

**T.C.
MUNZUR ve ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
ORTAK FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



MUNZUR
ÜNİVERSİTESİ
2008

**MALATYA – HEKİMHAN (HASANÇELEBİ VARYANTI) T2 TÜNELİNDEKİ
MÜHENDİSLİK İNCELEMELERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erhan DENİZ

Anabilim Dalı : Jeoloji Mühendisliği

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM**

TUNCELİ - 2019

T.C.
MUNZUR ve ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
ORTAK FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MALATYA – HEKİMHAN (HASANÇELEBİ VARYANTI) T2 TÜNELİNDEKİ
MÜHENDİSLİK İNCELEMELERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erhan DENİZ

Enstitü No : 141109101

Anabilim Dalı: Jeoloji Mühendisliği

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM

TUNCELİ - 2019

T.C.
MUNZUR ve ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
ORTAK FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MALATYA – HEKİMHAN (HASANÇELEBİ VARYANTI) T2 TÜNELİNDEKİ
MÜHENDİSLİK İNCELEMELERİ**

**Erhan DENİZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

Bu tez .../ ... / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği / oyçokluğu** ile Kabul edilmiştir.

İmza:.....

İmza:.....

İmza:.....

Dr.Öğr.Üyesi Özlem ERDEM
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

ÜYE

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Prof. Dr. Numan YILDIRIM
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

ÖZET

Bu çalışma 2018-2019 Eğitim-Öğretim yılında Munzur Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından planlanarak yapılan Malatya - Hekiman - 16. Bölge Hududu Yolu 2. Kısım Km:70+000-104+280 kesiminin ikmal inşaatı yapım işi kapsamında Hasançelebi Geçişi varyantı T2 Tünelinde (88+608.00-88+953.00) uygulanan Mühendislik uygulamalarını kapsamaktadır.

Bu çalışma Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) uygulanarak açılan bir tünelde yapılan mühendislik çalışmalarını içermektedir. Bunun için, tünellerin gerekliliğinden, öneminden ve çeşitlerinden bahsedilmiştir. Çalışma alanının genel jeolojisi incelenmiştir. Kaya sınıflama sistemlerinden bahsedilmiştir. Kaya ve zemin birimlerinin mühendislik özellikleri anlatılmıştır, yapılan sondaj log verileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bilgilerle tünel tipleri ve destekleri belirlenmiştir.

Yapılan kazı çalışması ve destek terkiplerinde kullanılan malzeme hakkında bilgiler verilmiştir. T2 Tüneli kazı çalışmaları Sol tüpde 207, sağ tüpde 215 günde tamamlanarak ışık görülmüştür. Toplamda Sol Tüp 344.28 m, Sağ Tüp 367.08 metre desteklenmiştir. Bu desteklemelerde; 8602 metre süren, 54352 metre bulon, 612 adet iksa, 5360 m³ püskürtme beton ve 64631 m³ kazı yapılmıştır. Tünel imalat aşamasında karşılaşılan sorunlar ve çözümlerden bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hasançelebi, Tünel, NATM, Zemin Sınıflamaları, Mühendislik.

ABSTRACT

This study was prepared as a Master Thesis in the Department of Geological Engineering of the Institute of Natural and Applied Sciences at Munzur University in 2018-2019 academic year.

It covers construction of T2 tunnel (Km: 88+608.00-88+953.00) on the Hasançelebi passage in the scope of construction of Malatya - Hekimhan - 16. District Border highway, second part, section Km: 70 + 000-104 + 280 planned by General Directorate of Highways.

This study includes engineering applications in a tunnel excavated by applying the New Austrian Tunneling Method (NATM). The necessity, importance and types of tunnels are mentioned. General geology of the study area has been investigated. Rock classification systems are mentioned. The engineering properties of rock and soil units are described and the drilling log data is evaluated. Tunnel types and support systems in the tunnel during tunnel excavation were determined by the obtained information. Information about the material used in the excavation work and the support compounds is given.

The informations about the materials used for tunnel supporting sytems has been clarified. The tunnel excavation Works in the left tube within 207 days, in the right tube within 215 days has been completed and reached the light. Totally 344,28 M in the left tube, 367,08 M in the right tube has been used the supporting sytems. In these supporting systems, 8.602 M steel pipe support (forepole) , 54.352 M rock bolt, 612 steel ribs 5.360 CM shotcrete and concrete, 64.631 CM tunnel excavation has been used. The problems and solutions encountered in the construction stage are mentioned.

Key Words: Hasançelebi, Tunnel, NATM, Soil Classifications, Engineering

TEŞEKKÜRLER

Yüksek Lisans'a başladığım günden itibaren bilgi ve tecrübeleriyle her zaman yanımda olan, sabrı ve ilgisiyle bana büyük umut ve destek veren çok kıymetli Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Özlem ERDEM'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması için yaptığım bilgi akışı sırasında her türlü kolaylığı sağlayan Kolin İnşaat Şantiye Şefi Zülfi Taştan ve Kartun Müh. Müş. Tic. Ltd. Şti.'ne ve şirket mühendislerine teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında kapısını aşındırdığım Karayolları 8.Bölge Müdürlüğünde görev yapan; Kontrol Şefi Muhammed ERSÖZ, KGM Kontrol Müh. Hüseyin KAYA ve bana yol gösteren ARGE Arazi Müh. Hacı Bayram TAŞKIRAN'a teşekkür ederim.

Bu tezin yazım aşamasından itibaren her konudan bana sabırla, bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren sevgili büyüğüm UBM A.Ş. Teşkilat Başkanı Sayın Mustafa TELLİOĞLU'na ilgi ve alakası için çok teşekkür ederim.

Yüksek Lisans süresi boyunca ve hayatımın en önemli anlarında bana eşlik eden dostum Sayın Yusuf CEVER'e, eşim Figen DENİZ ve tüm öğrenim hayatımda beni sürekli destekleyen, yanımda olan, sabır gösteren, kıymetli aileme teşekkür ederim.

Erhan DENİZ
TUNCELİ – 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜRLER.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	VIII
RESİMLER LİSTESİ	IX
SEMBOLLER LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tüneller.....	2
1.2. Tünel İnşaatını Gerektiren Nedenler	3
1.3. Tünelcilikte Kullanılan Terimler	3
1.4. Tünel Çeşitleri	4
1.4.1.Ulaştırma Tünelleri.....	4
1.4.1.1. Karayolu Tünelleri.....	4
1.4.1.2. Demiryolu Tünelleri	5
1.4.1.3. Metro Tünelleri.....	5
1.4.1.4. Yaya Tünelleri	5
1.4.2. Hizmet Tünelleri.....	6
1.4.2.1. Alt Yapı Tünelleri.....	6
1.4.2.2. Kanalizasyon Tünelleri.....	6
1.4.2.3. Enerji ve Su Tünelleri.....	6
1.5. Türkiyede Karayolu Tünellerinin Tarihçesi	6
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	8
3. MATERYAL VE METOD	9
3.1 Materyal.....	9
3.1.1. İnceleme Alanının Yeri	9
3.1.2. Tünel Ulaşım Fonksiyonu ve Geometrik Standartlara Göre Projelendirme.....	11
3.1.3. Tünel Açma Yöntemleri	12
3.1.4. Kaya Sınıflandırma Sistemi.....	14
3.1.4.1. Kaya Yüğü (Terzaghi) Sınıflaması.....	15
3.1.4.2. Bieniawski'nin Jeomekanik Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi (RMR)	17
3.1.4.3. Barton Kaya Kütlesi Sınıflaması (Q).....	24
3.2. Metod.....	34
3.2.1. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)	34
3.2.1.1. Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Ana İlkeleri.....	35
4. GENEL JEOLojİ	38
4.1. Stratigrafi	38
4.1.1. Hocalıkova Ofiyoliti (Krüh)	41
4.1.2. Karadere Formasyonu (Kka)	41
4.1.3. Hekimhan Formasyonu (Krh).....	43

4.1.4. Tohma Formasyonu (Tt).....	43
4.1.5. Hasançelebi Volkanitleri (Kha).....	44
4.1.6. Sivritepe Trakit yesi (Khas).....	45
4.1.7. Yüceşafak Siyenitoyidi (Ky)	45
4.1.8. Davutgu Metamorfiti (Kd).....	46
4.1.9. Hyk Kireçtaşı (Kh)	46
4.1.10. Zorbehan Dolomiti (Kz)	46
4.1.11. Leylek Volkanitleri (Tl).....	47
4.1.12. Yamadağ Volkanitleri (Tya).....	48
4.1.13. Taraça (Qtr)	49
4.1.14. Yamaç Molozu (Qym) ve Kolüvyon (Qc).....	49
4.1.15. Alüvyon (Qa).....	49
4.2. Jeomorfoloji.....	49
4.3. Yapısal Jeoloji ve Tektonik	50
4.4. Depremsellik.....	51
4.5. Hidrojeoloji.....	53
5. TÜNEL JEOLJİSİ	54
6. ARAşTIRMA BULGULARI	59
6.1. Mühendislik Jeolojisi.....	59
6.1.1. Eklemler	60
6.1.2. Fiziksel ve Mekanik zellikleri	64
6.1.3. Kaya Sınıflamaları ve Zemin Parametreleri	67
6.1.3.1. Giriş Kesimi.....	68
6.1.3.1.1. RMR Sınıflaması	69
6.1.3.1.2. Q Sınıflaması	70
6.1.3.1.3. RMR-Q Korelasyonu.....	70
6.1.3.1.4. NATM Sınıflaması	70
6.1.3.1.5. Kaya Kütlesi Elasto-Plastik Parametreleri	71
6.1.3.2. Orta Kesimi	72
6.1.3.2.1. RMR Sınıflaması	73
6.1.3.2.2. Q Sınıflaması	73
6.1.3.2.3. RMR-Q Korelasyonu.....	74
6.1.3.2.4. NATM Sınıflaması	74
6.1.3.2.5. Kaya Kütlesi Elasto-Plastik Parametreleri	74
6.1.3.3. ıkış Kesimi	75
6.1.3.3.1. RMR Sınıflaması	75
6.1.3.3.2. Q Sınıflaması	76
6.1.3.3.3. RMR-Q Korelasyonu.....	76
6.1.3.3.4. NATM Sınıflaması	76
6.1.3.3.5. Kaya Kütlesi Elasto-Plastik Parametreleri	77
6.1.4. Nümerik Analizler	79
7. YAPILAN MÜHENDİSLİK ALIşMLARI.....	82
7.1. Tünel Kazı ve Destekleme Sistemeleri.....	82
7.2. Önerilen Destek Sistemlerinin Tanımı ve Uygulamaları	89
7.2.1. Süren Uygulaması	89
7.2.2. Umbrella Arch Uygulaması.....	89
7.2.3. elik Hasır.....	92

7.2.4. İksa Montajı.....	94
7.2.5. Püskürtme Beton	95
7.2.6. Kaya Bulonu	100
7.2.6.1. SN Bulon	100
7.2.6.2. PG Bulon	100
7.2.6.3. İBO Bulon	101
7.3. T2 Tüneli Gerçekleşen Kazı - Destek Tipleri ve İmalatlar	105
7.3.1. Zemin Sınıfı ve Destek Tiplerinin Belirlenmesi.....	105
7.4. Tünelde Meydana Gelen Göçük Problemi ve Çözüm Metodolojisi.....	110
8. SONUÇLAR.....	117
KAYNAKLAR.....	118
EKLER	122
ÖZGEÇMİŞ	123



SEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Tünelde kullanılan terimler	4
Şekil 3.1. Proje alanın yeri.....	10
Şekil 3.2. Terzaghi (1946)'nin önerdiği tünellerde kaya yükü kavramı.....	16
Şekil 3.3. RMR değerlerine göre tüneln desteksiz durma süresi	22
Şekil 3.4. Eşdeğer boyut ile kaya kütlesi kalitesi arasındaki ilişki.....	30
Şekil 3.5. Jeolojik dayanım indeksi	31
Şekil 3.6. Kaya sınıflandırma sistemlerinin karşılaştırması	33
Şekil 4.1. Çalışma alanının 1/25 000 ölçekli jeoloji haritasındaki konumu	39
Şekil 4.2. Proje güzergâhı ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti.....	40
Şekil 4.3. Çalışma alanının yakın çevresindeki ana fay hatları ve çalışma alanında belirlenmiş Oligosen sonrası faylar.	51
Şekil 4.4. Deprem bölgeleri haritası.	52
Şekil 4.5. Güzergâhın deprenselliği	52
Şekil 6.1. T2 Tüneli sondaj yerleşim planı.....	59
Şekil 6.2. Süreksizliklerin tünel enkesitine göre genelleştirilmiş gösterimi.....	61
Şekil 6.3. T2 Tüneli giriş kesimi kontur diyagramı.....	63
Şekil 6.4. T2 Tüneli giriş kesimi gül diyagramı	63
Şekil 7.1. B1 destek tipi.....	84
Şekil 7.2. B2 destek tipi (iksasız)	85
Şekil 7.3. B2 destek tipi (iksalı)	86
Şekil 7.4. B3 destek tipi.....	87
Şekil 7.5. C2 destek tipi.....	88
Şekil 7.6. Umbrella setleri	91
Şekil 7.7. T2 tüneli sol tüp jeolojik profil	108
Şekil 7.8. T2 Tüneli sağ tüp jeolojik profili	109
Şekil 7.9. Göçük konum planı	110
Şekil 7.10. Göçük kesiti.....	110
Şekil 7.11. Tünel içi pasa üzerine püskürtme beton uygulaması	112
Şekil 7.12. Çimento enjeksiyonu.....	114
Şekil 7.13. Krater tanzim kazısı ve geri dolgu	114

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Tünelciliğin son 100 yıllık gelişmesini en fazla etkileyen unsurlar.....	2
Tablo 3.1. Terzaghi'nin kaya yükü sınıflaması.....	17
Tablo 3.2. RMR sınıflama sistemi.....	19
Tablo 3.2. RMR Sınıflama Sistemi'nin devamı	20
Tablo 3.3. Kaya tünellerinde RMR'ye dayalı destek tipleri.....	23
Tablo 3.4. Q Sistemi	26
Tablo 3.4. Q Sisteminin devamı	27
Tablo 3.4. Q Sisteminin devamı	28
Tablo 3.5. ESR değerleri	29
Tablo 3.6. Q'ya bağlı kaya kütle sınıfı	30
Tablo 3.7. Önorm B2203	32
Tablo 3.8. Yeni Avusturya tünel açma yönteminin avantajları ve dezavantajları.....	35
Tablo 4.1. Deprem bölgelerine göre ivme katsayıları	53
Tablo 5.1. Kaya kütlelerinin bozunma dereceleri	55
Tablo 5.2. Süreksizlik yüzeylerinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve arazi tanımlamalarına göre sınıflandırılması	56
Tablo 6.2. T2 Tüneli giriş kesimi süreksizlik ölçümleri verileri	62
Tablo 6.3. Sondaj numunelerine uygulanan deneylere ait min. ve max. değerleri	64
Tablo 6.4. Sondaj numunelerine uygulanan deneylere ait sonuçlar	66
Tablo 6.5. Giriş kesimi RMR sınıflaması.....	69
Tablo 6.6. Giriş kesimi Q sınıflaması.....	70
Tablo 6.7. Orta kesimin RMR sınıflaması.....	73
Tablo 6.8. Orta kesimi RMR sınıflaması.....	73
Tablo 6.9. Çıkış kesimi RMR sınıflaması	75
Tablo 6.10. Çıkış kesimi Q sınıflaması	76
Tablo 6.11. T2 Tüneli kaya sınıflamaları ve zemin parametreleri	78
Tablo 6.12. T2 Tüneli deformasyon modülü değerleri.....	79
Tablo 6.13. Analizlerde kullanılan parametreler	80
Tablo 6.14. Destekleme Elemanları Malzeme Parametreleri	80
Tablo 7.1. Tünel kazı ve destekleme sistemleri	82
Tablo 7.1. Devamı	83
Tablo 7.2. Agregası için önerilen dane büyüklüğü dağılımına ait değerler	97
Tablo 7.3. Püskürtme beton karışım hesap raporu (C20/25)	98
Tablo 7.4. T2 tüneli sol tüp üst yarı km: 88+750, 00 püskürtme betonda proktor penetrometre ve basınç dayanım testi	99
Tablo 7.5. Enjeksiyon karışım hesap raporu	102
Tablo 7.6. T2 tüneli sağ tüp alt yarı km: 88+750, 00 bulon enjeksiyonu basınç dayanım testi	103
Tablo 7.7. T2 tüneli sol tüp bulon çekme testi	104
Tablo 7.8. Tünelde kullanılan malzeme miktarları.....	105
Tablo 7.9. T2 tüneli itineri.....	107
Tablo 7.10. Göçük delgi ve enjeksiyon icmali	113

RESİMLER LİSTESİ

Sayfa No

Resim 3.1. Proje alanına ait uydu görüntüsü	10
Resim 5.1. T2 Tüneli giriş kesimine ait görünüm (T1 Tüneli çıkışından bakış).....	57
Resim 5.2. T2 Tüneli çıkış kesimine ait görünüm	57
Resim 5.3. T2 Tüneli giriş kesimi üstünde (Km 88+620) yer alan Hasançelebi Volkanitleri (Kha) içerisindeki çok zayıf dayanımlı Aglomeratik - Andezitik Breşik Tüflere ait görünüm 58	
Resim 5.4. T2 Tüneli giriş kesiminde (Km 0+950) taban kotlarında yer alan Hasançelebi Volkanitleri (Kha) içerisindeki Andezit-Andezitik Bazaltlara ait görünüm	58
Resim 6.1. SK-7 nolu sondaj'dan alınan Tüf Breş örnekleri	64
Resim 6.2. SK-8A nolu sondaj'dan alınan Andezit örnekleri	65
Resim 7.1. Süren uygulaması (Hasançelebi Malatya).....	89
Resim 7.2. Umbrella Arch boruları	90
Resim 7.3. Kendinden delen süren.....	92
Resim 7.4. Çelik hasır (Hasançelebi Malatya).....	93
Resim 7.5. NPI profil iksa kurulumu (Hasançelebi Malatya)	95
Resim 7.6. Robot kollu püskürtme beton makinası (Hasançelebi Malatya)	96
Resim 7.7. SN bulon (Hasançelebi Malatya)	101
Resim 7.8. Sağ tüp tüneli üstünde oluşan göçük krateri (Hasançelebi Malatya)	111
Resim 7.9. Tünel içi pasa birikimi (Hasançelebi Malatya)	111
Resim 7.10. T2 tüneline ait uydu görüntü	115
Resim 7.11. Krater yüzeyinin grobetonla kapatılması	115

SEMBOLLER LİSTESİ

A1, A2, B1, B2, B3, C1, C2, C3, C4, C5 : NATM Kazı ve Destek Tipleri

ESR : Kazı Destek Oranları Faktörü

Ja : Çatlak Arışma Değeri

Jn : Çatlak Sistemi Değeri

Jr : Çatlak Pürüzlülük Değeri

Jw : Çatlak Suyu Azaltma Faktörü

Kha : Hasançelebi Volkanitleri

Km : Kilometre

ln : Logaritma

Mpa : Megapaskal

Qa : Alüvyon

R0, R1, R2, R3, R4, R5, R6 : Süreksizlik Yüzeylerinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı ve
Arazi Tanımlamalarına Göre Sınıflandırılması

SRF : Gerilim İndirgeme Faktörü

W1, W2, W3, W4, W5, W6 : Bozunma Dereceleri

σ_c : Serbest Basınç Dayanımı

KISALTMALAR LİSTESİ

Bl. Hd.	: Bölge Hududu
GSI	: Geological Strength Index
ISRM	: Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu
KGM	: Karayollar Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartname
MTA	: Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü
M.Ö.	: Milattan Önce
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu
NPI	: Avrupa Standartı I Profil Krişler
Ort.	: Ortalama
Q	: Barton Kaya Kütlesi Sınıflaması
RMR	: Bieniawski'nin Jeomekanik Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi
RQD	: Kaya Kalite Tayini
SK	: Sondaj Kuyusu
T.C	: Türkiye Cumhuriyeti
TBM	: Tünel Delme Makinası
vd.	: Ve diğerleri
vb.	: Ve benzeri

1. GİRİŞ

Tüneller, aralarında doğal zorluklar ve tehlikeler olan, iki yerleşim biriminin uygun ulaştırma araçları ile kesintiye uğramadan bağlantısını kuran önemli mühendislik yeraltı inşaatlarıdır. Nehir, dağlık arazi ve deniz gibi doğal engellerin ulaştırmanın sağlanması maksadıyla, iklim koşullarından etkilenmeden aşılması ve böylelikle ulaşım imkânlarının kolaylaşması tüneller aracılığıyla sağlanmaktadır. Yolcu ve yüklerin sorunsuz taşınabilmesi, bir milletin gelişmesi ve sosyal açıdan refaha kavuşması açısından oldukça önemlidir. Bu yapıların esas itibari ile amaçları, güvenilirlik ve verimlilik sağlayarak, kesintiye uğratmadan uygun koşullarda ulaşım hizmet etmektir.

Tünellerin, gelişmiş ülkelerde toplumun günlük hayatının önemli bir bölümünü oluşturduğunun geçmişte de örneklerini görebiliriz. İnsanlar hayatın olağan akışına ayak uydurabilmek ve farklı milletlerle iletişim içinde bulunabilmek için tünellere ihtiyaç duymaktadırlar. Bu nedenle geçmişten günümüze gelene kadar tünelcilik alanında çok önemli gelişmeler ve değişimler meydana gelmiştir. Tarih boyunca kültürel açıdan gelişim göstermiş olan toplumların diğerlerinden önce tünel inşa ettikleri görülmüştür. Söz konusu bu toplumlar teknoloji ve ekonomi gücünü de ellerinde tutmuşlardır.

Tarihde Tünel inşasında projelendirmenin önemi ve tünel yapım yönteminin belirlenmesinde ilk defa Romalılar dikkat çekmektedir. Bununla birlikte tünel mühendisliğinde en büyük gelişim son 200 yılda kazı, destekleme, çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve en uygun projenin yapılması ile olmuştur.

Bu bağlamda T2 Tünelinin üzerinde bulunduğu Malatya – Hekimhan – 16. Bl. Hd. 2. Kısım Yolu zor topoğrafik ve iklimsel koşulların geçerli olduğu Orta Anadolu - Doğu Anadolu (Malatya-Sivas) bağlantısını sağlaması planlanan ana ulaşım arterinin bir parçasıdır. Bu ana arterin önemli dar boğazlarından biri olan Hasançelebi mevkiinde, bu kesimin geometrik ve fiziksel standartlarının yükseltilmesi amacıyla Hasançelebi yerleşim yerinin doğusundan geçecek şekilde Geçiş Varyantı (Hasançelebi Geçişi Varyantı) yapılmasına karar verilmiş ve T2 Tüneli, Hasançelebi Geçiş Varyantında oluşturulması planlanan 3 adet çift tüp Karayolu Tünelinin ikincisidir.

1.1. Tüneller

Farklı amaçlar için kullanılmak üzere yapılacak olan yapıların bir kesiminin yeryüzünden geçirilmesinin teknik açıdan olanaksız olduğu yerlerde söz konusu kesimin yeraltından geçirilmesiyle yapılan sanat yapılarına tünel adı verilir.

Tünelciliğin son 100 yıllık gelişmesini etkileyen faktörler Tablo 1.1’de verilmiştir. Bu faktörlerin haricinde tünelciliğin gelişmesine etkileyen diğer etmenler tünel inşa edilmeden ve inşası esnasında dikkate alınması gereken; jeofizik, jeolojik, hidrojeolojik ve geoteknik araştırmalardır.

Bu tez çalışmasında tünel inşa ederken bilinmesi gereken temel bilgiler, tünel projelendirme safhaları, inşası esnasında uygulanacak yöntemler, zemin sınıflandırılması, iyileştirme metotları ve NATM ile inşa edilen bir tünel incelenmiştir.

Tablo 1.1. Tünelciliğin son 100 yıllık gelişmesini en fazla etkileyen unsurlar (Halcrow,1941)

	Ana Etkenler
Kazı(Harfıyat)	1- Sondajlardan gelen sonuçlar 2- Geliştirilmiş patlayıcılar ve patlatma teknikleri 3- Elektriksel ve basınçlı havanın güç olarak kullanılması
İksa(Destekleme)	1- Geliştirilmiş kaplama,beton ve kalıp demiri 2- Basınçlı enjeksiyon ile yapılan zemin iyileştirmesi 3- Tünel aynasında Zemin kontrolünü sağlayan kalkan
Çalışma Ortamı	1- Havalandırma 2- Aydınlatma 3- Pompalar ile Zemin suyunun kontrol edilebilmesi 4- Tünel aynasında basınçlı hava yastıkları oluşturarak tünele su akışının engellenmesi

1.2. Tünel İnşaatını Gerektiren Nedenler

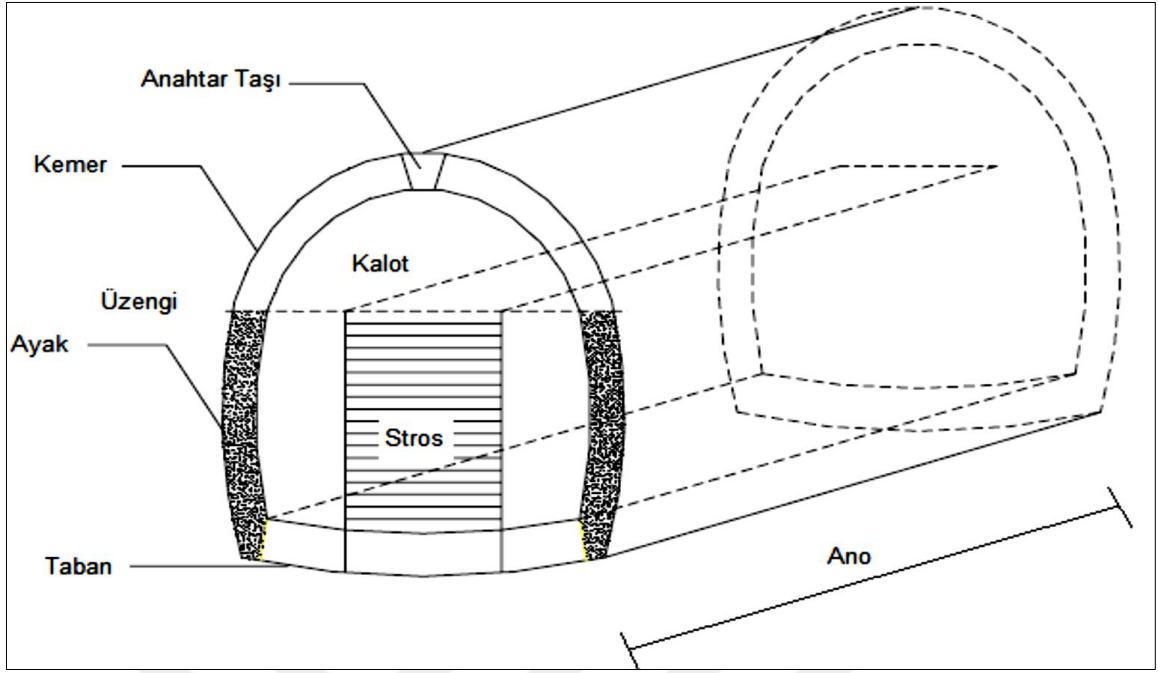
Tünel İnşaatını Gerektiren Nedenler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Dağlık arazide, eğimi yüksek olan güzergâhlarda, yeryüzünden geçilemeyen sırt ve tepelerin geçilmesi amacıyla,
- Toprak kaymaları, kaya yuvarlanmaları veya çığdan korunarak güvenli ulaşım sağlamak amacıyla,
- Demiryollarında, kot farkını yakalamak amacı ile,
- Sağlam olmayan zeminlerdeki büyük yarmalardan kurtulmak için,
- Farklı amaçlardaki su tünelleri, gaz borusu, telefon, elektrik kablosu gibi tesisleri içinde barındırarak galeriler şeklinde şehir hizmetlerinde,
- Yer üstü yapılarının maliyetinin fazla olduğu yerlerde yolların genişletilmesinde, yeni yolların açılma olanağının bulunmadığı koşullarda,
- Toplu halde insanların taşınmasını gerektiren metro inşaatlarında,
- Karayolu ile demir yolunun aynı düzende birbirini kesmemesi istenildiği yerlerde,
- Dağ, akarsu, boğaz vb. doğal engellerle birbirinden ayrılan yerleşim yerlerini birleştirmek amacıyla tüneller inşa edilmektedir.

1.3. Tünelcilikte Kullanılan Terimler

Tünelcilikte kullanılan terimler, bulunduğu konum itibari ile yatay düzlemle olan bağlantıları, kotları ve en kesitlerine bağlı olarak farklı şekillerde isimlendirilmektedir. Bu terimler Şekil 1.1. üzerinde gösterilmiştir. Yeraltında yatay veya eğik olarak yapılan bir tarafı açık olan kazılar ‘galeri’ adını alır. Dik şekilde yapılan kazılar ‘baca’veya ‘şaft’, eğimi aşağı doğru olanlarına ‘başaşağı’, eğimi yukarıya doğru olanlarına ise ‘başyukarı’ denir. Geniş daire ya da bunun gibilerine ‘oda’, tünelin üst kısmında yer alan zeminlere ‘örtü’, buradaki zemin kalınlığına da ‘örtü kalınlığı’ denilmektedir.

Tünel kazıldığında dışarıya atılan malzemeye ‘pasa’, tünelde herhangi bir işlemin yapıldığı parçaya ‘ano’ denir. Tünelin ilerlediği boşluğun alt kısmına taban veya ‘radye’, yankısımlarına ‘ayak’ veya ‘duvar’, üst kısmına da ‘tavan’ veya ‘kemer’ adı verilirken, kemerin ayaklarla birleştiği noktaya ‘üzengi’, buranın üstünde kalan kısma ‘kalot’, altında kalan kısmına ise ‘stros’, adı verilir. (Erguvanlı, K., 1984)



Şekil 1.1. Tünelde kullanılan terimler (Erguvanlı, K., 1984).

1.4. Tünel Çeşitleri

1.4.1. Ulaştırma Tünelleri

1.4.1.1. Karayolu Tünelleri

Şehirlerarası karayolu tünelleri genellikle 8 m'lik bir otoyolu ile banketlerde 1'er m'lik iki yaya yolunu bünyelerinde barındırırlar. Şehir merkezlerinde trafiğin çok olmasından dolayı daha geniş tüneller kullanılmasına rağmen trafik yoğunluğuna göre de tek şeritlide olabilmektedirler. Tüneller projelendirilirken genellikle tam kemer, sepet kulbu ya da elips şeklinde tasarlanırlar. Eğer nehir altından geçerlerse o zaman genellikle Tünel delme makinası (TBM) ile açıldıklarından daire şeklinde olurlar (Bozkurt, M., 1983).

1.4.1.2. Demiryolu Tünelleri

Ulaştırma tünelleri sıralamasında birinci sırayı demiryolu tünelleri almaktadır. Bunun nedeni demiryolu kullanımının artmasıyla birlikte, tünellerlik tekniklerinde gelişmeler kaydedilmesidir. Bu tüneller nehirlerde, su kanallarında ve boğaz altlarında ya da dağlık bölgelerin içerisinde inşa edilebilirler. Bir hat bulunan demir yollarında 4,5 ile 6 m, iki hat bulunan demiryollarında ise 8 ila 9 m'lik bir genişliktedir. Havalandırmanın rahatça sağlanabilmesi için, araçların üstünde en az 1,20 m bir boşluk kalacak şekilde, kurlarda dış ray, alinymanlarda ray seviyesinde alacak şekilde ray hizasından en az 4.0 m, anahtar taşı altına kadar en az 6 m bulunmalıdır (Bozkurt, M., 1983).

1.4.1.3. Metro Tünelleri

Projelendirilen bölgenin durumuna bağlı olarak otoyol ve ana güzergâh üzerinde veya şehir merkezi içinden geçmesi durumunda ise yer altında yapılırlar. Demiryolu tünellerinden boyutları ile farklılık gösterir. Yerleşim merkezlerindeki trafik yoğunluğunu en aza indirmek amacıyla metro tünelleri inşa edilmektedir. Hızlı ulaşım, metro, raylı sistem, toplu taşımacılık gibi ifadeler, yerleşim merkezlerinde raylı ulaşımı işaret eder. Bu taşımacılık sistemlerinin en önemli özellikleri, aynı anda yolcu sayılarının fazla olması ve on dakika gibi kısa süreler içinde sık seferlerinin olmasıdır. Bu yapılar diğer ulaşım sistemlerine göre farklı bir kotta inşa edilirler. Metro adıyla dünyanın birçok yerinde isimlendirilerek bilinmekte, 'metropolitan' veya 'metropolis' kelimesinden kısaltılarak kullanılmaktadır. Yerleşim yerlerinde metro ağları genellikle yerin altında yapılandırılır. Merkezden uzaklaştıkça yüzeylerde görülmeler sıklaşır (Bozkurt, M., 1983).

1.4.1.4. Yaya Tünelleri

Şehir merkezlerinde trafik sıkışıklığının fazla olduğu yerlere, ihtiyacı karşılayacak farklı kesitlerde ve eğimi fazla olabilecek şekilde yapılırlar. Eğimi fazla olan yerlerde iniş çıkışlarda kolaylık olması amacı ile asansörlerde yapılabilir, bu tünellerin genişliği 3 m, yüksekliği ise 2.50m'den daha az olmamalıdır. Yaya tünellerinde ihtiyaç halinde bisikletliler için ayrı bir şerit de yapılabilir. Dikdörtgen, kemer veya daire şeklinde olabilir (Bozkurt, M., 1983).

1.4.2. Hizmet Tünelleri

1.4.2.1. Alt Yapı Tünelleri

Şehir merkezlerinde enerji hatları, telefon ve diğer kablo hatlarının geçişi, su, gaz ve farklı amaçlara hizmet sağlanmak için boyut olarak çoğunlukla yaya tünelleri kadar olan tünellerdir. Başka tünellerden farkları ise bunların giriş ağzlarının düşey shaftlardan oluşmasıdır (Bozkurt, M., 1983).

1.4.2.2. Kanalizasyon Tünelleri

Şehir merkezlerindeki atık suların tahliyesi ve arıtma tesislerine ulaştırılması amacıyla kullanılan tünellerdir. Tünellerin amacına hizmet edebilmesi için tünelin iç yalıtımının çok iyi olması gerekmektedir, aksi taktirde atık suların içerisinde mevcut olan kimyasal maddeler tünel duvarlarına zarar verebilirler. Bir başka dikkat çeken husus ise sızıntının olmamasıdır. Sızıntının gerçekleşmesi durumunda kirli su yer altındaki temiz suya karışarak kirliliğe sebep olabilir. Bu nedenle kemer betonlarında aside karşı direnç kazandıran kimyasal maddeler kullanılmalıdır. Tünelin boyutları ihtiyacı karşılayacak şekilde değişiklik gösterebilir (Bozkurt, M., 1983).

1.4.2.3. Enerji ve Su Tünelleri

Elektrik eldesi için, suyun tribün merkezine naklini sağlayan tünellerdir. Tünelin içi tamamen su ile dolu olduğu için tünelin içinde yüksek su basıncı oluşacağından tünel tipi olarak dairesel ya da at nalıkesitleri daha uygun olmaktadır. Kemer beton dayanımı ve kaçakların önlenmesi için yapılan enjeksiyonlar bu tünellerde görülen en önemli sorunlardır (Bozkurt, M., 1983).

1.5. Türkiyede Karayolu Tünellerinin Tarihçesi

Ülkemizde 1950 yıllarında karayolları tünelleri yapım işine başlanmıştır. Yapılan ilk tünellerin amacı; yolları kısaltarak ulaşımı kolaylaştırmaktan ziyade çığ, heyelan gibi doğal afetlerden korunmak amacıyla yapılmıştır. 1980'lerin sonlarında otoyol yapımlarının hızlanmasıyla; tünel açmada kullanılan yeni makinalar ve NATM gibi yapım metodları ile

karşılaşmıştır. Gelişmeler, KGM ve Firmaları yeni ve daha uzun tünellerin yapılması konusunda cesaretlendirmiştir. 1990'lı yılların başında otoyollarda çift tüplü tünellerin yapımına başlanarak, son zamanlarda otoyol tünellerinde sağlanan yapım yöntemleri ve bilhassa elektromekanik sistemler üzerine bilgi ve tecrübe Devlet ve İl yollarına da aktarılmıştır. Bölünmüş yollar politikası ve Karadeniz sahil yolu projesi kapsamında yapılan birçok tünel otoyol tünellerinin güvenlik kriterleri standardında gerçekleştirilmiştir.

2000'li yıllarda 5 km ve üzerindeki tüneller yapılmaktayken, 2010'lu yıllardan sonra 10 km ile 15 km arasında değişen tüneller ihale edilmeye başlanmıştır. Uzun tünellerin yapılmasının en önemli sebeplerindenden birisi, Türkiye'nin 2023 yılı stratejik planlamasında yer alan kuzey-güney akslarının açılması hedefidir (URL-1).



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çalışma alanı Doğu toroslarda olup, Ketin (1959, 1966), Şengör ve Yılmaz (1981)'a göre Toridler, Özgül (1976), Perinçek ve Kozlu (1983)'ya göre Bozkır Birliği üzerinde yer almaktadır. Bölgedeki ilk çalışmalar, Poldini (1936), Bulumenthal (1937), Stchepinsky (1944), Wirtz (1954) tarafından yapılmıştır. Sonrasında stratigrafi ve petrol imkânlarının incelenmesi amacıyla, Ayan (1961), Bulut (1962), Pisoni (1962), Yoldaş (1971); genel jeoloji ve stratigrafi amaçlı olarak, Aslan (1971), Kurt (1972), Çoban (1973), Hakyemez ve Örcen (1982), İzdar ve Ünlü (1985), Yılmaz ve ark. (1991), Gürer (1992), Atabey ve ark. (1994), Ayyıldız ve ark. (2009), Beyazpirinç ve ark. (2010), Metin (baskıda); Maden potansiyelinin incelenmesi amacıyla İzdar (1961), Jacobson (1971), Leo (1971), Özer ve Kuşcu (1982), Yıldızeli ve ark. (1987), Yılmaz ve ark. (1998), Çubuk ve ark. (2001) tarafından çalışmalar yapılmıştır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Materyal

3.1.1. İnceleme Alanının Yeri

Çalışma alanı Malatya – Hekimhan – 16. Bl. Hd. 2. Kısım Yolu, Malatya'nın kuzeybatısında yer alan ve Malatya ilini Hekimhan ilçesi üzerinden Sivas iline bağlayan D850 nolu karayolu üzerinde, yaklaşık 35 km uzunluğunda bir kesimdir. Bu kesim üzerinde Hasacelebi yerleşim yerinin doğusundan geçecek şekilde 3 adet çift tüp karayolu tüneli içeren bir Geçiş Varyantı (Hasacelebi Geişı Varyantı) yapılmasına karar verilmiştir. Söz konusu yol kesimi, Karayolları 8. Bölge sınırları içerisindedir (Şekil 3.1).

Tez Konusu olan; Malatya – Hekimhan – 16. Bl. Hd. 2. Kısım Yolu Hasacelebi Geişı Varyantı içerisinde projelendirilen ‘‘T2 Tüneli [(Sol T p= Km 88+608-88+953 (345m), Sağ T p= Km 0+966- 1+334 (368m))’’ güzergâhı boyunca karşılaşılabacak olan jeolojik birimler belirlenmiş, arazi gözlemleri ile yapılan sondaj ve laboratuvar deneyleri sonucuna göre, T2 Tüneli Jeolojik-Jeoteknik modeli oluşturularak, kaya sınıflamaları yapılmış ve kaya kütlesi tasarım parametreleri belirlenmiştir.

