

**ZAYIF KAYA KÜTLELERİNDE TASARLANAN BİR
KARAYOLU TÜNELİNİN ÜÇ BOYUTLU NÜMERİK
ANALİZLERLE İNCELENMESİ (EVCİLER VARYANTI
TÜNELİ, BALIKESİR, TÜRKİYE)**

**INVESTIGATION OF A HIGHWAY TUNNEL DESIGNED
IN WEAK ROCK MASSES BY THREE DIMENSIONAL
NUMERICAL ANALYSES (EVCİLER VARIANT
TUNNEL, BALIKESIR, TURKEY)**

HANİFE BÜŞRA TUNCA PARLAR

PROF. DR. CANDAN GÖKÇEOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Değerli aileme ve çok sevgili eşime,

ÖZET

ZAYIF KAYA KÜTLELERİNDE TASARLANAN BİR KARAYOLU TÜNELİNİN ÜÇ BOYUTLU NÜMERİK ANALİZLERLE İNCELENMESİ (EVCİLER VARYANTI TÜNELİ, BALIKESİR, TÜRKİYE)

HANİFE BÜŞRA TUNCA PARLAR

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU

Ağustos 2024, 149 sayfa

Türkiye'nin jeolojik ve topografik yapısı, karayolu ulaşımında tünel ihtiyacını doğurmaktadır. Son yıllarda karayolu güzergahlarında yüksek yarmalardan kaçınılarak tünel alternatifi değerlendirilmektedir. Ancak tünel imalatının en önemli noktası doğru analiz ve doğru projelendirmedir. Gerekli arazi ve laboratuvar çalışmalarının ardından elde edilen verilerin analizlerinin doğru şekilde yapılması imalat aşamasında karşılaşılabilecek her türlü birim ve jeolojik yapı için doğru bir projelendirmeye yardımcı olur.

Tünel proje tasarımında en sık kullanılan analiz programları sadece iki boyutlu analiz yapımına imkan tanımaktadır. Bu da tünelin ve tünel açımının ortama etkisi nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Tünel imalatının sorunsuz şekilde tamamlanabilmesi, tünelin açılacağı ortamın jeolojik-jeoteknik özelliklerinin mümkün olan en doğru şekilde modellenmesine bağlıdır. Bu da elde edilen verilerin üç boyutlu modellenmesi ile sağlanmaktadır.

Bu çalışmada Balıkesir ilinin Edremit ilçesinde zayıf kaya kütlelerinde tasarlanan Evciler Varyant tünelinin üç boyutlu nümerik analizi yapılmıştır. Nümerik analizlerde FLAC 3D yazılımı kullanılmıştır. Analizlerin sonuçlarına göre tespit edilen deformasyon değerlerine uygun kazı destek sistemi tasarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tünel, Üç Boyutlu Model, Zayıf Kaya, Nümerik Analiz, Balıkesir
Danışman: Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji
Mühendisliği Bölümü

ABSTRACT

INVESTIGATION OF A HIGHWAY TUNNEL DESIGNED IN WEAK ROCK MASSES BY THREE DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSES (EVCİLER VARIANT TUNNEL, BALIKESİR, TURKEY)

HANİFE BÜŞRA TUNCA PARLAR

Master of Science, Department of Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU

August 2024, 149 pages

Turkey's geological and topographical structure, raises the need for road transport in the tunnel. In recent years, the tunnel alternative has been evaluated by avoiding high cuts on the highway routes. However, the most important point of tunnel construction is correct analysis and correct project planning. Correct analysis of the data obtained after the necessary field and laboratory studies helps to design an accurate project for any unit and geological structure that may be encountered during the manufacturing phase.

The most frequently used analysis programs in tunnel project design only allow two-dimensional analysis. This is insufficient due to the effect of the tunnel and tunnel opening on the environment. The trouble-free completion of the tunnel construction depends on modeling the geological-geotechnical characteristics of the environment in which the tunnel will be opened in the most accurate way possible. This is achieved by three-dimensional modeling of the data obtained.

In this study, three-dimensional numerical analysis of the Evciler Varyant tunnel designed in weak rock masses in Edremit district of Balıkesir province was performed. FLAC 3D software was used for numerical analysis. The excavation support system has been designed in accordance with the deformation values determined based on the analysis results.

Key Words: Tunnel, Three Dimensional Model, Weak Rocks, Numerical Analysis, Balıkesir

TEŞEKKÜR

Bilgisi, tecrübesi, ilgisi ve nezaketi ile en zor zamanlarda dahi yanımda olarak fikirlerimi ve çalışmalarımı şekillendiren, vizyonumu ve ufkumu genişleten, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU'na;

Tezimin çalışma bölgesine ait veri tabanının oluşturulmasında ve jeolojik raporların hazırlanmasında bilgi, kaynak ve önerilerini paylaşan, mesleki bilgi ve tecrübesini benimle paylaşarak tezimin şekillenmesi konusunda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Jeolojik Hizmetler Şubesi Müdürü Sayın Aydın DURUKAN'a;

Tecrübelerini ve bilgilerini benimle paylaşarak, desteğini esirgemeyen ve tezimin her aşamasında titizlikle tüm sorularıma cevap veren Ebu Bekir AYGAR'a;

Yüksek Lisans aşamasında bilgi birikimleriyle sorularıma cevap veren, desteklerini esirgemeyen Murat OKTAY'a, Sevda GÜNEY'e, Hüseyin DEMİRBİLEK'e ve Dr. Kürşat TOKGÖZOĞLU'na;

Sabır, sevgi ve özveri ile eğitim hayatımın her anında yanımda olan en büyük destekçim Annem Leyla TUNCA'ya ve aramızda olmasa da tüm hücrelerimde yaşamaya devam eden Babam Metin TUNCA'ya;

Tanıştığımız günden beri varlığıyla hayatımın her anını güzelleştiren, her türlü zorlukta varlığıyla bana destek olan, hayatı paylaşmaktan büyük mutluluk duyduğum sevgili eşim Yavuz Emre PARLAR'a ve tezimi hazırlama sürecinde dünyaya gelen canım kızım Güneş PARLAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÇİZELGELER.....	vii
ŞEKİLLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
1.2. Çalışma Alanının Özellikleri	2
1.2.1. İklim ve Bitki Örtüsü	8
1.2.2. Morfoloji	9
2. ÇALIŞMA ALANI JEOLJİSİ ve DAHA ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	11
2.1. Tünellerle Alakalı Daha Önceki Çalışmalar.....	11
2.2. Çalışma Alanı Jeolojisi.....	12
2.3. Stratigrafi.....	14
2.3.1. Hallaçlar Volkaniti	14
2.3.2. Yürekli Dasiti (Tmy).....	15
2.3.3. Şapçı Volkaniti (Tmş)	15
2.3.4. Soma Formasyonu (Tmso).....	16
2.3.5. Alüvyon (Qal)	16
2.3.6. Yamaç Molozu (Qym).....	17
2.4. Yapısal Jeoloji.....	18
2.5. Depremsellik	19
2.6. Hidrojeoloji	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Arazi Çalışmaları.....	23
3.1.1. Jeoteknik Amaçlı Sondaj Çalışmaları	23
3.2. Laboratuvar Araştırmaları	24
3.3. Kaya Kütlelerinin Jeolojik-Jeoteknik Özelliklerinin Tanımlanması	26
3.3.1. Kaya Kütleleri Sınıflama Sistemi - (RMR)	26

3.3.2. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI).....	27
3.3.3. Q Sınıflama Sistemi.....	29
3.3.4. Kaya Kütlesi İçin Deformasyon Modülü ve Sabitlerin Tespit Edilmesi	30
3.3.5. NATM (New Austrian Tunnelling Method) Sınıflama Sistemi.....	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	32
4.1. Arazi ve Laboratuvar Deneyleri.....	32
4.1.1. Sondaj Çalışmalarından Elde Edilen Veriler	32
4.1.2. Laboratuvar Deneylerinden Elde Edilen Değerler	33
4.1.2.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi	33
4.1.2.2. Nokta Yüğü İndeksi (I_{s50}).....	33
4.1.2.3. Tek Eksenli Basınç Dayanımı.....	34
4.2. Tünel Giriş Portal Bölgesi Parametrelerinin Seçimi.....	34
4.3. Kaya Kütle Sınıflama Sistemi (RMR).....	35
4.3.1. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI).....	39
4.3.2. Q Sınıflama Sistemi.....	41
4.3.3. Tasarıma Esas Parametreler	42
4.3.4. Kaya Malzeme Katsayısı (m_i).....	42
4.3.4.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c)	42
4.3.4.2. Birim Hacim Ağırlık (γ).....	42
4.3.4.3. Deformasyon Modülü (E_m).....	43
4.4. Tünel Eksen Parametrelerinin Seçimi.....	44
4.4.1. Kaya Kütle Sınıflama Sistemi (RMR).....	45
4.4.2. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI).....	48
4.4.3. Q Sınıflama Sistemi.....	50
4.4.4. Tasarıma Esas Parametreler	51
4.4.4.1. Kaya Malzeme Sabiti (m_i).....	51
4.4.4.2. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c)	51
4.4.4.3. Birim Hacim Ağırlık (γ).....	51
4.4.4.4. Elastisite Modülü (E_m).....	52
4.5. Tünel Çıkış Portal Bölgesi Parametrelerinin Seçimi	54
4.5.1. Kaya Kütle Sınıflama Sistemi (RMR).....	55
4.5.2. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI).....	58
4.5.3. Q Sınıflama Sistemi.....	60
4.6. Tasarıma Esas Parametreler	61

4.6.1. Kaya Malzeme Sabiti (m_i)	61
4.6.2. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c)	61
4.6.3. Birim Hacim Ağırlık (γ)	61
4.6.4. Elastisite Modülü (E_m)	62
4.7. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ve Destek Sistemi (NATM)	65
4.7.1. Birincil Destekleme Sistemi	66
4.7.2. Birincil Destekleme Sisteminde Kullanılan Elemanlar	66
4.7.2.1. Püskürtme Betonu	66
4.7.2.2. Çelik Hasır	66
4.7.2.3. Çelik İksa	67
4.7.2.4. Süren Boruları veya Demir Çubukları	67
4.7.2.5. Kaya Bulonları	67
4.7.3. İkincil Destekleme Sistemi	67
4.8. Tünel Kazısının Sayısal Modellemesi	68
4.8.1. Tasarım Yöntemi ve Esasları	68
4.8.2. Tünel Destek Sistemlerinin Analitik Çözümler ve Nümerik Analizler İle Belirlenmesi	68
4.9. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve FLAC Yazılımı	76
4.10. Analizlerin Değerlendirilmesi	87
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR	89
EKLER	92
EK-1. Tablolar	92
EK-2. Sondaj Logları	100
EK-3. Karot Sandık Fotoğrafları	116
EK-4. Laboratuvar Deney Sonuçları	128
ÖZGEÇMİŞ	131

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Sondajlarda karşılaşılan yeraltısuyu seviyeleri.....	21
Çizelge 3.1. Çalışmaya konu alanda gerçekleştirilen arazi ve laboratuvar deneyleri.....	22
Çizelge 3.2. Açılan sondaj kuyuları özet tablosu.....	23
Çizelge 3.3. Sondaj kuyularından elde edilen deney sonuçları.	25
Çizelge 3.4. GSI Sınıflama Sistemi Diyagramı [24].	28
Çizelge 4.1. Açılan sondajlara ait Ortalama TKV ve Ortalama RQD değerlerinin gösterir özet tablo.....	33
Çizelge 4.2. Nokta Yüğü Dayanımı Testi Sonuçları.....	34
Çizelge 4.3. Giriş Portal Bölgesi için RMR Kaya Kütle Sınıflandırma Sistemi [30].....	37
Çizelge 4.4. RMR Puan durumuna göre kaya kütle sınıfları.	38
Çizelge 4.5. RMR Puan durumuna göre tahmini kaya kütle sınıfları parametreleri.	39
Çizelge 4.6. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) diyagramı vasıtasıyla parametrelerin belirlenmesi [23].....	40
Çizelge 4.7. Eksen Bölgesi için RMR Kaya Kütle Sınıflandırma Sistemi [33].	47
Çizelge 4.8. RMR Puan durumuna göre kaya kütle sınıfları.	48
Çizelge 4.9. RMR Puan durumuna göre tahmini kaya kütle sınıfları parametreleri.	48
Çizelge 4.10. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) diyagramı ile parametrelerin atanması [23].....	49
Çizelge 4.11. Çıkış Bölgesi için RMR Kaya Kütle Sınıflandırma Sistemi [33].....	57
Çizelge 4.12. RMR Puan durumuna göre kaya kütle sınıfları.	58
Çizelge 4.13. RMR Puan durumuna göre tahmini kaya kütle sınıfları parametreleri.	58
Çizelge 4.14. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) diyagramı ile parametrelerin belirlenmesi.....	59
Çizelge 4.15. Tünel giriş, eksen ve çıkış kesimleri tasarıma esas özet parametreler.....	64
Çizelge 4.16. Tünel kesimlerine ait elde edilen parametreler.....	64
Çizelge 4.17. Kapalı sistem eşitlikleri (<i>Hoek ve Brown 1980; Hoek, 2012</i>)	68
Çizelge 4.18. Tahkimat kapasite formülleri (<i>Hoek ve Brown 1980; Brady ve Brown, 1985</i>).....	70
Çizelge 4.19. C2 sınıfı destek sistemi detayları.....	72
Çizelge 4.20. Destek Sistemi Basınçları.....	72
Çizelge 4.21. Analitik çözüm sonuçları.	72

Çizelge 4.22. C2 sınıfı destek sistemi detayları	74
Çizelge 4.23. Destek sistemi basınçları.....	74
Çizelge 4.24. Analitik çözüm sonuçları.	74
Çizelge 4.25. Püskürtme betonunda kullanılan parametreler.	77
Çizelge 4.26. İç kaplama betonunda kullanılan parametreler.	77
Çizelge 4.27. Süren parametreleri	77
Çizelge 4.28. Zemin parametreleri giriş kesimi	79
Çizelge 4.29. Zemin parametreleri çıkış kesimi.....	79

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Çalışmaya konu alanın Karayolları haritasındaki gösterimi [2].	3
Şekil 1.2. Çalışmaya konu alanın Google Earth uygulaması üzerinde gösterimi [3].	4
Şekil 1.3. Tünel tip kesiti [1].	4
Şekil 1.4. Sol tüp jeolojik profil [1].	6
Şekil 1.5. Sağ tüp jeolojik profil [1].	7
Şekil 1.6. Balıkesir İlinin 1938 - 2020 yılları arası; ortalama minimum ve maksimum sıcaklık değerlerine ait grafik [5].	8
Şekil 1.7. Balıkesir ilinin 1938-2020 yılları arası aylık yağış miktarları [5].	9
Şekil 1.8. Çalışma alanının morfolojik durumunu gösteren, güneybatıdan bakış açısıyla alınmış üç boyutlu uydu görüntüsü [6].	10
Şekil 1.9. Çalışma alanında D-B doğrultulu, morfolojiyi gösterir 2 boyutlu kesit [6].	10
Şekil 2.1. Çalışmaya konu alanın ve yakın çevresinin 1:25.000 ölçekli MTA haritasındaki konumu.	14
Şekil 2.2. Çalışmaya konu alanın ve çalışma alanının yakınının stratigrafik kolon istifi.	18
Şekil 2.3. Çalışmaya konu alanın ve yakın çevresinin MTA 1/2500000 ölçekli Balıkesir (NJ 35-3) paftası diri fay haritasındaki konumu [13].	19
Şekil 2.4. Çalışma alanının Türkiye deprem tehlikesi haritasındaki konumu [14].	20
Şekil 2.5. Çalışmaya konu alanın Türkiye deprem haritasındaki konumu ve yer ivmesi değeri [14].	20
Şekil 2.6. İnceleme alanında yakın tarihte meydana gelen depremlerin gösterimi [15].	21
Şekil 3.1. Sondajlardan elde edilen numunelerin karot sandığına dizilmiş görüntüsü [1].	24
Şekil 3.2. Q Sistemi için revizyona uğramış tünel desteği sistemi diyagramı [27].	30
Şekil 4.1. Evciler Tüneli giriş kesimi uzaktan görünümü.	35
Şekil 4.2. SK-5 ve SK-6 için kaya malzemesi dayanım puanları	36
Şekil 4.3. SK-5 ve SK-6 için RQD (%) puanı.	36
Şekil 4.4. SK-5 ve SK-6 için süreksizlik aralığı (mm) puanları.	37
Şekil 4.5. Abaktan elde edilen GSI değeri D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.	43

Şekil 4.6. Rezidüel GSI değeri ve D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.....	44
Şekil 4.7. SK-7 sondajı 30.00-45.00 m arası karot sandığı görünümü [1].....	45
Şekil 4.8. SK-7 için kaya malzemesi dayanım puanları.....	46
Şekil 4.9. SK-7 için RQD (%) puanı.....	46
Şekil 4.10. SK-7 için süreksizlik aralığı (mm) puanları.....	46
Şekil 4.11. Abaktan elde edilen GSI değeri ve D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.....	52
Şekil 4.12. Rezidüel GSI değeri ve D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.....	53
Şekil 4.13. Abaktan elde edilen GSI değeri ve D=0.6 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.....	53
Şekil 4.14. Rezidüel GSI değeri ve D=0.6 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.....	54
Şekil 4.15. SK-9 Sondajı 12.00-26.00m arası.....	54
Şekil 4.16. Çıkış kesiminde gözlemlenen Yürekli Dasiti'ne ait mostralara.....	54
Şekil 4.17. SK-8 ve SK-9 için kaya malzemesi dayanım puanları.....	55
Şekil 4.18. SK-8 ve SK-9 için RQD (%) puanı.....	56
Şekil 4.19. SK-8 ve SK-9 için süreksizlik aralığı (mm) puanları.....	56
Şekil 4.20. Abaktan seçilen GSI değeri ve D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.....	62
Şekil 4.22. Tünel boyuna deformasyon eğrisi-C2 sınıfı (Giriş kesimi).....	72
Şekil 4.23. Zemin karakteristik eğrisi ve plastik zon yarıçapı.....	73
Şekil 4.24. Zemin-destek reaksiyon eğrileri.....	73
Şekil 4.25. Tünel boyuna deformasyon eğrisi-C2 sınıfı (Giriş kesimi).....	75
Şekil 4.26. Zemin karakteristik eğrisi ve plastik zon yarıçapı.....	75
Şekil 4.27. Zemin-destek reaksiyon eğrileri.....	76
Şekil 4.28. FLAC 3D ile oluşturulmuş olan nümerik analiz modeli.....	79
Şekil 4.29. Üst yarı, alt yarı ve invert kazı kademeleri.....	80
Şekil 4.30. Destek sistemi elemanları.....	80
Şekil 4.31. Düşey deformasyon.....	81
Şekil 4.32. Boyuna deformasyon.....	82
Şekil 4.33. Yatay yer değiştirme.....	83
Şekil 4.34. Düşey yer değiştirme.....	84

Şekil 4.35. Boyuna yer değiştirme.....	85
Şekil 4.36. Yatay yer değiştirme	86

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	Malzeme Sabiti
c	Kohezyon
Ei	Kaya malzemesinin elastisite modülü
Em	Kaya kütlesinin deformasyon modülü
F	Güvenlik Katsayısı
σ	Normal Gerilme
σ_c	Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanım
σ_1'	Eksenel Gerilim
σ_3'	Yanal Basınç
Φ	İçsel sürtünme açısı
γ	Birim hacim ağırlık
θ	Derece

Kısaltmalar

cm	Santimetre
m	Metre
GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi
Is	Nokta Yüğü Dayanım İndeksi
Is(50)	50 mm çapında örnek için Nokta Yüğü Dayanım İndeksi
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniğı Birliğı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
kN	Kilo Newton
LL	Likit Limit
MPa	Megapascal
mi	Hoek-Brown kaya sabiti değeri
mm	Milimetre

PI	Plastisite İndeksi
PL	Plastik Limit
RMR	Kaya Kütle Sınıflama Sistemi
RQD	Kaya kalite göstergesi
UCS	Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı
TKV	Toplam Karot Verimi
SK	Sondaj Kuyusu
SPT	Standart Penetrasyon Testi

1. GİRİŞ

Nüfus artışı, teknolojiye yaşanan gelişmeler ve buna bağlı olarak toplumun artan ihtiyaçları beraberinde bazı gereksinimler doğurmaktadır. Otomotiv sektörünün gelişmesine bağlı olarak trafikteki artan araç sayısı ve insanların konforlu seyahat ihtiyacı standartları yüksek, gelişmiş karayolu ağına gereksinimi arttırmıştır. Karayolu inşası için özellikle son zamanlarda ülke ekonomisinden büyük kaynaklar ayrılmaktadır.

Ülkemizin coğrafik yapısı, jeolojik geçmişi düşünüldüğünde genç ve engebeli bir morfolojik yapıya sahiptir. Karayolu güzergah tasarımında yolun kullanım amacına göre standartları ve bu standartta olması için sahip olması gereken bazı özellikler vardır. Mevcut topografik yapıda ve istenen standartlarda tasarlanan ulaşım yollarında dolgu ve yarma kesitlerinin yanı sıra tünel, viyadük, köprü vb. sanat yapıları gereksinimi doğurmaktadır. Engebenin çok olduğu yerlerde uzun tülde yüksek yarma kesitleri ortaya çıkmaktadır. Uzun tülde yüksek şevli yarma teşkilinin zorluğu zaman içerisinde bir sanat yapısı olan tünel ihtiyacını doğurmuştur. Tünel imalatı için, tünelin açılacağı ortam hakkında proje aşamasında doğru ve eksiksiz arazi, laboratuvar ve büro çalışması gerekmektedir. Arazi ve büro çalışmalarından elde edilen verilerle doğru analiz yaparak imalat aşamasında karşılaşılabilecek ortamla çok benzer bir durum ortaya konmalıdır. Mühendisliğin genel ilkeleri olan güvenilir, ekonomik ve uygulanabilir çözümler üretebilmek için doğru analizler yapılması büyük önem taşımaktadır.

