeniyle kazı sırasında plastik-viskoz deformasyon davranışı göstermektedir. Bu davranış, kazı çevresinde baskılı kaya karakterinin gelişmesine yol açmaktadır. Kaya birimleri C sınıfı kapsamında değerlendirilmektedir. Bu nedenle çıkış portal kesimi C2 destek sınıfına karşılık gelmektedir.

6.5.1. C2 Destek Sınıfı

"Baskılı" kaya kütlesi olarak adlandırılmaktadır. C2, çevreleyen kaya kütlesi içerisinde derine uzanan plastik zonlar ve basınç veren davranışı ile karakterize edilir. Bu kaya kütlesinde orta derecede fakat belirgin olarak uzun süren ve yavaş son bulan deformasyonlar gözlenir.

Çamurtaşı birimi, suya duyarlı yapısı, düşük kohezyonu ve ayrışma eğilimi nedeniyle kazı sırasında plastik-viskoz deformasyon davranışı göstermektedir. Bu davranış, kazı çevresinde baskılı kaya karakterinin gelişmesine yol açmaktadır. Kaya birimleri C sınıfı kapsamında değerlendirilmektedir. Bu nedenle çıkış portal kesimi C2 destek sınıfına karşılık gelmektedir.

C2 destek sınıfında deformasyonlar genellikle yavaş gelişmekte ancak uzun süre devam etmekte, zamanla derinlere uzanan plastik zonlar meydana gelmektedir. Su sızıntılarının ve konsantre akışların kaya dayanımını azaltması, deformasyonların artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple kazının üstyarı, altyarı ve taban kazısı olarak bölünmesi gerekmektedir. Üstyarı kazısında ilerleme adımı 0,75–1,25 metre, altyarıda ise 2,0 metreyi geçmeyecektir.



Şekil 6.20. Çalışma alanın çelik hasır uygulaması

Kazı tıraşlamasından hemen sonra püskürtme beton kaplaması yapılmalı, çelik hasır, kaya bulonları ve gerektiğinde çelik iksa sistemleri uygulanmalıdır. Ayrıca deformasyonların derinlere ilerlemesini engellemek amacıyla süren boruları ve taban kemeri imalatı zorunludur (Şekil 6.20.). Bu önlemlerle, deformasyonların zamana bağlı etkileri sınırlandırılmakta ve tünel kesit stabilitesi korunmaktadır.

Çalışma alanının jeoteknik tasarımında temel dayanak olarak kullanılmış; her litolojik birim için uygun destek sınıfı seçilerek güvenli, ekonomik ve mühendislik açısından sürdürülebilir bir tünel tasarımı oluşturulmuştur.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma alanın Bandırma–Osmaneli Yüksek Hızlı Tren Projesi'nin Bursa kesiminde yer alan T-10 Tüneli güzergâhındaki kaya kütlelerinin mühendislik jeolojisi bakımından incelenmesi amaçlanmıştır.

İnceleme alanının Sakarya Zonu içerisinde yer aldığı, Triyas yaşlı Mehmetalan Formasyonu'na ait bazalt, Çal Formasyonu'na ait spilitik bazalt ve İnegöl Formasyonu'na ait çamurtaşı birimleri tünel güzergâhında mostra vermektedir. Tünelin giriş portalında bazalt, orta kesimlerinde spilitik bazalt, çıkış portalında ise çamurtaşı birimi izlenmiştir.

Birimlerin genellikle az ila orta derecede ayrışmış, zayıf–orta dayanımlı ve yüksek süreksizlik yoğunluğuna sahip oldukları saptanmıştır. Gerçekleştirilen sondajlardan elde edilen karot numuneleri üzerinde yapılan ölçümler sonucunda, TCR, SCR ve RQD parametreleri belirlenmiş; RQD değerlerinin %15–50 aralığında değiştiği ve kaya kütlesinin düşük–orta kalite aralığında sınıflandırıldığı görülmüştür.

Basınçlı Su Testleri (BST) sonuçlarına göre, birimlerin su geçirgenliklerinin düşük–orta seviyede olduğu ve Lugeon değerlerinin 1–8 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler doğrultusunda, birim hacim ağırlığı 2,3–2,6 g/cm³, tek eksenli basınç dayanımı (qu) 1,9–29 MPa, elastisite modülü 6.000–29.000 MPa, nokta yük dayanımı 0,4–1,8 MPa ve içsel sürtünme açısı 25°–35° arasında değişmektedir. Bu değerlerin, kaya birimlerinin litolojik farklılıklarına ve süreksizlik yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Hoek ve Diederichs (2006) eşitliği esas alınarak yapılan hesaplamalarda, deformasyon modülü değerleri bazalt için yaklaşık 223 MPa, spilitik bazalt için 290 MPa ve çamurtaşı için 150 MPa olarak elde edilmiştir.

RMR ve GSI değerlendirmeleri sonucunda, giriş portalında ortalama 32,9 -27, orta kesimde 41–45 ve 35–40, çıkış portalında ise 25–30 ve 20–25 olarak bulunmuştur. Tünel kazıları Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) prensiplerine uygun olarak delme–patlatma yöntemiyle gerçekleştirilmiş. Kaya kalitesi değerlerine göre tünel güzergâhındaki formasyonların B2, B3, C2 ve C3 kaya sınıflandırma sistemi klaslarında olacağı öngörülmüştür. Çalışma alanındaki tünelde yapılan kazı aşamalarında destek olarak sırasıyla çelik hasır, çelik iksa, shotcrete, bulon enjeksiyon, boru süren gibi destek sistemleri uygulanmıştır. Klas düştükçe, statik hesap raporlarda betonarme donatı oranı ve beton kesiti azalmaktadır.