Hasacelebi Geişı Varyantı T2 Tüneli, proje başlangıcı olan Malatya – Hekimhan – 16. Bl. Hd. 2. Kısım Yolunun yaklaşık 17,5 km ilerisinde yapılacaktır. T2 Tüneli, T1 Tünelinin bitiminden 127 m sonra; Hasacelebinin yaklaşık 500m güney doğusundan, Km 88+608’de başlamakta ve 350m doğusunda Km 88+953’te sona ermektedir. Hasacelebi Geişı Varyantı T2 Tüneli; Sol T p’te, Km 88+608- 88+953 arasında olup 345m, Sağ T p’te ise, Km 0+966- 1+334 arasında olup 368m uzunluğundadır. T2 Tüneli, T1 ve T3 Tünelleri ile Hasacelebi yerleşim yeri içerisinden geçen mevcut yolun yapılacak varyant ile yerleşim yerleri dışından geçmesini sağlayacaktır (Resim3.1).



Şekil 3.1. Proje alanının yeri (URL-8).



Resim 3.1. Proje alanına ait uydu görüntüsü (URL-9).

3.1.2. Tünel Ulaşım Fonksiyonu ve Geometrik Standartlara Göre Projelendirme

Mevcut Hekimhan-Sivas Devlet Yolu 9–10 m. (A2 sınıfı devlet yolu) platform genişliğinde olup trafik akış konforu ve emniyeti açısından uygun durumda değildir. Bu nedenle Ulusal Ağ bütünlüğü ‘Acil Eylem Planı’ kapsamında bu yolun, Şerit sayısı 2 x 2 olacak şekilde bölünmüş yol olarak projelendirilerek, trafik güvenliği ve sürüş konforu sağlanmasında yol standardının yükseltilmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede, Hekimhan-Sivas Devlet Yolunun Hasançelebi mevkiinde, oldukça engebeli bölgenin bir Devlet Yolu ve ana ulaşım arteri standartlarında geçişini sağlamak amacıyla oluşturulan 3 adet Karayolu Tünelinin ikincisi olan T2 Tüneli, Sağ Tüpü L=368 m ve Sol Tüpü L=345m boyunda ikişer şeritli çift tüplü tünel olarak projelendirilmiştir.

T2 Tüneli yatay ve düşey geometrisi, mevcut topografik kısıtlamalara rağmen, bir ana ulaşım yolu için gerekli görülen standartların dâhilinde belirlenmiş olup, Yatay Geometri R=1800 m yarıçaplı kurbda, Düşey Geometri ise % 3.98 boyuna eğim ile oluşturulmuştur. Tünel geometrisi, trafik akış konforu ve emniyeti açılarından uygun durumdadır.

Bir tünelin sahip olması gerekli enkesit genişliği yani şerit sayısı ve diğer gabari bileşenleri, mevcut trafiğin uygun bir konfor derecesinde geçirilmesi açısından yaklaşıldığında, şüphesiz ki, yatay ve düşey geometri ile birlikte trafik hacmi ve kompozisyonuna da doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda, T2 Tüneli’nin ikişer şeritli çift tüp olarak oluşturulması, bir ana ulaşım aksı üzerinde bulunan bu tünel için uygun bulunduğu şekliyle karar verilmiştir. Ek-1 (İnvertsiz) ve Ek-2 (İnvertli)’de gösterilen Tünel Tip Enkesitleri bu ihtiyacı karşılamaktadır.

T2 Tüneli kesiminde olduğu gibi, çift tüplü kesimlerde ve özellikle asgari jeoteknik koşullar ve zemin dayanımının mevcut olması durumunda, tüpler arasındaki yakınlığın kazı stabilitesi üzerinde çok belirgin olumsuz etkileri belirlenememiş olmakla beraber, pratikte söz konusu tüplerin birbirlerinden olabildiğince aralıklı konumlandırılmaları emniyetli bir yaklaşım olarak benimsenmektedir. Bu nedenle, iki tüp arasında, kazı cidarından kazı cidarı-na 17 m, yani ortalama bir tüpün kazı genişliğinin 1.5 katı kadar bir mesafenin bırakılması uygun görülmüştür.

T2 Tüneli giriş kesiminin ort. 100 m gerisinde T1 Tüneli çıkışı ve çıkış kesiminin ort. 150 m ilerisinde T3 Tüneli girişi bulunmakta olup, yeterli mesafe olmamasından

dolayı, asfalt kenarları arası 21 m'lik mesafe için herhangi bir rakordman yapılmadan yatay geometri aynen devam ettirilmiştir. T2 Tüneli yatay geometrisini oluşturan R=1800 m yarıçaplı kurb için, V=80 km/saat proje hızına göre tek taraflı %2 yanal eğim kullanılmıştır. Bunun dışında T2 Tüneli Giriş ve Çıkış Kesimi Portal Açık Kazılarında, bu kesimdeki tüm sandık yarmalarda uygulandığı üzere, sağ ve sol tarafta Kar Hendeği uygulaması gerekli görülmüştür.

T2 Tünelinde, Çift Tüp ve Tünel Boyu 1000 m'den az olduğu için, KGM tarafından hazırlanan “Tünel Güvenliği Proje Kriterleri” çerçevesinde, herhangi bir Acil Araç ve Yaya Geçişi ve Sığınma Cebi oluşturulmasına gerek görülmemiştir. T2 Tüneli için, benzer tünel boyu ve trafik hacimlerine göre değerlendirme yapıldığında (L<500 m-Çift Tüp- Şehirler-arası Karayolu Tüneli), herhangi bir havalandırma sisteminin gerekmediği anlaşılmaktadır.

3.1.3. Tünel Açma Yöntemleri

Yeraltı kazıları amacına göre; ulaşım, madencilik, sulama, drenaj ve benzeri ihtiyaçları sağlamak için geçmişten bugüne farklı bölgelerde kullanılmıştır. Bu süre zarfında kazı ve destekleme sistemleri aynı olup sadece uygulama zamanları farklı olacak şekilde farklı tünel açma metotları doğmuştur. Fakat bu metotların tamamına yakını kademeli kazı ve tam ayna kazılarının farklı kolları şeklinde gerçekleşmiştir. 18. ve 19. yüzyıllar arasında kullanılan bu metotlar; Amerikan, İngiliz, Avusturya Alman, Belçika ve İtalyan tünel açma yöntemleri vb. diğer yöntemler sayılabilir. Başka bir eski tünelcilik uygulaması ise Osmanlı askeri teşkilatında yeniçerilerden oluşan bir askeri birlik olan Lağımçı Ocağının, kale kuşatmalarında tünel kazarak sur duvarlarına ulaşması ve surları patlatarak, kale içine kadar tünel kazması ve kaleyi içten fethetmesi şeklindedir. Fakat bütün bu yöntemlere bakıldığı zaman tamamının, insan gücü ile parçalı kazı yapılması suretiyle keresteler kullanılarak destekleme yapılan sistemler şeklinde olduğu görülmüştür. Günümüzde teknolojik gelişmelerin artması nedeniyle bu yöntemler geliştirilmiştir. Kazı yapılan kayanın, kütle davranışını sınıflandırılmaya çalışılmakta, fakat bu sınıflandırmayı tünel açma yöntemi ile birleştirebilecek sayısal bir altlık oluşturamamaktadırlar. Bundan dolayı, mevcut sistemlerin genellikle büyük kesitli karayolu tünellerinde uygulanması esnasında sayısal, objektif değerlendirmelere gerek duyulmaktadır. Bu eksiklikler ise, uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflamaları kullanılarak giderilmeye çalışılmaktadır. Günümüzde yapılan uygulamalarda en fazla karşımıza çıkan ve bilinen yöntem; NATM

yöntemidir. Bu yöntem kaya kütle davranışını çeşitli şekillerde sınıflandırmalar yapmış ancak bunun için objektif değerlendirmeye esas sınıflama kategorileri oluşturamamıştır. Tünel tasarımının gerçekçi bir şekilde yapılabilmesi için yerinde fiziksel modeller kullanarak gerçek verilerle test yapmak doğru olan ancak pahalı seçenektir. Yöntem pahalı ve çok zaman aldığından, bilgisayar ve yazılım endüstrisindeki gelişmelerle de beraber sonlu elemanlar veya sonlu farklar içeren bilgisayar yazılımlarının ortaya çıkışı, tünel tasarımında bu tarz yazılımlara olan gereksinimi gündeme getirmiştir. Bu yazılımlar birtakım kabullerle çalışmakta olup, oluşturulan sayısal modelin hatasız çalışabilmesi için kaya kütlesi davranışını sisteme tanıttak jeoteknik özelliklerin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Sağlam kaya numunesi için jeoteknik özelliklerin laboratuvar ortamında belirlenmesi oldukça basitken, kaya kütlesi için aynı özelliklerin laboratuvar da veya arazide belirlenmesi oldukça güçtür. Bu sebeple hem bir takım deneye dayalı yaklaşımlar hem de uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflama yöntemleri aracılığıyla kaya kütlesine ait jeoteknik özellikler belirlenerek sayısal modeller oluşturulmakta ve buna göre tünel projelendirilmesi yapılmaktadır. Hem sağlamlaştırma türünün seçiminde hem de tünel açma yönteminin belirlenmesinde bu özelliklerinin büyük önemi vardır. Tünel yapımı genellikle 4 işlemin beraber ve birbirleriyle kordineli olarak yürütüldüğü bir çalışmadır;

- Tünelin kazılması
- Eğer gerekliyse iksa ya da destekleme yapılması
- Pasanın nakli
- Kaplama, izolasyon, drenaj ve havalandırma

Tünel açılması sırasında bu işlemlerin nasıl uygulanacağı, hangi yöntemlerin secileceği esas olarak Jeolojik ve Hidrolojik şartlara, tünelin şekline, genişliğine ve tünelin hangi amaçla hizmet edeceğine bağlı olarak, kayaçların ayrışma derecesi ve çatlak sıklığına bağlı olarak, tünel açma ve sağlamlaştırma yöntemleri doğru belirlenmelidir. Bu doğru seçimler aynı zamanda maliyetide etkilemekte olup, yanlış bir yöntem seçiminde birbirini takip eden sebeplerle maliyet artışıyla birlikte farklı sonuçlarda ortaya çıkmaktadır. Tünelcilite maliyete etki eden ana faktörler ise;

1. Tünel açılmasını etkileyen faktörler.
2. Tünel güzergâhının jeolojik ve hidrojeolojik durumu
3. Tünel desteklemesi ve destek türü

4. Tünelin yüzeyden derinliği
5. Tünelin çapı ve şekli
6. Tünelin uzunluğu
7. İşçilik
8. Çalışılan günler
9. Makine arızalarıdır.

Tünel açma yöntemleri 4 farklı yöntemle uygulanmaktadır.

- a) Alman Yöntemi
- b) İngiliz Yöntemi
- c) İsviçre Yöntemi
- d) Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi

3.1.4. Kaya Sınıflandırma Sistemi

Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, deneye dayalı tasarım yaklaşımlarının temel esasıdır ve mühendislik uygulamalarında genel olarak kullanılmaktadır. Bugün, kazı çalışması yapılmakta olan tünellerin birçoğunda sınıflama sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bunlardan en popüler olanı Terzaghi (1946) sınıflamasıdır. Bu sınıflama geçmişte de birçok tünellerin tamamlanmasında başarı ile kullanılmıştır. Terzaghi sınıflaması daha sonra ise Deere vd. (1970) tarafından güncellenmiştir ve yapılan birçok yeni sınıflama sistemleri çeşitli projelerde uygulanmıştır. Terzaghi sınıflamasında önerdiği çelik tahkimata karşılık, yeni sistemler, günümüzde kullanılan kaya saplaması ve püskürtme beton gibi tahkimat elemanları gibi yeni ekler getirmiştir. Yeni sınıflama sistemleri, yalnız tünelcilik uygulamalarında değil, şevler, büyük yeraltı boşlukları ve temellerin tasarımı gibi değişik mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Sınıflama sistemlerinin birçoğunda aşağıda belirtilen değişkenler kullanılmaktadır. Bunlar;

1. Tek eksenli basınç direnci
2. Kaya kalite katsayısı RQD
- 3, Süreksizliklerin:
 - a- Aralığı
 - b- Durumu (pürüzlülük, devamlılık, açıklık, dolgu maddesi gibi)
 - c- Konumu (doğrultu ve eğimi)

4. Yeraltı suyu durumu

5. Çevre etkileri

a- Gerilmeler

b- Kazı türü

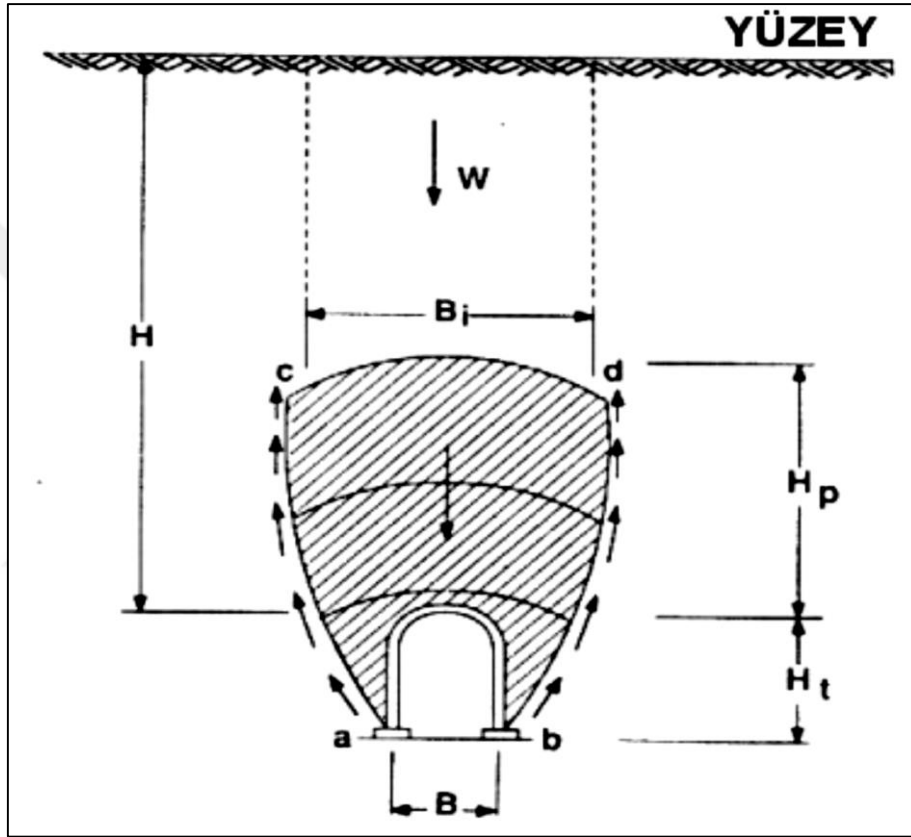
c- Ana süreksizlik düzlemlerinin etkisi

Taşın (kaya maddesi) basınç direnci birçok sınıflama sisteminde kullanılmıştır. Bunun nedeni, kaya kütlelerinin direncinin süreksizliklerin direnci ile taşın direnci arasında bir değerde olmasıdır. Yaygın kullanılan diğer parametre ise RQD dir. Sureksizlik özelliklerinden bir bölümünü kapsaması bakımından önemlidir. Yeraltı suyu ve başka çevresel etkilerde kaya kütlelerinin direncine ve davranışına önemli düzeyde etki etmektedir. Bu bölümde, yaygın olarak kullanılan kaya yükü (Terzaghi,1946), RMR (Bieniawski, 1973)ve Q (Barton, Lien ve Lunde, 1974) sınıflama sistemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

3.1.4.1. Kaya Yükü (Terzaghi) Sınıflaması

Terzaghi (1946); tünellerde çelik iksa kullanılmasına dayanarak tasarlanmasına yönelik gerçekçi ve ilk kaya yükü değerlendirme yöntemini ortaya atan kişidir. Alpler de çelik iksalı tünellerdeki tecrübelerine ve laboratuvarında kum kullanarak yaptığı fiziksel modellere dayanarak, farklı kaya türlerini tanımlamış, kaya türlerinde kullanılan tahkimat üzerine gelecek kaya yükü sınırlarını belirlemiştir. Bu yöntem, o günlerde gerçekten büyük bir gelişme olarak ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni tünellerde en fazla kullanılan tahkimat çeşidi olan çelik bağlar sınaama-yanılma yöntemine göre seçilmekteyken ortaya niteliksel olsa da bir sınıflama sistemi çıkmıştır. Kaya yapısı gözönüne alınarak, bu kayanın tahkimat üzerinde yaratacağı yükler sayısal olarak belirlenmiştir. Sonrasında birtakım değişikliklere uğrayan Terzaghi yöntemi, tünel ve yeraltı galerilerinde çelik iksa seçiminde yaygın şekilde kullanılmıştır. Terzaghi sisteminde çoğunlukla kaya sınıfları tanımlanmışsa da, Bieniawski (1989) ye göre bu sistem, objektif olarak kaya kalitesi değerlendirmesinde çok genel olup, kaya kütleleri özelliklerinin ölçülmesi ve sayısal olarak değerlendirilmesi sonucunda yapılan bir sınıflama metodu olmadığını ileri sürmüşlerdir. Çünkü sistem gereğinden fazla iksa önermektedir. Terzaghi'nin kaya yükü kavramını açıklayan basitleştirilmiş bir şekli Şekil 3.2.'de sınıflaması ise Tablo 3.1'de verilmiştir. Bu şekle göre, tünel kazısı sırasında bu açıklığın yanlarında ve üzerinde gevşemiş bir kaya kütleleri oluşacaktır, abcd alanı içinde yer alan bu gevşeyen kaya tünel açıldığı yöne doğru hareket

etmek isteyecektir, ac ve bd sınırlarında meydana gelen sürtünme kuvvetleri bu hareketi engellemeye çalışacaktır. Aynı zamanda, söz konusu kuvvetler, arazi yükünün (W) büyük bir kısmını tünelin her iki yanına doğru, orada bulunan kaya kütlesi üzerine aktaracaktır. Tünel tavanı ve yanlarının geriye kalan yükü (H_p) taşıması gerekecektir. İçinde hareketin olduğu kaya bölgesinin genişliği (B_i), kaya kütlelerinin özelliklerine ve tünelin genişlik (B) ve yüksekliğine (H) bağlıdır.



Şekil 3.2. Terzaghi (1946)'nin önerdiği tünellerde kaya yükü kavramı

Tablo 3.1. Terzaghi'nin kaya yükü sınıflaması

	Kayanın Durumu	RQD	Kaya yükü (ft)	Açıklamalar
1	Sert ve Sağlam	95-100	Sıfır	Küçük kavlaklamalar avrısı hafif kaplama gerekir
2	Sert tabakalı veya şistoz	90-99	0-0.5B	Esas olarak kaya düşmelerini önlemek için hafif destek. "Basınç ani değişiklikler gösterebilir
3	Masif, Orta eklemlili	85-95	0-0.25B	Yanal basınç yok
4	Orta bloklu	75-85	0.025-0.2(B+H ₁)	Önemli yanal basınç Sızan suyun kayayı yumuşatıcı etkisi çelik desteklerin alt kısımlarında sürekli destek veya dairesel destek gerektirir. Daha sonra yapılan değişikliklerle, suyun çok etkili olmadığı ve burada verilerin değerlerin %50 azaltılması önerilmiştir.
5	Çok bloklu	30-75	(0.2-0.6)(B+H ₁)	
6	Tamamen parçalanmış fakat kimyasal olarak sağlam	03,-30	(0.6-1.1)(B+H ₁)	
6a	Kum ve Çakıl	0-3	(1.1-1.4)(B+H ₁)	
7	Sıkışan kaya, orta derinlik	-	(1.1-2.1)(B+H ₁)	Yüksek yanal basınç Dairesel çelik destekler tavsiye edilir.
8	Sıkışan kaya, büyük derinlik	-	(2.1-4.5)(B+H ₁)	Yüksek yanal basınç Dairesel çelik destekler tavsiye edilir.
9	Şişen kaya	-	250 ft'e kadar (B+H ₁)'den bağımsız	Dairesel çelik destekler gereklidir. Aşırı durumlarda yenilen destekler kullanılmalıdır.

3.1.4.2. Bieniawski'nin Jeomekanik Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi (RMR)

Jeomekanik Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi olarak da bilinen Kaya Kütlesi Değerlendirme Sistemi (RMR) Bieniawski (1973) tarafından geliştirilmiştir. Bu sınıflama sisteminde aşağıda verilen altı parametre kullanılmaktadır:

- Kaya numunesinin tek eksenli basınç direnci
- Kaya kalite katsayısı (RQD)
- Süreksizlik aralığı
- Süreksizlilerin durumu
- Yeraltı suyunun durumu
- Süreksizliklerin konumu

RMR sisteminin kullanılması için, çalışma yapılan galeri ya da tünel boyunca kaya kütlesi yeterli sayıda, aynı özelliğe sahip kayaların bulunduğu bölgelere ayrılır. Yukarıda

belirtilen altı değişkenin değerleri her yapısal bölge için ölçümlerden belirlenerek standart veri toplama formlarına veya jeoteknik loglama formuna kaydedilir. Bu değişkenlerin hepsi kaya kütlesinin davranışını eşit oranda etkilememektedir. Örneğin % 90 RQD ve 200 MPa tek eksenli basınç direnci olan bir kaya kütlesi çok sağlam olarak nitelendirilirken, aynı kütleye etki edecek olan güçlü bir su akışı bu dayanıklılığı büyük oranda azaltacaktır. Bu nedenle, her değişkenin belirli sınır aralıklarına farklı sayısal değerler verilmiştir. Sınıflama için, beş değişkenin ilgili sayısal değerleri toplanarak, temel kaya kütlesi değerlendirme sayısı vardır. Elde edilen bu sayı, kaya kütlesi içerisinde mevcut eklemlerin konumlarına göre düzenlenerek, sonunda esas kaya kütlesi (RMR) değeri elde edilmektedir. Bu amaçla kullanılan gerekli tanımlar Tablo 3.2’de verilmektedir.



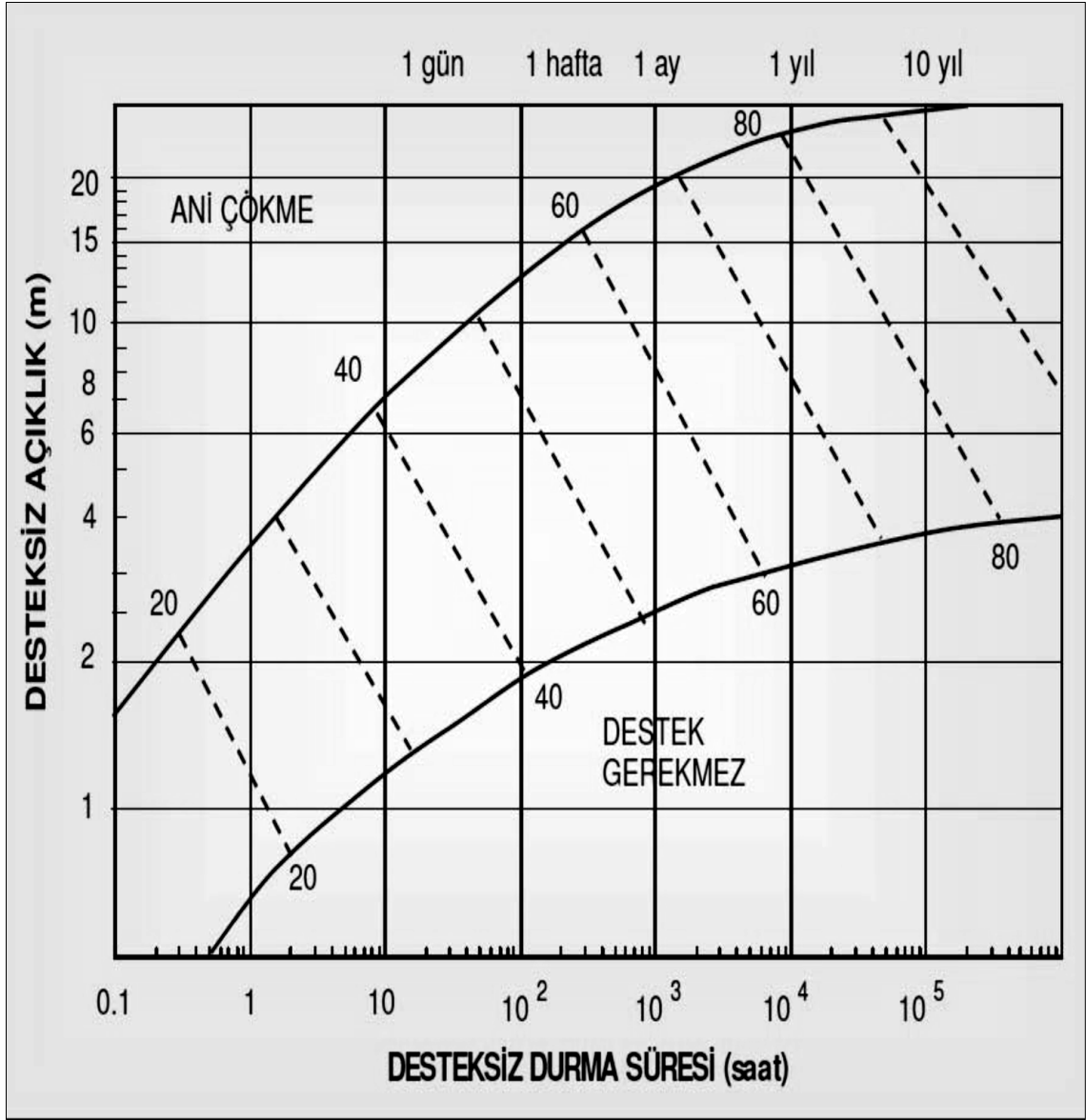
Tablo 3.2. RMR sınıflama sistemi

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE DEĞERLENDİRMELER									
PARAMETRELER			Birim	DEĞER ARALIĞI					
1	Nokta Yük Dayanımı		Mpa	> 10	4 - 10	4 - 2	1 - 2	Bu aralıkta Tek Eksenli Basınç Dayanımı tercih edilir	
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı		Mpa	> 250	100 - 250	5 - 100	25 -50	5 - 25	1 - 5
	DEĞERLENDİRME		Puan	15	12	7	4	2	1
2	Sondaj Karot Niteliği		RQD %	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25	
	DEĞERLENDİRME		Puan	20	17	13	8	3	
3	Eklem Aralıkları		cm.	> 200	60 - 200	20 - 60	6 - 20	< 6	
	DEĞERLENDİRME		Puan	20	15	10	8	5	
4	Süreksizlik Durumu			Çok pürüzlü, süreksiz, kapalı, taze eklem yüzü	Az pürüzlü, açıklık <1 mm.,az ayrışmalı eklem yüzü	Az pürüzlü, açıklık <1 mm.,çok ayrışmış eklem yüzü	Cilalı yüzler veya Dolgu <5 mm.,veya Açıklık 1 - 5 mm. sürekli	Yumuşak dolgu >5 mm.,veya Açıklık >5 mm. sürekli	
	DEĞERLENDİRME		Puan	30	25	20	10	0	
5	Yer altı Suyu	Tünelin her 10 m. lik kesiminden gelen su	Lt./Dak.	Yok	< 10	10 -25	25 - 125	> 250	
		(Gelen su basıncı) / (Asal gerilme)		0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5	
		Genel durumlar	Tanım	Tamamen kuru	Islak	Yaş	Sızıntı	Akıntı	
	DEĞERLENDİRME		Puan	15	10	7	4	0	
B. SÜREKSİZLİKLERİN KONUMU İÇİN DEĞER DÜZELTME									
Eklem Doğrultu ve Eğimi			Çok Uygun	Uygun	Orta	Olumsuz	Çok Olumsuz		
DEĞERLENDİRME	Tüneller	Puan	0	-2	-5	-10	-12		
	Temeller	Puan	0	-2	-7	-15	-25		
	Şevler	Puan	0	-5	-25	-50			

Tablo 3.2. RMR Sınıflama Sistemi'nin devamı

C. TOPLAM DEĞERLENDİRME DEN KAYA SINIFI TAYİNİ						
Değerlendirme		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21
Sınıf No		I	II	III	IV	V
Nitel Tanım		Çok İyi Kaya	İyi Kaya	Orta Kaya	Zayıf Kaya	Çok Zayıf Kaya
D. KAYA SINIFLARININ NİCELİK ANLAMI						
Sınıf No		I	II	III	IV	V
Ortalama kendini tutma 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 10 Dakika
Kaya kütlelerinin kohezyonu (Kpa)		> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı (°)		> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15
E. SÜREKSİZLİKLERİN DURUMUNA ÖZGÜ SINIFLAMA KLAVUZU						
Süreksizlik Uzunluğu	mt.	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20
Değerlendirme	Puan	6	4	2	1	0
Açıklık	mm.	Yok	< 0,1	0,1 - 1,0	1 - 5	> 5
Değerlendirme	Puan	6	5	4	1	0
Pürüzlülük	Tanım	Çok pürüzlü	Pürüzlü	Az pürüzlü	Pürüzsüz	Cıvalı Yüzlü
Değerlendirme	Puan	6	5	3	1	0
Dolgu	mm.	Yok	Sert Dolgu< 5	Sert Dolgu> 5	Yumuşak Dolgu< 5	Yumuşak Dolgu
Değerlendirme	Puan	6	4	2	2	0
Ayrışma	Tanım	Taze	Az Ayrışmalı	Orta Ayrışmalı	Çok Ayrışmalı	Bütünüyle Ayrışma
Değerlendirme	Puan	6	5	3	1	0
F. SÜREKSİZLİKLERİN DOĞRULTU VE DALIMININ AÇIMINA ETKİLERİ						
Doğrultu Tünel Eksenine Dik			Doğrultu Tünel Eksenine Paralel			
Dalım Yönünde İlerleme 45 - 90 °	Dalım Yönünde İlerleme 25 - 45 °			Dalım 45 - 90 °		Dalım 25 - 45 °
Çok Uygun	Uygun			Hiç Uygun Değil		Orta
Dalıma Karşı İlerleme 45 - 90 °	Dalıma Karşı İlerleme 25 - 45 °			Doğrultudan Bağımsız Dalım 0 - 20 °		
Orta	Olumsuz			Orta		

Tablo 3.2.'nin A bölümünde, sınıflama parametreleri ve puanlamalar gösterilmiştir. Her bir parametreler beş gruba ayrılarak, değer aralıkları bu gruplarda gösterilmiştir. Herhangi bir kaya kütlesi değerlendirilirken, parametrelerin bu gruplardan hangisine denk geldiği bulunur ve sonuçta bulunan sayısal değerler toplanır. Tablo 3.2.'nin E bölümünde süreksizlik şartlarının sınıflanması için kılavuz bilgiler vardır. Süreksizliklerin yönelimleri, tüneller ve madenlerden temellere, temellerden yamaçlara ilerledikçe daha önemli olmaktadır, bunlarda F ve B bölümlerinde görülmektedir. Tablonun C bölümünde, kaya kütlesi sınıfları çok iyi kayadan çok zayıf kayaya doğru değişen şekilde gösterilmiştir. D bölümünde; bir önceki C bölümündeki kaya kütle sınıflarına karşılık gelen kemerlenme süresi ile birlikte kaya kütlesinin Mohr - Coulomb dayanım parametreleri olan kohezyon ile sürtünme açısı yaklaşık değerleri verilmiştir. Yaklaşımın karmaşık kaya kütlelerindeki kullanımının basitliği sayesinde, bu sınıflama sisteminin ve düşünce yapısının uygulanması ile önemli mühendislik kazanımları sağlanmıştır. RMR değerlerine bağlı olarak tünel kazılarının ayakta kalma zamanı Şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. RMR değerlerine göre tüneltin desteksiz durma süresi

Destek yükü RMR sınıflamasından belirlenebilir:

$$P = \left[\frac{(100 - \text{RMR})}{100 \cdot \gamma \cdot B} \right] \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de P = kaya yükü (kN), B = tünel genişliği (m), γ = kayanın birim hacim ağırlığı (kg/m^3) dür.

Kaya tünellerinde RMR'ye dayalı destek rehberi Tablo 3.3'te belirtilmiştir.

Tablo 3.3. Kaya tünellerinde RMR'ye dayalı destek tipleri

RMR Sınıfı	Kazı Şekli	Destek		
		Kaya Bulonu	Püskürtme Beton	Çelik Hasır
Çok sağlam kaya 81-100	Tam ayna, 3m ilerleme	Belli noktalar dışında destekleme gerekmez		
Sağlam kaya 61-80	Tam Kesit: 1-1.5m ilerlemeli, Desteklerin tamamlanması aynadan 20m uzakta	3m uzunluğunda, 2.5 m aralıklı Lokal bulonlama, çelik ağ genellikle gerekir	Gereken yerlere 5 cm	Gerekmez
Orta derecede sağlam kaya 41-60	Üst ayna ve tabanda 1.5-3m ilerleme, her bir patlatmadan sonra ön destekleme aynanın 10m ilerlemesi ile nihai destek	4m uzunluğunda, 1.5-2 m aralıklı sistematik bulonlama, Tavan ve yanlarda çelik ağ	Tavanda 5-10cm yan duvarlarda 3 cm	Gerekmez
Zayıf kaya 21-40	Üst ayna ve tabanda 1-1.5 m ilerleme, aynanın 10m ilerlemesi ile destekleme hemen yapılmalı	4-5m uzunluğunda, 1-1.5 aralıklı sistematik bulonlama, Tavan ve yanlarda çelik ağ	Tavanda 10-15 cm, Yanlarda 10 cm	Gerekli yerlere 1.5 m aralıklı hafif çelik iksa
Çok zayıf kaya <20	Çoklu kazılar Çoklu kazılar Üstte 0.5-1.5m ilerleme Kazı ile birlikte destekler hemen yerleştirilmeli, Püskürtme beton patlatmadan sonra mümkün olan en kısa zamanda	5-6m uzunluğunda, 1-1.5 aralıklı sistematik bulonlama, Tavan ve yanlarda çelik ağ	Tavanda 15-20 cm, Yanlarda 15 cm, 5 cm aynada	0.75 m aralıklı ağır çelik iksa ile kesit kapatılmalı

3.1.4.3. Barton Kaya Kütlesi Sınıflaması (Q)

Q sınıflama sistemi, 1974 yılında Barton, Lien ve Lunde tarafından bulunmuştur. Q sisteminin, kaya sınıflama sistemi açısından çok büyük faydası ve etkisi olmuştur. Araştırmacılar İskandinavya’da açılan tünellerde 200 ayrı araştırma ve değerlendirme yaparak bu sistemi netleştirmişlerdir.

Q sistemide aynı RMR sisteminde olduğu gibi, altı parametreye değer verilerek oluşturulmuştur. Bunlar;

- RQD
- Süreksizlik takım sayısı
- En elverişsiz süreksizliğin pürüzlülüğü
- Ayırışma derecesi veya en zayıf süreklilikteki dolgu
- Su artışı miktarı
- Gerilme durumu

Kaya kütlesinin değerini veren ‘Q’ sayısı (tünellilik niteliği belirteci) eşitlik (3.2) ile tanımlanmıştır:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRW} \quad (3.2)$$

olarak tanımlanır. Burada:

RQD= Kaya kalite göstergesi,

J_n= Eklem takım numarası (süreksizlik takım sayısı ile ilgili)

J_r= Eklem pürüzlülük numarası (süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü ile ilgili).

J_a= Eklem ayırışma numarası (süreksizlik yüzeylerinin ayırışma veya bozuşma derecesiyle ilgili).

J_w= Eklem suyu azalım faktörüdür (süreksizlik içine akan su miktarları ve süreksizlikteki basınçlarla ilgilidir).

SRF= Gerilme azalım faktörüdür (makaslama zonlarının varlığı, gerilmekonsantrasyonları, sıkışan ve kabaran kayalarla ilgili).

Q’nun bulunmasındaki amaç denklemdeki üç temel oranın yorumlanmasında bazı yöntemleri geliştirerek Q’nun hakkında aşağıdaki görüşleri ortaya çıkmıştır:

Bu denklemde yer alan RQD/J_n kaya geometrisini kapsamaktadır. RQD/J_n; üstdeğeri 100/0.5 ile 100/20 alt değeri arasında değişmekte olup blok boyutlarının büyükçe

bir ölçüsüdür. RQD'nin artması ve süreksizlik takım sayısının azalmasıyla Q değerini artırır. Süreksizlik takım sayısının azalmasıyla RQD artar ve böylece orandaki pay ile payda biribilerini desteklerler. Esasındakaya kütlelerinin geometrik niteliği ne kadar kaliteli ise, bu oranın değeri de okadar yüksek olur. RQD'nin belirlenmesinde geleneksel olarak kullanılan 0.1 metrelik eşik değerinin 3 m'den küçük süreksizlik sıklık değerlerinden çoğunlukla etkilenmediği belirtilir.

Diğer oran (J_r/J_a) bloklar arası kaya dayanımıyla ilişkili olup, oranın yüksek olması kaya kütlelerinin mekanik niteliğinin iyi olduğunu göstermektedir. Ve yine eklem yüzeylerinin ve dolgusunun sürtünme özellikleri ile pürüzlülüğünü temsil etmektedir. Süreksizlik pürüzlülüğünün fazlalaşmasıyla oran büyür süreksizlik yüzeyinin ayrışması ile de azalmaktadır. Kaya kütlesi içerisindeki farklı süreksizlik takımlarının pürüzlülükleri ve ayrışma dereceleri değişkenlik gösterebilmektedir. Bu durumda Q sisteminin en kötü durumu tercih edilir.

Sonuncu oran (J_w/SRF) çevresel bir etkidir, makaslama zonlarının varlığı, su basınçları ve akımları, kayadaki sıkışmayla şişme ve analizdeki gerilme durumu ile alakalıdır. Su basıncıya da akım miktarının azalması, bunun yanında uygun kaya kütlesi dayanımının arazi gerilmelerine olan oranlarında bu oran artırmaktadır.

Bunlardan SRF:

- Killi kayaçlarda ve makaslama zonlarındaki kazılarda gevşeme yükünün,
- Kendi kendini tutabilen kayalarda gerilemenin,
- Kendini tutamayan plastik kayalarda (killerde) ezilme yüklerinin bir göstergesidir.

SRF, toplam gerilme değişkeni olarak da tanımlanabilir. J_w , etken normal gerilmeyi azaltarak eklem makaslama dayanımını azaltan su basıncının bir göstergesidir. Su bununla ötesinde, kil dolgulu eklemelerin yumuşamasına ve kilin su ile yıkanıp akarak eklem boşalmasına neden olabilmektedir. J_w / SRF ifadesi karmaşık deneye dayalı bir faktör olup etken gerilme koşullarını tanımlamaktadır. Q sisteminin kullanımı RMR sisteminden daha karmaşıktır. Bu nedenle, Tablo 3.4'da sistemin içerdiği altı parametreye ait sınıfların tüm aralıkları gösterilmiştir.