1.1. Çalışmanın Amacı

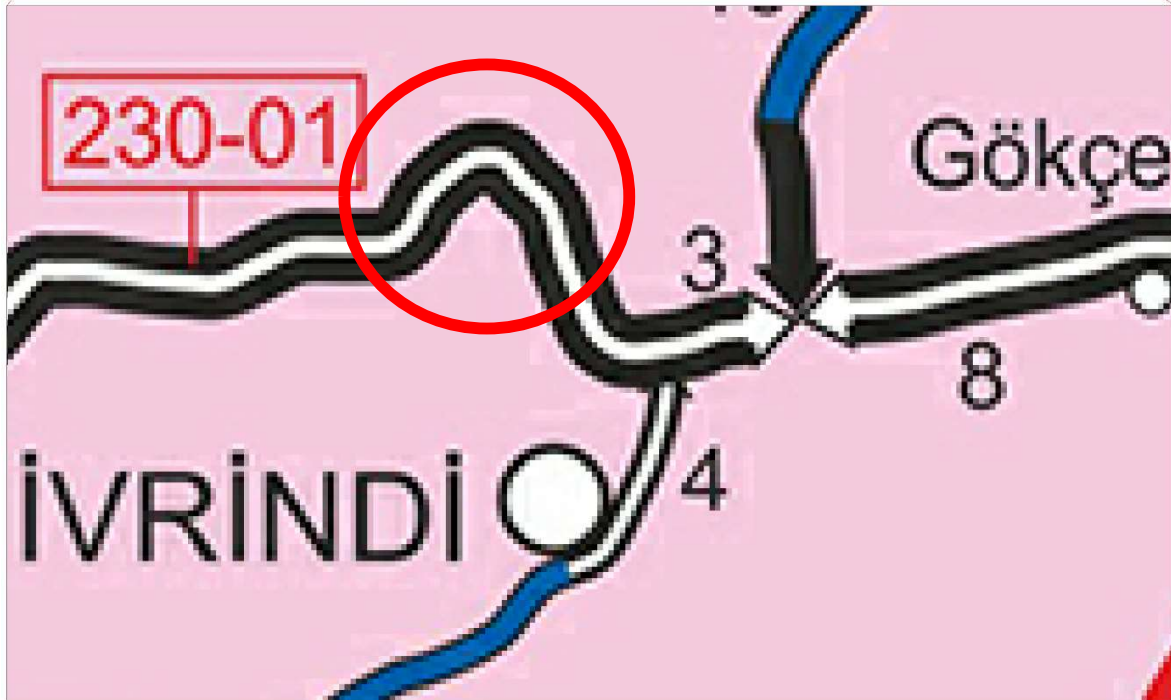
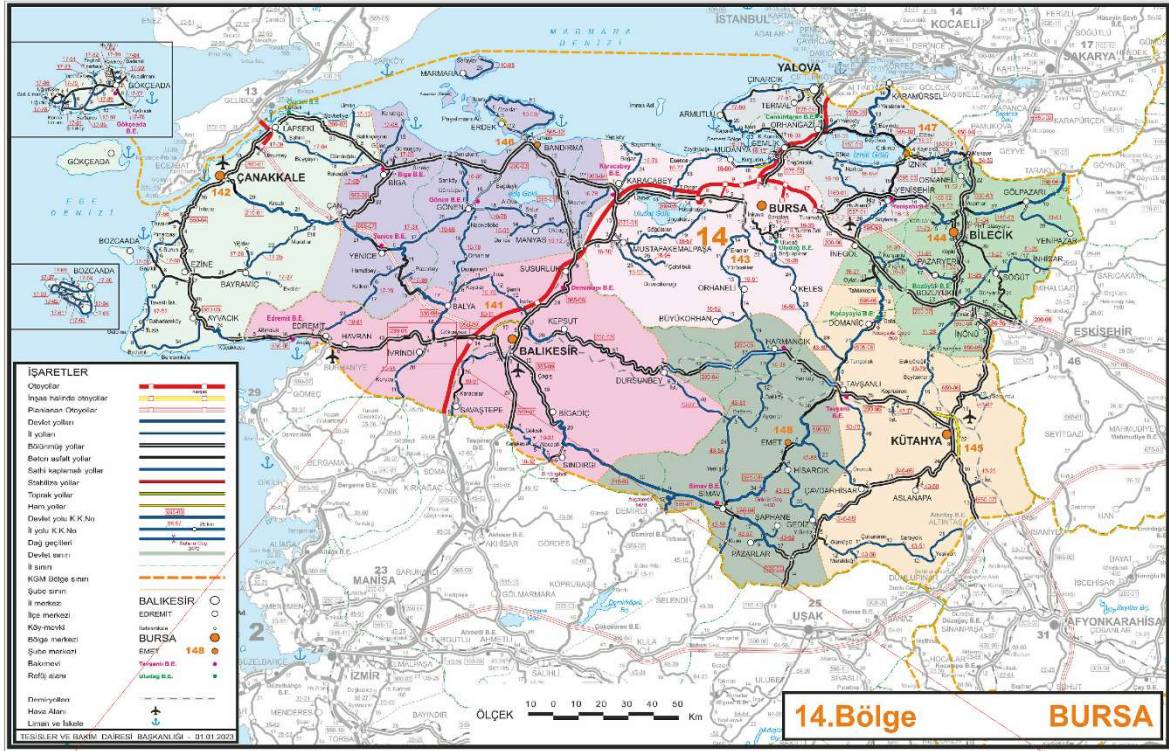
Jeolojik anlamda kaya kütlesi, yerindeki kayaç ve bu kayaçtaki süreksizliklerin birlikteliğini ifade eder. Kaya kütlelerinin sınıflandırılması ise jeomekanik özelliklerine ve dayanım değerine göre yapılmaktadır. Kaya kütlelerinin dayanımı, kütlelerin süreksizliklerine, kayanın fiziksel özelliklerine ve kayanın yenilmeden sağlam durabildiği maksimum gerilmeyle ölçülmektedir.

Doğada denge halinde durduğu kabul edilen kaya kütlelerinde tasarlanacak bir mühendislik yapısı için kaya kütlelerine ait tüm özelliklerin en doğru şekilde araştırılması gerekmektedir. Bu özelliklerin araştırılması amacıyla numune olarak alınacak kaya malzemesinin; türü, dokusu ve yapısı, bozunması, sertliği, dayanımı, porozitesi, yoğunluğu, poisson oranı gibi özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu tezin amacı, Balıkesir-Edremit Devlet Yolu güzergahında Km:38+627-38+835 aralığında (Sağ Tüp: Km: 38+633-38+820, 187 m; Sol Tüp: Km:38+627-38+835, 208 m) bulunan zayıf kaya kütlelerinde projelendirilecek olan Evciler Varyantı Tüneli'nin jeolojik ve jeoteknik açıdan incelenmesi, üç boyutlu nümerik analizlerinin yapılması, olası duraysızlık hallerinin belirlenmesi ve bu hallerdeki çözüme yönelik önerilerin ortaya konmasıdır. Yapılan bu çalışmada, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen “Balıkesir-Edremit Yolu Evciler Varyantı Etüt ve Proje Danışmanlık Hizmetleri İşi” dahilinde gerçekleştirilen sondaj kuyusu ve laboratuvar çalışmaları verilerinin bir kısmı kullanılmıştır [1].

1.2. Çalışma Alanının Özellikleri

Projelendirmesi yapılacak olan Evciler Tüneli, Balıkesir ili İvrindi ilçesi sınırları içinde yer almaktadır. Tünel güzergahı, mevcut Balıkesir Edremit Devlet Yolu'nun Km. 38+000-39+579 ve Km:40+195-40+600 arası geçişi için tasarlanmıştır. İlgili kesimde yer alan Çoban Tepe, Balıkesir Edremit Yolu- Evciler Yolu ayrımının güneyinde; sivri bir burun topoğrafyası sergilemekte olup, Evciler Tüneli ile bu topoğrafyanın geçilmesi planlanmaktadır. Evciler Tünelinin genel yönelimi KB-GD yönündedir. Proje alanının yer belirleme haritası aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 1.1.) (Şekil 1.2.).



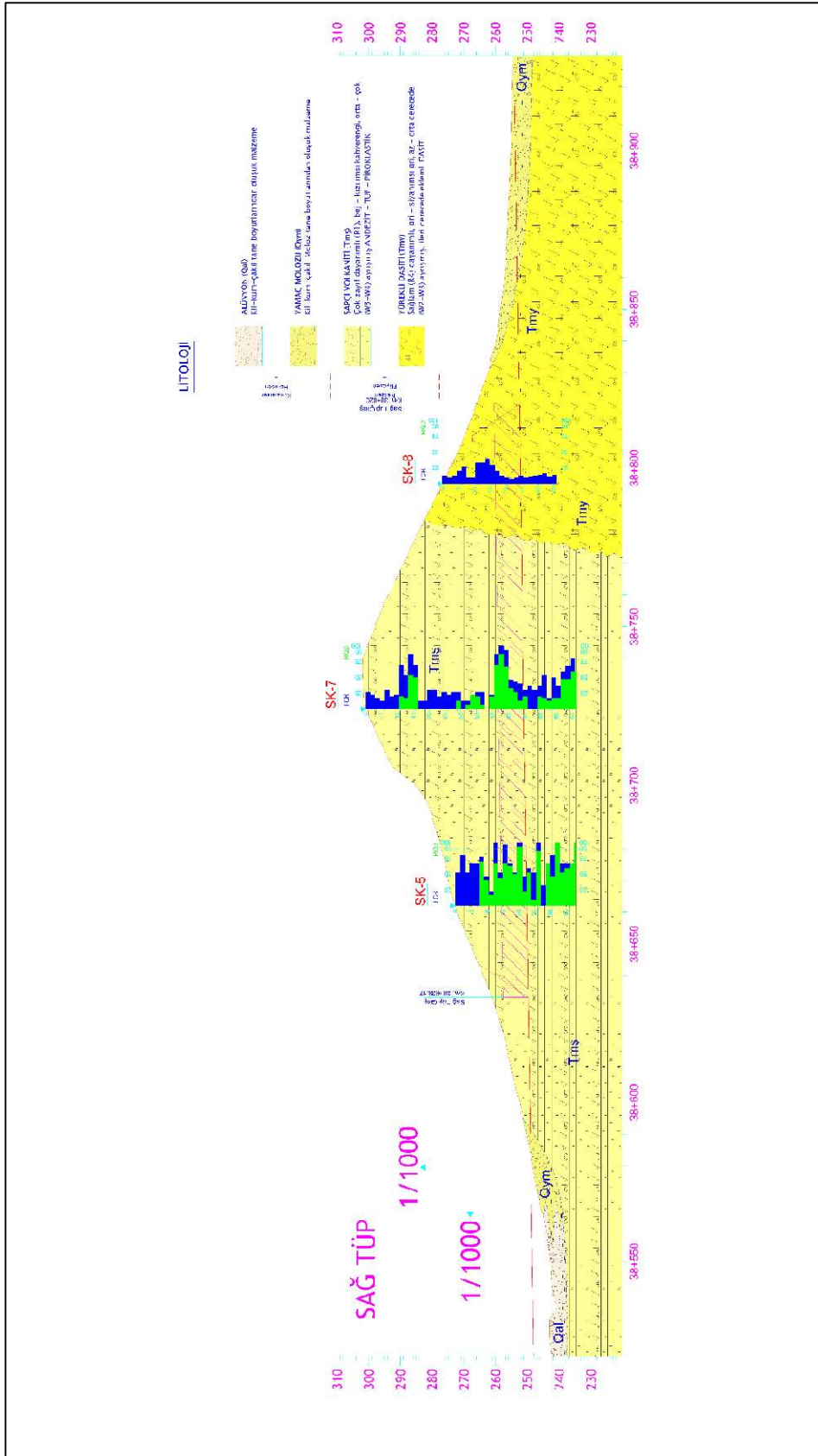
Şekil 1.1. Çalışmaya konu alanın Karayolları haritasındaki gösterimi [2].

Evciler Tüneli çift tüp olarak tasarlanmıştır. Tünelin giriş ve çıkış portalları ile mevcut devlet yolu bağlantısı, yeni yapılacak yaklaşım köprüleri ile sağlanacaktır. Sağ tüp, Km:38+633'te yaklaşık 250 m kotunda başlayıp, 187 m boyunca %1,50 boyuna sabit eğimle ilerleyerek Km:38+820'de yaklaşık 253 m kotunda sona ermektedir. Sol tüp ise Km:38+627'de yaklaşık 250 m kotunda başlayıp, 208 m boyunca %1,50 eğimle ilerleyerek Km:38+835'te yaklaşık 253 m kotunda sonlanmaktadır.

Projenin Özellikleri:

Karayolu Adı	: Balıkesir - Edremit Devlet Yolu
Tünel Adı	: Evciler Tüneli (T-1 Tüneli)
Tünel Uzunluğu	: Sağ Tüp (Km: 38+633-38+820) 187 m : Sol Tüp (Km:38+627-38+835) 208 m
Tünel Tipi	: At Nalı Kesit / Çift tüp
Tünel Boyuna Eğimi	: % 1,50
Yolun Cinsi	: Devlet yolu
Yolun Sınıfı	: 1. Sınıf
Şerit Genişliği	: 2 x 3,5 m
Banket Genişliği	: 2 x 0,50 m
Tünel İçi Yatay Gabari	: 8 m
Tünel Sağ ve Sol Tüp arası mesafe	: Eksenler arası 30 m

Tünel güzergahının jeolojik profili ise Şekil 1.4. ve Şekil 1.5.'te verilmiştir.

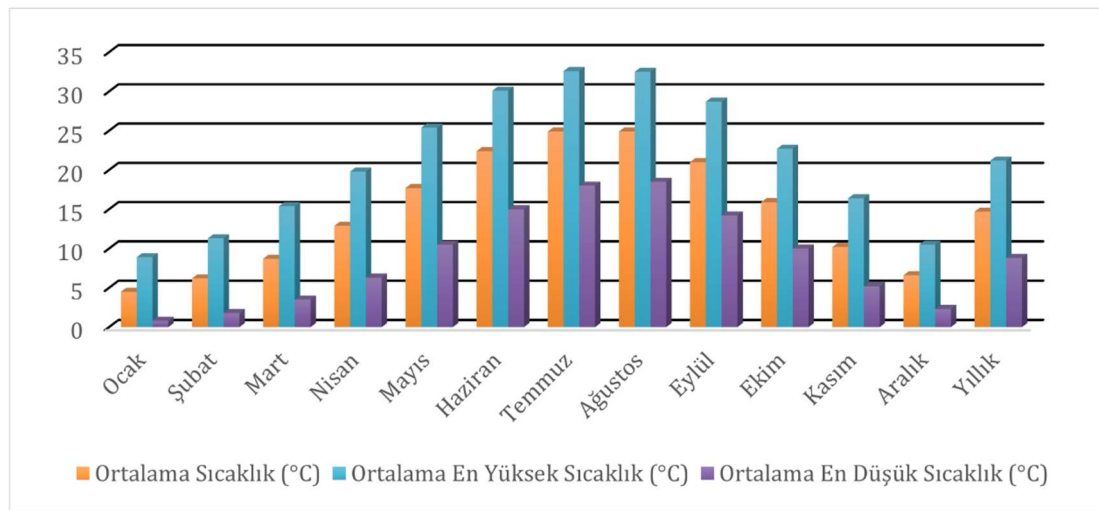


Şekil 1.5. Sağ tüp jeolojik profil [1].

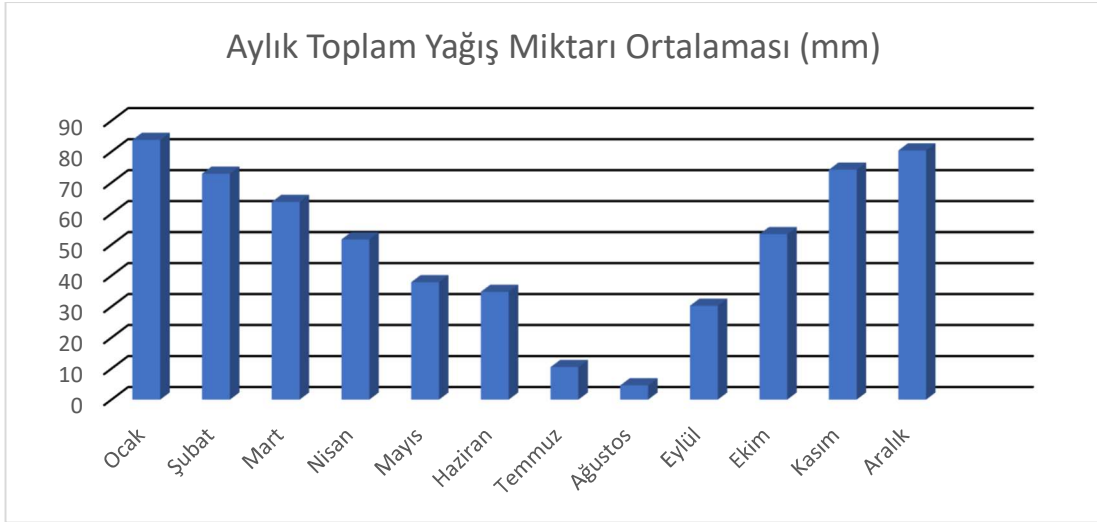
1.2.1. İklim ve Bitki Örtüsü

Balıkesir ilinde üç farklı iklim tipi beraber görülür. Ege kesimi kıyılarında Akdeniz iklimi, kuzey kesimlerde Marmara iklimi ve iç kesimlerde karasal iklim. Kıyı bölgelerinde yaz ve kış sıcaklıkları arasında büyük farklar bulunmazken, iç kesimlerde bu farklar belirgin şekilde artar. Doğuda yer alan yüksek dağlık alanlarda kışlar sert geçerken yazlar serindir. Yıllık yağış miktarı 540 ile 740 mm arasında değişmektedir.

Balıkesir’de Marmara, Akdeniz ve karasal iklimin etkileri belirgindir. Bu durum, ilin farklı bölgelerinde farklı bitki örtülerinin bulunmasına yol açar. Balıkesir’in yüzölçümünün yaklaşık %30'u, yani yaklaşık 650 bin hektarı ormanlarla kaplıdır. Bu ormanlar genellikle Dursunbey, Sındırgı, Edremit, Balya ve Burhaniye ilçelerinde yoğunlaşmıştır. İlin yaklaşık %32'si çayır ve mera alanlarından oluşurken, arazilerin %23'ü tarıma elverişlidir. Kalan %15 ise zeytinlikler, sebze ve meyve bahçeleriyle kaplıdır. Edremit bölgesinde, 500 metreye kadar olan yüksekliklerde zeytinlikler bulunurken, daha yüksek alanlarda karaağaç ve kızılbaş ormanları yaygındır [4].



Şekil 1.6. Balıkesir İlinin 1938 - 2020 yılları arası; ortalama minimum ve maksimum sıcaklık değerlerine ait grafik [5].

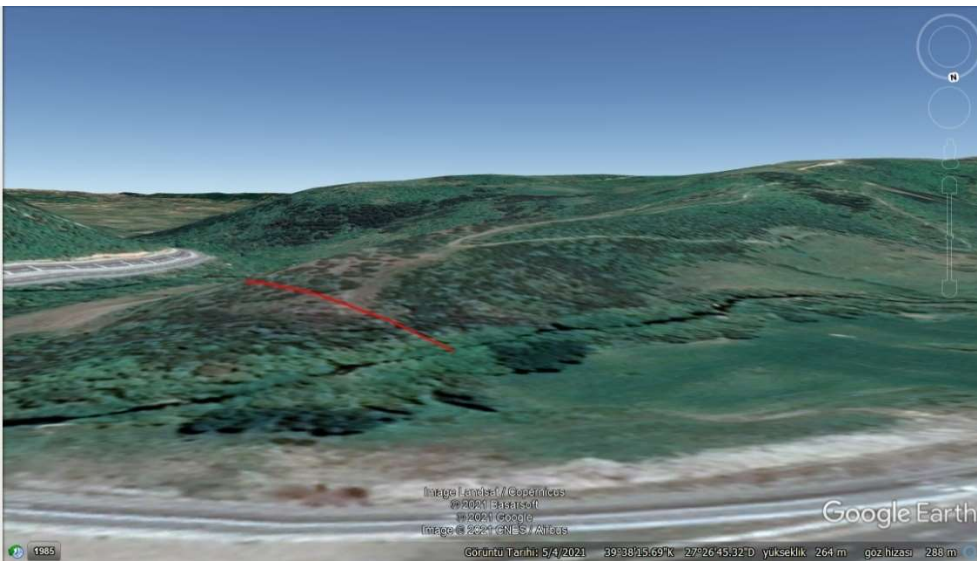


Şekil 1.7. Balıkesir ilinin 1938-2020 yılları arası aylık yağış miktarları [5]

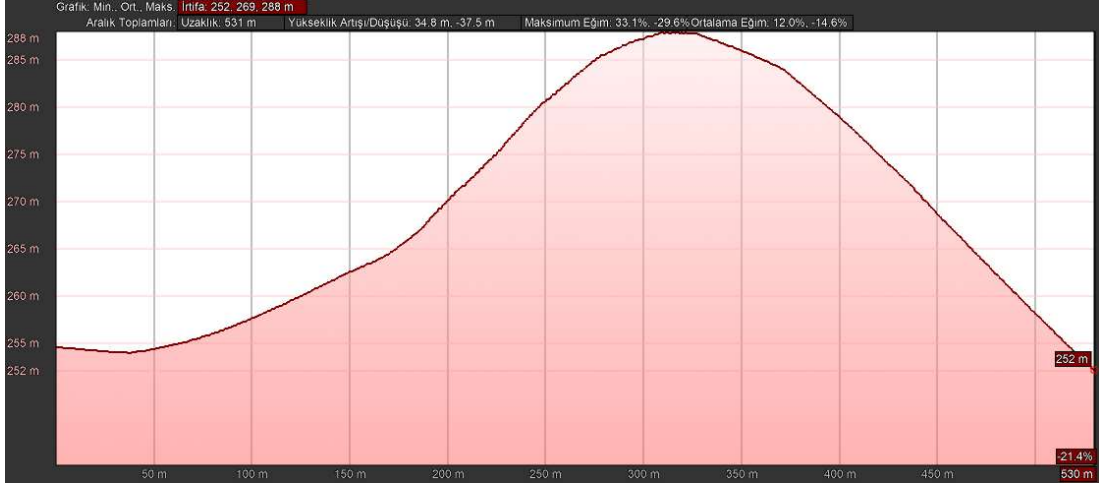
1.2.2. Morfoloji

Çalışma alanı, İvrindi Ovası olarak adlandırılan alanın kuzeyinde bulunmaktadır. Kocaçay havzasının tabanını oluşturan İvrindi Ovası'nın kuzeyinde Manyas Ovası, doğusundan Balıkesir Ovası ve kuzeybatısında Şap Dağı bulunmaktadır. Alanın, kuzeybatı ve güneydoğusunda dağlık alanlarla sınırlandırılmış olan alan genel olarak KD-GB doğrultusunda bir uzanış göstermektedir.

Çalışma alanına konu tünelin, 3 boyutlu morfolojik durumu Şekil 1.8'de de görülmektedir. Apik olmayan bir arazide teşkil edilmesi planlanan tünelin Şekil 1.9'da GB doğrultulu kesiti sunulmuştur.



Şekil 1.8. Çalışma alanının morfolojik durumunu gösteren, güneybatıdan bakış açısıyla alınmış üç boyutlu uydu görüntüsü [6].



Şekil 1.9. Çalışma alanında D-B doğrultulu, morfolojiyi gösterir 2 boyutlu kesit [6].