İnceleme alanın kaya birimlerinin süreksizlik aralıklarının 60–200 mm, eğim açı değerlerinin 15°–45° arasında değiştiği, eklem yüzeylerinde kil dolgusu ve demir oksit sıvalarının bulunduğu belirlenmiştir. Bu özelliklerin kaya kütlesinin stabilitesini olumsuz yönde etkilediği; ancak uygun tahkimat, drenaj ve enjeksiyon önlemleri ile güvenli kazı koşullarının sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, inceleme alanında yer alan birimlerin mühendislik davranışlarının süreksizlik özellikleri, ayrışma derecesi, su durumu ve kaya bütünlüğü gibi faktörlerden doğrudan etkilendiği belirlenmiştir. Uygun tahkimat sistemlerinin seçimi, deformasyonun düzenli izlenmesi ve kaya kütlesi parametrelerinin doğru tanımlanması ile güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir bir tünel kazısının gerçekleştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

ALTINOK – TCDD TEKNİK İŞ ORTAKLIĞI, (2024). Bursa–Yenişehir–Osmaneli Hızlı Tren Projesi Jeoteknik Değerlendirme Raporları. Ankara.

AYGM, (2023). Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü Bandırma–Osmaneli Yüksek Hızlı Tren Projesi, Bursa Kesimi T-10 Tüneli Jeolojik ve Jeoteknik Etüt Raporu. Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, Ankara.

Bandırma-Bursa-Yenişehir-Osmaneli Yüksek Standartlı Demiryolu Projesi (2025). Kurumsal – Anasayfa [Web sayfası]

Bieniawski, Z. T., (1989). Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons, New York, 251 s.

DSİ, (1973). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Bursa Ovası Hidrojeolojik Etüt Raporu. DSİ Yayınları, Ankara.

Doyuran, V., Canik, B., ve Yılmaz, İ. (2000). Bursa ve çevresinin hidrojeolojik özellikleri. Yerbilimleri, 21, 45–62.

Duru, M., Pehlivan, Ş., Şentürk, Y., Yavaş, F., ve Kar, H. (2007). 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları: Bursa Paftası. MTA Genel Müdürlüğü.

Duru, M., Pehlivan, Ş., ve Kar, H. (2009). Sakarya Zonu'nun stratigrafik özellikleri. Türkiye Jeoloji Bülteni, 52(1), 1–24.

Duru, M., Pehlivan, Ş., ve Kar, H. (2012). Sakarya Zonu'nun metamorfik temeli ve örtü birimleri. MTA Dergisi, 145, 1–28.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Emre, Ö., Duman, T. Y., Doğan, A., Özalp, S., ve Elmacı, H., (2011). Türkiye Diri Fay Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), Ankara.

Hamilton, W. J., & Strickland, H. E. (1841). Account of the geology of Asia Minor. London: John Murray.

Harita Genel Müdürlüğü. (2025). İndirilebilir Veriler & Dosyalar [Web sayfası]

Hoek, E., Carranza-Torres, C., ve Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion—2002 edition. Proceedings of the North American Rock Mechanics Society Meeting, 1, 267–273.

Hoek, E., ve Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(2), 203–215.

KTŞ, (2023). Karayolları Teknik Şartnamesi KGM Yayınları, Ankara.

Köse, H., Tatar, O., ve Aksoy, E. (2007). Tünel mühendisliği ve yeraltı yapıları. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.

Kun, A., (2010). Tünel Mühendisliği Uygulamaları. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 412 s.

Okay, A. İ., (1989). Tectonic units and evolution of the Pontides. Geological Society, London, Special Publications, 17, 109–116.

Okay, A. İ., (2011). Geology of Turkey: A synopsis. Geodinamica Acta, 24(1), 1–16.

Oktay, F. Y., & Tüysüz, O. (1999). Türkiye tektonik birlikleri. İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi, 12, 23–45.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Pehlivan, Ş., Duru, M., & Kar, H. (2014). Karakaya Kompleksi'nin stratigrafik ve tektonik özellikleri. Türkiye Jeoloji Bülteni, 57(2), 1–20.

Pehlivan, Ş., Usta, S., Bozkaya, Ö., (2014). Karakaya Kompleksi'nin litostratigrafisi ve tektonostratigrafik özellikleri. MTA Dergisi, 149, 27–44.

Phillipson, A. (1913). Reisen und Forschungen im westlichen Kleinasien. Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft, 177, 1–152.

Sandström, J., (1963). History of Tunneling and Underground Works. Pergamon Press, London, 284 s.

Sandström, J. (1963). Tunnelling. Elsevier.

Şengör, A. M. C., Yılmaz, Y., (1981). Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. Tectonophysics, 75, 181–241.

TCDD Teknik. (2024). RocLab programı kullanılarak kaya kütlesi parametre analizleri (Teknik yazılım çıktıları). Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları.

Tchihatcheff, P. de. (1869). Asie Mineure: Description physique, statistique et archéologique. Paris: Gide et J. Baudry.

Washington, H. S. (1894). The igneous rocks of the eastern Mediterranean. American Journal of Science, 48, 97–113.

Yazıcı, M. (2020). İznik–Mekece arasında jeomorfolojik gözlemler. Türkiye Jeoloji Bülteni, 63(2), 145–164.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Yiğitbaş, E., & Tunç, İ. O. (2020). Biga Yarımadası'nda Sakarya Zonu'nun Prekambriyen metamorfik kayaları: Geç Ediyakaran Gondwanaland aktif kıta kenarı. Yerbilimleri (Earth Sciences), 41(1), 1–28.