Q sistemi de 0.001 ile 1000 arasında ve RMR sistemi 0 ile 100 arasında bir değer verir. Bu yaklaşımlar kullanılarak, sınıflamada sayılar ile tanımlanan sınıflara göre bir kaya kütle tanımlaması yapılabilmektedir. Örneğin, RMR değeri 80-65 arası iyi kayayı; benzer şekilde Q'da ise 10-40 değeri iyi kayayı gösterir. RMR değeri beşkalite

sınıfısunarken, Q sistemi 9 kalite sınıfıile isimlendirilir. Bu sınıflamaların ikisi de tünel kazılarında gerekli desteği hesaplamak üzere geliştirilmiştirlerdir. Kullanıcılar, bu sınıflama tablolarınıbaşka projelerde kullanılırken dikkat etmelidirler. Bieniawski (1989) RMR sisteminin tüm tasarım problemlerine cevap olmadığını, geliştirme amacına yönelik olarak kullanılmasının önemli olduğu ifade etmiştir. Tablo 3.4.'de 6 değişkenin sayısal değerleri verilmektedir. Bu tablo incelendiğinde değişkenlerin anlamı daha kolay anlaşılacaktır.

Tablo 3.4. Q Sistemi

AÇIKLAMA		DEĞER	NOTLAR
KAYA NİTELİĞİ SINIFLAMASI (RQD)			RQD'nin 10 olarak ölçüldüğü veya rapor edildiği durumda (sıfır dahil), Q'yu değerlendirmede 10 nominal değeri kullanılır.5'lik RQD aralıkları (100,95,90 vb.) yeterince hassastır.
1 -	Çok fena	0-25	
2 -	Fena	25-50	
3 -	Orta	50-75	
4 -	İyi	75-90	
5 -	Pekiyi	90-100	
ÇATLAK PÜRÜZLÜK DEĞERİ (Jr)			
A -	Süreksiz Çatlaklar	4	İlgili eklem takımının ortalama açıklığının 3 m den büyük 1.0 ekle. Lineasyonlar uygun şekilde yönelmiş olmak koşuluyla lineasyonlu, düzlemsel, çizikli eklemler için Jr= 0.5 kullanılabilir. b den g ye kadar olanlar küçük, diğerleri büyük yapılardır
B -	Pürüzlü ya da düzensiz, dalgalı	3	
C -	Düz dalgalı	2	
D -	Sürtünme izli dalgalı	1,5	
E -	Pürüzlü ya da düzensiz, düzlemsel	1,5	
F -	Düz, düzlemsel	1	
G -	Sürtünme izli, düzlemsel	0,5	

Tablo 3.4. Q Sisteminin devamı

ÇATLAK SİSTEMİ DEĞERİ (J _n)		DEĞER		NOTLAR
A -	Masif, çatlak çok az veya hiç yok	0,5 - 1		Ara kesitler için (3.0xJ _n) kullanınız. Portallar için (2.0xJ _n) kullanınız.
B -	Bir çatlak sistemi	2		
C -	Bir çatlak sistemi ve gelişigüzel çatlaklar	3		
D -	İki çatlak sisitemi	4		
E -	İki çatlak sistemi ve gelişigüzel çatlakalar	6		
F -	Üç çatlak sistemi	9		
G -	Üç çatlak sistemi ve gelişigüzel çatlaklar	12		
H -	Dört veya daha fazla çatlak sistemi gelişigüzel çok fazla sayıda, küp şeker şeklinde	15		
J -	Paralanmış kaya, toprak görünümünde	20		
Not: Tünellerde kesişme bölgelerinde:		J _n x 3	36	
Giriş ağız bölgelerinde		J _n x 2	24	
AÇIKLAMA		DEĞER		NOTLAR
ÇATLAK SUYU AZALTMA FAKTÖRÜ (J _w)		Yaklaşık su basıncı (kg./ cm. ²)		
A -	Kuru kazılar ya da < 5 lt. / dak su gelen kazılar	< 1	1	
B -	Orta derecede su gelişi veya basınç, çatlak dolgularının yer yer yıkanması	1 - 2,5	0,66	
C -	Dolgusuz, çatlaklı dayanımlı kayada çok miktarda su gelişi veya yüksek basınç	2,5 - 10	0,5	
D -	Çok miktarda su gelişi veya yüksek basınç ile çatlak dolgularının fazlaca yıkanması	2,5 - 10	0,33	
E -	Patlama sırasında çok fazla su gelişi veya su basıncı, fakat zamanla azalması	10	0,2 - 0,1	
F -	Zamanla azalmayan çok fazla su gelişi veya su basıncı	< 10	0,1 - 0,05	
ÇATLAK AYRIŞMA DEĞERİ (J _a)		Ø °	Ja	
A -	Sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamaz geçirimsiz dolgu (Örneğin kuvars, epidol)	(-)	0,75	Φ _r , değerleri ayrışma ürünlerinin mineralojik özelliklerine yaklaşık bir kılavuz bilgi sağlamak amacıyla verilir.
B -	Ayrışmamış çatlak yüzleri, sadece yüzeysel paslanma	(25 - 35)	1	
C -	Hafifçe ayrışmış çatlak yüzleri. Yumuşamayan mincral kaplamaları, kil içermeyen kaya parçaları	(25 - 30)	2	
D -	Siltli veya kumlu kil kaplamaları, yumuşamayan düşük kil oranı	(20 - 25)	3	
E -	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil mineral kaplamalı, (kaolinit, mika v.b.) Ayrıca klorit, talk, jips, grafit ve az miktarlarda şişen killer (1 - 2 mm.veya daha az kalınlıkta kesikli kaplamalar)	(8 - 10)	4	
F -	Kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları	25 - 30	5	
G -	Fazla konsalide olmuş, yumuşamayan kil minaral dolguları (kesiksiz, kalınlığı 5 mm. den az)	16 - 24	6	

Tablo 3.4. Q Sisteminin devamı

ÇATLAK AYRIŞMA DEĞERİ (Ja)				DEĞER		NOTLAR			
H -	Orta veya düşük derecede konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineral dolgulu (kesiksiz, kalınlığı 5 mm. den az)			12 - 16	8	Φr, değerleri ayrışma ürünlerinin mineralojik özelliklerine yaklaşık bir kılavuz bilgi sağlamak amacıyla verilir.			
J -	Şişen kil dolgulu, (kesiksiz, kalınlığı 5 mm.den az). Ja' nın değeri, şişen kil boyutundaki tanelerin yüzdesine ve su etkisinde kalıp kalmayacağına göre değişir.			6 - 12	8 -12				
K -	Dağılmış kaya ve kil bölge veya bantları			6 - 24	10				
L -	Kil şartları tanımlaması için G.H.J.								
M -	Maddelerine bakınız								
N -	Siltli veya kumlu bölge kil bölge veya bantları, yumuşamayan düşük kil oranı			(-)	5				
O-P	Kalın, sürekli kil bölge veya bantları			(6 -24)	13				
GERİLİM İNDİRGEME FAKTÖRÜ (SRF)									
	a) Kazıyı kesen zayıflık zonları, tünel kazılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilir.					İlgili makaslama zonunun kazı yüzeyini sadece etkidiği fakat kesmediği durumda SRF değerlerini %25-50 oranında azaltınız. Kuvvetli bir anizotrop gerilme alanının bulunduğu durumda (ölçülmüşse): $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ olduğu zaman σ_c ve σ_t 'yi 0.8 σ_c ve 0.8 σ_t 'ye düşürür. $\sigma_1 / \sigma_t > 10$ olduğu zaman σ_c ve σ_t 'yi 0.6 σ_c ve 0.6 σ_t 'ye düşür.			
A -	Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya kapsayan birden fazla zayıflık (herhangi bir derinlikte)			10					
B -	Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya kapsayan tek zayıflık zonu (herhangi bir derinlikte)			5					
C -	Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya kapsayan tek zayıflık zonu (kazı derinliği < 50 m.)			2,5					
D -	Kil kapsamayan dayanımlı kayada birden fazla makaslanma zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)			7,5					
E -	Kil kapsamayan dayanımlı kayad tek makaslama zonu, (kazı derinliği < 50 m.)			5					
F -	Kil kapsamayan dayanımlı kayada tek makaslama zonu (kazı derinliği > 50 m.)			2,5					
G -	Gevşek ve açık çatlaklar, fazla çatlaklı, küp şekeri görünümlü (herhangi bir derinlikte)			5					
b) Dayanımlı kaya, kaya gerilmesi sorunları									
		s_c / s_1	s_1 / s_1	<u>SRF</u>					
H -	Düşük gerilme, yüzeye yakın	> 200	> 13	2,5					
J -	Orta derecede gerilme	200 - 10	13 - 0,66	1					
K -	Yüksek gerilme, çok sıkı yapı	10 - 5	0,66 -0,33	0,5 - 2					
L -	Az kaya patlaması (masif kaya)	5 - 2,5	0,33 - 0,16	5 -10					
M -	Fazla kaya patlaması (masif kaya)	2,5	0,16	10 - 20					
c) Yüksek kaya basıncının etkisi altında dayanımsız kayanın plastik akması									
N -	Az sıkışan kaya basıncı			5 -10					
O -	Fazla sıkışan kaya basıncı			10 - 20					
d) Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme									
P -	Az şişen kaya basıncı				5 -10				
R -	Fazla şişen kaya basıncı				10 - 15				

Yukarda belirtilen açıklamalar eşliğinde Q sayısı aşağıda verilen 3 değişkenin bir fonksiyonudur;

- Blok boyutları(RQD/ J_n)
- Bloklar arası makas dayanımı(J_r/ J_a)
- Etkin gerilme (J_w/SRF)

Tünelcilik niteliği belirtecini (Q) kullanarak kazının mekanik davranışını ve tahkimat gerekip gerekmediğini bulabilmek için Barton, Lien ve Lunde eşdeğer boyut (D_e) olarak adlandırdıkları yeni bir kavram bulmuşlardır. Eşdeğer boyut, kazıçapının, tavan açıklığının veya kazıyüksekliğinin, kazıtahkimat oranına (ESR) bölümü olarak açıklanmıştır. ESR değerleri Tablo 3.5.'da gösterilmektedir. Eşdeğer boyut ile kaya kütlesi kalitesi arasındaki ilişki Şekil 3.4.'da gösterilmiştir.

Tablo 3.5. ESR değerleri

KAZI DESTEK ORANLARI FAKTÖRÜ (ESR)		
Kazı tipi		Değer
A -	Geçici maden kazıları	3 - 5
B -	Sürekli maden kazıları, hidrolik enerji amaçlı su tünelleri (yüksek basınçlı cebri borular hariç), büyük kazılar için pilot tüneller, yarmalar ve aynalar v.b.	1 - 6
C -	Depolar, su tasviye tesisleri, küçük yol ve demir yol tünelleri, denge bacaları, yaklaşım tünelleri v.b.	1 - 3
D -	Santral binaları, büyük yol ve demir yolu tünelleri, sivil savunma sığınakları	1
E -	Yer altı nükleer santralleri, fabrikalar, spor ve kamu tesisleri	0,8

JEOLJİK DAYANIM İNDEKSİ Kaya kütlesinin yapısı ve yüzey koşulları belirlenerek uygun kutu seçilir, ortalama Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'nin değeri grafikteki doğrusal eğrilerden elde edilir.		Süreksizlik yüzey koşulu					
YAPI		AZALAN YÜZEY KALİTESİ →					
	Sağlam veya Masif-Kayaç malzemesi veya geniş aralıklı birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütlesi	UYGULANMAZ					
	Bloklu-Üç kesişen ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, birbirleriyle çok iyi bağlanmış, örselenmiş kaya kütlesi	90					
	Çok Bloklu- Dört veya daha fazla Süreksizlik setinin kesişmesinden oluşan köşeli bloklar içeren, kısmen örselenmiş kaya kütlesi	80	70				
	Bloklu/Örselenmiş- Birbirini Kesen Çok Sayıda Süreksizlik Setinin Oluşturduğu Köşeli Bloklar İçeren, Kıvrımlanmış ve/veya faylanmış kaya kütlesi		60	50			
	Parçalanmış- Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının bir araya gelmesinden oluşan, birbirlerine bağlanma dereceleri zayıf, aşırı derecede kırıklı kaya kütlesi			40	30		
	Foliasyonlu/Laminasyonu/Ma kaslanmış-Ince lamineal veya foliasyonlu, Zayıf kayaçlar. Diğer süreksizlik setlerine oranla daha egemen olan sık aralıklı şistozite yüzeyleri kayaçta bloklanmanın gelişmesini önlemiştir.				20	10	
		UYGULANMAZ					

Şekil 3.5. Jeolojik dayanım indeksi

Tablo 3.7. Önorm B2203

Kaya sınıfı		Kaya davranışı
A	A1 Stabil	Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Serbest kaya Parçaları temizlendikten sonra sökülme olma eğilimi yoktur.
	A2 Sonradan Az Sökülen	Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Tünel tavanında ve yan duvarların üst kısmında, süreksizlikler ve kaya kütlesi ağırlığından sığ sökülmelerin olma eğilimi vardır.
B	B1 Gevrek	Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Patlatmadan kaynaklanan kayadaki gevşemeler ve kaya kütlesinin düşük mukavemetli tünel tavanında ve yan duvarların üst kısmında sökülmelere neden olur.
	B2 Çok Gevrek	Deformasyonlar hızlı azalır. Kaya kütlesinin düşük mukavemetli patlamanın etkisi ile hızla derinlere ulaşan gevşemeler olur. Bu nedenle desteklenmeyen kısımlarda kopmalar meydana gelir.
	B3 Taneli	Bölünmüş kazıda bile kaya kütlesinde dökülmeler meydana gelir. Kohezyonun az olması ve az çimentolaşma kazının stabilitesinde yetersizliğe neden olur.
C	C1 Baskılı	Yüksek ön gerilmeler kırılma kayda kütlesince elastik enerji depolanmasına neden olur. Bu enerjinin aniden yer değiştirmesiyle kayada kesme ve kaya yapısının ezilmesi ile birlikte kırılmalar olur. Desteksiz bırakılan kısımlarda fırlayan kayalar fişkırmaya müsaittir. Kaya kütlesindeki kırılmalar derine ulaşır.
	C2 Çok Baskılı	Belirgin, uzun süren ve yavaş son bulan deformasyonlar gözlenir. Plastik davranışlı yüksek kohezyonlu kaya kütlelerinde yenilme gözlenir.
	C3 Aşırı Baskılı	İlk deformasyonlar yüksektir ve hızlı oluşur, uzun sürer ve yavaş son bulurlar. Derine inen kırılma ve plastik bölgeler gözlenir.
	C4 Akıcı	Çok az kohezyon ve sürtünme. Kaya kütlesinin az plastik davranışı kısa süre desteksiz bırakılan bölünmüş kazıda bile tünel içine malzeme akışına sebep olur.
	C5 Şişen	Şişme potansiyelli kil minerali, tuz, anhidrit içeren kaya kütlelerinde su alımıyla meydana gelen hacim artışı sebebiyle gevşemeler olur.

	BARTAON KAYA KÜTLESİ NİTELİĞİ (Q)	BİENLAWSKİ KAYA KÜTLESİ DEĞERİ (R M R)	ÖNORM B 2203 Ekim 1994 Öncesi	ÖNORM B 2203 Ekim 1994 Sonrası
1000		101		
400	SON DERECE İYİ	94		
	PEK ÇOK İYİ	82,7	A 1 STABİL	A 1 SAĞLAM
100		80		80
40	ÇOK İYİ			
	İYİ	65	A 2 AŞIRI SÖKÜLEN	A 2 SONRADAN SÖKÜLEN
10		58		10
4	ORTA	47	B1 GEVREK	B 1 GEVREK
	ZAYIF	40		4
1			45	B 2 ÇOK GEVREK
	ÇOK ZAYIF		B2 ÇOK GEVREK	1
0,1			29	B 3 TANELİ
	ÇOK FAZLA ZAYIF	20	C 1 BASKILI	0,1
0,01			17	C 1 DAĞ ATMA
	SON DERECE ZAYIF		15	0,03
			10	C 2 BASKILI
			5	0,015
				C 3 ÇOK BASKILI
				0,08
			L1 GEVŞEK ZEMİN YÜKSEK KOHEZYON	C 4 AKICI
			L2 GEVŞEK ZEMİN DÜŞÜK KOHEZYON	0,002
0				C 5 ŞİŞEN

Şekil 3.6. Kaya sınıflandırma sistemlerinin karşılaştırması

3.2. Metod

3.2.1. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)

NATM ilk olarak Rabcewicz tarafından 1962 yılında ortaya çıkarılmıştır. Tam olarak 1964 yılından itibaren her kesim tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Avusturya Alp Dağları'nda bulunan bilgiler ışığında gelişen yöntemin, birinci denemesi 1969 yılında Frankfurt metro inşaatında uygulanmıştır. Bu yöntemin esasında iki unsur bulunmaktadır. Birincisi; yeraltı kazısında kazılan kayayı desteklemek yerine güçlendirmek, başlangıç kazısından sonra meydana gelen yüksek basınçları taşımak değil, çevre kayayı, uygulanan güçlendirme elemanlarıyla güçlendirerek kendini taşımasını sağlamaktır. Buna ulaşmanın en kolay yolu kazı sonrası esnek bir taşıyıcı eleman olan püskürtme beton uygulayarak, deformasyonlara bir ölçüde izin verilmiş ve sonra kaya bulonları, püskürtme beton veya beton kaplama ve invert betonu ile tahkimatın diğer bölümleri yapılarak zemin sağlamlaştırılarak güçlendirilmiş olunur. İkinci aşamada, beton içi kemer oluşturulmadan, dış kemerin stabil hale ulaşmasına çalışılır. NATM kaya stabilizasyonunu masif kayada kubbeli bir kemer oluşturarak ve kayanın doğal mukavemetini koruyarak sağlamış olur. Kazıdan sonra kaya yüzeyine çelik hasırla birlikte püskürtme beton uygulanır, arkasından ise, bulonlama işlemi yapılarak zamanla oluşacak deformasyonlar engellenmek amaçlanır. Kemer betonu olan tünelin son kaplaması, çoğunlukla ilk püskürtme kaplamadan su geçirmez yapıya sahip membran ile korunan donatılı veya donatısız betondur. Drenaj elemanlarının parçası olan membran; kemer betonu korur ve drenaj için bir yön belirleyerek, suların membranın alt tarafına süzülüp oradan da drenaj boruları ile tahliye edilmesini sağlar.

NATM'ın diğer bir önemli unsuruda; özellikle zayıf kaya ortamlarında kazıyı çeşitli küçük kesitlere bölerek kademeli şekilde kazmaktır (Rabcewicz, 1964). Burada kazı sonrası çevre kaya davranışını gözlemleyerek deformasyon durumuna göre önlem almak esasını içermektedir. Metot kaya kütle davranışını sınıflandırmak için her ne kadar çeşitli kaynaklarda kaya veya kazı sınıflarını A, B ve C ile ifade edilen harflerle sınıflandırmış olsa da (KTŞ, 2013), bu sınıflandırma oldukça öznel olduğu için kendisine sayısal bir altlık oluşturma ihtiyacı ortaya çıkmış, bu boşluğu ise uygulamada RMR ve RQD gibi uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflandırma sistemlerini kullanarak giderilmesi amaçlanmıştır.

Bu sebeble NATM kesin olarak belirlenmiş kazı ve tahkimat sistemlerini barındırmamaktadır. En duyarlı ve ekonomik tahkimat elde edilmesi için tahkimatın sürekli kontrol edilmesi ve deformasyonların gözlemlenmesi esas olmak kaydıyla farklı tünelcilik ve kazı yöntemlerinden de faydalanılabilmektedir. Bu özelliğiyle NATM aslında bir felsefedir. Özellikle zayıf zeminlere uygulanan, ince bir püskürtme beton tabakasıyla hava temasını önleyerek yüzey sağlamlaştırılarak ardından, kaya bulonları ve mümkün olduğunca kısa sürede invert betonu ile kaplanan yeni bir tünelcilik yöntemidir. Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları Tablo 3.8. üzerinde anlatılmıştır.

Tablo 3.8.Yeni Avusturya tünel açma yönteminin avantajları ve dezavantajları

Yöntemin Avantajları	Yöntemin Dezavantajları
- Çok değişik zemin şartlarına uyumludur, - Farklı en ve kesitlere kolaylıkla ve esnek olarak uygulanabilir, - Gerekli tahkimat boyutlandırmasında ekonomik olarak optimizasyon sağlanabilir, - Kısa ve küçülmüş bölümlere ekonomik uygulamalar yapılabilir, - Tam kesit galeri açma makineleri ile kombinasyonları kolaydır	- Yeraltı suyunun altında uygulanması ek ölçümlerle olabilir, - İlerleme oranı nispeten küçük olduğu için önemli artışlar sağlanmaz, - Personel eğitilmesi, pratik kazandırılması kolay değildir, - Projeyi yaptıran ve yapan açısından anlaşma ve risk dağılımı zordur,

3.2.1.1. Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Ana İlkeleri

1- Tünelin taşıyıcı kısmını dağın kendisi bir başka ifadeyle, boşluğu çevreleyen ana kayanın kendisidir.

2- Kayanın ilk sağlamlığı muhafaza edilmelidir.

3- Gevşemelere engel olunmalıdır, yoksa kayanın taşıma direnci azalır.

4- Tek ve iki eksenli gerilme ortamından uzak durulmalıdır, durulmazsa kayanın taşıma direncini düşürür.

5-Kazı sonrasında meydana gelecek deformasyonlar, koruyucu zonun oluşmasına yeterli olmakta fakat kayacın aşırı gevşemesiyle taşıma direncinin düşmesine neden olmayacak şekilde kontrol edilerek koruyucu zon oluşturulmalı.

6- Destekleme işlemleri en uygun zamanda ve yeterli esneklikte yapılmalıdır. Bunu sağlamak için sağlamlaştırma işlemlerine zamanında başlanmalı, iksa direncini oluşturan yapının zayıf veya aşırı rijit olmamasına dikkat edilmelidir.

7- Kayacın kendini tutma süresi doğru şekilde tahmin edilmelidir.

8- Sağlamaştırma, kuvvetleri tutucu şekilde yapılmalıdır. Kazıdan sonra önemli deformasyonların ve gevşemelerin gözlemlendiği anlarda, önleyici en etkili metot olarak kısa sürede prizlenen ‘püskürtme beton’ kullanılmalıdır.

9- Ön ölçümler ve deneyler yapılmalıdır.

10- Sağlamaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde olmalıdır. Böylece kabuk içinde eğilme momentlerinin oluşması ve gelişebilecek çekme ve kesme kırıkları engellenmiş olur.

11- Desteklemeler, çelik hasır ve ankrajlarla yapılmalıdır. Sağlamaştırma, kabuğun kalınlaştırılmasıyla değil, kabuğa gerekli esnekliği verecek olan çelik hasır ve bağlarla sağlanmalı, kayayı kendine taşıtmak için mevcut gerilmeler ankrajlarla ama kayanın içine aktarılmalıdır.

12- Destekleme zamanı ve araçları ölçümlerle saptanmalıdır. Tünel duvarında ve onun etrafındaki kayalar içerisindeki deformasyonların ve gerilmelerin ölçülmesi, kayacın uygulama esnasındaki davranışını açığa vermesi bakımından önemlidir. Ön varsayımlara göre hazırlanan projelendirme ile dağın içine girildikten sonra uygulanması gereken proje, çoğu öngörülmeyen yeni etmenlerinde meydana gelmesi nedeniyle birbirinden farklı olacaktır. Bu nedenle yer altıkaya yapıları projelerinde, sürekli değişikliği zorunlu kılan bir yapı vardır. Yer altı kaya yapıları mühendisliğinde bir proje değil adım adım ve yer yer değişen bir proje sistemi olmalıdır. Bu sistemin kendi arasındaki uyumunun kaya ortamında uygun ve başarılı olması için; gözlem, denetleme, ölçme, deneyleme, yorumlama ve arşivlendirme gibi tüm mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği çalışmalarının noksansız yapılması zorunludur. Bu çalışmaların yapılmadığı ve kesitler boyunca hep aynı projenin kullanıldığı durumlarda NATM kullanılmamıştır.

13- Genel olarak tüneller dairesel kesitli yapılardır. Tünel, statik bakımdan taşıyıcı zon ile sağlamaştırma kabuğunun oluşturduğu bir dairedir.

14- Destekleme kabuğu kapak halka şeklinde olmalıdır. Bir çemberin statik bakımdan tam taşıyabilir duruma gelmesi için halkaların kaplanması mecburidir.

15- Destekleme halkası, en kısa zamanda oluşturulmalıdır, aksi takdirde tamamen kapanmamış bir çember, taşıyıcı halka durumunda olacağından gevşemeleri arttırarak ve boşluğu çevreleyerek onun taşıma direncini düşüren bir etken olur.

16- Dağ mümkün olduğunca az örslenmelidir. Tünelin açılması primer gerilme dengelerini değiştirerek yeni bir gerilme dağılımı meydana getirir. Tünelin biçimini ve

boyutunu değiştirmeye yönelen her yeni manevrabir kez daha gerilmelerin yönünün, şiddetinin ve yerinin değişmesine sebep olacak, böylelikle kaya dokusu zamanla gevşeyecek ve kayanın taşıma direnci düşecektir. Atlanmaması gereken en önemli nokta, kayanın en sağlam olduğu durumun kazı öncesindeki ilk halidir.

17-Tünel açma yöntemi yapının güvenliği açısından önemli olduğu için, yönteminin uygulanış biçimi yeraltı kaya yapısının stabilitesi ve güvenliği açısından, kayanın zamana bağlı davranışını doğrudan etkilenmesinden dolayı büyük önem arz etmektedir. Yöntemler uygulanma şekline göre büyük farklılıklar oluştururlar.

18- Tünel en kesiti elips veya daire şeklinde olmalıdır. Bu şekiller duvarlarda ve kaya içinde gerilmelerin yoğunlaştığı bölmeler meydana getirerek, bunların karşılanmasını zorunlu kılan aşırı boyutlandırmaya neden olurlar ya da yapının duraylılığınıve güvenliğini risk altına sokarlar.

19-İç kabuk ince ve dış kabuk ile sürtünmesiz fakat sıkı bağlı olmalıdır.

20- Geçici sağlamlaştırma işlemleriyle yapının stabilitesi temin edilmiş olmalıdır. Yeraltı kaya yapısının deformasyonları i kabuğun yerleştirilmesinden önce durdurulmuş, olmalıdır.

21-İmalat aşamasında gerekli ölçümleri yapılmalıdır. Kaya ve kabuktan oluşan sistemin, yapım sırasında karşılıklı davranışların bilinmesi, deformasyonların snmleşip snmleşmediğinin belirlenmesi ile gerilmelerin, yer, büyüklük ve türlerinin saptanması açısından önemlidir. Kaya ve beton içine yerleştirilen ölçüm aletleri yapının tamamlanmasından sonra da kontrol amacıyla kullanılmalıdır.

22- Yapının bünyesinde bulunan ve ordan kabuğa iletilen su basıncı drene edilmelidir. Yeraltı suyunun bulunduğu durumlarda yeraltında açılan her boşluk, bir drenaj yapısı gibi görev almakta ve suyu kendisine çekmektedir. Süreksizliklerin mekanik özelliklerini değiştirmesi çalışma ortamını olumsuz etkileyeceğinden dolayı istenmeyen su geliri, su boşaltan ağızların beton ile tıkanmasından sonra kabuk gerisinde büyük değerlere varan su basınçları oluşturabilir. Çatlak suyubasıncının sistemi taşıma direncini düşürmesini önlemek için suyun drene edilmesi çok önemlidir. Bu nedenle boşluk çevresine drenaj boruları konulmalıdır.

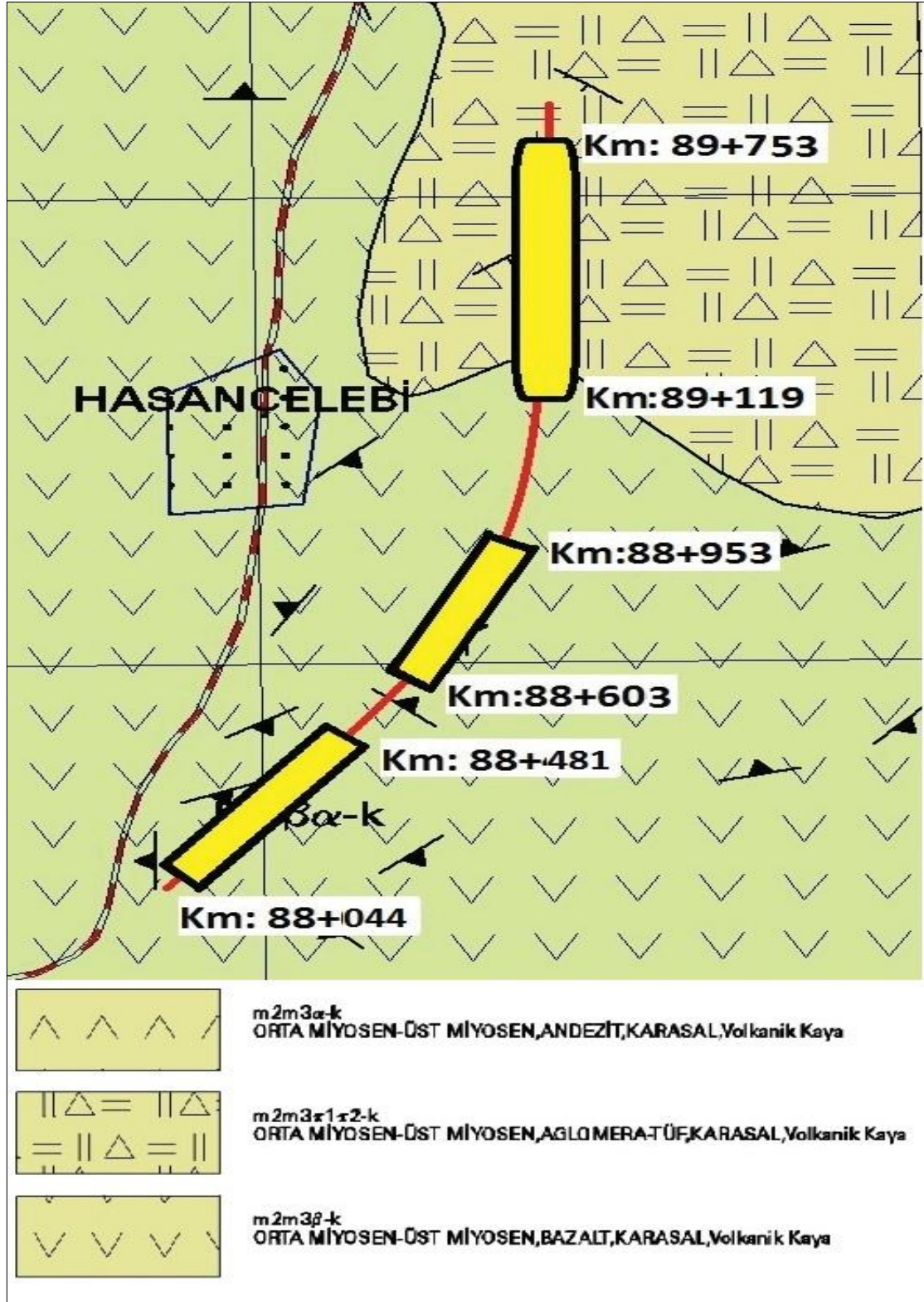
4. GENEL JEOLJİ

Çalışma alanı ve çevresinin, MTA ve değişik kurum ve kuruluşlar tarafından değişik zamanlarda genel jeoloji çalışmaları yapılarak yörenin jeolojisi aydınlatılmış ve jeolojik formasyonlar adlandırılmıştır. Bu kapsamında, MTA raporları esas alınarak formasyon isimlerine uyulmuş, incelenen çalışmaların özeti; stratigrafi, jeomorfoloji, yapısal jeoloji ve tektonik ve depremsellik alt başlıklarında aşağıda sunulmuştur.

4.1. Stratigrafi

Çalışma kapsamında yer alan kesimde yerel olarak; Üst Jura - Alt Kretase yaşlı Hocalıkova Ofiyolitleri, Üst Kretase yaşlı Karadere Formasyonu, Hekimhan Formasyonu, Hasançelebi Volkanitleri ve Zorbehan Dolomiti ile Kuvaterner yaşlı Taraça, Yamaç molozu, Kolüvyon ve Alüvyon bulunmaktadır. Hasançelebi Geçiş Varyantı T2 Tüneli'nin yapılacağı kesimin yer aldığı, MTA tarafından hazırlanan 1/25 000 ölçekli jeoloji haritasında, yapılan arazi ve sondaj çalışmaları değerlendirildiğinde, Hasançelebi Geçiş Varyantına ait T2 Tünelinin tamamının Üst Kretase yaşlı Hasançelebi Volkanitleri (Kha) içerisinde açılacağı öngörülmüştür. Hasançelebi Volkanitleri bu kesimlerde genel olarak birbirine geçişli özellik gösteren Andezit, Andezitik Bazalt, Andezitik-Bazaltik Lav Akıntıları, Aglomera, Piroklastik Kayaçlar ile Tüf Arabantlarından ve Tüf Breşlerinden oluşmaktadır.

Güzergâh ve yakın çevresi boyunca yüzeyleyen jeolojik birimlerin özellikleri yaşlıdan gence doğru tanımlanmış olup ayrıca proje alanının 1/25 000 ölçekli jeolojik haritasındaki konumu Şekil 4.1'de, proje güzergâhı ve yakın çevresine ait genelleştirilmiş stratigrafik kesit Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Çalışma alanının 1/25 000 ölçekli jeoloji haritasındaki konumu (MTA Malatya K-39-b2 paftası sadeleştirilmiştir).

ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	FORMASYON	SİMGE	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SENOZOYİK	KUV.	ÜST EÖSEN	Alüvyon	Qal		Kil, kum, çakıl boyutundaki malzemeler
			Yamaç Molozu	Qym		Bloklu ÇAKIL - çakılı BLOK
			Taraça	Qtr		Siltli, kili, çakılı KUM - kumlu ÇAKIL
	TERSİYER	ÜST EÖSEN	Yamadağ Volkanitleri	Tya		Bazaltik bileşimli lav akıntıları, piroklastikler ve bazaltik ve andezitik lav akıntıları
			Laylek Volkanitleri	Tl		Birim açık renkli, sert ve dayanıklıdır. Albit-ortoklas, albit ve biotit içerir.
MESOZOYİK	KRETASE	ÜST KRETASE	Zorbehan Dolomiti	Kz		Dolomitli Kireçtaşı
			Hüyük Kireçtaşı	Khü		Orta-kalın katmanlı, makro ve mikro fosilli, yer yer kumlu, spatik, biyoklastik fasyesli kireçtaşı
			Davulğu Metamorfik Yuzeşak Siyenitoid Hasanyeli Vol.	Kd Ky Kya Kas		Trakit/Alkali Trakit Siyenit, Kuvars Siyenit, Nefelin Siyenit, Siyenodiyorit Kontakt Metamorfik Volkanit Traki Andezit, Tefritonolit, Dazit, Spliit, Diyabaz
			Sinilepe Trakit Üyesi			
			Torun For.	Tl		Kireçtaşı - marn ard.
			İrdaç Üyesi			Çamurtaşı-kumtaşı-kili kireçtaşı ard.
			Çivril Üyesi			Kireçtaşı - marn ard.
			Çorak Üyesi			Kireçtaşı - marn ard.
			Yoğunsakız Üyesi			Çakıltası, kumtaşı-çamurtaşı ard.
			Zeynepoğlu Üyesi			Resital kireçtaşları
			Karıkaya Üyesi	Krh		Kumtaşı-marn-kireçtaşı ard
			Karatepe Üyesi			Konglomera, kumtaşı, silttaşı ve kilitaşı
			Kesikköprü Üyesi			Çakıltası-Kumtaşı-Çamurtaşı ardalanması
			Karadere Formasyonu	Kka		
	JURA	Ü. JURA- AKRETASE	Hocalıkova Oliyoliti	Krh		Dunit, Harzburgit, Lerzolit, Gabro, Peridotit, Serpantin, Spliit, Pelajik Çökeller

Şekil 4.2. Proje güzergâhı ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (MTA).

4.1.1. Hocalıkova Ofiyoliti (Krüh)

Birimin yaşı Turoniyendir (Üst Kretase). Ayrıca, bölgede Jura - Alt Kretase yaşlı kireçtaşlarının bu ofiyolitik seri tarafından kesildikleri ve Maastrichtiyen yaşlı çökellerin de ofiyolitik seri üzerinde transgresif olarak bulundukları da belirtilmektedir. Hekimhan - Hasançelebi (Malatya) bölgesinde de oldukça geniş yüzlekleri bulunan ve başlıca harzburjit, dunit, piroksenit, serpantinit, peridotit, gabro, spilitlerden oluşan birim ilk olarak Hocalıkova Ofiyoliti olarak isimlendirilmiştir. İnceleme alanında okyanusal kabuğa ait olan Hocalıkova Ofiyoliti (Krüh) ultramafik ve mafik kayaların büyük çoğunluğu serpantinleşmiş harzburjit, piroksenit, gabro, spilit ve pelajik çökellerden oluşan kaya topluluğundan oluşmaktadır. Hocalıkova Ofiyolitini oluşturan ultramafik kayalar genellikle yeşil renkte olup, genelde kümülatif kayalarla temsil edilmektedir. Hocalıkova Ofiyoliti (Krüh) çalışma alanında genelde yeşil ve yeşilin diğer tonlarında gözlenmektedir. Ayırmamış yüzeylerde olivin ve piroksen kristalleri gözle seçilebilmektedir. Ultramafik kümülatlar ana minerallerini olivin ve piroksenin oluşturduğu dunit, harzburgit ve piroksenit ile temsil edilir. Kretase yaşlı Horasansal formasyonunu tektonik dokanak ile üzerlemekte olup, Kretase yaşlı Ulupınar Formasyonu tarafından uyumsuzlukla üzerlenmektedir.

4.1.2. Karadere Formasyonu (Kka)

Hocalıkova Ofiyolitinin bölgeye yerleşmesini izleyen dönemde ofiyolitin üzerinde Çökelmiş ve tümüyle ofiyolitik gereçten türemiş, karasal-sığ denizel, çakıltaşı - Kumtaşı – çamurtaşı araldanmalı bir birimdir. Formasyon tipik yüzeylemesini Hekimhan'ın 4 km batısındaki Karadere Köyü çevresinde verdiği için Karadere Formasyonu adıyla anılmıştır. Başlıca çakıltaşı - kumtaşı – çamurtaşı Araldanmasından oluşan bu birimde tabanda çakıltaşı, tavana doğru ise kumtaşı Egemendir. İstif tabanda çoğunlukla kırmızı ve kahverenginin egemen olduğu alacalı Renkli çakıltaşı ile başlar. Başlıca gabro, piroksenit, spilit, kırmızı çört ve kireçtaşı Bileşimli çakılların hemen tümü ofiyolitten türemiştir. Yuvarlaklık ve küresellik iyi gelişmiştir. Binik çakıllar yer yer gözlenir. Boylanma kötü-orta arasında değişir. Ufaktan çok iri çakıla dek her boyutta gerece rastlamak olasıdır. Matriks orta-iri taneli Kum, başlayıcı ise karbonatlı - demirli kildir. Çoğunlukla orta - çok kalın paralel, Seyrek tekneksi veya tablamsı çapraz katman örnekleri gelişmiştir. Çakıltaşı

Katmanlarının tabanları çoğunlukla aşındırılmalıdır. Kumtaşları, çakıltaşlarına oranla İstifte daha az yaygındır. Toplam kalınlığın yaklaşık % 20'sini kaplar. Gereçler Çakıltaşlarında olduğu gibi yine tabandaki ofiyolitten türemiştir. Küresellik, yuvarlaklık Ve boylanma iyidir. Matriks destekli taneler; kalsit, demir karbonat, demir oksit ve kil Mineralleri içeren gözenek dolgusu tarafından çevrelemiştir ve istif içinde diğer Litolojiler ile düzensiz aralanırlar.