2. ÇALIŞMA ALANI JEOLJİSİ ve DAHA ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Tünellerle Alakalı Daha Önceki Çalışmalar

LuoBu ve diğerleri [7] Çin'de inşa edilen tünellerde 3 boyutlu nümerik modelleme uygulamalarını incelemişlerdir. Nümerik yöntemler 1970'lerin ortalarından itibaren kullanılsa da, başlangıçta sadece inceleme yapılan alanın spesifik bir bölümüne dair bilgi sağlıyordu. Ancak, üç boyutlu sonlu elemanlar analiz teknikleri daha ayrıntılı sayısal hesaplamalar yapılmasına olanak tanımıştır. Bu çalışmada, zayıf dayanımlı kayaç kütlelerinin boylamsal deformasyon profilleri geri analiz yöntemi vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Mingyazi Tüneli örneğinde uygulanan yöntem, tünel stabilitesine ilişkin nümerik veriler sağlamıştır.

Aygar ve Gökçeoğlu [8], Ankara-İzmir Yüksek Hızlı Tren Projesi'nde Afyonkarahisar-Banaz kesiminde bulunan ve zayıf kiltası, killi kum, zayıf çimentolanmış kumtaşı ve siltli çakıllı siltli kilde açılacak olan T4 Tünelini incelemişlerdir. Çalışmalarında düşük örtü kalınlığı (10 m-35 m) koşullarındaki şiddetli deformasyon ve stabilite sorunlarını ele alarak sonlu farklar yöntemi kullanarak analizler gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, zayıf zemin koşullarında inşa edilen sığ tüneller için hem yetersiz/etkisiz destek sistemlerinin hem de yeterli destek sistemlerinin özellikleri incelenmektedir. Bunun yanı sıra, tünelin yapısı ve destek sistemine dair karşılaşılan problemler detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Analitik çözümler ile 3D sayısal analizlerin sonuçları karşılaştırılmış ve 3D sayısal analizlerin sağladığı avantajlar tartışılmıştır. Zayıf zeminlerde tünel yüzeyi ve tavan stabilitesinin, genel tünel stabilitesi açısından taşıdığı önem ve gereklilik vurgulanmıştır.

Gökçeoğlu ve diğerleri [9], Ankara ile İstanbul'u birbirine bağlayan Yüksek Hızlı Tren Projesi kapsamındaki zayıf zemin koşullarındaki T2 Doğançay Tüneli'ni incelemişlerdir. Tünel, amfibolit ve metakuvarsitler içerisinde açılmaktadır. Zayıf zemin ve kohezyonsuz birimler içerisinde açılan tünelin destek sistemi tasarımı için çeşitli analizler yaparak önerilerde bulunmuşlardır. Bu çalışmalarında, araştırmacılar kohezyonsuz ve çok zayıf zemin koşullarında açılan tünellerde tünel ayna ve tavan stabilitesinin önemine dikkat çekmişlerdir.

Koçkar ve Akgün [10], tünel destek sistemi dizaynı için yöntem geliştirmek amacıyla Antalya-Alanya arasındaki iki karayolu tüneline incelemişlerdir. Bu inceleme kapsamında, zayıf kayaç kütleleri olan şist, fillit ve limonit kayaçlarının yer aldığı tünel giriş bölgelerinde kinematik ve limit denge analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada, kaya kütlelerinin jeomekanik özellikleri ve

çekme dayanımı parametreleri GSI değeri kullanılarak tespit edilmiştir. Su basıncının etkisi de modele dahil edilerek, kaya şevlerinin yenilme durumları kinematik ve limit denge analizleri ile incelenmiştir. Yüksek foliasyonlu, düzensiz eklemlili şevlerde dairesel yenilme koşulları ile karşılaştırılmış ve bu duraysızlaşan şevlerde ters analiz modeli geliştirilmiştir. GSI yöntemi vasıtasıyla ulaşılan sonuçlar ters analiz çıktıları ile karşılaştırılmış ve bilgisayar programları yardımıyla tünel bölümlerinde deformasyon ve stres koşullarına karşılık destek sistemlerinin etkileşimleri incelenmiştir.

Xing Yan ve diğerleri [11], yeraltı kazılarında kaya kütlelerinin kararlılığını çeşitli sayısal modeller ile irdelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarında, göçmenin ardından kayaç kütlelerinin davranışları, süreksizliklerin mekanik nitelikleri, kazı ve destek bölümleri 3 boyutlu sayısal analiz yöntemleri yardımıyla ayrı ayrı incelenmiş ve sonuçlar sunulmuştur. İnceleme alanında faylar, dayklar, çatlaklar ve kırıklar gibi önemli jeolojik unsurlar mevcuttur. Nümerik analiz yöntemiyle veriler toplanmış, ilgili bilgisayar programına girilmiş ve gerilim ile basınç analizleri yapılmıştır. Tüm veriler, kazı alanında elde edilen gerçek değerlerle karşılaştırılmış ve 3 boyutlu nümerik analizlerin yeraltı tünel kazılarında etkili bir şekilde kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

2.2. Çalışma Alanı Jeolojisi

Biga Yarımadası olarak bilinen bölgede, Tersiyer öncesine ait kayaçlar, KD-GB yönünde uzanan ve tektonik olarak birbirleriyle ilişkili kuşaklarda görülmektedir. Stratigrafik olarak farklı istiflerden oluşur. Farklı jeolojik birimlerden meydana gelen bu bölgeler; doğudan batı yönüne sırasıyla İzmir İli-Ankara İli Zonu, Sakarya İli Zonu, Çetmi Melanjı ve Ezine Zonu olarak adlandırılmaktadır.

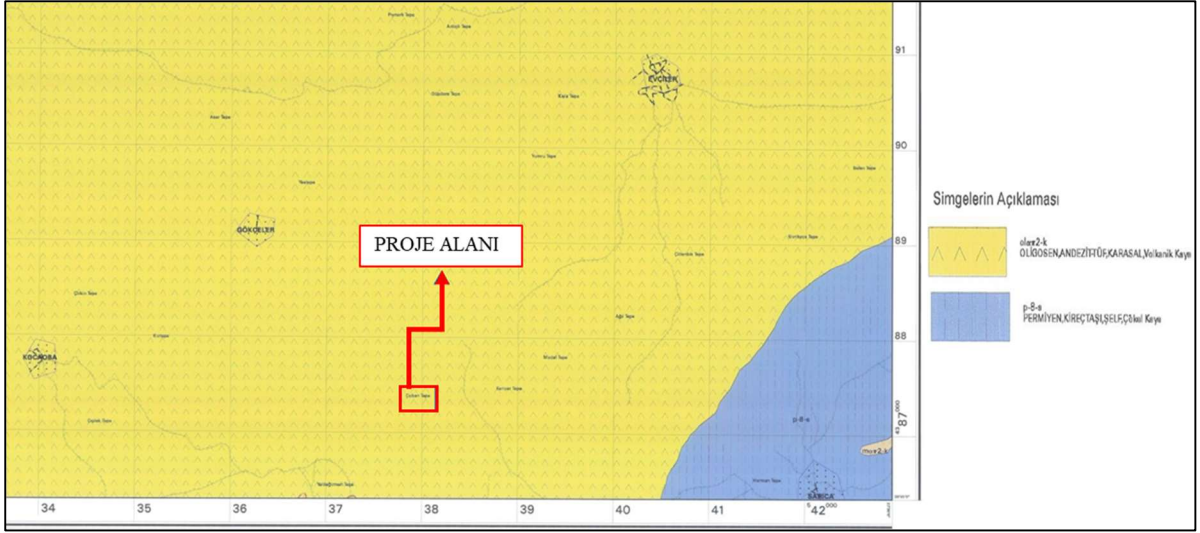
Fındıklı Formasyonu, amfibolitli gnays, mermer ve amfibolit ardışık olarak sıralanmasıyla oluşur. Altınoluk mermer üyesi de bu formasyonun bir parçasıdır. Üzerinde bulunan Sutüven Formasyonu, Kazdağ masifinin üstünde yer alır. İçeriğinde mermer, amfibolit mercikleri içeren sillimanit gnays, biyotit gnays, granitik gnays ve yer yer migmatit içeren tabakalardan oluşur. Bunun üzerinde, Geç Paleozoyik yaşlı Kalabak Birimi, tektonik dokanakla yerleşmiştir. Kalabak Birimi, düşük dereceli metamorfizmlerden oluşur ve içerisinde Çarmık metagranitoidiyoriti, mermer ve metaserpantinitle mercikli fillit ile şistlerin yer aldığı Torasan

Formasyonu ve mermer aralanmalı mattüf ile tremolit-aktinolit şistleri içeren Sazak Formasyonu bulunur.

Kalabak Biriminin üstünde, Triyas yaşlı Karakaya Kompleksi bulunur. Bu kompleks, arkozik kumtaşları ve kilttaşları içeren ardışık istifler, çört mercekli grovaklar, Orhanlı Grovakları, yeşil bazaltik kayaçlar ve tüflerden oluşan Mehmetalan Formasyonu, kahve-haki renkli spilitik bazalt, aglomera ve tüflerin yoğun olduğu Çal Formasyonu ve en üstte kireçtaşı tabakaları içeren Camialan Kireçtaşları ile karakterizedir. Karakaya Kompleksi ile tektonik dokanaklı olan Balya Formasyonu, arkozik kumtaşı ve Holobialı şeyllerden meydana gelir. Geç Triyas yaşlı olan bu formasyon, Bayırköy Formasyonu tarafından uyumsuz dokanakla örtülür. Bayırköy Formasyonu, karasal-sığ denizel konglomera, kumtaşı, çamurtaşı ve kireçtaşlarından oluşan Liyas yaşlı bir birimdir. Bu formasyonun üzerinde, Geç Jura-Erken Kretase yaşlı platform kireçtaşları içeren Bilecik Formasyonu yer alır ve onun üzerinde ise Hotriviyen-Albiyen yaşlı hemipelajik, mikritik kireçtaşı ve kiltası ardışıklı Pınar Formasyonu bulunur.

Geç Kretase yaşlı ofiyolitli kayaçlardan oluşan Çetmi Melanjı, paftada tektonik zonlarda bulunmaktadır. Temel kayaçlar üzerinde uyumsuz olarak yer alan Tersiyer birimleri arasında, Orta-Geç Eosen yaşlı bazalt, bazaltik andezit ve geçişli volkanoklastiklerden oluşan Şahinli Formasyonu yer alır. Bu formasyon içinde, volkanoklastikler ve kumtaşı-kiltasından oluşan Bilaller Üyesi bulunmaktadır. Erdağ Volkaniti çoğunlukla Geç Eosen yaşlı bazaltlardan meydana gelir. Biga Yarımadasında Oligosen dönemi boyunca volkanik faaliyet devam etmiştir. Bu döneme ait Bağburun volkanitleri (andezitik lav, ignimbirit, aglomera ve az miktarda volkanoklastikler) ve Hallaçlar Volkanitleri (andezitik ve dasitik bileşimli birimler) Oligosen yaşlı volkanitlerdir. Hallaçlar Volkaniti kısım kısım altere olmuştur ve etkinliği Erken Miyosene kadar sürmüştür. Bu alterasyonun nedeni, Oligosen-Erken Miyosen aralığında bölgeye yerleşen Oligo-Miyosen granitoidleri olarak gösterilmektedir. Erken Miyosen birimlerini uyumsuz dokanakla örten, Geç Miyosen yaşlı konglomera, kumtaşı, kiltası ve kireçtaşlarından oluşan gölsel çökeller İlyasbaşı Formasyonu olarak adlandırılır. Tüm bu birimleri uyumsuz olarak Kuvaterner yaşlı alüvyal çökeller örtmektedir [1].

Proje sahasının yer aldığı Bölge, MTA 1:500.000 ölçekli Jeoloji Haritaları İzmir paftası ve 1/25 000 ölçekli Balıkesir İ18-c2 paftası üzerine işaretlenmiş olup, ölçeksiz olarak aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 2.1. Çalışmaya konu alanın ve yakın çevresinin 1:25.000 ölçekli MTA haritasındaki konumu.

2.3. Stratigrafi

Biga Yarımadası olarak adlandırılan alanda Tersiyer öncesi kayalar, KD-GB doğrultusunda uzanan ve birbirleriyle tektonik olarak ilişkili kuşaklarda mostra vermektedir. Stratigrafik olarak farklı istiflerin oluşturduğu bu zonlar bu bölgeler; doğudan batı yönüne sırasıyla İzmir İli-Ankara İli Zonu, Sakarya İli Zonu, Çetmi Melanjı ve Ezine Zonu olarak sıralanabilir. Bu temel birimler üzerine uyumsuz olarak yerleşen Tersiyer yaşlı volkanosedimanter kayalar çalışma alanındaki temel kayaları teşkil etmektedir.

2.3.1. Hallaçlar Volkaniti

Hallaçlar Volkaniti olarak adlandırılan kayalar, bazaltik andezitik lavlar, piroklastikler ve yer yer altere olmuş andezitlerden oluşur. Bu birim, geniş alanlarda Kalkım, Pazarköy ve Yenice civarında yüzeylemiştir. Mostralar incelendiğinde, aşırı derecede alterasyona uğradıkları gözlenir ve arazide beyaz, sarı, kahverengi ve kırmızı renkler dikkat çeker. Kayalar genellikle hipokristalin porfirik dokuya sahiptir ve içerdikleri mineraller arasında plajiyoklaz, biyotit, klinopiroksen, alkali feldspat ve apatit bulunur. Kalsit, klorit ve serpantin gibi ikincil mineraller de rastlanabilir. Plajiyoklazlar genellikle iri-orta taneli ve özşekillidir ve yer yer foliasyonlu zonlanma gösterirler. Biyotitlerin özşekilli-yarı özşekilli olduğu ve opaklaşma ve kloritleşme izleri taşıdığı görülür. Klinopiroksenlerde ise kenarlardan itibaren bozulmalar gözlenir ve öz şekilsiz kalıntılar şeklinde görünürler.

Karbonatlaşma, kloritleşme ve sınırlı miktarda serpantin benzeri minerallere dönüşüm gibi değişiklikler klinopiroksenlerde de gözlemlenmektedir. Kalan malzeme genellikle devitrifiye volkanik cam ve mineral mikrolitlerden oluşur. Geç Oligosen döneminde başlayan volkanik etkinlik, Erken Miyosen'e kadar devam etmiştir.

2.3.2. Yürekli Dasiti (Tmy)

Yürekli Dasiti, gri ve beyaz renklerde olup, kuvars ve biyotit mineralleri bakımından zengin asidik bileşimli lav ve piroklastiklerden oluşur. Bu birim, Hallaçlar Köyü güneyi, İvrindi İlçesi'nin güney kesimleri ve Yürekli Köyü civarında gölgesel çökellerle ardalanmış şekilde yayılım gösterir. Yürekli Köyü ve çevresinde, seri halinde volkanik domlar oluşmaktadır. Mikroskobik incelemelerde, dasit ve riyolit şeklinde tanımlanan kayalar görülmüştür. Hipokristalin porfirik dokuya sahip lavlarda, kuvars, plajiyoklaz, alkali feldspat, biyotit, apatit ve opak mineraller önemli fenokristallerdir. Kayaçlar, orta taneli ve özşekilli-yarı özşekilli feldispatlar, özşekilsiz kuvars mineralleri ve özşekilli-yarı özşekilli biyotit minerallerini içerir. Plajiyoklazlarda polisentetik ikizlenme ve bazı örneklerde zonlanma gözlenirken, biyotit minerallerinde hafif opaklaşma meydana gelmiştir. Kalan hamur kısmı genellikle devitrifiye volkan camı ve mineral mikrolitlerinden oluşur. Bu birim, Hallaçlar Volkaniti üzerine yerleşmiştir.

2.3.3. Şapçı Volkaniti (Tmş)

Şapçı Volkaniti olarak adlandırılan birim, beyaz renkli ve yer yer ignimbiritik özellikler taşıyan kalın asidik tüflerle başlar ve ardından asidik lavlar ve piroklastik malzemelerle devam eden volkanizmanın son evrelerini oluşturan andezitik lavlar ve piroklastiklerden oluşur. Bu volkanik hareket, Büyük Şapçı, Küçük Şapçı (Balıkesir) köyleri ile Balya İlçesi arasında ve Balıkesir ili kuzeyindeki İbirler Köyü civarında geniş bir alanı kapsar. Büyük Şapçı ve İbirler Köyü'nün güneyinde, volkanizmanın belirgin çıkış noktaları bulunur. Şapçı Volkaniti örnekleri mikroskobik olarak incelendiğinde, ilk evre ürünlerinin riyodasit ve son evre ürünlerinin andezit olduğu tanımlanmıştır. Riyodasitler, hipokristalin porfirik dokuya sahip olup, plajiyoklaz, klinopiroksen, biyotit, apatit, alkali feldspat ve opak mineraller içerir. Andezit olarak tanımlanan son evre ürünleri ise hipokristalin dokuludur ve plajiyoklaz, klinopiroksen, biyotit, klinoamfibol, apatit, alkali feldspat ve opak mineraller içerir. Volkanizma Erken

Miyosen yaşındadır ve Hallaçlar Volkaniti Büyük Şapçı Köyü çevresinde üzerlenirken, bu birim Yürekli Dasiti birimi tarafından uyumsuz olarak da üzerlenmektedir.

2.3.4. Soma Formasyonu (Tms0)

Balıkesir'in güneyinde, Biga Yarımadası'nın iç kesimlerinde yüzeyleyen Soma Formasyonu, genellikle marn, silttaşı, kumtaşı ve kireçtaşlarından oluşan bir birimdir.

Çamköy'de, çamurtaşı, marn, silttaşı, tuf, kumtaşı ve kireçtaşlarından oluşan bir birimde, kireçtaşlarının içinde stramolitler bulunur. Çoraklı, Büyük Bostancı köyü ve Çinge Köylerinde gözlenen Soma Formasyonu, kireçtaşlarından, tüften ve silis yumrularından oluşmaktadır. Çamköy'de ise, silttaşı ve kumtaşı ardalanması görülür ve bu istifte düzlemsel paralel katmanlı, dalga ripıllı, çapraz katmanlı, düzlemsel ve tekne türü çapraz katmanlı silttaşı ve kumtaşları yer alır. Formasyona ait kireçtaşlarında fosillere rastlanmış olup, bu fosillere dayanarak formasyonun Miyosen yaşında olduğu belirlenmiştir.

2.3.5. Alüvyon (Qal)

Gözlenen alüvyon birimi, dereler tarafından taşınan silt, kum, çakıl ve blok gibi deritik malzemelerin, düşük eğimli geçişlerdeki dere yataklarında çökmesi ve birikmesi sonucu oluşur. Bu birim çimentosuzdur ve çakıl ve bloklar genellikle yuvarlak veya yarı yuvarlaktır. Kuvaterner yaşlı olan bu birim, anakayayı uyumsuz bir şekilde örter ve yamaç diplerindeki yamaç molozu birimi ile yer yer yanal geçişler gösterir.

2.3.6. Yamaç Molozu (Qym)

Yamaç molozu, vadi üst kotlarında bulunan anakayanın fiziksel ve kimyasal ayrışması sonucu oluşan blok, çakıl, kum, silt ve kil gibi malzemelerin eğim boyunca yamaç aşağı hareket etmesiyle oluşur ve eteklerde birikir. Bu birim gevşek ve çimentosuzdur ve anakayayı kaplar. Yamaç molozu birimi, türediği birim ve çökelim uzaklığına bağlı olarak farklı kalınlıklarda görülür. Evciler Tüneli giriş ve çıkış portal kesimlerinde, volkanik malzemenin ayrışmasıyla oluşan yamaç molozu birimi bulunmaktadır. Portal kesimlerinde, yaklaşık 50 cm'lik bitki örtüsü altında 1,5-2 metrelik yamaç molozu görülür. Çıkış portal kesimi ile tünel orta kesimi arasında yer alan toprak yolda, altere olmuş anakayanın üst kesimleri üzerinde yamaç molozu ve üzerinde bitkisel toprak zonu gözlenir. Tünel üst kotlarında, topoğrafya dikleşir ve yüzey suyunun durumuna ve bölgenin iklimine bağlı olarak, anakayada ayrışma ve yamaç molozu oluşumu devam eder. Proje alanında ve çevresindeki formasyonların taban-tavan ilişkileri, stratigrafik kolon kesitte gösterilmiştir.

SENZOYİK		ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	FORMASYON	SİMGE	LİTOLOJİ	AÇIKLAMA
Paleojen	Üst Oligosen	Hallaçlar Volkaniti	Miyosen	Şapçı Volkaniti	Soma Formasyonu	Alüvyon	Qal	Alüvyon (Qal): Akarsu yataklarında, vadi tabanlarında ve ovalarda çökelen çakıl, kum, mil ve çamurları kapsar
								Şapçı Volkaniti (Tmş): Tabanda yer yer ıgnımbirlik özellikle kalın asidik tüflerle başlayıp, bunları takip eden asidik lav ve piroklastikler ve volkanizmanın son evrelerini oluşturan andezitik lav ve piroklastiklerden oluşur.
								Yüreklili Dasiti (Tmy): Kuvars ve biyotit minerallerince zengin bol kayaç parçalı asidik bileşimli lav ve piroklastikler. Kayaçlar önceki mikroskobik incelemelerinde dasit ve riyolit olarak tanımlanmışlardır.
								Hallaçlar Volkaniti (Toh): Yer yer altere andezit ve bazalitik andezitik lav ve piroklastiklerden oluşur.

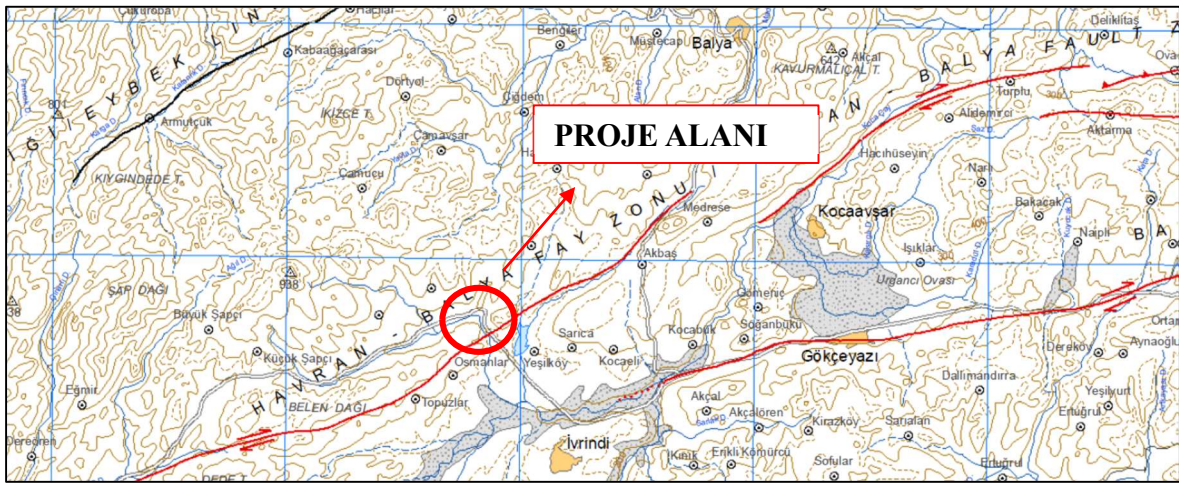
Şekil 2.2. Çalışmaya konu alanın ve çalışma alanının yakınının stratigrafik kolon istifi.