Belirsiz ince-orta paralel katman örnekleri gelişmiştir ve çakıltaşları içinde sık sık Lamina veya mercek biçimli arakatkılar şeklinde yer alırlar. Formasyonunu çoğunlukla Üst düzeylerinde, yer yer de ara seviyelerde kumtaşları ile aralanırlar. Formasyon Tabanda Hocalıkova Ofiyoliti üzerinde belirgin bir açısal uyumsuzlukla oturur. Tavanda ise Hekimhan Formasyonu ile yanal ve düşey geçişlidir. Birimin kalınlığı Oldukça değişkendir ve 0 - 300 m arasında kalınlık sunar. İnceleme alanında düzensiz dağılmış yamalar biçiminde yaklaşık 20 km² lik alan kaplayan birim başlıca Hekimhan ilçesi, Karadere Köyü, Kirizli, Denizbaşı, Ellezli, Çay, Yayladam, Çıkrıkçı, Karlık, Kızıldere Mahalleleri ve çevresinde yüzeylenir. Formasyona ait kayalardan Fosil derlenememiştir. Ancak birimin stratigrafik konumu göz önüne alındığında, Ofiyolitin yerleşmesi sonrasında Geç Kampaniyen'de çökelmiş olabileceği düşünülmektedir. Karadere Formasyonu, Hocalıkova Ofiyolitinin bölgeye Yerleşiminden sonraki dönemde meydana gelen bir kalınlaşım yükselme ve Yükselmeyi izleyen erozyonun ürünüdür. Birimin litolojik özellikleri ofiyolitik bir temel Üzerinde gelişmiş ve tektonik aktivite ile denetlenmiş akarsu-sığ deniz ve ilişkili Ortamları yansıtır. Formasyonunu yanal ve düşey yönde değişen kalınlıklar ve litolojik Farklılıklar sergilemesi tektonik aktivitedeki değişimler, düzensiz topografya ve Akarsuların debisi ile ilgilidir. Kaynak alanın hızla yükselmesi veya havzanın hızla Alçalmasına bağlı olarak ince taneli gerecin bağıl olarak az olması iri çakıl boyu Gerecin kalınlığını ve yayılma alanını arttırmıştır. Kısa süren tektonik dinginlik Dönemlerinde kum ve silt boyu ince taneli kırıntılar ince katmanlar halinde çökelebilmıştır. Yinelenen tektonik etkinlik dolayısıyla fasiyes örneklerinde ve tane Boyunda dönemsellikler gelişmiştir. Sürekli aşındırma ve peneplenleşme nedeniyle Engebeler giderek azalmıştır. İstifin üst düzeylerine doğru kırıntı boylarının yukarıya Doğru küçülmesi ile birlikte kırmızı oksidasyon rengi kaybolmuştur. Sonuç olarak Karadere Formasyonunun tektonik etkinlik ile denetlenmiş, yüksek yatak eğimine Sahip örgülü bir akarsu, akarsu-delta ve kısmende sığ denizel bir ortamda çökeldiği düşünülmektedir.

4.1.3. Hekimhan Formasyonu (Krh)

Tabanda yer alan Kesikköprü Üyesi, ofiyolitik malzemeden türemiş olan konglomera, kumtaşı, silttaşı ve kiltaşından oluşan ve yaklaşık 160 m kalınlıktaki bunun üzerine uyumlu olarak gelen kumtaşı-marn-kireçtaşı ardalanmasından oluşan ve yaklaşık kalınlığı 380 m Karatepe Üyesi gelmekte ve en üstte yer alan 25 m kalınlıktaki resifal kireçtaşlarından oluşan Kızılkaya Üyesi ayırtlanmıştır.

Formasyon, yanal ve düşey yönde düzenli bir istifleme gösterir. Tabanda konglomera ve kumtaşı ile başlayan birim üste doğru kumtaşı-marn-kireçtaşı ardalanmasına geçer. Altta genellikle merceksi kireçtaşı, üstte killi kireçtaşı yer alır.

Kumtaşları çoğunlukla marn ve kireçtaşları ile ardalanmalıdır ve inceleme alanı çevresinde büyük bir alan kaplamaktadır. Kumtaşları ince kumdan çok iri kuma dek değişen boyutta sediman içerirler. Matriksilt ve kil boyu gereç, çimento ise karbonattan oluşmuştur. Kumtaşlarının ince kesitlerinin incelenmesi sonucunda litikgrovak, feldspatikgrovak olarak belirlenmiştir. İstifin alt düzeylerinden alınan örneklerde kuvars oranı oldukça azdır. Üst düzeylerde ise kuvars oranının arttığı belirlenmiştir. Hekimhan formasyonunun büyük bir bölümünü kumtaşı-marn-kireçtaşı ardalanmasının oluşturduğu Karatepe Üyesi olarak ayırtlanan istif oluşturmaktadır. İstifin tabanında kumtaşları, tavanında ise killi kireçtaşları bulunmaktadır. Birimin yaşı elde edilen bilgilere dayanılarak Üst Kampaniyen - Maastrihtiyen olarak belirlenmiştir.

4.1.4. Tohma Formasyonu (Tt)

Tohma Formasyonu olarak adlandırılan birim Zeynepoğlu Üyesi, Yoğunsakız Üyesi, Çorak Üyesi, Çivril Üyesi ve İriağaç Üyesi olmak üzere 5 üyeye ayrılmıştır. Birim tabandan tavana doğru; Zeynepoğlu Üyesi olarak tanımlanan çakıltası, kumtaşı-çamurtaşı ardalanması, Yoğunsakız Üyesi olarak tanımlanan taban konglomerası ile başlayan kumtaşı ile devam eden kireçtaşı - marn ardalanması, Çorak üyesi olarak tanımlanan çamurtaşı – kumtaşı-killi kireçtaşı ardalanması, Çivrilüyesi olarak tanımlanan marn-kireçtaşı ardalanması ve İriağaç üyesi olarak tanımlanan tabanda marnlı seviyeler ile başlayan masif resifal karakterli kireçtaşı ile istif sunmaktadır. Yazıhan platosunu güney ve kuzey bölüm olarak iki bölüm halinde incelendiğinde, temel farklılık olarak platonun güney bölümünde Tohma Formasyonuna ait 5 üye gözlemlenirken, kuzey bölümünde ise

Zeynepoğlu Üyesi mostra vermez iken Yoğunsakız Üyesi de Gövceler Mahallesi civarında merceklenmektedir. Platonun kuzey bölgesinin kuzey batısında da Yoğunsakız Üyesi mostra vermemektedir. Tohma Formasyonunda, istifin genel durumu göz önüne alındığında transgresif bir istif olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, Çorak üyesinin litolojik özellikleri göz önüne alındığında, bu dönemde geçici bir regresyonun gerçekleştiği görülmektedir. Çökelme ortamı olarak da, içerdiği mikro ve makrofosiller ile yaşama ortamları ve birimlerin sedimentoloji özelliklerine göre; çökelme ortamları lagün, kumsal, sıg ve açık şelf olarak düşünülmektedir.

4.1.5. Hasançelebi Volkanitleri (Kha)

Hasançelebi Kasabası çevresinde geniş yüzeylemeler sunan volkanitler; sahada başlıca andezitik ve trakitik olarak tanımlanabilen volkanik ürünlerle temsil edilir. Farklı türdeki volkanitler içinde arazide diğerlerinden ayrılabilen trakit ve alkali trakit, Sivritepe trakit üyesi adı altında tanıtılmıştır. Volkanitler açık yeşil/maviden ve kahverengiye değişen renkleri, porfirikten camsıya değişen dokuları ile oldukça farklılıklar sergiler. Volkanitlerin büyük çoğunluğunu traki andezit bileşimli lav ve piroklastitler oluşturur. Belirsiz orta-kalın akma foliasyonları gelişmiştir. Piroklastitler aglomera, breş, lapilli, tüf, tüfit ile temsil edilir ve istif içinde hemen her düzeyde yer alırlar. Katmanlanma yer yer belirgin olup ince kalın arasında değişir. Dayk ve sillerin katılmalarıyla bu belirli ve düzenli katmanlanma sık sık bozulmaktadır. Volkanitleri ve bunlarla geçişli olan Hekimhan Formasyonunu birbirine paralel dayk sistemleri keser. Yaklaşık D-B doğrultulu daykların yanısıra yapıya az çok uyumlu siller de gözlenmiştir. Volkanitler içerisinde yer yer spilitik kayalar da tanınabilmektedir. Genellikle bir yönde uzamış belirsiz yastık yapısı sunarlar. Volkanitler tabanda Hocalıkova Ofiyolitini uyumsuzlukla örter. Ayrıca Hekimhan Formasyonunun orta ve üst düzeyleri ile geçişlidir. Yüceşafak Siyenitoyidi ile kesilirler. Tavanda ise Hüyük kireçtaşı ve Zorbehan dolomiti ile uyumlu, Akpınar Formasyonu ile uyumsuz olarak örtülürler. Volkanitlerin kalınlığı hazırlanan enine kesitlerde maksimum 1000 m hesaplanmıştır. Yüzeylendikleri başlıca alanlar Hasançelebi Nahiyesi; Gögebakan Mevkii, Bahçedamı, Dereköy, Deveci Köyleri; Etyemezler, Kürt Ali, Karakısıık, Bozarmut Mahalleleri çevresindedir. Volkanitlerden doğrudan yaş verisi bulunamamıştır. Hekimhan Formasyonu ile geçişli olması ve Akpınar formasyonu ile uyumsuz örtülmeleri nedeniyle havza ya da Geç Kampaniyen-Maastrichtiyen aralığında oluştukları düşünülmektedir.

4.1.6. Sivritepe Trakit Üyesi (Khas)

İnceleme alanının özellikle kuzey yansında sık yüzeylenen trakitik volkanitler tipik yüzeylenmesini Sivritepe'de verir. Trakitler genellikle D-B doğrultulu dar, uzunluğu birkaç yüz m olan dayklar, ender olarak yüzeysel lav ve tüfler şeklinde izlenirler. Morfolojide dayanımlı sivri tepeler oluştururlar. Taze yüzeyleri açık kahve-pembe, ayrışma yüzeyleri koyu kahverengidir. El örneklerinde irili ufaklı sanidin ve amfibol kristalleri ile opak mineraller gözle seçilebilir. Trakitlerin önemli ölçüde demir cevheri taşıdıkları ve bölgedeki demir yataklarının oluşmasına neden oldukları saptanmıştır. Bu tür trakitler Karakuz Dağı'nın kuzey yamacında, Mağara, Sivri ve Taşlı Tepe'de yüzeylenir. Bu kesimlerde trakitler hematit, manyetit, siderit, limonit, götit gibi demir cevherleri yanı sıra gang minerali olarak barit, fluorit ve yer yerde kuvars, kalsit ve turmalin içerirler. Trakitlerin çevre kayalarla dokanakları belirgindir ve Hasançelebi volkanitlerinin diğer kayalarını keserler veya üzerlerini uyumsuz örterler.

4.1.7. Yüceşafak Siyenitoyidi (Ky)

Başlıca siyenit, kuvars siyenit, nefelin siyenit, siyenodiyorit, siyenit porfir, siyenit apolit türünde derinlik ve yan derinlik kayalar topluluğudur. Yüceşafak Tepe çevresinde tipik olarak yüzeylendiği için aynı adla anılmışlardır. Siyenitoyide ait kayalar arazide pembe-bej renkleri ile tipiktir. Masif plüton ve dayklarla temsil edilir, masif olan bölümlerde orta-iri, eş taneli ve holokristalen dokuludur. Dayklar şeklinde bölümlerde ise apiitikporfirik, daha çok siyenitoyidin kenar fasiyesleri şeklinde, plütonun çevre kaya ile kontaklarında veya geç mağmatik fazdaki damar dolguları şeklinde izlenirler. Siyenitoyid kütlesi içerisinde sık sık yamalar şeklinde 3-10 cm çaplı, başlıca amfibol piroksen-biyotit-apatit minerallerinden oluşan, ince taneli ksenolitler gözlenir. Siyenitoyid, Hasançelebi Volkanitlerini intrüzif olarak keser. Dayklar şeklinde kestiği yerlerde kontak daha belirgin ve nettir. Dayklar yaklaşık D-B doğrultulu ve yaklaşık düşey konumludur. Siyenitoyid başlıca Yüceşafak, Büyük pelitinkuz, Kale, Çatalkoyak ve Armut Tepe dolaylarında yüzeylenir. Bundan başka birçok irili ufaklı dayk Hasançelebi Volkanitleri ve Davulgu Metamorfiti içine sokulmuş olarak bulunur. Siyenitoyidin yaşına ilişkin kesin bir veri bulunamamıştır. Hasançelebi Volkanitlerini kesmesi nedeniyle Üst Maastrichtiyen yaşı uygun bulunmuştur.

4.1.8. Davutgu Metamorfiti (Kd)

Hasançelebi Volkanitlerinin, Yüceşafak Siyenitoyidinin intrüzyonu ile kontakt metamorfizmaya ve metasomatizmaya uğraması sonucu gelişen bir bilimdir. Davutgu Köyü çevresinde yaygınca yüzeylendiklerinden aynı adla anılmışlardır. Birime gri, bej ve açık kahve renkler egemendir, sertlikleri azdır, metarmorfizma öncesi birincil kaya özellikleri yer yer korunmuştur. Metamorfik zon içerisinde yaklaşık D-B gidişli, yapıya uyumsuz, düşeye yakın eğimli siyenit porfir, siyenit aplit ve lamporfirik dayklar yer alır. Daykların ve metasomatik etkilerin yoğunlaştıkları yerlerde birincil kaya özelliklerinin hemen tümüyle kaybolduğu ve yaygın alterasyonun geliştiği gözlenir. Dayklarda ve dayklara yakın bölümlerde disseminemanyetit-hematit mineralleri yaygınca bulunur. Metamorfitin ana minerali skapolittir.

4.1.9. Hüyük Kireçtaşı (Kh)

Geç Kretase döneminde tektonik olarak oldukça sakinleşen havzada çökelen kireçtaşı, tipik yüzeylemesini Hüyük Tepe'de verdiği için Hüyük kireçtaşı adıyla anılmıştır. Kireçtaşı dayanımı ile topografyada sarp yükseltiler yapabildiği gibi, yer yer tınaz tepeler ve tatlı engebeli sırtlar oluşturur. İstifin alt düzeyleri belirgin orta - kalın katmanlı, üst düzeyleri ise çok kalın katmanlı ya da masiftir. Kireçtaşı içinde birbirinden farklı fasiyesler izlenmiştir. İnceleme alanı kuzeyinde Zorbehan Dağı ve Kale Tepe'de bol bentik makro ve mikro fosilli, yer yer kumlu sparitik, biyoklastik kireçtaşı fasiyesinde, güneyinde Alibaba, Mağarakaya ve Kuzkulağı Tepe çevresinde pelajik fosilli biyomikrit fasiyesinde gelişmiştir.

4.1.10. Zorbehan Dolomiti (Kz)

Başlıca dolomitli kireçtaşı, kalsitli dolomit taşı gibi kayaları içeren birim tipik yüzeylemesini Zorbehan Dağı ve çevresinde verdiği için aynı adla anılmıştır. Birim açık gri-bej, alt düzeylerde orta-kalın, ortada masif, üstte ise orta-kalın katmanlıdır. Farklı düzeylerden derlenen örneklerin petrografik analizlerinde kayanın % 30-100 oranında ince-orta taneli dolomit kristalleri içerdii saptanmıştır. Dolomit içerisinde % 10-60 arasında değişen oranlarda bulunan biyoklastların dolomitleşmeden kısmen korunduğu veya tümüyle yok oldukları belirlenmiştir. İstifte dolomitleşme alttan üste ve güneyden

kuzeye doğru artış gösterir. Zorbehan dolomiti tabanda Hüyük kireçtaşı, Hekimhan formasyonu ve Hasançelebi Volkanitleri ile tavanda ise Ağharman jipsi ile yanal ve düşey dereceli geçişlidir. Birimin kalınlığı yaklaşık 200 m hesaplanmıştır, ancak kalınlık Birim bentik fosil açısından oldukça zengin olmasına karşın dolomitizasyon nedeniyle bunlardan çokazı tanınabilmiştir. Derlenen renklerden Üst Maastrichtiyen yaşı elde edilmiştir. Zorbehan dolomiti Hüyük kireçtaşının tektonizma, volkanizma, evaporasyon ve bunların ortak etkileri ile gelişen ısı konveksiyonu yoluyla sin ve post dolomitleşmesi sonucunda oluşmuştur.

4.1.11. Leylek Volkanitleri (Tl)

Birim inceleme alanının kuzeydoğusunda bulunan Leylek dağında bulunan bir bacadan çıkan volkanik malzemeyi oluşturan trakiandezit, Üst Kretase ve Eosen yaşlı birimleri örtmüştür.

Birim genelde açık renkli, sert ve dayanıklıdır. Çok miktarda eklem düzlemi ve foliasyona rastlamak mümkündür. Yapılan petrografik incelemeler sonucu kısmen camsı materyalden oluşmuş ve kısmende kristalize olmuş camsı materyalden ibaret matriks içerisinde mikrofenero kristaller halinde albit-ortoklas, albit ve biotit içerdiği belirlenmiştir.

Doğuda Parçikan Formasyonu, güneyde Akyar Formasyonu, batıda Yeşilpınar Formasyonu ile inceleme alanının hemen dışında kalan kuzey kesiminde Burdigaliyen yaşlı Çavuş Formasyonu tarafından örtmeleri, ve inceleme alanı çevresinde Yeşilpınar Formasyonu içerisinde çakıllarının bulunuşu nedeniyle Orta Eosen'den daha genç, Oligosenden yaşlı, muhtemelen Üst Eosen yaşında çökelmiş olduğu düşünülmektedir. İnceleme alanı çevredeki çalışmalardan derlenen veriler ışığında, muhtemelen Kampaniyen'den beri kuzey yönde kapanmakta olan Güney Neo-Tetis okyanus kabuğunun Üst Eosen'de bölgede meydana gelen muhtemel kabuk daralması nedeniyle, bölgenin güneylerinde varlığı bilinen volkanizması kuzeye ilerlemiş ve daha önce yay gerisinde kalan havzaya yerleşmiş olmalıdır.

4.1.12. Yamadağ Volkanitleri (Tya)

Bu volkano-sedimanter kayaçlar Doğu Anadolu'da geniş bir yayılım sunan Miyosen volkanizmasının bir parçasını oluşturmaktadır. Yamadağ volkanitleri, inceleme alanı ve çevresinde Yaşca vadisi boyunca ve Sarsa Tepe, Boztepe mahallesi, Kamer mahallesi ve Çiftlik mahalleri civarında yüzeylemekte olup arazide kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Koyu - mor - siyah renkli Yamadağ volkanitleri, açık renkli tüfitler üzerine gelen birim, tabanda bazaltik bileşimli lav akıntıları ile başlamakta olup üste doğru piroklastikler ve bazaltik ve andezitik lav akıntıları ile son bulmaktadır. Alterasyona uğramış kısımları pembemsi kahverengi bir renge sahiptir. Oldukça sert ve dayanıklıdır. Genelde porfirik dokuludur. İki evrede oluşmuşlardır; birinci evre iri plajiyoklaz ve olivin fenokristalli bazaltlarla temsil edilirken, ikinci evre iri plajiyoklaz, olivin ve piroksen fenokristalli bazaltlarla karakterize edilmektedir. Neo Tetis'in kapanmasına bağlı olarak gelişen kıta - kıta çarpışmasının sonucu, Doğu Anadolu'da kıvrımlar, bindirmeler, doğrultu atımlı faylar ve açılma çatlaklarının geliştiğini belirlenmiştir. Bu yapılar Doğu Anadolu'nun kabaca kuzey - güney yönünde daralıp, doğu - batı yönünde uzamasına kıta kabuğunun kalınlaşmasına ve bölgenin yükselmesine neden olmuştur. Kıta kabuğunun evrimine bağlı olarak bölgenin genç volkanizması da değişimler sergilemiş ve volkanlarda çoğunlukla kabukta oluşan açılma çatlaklarını kendilerine çıkış yolu bulmuşlardır. Bu veriler ışığında, Yamadağ volkanitleri Doğu Anadolu genç volkanizmasının zaman ve köken açısından bir parçasıdır. İnceleme alanı ve çevresinde volkanizma karasal bir ortamda üç aşamada faaliyet göstermiştir. İlk olarak, son derecede patlamalı oluşum daha çok asidik volkanizma için öngörülen bir model olarak düşünülmektedir. Ancak ender olarak bazaltik volkanizmada bazen bu şekilde şiddetli patlamalar şeklinde olabilirler. Böylece tüf, aglomera ve lapilliden oluşan piroklastikler birkaç yüz kilometre karelik alanlara yayılmış olmalıdırlar. İlk aşamada oluşan bazaltik tüfler, ikinci aşamada üzerlerine gelen olivinli bazalt lavlarının etkisi ile dokanaklarda pişme zonlarını meydana getirmiştir. Üçüncü aşama andezit ve piroksen andezit bileşimli volkanitlerin püskürmesi ile devam etmiştir. Olivinli bazaltlar, Üst mantoyu oluşturan bazaltik magmadan herhangi kıtasal kirlenme olmadan türemiş olduğu düşünülmektedir. Daha sonraki evrelerde gelişen andezitler ise bazaltik magmanın az veya çok kıtasal gereç ile karışması sonucu oluştukları kabul edildiği düşünülmektedir.

4.1.13. Taraça (Qtr)

Kuvaterner yaşı olan taraçalar, kendinden yaşı birimlerin çakıllarını kapsamaktadır. Paleozoyik, Mesozoyik, Eosen ve Burdugaliyen kireçtaşı çakılları, bazalt, radiolarit ve ofiyolitik çakılları içerirler. Az pekişmiş olduğundan kolayca dağılırlar. Kalınlığı 5- 20 m arasında değişmektedir.

4.1.14. Yamaç Molozu (Qym) ve Kolüvyon (Qc)

Yamalardan aşığı yerçekimi etkisiyle hareket etmiş bulunan, kil, kum, çakıl blok karışımları.

4.1.15. Alüvyon (Qa)

Birim, her yaşıta çakıl ve kum sedimanları içermektedir. Tabakalanma gözlenmemiştir.

4.2. Jeomorfoloji

Malatya – Hekimhan – 16. Bl. Hd. 2. Kısım Yolu projesi kapsamında yer alan Hasançelebi Geişı Varyantı T2 Tüneli güzergâhının bulunduğu bölge, Malatya ili sınırları içerisinde kalmaktadır. Malatya ilinde bulunan dağların güney kısmında Besni, Adıyaman ve Kâhta düzlükleri, Malatya Ovası olarak bilinen çukurluk ise kuzey kesiminde bulunmaktadır. Dağlık kesimler engebeli aynı zamanda çok yüksektir. Bu bölgelerde oluşan derin vadiler akarsuların yüksek tepelerden çeşitli yönle inerek bu dağları aşındırarak iyice parçalayarak oluşmalarına sebep olmuştur. Kapıdere boğazından başlayan Malatya Torosları, doğuya doğru genişleyerek paralel sıradağlar meydana getirmiştirler. Torosların devamı olan bu dağlar, Malatya topraklarının yaklaşık %38'i kaplayarak, sıradağlar biçiminde birbirine eklenmiştir.

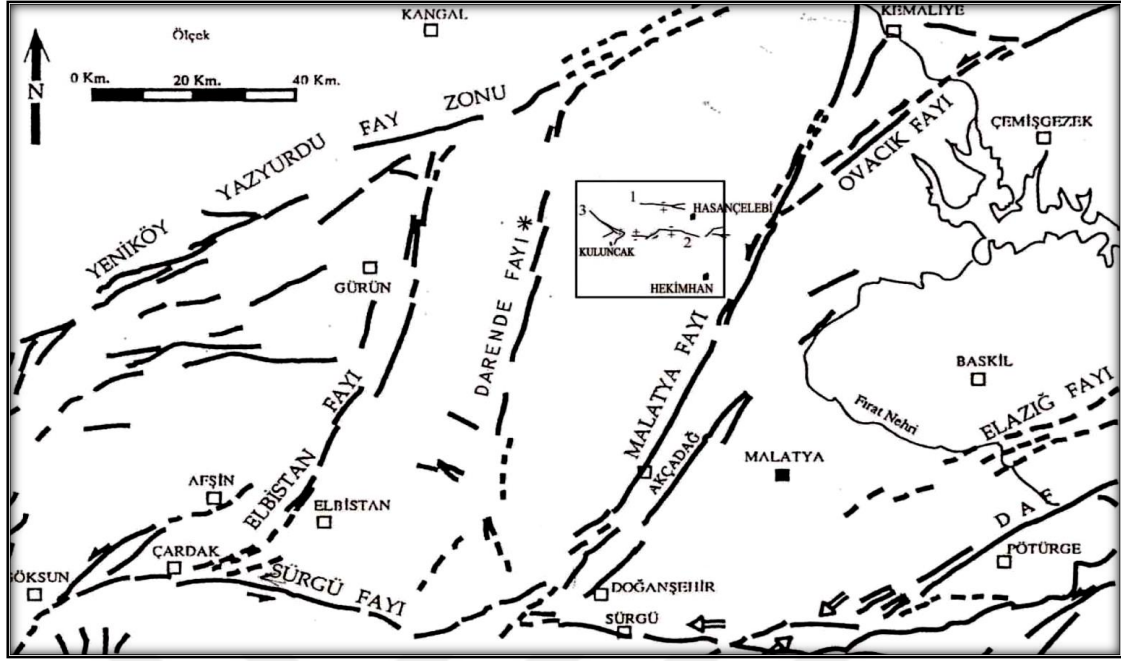
Malatya'nın kuzeyinde yer alan Yama Dağı, yükseklik ortalaması 1500 metredir. Büyük kısmı Sivas il sınırları içinde bulunan Yama Dağı üzerinde bir platoda yer almaktadır. Öğlekayası Dağı 2397 m, Kartaltepe 2916 m, Keklice Dağı 2727 m, Karakaya Tepe 2424 m, Becbel Dağı 2006 m, Kelletepe 2306 m; Arguvan ile Arapgir arasında Göl, aplılı, Ayranca, Ereğli dağları; Hekimhan yöresinde Demirli, Kızılhisar, Zorbehan

dağları bulunmaktadır. Malatya il topraklarının % 13'ü ovalardan ibarettir. Bu ovalar; Malatya Ovası, Tohma Vadisi, Kuruçay Vadisi, Yazıhan Düzü.

T2 Tüneli güzergâhı; Km 88+608'de 1286 m kotunda başlar. Km 88+750'ye kadar az engebeli olarak artarak 1325 m kotuna ulaşır. Bu kesimden sonra inişli çıkışlı ve az engebeli bir topoğrafya izleyerek Km 88+953'te 1303 m kotunda sona erer.

4.3. Yapısal Jeoloji ve Tektonik

Çalışma alanı Doğu Toroslarda olup, Ketin (1959, 1966), Şengör ve Yılmaz (1981)' a göre Toridler, Özgül (1976), Perinçek ve Kozlu (1983)' e göre Bozkır Birliği üzerinde yer almaktadır. Çalışma alanını, batısında Darende fayı (Gürer 1992) ve Elbistan fayı, doğuda Malatya fayı, güneyde Sürgü fayı, kuzeybatıda Yeniköy-Yazyurdu fay zone ile sınırlanır. Oligosen sonrasında, çoğunlukla sol yönlü doğrultu atım bileşenli faylar arasında kalan bölgede saat yönünde bir rotasyon etkisi görülmektedir (Perinçek vd. 1987). Çalışma alanında gözlenen faylardan önemli olanları ve Oligosen yaşlı birimleri etkileyenler açıklanmıştır. Oligosen yaşlı Ulugüney Formasyonunun çökeldiği havzayı sınırlayan bir fay veya fay sistemi gözlenmemektedir. Ayrıca Oligosen istiflerinin çökeldiği havzanın sınırları belirgin değildir. Olasılıkla Şekil 2.3.'de gösterilen fay ve fay sistemleri Oligosen sonrasında havzayı etkilemiş ve bugünkü şeklini almasına sebep olmuştur. Bu sebeple Oligosen istiflerinin çökeldiği tektonik ortam hakkında yorumlar sadece istifin sedimentolojisi ile yapılabilmektedir. Bununla birlikte Oligosen yaşlı birimlerin genel tabaka doğrultusu D-B, bazen GD-KB, KD-GB ve eğim yönü kuzeydir. Ortalama eğim açısı 20°-35°, faylarla ilişkili olduğu alanlarda 60° 'ye kadar görülmektedir.



Şekil 4.3. Çalışma alanının yakın çevresindeki ana fay hatları ve çalışma alanında belirlenmiş Oligosen sonrası faylar (Perinçek vd. 1987 ve Gürer 1992).

4.4. Depremsellik

Malatya ili ve çevresi, T.C Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet işleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi'nin 1996 yılında hazırladığı "Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası'na (Şekil 4.4) göre 1.2. ve 3. Derece Deprem Bölgeleri içerisinde bulunmaktadır. Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli güzergâhı 2. derece deprem bölgesi içerisinde değerlendirilmiştir (Şekil 4.5)

Tablo 4.1. Deprem bölgelerine göre ivme katsayıları (URL-7)

Deprem Bölgesi	Etkin Yer ivmesi (Ao)	Etkin Yer ivmesi (Ao)
	Sanat Yapıları	Toprak Yapıları
1	0.40	0.20
2	0.30	0.15
3	0.20	0.10
4	0.10	0.05

4.5. Hidrojeoloji

Güzergâh boyunca yapılan Mühendislik Jeolojisi haritalama çalışmalarında Hasacelebi Geçişi Varyantına ait T2 Tünelinin tamamı Üst Kretase yaşlı Hasacelebi Volkanitleri (Kha) içerisinde açılacağı öngörülmektedir. Hasacelebi Volkanitleri bu kesimlerde genel olarak birbirine geçişli özellik gösteren Andezit, Andezitik Bazalt, Andezitik- Bazaltik Lav Akıntıları, Aglomera, Piroklastik Kayaçlar ile Aglomeratik, Andezitik Breşik Tüf ve Andezitik Tüf Arabantlarından oluşmaktadır.

Genel olarak tünel güzergâhları boyunca yüzeysel olarak bir su çıkışına rastlanmamıştır. Yapılan sondajlarda da yer altı suyuna raslanılmamıştır. Morfolojik olarak yeraltı suyu ile karşılaşılacağı düşünölmeyen tünelden yağışa bağlı olarak yüzey sularının eklemler boyunca tünele ulaşma olasılığı vardır. Andezit, Andezitik Bazalt, Aglomera ve Piroklastik malzemelerden oluşan kayaçlar yeraltı suyu taşınması durumunda dayanımlarını nispeten kaybetmeler de Aglomeratik, Andezitik Breşik Tüf ve Andezitik Tüfler suyla etkileşimi durumunda yer yer killeşme gösterebilirler. Hasacelebi Volkanitlerini (Kha) oluşturan volkanik kayaçlar genellikle aynı mühendislik özelliklerine sahiptirler. Andezit, Andezitik Bazalt, Bazaltik ve Andezitik Lav Akıntıları, Aglomeralar ve Piroklastik Kayaçlar içerdikleri kırık ve çatlak oranlarına göre az- orta geçirimli özellik göstermektedirler. Aglomeratik, Andezitik Breşik Tüf ve Andezitik Tüfler ise killeşme durumları dikkate alınarak az geçirimli özellik göstermektedirler.

T2 Tünelinin tamamı, Aglomeratik, Andezitik Breşik Tüf ve Andezitik Tüflerin yoğunluğu nedeniyle az geçirimli ortamlar olarak tanımlanmıştır.

5. TÜNEL JEOLJISİ

Sağ Tüpü 368 m. Sol Tüpü 345 m. uzunluğunda olan Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli'nin yapılacağı kesim, MTA tarafından hazırlanan 1/25 000 ölçekli jeoloji haritasında, ayrıca yapılan arazi çalışmalarında ve yapılan sondaj çalışmaları değerlendirildiğinde, Hasançelebi Geçişi Varyantına ait T2 Tünelinin tamamının st Kretase yaşlı Hasançelebi Volkanitleri (Kha) içerisinde açılacağı öngörülmüştür.

Hasançelebi Formasyonu (Kha); genel olarak andezitik ve trakitik olarak bilinen volkanik ürünlerle tanımlanır. Çeşitli türdeki volkanitler bünyesinde arazide diğerlerinden farklı olan trakit ve alkali trakit, Sivritepe trakit yesi adı altında isimlendirilmiştir. Volkanitler açık yeşil/maviden ve kahverengiye değişen renkleri, porfirikten camsıya değişen dokuları ile oldukça farklılıklar sergiler. Volkanitlerin hemen hemen hepsi trakiandezit bileşimli lav ve piroklastitler meydana gelir. Belirsiz orta kalın akma foliasyonları gelişmiştir. Piroklastitler, aglomera, breş, lapilli, tf, tffit ile temsil edilir ve istif içinde hemen her düzeyde yer alırlar. Katmanlaşmalar kısmen belirgin olup ince kalın arasında değişmektedir, ancak, dayk ve sillerin oluşumlarıyla katmanlaşmalar sık sık bozulmaktadır.

Hasançelebi Volkanitleri T2 Tüneli'nin açılacağı kesimlerde genel olarak birbirine geçişli özellik gösteren Andezit, Andezitik Bazalt, Andezitik - Bazaltik Lav Akıntıları, Aglomera, Piroklastik Kayaçlar ile Tf Arabantlarından ve Tf Breşlerinden oluşmaktadır. Alüvyon (Qa); Alacalı renkli, sıkı- çok sıkı, az killi, kumlu, bloklu çakıl'lardan oluşmaktadır. Kolüvyon (Qc); Kahve renkli, orta sıkı-sıkı, az bloklu, çakıllı, killi kumlardan, Yamaç Molozu (Qym) ise; Kahve renkli, orta sıkı, bloklu, çakıllı, killi kumlardan oluşmaktadır.

Tünel güzergâhı jeolojik-jeoteknik modellemesinin en önemli aşaması kaya sınıflamalarıdır. Bu amaçla toplanan arazi verileri ışığında tünelin değişiklik göstereceği düşünülen aralıkları için RMR ve Q sınıflamaları yapılarak kazı ve destek sınıflamaları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu çerçevede yapılan arazi çalışmalarında elde edilen veriler belirli standartlar ışığında değerlendirilmiş olup özellikle ISRM tarafından önerilmiş standartlara uyulmuştur (Tablo 5.1 - Tablo 5.2).

Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli; Giriş Kesiminde (Resim 5.1) SK-6, SK-7, Orta Kesiminde SK-8, SK-8A, ıkış Kesiminde (Resim 5.2) yapılan SK-9 ve SK-10, sondajlarına ve arazi gözlemlerine göre, Hasançelebi Volkanitleri (Kha)’ne ait Aglomeratik-Andezitik Tüf Breş, Andezitik Tüf Arabantlı, Andezit, Andezitik Bazalt, Piroklastik Kayaçlar içerisinde açılacaktır. Sol Tüp’te Km 88+660’a kadar, Sağ Tüp’te ise Km 1+025’e kadar çok zayıf dayanımlı, çok veya tamamen ayrışmış özelliğe sahip olan Aglomeratik- Andezitik Tüf Breşlerinin egemen olarak geçileceği, bu kesimlerden sonra ise ağırlıklı olarak Andezitik Tüf Arabantlı, Andezit, Andezitik Bazalt, Piroklastik Kayaçlar geçileceği yapılan sondajlardan anlaşılmaktadır. Özellikle Sol Tüp tabanında Aglomeralar daha yoğun olarak geçilecektir.

Tablo 5.1. Kaya kütlelerinin bozunma dereceleri

Tanım	Tanımlama	Bozunma Derecesi
Taze	Kayanın bozunduğuna ilişkin gözle ayırt edilebilir bir belirti olmamakla birlikte ana süreksizlik yüzeylerinde önemsiz bir renk değişimi gözlenebilir.	W1
Az Ayrışmış	Kaya malzemesinde ve süreksizlik yüzeylerinde renk değişimi gözlenir. Bozunma nedeniyle tüm kayanın rengi değişmiş ve kaya taze halinden daha zayıf olabilir.	W2
Orta Derecede Ayrışmış	Kayanın yarısından az bir kısmı toprak zeminde dönüşerek ayrışmış ve/veye parçalanmıştır. Kaya; taze, yada renk değişimine uğramış olup sürekli bir kütle veya çekirdek taşı halindedir.	W3
Yüksek Derecede Ayrışmış	Kayanın yarısından çoğu toprak zeminde dönüşerek ayrışmış ve/veye parçalanmıştır. Kaya; taze, ya da renk değişimine uğramış olup sürekli bir kütle veya çekirdek taşı halindedir.	W4
Tamamen Ayrışmış	Kayanın tümü toprak zemine dönüşerek ayrışmış ve/veya parçalanmıştır. Ancak orijinal kaya kütlelerinin yapısı halen korunmaktadır.	W5
Artık Zemin	Kayanın tümü toprak zemine dönüşmüştür. Kaya kütlelerinin yapısı ve dokusu kaybolmuştur. Hacim olarak büyük bir değişiklik olmamakla birlikte zemin tanınmamıştır	W6

Tablo 5.2. Süreksizlik yüzeylerinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve arazi tanımlamalarına göre sınıflandırılması

Simge	Tanım	Saha Tanımlaması	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı σ_c , [MPa]
R0	Aşırı Derecede Zayıf Kaya	Kayanın yüzeyinde tırnak ile çentik oluşturulabilir	0,25-1
R1	Çok Zayıf Kaya	Jeolog çekiciyle sert bir darbeyle ufalanan kaya çakı ile doğranabilir.	1,0 - 5,0
R2	Zayıf Kaya	Kaya çakı ile güçlükle doğranır. Jeolog çekicinin sert bir darbesi kaya yüzeyinde iz bırakır.	5,0 - 25,0
R3	Orta Derecede Sağlam Kaya	Kaya çakı ile doğranamaz, Jeolog çekicinin tek ve sert bir darbesi ile kaya örneği kırılabilir.	25,0 - 50,0
R4	Sağlam Kaya	Kaya örneğinin kırılabilmesi için jeolog çekici ile birden fazla darbe gerekir.	50,0 - 100,0
R5	Çok Sağlam Kaya	Kaya örneğinin kırılabilmesi için jeolog çekici ile çok sayıda darbe gerekir.	100,0 - 250,0
R6	Aşırı Derecede Sağlam Kaya	Kaya örneği jeolog çekici ile sadece yontulabilir.	>250

Hasançelebi Volkanitleri (Kha) içerisindeki; Aglomeratik – Andezitik, Breşik Tüfler (Resim 5.3), Birim genel olarak sarımsı açık kahve renkli, ufalanabilir, zayıf çok zayıf dayanımlı (R1, R2), çok- tamamen ayrıışmış (W4-W5) Andezitik Tüflerden oluşmuştur. Yer yer çok zayıf dayanımlı Aglomeratik görünüm sunmaktadır. Tüf matriks içerisinde %5-20 oranında az- orta sert volkanik kayaç kökenli köşeli blok ve çakıllar içermektedir.

Hasançelebi Volkanitleri (Kha) içerisindeki; Andezit – Andezitik Bazalt - Piroklastik Kayaçlar (Yer yer Andezitik Tüf Arabantlı) (Resim 5.4); birbirine geçişli özellik gösteren birimlerden oluşan Formasyon Tüf arabantları dışında genel olarak, açık- koyu gri, morumsu, yeşilimsi, siyahımsı gri renklerde, sert orta sert, dayanımlı- orta dayanımlı (R3-R4), az- orta derecede ayrıışmış (W2-W3) özellikte olup, süreksizliklerin sıklaştığı kesimlerde ise az sert, orta zayıf- zayıf dayanımlı (R2-R3), orta derecede- çok ayrıışmış (W3-W4) özelliktedir.

Süreksizlikler; düzlemsel- düz, yüksek uzanımlı, 5mm den küçük açıklıklı, yumuşak dolgulu, çok ayrıışmıştır. Tüf arabantları ise; sarımsı açık kahve renkli, az sert- ufalanabilir, zayıf- çok zayıf dayanımlı (R1-R2), çok- tamamen ayrıışmış (W4-W5) özelliktedir.



Resim 5.1. T2 Tüneli giriş kesimine ait görünüm (T1 Tüneli çıkışından bakış)



Resim 5.2. T2 Tüneli çıkış kesimine ait görünüm



Resim 5.3. T2 Tüneli giriş kesimi üstünde (Km 88+620) yer alan Hasaelebi Volkanitleri (Kha) içerisindeki çok zayıf dayanımlı Aglomeratik - Andezitik Breşik Tüflere ait görünüm



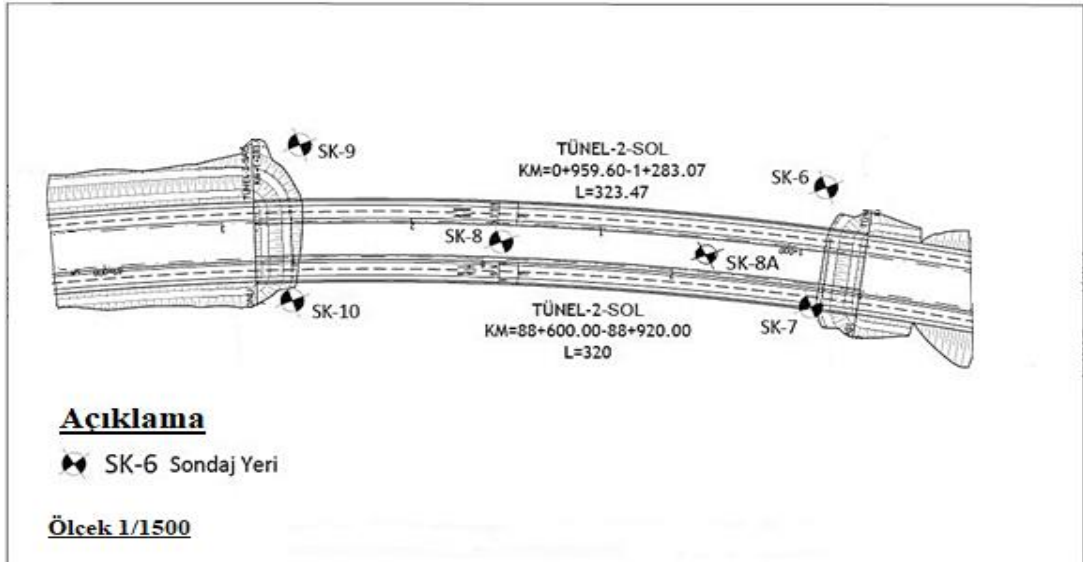
Resim 5.4. T2 Tüneli giriş kesiminde (Km 0+950) taban kotlarında yer alan Hasaelebi Volkanitleri (Kha) içerisindeki Andezit-Andezitik Bazaltlara ait görünüm

6. ARAŞTIRMA BULGULARI

6.1. Mühendislik Jeolojisi

Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli güzergâhına ait jeolojik özelliklerin belirlenebilmesi adına öncelikli olarak 1/1000 ölçekli jeoloji haritası hazırlanmıştır. Haritalama aşamasında güzergâhın litolojik özellikleri, birim sınırları, süreksizliklerin eğim – eğim yönleri, süreksizlik koşulları (pürüzlülük, dolgu, açıklık vb.), heyelan, fay gibi kritik kesimlerin varlığı yokluğu belirlenmiştir.

Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tünel’inde 6 ayrı kuyuda toplam 270 m zemin araştırma sondajı planlanmış ve yapılmıştır (Şekil 6.1.). Sondaj çalışmalarında, zeminlerin düşey ve yanal yöndeki devamlılıklarının belirlenmesi, kaya birimde yüksek verimli karot numune alımı ve yeraltı su seviyelerinin belirlenmesi vb. amaçlanmıştır. Yapılan sondajlara ait özet bilgiler Tablo 6.1.’de verilmiştir. Sondajlar her ne kadar giriş ve çıkış kesimi olarak gruplandırılmış olsa da gerek tünel boyunun kısa olması gerekse sondajların bazılarının portallardan bir miktar içeride yapılmış olması dolayısıyla sondajlar orta kesimi de temsil edebilecek konumdadır. Ayrıca Orta Kesimde yapılan SK-8A sondaj verileri Tünelin Giriş kesimi değerlendirilmesinde kullanılabilecektir.



Şekil 6.1. T2 Tüneli sondaj yerleşim planı

Tablo 6.1. T2 Tüneli güzergâhı boyunca yapılan sondaj listesi ve bilgileri

SONDAJ NO	SOL TÜP KM	SAĞ TÜP KM	DERİNLİK (m)	KOORDİNATLAR			KIRMIZI KOT (m)	SONDAJ KIRMIZI KOTU (m)	AÇIKLAMALAR
				X	Y	Z (Sondaj Kotu) (m)			
SK-6	88+624	0+984	35,00	404171	4313511	1290,60	1274,00	16,60	SAĞ TÜP GİRİŞİ
SK-7	88+631	0+991	40,00	404129	4313544	1293,70	1274,00	19,70	SOL TÜP GİRİŞİ
SK-8A	88+706	1+067	55,00	404174	4313604	1314,70	1277,28	37,42	ORTA-GİRİŞ KESİMİ
SK-8	88+800	1+160	50,00	404221	4313686	1310,00	1281,00	29,00	ORTA KESİM
SK-9	88+915	1+280	55,00	404305	4313782	1312,88	1285,69	27,19	SAĞ TÜP ÇIKIŞI
SK-10	88+890	1+250	35,00	404229	4313782	1298,38	1284,60	13,78	SOL TÜP ÇIKIŞI

Toplam; 270m

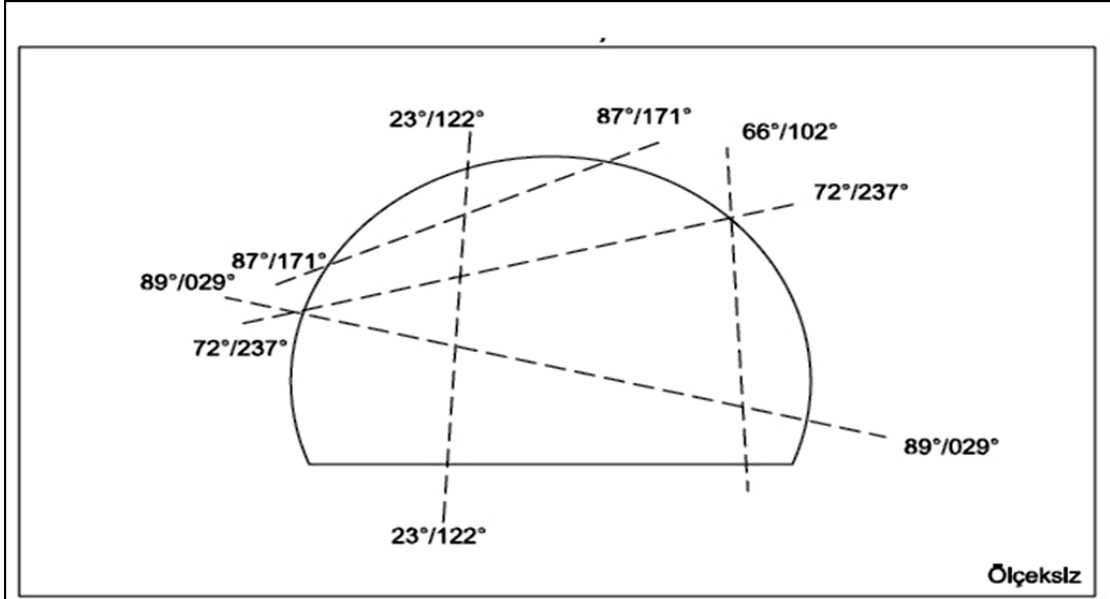
Sondajların bitiminden hemen sonra her kuyuda gerekli görülen seviyelerden numuneler alınmış ve kaya mekaniği deneylerinin yapılabilmesi adına laboratuvara nakledilmiştir.

Alınan karot numuneleri üzerinde öncelikle, serbest basınç dayanımı, elastisite modülü, poisson oranı tayini ve birim hacim ağırlık deneyi yapılmış olup, serbest basınç dayanımı deneyin yapılamadığı durumlarda nokta yükü dayanımı deneyi yapılmıştır.

6.1.1. Eklemler

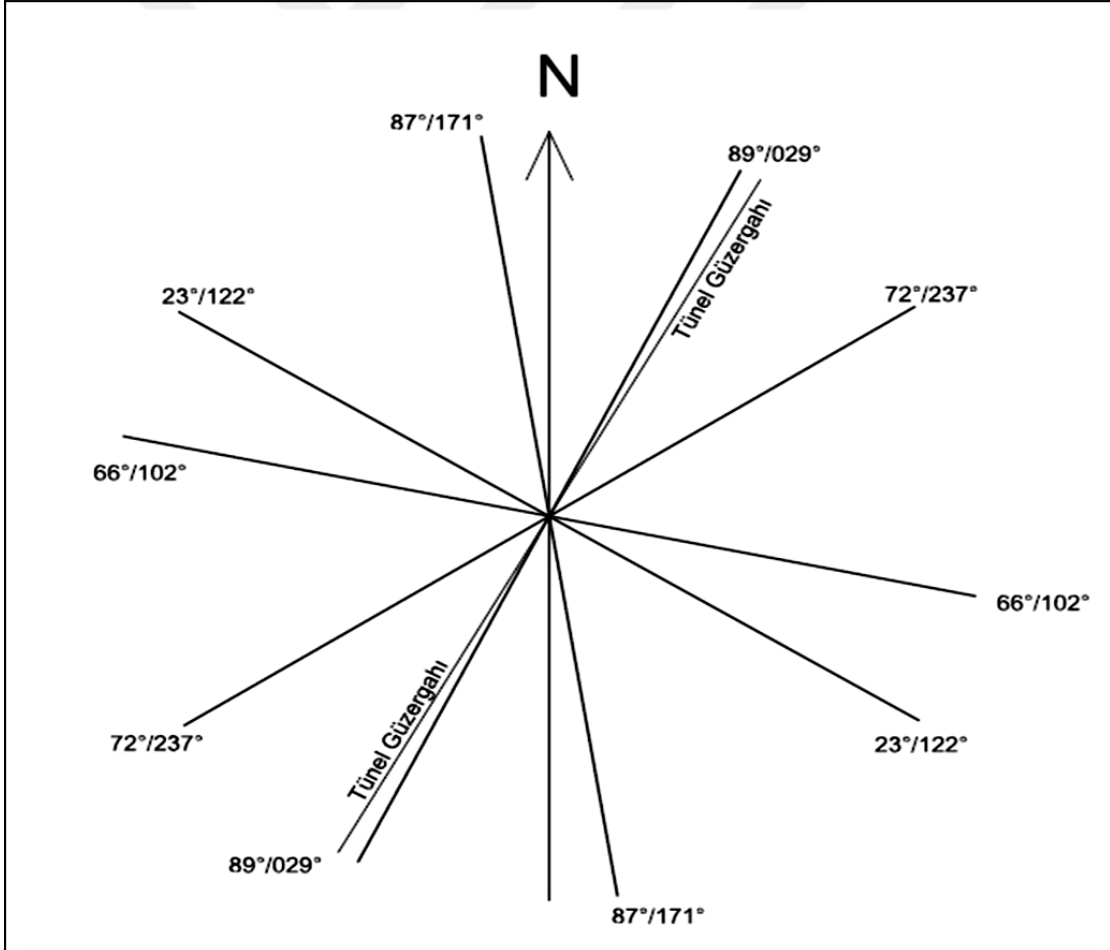
Giriş Kesiminden (Km 0+925, Km 0+950, Km 88+535'te 60m soldan), Orta Kesimden (Km 88+820, Km 1+280) ve Çıkış Kesiminden (Km 88+990, Km 1+370) alınan süreksizlik ölçümleri 3set + random süreksizlik setinin olduğunu göstermiştir. Hakim eklem setleri; 66°/102°, 72°/137°, 87°/171°, 89°/029°, 23°/122° eğim/ eğim yönlerine (Şekil 6.2) sahiptir. Eklemler genel olarak; düzlemsel - düz, yüksek uzanımlı, 5mm'den küçük açıklıklı, yumuşak dolgulu, çok ayrılmıştır.

Giriş Kesiminden (Km 0+925, Km 0+950, Km 88+535'te 60m soldan) alınan süreksizlik ölçümleri kullanılarak hazırlanan süreksizlik ölçümü veri formu, kontur ve gül diyagramları tablo (Tablo 6.2) ve şekillerde (Şekil 6.3 ve Şekil 6.4) sunulmuştur.



Süreksizlik Ölçümleri Yüzeyden Alınmıştır.

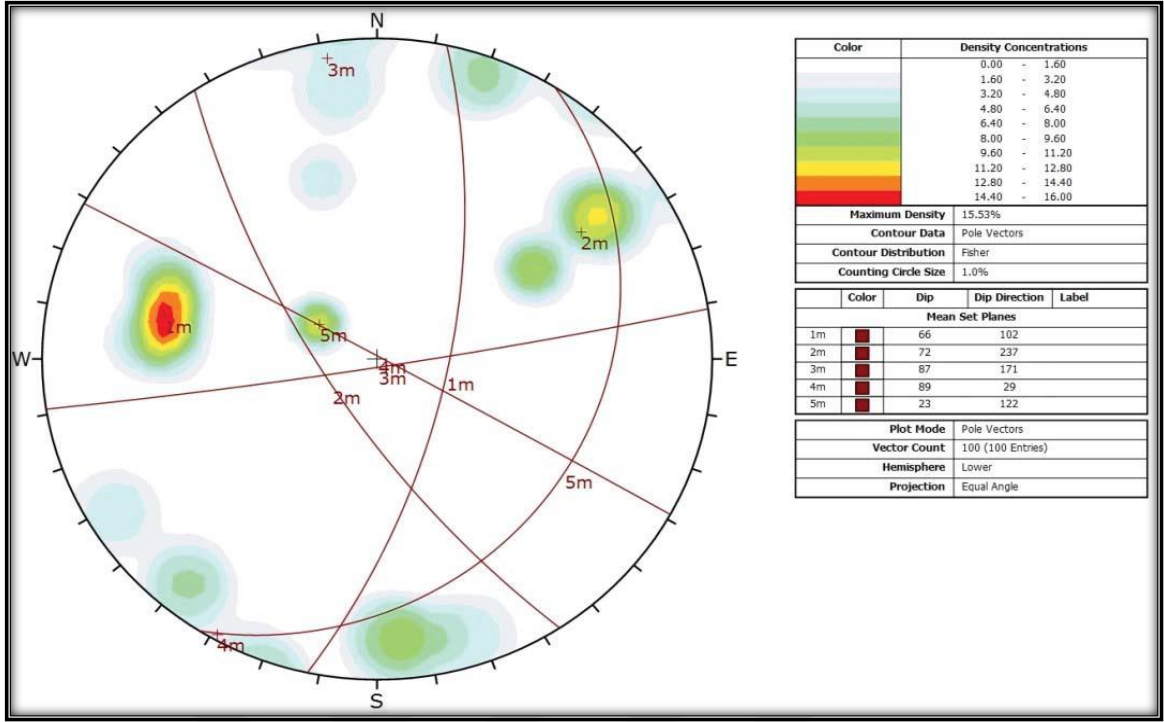
23°/122° Süreksizlik Eğimi / Süreksizlik Yönü



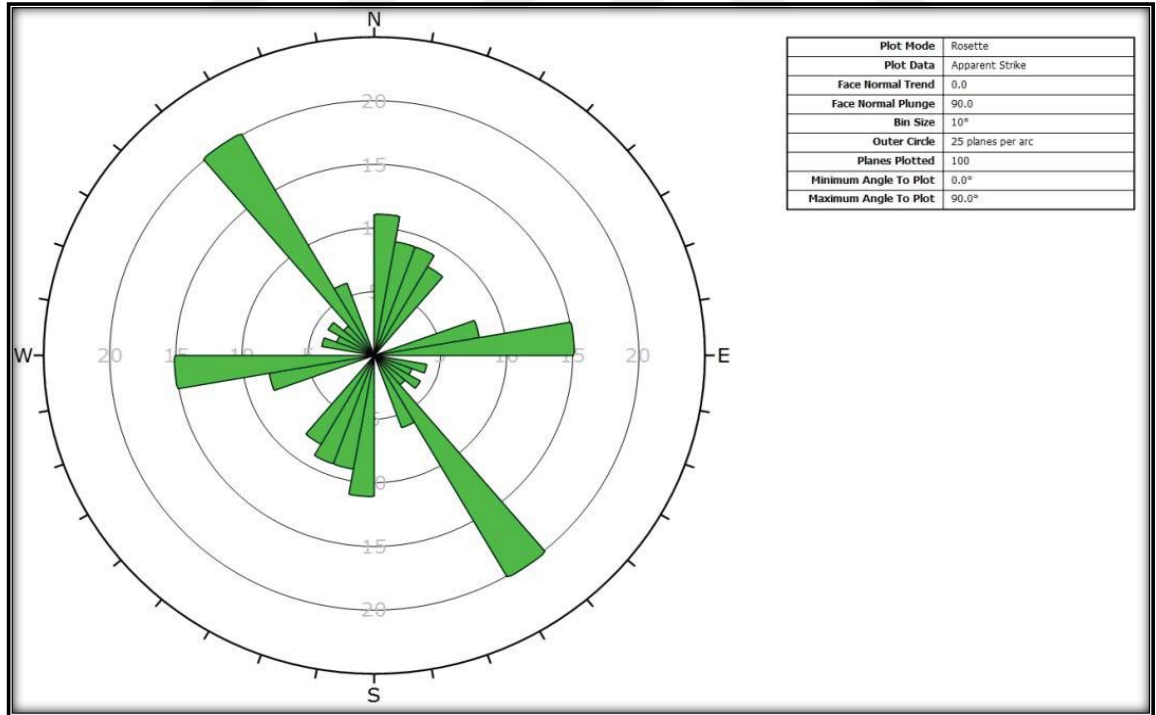
Şekil 6.2. Süreksizliklerin tünel enkesitine göre genelleştirilmiş gösterimi

Tablo 6.2. T2 Tüneli giriş kesimi süreksizlik ölçümleri verileri

SÜREKSİZLİK ÖLÇÜMLERİ														
HASAN ÇELEBİ VARYANTI T2 TÜNELİ GİRİŞ KESİMİ														
KİLOMETRE	SOL/SAĞ TÜP	TÜR	EĞİM	EĞİM YÖNÜ	ARALIK	AÇIKLIK	DEVAMLILIK	PÜRÜZLÜLÜK	DOLGU TÜRÜ	SU DURUMU	AYRIŞMA	ADET	LİTOLOJİ	
0+925-0+950	SAĞ TÜP	3	82	39	2	5	4	C	2	3	1	4	7	TÜF ARABANTLI ANDEZİT PİROKLASTİK KAYAÇLAR
		3	68	111	1	4	3	C	2	2	1	4	15	
		3	78	240	3	3	4	C	2	3	1	4	12	
		3	24	120	3	4	4	C	3	3	1	4	8	
		3	62	91	4	3	4	C	2	2	1	4	9	
		3	88	200	2	5	3	C	2	3	1	4	7	
		3	85	340	1	4	4	C	2	2	1	4	15	
		3	59	240	5	4	4	C	3	3	1	4	12	
		3	70	95	3	4	3	C	3	3	1	4	8	
88+535 (60M SOLDA)	SOL TÜP	3	62	165	4	4	3	C	2	2	1	4	5	TÜF ARABANTLI ANDEZİT PİROKLASTİK KAYAÇLAR
		3	82	360	3	4	4	C	3	3	1	4	4	
		3	78	170	3	4	4	C	2	3	1	3	6	
		3	86	60	2	5	4	C	2	3	1	4	7	



Şekil 6.3. T2 Tüneli giriş kesimi kontur diyagramı

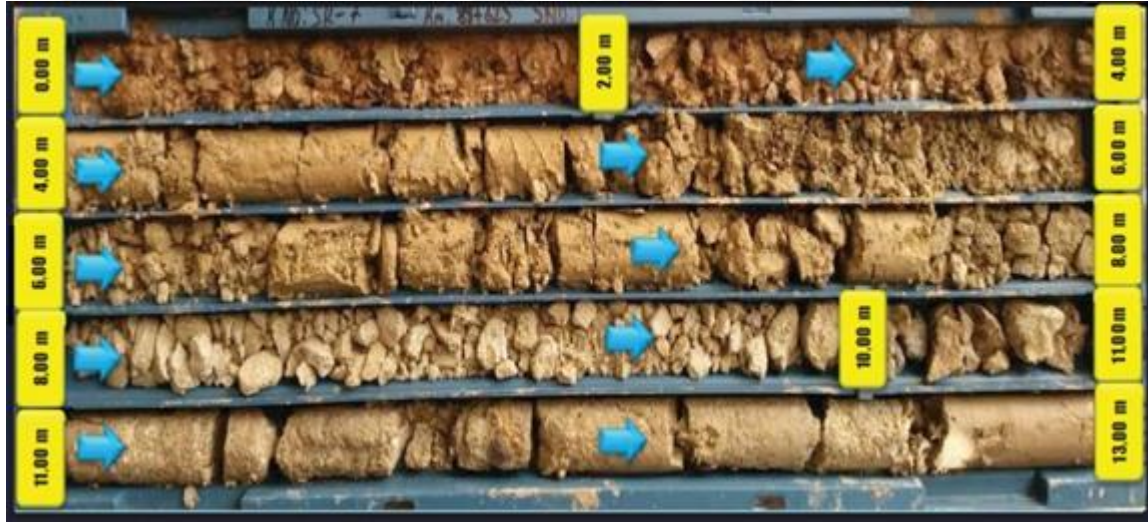


Şekil 6.4. T2 Tüneli giriş kesimi gül diyagramı

6.1.2. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli güzargahında yapılan sondajlarda Hasançelebi Volkanitleri'ne ait Andezit, Andezitik Bazalt, Piroklastik Kayaçlar ve Tüf Breş ile arabantlar şeklinde AndezitikTüf kesilmiş, gerekli görülen tüm seviyelerden numune alınarak laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Özellikle SK-6 ve SK-7'de üst seviyelerdeki Tüf Breşlerden (Resim 6.1.) deney için uygun numune bulunmadığından bu kesimdeki numunelerden laboratuvar deneyi yapılamamıştır. Giriş Kesiminde yapılan SK-6, SK-7 ve SK-8A sondajlarından alınan numuneler üzerinde yapılan deneylere ait minimum ve maksimum değerler Tablo 6.3'te sunulmuştur.



Resim 6.1. SK-7 nolu sondaj'dan alınan Tüf Breş örnekleri

Tablo 6.3. Sondaj numunelerine uygulanan deneylere ait min. ve max. değerleri

	Hasançelebi Volkanitleri (Kha)	
	Min.	Max.
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı; σ_{ci} (MPa)	1,22	141,68
Elastisite Modülü; E_i (GPa)	0,30	46,70
Poisson Oranı; ν	0,11	0,35
Birim Hacim Ağırlık; BHA (kN/m ³)	19,00	27,00
Nokta Yüğü Dayanımı; IS(50), [MPa]	0,05	0,29

Giriş kesiminde yapılan SK-6, SK-7 ve SK-8A sondajlarından (Resim 6.2) alınan numuneler üzerinde yapılan deneylere ait sonuçlar Tablo 6.4.'te sunulmuş olup tabloda ayrıca sondaj kırmızı kotuda belirtilmiştir.



Resim 6.2. SK-8A nolu sondaj'dan alınan Andezit örnekleri

Tablo 6.4. Sondaj numunelerine uygulanan deneylere ait sonuçlar

Numune No	Derinlik (m)	Birim Hacim Ağırlık γ . [kN/m ³]	Serbest Basınç Dayanımı σ_{cl} . [Mpa]	Elastisite Modülü Ei. [GPa]	Poisson Oranı ν	Nokta Yüğü Dayanımı $I_{S(50)}$. [MPa]	Sondaj Kırmızı Kotu
SK-6							
Kırmızı Kot Üzerinde Deney Yapılacak Numune Bulunmamaktadır							16.60m
CR-1	25.00-25.20	21.30	-	-	-	0.10	K.Kot Altı
CR-2	26.50-26.65	19.00	-	-	-	0.05	
CR-3	27.10-27.30	19.80	-	-	-	0.05	
CR-4	28.40-28.50	19.90	-	-	-	0.15	
SK-7							
CR-1	19.20-19.35	21.20	1.22	0.30	0.35	-	19.70m
CR-2	23.80-23.95	22.20	2.28	0.40	0.33	-	K.Kot Altı
CR-4	28.60-28.70	22.90	-	-	-	0.29	
CR-5	29.10-29.20	23.80	-	-	-	0.21	
CR-9	33.00-33.30	25.30	24.80	11.30	0.21	-	
CR-10	34.50-34.75	24.60	17.62	6.10	0.19	-	
CR-11	35.60-35.85	25.80	22.72	17.80	0.13	-	
CR-12	37.75-38.00	25.20	14.35	4.70	0.19	-	
CR-13	39.50-39.90	25.20	19.84	5.50	0.27	-	
SK-8A							
CR-8	18.10-18.25	26.40	30.21	15.10	0.17	-	37.42m
CR-10	21.70-22.00	26.40	60.80	29.10	0.11	-	
CR-12	24.60-24.90	26.10	50.32	32.00	0.14	-	
CR-13	25.50-25.75	26.90	65.26	32.90	0.14	-	
CR-15	28.00-28.35	27.00	81.70	24.60	0.17	-	
CR-16	30.40-30.60	26.70	74.83	31.00	0.18	-	
CR-18	34.35-34.60	27.00	127.39	46.70	0.17	-	
CR-19	36.30-36.60	25.80	44.03	18.80	0.22	-	
CR-20	37.70-37.90	26.10	141.68	38.80	0.13	-	K. Kot Altı
CR-22	40.80-41.00	25.40	35.70	11.90	0.20	-	
CR-23	41.70-42.00	26.10	40.76	14.90	0.16	-	
CR-25	45.00-45.35	24.90	22.74	18.20	0.17	-	
CR-26	46.60-46.80	25.00	41.74	11.10	0.25	-	
CR-27	47.35-47.55	24.90	25.83	15.00	0.21	-	

6.1.3. Kaya Sınıflamaları ve Zemin Parametreleri

Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli güzergâhını oluşturan jeolojik formasyonlar ve bu formasyonların jeoteknik özellikleri, daha önce açıklanmıştır. Bu çalışmalar neticesinde Tünel Güzergâhında bulunan ve ortak özellik gösteren jeolojik formasyonlar belirlenerek, yapılan arazi çalışmaları, yüzey jeolojisi ölçüm ve verileri ile laboratuvar analizlerine göre, Giriş, Orta ve Çıkış kesimlerinde karşılaşılabilecek muhtemel birim sınıflamaları (yaygın olarak kullanılmakta olan RMR, Q ve NATM' ye göre) ve bu sınıflamalara göre de nümerik analizlerde kullanılan elasto-plastik parametreler belirlenmiştir.

T2 Tüneli Güzergâhı boyunca toplam 6 adet Sondaj (SK-6, SK-7, SK-8, SK-8A, SK-9 ve SK-10 sondajları) yapılmıştır. Sondajlar, gerek uygun lokasyonlarından ve gerekse de tünel boyunun kısa olmasından dolayı Tünelin tamamının jeolojik modelinin oluşturulmasında yeterli veriyi sunabilmektedir. Bu çerçevede, yapılan arazi çalışmaları, yüzey jeolojisi ölçüm ve verileri ile laboratuvar analizleri, yapılan sondajlar ile birlikte değerlendirildiğinde, T2 Tünelinin tamamının Hasançelebi Volkanitlerine ait Aglomeratik-Andezitik Breşik Tüf, Andezit-Andezitik Bazalt – Piroklastlar-Aglomera ve Tüf arabantlarından oluştuğu anlaşılmaktadır. Andezitler genel olarak zayıf-orta dayanımlı olmakla birlikte, Aglomeratik-Andezitik Breşik Tüfler aşırı zayıf-çok zayıf dayanım göstermektedir. Andezitik Bazalt-Piroklastlar ise orta-orta iyi dayanımlıdır. Bu çerçevede, Tünel boyunca kaya kütle kalitesini Tüflerin ve Aglomeratik- Andezitik Breşik Tüflerin konum ve uzanımı belirlemektedir. Özellikle Tünel Giriş Kesimindeki Breşik Tüfler aşırı zayıf-çok zayıf dayanımlıdır. Tünel Orta Kesimlerinde de orta-orta iyi dayanımlı Andezit-Andezitik Bazalt – Piroklastlar bulunmakta olup, Çıkış Kesiminde ise zayıf dayanımlı Aglomera ve Tüf arabantlı Andezit-Andezitik Bazalt-Lav akıntıları-Piroklastlar mevcuttur.

T2 Tüneli Girişindeki Aglomeratik-Andezitik Breşik Tüfler çok zayıf kaya sınıfında olup Portal C2 ve C2 Kazı ve Destek Sistemi ile geçilmesi gerekli olacaktır. Tünel Orta Kesimlerinde ise, Andezit-Andezitik Bazalt-Piroklastik seviyelerinin orta iyi kaya sınıfında olacağı ve B1 ve B2 Kazı ve Destek Sistemi ile geçileceği ön görülmüştür. Bu zonlarda Andezitik Tüf arabantlarının konum ve uzanımına göre yer yer B3 Kazı ve Destek Sisteminin de kullanılması gerekebilecektir.

Tünel Çıkış Kesimindeki Tüf arabantlı Andezit-Andezitik Bazalt-Lav Akıntıları-Piroklastlar ve Aglomera ise zayıf kaya sınıfındadır. Bu zonda Portal B3 ve B3 Kazı ve

Destek Sisteminin kullanılması gerekli olacaktır. Tünel Orta Kesimlerinde kullanılacak B2 Kazı ve Destek Sistemi, Andezitik Tüflerin konum ve uzanımına göre, çelik iksasız (B2 Kazı ve Destek Sistemi-1) veya I100çelik iksalı (B2 Kazı ve Destek Sistemi-2) olarak uygulanabilecektir.

Herhangi bir tünel için, öngörülen kaya sınıflamalarına göre önerilen destek sistemlerinin uygunluğunun belirlenmesi amacıyla oluşturulan nümerik analizlerde kullanılacak tasarım parametrelerinin ve başlıca da deformasyon modüllerinin seçilmesi ve belirlenmesi, bu konu ile ilgili bir çok farklı deneye dayalı yaklaşımlar bulunduğu için önemli bir tartışma konusu olmaktadır. Bu bağlamda Tablo 6.11’de, T2 Tüneli için, hesaplanan Kaya Sınıflamaları (RMR ve Q)değerlerinden hareketle, ampirik formüllere uygun olarak hesaplanan Deformasyon Modülü değerleri sunulmuştur.

T2 Tüneli Destek ve Kazı Sistemleri nümerik analizlerinde kullanılan deformasyon modülü parametrelerinin, hem kaya kütle özelliklerini daha iyi şekilde yansıttığının öngörülmesinden ve hem de şu anda dünyada en yaygın olarak kullanılan yaklaşım olması açısından Hoek & Diederichs (2006) ampirik yaklaşımına göre belirlenmesinin uygun olacağı düşünülmüştür. Seçilen bu değerler, Tablo 6.11.’de diğer kaya kütlesi parametreleri ile birlikte sunulmakta ve Tablo 6.12. ’de de altı çizili olarak gösterilmektedir.

6.1.3.1. Giriş Kesimi

Giriş kesiminde; Aglomeratik-Andezitik Breşik Tüf, Hasaңcelebi Volkanitleri, SK-6 ve SK-7 Sondajları ile portal aynasında yapılan jeolojik ölçümler ve veriler kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. (Sol Tüp Girişi (Km:88+608-Km:88+665 arası) - Sağ Tüp Girişi (Km:0+966-Km:1+040 arası))

6.1.3.1.1. RMR Sınıflaması

Giriş kesimine ait RMR sınıflaması Tablo 6.5’de verilmiştir.

Tablo 6.5. Giriş kesimi RMR sınıflaması

Sınıflama Parametresi		Açıklamalar	PUAN
RQD		10,0*	4
Serbest Basınç Dayanım		5 MPa**	1
Süreksizlik Aralığı		0,01-0,02 m	6
Süreksizlik Durumu			
a	Süreksizlik Uzunluğu, m	10 - 20 m	1
b	Süreksizlik Açıklığı, mm	< 5 m	1
c	Pürüzlük	Düz	1
d	Dolgu	Yumuşak Dolgu <5 mm	2
e	Ayrışma	Çok Ayrışmış	0
Yeraltı Suyu		Kuru	15
TEMEL RMR PUANI (RMR0) =			31
Süreksizlik Yönü		Orta	-5
RMR PUANI = 26			(Çok Zayıf Kaya)

* SK-6 sondajının tamamının ort. RQD değeri 16, SK-7 sondajında H=0-21.5 m arasının (Breşik Tüf Seviyelerinin) ort. RQD değeri 22’dir. Ancak çok zayıf dayanımlı Breşik Tüf seviyelerinden oluşan bu portal zonunda kaya sınıflamasından kullanılacak RQD değerinin 10’dan yüksek alınması uygun bulunmamıştır.

** SK-6 sondajından 4 adet numune alınmış olup, bunlardan hiçbirisinde Serbest Basınç Deneyi yapılamamış, ancak Nokta Yükleme Deneyi yapılmıştır. Nokta yükleme dayanımı serbest basınç dayanımı korrelasyonu oldukça geniş aralıkta sağlanabilmekle birlikte, genel olarak serbest basınç dayanımı nokta yükleme dayanımının ort. 20-25 katı kadardır. Ancak bazı inizotropik kayalarda bu miktar 15-50 kat arasında değişmektedir.

Bu çerçevede, SK-6 sondajı için yapılan dört adet Nokta Yükleme Deneyinin ortalaması alınmış ($I_s=0.1$ Mpa) ve bu değer de 50 katı alınarak Nokta Yükleme Dayanımı-Serbest Basınç Dayanımı korrelasyonu oluşturulmuştur. Nokta Yükleme Deney sonuçları oldukça düşük çıktığı için, mantıklı ve kabul edilebilir bir sonuç oluşabilmesi açısından, Serbest Basınç Dayanımı-Nokta Yükleme Dayanımı korrelasyonu için en yüksek değer kullanılması benimsenmiştir. Bu çerçevede ort. 5 MPa çıkan Serbest Basınç Dayanımının, kütlenin elastoplastik karakteristiği ile örtüştüğü açıktır.

6.1.3.1.2. Q Sınıflaması

Giriş kesimine ait Q sınıflaması Tablo 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.6. Giriş kesimi Q sınıflaması

Sınıflama Parametresi	Açıklamalar	PUAN
RQD	10,0	10
Eklem Sayısı (Jn)	3 set+random	12
Eklem Pürüzlülüğü (Jr)	Düzlemsel Düz Eklemler	1.0
Eklem Ayırışması (Ja)	Çok ayırışmış yumuşak dolgulu Eklemler <5 mm	8.0
Su Durumu (Jw)	Kuru	1.0
SRF (Stres Azaltma Faktörü) (Baskılı Zon-Portal Kesimi)		2,5
$Q = (RQD/Jn)*(Jr/Ja)*(Jw/SRF) = (10/12)*(1.0/8.0)*(1.0/2.5) =$		0.042
		(Aşırı Zayıf Kaya)

6.1.3.1.3. RMR-Q Korelasyonu

$RMR=9\ln Q+44$, $Q=0.042 \Rightarrow RMR \cong 16$ olup bu değer hesapla bulunan $RMR=26$ değerinden farklıdır. Bu durumun en büyük nedeni RQD değerinin oldukça düşük olması ve bu değer Q sınıflandırma sistemini direkt etkiliyor olmasıdır. Zaten bu nedenle de, normal şartlarda, portal kesimlerinde iki katı olarak dahil edilen eklem sayısı, kaya kütle kalitesi RQD ve SRF değerleri ile yeteri kadar düşürüldüğü için, ayrıca iki katı olarak dahil edilmemiştir. Ancak, RMR sınıflandırma sisteminin bu kesimdeki kaya kütleliğini çok daha iyi temsil ettiği öngörülmektedir.

6.1.3.1.4. NATM Sınıflaması

T2 Tüneli bu kesimde iki kısım halinde değerlendirilmiştir. Sol Tüp Girişi Km:88+608.00 - Km:88+650 arası ve Sağ Tüp Girişi Km:0+966.00-Km:1+025 arası örtü kalınlığının iyice azaldığı Giriş Portalı Kesimi ve Sol Tüp Km:88+650-Km:88+665 ve Sağ Tüp Km:1+025-1+040 arası Tünel Kesimi. Hasançelebi Volkanitlerine ait Aglomeratik - Andezitik Breşik Tüflerin bulunduğu bu kesimde su yoktur. Çok zayıf kaya özelliği gösteren bu zon, baskılı bir kaya ortamı oluşturacaktır. Bunun dışında süreksizlikler yüksek uzanımlı olup aralıkları da 0.01-0.2 m arasında değişmektedir. Açıklıklar genellikle

düz, yumuşak dolgulu ve çok ayrılmış olup 5mm'den azdır. Bu çerçevede, tavanda ve yan duvarlarda hemen sistematik destekleme gerekmektedir. Kazının yumuşak patlatma ve/veya mekanik kazı ile yapılması mümkün olup, ilerlemeler 1 m'yi geçmemelidir. Tünel kazıları etrafında kinematik problem ön görülmemekle birlikte, dökülmelerin ve ani deformasyonların engellenmesi amacıyla kazıyı müteakip hemen sistematik destekleme yapılmalı ve en az NPI180 çelik iksa uygulanmalıdır. Dairesel kesitin kapanması amacıyla taban kemeri kazısı ve tabanda püskürtme betonu yapılmalıdır. Ayna stabilizasyonun sağlanması ve aşırı sökümlerin engellenmesi için enjeksiyonlu süren gerekecektir. Bu bağlamda ve RMR=26 (Çok zayıf Kaya) ve $Q=0.042$ (Aşırı Zayıf Kaya) değerlerine göre T2 Tüneli Sol Tüp Girişi (Km:88+608) - Km:88+650 arası ve SağTüp Girişi Km:0+966-Km:1+025 arası kesiminin Portal C2 Kazı ve Destek Sistemi ile ve Sol Tüp Km:88+650-Km:88+665 arası ve Sağ Tüp Km:1+025-1+040 arası kesimlerinin de C2 Kazı ve Destek Sistemi ile geçilmesi uygun ve gerekli olacaktır.

6.1.3.1.5. Kaya Kütlesi Elasto-Plastik Parametreleri

Kaya Kütlesi elasto-plastik parametreleri Rocklab 1.03 programı kullanılarak elde edilmiş olup, program girdileri aşağıda, sonuçlar ise Tablo 6.11.'de, sunulmuştur.