2.4. Yapısal Jeoloji

Balıkesir İvrindi İlçesi'ni kapsayan 1:100.000 ölçekli MTA Jeoloji Haritaları, Balıkesir İli-İ18 paftası içinde bulunmaktadır. Bu haritalar, Biga Yarımadası'nı oluşturan zonlardan biri olan Ezine Zonu içindeki "Karakaya Kompleksi'ni" değerlendirmektedir. Biga Yarımadası'nda oluşan horst graben yapılarına dayanan tektonik faaliyetler hala devam ettiğiinden, grabenlerdeki ovalık alanlarda çökme devam etmekte ve büyük depremler sonrası düşey atımlar görülebilmektedir. Bu nedenle, inceleme alanı ve yakın çevresi tektonik hareketler açısından yoğun bir bölgedir ve jeolojik birimler içinde kırıklı yapılar sıkça bulunmaktadır. Düz alanlarda egemen olan jeolojik birim alüvyondur. Hafif engebeli alanlarda ise karasal volkanizma kökenli andezit lavları, andezit blok ve çakıllı aglomeralar ve tüfler

gözlemlenmektedir. Bölgede görülen ve üzerinde tarım yapılan bu birimlerin mostralarında eklem ve tabaka yapılarının varlığı gözlenmiştir.

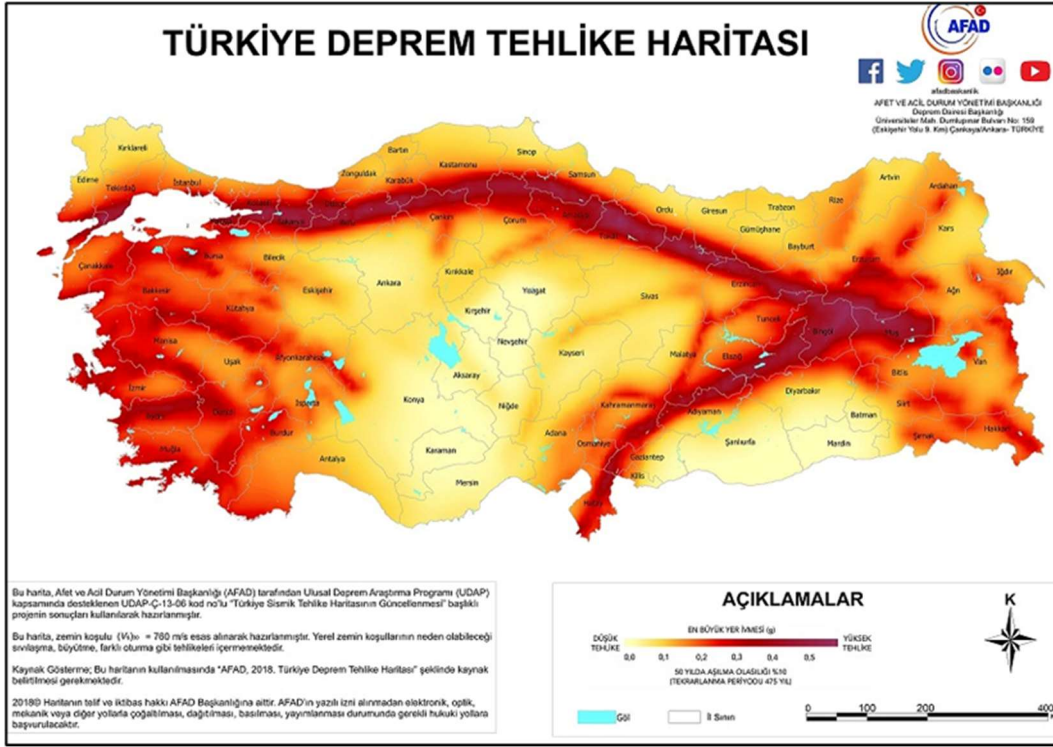
Bölgesel tektonizma açısından çalışma alanının değerlendirilmesi için, 2012'de yayınlanan MTA 1/2500000 Ölçekli Diri Fay Haritaları Balıkesir Paftası (NJ 35-3) ve MTA Yer Bilimleri Harita Görüntüleyicisi ve Çizim Editörü Türkiye Diri Fayları verilerinden yararlanılmıştır. Evciler Tüneli'nin bulunduğu bölgede, tünel giriş portalının yaklaşık 1 km güney doğusunda, KD-GB uzanımlı ve yaklaşık 28 km uzunluğunda doğrultu atımlı Holosen Fayı'nın (Havran-Balya Fay Zonu) varlığı belirlenmiştir.



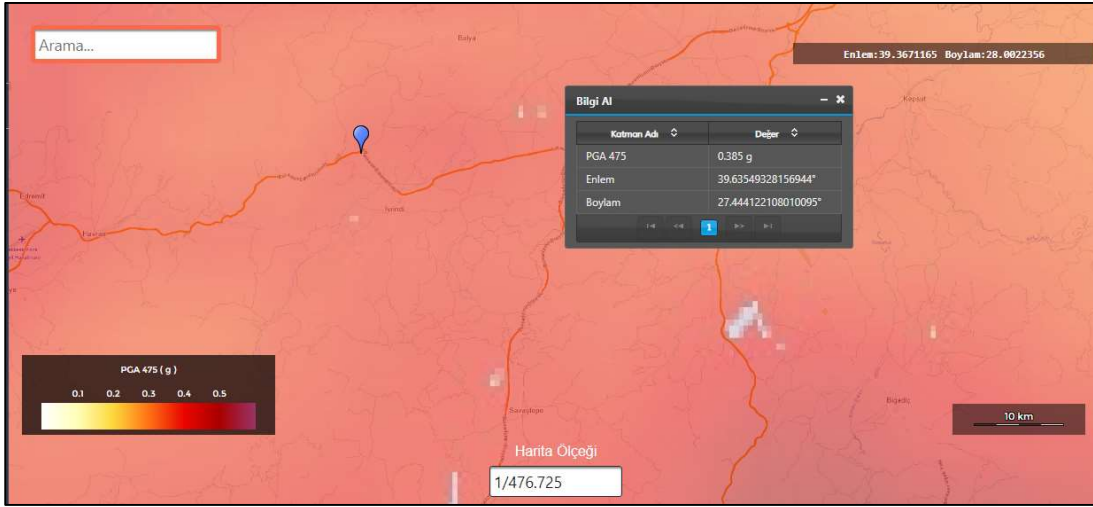
Şekil 2.3. Çalışmaya konu alanın ve yakın çevresinin MTA 1/2500000 ölçekli Balıkesir (NJ 35-3) paftası diri fay haritasındaki konumu [12].

2.5. Depremsellik

1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren yenilenmiş deprem haritasına göre proje alanı yer ivmesi 0,3-0,5g arasında olabilecek bir bölgede yer almaktadır.

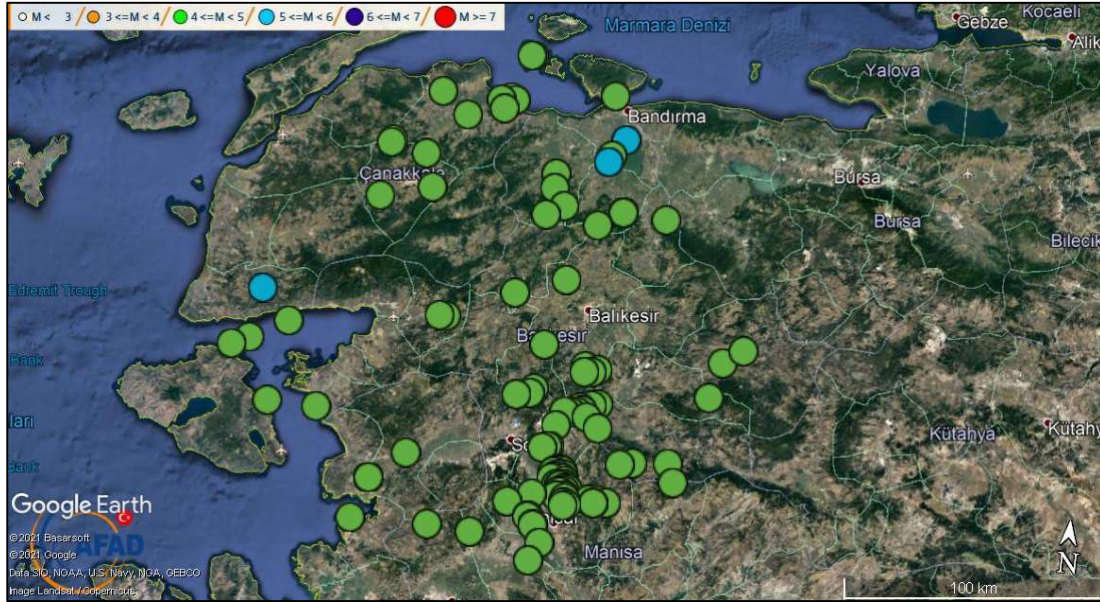


Şekil 2.4. Çalışma alanının Türkiye deprem tehlikesi haritasındaki konumu [13].



Şekil 2.5. Çalışmaya konu alanın Türkiye deprem haritasındaki konumu ve yer ivmesi değeri [13].

Çalışma alanı ve yaklaşık 100 km yarıçapındaki son senelerdeki depremler, Ek'te listelenmiş ve uydu görüntüsü üzerinde gösterilmiştir (Şekil 2.6). 1900-2021 yılları arasında, büyüklüğü $M \geq 4$ olan 121 deprem kaydedilmiştir (EK-1).



Şekil 2.6. İnceleme alanında yakın tarihte meydana gelen depremlerin gösterimi [14].

2.6. Hidrojeoloji

Tünel tasarımında dikkat edilmesi gereken hususların başında projenin yapılacağı alanın hidrojeolojik özellikleri gelmektedir. Çalışma alanında yapılan çalışmalarda tünel giriş ve çıkış kesimlerinde herhangi bir su çıkışına rastlanmamıştır. Yapılan jeoteknik amaçlı sondajlarda da yeraltı suyu ile karşılaşılmaştır.

Çizelge 2.1. Sondajlarda karşılaşılan yeraltısu seviyeleri.

No	Sondaj No	Yer	Derinlik	Yass
1	SK-5	Portal	38.00	Kuru
2	SK-6	Portal	37.50	Kuru
3	SK-7	Eksen	68.00	Kuru
4	SK-8	Portal	36.00	Kuru
5	SK-9	Portal	36.00	Kuru

Olası su varlığı durumunda Şapçı Volkaniti'nin dayanımını ciddi bir şekilde yitirmesi beklenirken Yürekli Dasiti'ne ait dasitlerde ciddi bir dayanım kaybı olmayacaktır. Yürekli Dasiti ileri derecede eklemli yapısıyla oldukça geçirgen bir özellikte iken Şapçı Volkanitleri az geçirimli niteliktedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

İlgili sahada arazi incelemeleri, jeoteknik sondajlar ve arazide deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu tezde değerlendirmeye alınan veriler Karayolları Genel Müdürlüğü'nden temin edildiği için arazi çalışmaları ve kuyu sondajları üzerinde doğrudan inceleme yapılamamıştır. Evciler Varyantı Tüneli'nin giriş, eksen ve çıkış bölgelerindeki duraysızlık ve stabilite sorunlarını çözmek ve jeoteknik modelleme yapmak için bu çalışmalardan vasıtasıyla edinilen bilgiler ve sondaj örneklerinde yapılan jeomekanik laboratuvar deneylerinden alınan bilgiler kullanılmıştır. Çalışmada, Karayolları Genel Müdürlüğü projesi dahilinde yapılan sondaj çalışmaları ile arazide ve laboratuvardan alınan veriler bir arada değerlendirilmiştir. Arazi ve laboratuvar çalışmalarından alınan bilgiler, tünel giriş kesimi bölgelerinin sayısal analizler ile yapılacak modellemesi için jeoteknik parametreler oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Laboratuvar deneyleri ISRM (1981) [15] standartlarına göre yapılmıştır.

Çizelge 3.1. Çalışmaya konu alanda gerçekleştirilen arazi ve laboratuvar deneyleri.

DENEYLER	
Laboratuvar Deneyleri	Birim Hacim Ağırlığı Deneyi
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi
	Nokta Yüğü Dayanıklılık İndeksi Testi

Evciler Varyantı Tüneli, giriş, eksen ve çıkış olmak üzere üç kesime ayrılarak bu kesimler ayrı ayrı incelenmiştir. Her kesim için yapılan çalışmalar değerlendirilerek RMR, GSI ve Q sistemlerine göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmalar temel alınarak, destek sistemleri ve tünel içinde beklenen deformasyonların FLAC 3D programı ile sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, Hoek-Brown yenilme kriteri gibi görgül yaklaşımlar kullanılmıştır. Elastisite Modülü (Ei) ve Deformasyon Modülü [16] Roclab 1.0 [17] yazılımı ile belirlenmiştir. Elde edilen parametreler ve kaya kütlelerinin sınıfı dikkate alınarak, NATM prensiplerine uygun destek sistemleri ve kazı yöntemleri öngörülmüştür. Analizler için kaya kütlelerinin Birim Hacim Ağırlığı, Poisson Oranı, elastisite modülü, deformasyon modülü, mb, s ve a gibi girdiler programa tanımlanmıştır. Her bir kaya sınıfı için uygun destek sistemleri, inşaat sırasına göre adım adım eklenerek modelleme yapılmıştır. Destek sınıflarının

tanımlanmasından sonra gerçekleştirilen analiz ile olası deformasyonlar ve gerilim dağılımları üç boyutlu olarak ortaya konmuştur.

3.1. Arazi Çalışmaları

Evciler Varyantı Tüneli'nin giriş, çıkış ve eksen bölgelerinde arazi çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında, jeolojik ve jeoteknik özellikleri belirlemek, analizler için gerekli parametreleri elde etmek ve laboratuvar testleri için gereken numuneleri toplamak için 5 farklı lokasyonda sondaj çalışması gerçekleştirilmiştir.

3.1.1. Jeoteknik Amaçlı Sondaj Çalışmaları

Tünel güzergahı boyunca gerçekleştirilen sondajlara ait özet bilgiler aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Evciler Tüneli'nde, 4 adet portal bölgesinde ve 1 adet tünel gövdesinde olmak üzere toplamda 215,5 metre uzunluğunda 5 sondaj yapılmıştır. Bu sondaj çalışmalarına ilişkin kot, koordinat ve derinlik bilgileri Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Açılan sondaj kuyuları özet tablosu.

No	Sondaj Adı	Yer	Derinlik	Kot	Koordinatlar	
					N	E
1	SK-5	Portal	38.00	273	538 224	4 389 130
2	SK-6	Portal	37.50	273	538 202	4 389 108
3	SK-7	Eksen	68.00	300	538 158	4 389 145
4	SK-8	Portal	36.00	280	538 110	4 389 194
5	SK-9	Portal	36.00	280	538 083	4 389 170

Sondajlar Temmuz-Ekim 2018 zaman diliminde rotary sondaj yöntemi ve donanımı kullanılarak hidrolik tip sondaj makinası ile Denizler Proje ve Danışmanlık Şirketi tarafından yapılmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nden gerekli izinler alınarak hazırlanan bu tez kapsamında ilgili çalışmalardan önemli ölçüde yararlanılmıştır [1].

3.2. Laboratuvar Araştırmaları

Laboratuvar alışmaları için, 5 sondajdan alınan numuneler, derinliklerine göre karot sandıklarına dizilmiştir. (şekil 3.1) (EK-3). Bu karot sandıkları temel alınarak 5 sondaj kuyusu için sondaj logları oluşturulmuştur (EK-2). Genel olarak, sondaj kuyularında yüzeyden itibaren anakaya gözlemlenmiştir. Bu nedenle, elde edilen numuneler üzerinde karot numunelere yönelik deneyler yapılmıştır.



şekil 3.1. Sondajlardan elde edilen numunelerin karot sandığına dizilmiş görüntüsü [1].

Birim zelliklerinin ve bu özelliklere bağlı olarak kaya kütlesi dayanım parametrelerinin belirlenmesi amacıyla nadir ve zorlukla elde edilen numuneler üzerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneyler arasında "Birim Hacim Ağırlığı Testi (γ), Nokta Yükü Dayanıklılık İndeksi Testi (I_s) ve Tek Eksenli Basınç Dayanımı Testi" bulunmaktadır. Yapılan bu deneylerin sonuçları, tasarım için gerekli parametrelerin belirlenmesinde doğrudan kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Sondaj kuyularından elde edilen deney sonuçları.

Sondaj Adı	Derinlik (m)	Birim Hacim Ağırlık γ , (kN/m ³)	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı σ_c , [18]	Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (I_{s50})	Jeolojik Birim
SK-5	2,80-3,00	19,72	4,80		Andezitik tüf
SK-5	4,50-4,90	19,36	4,60		Andezitik tüf
SK-5	7,50-7,80	18,34	3,90		Andezitik tüf
SK-5	9,00-9,20	20,25	5,40		Andezitik tüf
SK-5	10,50-10,65	19,96		0,10	Andezitik tüf
SK-5	12,80-13,00	20,00	5,10		Andezitik tüf
SK-5	14,60-14,80	20,44	5,70		Andezitik tüf
SK-5	16,70-16,85	20,15	5,00		Andezitik tüf
SK-5	18,00-18,25	19,75	4,60		Andezitik tüf
SK-5	19,65-19,80	20,71	5,10		Andezitik tüf
SK-5	21,10-21,25	20,53	4,30		Andezitik tüf
SK-5	22,50-24,00	21,93	5,50		Andezitik tüf
SK-5	24,00-25,00	20,05		0,12	Andezitik tüf
SK-5	26,00-26,30	20,44	5,10		Andezitik tüf
SK-5	26,80-27,00	22,49	7,40		Andezitik tüf
SK-5	30,00-31,50	21,66	4,70		Andezitik tüf
SK-5	32,00-32,50	21,86	4,80		Andezitik tüf
SK-5	33,00-34,50	23,94	5,30		Andezitik tüf
SK-5	36,00-37,50	22,32	5,30		Andezitik tüf
SK-6	3,00-3,00	18,97		0,10	Andezitik tüf
SK-6	5,50-5,50	18,40		0,11	Andezitik tüf
SK-6	8,70-9,00	18,45		0,10	Andezitik tüf
SK-6	9,00-9,20	23,01		0,10	Andezitik tüf
SK-6	11,80-12,00	18,36		0,10	Andezitik tüf
SK-6	12,20-12,35	23,49		0,12	Andezitik tüf
SK-6	12,50-12,70	18,27		0,10	Andezitik tüf
SK-6	15,00-15,10	18,05		0,10	Andezitik tüf
SK-6	15,15-15,30	20,96		0,10	Andezitik tüf
SK-6	19,60-19,75	22,98		0,10	Andezitik tüf
SK-6	21,15-21,30	19,95		0,11	Andezitik tüf
SK-6	21,90-22,30	19,99	6,30		Andezitik tüf
SK-6	24,30-24,70	19,61	4,80		Andezitik tüf
SK-6	30,50-30,90	19,92	5,40		Andezitik tüf
SK-6	33,50-33,90	19,71	5,00		Andezitik tüf
SK-7	37,50-40,00	18,70		0,10	Andezitik tüf
SK-7	40,60-42,00	18,00	3,40		Andezitik tüf
SK-7	42,00-43,00	18,00	4,00		Andezitik tüf
SK-7	43,30-43,50	19,80	4,90		Andezitik tüf
SK-7	44,00-44,40	20,20	6,30		Andezitik tüf

SK-9	13,80-14,00	22,30		3,12	Dasit
SK-9	16,30-16,50	24,00		2,71	Dasit
SK-9	27,90-28,00	22,60		0,64	Dasit
SK-9	29,40-29,50	22,00		2,86	Dasit
SK-9	33,80-34,00	22,10		2,34	Dasit

İnceleme bölgesi ve yakın çevresinde, jeolojik birimleri temsil eden kesimlerde yapılan araştırma sondajları “Bölüm 3.3. Kaya Kütlelerinin Jeolojik-Jeoteknik Parametrelerini Belirlenmesi” kısmında ayrıntılı olarak ele alınmış ve değerlendirilmiştir.

3.3. Kaya Kütlelerinin Jeolojik-Jeoteknik Özelliklerinin Tanımlanması

Kaya kütlelerinin parametrelerinin belirlenmesi, tünel açımında destek sisteminin seçilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Tünelin açılacağı jeolojik birimin parametreleri, sondaj kuyuları, arazi gözlemleri ile arazi ve laboratuvar deneyleri kullanılarak belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu süreçte, tünel tasarımı için RMR, GSI ve Q sınıflama sistemleri kullanılacaktır.

3.3.1. Kaya Kütle Sınıflama Sistemi - (RMR)

Kaya Kütle Sınıflandırma Sistemi (RMR), ilk olarak Bieniawski [19-21] tarafından tanıtılmıştır. Bu sistem, ilk olarak sedimanter kaya kütlelerindeki tünellerde gerçekleştirilen gözlemler ve bu gözlemler sonucunda elde edilen verilere dayanarak şekillendirilmiştir. İlk kaya kütle sınıflaması yapılırken şu parametreler kullanılmıştır:

- Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanıklılığı
- Kaya kalitesi değeri (RQD)
- Ayrışma derecesi
- Süreksizliklerin mesafesi
- Süreksizlik genişliği
- Süreksizlik sürekliliği
- Yeraltı suyu akımı
- Süreksizliklerin doğrultusu

1974 yılında, RMR sisteminde ilk önemli değişiklikler yapılmıştır. 1973 versiyonundaki süreksizlik genişliği, süreksizlik sürekliliği ve ayrışma derecesi gibi parametreler "süreksizlik

durumu" başlığında birleştirilmiştir. Buna ek olarak, tünel açımı için önemli bir parametre olan süreksizlik yönelimlerinin etkisini tanımlamak amacıyla sisteme yeni ölçütler eklenmiştir.

1976'da sisteme alternatif bir parametre olarak nokta yükü dayanım indeksi eklenmiş ve RQD ile dayanım puanlaması süreçlerinde değişiklikler yapılmıştır. Ayrıca, süreksizlik aralığı, süreksizlik koşulu ve yeraltı suyu koşulu gibi faktörlerde de ayarlamalar gerçekleştirilmiştir. 1979'daki güncellemede, su miktarının ölçülmesinin mümkün olmadığı durumlar için "tamamen kuru", "nemli" gibi tanımlamalar eklenmiştir. RMR sistemi, zamanla yapılan yeni gözlemler ve elde edilen verilerle 1989'a kadar birkaç kez daha güncellenmiştir.

1989 yılına kadar gelişimini sürdüren ve günümüzde de hala kullanılan RMR sistemi, temel olarak 5 ana parametreden oluşmaktadır. Tablodaki bu 5 ana parametrenin puanlaması ile hesaplanan RMR değeri, "Temel RMR" değeri olarak bilinmektedir. RMR Kaya Kütle Sınıflama Sistemi'ne ait kullanılan tablolar Ek'te verilmektedir (EK-1).







RMR kaya kütle sınıflama sistemi, tüneller, galeriler ve madencilik gibi yeraltı kazılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistem, kazı yöntemine göre uygun destek sisteminin seçilmesini sağlar (EK-1). Benzer özelliklere sahip her kaya grubunda, kaya yükü, desteksiz durabilme süresi ve desteksiz genişlik büyüklüğü benzeri parametreler belirlenir.

3.3.2. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Kayaç kütlelerinin özelliklerini belirlemede çeşitli yöntemler mevcut olup, özellikle sık eklemli ve zayıf kaya kütleleri için bazı sınırlamalar söz konusudur. Kaya kütlelerini oluşturan kaya malzemesi, süreksizlikler ve bunlar arasındaki ilişkiler, kaya kütlelerinin doğru bir şekilde anlaşılmasını sağlar. Bu doğru anlayışı elde etmek için kaya kütlelerinin jeoteknik parametrelerinin belirlenmesi ve uygun boyuttaki numunelerin alınması önemlidir. Ancak, laboratuvar koşullarında geniş numuneler elde etmek her zaman mümkün olmayabilir. Bu yüzden mühendislik özelliklerini belirlemek için ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan birisi de Hoek-Brown [22] yenilme ölçütüdür. Bu ölçüt, kaya kütlelerinin özelliklerini tanımlamak için görgül ilişkiler ve tablolar sunar. Bu yaklaşımda, kaya kütlelerine etki eden azami ve asgari asal gerilmeler (σ_1 ve σ_3), başka deyişle normal gerilme (σ) ile makaslama gerilmesi (τ) arasındaki ilintinin eğrisel bir bağlantı olduğunu geliştirmişlerdir. Ayrıca, eklemli kaya kütleleri için kaya sabitlerinin (m , s , a) belirlenmesi için çeşitli formüller oluşturulmuştur. Söz konusu eşitlikler, doğrudan deney ve modelleme kısıtlamaları ile RMR kaya sınıflamasının

yetersiz kaldığı durumlar göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) bu bağlamda geliştirilmiş olup, eklemli ve çeşitli dayanıklılık karakterlerine sahip kayaç kütlelerinin dayanım katsayılarını tablolar ile ampirik ilişkiler vasıtasıyla ortaya koymaktadır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. GSI Sınıflama Sistemi Diyagramı [23].

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

3.3.3. Q Sınıflama Sistemi

Q sınıflama sistemi, Barton [24-26] tarafından 1974 yılında yaklaşık 200 tünel ve yeraltı açıklığında elde edilen deneyimlere dayanarak geliştirilmiştir. Araştırmacı, yıllar içinde sisteme çeşitli yenilikler eklemiş olup, sistemin kullanımı aşağıda açıklanmıştır.

Barton Kaya Kütle Kalitesi sınıflamasına göre Q değeri şu şekilde tanımlanmıştır:

$$Q = [RQD/J_n][J_r/J_a][J_w/SRF] \quad \text{Eşitlik 3.1}$$

Bu eşitlikte;

RQD: Kaya kalite göstergesi

J_n: Eklem seti sayısı

J_r: Eklem pürüzlülük derecesi

J_a: Eklem alterasyon derecesi

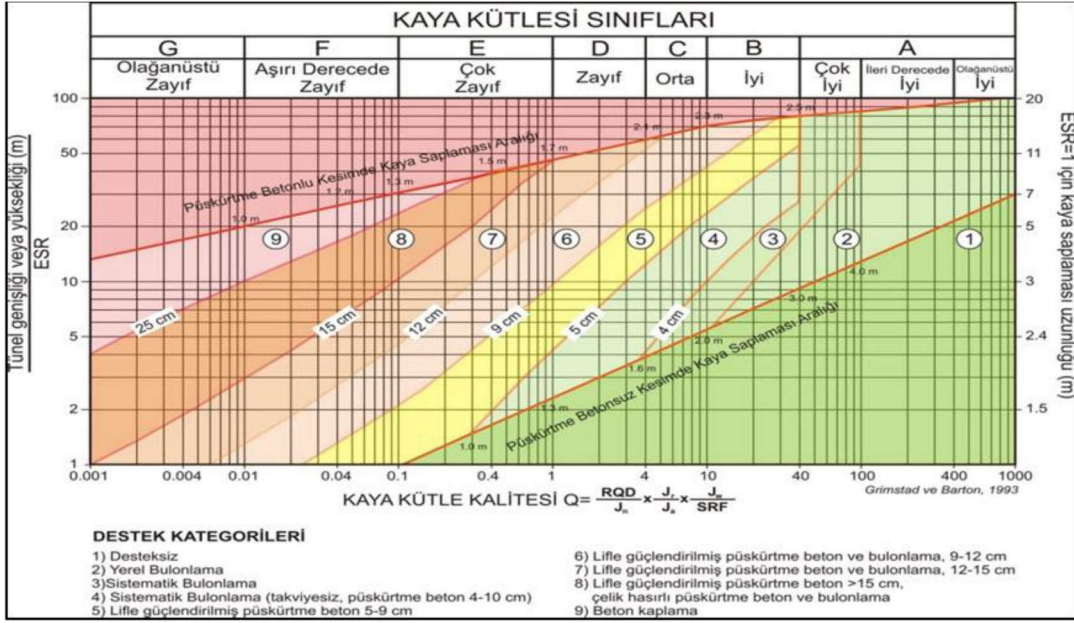
J_w: Eklem su indirgeme faktörü

SRF: Gerilim düşürme faktörü olup, tanımlanan kriterler Ek'teki tablodan seçilebilir (EK-1).

Q değerine göre tünelde uygulanması önerilen destekleme sistemlerini belirlemek için Grimstad ve Barton, 1993 yılında bir tablo önermiştir. Bu tablonun kullanımında, Eşdeğer boyut (De) hesaplanması gerekmektedir. De değeri, kazı eni, çapı veya yüksekliğinin kazı destek oranına bölünmesiyle elde edilir. Kazı destek oranı, farklı yapılar için değişiklik göstermekle birlikte, tüneller için 1 önerildiğinden bu çalışma kapsamında tüm hesaplamalarda bu değer 1 olarak alınmıştır.

$$\text{Eşdeğer Boyut (De)} = \frac{\text{Kazı eni, çapı veya yüksekliği (m)}}{\text{Kazı Destek Oranı (ESR)}} \quad \text{Eşitlik 3.2}$$

Bulunan Eşdeğer Boyut (De), ve hesaplanan Q değeri aşağıda verilen grafikte yerine konularak destek sistemi belirlenir.



Şekil 3.2. Q Sistemi için revizyona uğramış tünel desteği sistemi diyagramı [26].

3.3.4. Kaya Kütleleri İçin Deformasyon Modülü ve Sabitlerin Tespit Edilmesi

Kayaç kütlelerinde tasarlanacak mühendislik yapılarında temel öneme sahip parametrelerden biri Deformasyon Modülüdür (E_m). Bu değeri elde etmek çeşitli zorluklar taşır, çünkü kaya kütleleri, kaya malzemesi ve süreksizliklerden oluşur ve büyük ölçekli numunelerin alınması mümkün değildir. Arazide bu değerlerin sağlıklı şekilde elde edilmesi zor olduğundan, bir takım ampirik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada, tek eksenli basınç dayanıklılığı testleri sonucunda bulunan elastisite modülü değerleri girdi parametresi olarak kullanılarak Roclab 1.0 [17] programıyla hesaplanan deformasyon modülü değeri üzerinden bir değerlendirme yapılmıştır.

Kaya kütlelerine ait 's' ve 'a' parametrelerinin belirlenmesi için öncelikle GSI değerinin hesaplanması gerekmektedir. GSI değeri kullanılarak çeşitli eşitlikler yardımıyla 's' ve 'a' sabitleri elde edilebilmektedir:

'a' sabiti için;

$$GSI \geq 30 \text{ ise } a = 0.5 \text{ ve } GSI \leq 30 \text{ ise } a = 0.65 - (GSI/200) \text{ Eşitlik 3.3}$$

Olarak belirlenebilmektedir.

's' sabiti için ise,

$$S=\exp\left(\frac{(GSI-100)}{(9-3D)}\right) \quad \text{Eşitlik 3.4}$$

Formülü kullanılmaktadır.

'mb' kaya kütle sabiti ise;

$$Mb=mi \exp\left(\frac{(GSI-1)}{(28-14)}\right) \quad \text{eşitlik 3.5}$$

Bu eşitliklerdeki mi kaya sabiti, Hoek vd. (2002) [27] katkılarıyla oluşturulan bir tablo vasıtasıyla belirlenir (EK-1). Eşitliklerdeki 'D' değeri ise örselenme faktörünü ifade eder ve kaya kütlelerine etki eden dış etkenlere bağlı olarak 0 ile 1 arasında değişir. Örselenmemiş kaya kütleleri için 'D' değeri 0 iken, örselenmiş kaya kütleleri için 1'dir. Bu değer, Hoek vd. (2002) [27] katkılarıyla geliştirilen bir tablo vasıtasıyla tespit edilebilmektedir (EK-1).

3.3.5. NATM (New Austrian Tunnelling Method) Sınıflama Sistemi

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi, kısaca "NATM" olarak bilinen sistem, 1964 yılında Rabcewicz ve ekibi tarafından geliştirilmiştir [28]. Avusturya'nın standartlarından biri olan ÖNORM B2203 (1994), bu yöntemi uygulamak için çeşitli kaya sınıflarını tanımlamıştır; bunlar arasında sağlam kayadan, şişen ve kabaran kayaya kadar geniş bir aralık bulunmaktadır. Bu sınıflandırmada, "A1" kodu sağlam kaya için, "C5" kodu ise şişen, kabaran ve çok zayıf kaya için kullanılmaktadır. Ayrıca, bu kaya türlerinin davranışları ve gerekli destekleme stratejileri detaylandırılmıştır. İlgili tablonun detayları Ek bölümünde sunulmuştur (EK-1).

Tünel güzergahındaki saha ve sondaj çalışmalarından elde edilen bilgiler doğrultusunda, "RMR" ve "Q" kaya kütle sınıflama değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler, doğal tünel açma yöntemine uygun olarak abaklar üzerinde karşılaştırılarak uygun NATM kaya kütle sınıfı belirlenmiştir. Tasarım aşamasında tespit edilen NATM kazı destek sınıfı, İzle (Ölç), Tasarla ve İlerle gibi temel prensiplere dayalı olarak uygulanmakta olup, kazı koşulları ve kazı sürecinde edinilen yeni bilgiler ışığında gerektiğinde değiştirilebilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölüm, arazide gerçekleştirilen sondajlardan, arazi deneylerinden ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesini kapsamaktadır. Çalışma alanının jeoteknik koşullarını belirlemek amacıyla sondajlardan elde edilen veriler ve laboratuvar deney sonuçları titizlikle incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, jeoteknik parametrelerin değerlendirilmesinde Kaya Kütle Derecelendirme (RMR), Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ve Q Sınıflama Sistemi gibi Kaya Kütle Sınıflandırma Sistemleri kullanılmıştır.

4.1. Arazi ve Laboratuvar Deneyleri

Bu başlık altında çalışma alanında araştırma amacıyla yapılan arazi deneyleri ve bunlardan elde edilen numunelere yapılan laboratuvar deneylerine ait bilgiler verilecektir.

4.1.1. Sondaj Çalışmalarından Elde Edilen Veriler

Evciler Varyantı tünelinin giriş, çıkış portal bölgeleri ve eksen bölgesinde yapılan 5 adet sondajda yüzeyden itibaren anakayaya inilmiş ve ilerlenmiştir. SK-5, SK-6 ve SK-7 sondajlarında Şapçı Volkaniti'ne ait andezitik tüfler, SK-8 ve SK-9 sondajlarında ise Yürekli Dasiti'ne ait dasit birimi geçilmiştir. Bu sondaj çalışmalarında ilerleme adımlarına göre kaya kütlelerinin toplam karot verimi (TKV) ve kaya kalite göstergesi (RQD) değerleri aşağıdaki tabloda örneklendirilmiştir (Çizelge 4.1.).

Çizelge 4.1. Açılan sondajlara ait Ortalama TKV ve Ortalama RQD değerlerinin gösterir özet tablo.

Sondaj Adı	Ortalama TKV (%)	Ortalama RQD (%)
SK-5	68	56
SK-6	62	53
SK-7	38	19
SK-8	17	0
SK-9	39	1

4.1.2. Laboratuvar Deneylerinden Elde Edilen Değerler

4.1.2.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Kayaçların jeomekanik özelliklerini tespit etmek için giriş, çıkış ve eksen bölgelerinde gerçekleştirilen SK-5, SK-6, SK-7, SK-8 ve SK-9 sondajlarından güçlkle elde edilen numunelere birim hacim ağırlık deneyleri uygulanmıştır. Giriş bölgesinde yapılan deneylerin ortalama sonucu 20,41 kN/m³, çıkış bölgesinde ise 20,77 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Eksen bölgesindeki sondajdan deneye uygun yeterli örnek sağlanamadığı için birim hacim ağırlık deneyi gerçekleştirilememiştir. Yoğunluk ve birim hacim ağırlık testi sonuçları EK-4'te yer almaktadır.

4.1.2.2. Nokta Yüğü İndeksi (Is₅₀)

Tünel giriş ve çıkış kesimlerinde gerçekleştirilen sondaj çalışmalarında, tek eksenli sıkışma deneyi için yeterli numune alınamayan derinliklerde bu deney yapılamamıştır. Bunun yerine, bu kesimlerden alınan numunelere nokta yükleme deneyi uygulanmıştır. Kayacın dayanımını belirlemek amacıyla, ISRM standartlarına göre gerçekleştirilen nokta yükleme deney sonuçları, giriş portal bölgesi için ortalama nokta yük indeks değeri (Is) 0,10 MPa ve çıkış portal bölgesi için ortalama nokta yük indeks değeri 1,96 MPa olarak belirlenmiştir. Giriş portal bölgesine ait özet sonuçlar Çizelge 4.2'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.2. Nokta Yüğü Dayanımı Testi Sonuçları

Tünel Giriş Portal Bölgesi	Nokta yüğü dayanım testi sonuçları
	0,10
	0,11
	0,10
	0,10
	0,10
	0,12
	0,10
	0,10
	0,10
	0,10
	0,10
	0,11

4.1.2.3. Tek Eksenli Basınç Dayanımı

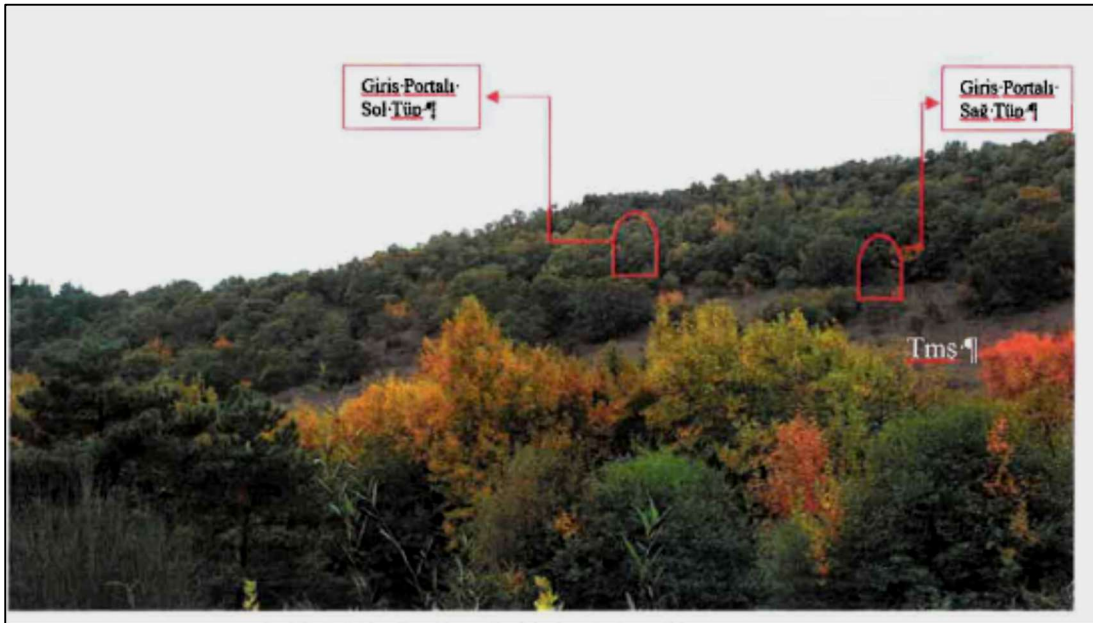
Tünel eksen kesiminde yapılan sondajlarda, tek eksenli sıkışma deneyi için yeterli numune alınmadığı için bu test gerçekleştirilememiştir. Ancak, tünel giriş ve çıkış kesimlerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri uygun numuneler üzerinde ISRM standartlarına uygun olarak yapılmış ve veriler elde edilmiştir. Kaya malzemelerinin tek eksenli sıkışma dayanımı kullanılarak sınıflandırılmasına ait tablo Ek'te verilmiştir (EK-1). Elde edilen verilere göre değerlendirme yapılmış ve bu değerlendirme sonucunda tünel giriş ve çıkış kesimindeki kaya birimleri 'Çok Düşük Dirençli' olarak sınıflandırılmıştır. Tek eksenli sıkışma dayanımı testlerinin sonuçları ve bu sonuçların analizleri "parametre seçimi" bölümünde ele alınmış olup, deney verilerinin tamamı EK-4'te verilmiştir.

4.2. Tünel Giriş Portal Bölgesi Parametrelerinin Seçimi

Tez çalışması sahasında, tünel girişi portal alanında yapılan sondaj çalışmaları ve arazi gözlemleri değerlendirildiğinde, yüzeyde ve sondajlarda gözlenen volkanik kaya kütlesi, zayıf kaya özellikleri göstermekte ve çok sık aralıklı süreksizliklerle bölünmüş, ayrıca oldukça ayrılmış ve bozunmuş durumdadır. Bu nedenle, Hoek-Brown yenilme kriteri [22] öneme alınarak yapılmış analizlerden temin edilen parametreler, şev stabilitesi analizlerinde girdi parametresi olarak değerlendirilmiştir.

Giriş portal kesiminde yapılan arazi gözlemleri ve sondajlar (SK-5 ve SK-6) sonucunda, Evciler Tüneli kesiminde gözlenen Şapçı Volkaniti, genel olarak açık-koyu gri renkli andezitik lavlar, andezit kökenli pembe-kırmızı piroklastlar, bej renkli tuf, ignimbirit ve yer yer gri renkli andezit karışımlarından oluşmaktadır. Andezitler sert ve yer yer çok sert nitelikte olup,

dayanımlı ve orta derecede ayrıışmıştır. Buna karşılık, tuf, ignimbirit ve andezitik lav seviyeleri zayıf dayanımlı ve orta-çok ayrıışmış olarak tanımlanmıştır.



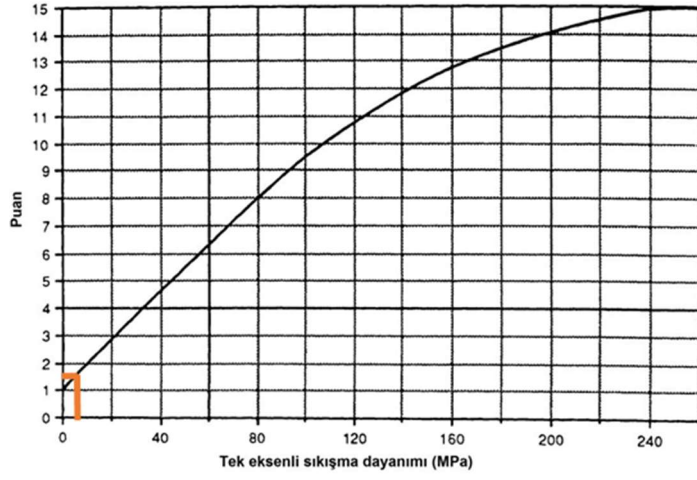
Şekil 4.1. Evciler Tüneli giriş kesimi uzaktan görünümü.

Bu kesim için parametre üretiminde arazide gerçekleştirilen SK-5 ve SK-6 sondajlarından yararlanılmıştır.

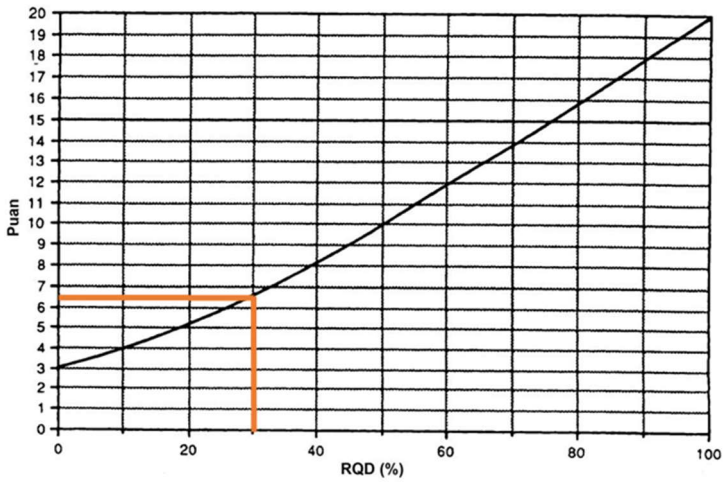
4.3. Kaya Kütle Sınıflama Sistemi (RMR)

Tünel girişi bölgesinde gerçekleştirilen SK-5 ve SK-6 sondajlarında, Şapçı Volkaniti'ne ait andezitik tuf birimi gözlemlenmiştir. Bu birimin RMR değeri, Ek'te (EK-1) verilen tablolar vasıtasıyla hesaplanmıştır. Değerlendirmelerde, sağlam kayaların tek eksenli basınç dayanımı, RQD, süreksizliklerin açıklığı, pürüzlülüğü, dolgu durumu ve aralığı gibi faktörler ile eklem yüzeylerinin ve kayacın bozunma seviyeleri karot analizleri ile tespit edilmiştir. Ayrıca, bozunma ve süreksizliklerin sürekliliği (uzunluğu) yüzeye çıkan aynı formasyona ait birimlerden tahmin edilmeye çalışılmıştır.

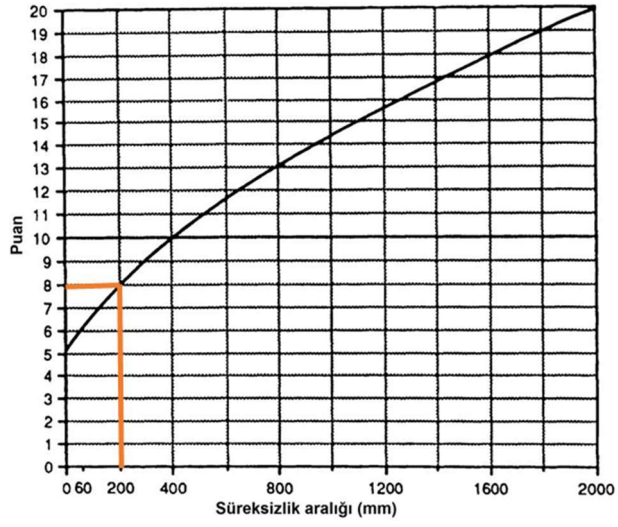
Hesaplamalar sonucunda, 5 ana parametrenin toplamı olan “Temel RMR değeri” 36 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.3.). Tünelin kazı koşullarında belirgin bir süreksizlik yönelimi gözlemlenmediği için, süreksizlik yönelim düzeltme puanı olarak orta seçenek değerlendirilmiş ve 5 puanlık bir düzeltme uygulanarak “Düzeltilmiş RMR değeri” 31 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. SK-5 ve SK-6 için kaya malzemesi dayanım puanları



Şekil 4.3. SK-5 ve SK-6 için RQD (%) puanı.