- mi (intakt kayanın Hoek-Brown Dayanım Parametresi)
- => mi (Aglomeratik-Andezitik Breşik Tüf için) =12
- σ_c = intakt kayanın serbest basınç dayanımı = 5 MPa
- MR= 300 (Aglomeratik-Andezitik Breşik Tüf için)
- E_i = $MR \cdot \sigma_c = 1.50$ GPa (intakt kaya ort. Elastisite Modülü)
- Örtü Kalınlığı = 15 m
- D (Örselenme Faktörü) = 0.2

Hoek, Torres ve Corkum tarafından Hoek-Brown dayanım kriterleri kapsamında 2002 yılında oluşturulan yaklaşıma göre, açık ve kapalı kazılarda örselenme derecesi için “D” örselenme faktörü (disturbance factor) belirlenmekte ve bu faktör kaya kütlesi elasto-plastik parametrelerinin (E , m , s) bulunması için oluşturulan ampirik formüllere dahil edilmektedir. “D” değeri, iyi kaya şartlarında ve “mükemmel” derecede kontrollü bir patlatma uygulanması durumunda veya TBM kullanılması durumunda “0” ve yine aynı iyi kaya şartlarda kötü kontrollü bir patlatma durumunda “0.8” olarak önerilmekte, zayıf kaya

koşullarında ise patlatmasız mekanik kazı yöntemlerinin kullanılması durumunda ise yine “0” olarak önerilmektedir.

Bu çerçevede, T2 Tüneli Kapalı Kazıları etrafında oluşacak örselenme faktörünün ise orta-orta iyi kaya kesimleri (B1 ve B2 kaya sınıfı) için orta-iyi kalitede yumuşak patlatma durumuna göre $D=0.6$ ve zayıf kaya kesimleri (B3kaya sınıfı) için orta-iyi kalitede yumuşak patlatma durumuna göre $D=0.4$ ve çok zayıf kaya kesimleri (C2 kaya sınıfı) için de mekanik kazı ve/veya orta-iyi kalitede yumuşak patlama durumuna göre $D=0.2$ olarak kullanılması uygun bulunmuştur.

Kazı etrafında oluşacak örselenmiş bölge için ise, T2 Tüneli Kapalı Kazıları etrafında, yumuşak patlatma yöntemi ile patlatma ve patternleri kaya sınıfına göre değişen 4-6 m. boyunda bulon imalatı yapılacaktır. 4-6 m’lik bulon boyunun tamamının örselenmeyeceği açık olup, imalat sisteminde herhangi bir değişiklik de öngörülmemektedir. Kaya kütle kalitesiazaldıkça örselenme miktarı ve derecesinin de azalacağı gerçeğinden de hareketle T2 Tüneli boyunca, B1 ve B2 kaya sınıfı için 3 m, B3 kaya sınıfı için 2.5 m ve C2 kaya sınıfı için de 2 m kalınlığında birkesimin örselenmiş olacağı kabul edilmiştir.

Bu açıklamalar çerçevesinde, T2 Tüneli Giriş Kesiminde, kaya kalitesi çok zayıf kaya sınıfındadır ve tünel kazıları “patlatmalı olarak veya mekanik kazı” ile yapılacaktır. Bu nedenle çok zayıf kayada yumuşak patlatma veya mekanik kazı yapılacağı düşünülerek “ $D=0.2$ ” olarak belirlenmesi uygun bulunmuştur.

6.1.3.2. Orta Kesimi

Orta kesiminde; Andezit-Andezitik Bazalt-Piroklastlar, Hasaңelebi Volkanitleri, SK-8 Sondajı ile yüzeyde yapılan jeolojik ölçümler ve veriler kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. (Sol Tüp Km:88+680-Km:88+690 ve Km:88+790-Km:88+855 arası, SağTüpKm:1+055-Km:1+065 ve Km:1+150- 1+220 arası).

6.1.3.2.1. RMR Sınıflaması

Orta kesimine ait yapılan RMR sınıflaması Tablo 6.7’de verilmiştir.

Tablo 6.7. Orta kesimin RMR sınıflaması

Sınıflama Parametresi		Açıklamalar	PUAN
RQD		65,0	13
Serbest Basınç Dayanım		18 MPa	3
Süreksizlik Aralığı		0,05-1.5 m	12
Süreksizlik Durumu			
a	Süreksizlik Uzunluğu, m	10 - 20 m	1
b	Süreksizlik Açıklığı, mm	< 5 m	1
c	Pürüzlük	Az Pürüzlü	3
d	Dolgu	Sert Dolgulu <5 mm	4
e	Ayrışma	Orta Ayrışmış	3
Yeraltı Suyu		Kuru	15
TEMEL RMR PUANI (RMR0) =			55
Süreksizlik Yönü		Orta	-5
RMR PUANI = 50 (Orta Kaya)			

* RQD değeri, SK-8 sondajının tamamının ort. değeridir.

** SK-8 Sondajından toplam 6 adet numune alınmıştır. Tamamından tek eksenli serbest basınç deneyi yapılabilmiş olup bu deneylerin ortalamasıdır.

6.1.3.2.2. Q Sınıflaması

Orta kesimine ait yapılan Q sınıflaması Tablo 6.8’de verilmiştir.

Tablo 6.8. Orta kesimi RMR sınıflaması

Sınıflama Parametresi	Açıklamalar	PUAN
RQD	65,0	65
Ekleme Sayısı (Jn)	3 set+random	12
Ekleme Pürüzlülüğü (Jr)	Düzlemsel Pürüzlü Eklemler	1,5
Ekleme Ayrışması (Ja)	Orta ayrışmış sert dolgulu eklemler < 5 mm	6.0
Su Durumu (Jw)	Kuru	1.0
SRF (Stres Azaltma Faktörü)		2,5
$Q = (RQD/Jn)*(Jr/Ja)*(Jw/SRF) = (65/12)*(1.5/6.0)*(1.0/1.0) = 1.354$		
(Zayıf Kaya)		

6.1.3.2.3. RMR-Q Korelasyonu

$RMR=9\ln Q+44$, $Q=1.35 \Rightarrow RMR \cong 47$ olup bu değer hesapla bulunan $RMR=50$ değerine yakındır.

6.1.3.2.4. NATM Sınıflaması

T2 Tünelinin bu kesimleri Hasacelebi Volkanitlerine ait Andezit-Andezitik Bazalt-Piroklastlardan oluşmakta olup, yer yer küçük uzanımlı Tüf arabantları bulunmaktadır. Esasen SK-8 sondajının yapıldığı zonda (Sol Tüp Km:88+790-Km:88+855 ve Sağ Tüp Km:1+150-1+220 arası) karşılaşılması öngörülen bu kaya kütesinin, T2 Tüneli Giriş-Orta Kesiminde, zayıf kaya klasındaki Orta Kesim-1 ve orta-iyi kaya klasındaki Orta Kesim-3 Geçiş zonundaki kısa tülde de (Sol Tüp Km:88+680-Km:88+690 ve Sağ Tüp Km:1+055-Km:1+065) karşılaşılması kuvvetle muhtemeldir.

Su bulunmayan bu kesimde süreksizlikler yüksek uzanımlı olup aralıkları da 0.05-1.5m arasında değişmektedir. Açıklıklar genellikle az pürüzlü, sert dolgulu ve orta ayrışmış olup 5 mm'den azdır. Tavanda ve yan duvarlarda sistematik destekleme gerekmektedir. Kazının yumuşak patlatma ile yapılması uygun olacaktır. Tünel kazıları etrafında, kapalı kazı - süreksizlik sistemleri geometrisinden kaynaklı yapısal bir duraysızlık potansiyeli öngörülmemektedir. Bu çerçevede ve $RMR=50$ (Orta Kaya) ve $Q=1.35$ (Çok Zayıf Kaya) değerlerine göre T2 Tünelinin bu kesimlerinin B2 Kazı ve Destek Sistemi ile geçilmesi uygun ve gerekli olacaktır.

6.1.3.2.5. Kaya Kütesi Elasto-Plastik Parametreleri

Kaya Kütesi elasto-plastik parametreleri Roclab 1.03 programı kullanılarak elde edilmiş olup, program girdileri aşağıda, sonuçlar ise Tablo 6.11'de, sunulmuştur.

- m_i (intakt kayanın Hoek-Brown Dayanım Parametresi)

$\Rightarrow m_i$ (Andezit-Andezitik Bazalt-Piroklastlar için) =18

- σ_c = intakt kayanın serbest basınç dayanımı = 18 Mpa

- $MR = E_i / \sigma_c = 435$ (SK-8 Sondajından 6 adet elastisite modülü deneyi yapılmış olup, bu deneylerden elde edilen ortalama MR değeridir.)

- $E_i = MR * \sigma_c = 7.83$ GPa (intakt kaya ortalama Elastisite Modülü)

-Örtü Kalınlığı = 35 m ve D (Örselenme Faktörü) = 0.6

T2 Tüneli bu kesimlerinde, kaya kalitesi orta kaya sınıfındadır ve tünel kazılarının“patlatmalı” yapılması öngörülmektedir. Bu nedenle orta kayada, orta-iyi kalitede yumuşak patlatma yapılacağı düşünülerek “D=0.6” olarak belirlenmesi uygunbulunmuştur.

6.1.3.3. Çıkış Kesimi

Çıkış kesiminde; Andezit, Andezitik Bazalt, Lav Akıntıları, Piroklastlar, Aglomera, Tüf arabantları, SK-9 ve SK-10 Sondajları ile portal aynasında yapılan jeolojikölçümler ve veriler kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır.(Sol Tüp Km:88+855, Sol Tüp Çıkışı Km:88+953, Sağ Tüp Km:1+220, Sağ Tüp ÇıkışıKm:1+334)

6.1.3.3.1. RMR Sınıflaması

Çıkış kesimine ait yapılan RMR sınıflaması Tablo 6.9’de verilmiştir.

Tablo 6.9. Çıkış kesimi RMR sınıflaması

Sınıflama Parametresi		Açıklamalar	PUAN
RQD		45,0*	9
Serbest Basınç Dayanım		15 MPa**	2
Süreksizlik Aralığı		0,02-1.5 m	11
Süreksizlik Durumu			
a	Süreksizlik Uzunluğu, m	10 - 20 m	1
b	Süreksizlik Açıklığı, mm	< 5 m	1
c	Pürüzlük	Az Pürüzlü	3
d	Dolgu	Yumuşak Dolgulu	2
e	Ayrışma	Ayrışmış	1
Yeraltı Suyu		Kuru	15
TEMEL RMR PUANI (RMR₀) =			45
Süreksizlik Yönü		Orta	-5
RMR PUANI = 40 (Zayıf-Orta Kaya)			

* RQD değeri, SK-9 ve SK-10 sondajlarının tamamının ort. değeridir. ** SK-9 ve SK-10 Sondajlarından 8'er adet (toplam 16 adet) numune alınmıştır. Numunelerin tamamından tek eksenli serbest basınç deneyi yapılabilmiş olup, deneylerinin tamamının ortalama sonucudur.

6.1.3.3.2. Q Sınıflaması

Çıkış kesimine ait yapılan Q sınıflaması Tablo 6.10'de verilmiştir.

Tablo 6.10. Çıkış kesimi Q sınıflaması

Sınıflama Parametresi	Açıklamalar	PUAN
RQD	45,0	45
Eklem Sayısı (Jn)	3 set+random	2
Eklem Pürüzlülüğü (Jr)	Düzlemsel Pürüzlü Eklemler	5,0
Eklem Ayırışması (Ja)	Ayrışmış yumuşak dolgulu Eklemler	8,0
Su Durumu (Jw)	Kuru	1,0
SRF (Stres Azaltma Faktörü) (Portal Kesimi)		2,5
Q = (RQD/Jn)*(Jr/Ja)*(Jw/SRF) = (45/12)*(1,5/8,0)*(1,0/2,5) =		0,281
		(Çok Zayıf Kaya)

6.1.3.3.3. RMR-Q Korelasyonu

$RMR=9\ln Q+44$, $Q=0,281 \Rightarrow RMR \cong 33$ olup bu değer hesapla bulunan $RMR=40$ değerinden biraz farklıdır. Bu durumun en büyük nedeni Q sınıflandırma sistemini direkt etkileyen eklem takım sayısı puanının, fazla eklem sayısından dolayı, yüksek çıkmasıdır. Puan zaten yüksek olduğu için Q sınıflamasına katılırken iki katı ile çarpılmasına gerek görülmemiştir. Ancak RMR sınıflandırma sisteminin bu kesimdeki kaya kütle özelliklerini çok daha iyi temsil ettiği kuvvetle tahmin edilmektedir.

6.1.3.3.4. NATM Sınıflaması

T2 Tüneli bu kesimde iki kısım halinde değerlendirilmiştir. Sol Tüp Km:88+855-Km:88+865 ve Sağ Tüp Km: 1+220-Km:1+230 arası Tünel Kesimi ve Km:88+865-SolTüp Çıkışı (Km:88+953.00) arası ve Km:1+230-Sağ Tüp Çıkışı (Km:1+334) arası örtükalinlığının iyice azaldığı Çıkış Portalı Kesimi. Hasaңcelebi Volkanitlerinin Tüfarabantlı Andezit - Andezitik Bazalt - Lav Akıntıları – Piroklastlar - Aglomera seviyelerinden oluşan bu kesimde su bulunmamaktadır. Bunun dışında, süreksizlikler yüksek uzanımlı olup, aralıkları 0.02-1.5 m arasında değişmektedir. Açıklıklar genellikle az pürüzlü, yumuşak dolgulu ve ayrışmış olup 5 mm'den azdır. Kazının yumuşak patlatma

veya mekanik kazı ile yapılması uygun olacaktır. Tünel kazıları etrafında kinematik problem öngörülmemekle birlikte, dökülmelerin ve ani deformasyonların engellenmesi amacıyla kazıyı müteakip hemen sistematik destekleme yapılmalı ve çelik iksa uygulanmalıdır. Ayna stabilizasyonun sağlanması ve aşırı sökülmelerin engellenmesi için süren gerekecektir.

T2 Tüneli Çıkışında, Portal Kesimi olarak belirlenen zon uzun tutulmuş olup budurumun en büyük nedeni uzun tulde bulunan düşük örtü kalınlığıdır. Sol Tüp Çıkışı Km:88+900-88+920 arası kesiminde örtü kalınlığı 4 m'ye kadar düşmektedir. Detayları Portal Kesin Proje Raporunda açıklandığı üzere, Portalaçık kazı yükseklik ve hacimlerinin optimize edilmesi amacıyla kapalı tünel kazısı ile geçilecek bu kesim de dahil olmak üzere, T2 Tüneli Çıkışında Sağ ve Sol Tüpte ortalama 100'er metre uzunluğunda Portal B3 Kazı ve Destek Sistemi uygulanacak zon bulunmaktadır.

Bu çerçevede RMR=40 (Zayıf-Orta Kaya) ve $Q=0.281$ (Çok Zayıf Kaya) değerlerine göre T2 Tüneli Km:88+865-Sol Tüp Çıkışı (Km:88+953.00) arası ve Km:1+230-Sağ Tüp Çıkışı (Km:1+334) arası kesiminin Portal B3 Kazı ve Destek Sistemi ile ve Sol Tüp Km:88+855-Km:88+865 ve Sağ Tüp Km: 1+220-Km:1+230 arası kesimlerinin de B3 Kazı ve Destek Sistemi ile geçilmesi uygun ve gerekli olacaktır.

6.1.3.3.5. Kaya Kütlesi Elasto-Plastik Parametreleri

Kaya Kütlesi elasto-plastik parametreleri Roclab 1.03 programı kullanılarak elde edilmiş olup, program girdileri aşağıda, sonuçlar ise Tablo 6.11'de, sunulmaktadır.

-mi (intakt kayanın Hoek-Brown Dayanım Parametresi)

=> mi (Tüf arabantlı Andezit-Andezitik Bazalt-Lav Akıntıları-Piroklastlar-Aglomera)=13

- σ_c = intakt kayanın serbest basınç dayanımı = 15 MPa

-MR= E_i/σ_c = 335 (SK-9 ve SK-10 sondajlarından 8'er adet (toplam 16 adet) elastisite modülü deneyi yapılmış olup, bu deneylerden elde edilen ort. MR değeridir.)

- E_i = MR* σ_c = 5.025 GPa (intakt kaya ort. Elastisite Modülü)

-Örtü Kalınlığı = 15 m

-D (Örselenme Faktörü) = 0.4

T2 Tüneli Çıkış Kesiminde, kaya kalitesi zayıf-orta kaya sınıfındadır ve tünel kazıları "patlatmalı olarak veya mekanik kazı" ile yapılacaktır. Bu nedenle zayıf-orta

kayada yumuşak patlatma veya mekanik kazı yapılacağı düşünülerek “D=0.4” olarak belirlenmesi uygun bulunmuştur.

Tablo 6.11. T2 Tüneli kaya sınıflamaları ve zemin parametreleri

						ÖRSELENMEMİŞ KAYA					ÖRSELENMİŞ KAYA (D=0.2-0.6)					γ (kN/m ³)
	RMR ₀	Q	NATM	YÜK.	q _c (Mpa)	E _m (Mpa)	m	s	c(kPa)	Ø(°)	E _m (Mpa)	m	s	c(kPa)	Ø(°)	
GİRİŞ KESİMİ (SOL GİRİŞ-88+665) (SAĞ GİRİŞ-1+040)	31	0.042	C2	15m	5	95	0.854	0.0003	40	42	75	0.637	0.0001	36	39	20
ORTA KESİM-1 (SOL 88+665-88+680) (SAĞ 1+040-1+055)	45	0.70	B3	30m	15	862	1.525	0.0013	147	49	479	0.893	0.0005	119	45	23
ORTA KESİM-2 (SOL 88+680-88+690) (SOL 88+790-88+855) (SAĞ 1+055-1+065) (SAĞ 1+150-1+220)	55	1.354	B2	35m	18	2405	3.018	0.0039	239	54	984	1.404	0.0010	175	49	24
ORTA KESİM-3 (SOL 88+690-88+790) (SAĞ 1+065-1+150)	64	2.916	B1	45m	50	10940	4.162	0.0105	660	60	4863	2.222	0.0034	462	56	26
ÇIKIŞ KESİMİ (88+855-SOL ÇIKIŞ) (1+220-SAĞ ÇIKIŞ)	45	0.281	B3	15m	15	802	1.525	0.0013	102	54	446	0.893	0.0005	80	50	23
Not: Zemin parametreleri Roclab 1.03 programı ile elde edilmiş olup, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri yuvarlatılmıştır.																

Tablo 6.12. T2 Tüneli deformasyon modülü değerleri

DEFORMASYON MODÜLÜ (ÖRSELENMEMİŞ)							
	$E_m = E_i (0.02 + (1-D/2)/(1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}))$ (Mpa) (Hoek&Diederichs,2006)	RMR ₀	E _i (Mpa)	Q	NATM	q _c (Mpa)	m _i
GİRİŞ KESİMİ	<u>95</u>	31	1500	0,042	C2	5	12
ORTA KESİM	<u>2405</u>	55	7830	1,354	B2	18	18
ÇIKIŞ KESİMİ	<u>802</u>	45	5025	0,281	B3	15	13

DEFORMASYON MODÜLÜ (ÖRSELENMİŞ, D=0.2-0.6)									
	$E_m = E_i (0.02 + (1-D/2)/(1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}))$ (Mpa) (Hoek&Diederichs,2006)	D	RMR ₀	E _i (Mpa)	r _f	Q	NATM	q _c (Mpa)	m _i
GİRİŞ KESİMİ	<u>75</u>	0,2	31	1500	0,95	0,042	C2	5	12
ORTA KESİM	<u>984</u>	0,6	55	7830	0,67	1,354	B2	18	18
ÇIKIŞ KESİMİ	<u>446</u>	0,4	45	5025	0,83	0,281	B3	15	13

6.1.4. Nümerik Analizler

Yukarıda da sunulan kaya sınıflama sistemlerinden hareketle, NATM'ye göre ampirik olarak belirlenen Kazı ve Destek Sistemlerinin uygunluğunun ve geçerliliğinin nümerik analizler ile kontrol edilmesi, bir yer altı açıklığının kazı ve destek tasarımı için oluşturulması gerekli olan ve jeolojik-jeoteknik modelin oluşturulması ile başlayan simülasyonun son halkasıdır.

Bu analizler için gerekli olan girdi parametreleri, yine kaya sınıflamala sistemlerinden hareketle GSI'e göre belirlenmiş olup, kaya birimleri ise Hoek-Brown yenilme kriterine tabii elasto-plastik malzemeler olarak kabul edilmiştir. Analizlerde kullanılan kesitlerin jeolojik yapısı, örtü kalınlığı, kaya kalitesi vb detayları Tablo 6.13.'de verilmektedir. Destekleme Elemanları Malzeme Parametreleri ise Tablo 6.14.'de sunulmaktadır.

Tablo 6.13. Analizlerde kullanılan parametreler

ANALİZ ADI	ANALİZ KESİTİ KİLOMETRE	ANALİZ KESİTİ ÖRTÜ KALINLIĞI	JEOLJİK BİRİM	GSI
C2	88+665 (SOL TÜP) 1+025 (SAĞ TÜP)	25 m	Andezitik Breşik Tuf	26
B3	88+855 (SOL TÜP) 1+217 (SAĞ TÜP)	30 m	Andezit-Andezitik Bazalt	40
B2	88+840 (SOL TÜP) 1+202 (SAĞ TÜP)	35 m	Andezit-Andezitik Bazalt	50
B1	88+750 (SOL TÜP) 1+111 (SAĞ TÜP)	45 m	Andezit-Andezitik Bazalt	59
PORTAL C2	88+615 (SOL TÜP) 0+975 (SAĞ TÜP)	10 m	Andezitik Breşik Tuf	26
PORTAL B3	88+913.50 (SOL TÜP) 1+276.50 (SAĞ TÜP)	10 m	Andezit-Andezitik Bazalt	40

Tablo 6.14. Destekleme Elemanları Malzeme Parametreleri

	PÜSKÜRTME BETONU (C20-25)	BULON	ÇELİK İKSA	ÇELİK İKSA	ÇELİK HASIR	ÇELİK HASIR
		Ø28	(I180)	(I160)	(Q221/221)	(Q317/317)
E (Mpa)	14.250-28.500*	210.000	210.000	210.000	210.000	210.000
Basınç Dayanımı (Mpa)	10-20*	420	420	420	420	420
v (Poisson oranı)	0.2	-	-	-	-	-
Kesit Alanı(cm ²)	-	6.157	27.90	22.80	2.21	3.17
Çekme Dayanımı	1-2 (MPa)	0.16 (MN)	-	-	-	-

Numerik analiz tekniği olarak ise, son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki çok ciddi gelişmelere paralel olarak, karmaşık geometrilerin ve inhomojen ortamların modellenenbilmesinin en uygun şekilde sağlanabildiği Sonlu Elemanlar Analiz Tekniğinin kullanılması uygun görülmüştür. Bu çerçevede, Hoek-Brown dayanım kriterinin ve GSI'in fikir babası olan da Evert Hoek liderliğinde geliştirilen Phase² programı, tüm dünyada en

karmaşık yeraltı veyerüstü geomekanik problemlerin çözümünde fiilen uygulanması ve bunu yanında da kolay kullanımı nedenlerinden dolayı tercih edilmiştir.

Çalışmada nümerik analizlerin esas olarak irdeleme amaçlı oldukları şeklinde bir yaklaşım benimsenmiş ve bu durum yeri geldikçe açıklanıp yorumlanmıştır. Analizler, özellikle tünel orta kesimlerinde örtü kalınlıklarının artması ile birlikte, öngörülen destekleme elemanlarının yer yer tam kapasitelerine yakın mertebelerde yüklenebileceklerini göstermekle beraber, öneri destek sistemlerinin yeterli oldukları görülmüştür.

Nümerik analizleri kapsamında yapılan çalışmalar:

- Tünel İç Kesimleri C2 Kazı ve Destek Sistemi Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Nümerik Analizleri
- Tünel İç Kesimleri B3 Kazı ve Destek Sistemi Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Nümerik Analizleri
- Tünel İç Kesimleri B2 Kazı ve Destek Sistemi Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Nümerik Analizleri
- Tünel İç Kesimleri B1 Kazı ve Destek Sistemi Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Nümerik Analizleri
- Giriş Portal Kesimi C2 Kazı ve Destek Sistemi Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Nümerik Analizleri
- Çıkış Portal Kesimi B3 Kazı ve Destek Sistemi Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Nümerik Analizleri

7. YAPILAN MÜHENDİSLİK ÇALIŞMLARI

7.1. Tünel Kazı ve Destekleme Sistemleri

T2 Tüneli güzergâhını oluşturan hâkim jeolojik formasyonlar, bunların jeoteknik özellikleri ile Tünelin Giriş, Orta ve Çıkış Kesimlerinde karşılaşılmaması muhtemel birim sınıflamaları açıklanmıştır. Buna göre, T2 Tünelinin tamamının Hasançelebi Volkanitlerine ait Aglomeratik-Andezitik Breşik Tüf, Andezit-Andezitik Bazalt-Piroklastlar-Aglomera ve Tüf arabantlarından oluştuğu anlaşılmaktadır. Önceki çalışmalara göre oluşturulan T2 Tüneli kazı ve destek sistemleri Tablo 7.1.'de sunulmaktadır.

Tablo 7.1. Tünel kazı ve destekleme sistemleri

DESTEK SİSTEMLERİ	B1	B2	B3	C2
KAYA BULONU ÇAPI	Ø 28-SN	Ø 28-SN	Ø 28-PG	Ø 28-PG
KAYA BULONU ARALIĞI	2.50x2.50 (ÜST YARIDA)	2.00x2.00	1.50x 1.00-1.50	1.00x1.00-1.25
KAYA BULONU UZUNLUĞU	4m	4m	4-6m	6m
PÜSKÜRTME BETON SINIFI VE KALINLIĞI	C20-25 (10cm)	C25-30 (10 cm veya 15 cm)	C25-30 (20cm)	C25-30 (25cm)
ÇELİK HASIR TİPİ	Q221/221 TEK KAT	Q221/221 TEK KAT-10 cm için ÇİFT KAT-15 cm için	Q221/221 ÇİFT KAT	Q317/317 ÇİFT KAT
ÇELİK İKSA TİPİ VE ARALIĞI	-	I100 (15 cm için GEREKTİĞİNDE)	I160 1.00-1.50m	I180 ≤1.00m
SÜREN ARALIĞI VE BOYU	-	0.30-0.40 m L=4 m (15 cm için) L=2 m (15 cm için) Ø 28 ÇELİK	0.20-0.40 m L=4 -6 m L=2-3 m Ø 30-35 BORU	0.20-0.30m L=6 m L=2-3 m Ø 30-35 BORU Ø 2 inç BORU

MANEVRA BOYU				
ÜSTYARI	2.00-3.00 m	≤1.50-2.00 m	≤1.25-1.50 m	≤0.75-1.25m
ALTYARI	≤4.00 m	≤3.00-3.50 m	≤3.00 m	≤2.00 m
TABAN	-	-	-	≤2.00 m

Tablo 7.1. Devamı

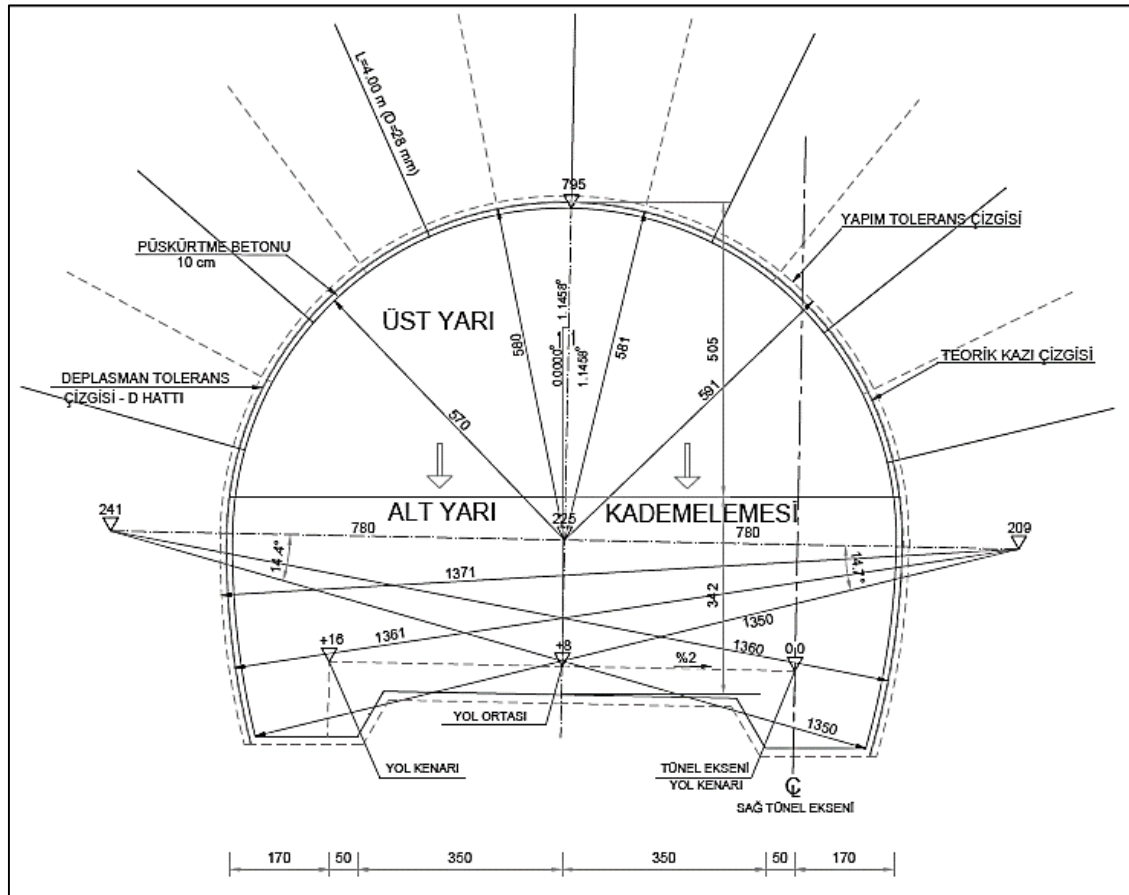
DESTEK SİSTEMLERİ	ÇIKIŞ PORTAL KESİMİ B3	GİRİŞ PORTAL KESİMİ C2
KAYA BULONU ÇAPI	Ø 28-PG	Ø 28-PG
KAYA BULONU ARALIĞI	1.00x1.50	1.00x0.75-1.00
KAYA BULONU UZUNLUĞU	4-6m	6m
PÜSKÜRTME BETON SINIFI VE KALINLIĞI	C25-30 (25cm)	C25-30 (30cm)
ÇELİK HASIR TİPİ	Q221/221 ÇİFT KAT	Q317/317 ÇİFT KAT
ÇELİK İKSA TİPİ VE ARALIĞI	I160 1.00m	I180 ≤1.00m
SÜREN ARALIĞI VE BOYU	0.20-0.30m L=4-6 m L=2-3 m Ø 30-35 BORU	0.20-0.30m L=6 m L=2-3 m Ø 30-35 BORU Ø 2 inç BORU

MANEVRA BOYU		
ÜSTYARI	≤1.00m	≤0.75-1.00m
ALTYARI	≤3.00 m	≤2.00 m
TABAN	≤3.00 m	≤2.00 m

B1 Destek Tipi

- Püskürtme Beton ($d=10$ cm)
- Çelik Hasır (Tek kat)
- Bulon (SN Bulon 4m, 6-7 adet)
- İlerleme Mesafesi Ayna (2.0-3.0 m)

B1 destek tipi için tam kesit kazıdan sonraki durumu Şekil 7.1’de gösterilmektedir.

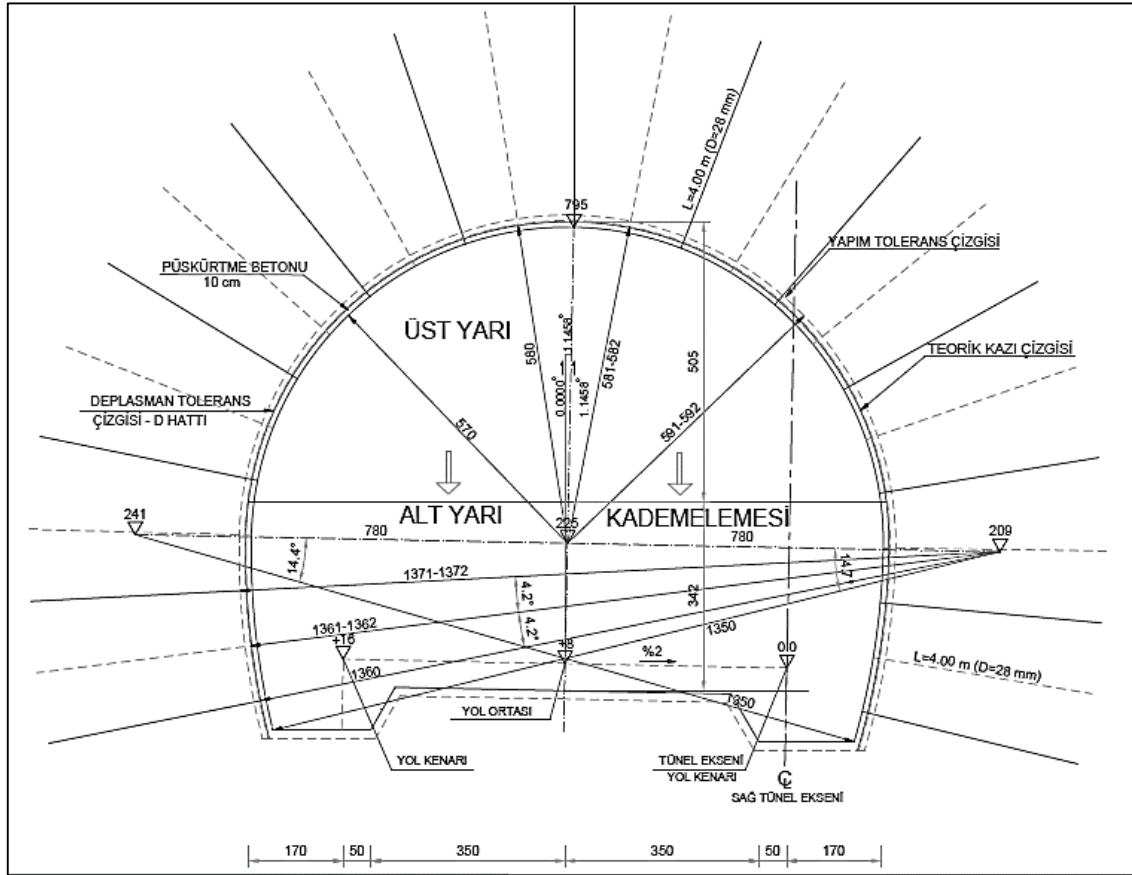


Şekil 7.1. B1 destek tipi

B2 Destek Tipi (ihsasız)

- Püskürtme Beton (d=10 cm)
- Çelik Hasır (Tek kat)
- Bulon (SN Bulon 4m, 12-13 adet)
- İlerleme Mesafesi Ayna (1.5-2.0 m)

B2 destek tipi için tam kesit kazıdan sonraki durumu Şekil 7.2’de gösterilmektedir.

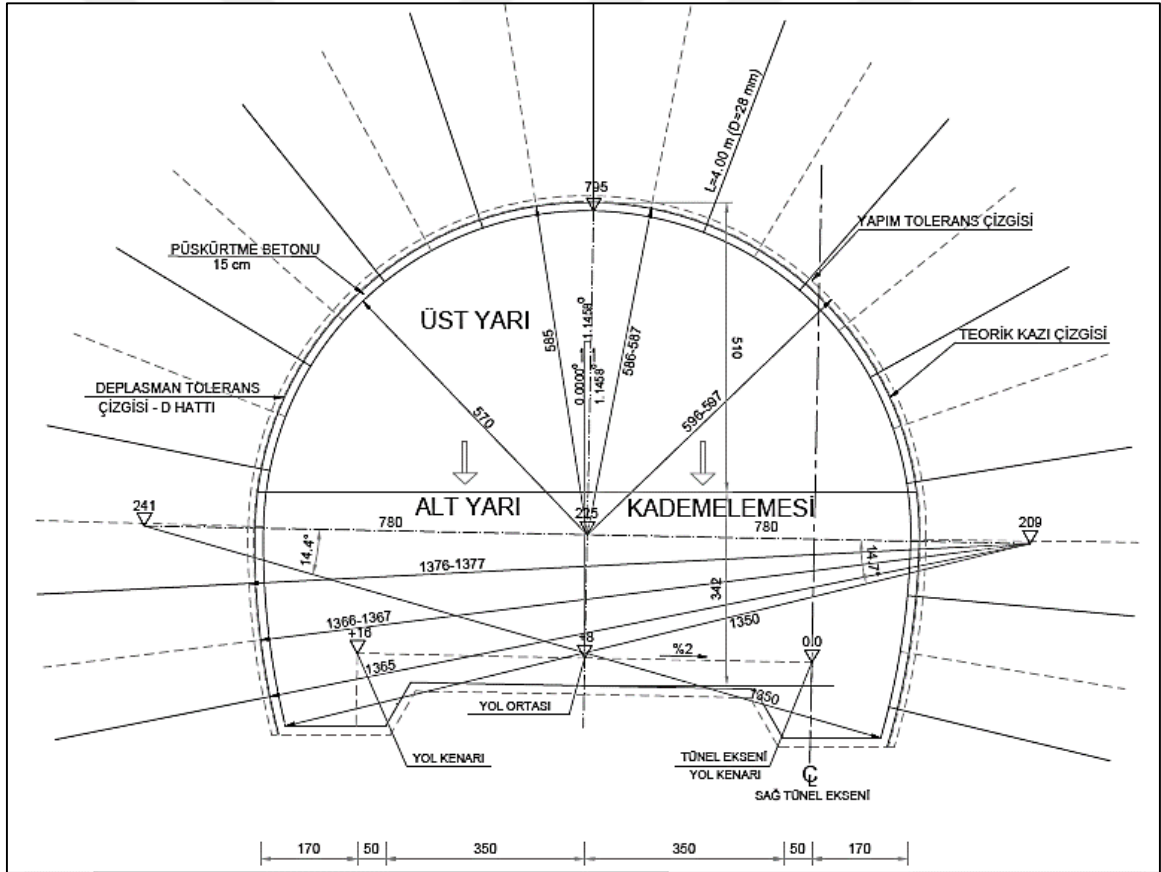


Şekil 7.2. B2 destek tipi (ihsasız)

B2 Destek Tipi (iksalı)

- Püskürtme Beton (d=15 cm)
- Çelik Hasır (Çift kat)
- Çelik İksa (NPI 100 – 1.5-2.0 m aralıkla)
- Süren ($\Phi 28\text{mm}$, 4 m – 0.3-0.4 m aralıkla)
- Bulon (SN Bulon 4m, 12-13 adet)
- İlerleme Mesafesi Ayna (1.5-2.0 m)

B2 destek tipi için tam kesit kazıdan sonraki durumu Şekil 7.3'te gösterilmektedir.