Şekil 4.4. SK-5 ve SK-6 için süreksizlik aralığı (mm) puanları.

Çizelge 4.3. Giriş Portal Bölgesi için RMR Kaya Kütle Sınıflandırma Sistemi [29].

1	Kaya Dayanımı (Mpa)	Nokta Yükleme Dayanımı (Mpa)	>10	4-10	2-4	1-2	Daha düşük değerler için TEB değeri tercih edilir		
	Kaya Dayanımı (Mpa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	1
	Puan		15	12	7	4	1,5	1	0
2	Kayaç Kalite Göstergesi, RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puan		20	17	13	8	6,5		
3	Süreksizlik aralığı		>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Puan		20	15	10	6	5		
4	Süreksizliklerin uzunluğu		<1m	1-3m	3-10 m	10-20 m	> 20m		
	Puan		6	4	2	1	0		
	Süreksizliklerin açıklığı		Yok	< 0.1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	> 5 mm		
	Puan		6	5	4	1	0		
	Pürüzlülük		Çok pürüzlü	Pürüzlü	Az pürüzlü	Düz	Kaygan		
	Puan		6	5	3	1	0		
5	Dolgu		Yok	Sert Dolgu			Yumuşak Dolgu		
				< 5 mm		>5 mm	< 5 mm		>5 mm
	Puan		6	4		2	2		0
5	Bozunma		Bozunmamış	Az bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Bozunmuş	Çok bozunmuş		
	Puan		6	5	3	1	0		
5	Yeraltı suyu		10 m tünel uz. gelen su l/m	Yok	< 10 lt/dk	10-25 lt/dk	25-125 lt/dk	> 125 lt/dk	
			Genel su durumu	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı	
	Puan		15	10	7	4	0		
TEMEL RMR			36						

Kaya kütlesi parametreleri belirlenirken temel RMR değeri dikkate alınacaktır, ancak kaya sınıfı değerlendirmesinde final RMR değeri kullanılacaktır. Bu doğrultuda, giriş portal kesimindeki kaya 'Zayıf Kaya' olarak sınıflandırılmıştır (Çizelge 4.4.).

Çizelge 4.4. RMR Puan durumuna göre kaya kütlesi sınıfları.

Puan	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Sınıf	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok İyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok Zayıf

Çizelge 4.5. RMR Puan durumuna göre tahmini kaya kütlesi parametreleri.

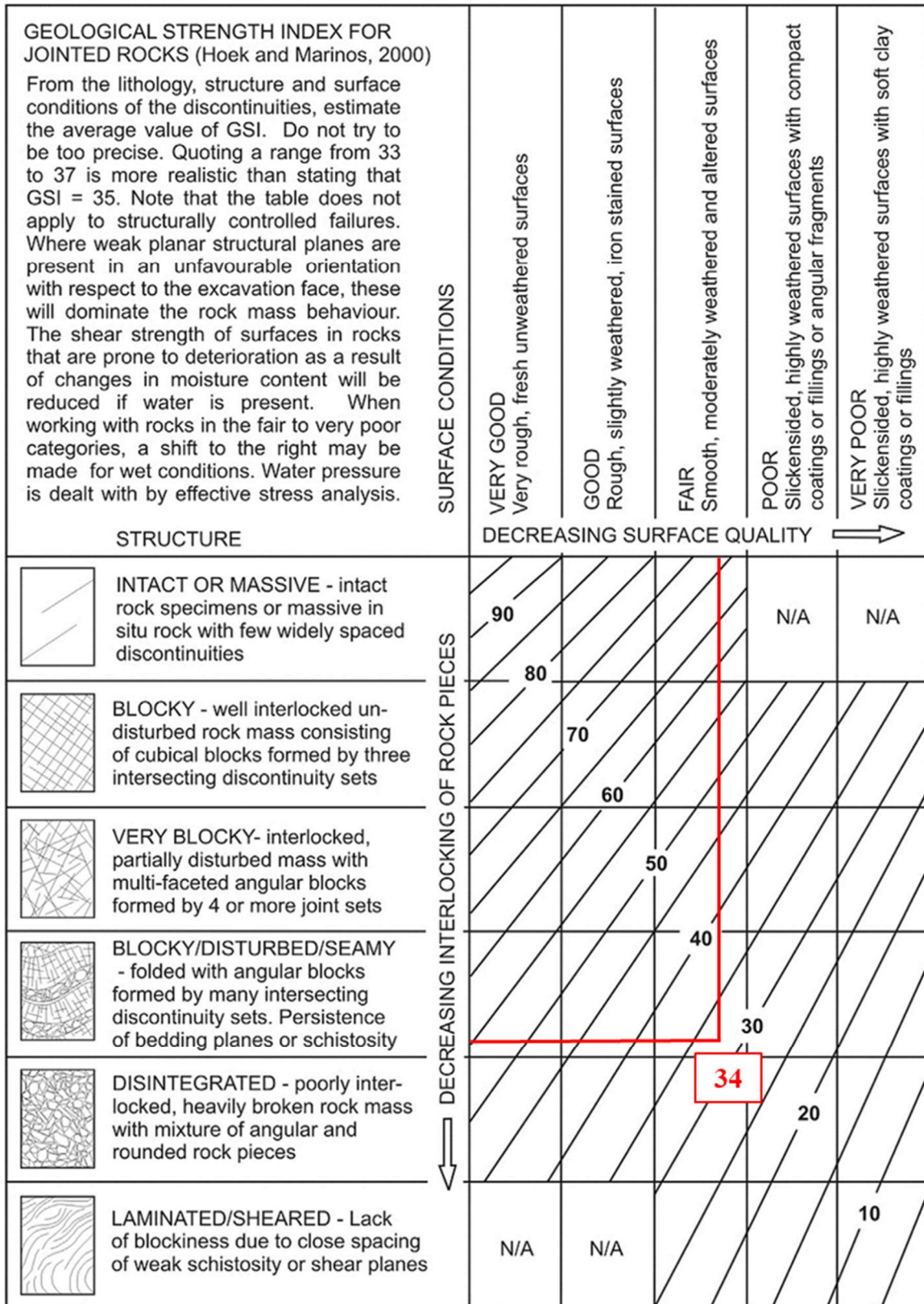
Sınıf No	I	II	III	IV	V
Ortalama Desteksiz Kalma Süresi	15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	1.5 m açıklık için 10 saat	1 m açıklık için 30 dakika
Kaya Kütlesinin Kohezyonu (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Kaya Kütlesinin İçsel Sürtünme Açısı (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

4.3.1. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Çalışmaya konu alandaki tünel giriş portalında gerçekleştirilen jeoteknik sondajlar, kaya kütlelerinin nitelikleri ve arazide yapılan gözlemler dikkate alınarak, GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) kriterleri hususunda değerlendirmeler yapılmıştır (Çizelge 4.6.).

Arazi gözlemlerinde karşılaşılan kaya; oldukça bloklu, ele alındığında dahi parçalanabilen ve bozunmuş bir yapıdadır. İlgili abakta sahadaki birimin özelliklerine uygun özellikler kesiştirildiğinde GSI değeri 34 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.6. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) diyagramı vasıtasıyla parametrelerin belirlenmesi [22].



Sayısal analizlerde, kaya ortamındaki kırılma sonrası plastik davranışın dikkate alınması ve gerilme analizlerinde kaya dayanım parametrelerinin yenilme sonrası öngörülmesi gerekmektedir. Kazı sonrası elastoplastik davranışı tanımlamak amacıyla gereken artık dayanım parametrelerini belirlemek için, Cai ve arkadaşlarının (2007) [30] önerdiği ilişkiler kullanılmıştır. Bu çerçevede, andezitik tuf birimi için sayısal analiz modelinde Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) rezidüel değeri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$GSI_r = GSI e^{(-0.0134GSI)} = 34 e^{(-0.0134 \times 34)}$$

$GSI_r = 22$ olarak bulunmuştur.

4.3.2. Q Sınıflama Sistemi

Tünel giriş portal bölgesinde karşılaşılabilecek andezitik tuf birimine ait Q kaya sınıfı puanı, aşağıdaki parametreler kullanılarak ve Ek'teki Çizelge'ye göre hesaplanmıştır:

RQD Değeri:

Giriş portal bölgesindeki SK-5 ve SK-6 no'lu sondajlardan elde edilen RQD değerlerinin ortalaması 30 olarak bulunmuştur. Bu değere karşılık, kaya kalite göstergesi olarak "Zayıf" olarak tanımlanmıştır.

Süreksizlik Set Sayısı:

Giriş bölgesinde yapılan arazi gözlemleri ve sondajlara göre dört veya daha fazla eklem seti ve bol miktarda, küp şeker benzeri eklemler gözlemlendiği için, J_n değeri 15 olarak seçilmiştir. Portal bölgesi olması nedeniyle, $J_n \times 2$ değeri dikkate alınarak $J_n:30$ olarak belirlenmiştir.

Süreksizlik Pürüzlülüğü:

Giriş bölgesindeki pürüzlü veya düzensiz, dalgalı yüzeyler için $J_r:1.5$ değeri uygun görülmüştür.

Süreksizlik Ayrışması:

Giriş bölgesinde, siltli veya kumlu-kil sıvamalar ve küçük kil fraksiyonları için $J_a:3.0$ değeri atanmıştır.

Eklem Su Azaltma Faktörü:

“Orta derecedeki su gelişleri veya basınç sebebiyle yer yer süreksizliklerdeki dolguların yıkanması” durumlarına bağlı olarak $J_w:0.66$ değeri atanmıştır.

Stres İndirgeme Faktörü (SRF):

Kaya kütle karakteristikleri ve gömülme derinliği değerlendirildiğinde, tünel girişinde kazı derinliğinin 50 metreden düşük olması durumu göz önüne alınarak SRF:5 olarak atanmıştır.

Bu parametrelerle birlikte Q değeri şu şekilde hesaplanmıştır:

$$Q=(RQD/J_n)/(J_r/J_a)*(J_w/SRF) \text{ eşitliğinden}$$

$$Q=0,066 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

4.3.3. Tasarıma Esas Parametreler

Tünel giriş kesimi için arazi ve laboratuvar testlerinden elde edilen verilerden yararlanarak, tasarım sürecinde kullanılacak parametrelerin seçimi yapılacaktır.

4.3.4. Kaya Malzeme Katsayısı (m_i)

Kaya malzeme sabiti olarak tanımlanan m_i değeri, kaya kütledeki blokların kenetlenme ve dayanım seviyelerini gösteren bir parametredir. Bu çalışma kapsamında, m_i değeri Hoek ve arkadaşlarının (2007) sunduğu tablo ve Roclab 1.0 [17] programının önerdiği değerler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Andezitik tuf için bu değer $m_i=19$ olarak saptanmıştır.

4.3.4.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c)

Tünel girişi bölümünde bulunan andezitik tuf biriminden alınan örnekler üzerinde yapılan deneylerin sonucunda, ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı değeri 5 MPa olarak ölçülmüştür.

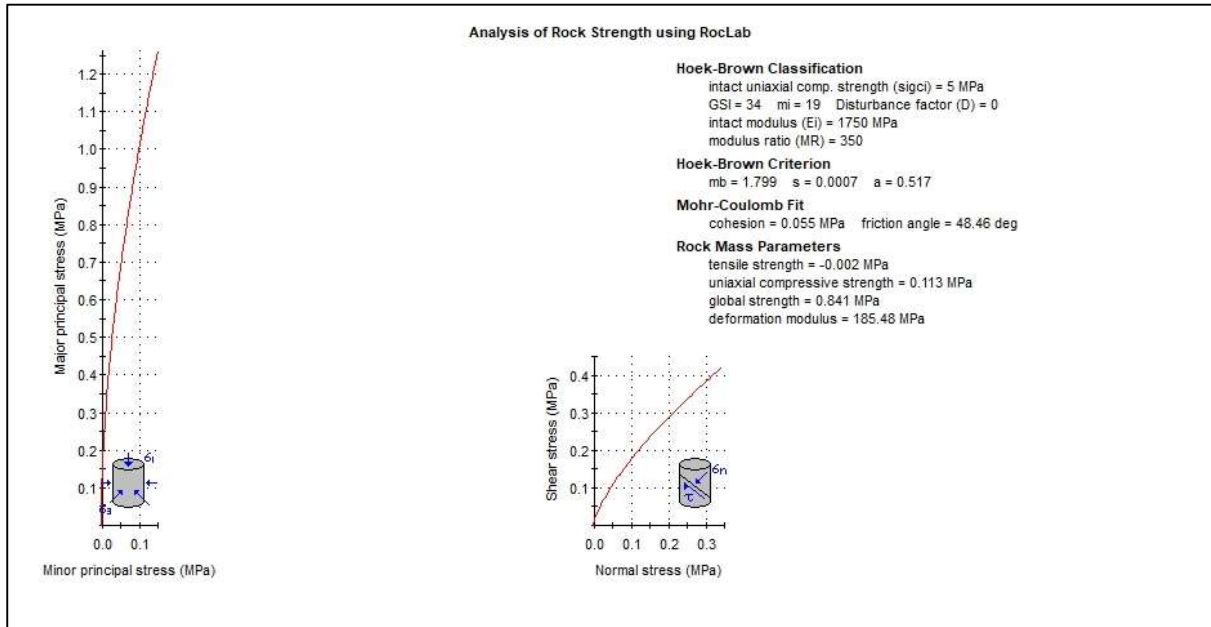
4.3.4.2. Birim Hacim Ağırlık (γ)

Laboratuvar deneyleri sonucunda andezitik tuf birimi için birim hacim ağırlık değeri 20,41 kN/m³ olarak hesaplanmıştır.

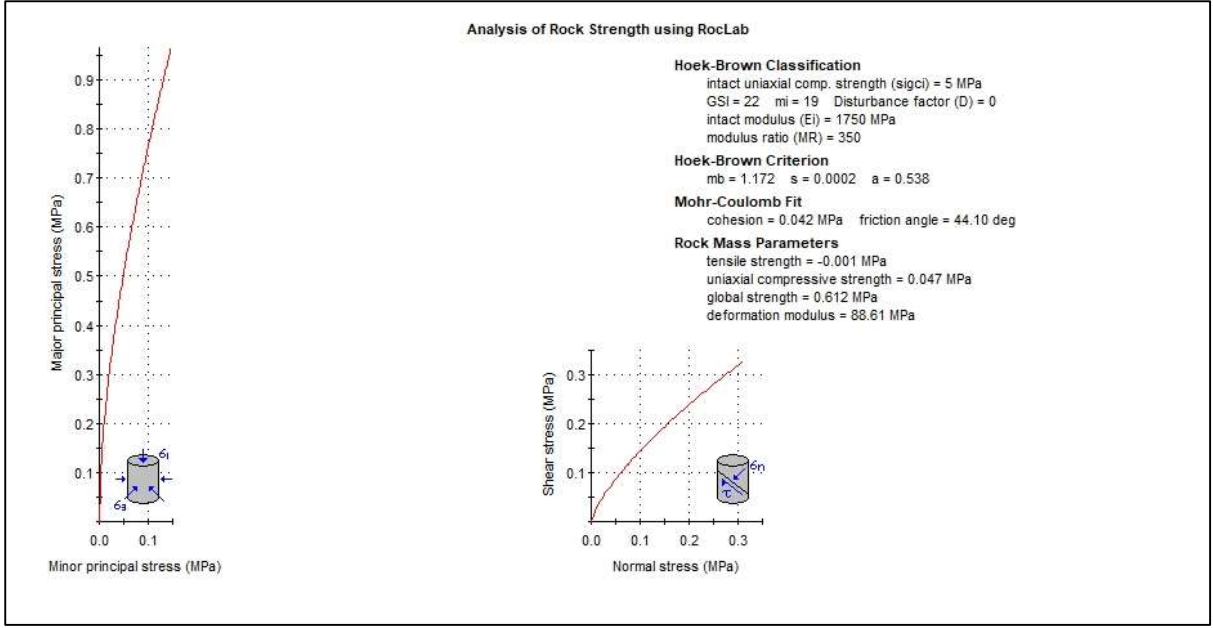
4.3.4.3. Deformasyon Modülü (Em)

Kaya kütleleri üzerinde inşa edilen mühendislik yapılarının tasarımında en kritik faktörlerden biri Deformasyon Modülü'dür. Deformasyon Modülü (Em) elde edilirken çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Kaya kütlesi, hem kaya malzemesini hem de süreksizlikleri barındırdığı için çok büyük boyutlarda örnekler alınması mümkün değildir. Ayrıca, arazide deney yapmanın zorluğu sebebiyle, bu değer belirlenmesinde ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Hoek-Brown yenilme ölçütü [27] kapsamında parametreler Roclab v1.0 [17] programı kullanılarak belirlenmiştir. Sondajlardan elde edilen numunelere ilgili deneyler yapılamadığından laboratuvar verilerinden Elastisite modülü (Ei) elde edilememiştir. Bu nedenle programda girdi olarak MR değeri üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Aynı şekilde mi değeri de, Roclab v1.0 [17] programında önerilen değerlerden seçilmiştir. Buna göre Deformasyon Modülü aşağıdaki eşitlikten hesaplanarak 185.48 MPa bulunmuştur.

$$Em = Ei \times \left(0,02 + \frac{1-D/2}{1+e^{(60+15D-GSI)/11}} \right) \quad [31]$$



Şekil 4.5. Abaktan elde edilen GSI değeri D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.



Şekil 4.6. Rezidüel GSI değeri ve D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.

4.4. Tünel Eksen Parametrelerinin Seçimi

Tünel eksen kesiminde yapılan gözlemler ve sondaj (SK-7) verileri bu kesimdeki hakim birimin Şapçı Volkanitleri olduğunu göstermiştir. Birim genel olarak açık-koyu gri renkli andezitik lav, andezit kökenli pembe-kırmızı renkli piroklastlar, bej renkli tuf, ignimbrit ve yer yer gri renkli andezit karışımlarından oluşmaktadır. Andezitler sert-yer yer çok sert nitelikli, dayanımlı ve orta derecede ayrışmıştır. Tuf, ignimbrit ve andezitik lav seviyeleri ise zayıf dayanımlı, orta-çok ayrışmıştır.

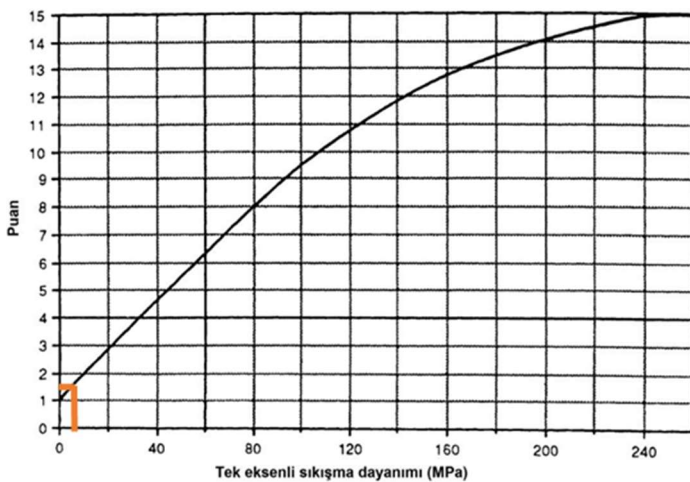


Şekil 4.7. SK-7 sondajı 30.00-45.00 m arası karot sandığı görünümü [1].

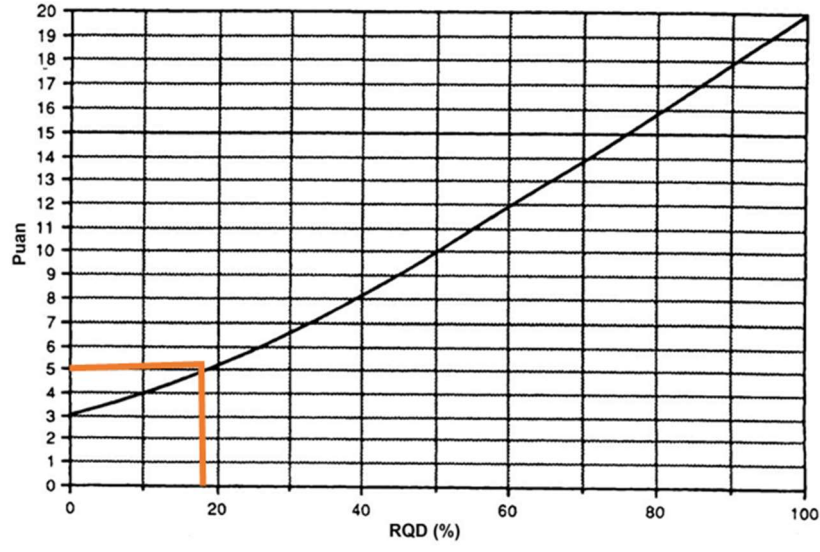
4.4.1. Kaya Kütle Sınıflama Sistemi (RMR)

Tünel eksen bölümünde gerçekleştirilen SK-7 jeoteknik sondajında andezitik tüf birimi tespit edilmiştir. Bu birime ait RMR değeri, Bölüm 4'te sunulan güncellenmiş tablonun kullanımıyla hesaplanmıştır. Bu birimin RMR değeri, Ek'te (EK-1) verilen tablolar vasıtasıyla hesaplanmıştır. Değerlendirmelerde, sağlam kayaların tek eksenli basınç dayanımı, RQD, süreksizliklerin açıklığı, pürüzlülüğü, dolgu durumu ve aralığı gibi faktörler ile eklem yüzeylerinin ve kayacın bozunma seviyeleri karot analizleri ile tespit edilmiştir. Ayrıca, bozunma ve süreksizliklerin sürekliliği (uzunluğu) yüzeye çıkan aynı formasyona ait birimlerden tahmin edilmeye çalışılmıştır.

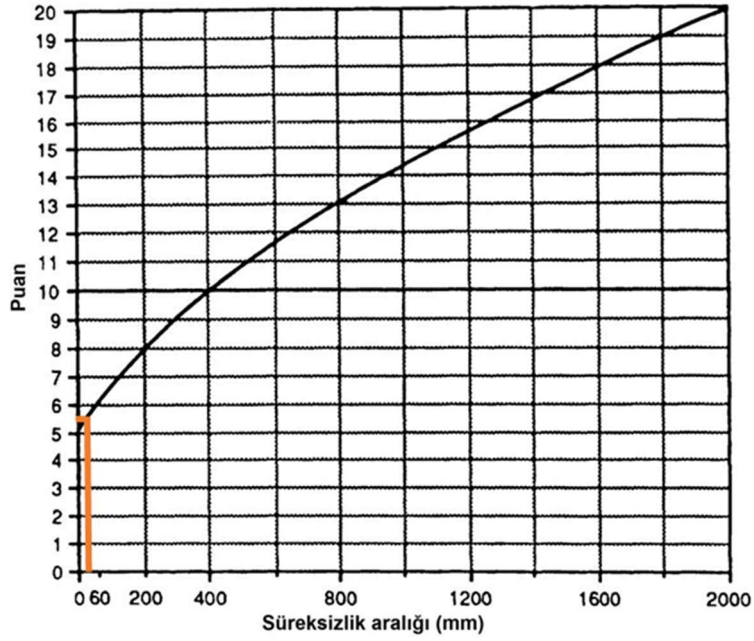
Beş ana parametrenin toplamı sonucunda 'Temel RMR değeri' 37 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.7). Tünel kazısı esnasında düzenli bir süreksizlik yönelimi gözlemlenmediği için süreksizlik yönelimi düzeltme puanı 'orta' olarak değerlendirilmiş ve 5 puanlık bir düzeltme uygulanmıştır. Böylece, 'Düzeltilmiş RMR değeri' 32 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.8. SK-7 için kaya malzemesi dayanım puanları



Şekil 4.9. SK-7 için RQD (%) puanı.



Şekil 4.10. SK-7 için süreksizlik aralığı (mm) puanları.

Çizelge 4.7. Eksen Bölgesi için RMR Kaya Kütle Sınıflandırma Sistemi [32].

1	Kaya Dayanımı, (Mpa)	Nokta Yükleme Dayanımı (Mpa)	>10	4-10	2-4	1-2	Daha düşük değerler için TEB değeri tercih edilir		
		Tek Eksenli Basınç Dayanımı (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	1
	Puan		15	12	7	4	1,5	1	0
2	Kayaç Kalite Göstergesi, RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puan		20	17	13	8	5		
3	Süreksizlik aralığı		>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Puan		20	15	10	8	5,5		
4	Süreksizliklerin uzunluğu		<1m	1-3m	3-10 m	10-20 m	>20m		
	Puan		6	4	2	1	0		
	Süreksizliklerin açığı		Yok	<0.1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	>5 mm		
	Puan		6	5	4	1	0		
	Pürüzlülük		Çok pürüzlü	Pürüzlü	Az pürüzlü	Düz	Kaygan		
	Puan		6	5	3	1	0		
	Dolgu		Yok	Sert Dolgu		Yumuşak Dolgu			
				<5 mm		>5 mm		<5 mm >5 mm	
	Puan		6	4		2		2 0	
	Bozunma		Bozunmamış	Az bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Bozunmuş	Çok bozunmuş		
	Puan		6	5	3	1	0		
5	Yeraltı suyu	10 m tünel uz. gelen su l/m	Yok	< 10 lt/dk	10-25 lt/dk	25-125 lt/dk	> 125 lt/dk		
		Genel su durumu	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı		
	Puan		15	10	7	4	0		
TEMEL RMR			37						

Kaya kütlesi parametrelerinin belirlenmesi aşamasında temel RMR değeri dikkate alınacaktır, ancak kaya sınıfının değerlendirilmesinde nihai RMR değeri kullanılacaktır. Bu doğrultuda, giriş portal kesimindeki kaya "Zayıf Kaya" olarak sınıflandırılmaktadır (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8. RMR Puan durumuna göre kaya kütlesi klasları.

Puan	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Sınıf	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok İyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok Zayıf

Çizelge 4.9. RMR Puan durumuna göre tahmini kaya kütlesi parametreleri.

Sınıf No	I	II	III	IV	V
Ortalama Desteksiz Kalma Süresi	15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	1.5 m açıklık için 10 saat	1 m açıklık için 30 dakika
Kaya Kütlesinin Kohezyonu (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Kaya Kütlesinin İçsel Sürtünme Açısı (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

4.4.2. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Çalışmaya konu alandaki tünel giriş portalında gerçekleştirilen jeoteknik sondajlar, kaya kütlelerinin nitelikleri ve arazide yapılan gözlemler dikkate alınarak, GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) kriterleri hususunda değerlendirmeler yapılmıştır (Çizelge 4.10.).

Arazi gözlemlerinde karşılaşılan kaya; oldukça bloklu, ele alındığında dahi parçalanabilen ve bozunmuş bir yapıdadır. İlgili abakta sahadaki birimin özelliklerine uygun özellikler keşiftirildiğinde GSI değeri 37 olarak hesaplanmıştır.

dayanım parametrelerini belirlemek için, Cai ve arkadaşlarının (2007) [30] önerdiği ilişkiler kullanılmıştır. Bu çerçevede, andezitik tuf birimi sayısal analiz modelinde Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) rezidüel değeri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$GSI_r = GSI e^{(-0.0134GSI)} = 37 e^{(-0.0134 \times 37)}$$

$GSI_r = 30$ olarak bulunmuştur.

4.4.3. Q Sınıflama Sistemi

Tünel eksen bölgesinde karşılaşılabilecek andezitik tuf birimine ait Q kaya sınıfı puanı, aşağıdaki parametreler kullanılarak ve Ek'teki (EK-1) tabloya göre hesaplanmıştır:

RQD Değeri:

Eksen bölgesindeki SK-7 no'lu sondajdan elde edilen RQD değerlerinin ortalaması 18 olarak bulunmuştur. Bu değere karşılık, kaya kalite göstergesi olarak "Çok Zayıf Kaya" olarak tanımlanmıştır.

Süreksizlik Set Sayısı:

Eksen bölgesinde yapılan arazi gözlemleri ve sondajlara göre dört veya daha fazla eklem seti ve bol miktarda, küp şeker benzeri eklemler gözlemlendiği için, J_n değeri 15 olarak seçilmiştir.

Süreksizlik Pürüzlülüğü:

Eksen bölgesindeki kaygan/düzlemsel pürüzlü tanımı için J_r :1.5 değeri uygun görülmüştür.

Süreksizlik Ayrışması:

Eksen kesiminde, siltli veya kumlu-kil sıvımaları ve küçük kil fraksiyonları için J_a :3.0 değeri seçilmiştir.

Eklem Su İndirgeme Faktörü:

“Orta dereceli su gelimi veya basınç, yer yer süreksizliklerdeki dolguların yıkanması” durumuna uygun olarak $J_w:0.66$ değeri kullanılmıştır.

Stres Azaltma Faktörü (SRF):

Kaya kütlesi karakteristikleri ve gömülme derinliği değerlendirildiğinde, tünel eksen kesiminde kazı derinliğinin 50 metreden düşük olması durumu göz önüne alınarak SRF:5 olarak atanmıştır.

Bu parametrelerle birlikte Q değeri şu şekilde hesaplanmıştır:

$$Q=(RQD/J_n)/(J_r/J_a)*(J_w/SRF) \text{ eşitliğinden}$$

$$Q=0,025 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

4.4.4. Tasarıma Esas Parametreler

Tünel giriş kesimi için arazi ve laboratuvar testlerinden elde edilen veriler doğrultusunda, tasarım aşamasında kullanılacak parametreler belirlenecektir.

4.4.4.1. Kaya Malzeme Sabiti (m_i)

Kaya malzeme sabiti olarak adlandırılan m_i değeri, kaya kütleindeki blokların kenetlenme ve dayanım seviyelerini ifade eden bir kaya katsayısıdır. Çalışmanın odaklandığı alandaki kayaç birimleri için m_i değeri, Hoek ve arkadaşlarının (2007) sunduğu tablo ve Roclab 1.0[17] azılımının önerdiği değerler göz önüne alınarak, andezitik tuf için $m_i=19$ olarak atanmıştır.

4.4.4.2. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c)

Tünel eksen kesimindeki andezitik tuf biriminden alınan numunelere uygulanan deneylerden bulunan ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı değeri 5 MPa şeklinde bulunmuştur.

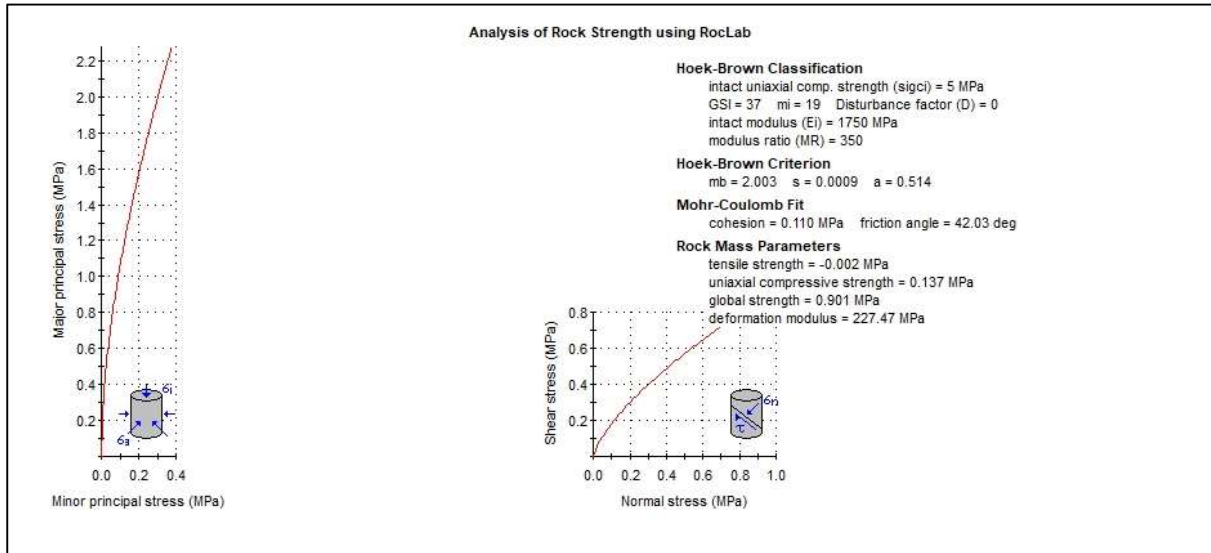
4.4.4.3. Birim Hacim Ağırlık (γ)

Laboratuvar deneyleri sonucunda andezitik tuf birimi için birim hacim ağırlık değeri 19,00 kN/m³ olarak hesaplanmıştır.

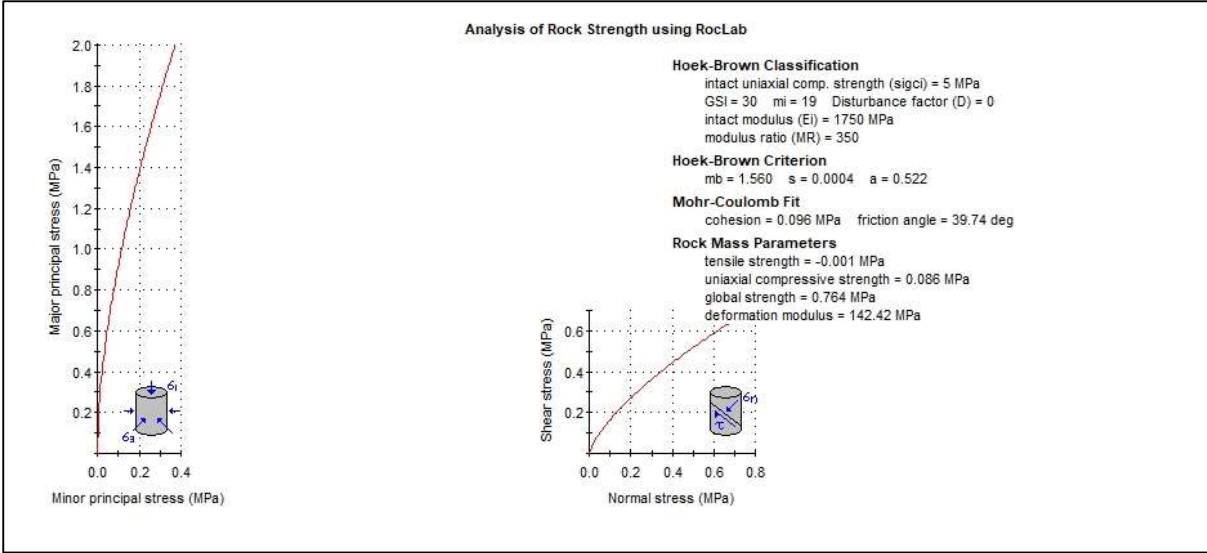
4.4.4.4. Elastisite Modülü (Em)

Kaya kütleleri üzerinde inşa edilen mühendislik yapılarının tasarımında en kritik faktörlerden biri Deformasyon Modülü'dür. Deformasyon Modülü (Em) elde edilirken çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Kaya kütlesi, hem kaya malzemesini hem de süreksizlikleri barındırdığı için çok büyük boyutlarda örnekler alınması mümkün değildir. Ayrıca, arazide deney yapmanın zorluğu sebebiyle, bu değer belirlenmesinde ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Hoek-Brown yenilme ölçütü [29] kapsamında parametreler Roclab v1.0 [20] programı kullanılarak belirlenmiştir. Sondajlardan elde edilen numunelere ilgili deneyler yapılamadığından laboratuvar verilerinden Elastisite Modülü (Ei) elde edilememiştir. Bu nedenle programda girdi olarak MR değeri üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Program çıktılarında, doruk dayanım parametreleri ve artık dayanım parametreleri örselenmiş ve örselenmemiş olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde mi değeri de Roclab v1.0 [20] programında önerilen değerlerden seçilmiştir. Buna göre Deformasyon Modülü aşağıdaki eşitlikten hesaplanarak 227.47 MPa bulunmuştur.

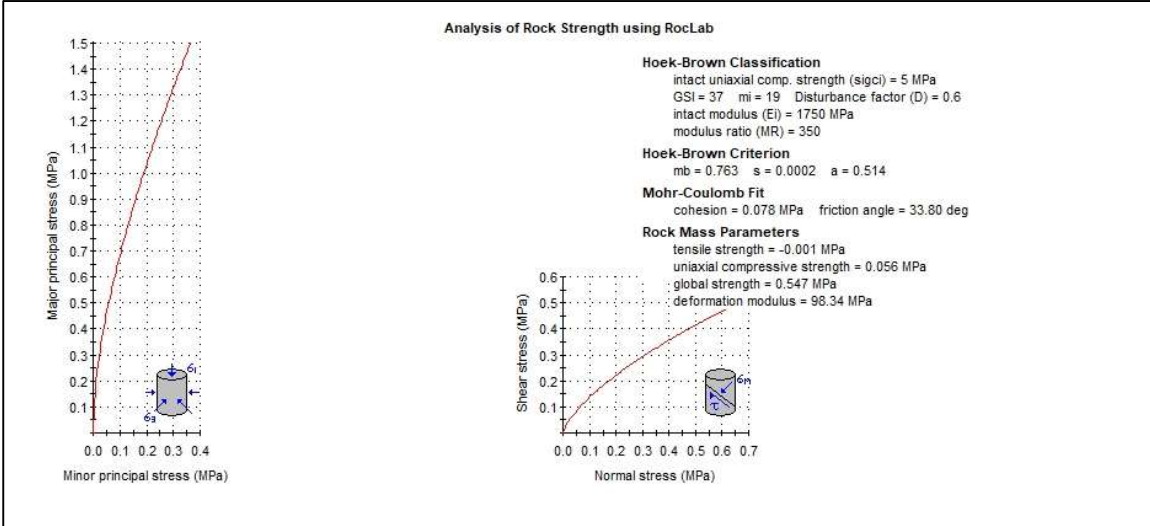
$$Em = Ei \times \left(0,02 + \frac{1-D/2}{1+e^{(60+15D-GSI)/11}} \right) [31]$$



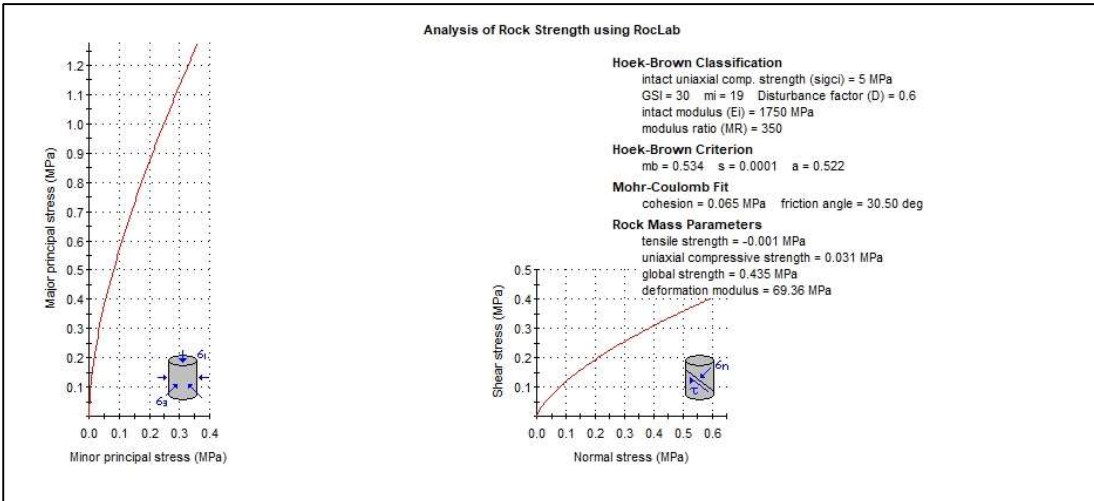
Şekil 4.11. Abaktan elde edilen GSI değeri ve D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.



Şekil 4.12. Rezidüel GSI değeri ve D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.



Şekil 4.13. Abaktan elde edilen GSI değeri ve D=0.6 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.



Şekil 4.14. Rezidüel GSI değeri ve $D=0.6$ örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.

4.5. Tünel Çıkış Portal Bölgesi Parametrelerinin Seçimi

Çıkış kesiminde yapılan arazi gözlemleri ve sondajlar (SK-8 / SK-9) Evciler Tüneli'nin bu kesimde Yürekli Dasiti'nden oluşmuş olduğunu göstermiştir. Birim genel olarak acık-koyu gri renkli, hipokristalin porfirik dokulu, iri plajiyoklas ve kuvars kristalli, biyotit ve feldispat minerallerince zengin dasit ve riyodasitten oluşmaktadır. Taze mostraları sert, dayanımlı ve belirgin eklem sistemlidir. Altere kesimleri ise kahverengi, killi kum karışımı niteliğindedir. Yapılan sondajlarda birimin ileri derecede eklemli olduğu RQD değerlerinin 0 olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.15. SK-9 Sondajı 12.00-26.00m arası

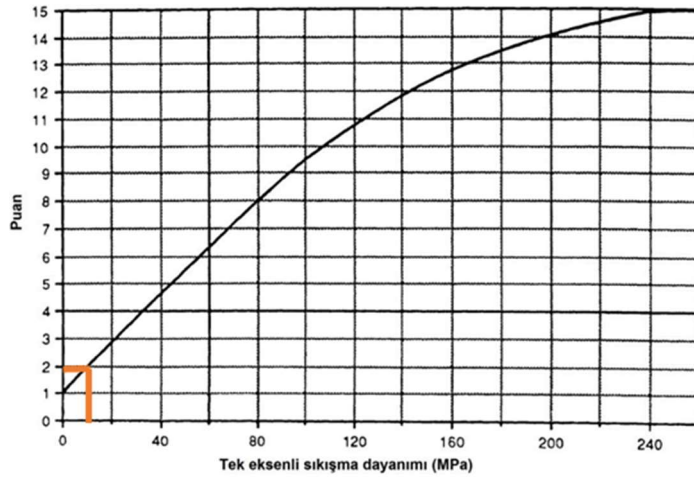


Şekil 4.16. Çıkış kesiminde gözlemlenen Yürekli Dasiti'ne ait mostralar.

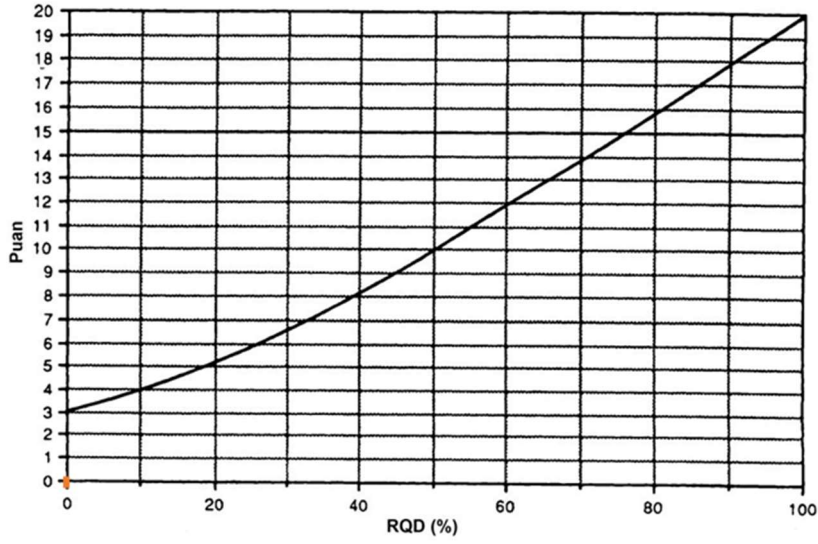
4.5.1. Kaya Kütle Sınıflama Sistemi (RMR)

Tünel çıkışı bölgesinde yapılan jeoteknik sondaj çalışmaları esnasında, SK-8 ve SK-9 numune noktalarında andezitik tüf birimine rastlanmıştır. Bu birime ilişkin RMR değeri, Bölüm 4'te yer alan ve güncellenmiş çizelgeye dayanarak hesaplanmıştır. Bu birimin RMR değeri, Ek'te (EK-1) verilen tablolar vasıtasıyla hesaplanmıştır. Değerlendirmelerde, sağlam kayaların tek eksenli basınç dayanımı, RQD, süreksizliklerin açıklığı, pürüzlülüğü, dolgu durumu ve aralığı gibi faktörler ile eklem yüzeylerinin ve kayacın bozunma seviyeleri karot analizleri ile tespit edilmiştir. Ayrıca, bozunma ve süreksizliklerin sürekliliği (uzunluğu) yüzeye çıkan aynı formasyona ait birimlerden tahmin edilmeye çalışılmıştır.