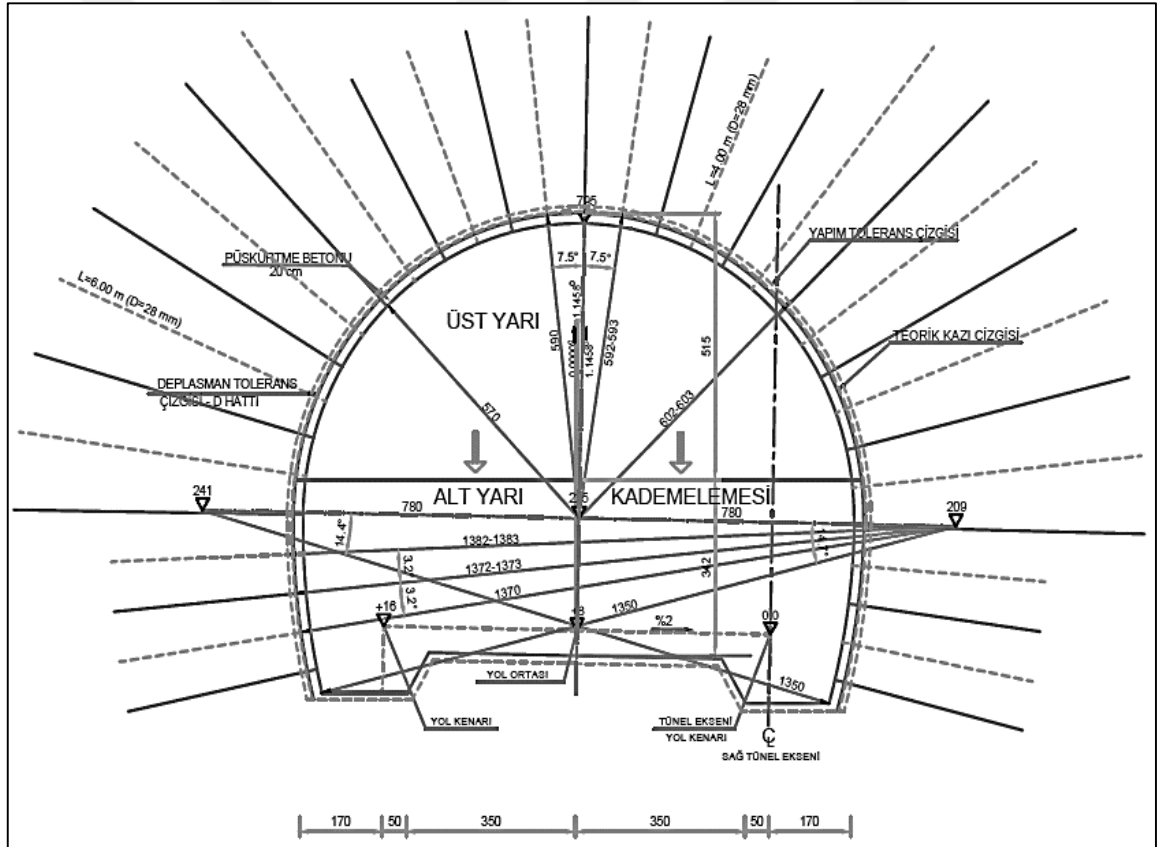


Şekil 7.3. B2 destek tipi (iksalı)

B3 Destek Tipi

- Püskürtme Beton (d=20 cm)
- Çelik Hasır (Çift kat)
- Çelik İksa (NPI 160 – 1.0 - 1.5 m aralıkla)
- Süren ($\Phi 30$ -35mm Enjeksiyonlu Çelik boru, 4-6 m – 0.2-0.4 m aralıkla)
- Bulon (SN Bulon, 9adet - 4m, 8adet-6m)
- İlerleme Mesafesi Ayna (1.0-1.5 m)

B3 destek tipi için tam kesit kazıdan sonraki durumu Şekil 7.4’de gösterilmektedir.

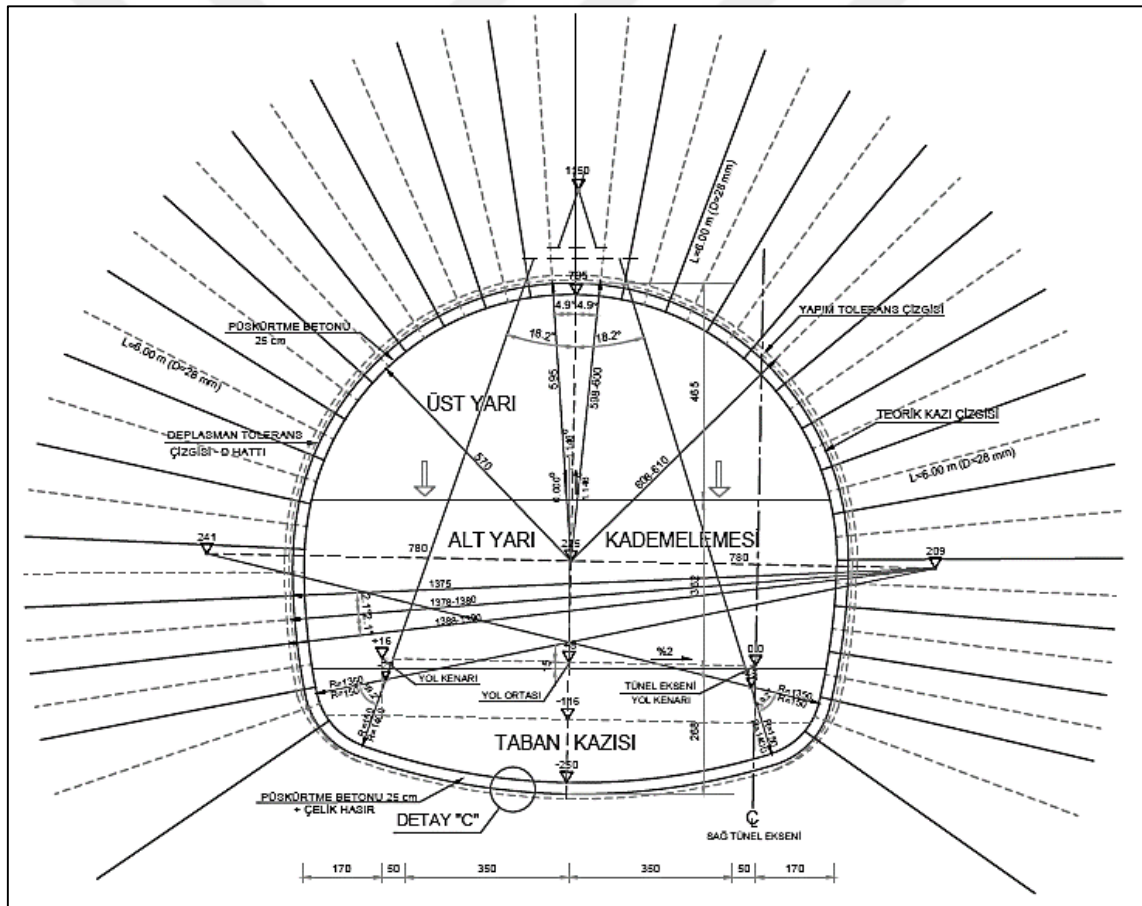


Şekil 7.4. B3 destek tipi

C2 Destek Tipi

- Püskürtme Beton (d=25 cm)
- Çelik Hasır (Çift kat)
- Çelik İksa (NPI 180 – <1.0 m aralıkla)
- Süren (Φ 30-35mm veya 2 inç Enjeksiyonlu Çelik boru, 6 m – 0.2-0.3 m aralıkla)
- Bulon (SN veya IBO Bulon, 6m 26-27 adet)
- İlerleme Mesafesi Ayna (0.75-1.25 m)

C2 destek tipi için tam kesit kazıdan sonraki durumu Şekil 7.5’de gösterilmektedir.



Şekil 7.5. C2 destek tipi

7.2. Önerilen Destek Sistemlerinin Tanımı ve Uygulamaları

7.2.1. Süren Uygulaması

Tünelde yapılan kazı veya patlatma sonrasında dökülmeye elverişli kaya ortamlarında, aşırı sökülme ve istenmeyen boşlukların oluşmaması için, çatlaklı yapılarda, özellikle de su miktarının fazla olduğu bölgelerde, ilerlemeye başlamadan önce süren montajı yapılmaktadır. Çelik iksanın hemen üst kısmından yaklaşık 5-10 derecelik maksimum bir açı ile çakılarak, süren adetleri uygulanan destekleme tiplerine göre farklıdır. Bu projede 1.5-2" çapında, 4-6 m lik borular kullanılmıştır (Resim 7.1).



Resim 7.1. Süren uygulaması (Hasançelebi Malatya)

7.2.2. Umbrella Arch Uygulaması

NATM'in kohezyonu düşük zeminlerde uygulanamaması, deformasyonların yüksek olması ve istenilen verimin elde edilememesi üzerine geliştirilmiştir. Bu yöntemle, verimlilik ve ilerleme hızının üst düzeye çıkmış, tünel ve yüzey emniyetini arttırılmıştır.

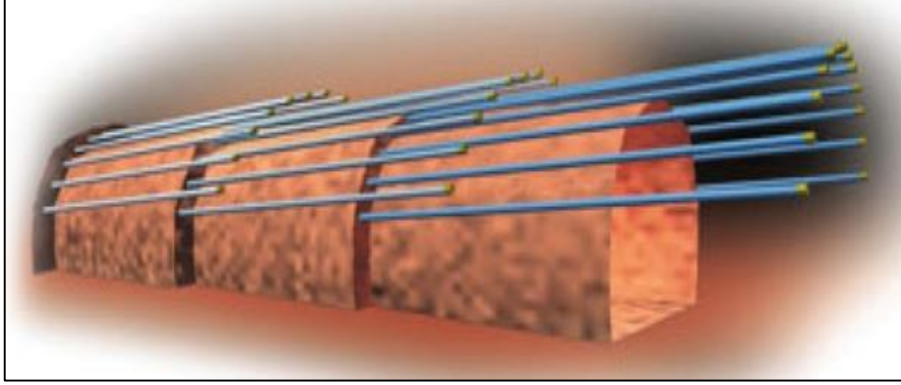
Umbrella Arch uygulamasının ilk kısmında, umbrella (süren) delikleri delinmektedir. Daha sonra, kazı sırasında tünel tavan kısmından ve yan duvarlardan gelecek gerilmeleri karşılayabilmek amacı ile kazı aynasının tavanından başlayarak simetrik olarak omuzlara ve ayaklara doğru proje âdetince, 9 m uzunluğunda ve projede belirtilen çapta çelik borular yerleştirilmektedir (Resim 7.2.). Bu şemsiye boruları yatay ile 6-8 derecelik açı yapacak şekilde, delinmiş olan deliklere yerleştirilir. Boruların açılan delik içerisinde rahatça ilerleyebilmesi için uçları sivriltilir. Umbrella Arch borularının yerleştirilmesi işlemi yapıldıktan sonra; boruların dip kısımlarındaki boru ağızları enjeksiyon manşonu ile kapatılır ve boru ile delik arasında kalan açıklık alçı ile sıvanarak 2-3 bar basınçta, çimento/su enjeksiyon şerbeti basılarak doldurulur. Bu işlem ile hem borunun içi hemde boru ile delik arasında kalan boşlukların basınçlı çimento şerbeti ile doldurulması sağlanmış olur. Bu enjeksiyon işlemi enjeksiyon şerbeti geri dönüş hortumlarından gelinceye kadar yapılır. Her ilerleme adımında (Ano), setler tamamlanana kadar bu işlemler tekrar edilir ve projede belirtilen bindirmeler dikkate alınarak umbrellalar çakılmaktadır (Şekil 7.6).

Umbrellalar çakıldıktan sonra kazıya başlanır ve projedeki yükselen iksaların montajı yapılır (6-9 adet) yani bir anoluk ilerleme sağlanır. Bu ilerleme sırasında tünel kesitin 50 cm dışına doğru yarıçap genişletilmesiyle tekrar umbrella çakılacak alan oluşturulur. Bu pay başlangıçta 4.5-6.0 m lik bölümde genişletme kazısı adı altında, genişleyen ve yükselen iksalar monte edilerek 4.5-6.0 m nin sonunda elde edilmektedir.

Bu yöntem ile yeraltı kaya-zemin kompleksinin, yapay kemer ile eksenel ve düşey gerilmeleri önlenir, deformasyonlar minimize edilerek güvenli kazı sahası elde edilmiş olur.



Resim 7.2. Umbrella Arch boruları



Şekil 7.6. Umbrella setleri

Aynı zamanda, Konsolide olmayan, göçük riski taşıyan zayıf formasyonlarda, umbrella (süren) deliklerinin göçme riski taşıdığı yerlerin geçilmesini hızlı ve güvenli bir şekilde ilerleme sağlayan kendinden delen süren (Resim 7.3) sistemi uygulanmaktadır. Bu sistemin tek farkı süren deliklerinin önceden değil, deliklere sürülecek olan umbrella boruları tarafından, kendinden delici ucu(Rockbit) ile delinip kuyu içine ilerlemesi ve yerleşmesi ile sağlanmaktadır. Bu uygulama ile Kohezyonsuz zeminlerde bile rahatlıkla ilerleme sağlanmıştır. Ekonomik olarak farklılık gösterebilecek ihtiyaç duyulan sistemler arasında yerini almıştır. Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli Sağ tüpde yaşanan göçükde bu sistemle geçilmiştir.



Resim 7.3. Kendinden delen süren

7.2.3. Çelik Hasır

Püskürtme beton donatısı olarak kullanılan hasır çelik, kazı sonrası çelik iksa montajından önce serilir ve tüneller için belirlenen standartlara göre yatay ve düşey yönde 30 veya 45 cm’lik bir bindirme boyu vardır. Hasır çelik yerleştirilmesinde dikkat edilmesi gereken nokta hasırın kayanın yüzeyine olabildiğince yaklaşmasının sağlanmasıdır.

Çelik hasır, S220 çeliğinden soğuk çekme yöntemi ile çekilip nervürlenerek imal edilen, yüksek dayanma gücüne sahip ve genellikle inşaatlarda kullanılan bir beton çeliğidir. Çelik hasırların minimum akma sınırı 500 N/mm^2 , minimum çekme mukavemeti ise 550 N/mm^2 dir (Resim 7.4).



Resim 7.4. Çelik hasır (Hasançelebi Malatya)

Çelik hasırın emniyet gerilmesi normal inşaat demirinden 2 kat fazladır ve bu taşınabilen ağırlıkta % 40 oranında bir tasarruf sağlanmaktadır. Yani 1 cm² başına düşen ağırlık çelik hasırda daha fazla olacağından bu donatı tipinde malzemeden tasarruf sağlanmış olur. Plakalar şeklinde oluşu, taşınmasını, tahkimat yapılacak bölgeye yerleştirilmesinde avantaj sağlar. Püskürtme betonun kaya yüzeyine uygulanmasını kolaylaştırır. Ayrıca çelik hasır donatılar beton içinde homojen bir dağılım göstermekte böylece çekme kuvvetlerinin düzgün bir şekilde alınması sağlanmaktadır. Çubukları nervürlü ve birbirine kaynaklı oluşu aderansı artırmakta, beton içerisindeki çubukların kayması önlenmekte yapıda olabilecek çatlaklar, korozyon ve sızıntılar giderilmektedir. Çelik hasır donatının kullanılması püskürtme betonun statik özelliklerini artırır, uygulanmasını kolaylaştırır ve püskürtme betonda geri sıçramayı azaltır ve püskürtme betonun yenilmesi durumunda parçalanıp dökülmesini engeller.

7.2.4. İksa Montajı

Kazı ve destekleme işlemlerinin çok hızlı ve uygun şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Kazı destekleme tipinin belirlenirken kazı yapılan kayanın stabilitesi, tünel üstündeki örtü kalınlığı, tünel güzergâhı üzerindeki yapılaşmanın niteliği ve projelendirme aşamasında tünel içindeki gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeler dikkate alınır. Bunlar belirlendikten sonra da çelik hasır miktarına, çelik iksa gereksinimi olup olmadığı, ne kadar kalınlıkta püskürtme betonun atılmasının ve ne tür bulonların kullanılması gerektiğine karar verilir. Üzerinde yerleşim belgesi bulunan, çevresindeki kayaların oluşturduğu gerilmelerin kontrol edilmesi gerektiği bölgelerde yüksek dayanımlı püskürtme beton, birkaç kat çelik hasır ve yakın aralıklı olarak yerleştirilmiş çelik iksa kullanılmasına özen gösterilmelidir.

Çelik iksalar, kazı sırasında kazı cidarında meydana gelen deformasyonları kontrol altına alarak püskürtme betonla beraber güvenli bir bölge oluşturmak amacıyla kullanılır. Bu iksaların farklı türleri vardır ve zemin yapısına göre hangi tür iksa kullanılacağına karar verilir. Tünel içerisine hazırlanarakiki parça halinde gelen iksanın, flanşlarıüzerinde açılan dört delik ile civata ve somunun birbirlerine bağlanmasıyla montalanır. İksalar, kazılmışolan tünel boşluğunu kısmen de olsa destekleyip, belirli bir noktanın ötesinde zemin akmalarınıönlemek ve boşluğu çevreleyen zeminin hareketini azaltmak için kullanılırlar. Kazının yapıldığı ortamın kaya yapısına göre NPI tipi veya kafes tipi iksa kullanılabilir (Resim 7.5).



Resim 7.5. NPI profil iksa kurulumu (Hasacelebi Malatya)

7.2.5. Püskürtme Beton

Yoğun ve homojen bir ktle oluşturmak üzere uygulanacağı yere kapalı bir hortum veya tüple iletilip, bir püskürtme ucu (nozul) aracılığıyla yüzey üzerine yüksek hızda püskürtülen imento-su-agrega veya imento-su-agrega-kimyasal ve mineral katkı karışımıdır. Püskürtme beton tünel çevresini kontrol altında tutmak ve tünel zeminin gevşemesini önlemek için kullanılır. Kayalardaki çatlakları doldurup sıkıştırarak kırılmaları ve kaya düşmelerine engel olur. Püskürtme betonun en güvenilir ve uygun şekilde zemin yüzeyine boşluksuz bir şekilde uygulanması ve yüzeyi tamamen kaplaması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek için yüzeyin taranması ve eğer elik hasır varsa, elik hasırın zemin yüzeyine çok yakın yerleştirilmesi, erken prizlenmenin olması için gerekli kimyasal hızlandırıcıların kullanılması ve doğru makine ile uygulanma yapılması gerekmektedir (Resim 7.6).



Resim 7.6. Robot kollu püskürtme beton makinası (Hasançelebi Malatya)

Püskürtme beton uygulama kuru ve yaş karışım olarak ikiye ayrılır.

Kuru karışım; Çimento ile agrega hava yoluyla karıştırılıp çıkış ağzında suyla karıştırılarak uygulanır. Kuru karışım, farklılık gösteren her duruma kolayca uyarlanabilmesi, yaş yüzeylere pratik bir şekilde uygulanmasından dolayı tercih edilir.

Yaş karışım; Çimento, agrega ve su karıştırılarak hortuma gönderilir ve çıkış ağzında prizlenmesini çabuklaştırmak için gereken katkı maddesi kimyasal dahil olarak uygulanır. Islak karışımın tercih edilmesinin en önemli nedenleri; uygulanırken gradasyonun korunması, püskürtme beton kaybının az olması, toz oranının az olması ve karışımın kontrol edilebilir olmasıdır.

Püskürtme beton agregası, normal betonarme betonunkinden farklılık göstermektedir. Püskürtme beton uygulamasında 16 mm'den büyük dane büyüklüğünde agrega kullanılmayarak, dane büyüklüğü, kullanılan robotun hortum çapının 1/3'ünden büyük olmamalıdır. Püskürtme betonda kullanılacak agregaların granülometresi Tablo 7.2'ye göre uygun olmalıdır.

Tablo 7.2. Agrega için önerilen dane büyüklüğü dağılımına ait değerler

Elek Boyutu	%Gecen (Ağırlıkça kümülatif)	
	Min.	Maks.
(mm)		
16,0	100	100
8,0	90	100
4,0	73	100
2,0	55	90
1,0	37	72
0,5	22	50
0,250	11	26
0,125	4	12
0,063	<2	

Kullanılacak Çimento TS EN 197-1 standardına uygun özellikte olmalıdır. Çimento miktarı; kullanılan agreganın D_{max} , durabilite ve minimum çimento dozajı nenenleriyle, kuru sistemde 350 kg/m^3 'ten, yaş sistemde ise 400 kg/m^3 'ten az olmamalıdır. Farklı özel uygulamalarda idare onayı ile bu miktarlar değiştirilebilir. Çimento miktarı, kuru ve yaş sistemde 500 kg/m^3 'ten fazla olmamalıdır. Betonda aranan özelliklerin 500 kg/m^3 ile sağlanması halinde çimento tipinin değiştirilmesi tartışılabilir.

Yukardaki kriterlere bağlı kalarak bu projede kullanılmak üzere hesaplanan Püskürtme Beton sınıfı C20/25'dir. Bu bağlamda beton karışım hesap raporu Tablo 7.3'de verilmiştir. Beton karışım hesabı TS-500 ve TS-802' ye göre yapılmıştır. Malzeme miktarları, numunelerin kuru yoğunluklarına göre hesaplanmıştır. Belirtilen su miktarı, karma (yoğurma) suyudur. T2 Tüneli Sol Tüp Üst Yarı KM:88+750,00'da kullanılan püskürtme betonuna ait Proktor Penetrometre ve Basınç Dayanım deneylerine ait sonuçlar Tablo 7.4'de gösterilmiştir.

Tablo 7.3. Pükürtme beton karışım hesap raporu (C20/25)

1.KULLANILAN MALZEMELER VE BETONUN ÖZELLİKLERİ		BİRİM	AÇIKLAMALAR	2. AGREAGANIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ		
SU	Karayolları 8. Böl.Müd.sondaj suyu			kg	205	Agreganın cinsi ve Menşegi
ÇİMENTO	Elazığ Seza CEM I PÇ 42.5 R	kg	456	Tane Sınıfı (mm)	0-5mm	5-12 mm
İNCE AGREGA	Kılıç Tuğla Kırmataş (0-5mm)	kg	1374	Kuru mlz. hacim özgül ağırlığı	2,67	2,71
İRİ AGREGA	Kılıç Tuğla Kırmataş (5-12 mm)	kg	242	Doygun yüzey kuru mlz. Hacim özgül ağırlığı	2,71	2,72
KATKI	ARKİM H-40	kg	6,84	Su emme 24 saatlik (%)	1,44	0,56
		%	1,5			
KULLANILACAĞI YAPI ELEMANI		PÜSKÜRTME BETONU TÜNEL		ELEKLER (mm)	AĞIRLIKÇA GEÇEN %	
BETON SINIFI			C20/25	16		100
SLUMP (çökme)		cm	16	11,2		100
SU/ÇİMENTO ORANI		-	0,45	8	100	64
TAZE BETON YOĞUNLUĞU		kg/m³	2,339	4	96	26
BASINÇ DAYANIMLARI				2	60	4
BETON SINIFI		N/mm²	C20/25	1	34	
		(MPa)		0,5	22	
ŞARTNAME Lab.Marjlı (KAROT)		“	20,5	0,25	13	
7 Günlük	(a= 15 *15*15 cm lik Küp)	“	41,3	0,15	10	
28 Günlük	(a= 15 *15*15 cm lik Küp)	“	47,3	0,063	2	

Tablo 7.4. T2 tüneli sol tüp üst yarı km: 88+750, 00 püskürtme betonda proktor penetrometre ve basınç dayanım testi

NUMUNE ALIŞ TARİHİ	26.07.2017						ÇİMENTO TİPİ VE DOZU			ELAZIĞ SEZA ÇİM CEM I 42,5R 456 kg			
Numunenin Alındığı Yer	T2 TÜNELİ SOL TÜP ÜST YARI KM:88+750,00						BETON SANTRALI			ŞANTIYE BETON SANT.			

PROKTOR PENETROMETRE TESTİ													
OKUMALAR											ORTALAMA - ŞARTNAME		
2 dk. sonra	270	280	280	290	300	310	320	330	340	350	360	312	>260 N
5 dk. sonra	370	380	380	390	400	410	420	430	430	440	450	409	>380 N
10 dk sonra	470	480	490	500	510	520	530	540	540	550	560	517	>450 N

BASINÇ DAYANIM TESTİ													
1 GÜNLÜK (KAROT 100x100 mm)					7 GÜNLÜK (KAROT 100x100 mm)				28 GÜNLÜK (KAROT 100x100 mm)				
Karot Alanı	Kırım Tarihi	Karot Yaşı	Kırılma Yükü (F)kgf	Basınç Dayanımı (P1=F/A) N/mm2	Kırım Tarihi	Karot Yaşı	Kırılma Yükü (F)kgf	Basınç Dayanımı (P1=F/A) N/mm2	KIRIM TARİHİ	KAROT YAŞI	Kırılma Yükü (F)kgf	Basınç Dayanımı (P1=F/A) N/mm2	
78,5	27.07.2017	1 gün	111	14,1	1.08.2017	7 gün	158,6	20,2	22.08.2017	28 gün	211	26,9	
78,5			101,2	12,9			150	19,1			208	26,5	
78,5			99,6	12,7			156	19,8			212	27,0	
ORTALAMA ŞARTNAME MİN: 9,0				13,2	ORTALAMA ŞARTNAME MİN: 17,5				19,7	ORTALAMA ŞARTNAME MİN: 21,5			26,8

7.2.6. Kaya Bulonu

Kaya bulonları geçici tahkimatın en önemli elemanıdır ve zeminin içindeki ana kemerleşmeyi bulon sağlar. Diğer tahkimat elemanları olan hasır çelik, kafes iksa ve püskürtme beton işlemlerinin ardından tahkimat sistemlerinin tamamlayıcısı olarak uygulanır. Prizini alan püskürtme betonun ardından kazı cidarına çakılan bulonlar püskürtme betonun oluşturduğu kabuğun altındaki katmanlara oturmasını ve beraber çalışmalarını sağlar.

Tünel zemini kazı yapılmadan önce ilk gerilmelerin etkisindedir. Kazı yapıldıktan sonra gerilme ve deformasyonlar meydana gelir. Meydana gelen bu gerilmeler kayaların basınç gerilmesi yerine, çekme gerilmesi oluşturmaya zorlayarak, zeminin dokusunu bozmakla birlikte kayma direncini de azaltır. Bu durumu engellemek için bulon montajı yapılır. Bulonlar zeminin özelliklerine göre farklı yöntemlerle montalanmaktadır. Her zemin için de hesaplar yapıldıktan sonra farklı cins, boy ve ebatda bulonlar kullanılır.

7.2.6.1. SN Bulon

Çatlaklı bir yapıya sahip ama akıcılığı çok yüksek olmayan bir zemine sahip tünellerde yaygın olarak kullanılan kaya bulonudur (Resim 7.7.). Zeminin yapısal durumuna, kendi kendini tutabilme özelliklerine göre belirlenen aralıklarda jumbo gibi bir delici makineyle açılan deliklere (minimum 45 mm çapa sahip delikler) çimento ve su karışımından oluşan enjeksiyon yapılır. Enjeksiyonun ardından nervürlü çelikten imal edilmiş 3 – 5 m boyundaki 28 mm çapındaki SN bulonlar deliklere itilerek yerleştirilir.

Enjeksiyon delik içerisinde kuruduktan, sertleştikten sonra ucundaki somun ve plaka sıkılaştırılır. Bulonların kontrol metodu olan torklama işlemini gerçekleştirebilmek için bu şekilde enjeksiyonun prizini almasını beklemek gerektiği için SN bulon anında kullanılabilen bir tahkimat elemanı değildir.

7.2.6.2. PG Bulon

Genelde 28 mm çapında veya farklı çapa sahip olan ve yine nervürlü çelikten imal edilmiş PG bulonların boyları da farklı olarak gerektiği şekilde belirlenebilir. SN

bulonlardan farkı uygulamasındaki adımların sırasıdır. Ayrıca PG bulonlarda, bulon boyu kadar PVC boru kullanılır ve enjeksiyon bu borular aracılığıyla yapılır. Bulon yerleştirdikten sonra enjeksiyonların yapıldığı bulon tipidir. İlk olarak delikler açılarak bulonlar yerleştirilir, sonra enjeksiyon işlemi yapılır. Boşlukların tamamen dolmasınadikkat edilir. Kırıklı, çatlaklı zeminlerde uygulanabilir ancak killi, siltli yani yumuşak zeminlerde kullanımı tercih edilmez.

7.2.6.3. İBO Bulon

Tünel kazısı yapılan ortamda delik açıldığında bu delgi sağlam kalamıyorsa ve akıcılığı fazlaysa ibo bulonlar tercih edilmektedir. Yumuşak zeminlerde kullanılan bir tür bulondur. Maden ve tünel sektörünün vazgeçilmez ürünüdür

İbo bulon, iç kısmı boş, uç kısmında delici bir bit bulunan, dış kısmı yivli bir bulondur. Delme işlemini gerçekleştiren uçtaki bit'in türü ortamdaki kayaçların türüne göre uygun olarak seçilebilir. İbo bulonda delgi ve ankraj birlikte gerçekleştirilir. Yani delgi yapılırken bulon da zemin içine girer ve orada bırakılır. Bulon yerleştirildikten sonra ortasındaki boşluktan enjeksiyon yapılır.



Resim 7.7. SN bulon (Hasançelebi Malatya)

Enjeksiyon karışımı idare veya şantiye laboratuvarında hazırlanıp onaylı şekilde dizayn kullanılmaktadır. Her 40m³ enjeksiyon için bir setten az olmayacak şekilde standartlarda belirtilen kurallara göre test numuneleri alınarak, basınç dayanım testleri yapılır.3 günlük basınç dayanım değerleri: $f_{c \min} \geq 10,5$ MPa,7 günlük basınç dayanım değerleri: $f_{c \min} \geq 21$ MPa olmalıdır. Hazırlanan enjeksiyon raporu Tablo 7.5 ve tünelde kullanılan enjeksiyona ait deney sonuçları Tablo 7.6.’de gösterilmektedir.

Tablo 7.5. Enjeksiyon karışım hesap raporu

KULLANILAN MALZEMELER ve ÖZELLİKLERİ			BİRİM	MİKTARI
SU / ÇİMENTO ORANI			-	0,42
SU			kg	566,0
ÇİMENTO (Elazığ Seza CEM I PÇ 42.5 R)			kg	1347,0
KATKI (ARKİM H-40)			kg	18,9
VİSKOZİTE			sn	56,0
KULLANILACAĞI YAPI ELEMANI			UMBRELLA, BULON, SÜREN, KONTAK ENJEKSİYON	
AGREGA HACİM TAYİNİ				
CİNSİ	AĞIRLIK	ÖZGÜL AĞIRLIK	HACİM	
	kg	kg/m³	dm³	
ÇİMENTO	1347	3,100	434,5	
SU	566	1,000	565,7	
TOPLAM HACİM			1000	
KARIŞIM DİZAYNI 1m3				
BİRİM			kg/m3	
SU			566,0	
ÇİMENTO			1347,0	
KATKI			18,9	
TOPLAM			1931,9	

Tablo 7.6. T2 tüneli sağ tüp alt yarı km: 88+750, 00 bulon enjeksiyonu basınç dayanım testi

Uygulanan Yer				:T2 TÜNELİ SOL TÜP KM:88+750,00				Tarih: 27.07.2017			
Kalıp - Küp (cm)				: 5x5x5							
Kullanım Amacı				:Bulon Enjeksiyonu				Su / Çimento Oranı		0,42	
Enjeksiyon Uygulama Yeri Bilgileri		Küp Alım Bilgileri		Küp Kırım Bilgileri							
		Küp	Numune Alınma Tarihi	3 Günlük				7 Günlük			
				Tarih	Basınç		Tarih	Basınç			
					KN	Mpa		KN	Mpa		
T2 Tüneli Giriş Sol Tüp 118-119-120 Raund		5x5x5	27.7.2017	30.7.17	36	14,4	3.8.17	73,2	29,3		
		Şartname Min. Basınç Dayanımı ve Ortalama Sonuçlar		10,5	<	14,4	Mpa	21	<	29,3	Mpa

Bulonlama işleminde bulon, deliklerinin delinme ve hazırlanmasından sonra en geç 3 saat içerisinde deliklere yerleştirilmelidir. Bulon deliğinin çapı konulacak kaya bulonu manşonu çapından en az 10 mm daha büyük olmalıdır. Çakılan bulonların enjeksiyonları yapıldıktan sonra üzerinden en az 7 gün geçtikten sonra bu bulonlar üzerinde Çekme deneyleri yapılarak test edilmektedirler. Tünelde çakılan ilk 100 adet kaya bulonu arasından her bulon tipi için 5 er adet kalan bulonlardan da her 200 adet için 1 adet bulon test amacıyla seçilebilir. Uygulanacak test kuvveti test edilecek kaya bulonunun kopma yükünün % 80'inden az olmayacaktır. Test sonucunda uygun olmayan veya yerinden çıkan bulonlar yenilenecektir. Aksi onaylanmadıkça uygulanacak maksimum yük 250 KN olacaktır.T2 Tüneli Sol Tüpte yapılan çekme testi Tablo 7.7.'de verilmektedir.

Tablo 7.7. T2 tüneli sol tüp bulon çekme testi

BULON ÇEKME TESTİ							
PROJEADI	:	T-1 Tüneli	Bulon Cinsi ve Çapı	:	SN Q 28		
YER	:	Sol Tüp	Bulon Boyu	:	4 - 6 mt		
TARİH	:	20.08.2017	Çekme Mukavemeti	:	250 KN		
Uygulanacak Deney Kuvveti:					200 KN		
Şartname gereği kopma kuvvetinin % 80 ni uygulanmıştır.							
KM	BULON NO	Raund No	Uygulama Yüğü KN	Test Sonucu		NOTLAR	
				Başarılı	Başarısız		
88+623,53-88+624,33	3	17	200	x		ϕ = ...28.....mm	L = ...4.....m
88+623,53-88+624,33	2	17	200		x	ϕ = ...28.....mm	L = ...4.....m
88+623,53-88+624,33	5	17	200	x		ϕ = ...28.....mm	L = ...6.....m
88+623,53-88+624,33	6	17	200	x		ϕ = ...28.....mm	L = ...6.....m
88+623,53-88+624,33	14	17	200	x		ϕ = ...28.....mm	L = ...4.....m
88+628,33-88+629,33	8	22	200	x		ϕ = ...28.....mm	L = ...4.....m
88+628,33-88+629,33	16	22	200	x		ϕ = ...28.....mm	L = ...4.....m
88+628,33-88+629,33	3	22	200	x		ϕ = ...28.....mm	L = ...6.....m
88+628,33-88+629,33	5	22	200	x		ϕ = ...28.....mm	L = ...4.....m
88+628,33-88+629,33	6	22	200	x		ϕ = ...28.....mm	L = ...4.....m

7.3. T2 Tüneli Gerçekleşen Kazı - Destek Tipleri ve İmalatlar

Hasançelebi varyantı T2 Tüneli kazı çalışmaları sırasında ayna başında sınıflama, inceleme çalışmaları ile kazı ve destek tipleri belirlenerek tünel açma işlemleri gerçekleştirilmiştir. T2 Tüneli Sol tüp'te B3 %59.57, B2 İksalı % 32.46, C2 Portal % 4.2, B3 Portal % 3.72 ve Sağ Tüp'te B3 % 65.68, B2 İksalı % 18.18, C2 % 7.74, C2 Portal % 5.72, B3 Portal % 2.67 olarak gerçekleştirilmiştir. Toplamda Sol Tüp 344.28 metre, Sağ Tüp 367.08 metre desteklenmiştir.

Tünel imalatı sırasında gerçekleşen kazı miktarları ve kullanılan malzemelerin detayları Tablo 7.8'de gösterilmiştir. Kullanılan destek tipleri ve kilometreleri Tablo 7.9'da verilmiştir.

Tablo 7.8. Tünelde kullanılan malzeme miktarları

				SOL TÜP		SAĞ TÜP		TOPLAM
DESTEK SİSTEMLERİ	BULON	SN	4M	2542Ad.	10168m	2331Ad.	9324m	54352M
			6M	1760Ad.	10560m	3142Ad.	18852m	
		İBO	6M	384Ad.	2304m	524Ad.	3144m	
	SÜREN	1,5"	4M	353Ad.	1412m	655Ad.	2620m	8602M
			6M	159Ad.	954m	167Ad.	1002m	
		2"	4M			37Ad.	148m	
			6M	39Ad.	234m	322Ad.	1932m	
		ROBİT 3,5"	6M			50Ad.	300m	
	İKSA		ADET	281		331		612Ad.
PÜSKÜRTME BETON		M³	2418,529		2981,395		5399,924	
GERÇKELEŞEN KAZI MİKTARI		M³	30582,263		34048,757		64631,02	

7.3.1. Zemin Sınıfı ve Destek Tiplerinin Belirlenmesi

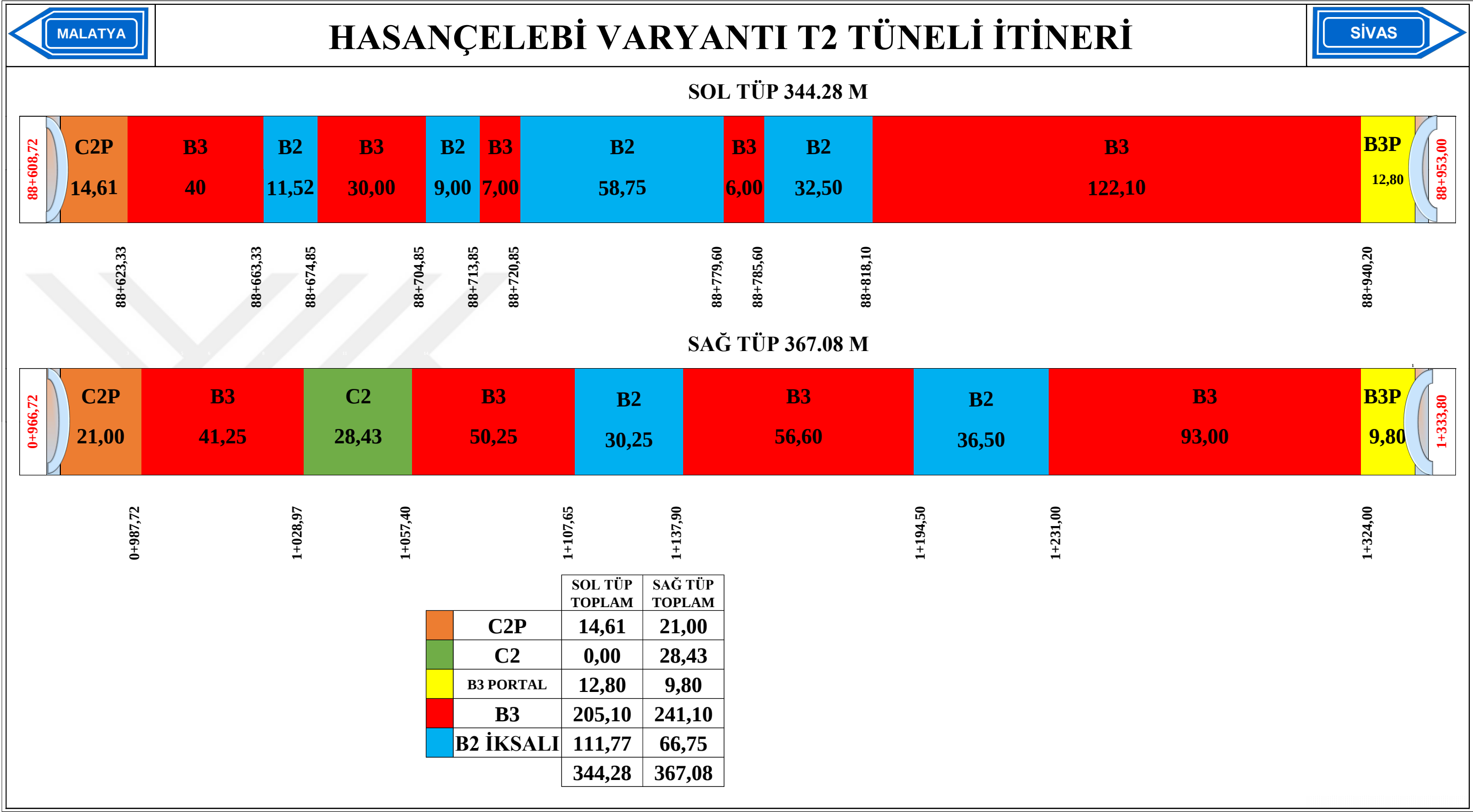
Tünel kazı aynasındaki kaya kütle ortamının Zemin sınıfı ve Destek Tiplerinin belirlenmesinde aşağıda belirtilen mühendislik özellikleri dikkate alınarak Kaya Kütle Kalitesi (Q) ve Kaya Kütle Sınıflaması (RMR) gibi sistemlere göre belirlenmektedir.

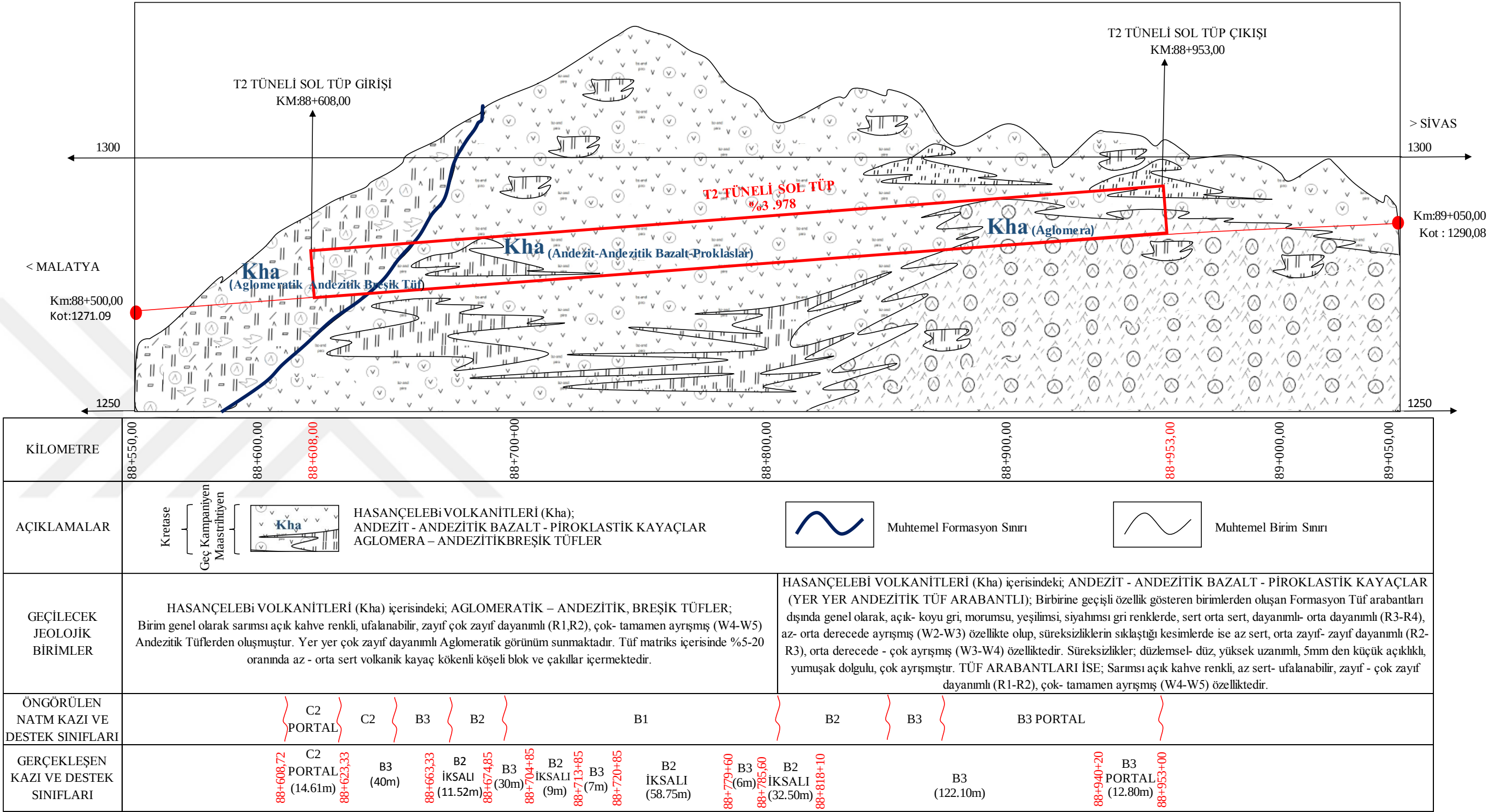
- Jeolojik birimlerin litolojisi, rengi, dış dokusu, çimentolanması ve dayanımlarının niteliksel olarak belirlenmesi

- Ana süreksizliklerin konumu (eğim/eğim yönü)
- Eklem takım sayısı
- Eklem aralıkları
- Eklem açıklıkları
- Eklem devamlılığı
- Eklem pürüzlülüğü
- Eklem dolgu malzemesinin cinsi ve özellikleri
- Ana süreksizlik sistemlerinin türü
- Fay(aktif, ölü, normal, yanal atımlı, ters)
- Eklem, çatlak, uyumsuzluk, tektonik makaslama niteliği
- Aynadaki sondaj verisi ile elde edilen RQD, tek eksenli basınç dayanımı, ayrışma, bozuşma, dayanım koşulları vb. mühendislik özelliklerinin niteliksel olarak belirlenmesi
- Su durumu

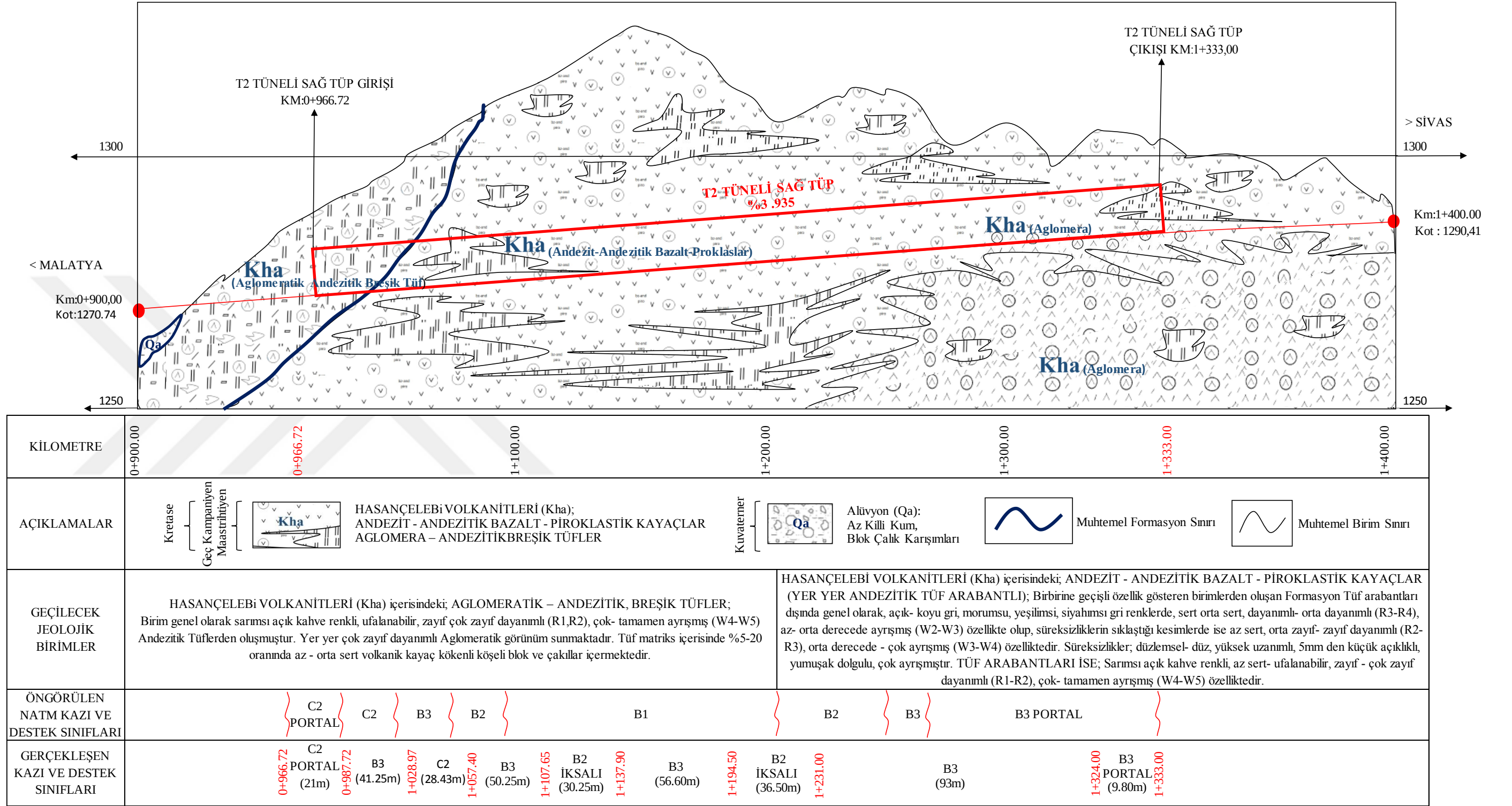
Bu özellikler kaya kütle davranışını yansıtmakta olup, kaya stabilitesini etkileyebilecek örtü kalınlığı, kazı kesitinin büyüklüğü, ilerleme adımı, kazı sırası, yer altı suyu, süreksizlik durumu ile jeoteknik ölçüm sonuçları vb. bazı dış faktörlerde dikkate alınarak Zemin sınıfı ve Destek tipleri belirlenmektedir. Aynı zamanda bu özelliklere bağlı olarak değişen zemin şartlarına göre, her ne kadar projede zemin sınıfları öngörülmüş olsada, T2 tüneline yerinde, ayna başında inceleme yapılarak; süreksizlikler incelenip gerekli ölçümler ve bilgileri, su durumu, eklem takım sayıları, dolgu türleri, RQD'nun belirlenmesi, aynadan alınan numuneler üzerinde laboratuvarında tek eksenli basınç deneyi ile dayanımı belirlenmesi vb. mühendislik özelliklerinin niteliksel olarak belirlenmesi ile zemin sınıfı ve destek tipleri belirlenmiştir. T2 Tüneli Giriş sol tüpte yapılan bir zemin sınıflamasına ait forum Ek-3 de verilmiş olup hazırlanan detaylı jeolojik profiller Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de gösterilmiştir.

Tablo 7.9. T2 tüneli itineri





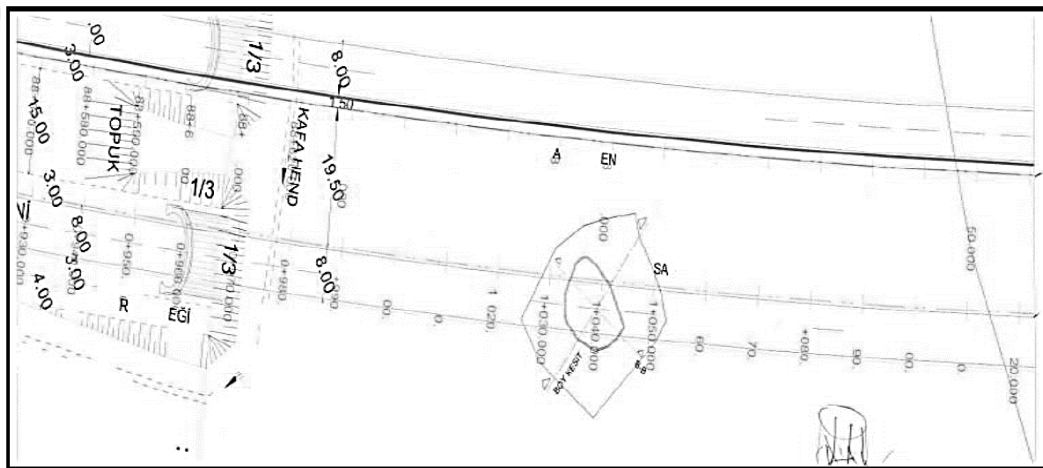
Şekil 7.7. T2 tüneli sol tüp jeolojik profil



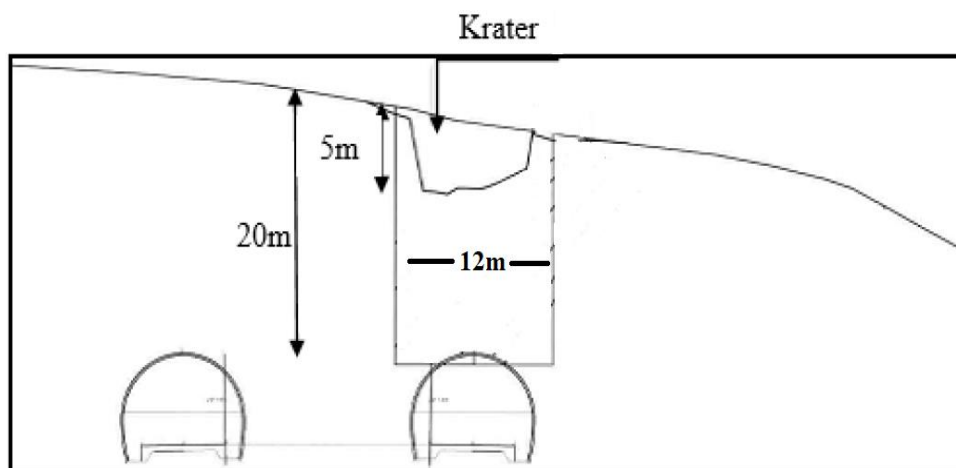
Şekil 7.8. T2 Tüneli sağ tüp jeolojik profili

7.4. Tünelde Meydana Gelen Göçük Problemi ve Çözüm Metodolojisi

Kazı çalışmaları sırasında T2 tünelinin sağ tüpünde Km:1+040 kesitinde (Sol Km:88+680) göçük meydana gelmiştir (Şekil 6.9). Göçük, sağ tüpün üst yarı kazısında 80. metresindeki aynasında önce küçük miktarda kütle akmaları daha sonra omuz bölgelerinde ani boşalma şeklinde meydana gelmiştir. Öncül akmaların tespit edilmesiyle birlikte gerekli tedbirlerin alınması sonucunda herhangi bir vahim kayıp yaşanmamıştır. Göçen tünel üstünde örtü kalınlığı 20 metredir. Göçük üstünde oluşan krater derinliği 5 metre genişliği ise 12 m x 10 m'dir (Şekil 6.10).



Şekil 7.9. Göçük konum planı



Şekil 7.10. Göçük kesiti

Göçük sonrasında tünel üzerinde oluşan kraterin hacmi ölçülmüş ve 600 m³ olarak belirlenmiştir (Şekil 7.8). Tünel ile krater tabanı arasında 15 metre yüksekliğinde oluşan baca, kısmi olarak gevşek malzeme ile doludur. Göçükle dökülen pasa malzemesi tünel içindeki kazı destek imalatı tamamlanmış üst yarı kesiminin 20 metrelik bölümünü doldurmuştur (Resim 7.9). Tahmini hacim hesaplamalarına göre tünel ile krater arasında yaklaşık olarak 400 m³ boşluğun var olduğu anlaşılmaktadır.



Resim 7.8. Sağ tüneli üstünde oluşan göçük krateri (Hasançelebi Malatya)



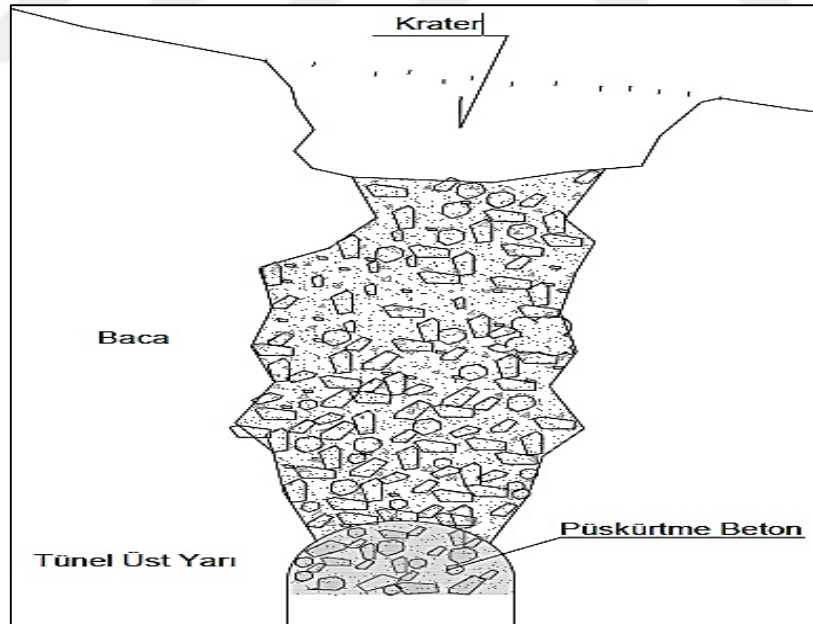
Resim 7.9. Tünel içi pasa birikimi (Hasançelebi Malatya)

Tünel üstünde yapılan gözlemlerde kraterin birkaç metre dışında da gerilme çatlaklarının varlığı tespit edilmiştir. Bu durum göçüğün genişleme potansiyeline işaret etmektedir. Göçük problemi sağ tüpte olmuştur. Sol tüpte ise herhangi bir deformasyon gözlenmemiştir. Sol tüp sert kaya birim içindedir. Göçen sağ tüp kaya ortamındaki ayrışma derecesi göreceli olarak daha fazladır. Bu durum sağ tüpün yan vadinin oluşturduğu yamaca yakın olması sol tüpün 20 metre daha uzak olması ile açıklanabilir.

Göçük probleminin çözüm metodolojisinin geliştirilmesi için iki esas yaklaşım bir arada benimsenmiştir. Birincisi; Tünel inşaatına güvenli ve risksiz bir şekilde devam edilebilmesi, İkincisi ise; Tünelin işletme aşamasında da kalıcı olarak stabil olmasıdır. Belirtilen her iki kriteri de sağlayan çözüm metodolojisine göre aşağıdaki işlemlerin sıralı olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Tünel İçine Boşalan Pasa Malzemenin Stabilite Güvenliğinin Yükseltilmesi:

Tünel içinde yaklaşık 1/1 şevle şekillenmiş pasa malzeme üzerine en az 30 cm kalınlığında püskürtme beton uygulanarak bloklar birleştirilecek ve ilave topuk desteği sağlanmıştır. Böylece kritik dengede olan pasa malzemenin denge durumu yükseltilmiştir (Şekil 7.11).



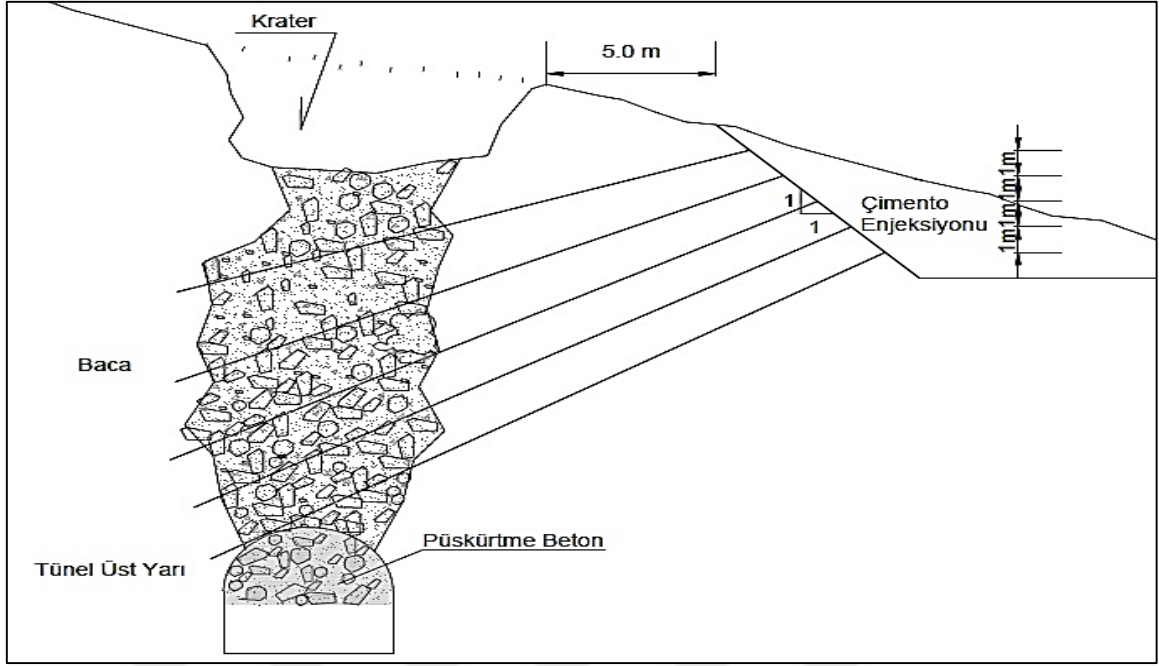
Şekil 7.11. Tünel içi pasa üzerine püskürtme beton uygulaması

Baca ve Krater Güvenliğinin Artırılması: Tünel üstü ile krater oluşumu arasında oluşan bacada var olan gevşek malzemeler çimentolu harç enjeksiyonu ile bağlanarak ortamın stabil hale getirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca var olan boşluklar aynı işlemle

doldurulmuştur. Bu amaçla tünel üstü krater ve yakın çevresinin kullanımı uygun olmayacağından, iş makinelerinin yakın bölgede çalışması sakıncalıdır. Ayrıca sol tüp üst yarıda da patlayıcı kullanımlı çalışma belli bir süre yapılmamıştır. Enjeksiyon uygulaması için kendi delen ortası delikli İBO bulon tercih edilmiştir. İBO bulon uzunlukları sağtüp tünel eksenini en az 7.5 metre geçecek şekilde uygulanmış ve enjeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra yerinde donatı olarak bırakılmıştır. Uygulanan enjeksiyon basıncı ve harç dizaynı yerinde yapılacak denemelerin sonucuna göre tespit edilmiştir ve çimento/su oranı 0,45 olarak belirlenmiştir. Enjeksiyon delgileri ışınal olarak tünel üstü ile krater arasındaki bölgeyi hedefleyecek şekilde yapılmıştır. Enjeksiyon işlemi tünelin son 30 metrelik uzunluğu dikkate alınarak ortalama 150 delgi vasıtasıyla yapılmış ve toplamda 1009 m³ enjeksiyon kullanılmıştır. Kullanılan İBO Bulon ve enjeksiyon miktarları Tablo 6.10.'da verilmiştir. Delgi ve enjeksiyon işlemi alttan yukarı doğru ve şaşırtmalı yapılmıştır (Şekil 7.12)

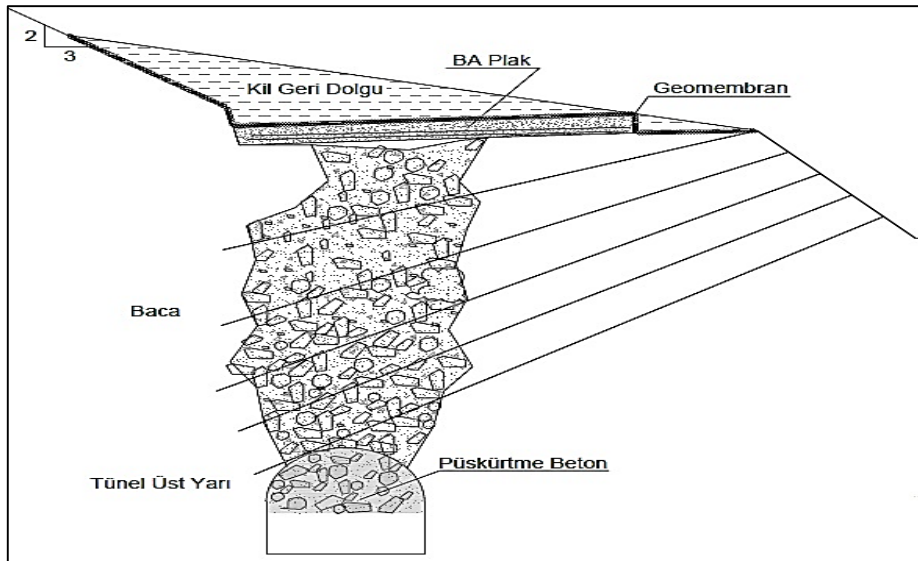
Tablo 7.10. Göçük delgi ve enjeksiyon icmali

ENJEKSİYON SIRASI	TOPLAM ENJEKSİYON (m ³)	TOPLAM İBO BULON (m)
A	235,6	480
B	38,1	540
C	75,55	565
D	523,4	576
E	136,35	486
GENEL TOPLAM	1009	2647



Şekil 7.12. Çimento enjeksiyonu

Kraterin Tanzimi : Enjeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra tünel üstündeki krater bölgesi düzenlenmiştir. Öncelikle göçük ve çevresinde 3-5 metre derinliğinde sıyırma kazısı yapılmış yük hafifletilmiştir. Kraterde kalan boşluklar grobeton ile doldurularak kapatılmıştır (Şekil 6.13 - Resim 7.10. - 7.11).



Şekil 7.13. Krater tanzim kazısı ve geri dolgu



Resim 7.10. T2 tüneline ait uydu görüntü (URL-9)



Resim 7.11. Krater yüzeyinin grobetonla kapatılması (URL-9)

Pasa Temizliği ve Tünel İmalatı: Tünel dışında yapılan işlemlerin başarısından ve güvenliğinden emin olunduktan sonra tünel içi imalatlara başlanmıştır. Pasa malzeme kaldırılmadan önce omuzlar dahil olmak üzere tünel üstüne şemsiye formunda delgiler vasıtasıyla çimento enjeksiyonu yapılmıştır. Bu işlem her tünel ilerleme adımında devam edmiştir. Ön kısmın güvenliği sağlandığından emin olunduktan sonra pasa kaldırma işlemine 80 cm ilerleme adımları ile devam edilmiştir, 80 cm ara mesafe ile I180 profil iksa yerleştirilerek C2 kazı destek sınıfının gerekleri uygulanmıştır. İhtiyaç duyulan yerlerde Umbrelle Arc uygulanarak ilerleme sağlanmıştır. Tariflenen kontrollü ilerleme sistemi göçük bölgesini en az 15 metre geçilene kadar uygulanarak emniyet artırılmıştır.



8. SONUÇLAR

Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli (88+608.00-88+953.00) güzergâhının zemin özellikleri araştırılarak, projelendirmek için gerekli zemin parametrelerin ortaya konulmasına yönelik olarak jeolojik-jeoteknik çalışmalar gerçekleştirilmiştir, bölgenin genel jeolojisi araştırılmış, proje üzerinde çalışmalar yapılmış ve yorumlanmıştır.

Tünel zemin sınıfları ve destek tipleri belirlenmiştir. Bu sınıflandırmalar incelenerek ve doğruluğu karşılaştırılmıştır ve sınıflamalara bağlı olarak çeşitli destekleme tipleri belirlenebilmekle birlikte, karışıklığa yol açmamak ve bütünsellik sağlanması amacı ile tünel kazıları için NATM kaya sınıflamasına karşılık birincil destek tipleri kullanılmıştır. Kullanılan bu destek tiplerinde ve ilerleme mesafeleri hakkında gerekli bilgi verilmiştir. Projede önerilen destekler ile yerinde yapılan uygulamalar karşılaştırılmıştır. Mühendislik jeolojisi uygulamalarının tünel açma yöntemleri ile ilişkisi anlatılmıştır. Tünelde karşılaşılan sorunlar hakkında çözümler üretilmiş ve yorumlanmıştır.

T2 Tüneli kazı çalışmaları ortalama 210 gün gibi kısa bir süre de tamamlanarak ışık görülmüştür. Toplamda Sol Tüp 344.28 m, Sağ Tüp 367.08 metre desteklenmiştir. Bu desteklemelerde; 8602 metre süren, 54352 metre bulon, 612 adet iksa, 5360 m³ püskürtme beton ve 64631 m³ kazı yapılmıştır.

Tünelcilik faaliyetler her geçen gün hızla büyümekte ve gelişmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda gerek projelendirme gerekse imalat aşamasında güncel teknik ve yöntemlerden her aşamada faydalanılarak, yerinde sonuca odaklı olarak uygulanması en kolay ve ekonomik bir şekilde ilerlemeler fayda sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Aslan, V.** 1971. Malatya İli Hekimhan İlçesi Güzelyurt, Yukarı Selimli, Sincanlı Boğazı ve Sarıkız Köyleri Arasında Kalan Alanın Jeoloji Raporu. MTA, Rapor No: 4897, Ankara.
- Atabey, E., vd.** 1994. Gürün, Kangal (Sivas) ve Darende, Hasançelebi (Malatya) Arasının Jeolojisi. MTA, Rapor No: 9760, Ankara.
- Atakan, E.,** 2010. İstanbul (4.Levent-Haciosmanarası) Metro Tünelindeki Mühendislik Uygulamaları, *Yüksek Lisans Tezi* Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 139s.
- Ayan, T.** 1961. Malatya Kuzeyindeki Hekimhan-Ebreme Köyü Bölgesinin Detay Jeolojisi ve Petrol İmkanları. MTA, Rapor No: 4186, Ankara
- Ayyıldız, T., vd.** 2009. Malatya Havzası Kuzey Bölümünde Üst Kretase (Mestrihtiyen)–Paleosen Sınırında Evaporit Oluşumları, Doğu Anadolu, Türkiye, 62. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı, s. 118, Ankara
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J.,** 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6, 189-239.
- Beyazpirinç. M., vd.** 2010. Doğu Torosların Jeodinamik Evrimi (Sivas-Malatya-Kahramanmaraş-Kayseri), MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Derleme Servisi Rapor No: 11331., Ankara.
- Bozkurt, M.,** 1983. Tüneller Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- Bulut, C.** 1962. Malatya Bölgesi K39c4 Paftasına Ait Detay Jeoloji Etüdü ve Asfalt Zuhurları Raporu. MTA, Rapor No: 4433, Ankara.
- Bulumenthal, M.** 1937. Şarki Toros Mıntıkasında Hekimhan-Hasançelebi-Kangal İrtifasında Jeolojik Araştırmaları. MTA, Rapor No: 570, Ankara.
- Bieniawski, Z. T.,** 1989. Engineering rock mass classification. Wiley, New York, 251 p.
- Çoban, A.** 1973. K39b3 Paftasının Jeoloji İncelemesi. MTA, Rapor No: 1190, Ankara.
- Çobankaya, M.** 2011. Hekimhan (Malatya) Yöresi Oligosen İstifinin Sedimentolojisi *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 101s.
- Çubuk, Y., Kırıl, N., Çelik, B., Üstün, H. ve Atalay, Z.** 2001. Kangal-Çetinkaya (Sivas) 78 ve Hasançelebi (Malatya) Yöresi Endüstriyel Hammadde Prospeksiyon Raporu. MTA, Rapor No: 10734, Ankara.

- Dalgıç, S.,** 1997. Tünellerde Tahmin Edilen İle Gerçekleşen Jeolojik Koşulların Karşılaştırılması.
- Derya, O.,** 2007. Tünellerde Zemin İyileştirilmesi Ve Stabilitenin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Plaxis Programında Analiz Edilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 121s.
- Erguvanlı, K.,** 1984. Mühendislik Jeolojisi Ders Konuları ve Uygulamaları, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- Gülbirivan, Ö.** 2009. Marmaray Projesi Mühendislik Jeolojisi Özellikleri, *YÜKSEK LİSANS TEZİ*, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 152s.
- Gürer, Ö. F.** 1992. Hekimhan-Hasançelebi (Malatya) Dolayının Jeolojik İncelemesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Hakyemez, Y. ve Örcen, S.** 1982. Medik-Ebreme Dolayındaki (Malatya Kuzeybatısı) Senozoyik Yaşlı Çökel Kayaların Stratigrafisi ve Sedimentolojisi. MTA, Rapor No: 4186. Ankara
- Halcrow, W.J.,** 1941. History of Tunnelling, Proc. I. Mech. E.,
- İzdar, K.E.** 1961. Kuluncak Bölgesi Jeolojisi ve Mineral Muhteviyatının Etüdü, MTA, Rapor No: 2933. Ankara.
- İzdar, K.E. ve Ünlü, T.** 1985. Hekimhan-Hasançelebi-Kuluncak Bölgesinin Jeolojisi. Ege Bölgeleri Jeolojisi VI. Kolloyumu, 303 - 330, 1985, İzmir.
- Jacobson, H.S.** 1971. Hekimhan-Hasançelebi Demir Sahasının Jeolojisi ve Maden Yatakları. MTA, Rapor No: 2256. Ankara.
- Kartun Müh. Müş. Tic. Ltd. Şti.,** Nisan, 2017. Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli Jeolojik-Jeoteknik Kesin Proje Raporu, Ankara, 208s.
- Kartun Müh. Müş. Tic. Ltd. Şti.,** Nisan, 2017. Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli Tünel Kesin Proje Raporu, Ankara, 213s.
- Kartun Müh. Müş. Tic. Ltd. Şti.,** Nisan, 2017. Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli Portal Kesin Proje Raporu, Ankara, 151s.
- Kartun Müh. Müş. Tic. Ltd. Şti.,** Haziran, 2017. Hasançelebi Geçişi Varyantı T2 Tüneli Göçük Problemi Çözüm Raporu Ankara, 13s.
- Ketin, İ.** 1959. Türkiye'nin orojenik gelişmesi. MTA Der. Ankara. - 1966, Anadolu'nun tektonik birlikleri. MTA Der. Ankara
- KGM,** Karayolları Teknik Şartnamesi 2013. Karayolları Vakfı, Ankara, 2013.
- Kurt, M.** 1972. Malatya K40a4 Paftasının Jeoloji Raporu. MTA, Rapor No: 4927. Ankara.

- Leo, .G.W.** 1971. Kuluncak-Sofular Sahasındaki (Malatya K39a1 ve K39a2 Paftaları) Mineral Kaynakları ve Jeoloji. MTA, Rapor No: 4907. Ankara.
- Özer, T., ve Kuşcu, A.E.** 1982. Malatya-Hekimhan-Deveci Demir Yatağı Jeoloji ve Rezerv Raporu. MTA, Rapor No: 7332, Ankara.
- Özgül, N.** 1976. Torosların Bazı Temel Jeolojik Özellikleri. TJK Bülteni, Ankara.
- Perinçek, D. ve Kozlu, H.** 1987. Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesindeki yanal atımlı faylar ile ilgili yeni gözlemler, Türkiye 7. Petrol Kongresi,
- Poldini, M.** 1936. Hasançelebi bölgesindeki manyetit yataklarının keşfi hakkında rapor. MTA Arş. NO. 472.
- Pisoni, C.** 1962. Malatya L39a2 Paftasının (ve Kısmen Malatya K39d3) Jeolojisi ve Petrol İmkanları. MTA, Rapor No: 4339, Ankara.
- Reşat U., Harun S.,** 2007 Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara 292s.
- Satıcı, Ö. Topal, T.** 2015, Tünel Açma Yöntemlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Sınıflama Sistemleri ile Değerlendirilmesi.
- Stchepinsky, V.** 1944. Malatya Bölgesinin Jeolojisi ve Mineral Varlıkları. MTA Dergisi, Ankara.
- Şengör, A. M. C. and Yılmaz, Y.** 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. Tectonophysics.
- Wirtz, D.** 1954. Malatya ve Tohma Suyu Çöküntü Bölgelerinin Jeolojik Löveleri Hakkında Rapor. MTA, Rapor No: 2364, Ankara.
- Yoldaş, R.** 1971. Malatya k40d1-d3-d4 Paftalarının Jeolojisi ve Petrol Olanakları. MTA, Rapor No: 4705, Ankara.
- Yıldızeli, N., vd.** 1987. Kangal, Alacahan (Sivas), Kuluncak (Malatya) Yöresinin Demir ve Jeoloji Raporu. MTA, Rapor No: 8176, Ankara
- Yılmaz, S., Boztuğ, D. ve Öztürk, A.** 1991. Hekimhan-Hasançelebi (KB Malatya) yöresinin stratigrafisi ve tektoniği. C.Ü. Müh. Fak. Dergisi, Seri-A, Yerbilimleri,
- Yılmaz, H., vd.** 1998. Hasançelebi (Hekimhan- Malatya) Batısının Jeolojisi, TDÇİ Adına Ücretli Çalışma Raporu. MTA, Ankara.
- Terzaghi, K.,** 1946. Rock defects and loads in tunnel supports, Rock tunneling with steel supports, The Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio,

- URL-1**, 2019 http://www.yukselproje.com.tr/wp-content/uploads/2017/03/File_0221_irfan_unal_IRF-Fullpaper-2.pdf Şubat 2019.
- URL-10**, 2019 <http://www.tunelteknolojisi.com/pdf/lermak-1433418388.pdf>. Şubat 2019.
- URL-2**, 2019 http://www.utyayk.org/files/Presentations/Day-211.45-12.0_Abdullah_Kursat-EROL.pdf Şubat 2019.
- URL-3**, 2019 <http://www.bakiacil.com/tunel-destekleme-elemanlari.html> Şubat 2019.
- URL-4**, 2019 https://aves.ktu.edu.tr/ImageOfByte.aspx?Resim=8&SSNO=16&US_ER=6939 Şubat 2019.
- URL-5**, 2019 <http://yollarfennisartnamesi.blogspot.com.tr/2015/12/tunel-tunnel-bu-baslk-altndan-tuneller.html> Şubat 2019.
- URL-6**, 2019, <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi> 1 Şubat 2019.
- URL-7**, 2019 https://webdosya.csb.gov.tr/db/destek/editordosya/1_3_2007_Deprem_Yonetmeligi.pdf Şubat 2019.
- URL-8**, 2019 <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionImages/KGMImages/Haritalar/b8.jpg> Şubat 2019.
- URL-9**, 2019 <https://earth.google.com/web/@38.95114422,37.89508823,1313.33837667a,399.43055595d,35y,101.47318323h,3.06239935t,0r> Şubat 2019.

EKLER

EK - 1 – Tünel tip enkesiti

EK - 2 – Tünel tip enkesiti (Taban Kemerli)

EK - 3 - Zemin Sınıflama Formu



ÖZGEÇMİŞ

Elazığ ilinde 1989 yılında doğmuştur. İlk ve ortaöğretimi yine Elazığ merkez okullarında tamamlamıştır. Elazığ Fırat Üniversitesi Süleyman Demirel Keban Meslek Yüksek Okulunda 2007-2009 yıllarında jeoteknik teknikerliği ön lisans bölümünü bitirmiştir. 2009 yılında DGS Sınavı ile Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği kazanıp 2011 yılında yatay geçişle Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği bölümüne geçiş yapıp 2013 yılında bölümünü bitirmiştir. 2014 yılında Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans programına başlamış olup eğitimine devam etmektedir. 2013 yılında mezun olduktan sonra Karayolları kontrollük teşkilatına bağlı olarak çalışan müşavir firması UBM’de Kalite Kontrol Müh. olarak halen çalışmaktadır.



EKLER