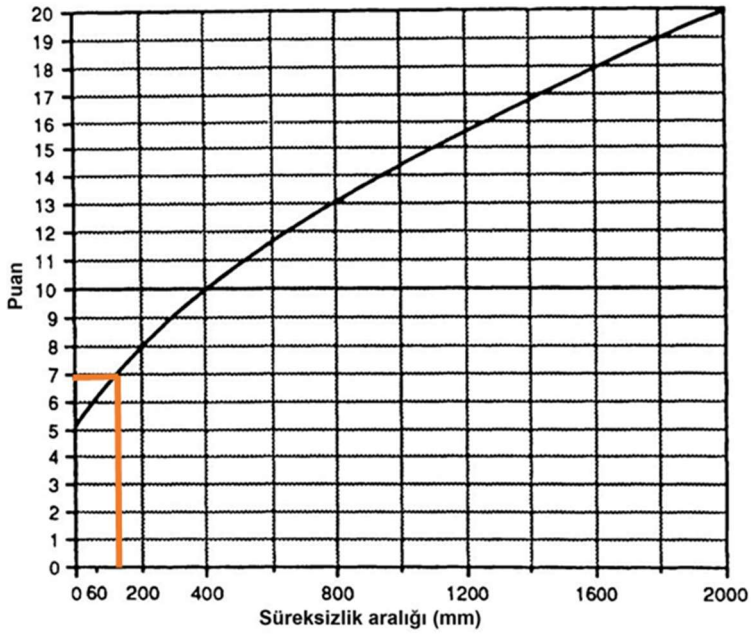
Hesaplamalar sırasında dikkate alınan beş ana parametrenin toplamı ile 'Temel RMR değeri' 32 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.11). Tünel kazısı sırasında sistematik bir süreksizlik yönelimi gözlemlenmediğinden, süreksizlik yönelimi düzeltme puanı 'orta' olarak değerlendirilmiş ve 5 puanlık bir düzeltme yapılmıştır. Bu nedenle, 'Düzeltilmiş RMR değeri' 27 olarak belirlenmiştir."



Şekil 4.17. SK-8 ve SK-9 için kaya malzemesi dayanım puanları.



Şekil 4.18. SK-8 ve SK-9 için RQD (%) puanı.



Şekil 4.19. SK-8 ve SK-9 için süreksizlik aralığı (mm) puanları.

Çizelge 4.11. Çıkış Bölgesi için RMR Kaya Kütle Sınıflandırma Sistemi [32].

1	Kaya Dayanımı (Mpa)	Nokta Yükleme Dayanımı (Mpa)	>10	4-10	2-4	1-2	Daha düşük değerler için TEB değeri tercih edilir		
		Tek Eksenli Basınç Dayanımı (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	1
	Puan		15	12	7	4	2	1	0
2	Kayaç Kalite Göstergesi, RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puan		20	17	13	8	0		
3	Süreksizlik aralığı		>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Puan		20	15	10	8	3		
4	Süreksizliklerin uzunluğu		<1m	1-3m	3-10 m	10-20 m	> 20m		
	Puan		6	4	2	1	0		
	Süreksizliklerin açtığı		Yok	< 0.1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	> 5 mm		
	Puan		6	5	4	1	0		
	Pürüzlülük		Çok pürüzlü	Pürüzlü	Az pürüzlü	Düz	Kaygan		
	Puan		6	5	3	1	0		
5	Dolgu		Yok	Sert Dolgu		Yumuşak Dolgu			
				< 5 mm	>5 mm	< 5 mm	>5 mm		
	Puan		6	4	2	2	0		
5	Bozunma		Bozunmamış	Az bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Bozunmuş	Çok bozunmuş		
	Puan		6	5	3	1	0		
5	Yeraltı suyu		10 m tünel uz. gelen su 1/m	Yok	< 10 lt/dk	10-25 lt/dk	25-125 lt/dk	> 125 lt/dk	
			Genel su durumu	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı	
	Puan		15	10	7	4	0		
TEMEL RMR			32						

Kaya kütle parametrelerinin belirlenmesi aşamasında temel RMR değeri dikkate alınacaktır, ancak kaya sınıfının değerlendirilmesinde nihai RMR değeri kullanılacaktır. Bu doğrultuda, giriş portal kesimindeki kaya "Zayıf Kaya" olarak sınıflandırılmaktadır (Çizelge 4.12.).

Çizelge 4.12. RMR Puan durumuna göre kaya kütlesi sınıfları.

Puan	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Sınıf	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok İyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok Zayıf

Çizelge 4.13. RMR Puan durumuna göre tahmini kaya kütlesi parametreleri.

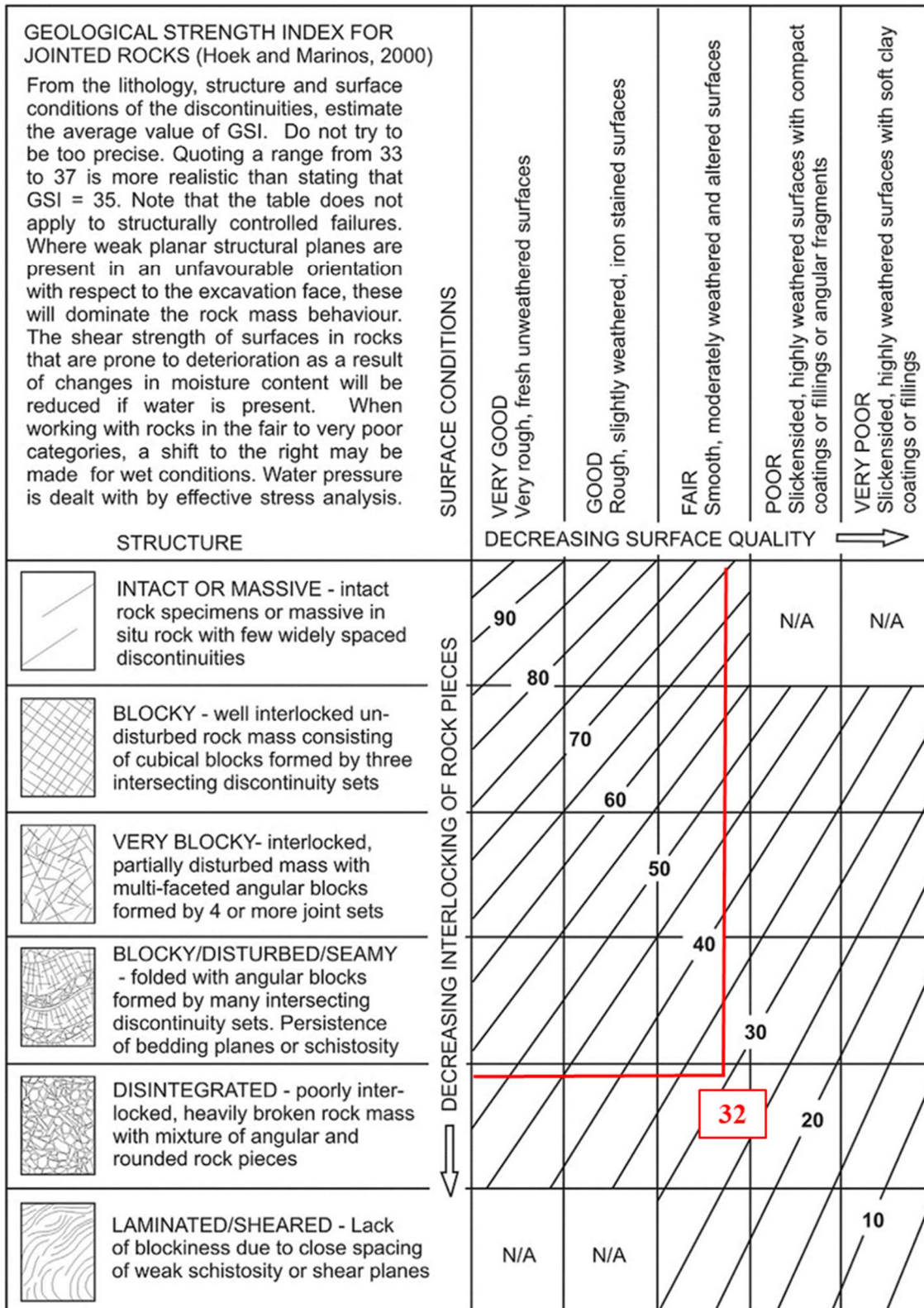
Sınıf No	I	II	III	IV	V
Ortalama Desteksiz Kalabilme Süresi	15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	1.5 m açıklık için 10 saat	1 m açıklık için 30 dakika
Kaya Kütlesinin Kohezyonu (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Kaya Kütlesinin İçsel Sürtünme Açısı (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

4.5.2. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Çalışmaya konu alandaki tünel giriş portalında gerçekleştirilen jeoteknik sondajlar, kaya kütlelerinin nitelikleri ve arazide yapılan gözlemler dikkate alınarak, GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) kriterleri hususunda değerlendirmeler yapılmıştır (Çizelge 4.14).

Arazi gözlemlerinde karşılaşılan kaya; oldukça bloklu, ele alındığında dahi parçalanabilen ve bozunmuş bir yapıdadır. İlgili abakta sahadaki birimin özelliklerine uygun özellikler kesiştirildiğinde GSI değeri 32 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.14. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) diyagramı ile parametrelerin belirlenmesi.



Sayısal analizlerde, kaya ortamındaki kırılma sonrası plastik davranışın dikkate alınması ve gerilme analizlerinde kaya dayanım parametrelerinin yenilme sonrası öngörülmesi gerekmektedir. Kazı sonrası elastoplastik davranışı tanımlamak amacıyla gereken artık

dayanım parametrelerini belirlemek için, Cai ve arkadaşlarının (2007) [30] önerdiği ilişkiler kullanılmıştır. Bu çerçevede, andezitik tuf birimi için sayısal analiz modelinde Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) rezidüel değeri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$GSI_r = GSI e^{(-0.0134GSI)} = 32 e^{(-0.0134 \times 32)}$$

$GSI_r = 21$ olarak bulunmuştur.

4.5.3. Q Sınıflama Sistemi

Tünel çıkış bölgesinde karşılaşılabilecek andezitik tuf birimine ait Q kaya sınıfı puanı, aşağıdaki parametreler kullanılarak ve Ek'teki Tablo'ya göre hesaplanmıştır:

RQD Değeri:

Çıkış bölgesindeki SK-8 ve SK-9 no'lu sondajlardan elde edilen RQD değerlerinin ortalaması 0 olarak bulunmuştur. Bu değere karşılık, kaya kalite göstergesi olarak "Çok Zayıf Kaya" olarak tanımlanmıştır.

Süreksizlik Set Sayısı:

Çıkış bölgesinde yapılan arazi gözlemleri ve sondajlara göre dört veya daha fazla eklem seti ve çok sayıda küp şeker benzeri eklemeler görüldüğünden, J_n değeri 15 olarak seçilmiştir. Portal bölgesi olduğundan, J_n değeri $J_{n \times 2}$ olarak 30'a çıkarılmıştır.

Süreksizlik Pürüzlülüğü:

Çıkış bölgesinde düz ve düzlemsel yüzeylerin tanımlanması yapılabileceğinden, J_r değerinin 1,0 olarak seçilmesi uygun bulunmuştur."

Süreksizlik Ayrışması:

Çıkış kesiminde, siltli veya kumlu-kil kaplamaları ve ince kil parçaları için J_a değeri 3.0 olarak seçilmiştir.

Eklem Su İndirgeme Faktörü:

“Orta derecede su gelişi veya basınç, yer yer süreksizliklerdeki dolguların yıkanması” durumuna uygun olarak $J_w:0.66$ değeri belirlenmiştir.

Stres İndirgeme Faktörü (SRF):

Kaya kütle nitelikleri ve gömülme derinliği göz önüne alındığında, tünel çıkış kesiminde kazı derinliğinin 50 metreden düşük olması durumu dikkate alınarak SRF değeri 2,5 olarak seçilmiştir.

Bu parametrelerle birlikte Q değeri şu şekilde hesaplanmıştır:

$$Q=(RQD/J_n)/(J_r/J_a)*(J_w/SRF) \text{ eşitliğinden}$$

$$Q=0,029 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

4.6. Tasarıma Esas Parametreler

Tünel çıkış kesimi için, arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilere dayanarak tasarım aşamasında kullanılacak parametreler belirlenecektir."

4.6.1. Kaya Malzeme Sabiti (m_i)

m_i değeri, kaya malzeme sabiti olarak, kaya kütledeki blokların kenetlenme ve dayanım özelliklerini temsil eder. Çalışma bölgesindeki kayaç birimleri için m_i değeri, Hoek ve arkadaşlarının (2007) tablosuna ve Roclab 1.0 [17] programının tavsiyelerine dayanarak, andezitik tüf için $m_i=15$ olarak belirlenmiştir.

4.6.2. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c)

Tünel çıkış kesiminde andezitik tüf biriminden alınan örneklerle yapılan deneyler sonucunda ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı değeri 10 MPa olarak belirlenmiştir.

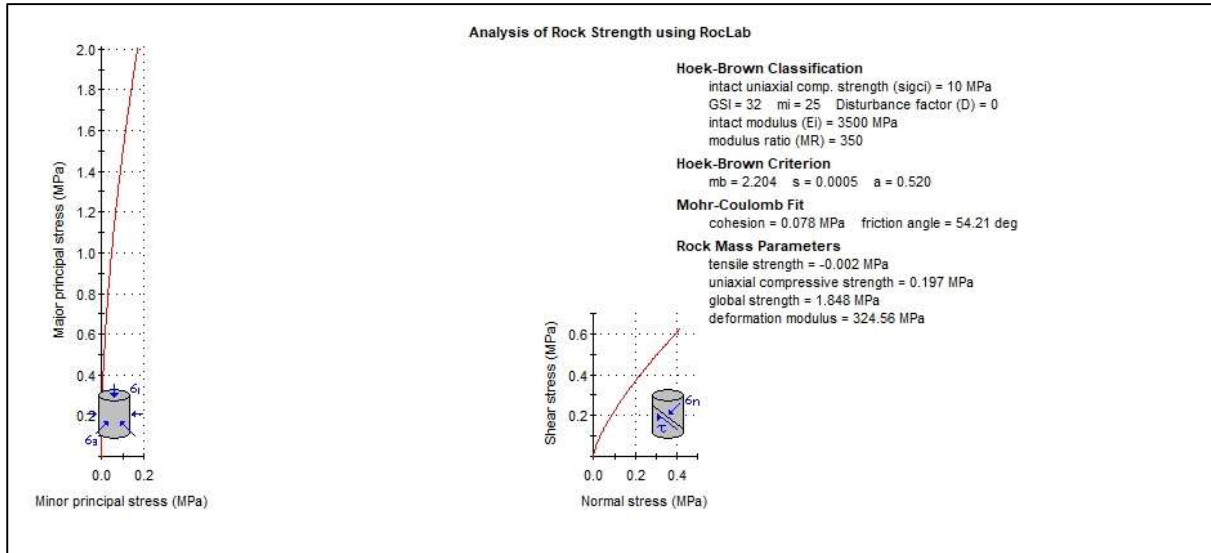
4.6.3. Birim Hacim Ağırlık (γ)

Laboratuvar deneyleri sonucunda andezitik tüf birimi için birim hacim ağırlık değeri 22,60 kN/m³ olarak hesaplanmıştır.

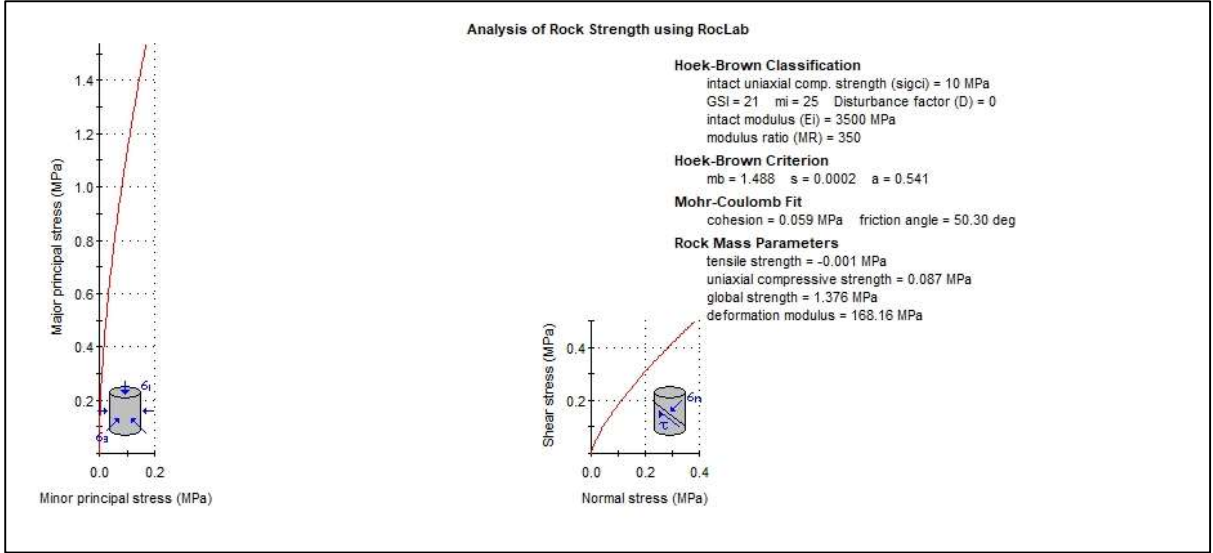
4.6.4. Elastisite Modülü (Em)

Kaya kütleleri üzerinde inşa edilen mühendislik yapılarının tasarımında en kritik faktörlerden biri Deformasyon Modülü'dür. Deformasyon Modülü (Em) elde edilirken çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Kaya kütlesi, hem kaya malzemesini hem de süreksizlikleri barındırdığı için çok büyük boyutlarda örnekler alınması mümkün değildir. Ayrıca, arazide deney yapmanın zorluğu sebebiyle, bu değer belirlenmesinde ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Hoek-Brown yenilme ölçütü [29] kapsamında parametreler Roclab v1.0 [20] programı kullanılarak belirlenmiştir. Sondajlardan elde edilen numunelere ilgili deneyler yapılamadığından laboratuvar verilerinden Elastisite Modülü (Ei) elde edilememiştir. Bu nedenle programda girdi olarak MR değeri üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Aynı şekilde mi değeri de Roclab v1.0 [20] programında önerilen değerlerden seçilmiştir. Buna göre Deformasyon Modülü aşağıdaki eşitlikten hesaplanarak 324.56 MPa bulunmuştur.

$$Em = Ei \times \left(0,02 + \frac{1-D/2}{1+e^{(60+15D-GS)/11}} \right) \quad [31]$$



Şekil 4.20. Abaktan seçilen GSI değeri ve D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler.



Şekil 4.21. Rezidüel GSI değeri ve D=0 örselenme faktörüne göre elde edilen parametreler

Tünel; Giriş Portal kesimi, Eksen kesimi ve Çıkış Portal kesimi olmak üzere 3 kesimde incelenerek bu 3 kesim için tasarıma esas parametreler elde edilmiştir. Elde edilen bu parametreler (Çizelge 4.15.) nümerik analizin yapılacağı Flac 3d programında girdi olarak kullanılacaklardır.

Çizelge 4.15. Tünel giriş, eksen ve çıkış kesimleri tasarıma esas özet parametreler.

Kesit	Tünel Giriş Portal Kesimi	Tünel Eksen Kesimi	Tünel Çıkış Portal Kesimi
Km Aralığı	Km: 38+627.18-38+680 (Sol Tüp) Km: 38+633.17-38+680 (Sağ Tüp)	Km: 38+680-38+785 (Sol Tüp) Km: 38+680-38+780 (Sağ Tüp)	Km: 38+785-38+835 (Sol Tüp) Km: 38+780-38+820 (Sağ Tüp)
Q Değeri	0,066	0,025	0,029
GSI Değeri	34	37	32
RMR Değeri	31	32	27
NATM Sınıfı	C2	B3	C2
Kaya Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	20,41	19	22,6
Tek Eksenli Basınç Dayanımı, σ_{ci}	5	5	10
m_i Değeri	19	19	25
Örselenme Faktörü, D	0	0,6	0

Çizelge 4.16. Tünel kesimlerine ait elde edilen parametreler.

Kesit		Tünel Giriş Portal Kesimi	Tünel Eksen Kesimi	Tünel Çıkış Portal Kesimi
Örtü Kalınlığı (m)		10	40	0-15
NATM Kazı ve Destek Sınıfı		C2	B3	C2
Dayanım Hoek-Brown parametreleri ölçütü	mb	1,799	2,003	2,204
	s	0,0007	0,0009	0,0005
	a	0,517	0,514	0,520
Deformasyon Modülü (GPa)		0,185	0,98	0,324

4.7. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ve Destek Sistemi (NATM)

Tünel açma sürecinde zemin deformasyonları ve gerilme değişiklikleri, uygulanan kazı yöntemine bağlı olarak farklılık gösterir. 'Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi,' tünel kazı ve destek tasarımında çeşitli avantajlar sunar. Bu avantajlar şunlardır:

- Kaya kütlelerinin doğal dayanımını en üst düzeyde kullanarak ve destek sistemlerini zamanında uygulayarak kazı sürecini optimize etmek,
- Rijit destek sistemleri yerine, kaya deformasyonlarına ve kemerleşmeye uyum sağlayan esnek destek sistemleri kullanarak, destek sistemi ile kazı yüzeyi arasında tam uyum sağlamak,
- Püskürtme beton, hasır çelik, kaya bulunu ve/veya hafif çelik iksa gibi malzemelerle aşırı gevşeme ve deformasyonları hızlı bir şekilde önlemek,
- Sürekli deformasyon ölçümleri yaparak kazı ve destek sistemlerini izlemek ve gerekirse kademeli kazı veya farklı destek sınıflarına geçiş sağlamak,
- Zayıf zemin veya kayaçlarda, taşıyıcı halkayı zamanında kapatarak destek sisteminin etkinliğini artırmak,
- Kazı sırasında yapılan gözlem ve ölçümlere dayanarak kaya sınıfı ve destek sistemlerinin ödeme esaslarını belirlemede esneklik sağlamak.

Yeni Avusturya Yöntemi'nin ana prensibi, kaya kütlelerinin kendi ağırlığını mümkün olduğunca taşımaya devam etmesine izin vermektir. Kazı sırasında belirli bir seviyede deformasyona izin verilerek, destek sisteminin üzerindeki yükler önemli ölçüde azaltılabilir. Kontrol altında serbest bırakılan kaya kütlesi, kemerleşme etkisi ile yükü yanlara aktarır ve çevresinde bir taşıma halkası oluşturarak maksimum taşıma kapasitesini kullanır. Tünel aynasında üç boyutlu olan kemerleşme, tünelden uzaklaştıkça iki boyutlu bir yapıya dönüşür.

Destek sistemleri, tünel üzerindeki örtü yükünü taşımak yerine, kazı çevresindeki taşıyıcı halkayı koruyarak plastik deformasyonları kontrol eder ve kayanın aşırı gevşemesini engeller. Bu nedenle, destek sisteminin kaya deformasyonlarına uyum sağlayacak şekilde esnek olması, yöntemin en önemli gereksinimlerinden biridir. Kaya kütlesi kendi ağırlığını taşıyamayacak kadar zayıfsa, kullanılan destek sistemi, kaya taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra ek iç basıncı sağlayarak dengeyi sağlar.

4.7.1. Birincil Destekleme Sistemi

NATM'ın ana prensibi, tünel kesitini çevreleyen kaya kütesinin yük taşıyan bir yapı elemanı olarak işlev görmesini sağlamaktır. Bu yöntem, ilk destek sisteminin uygulanmasından önce ve sonra sınırlı bir deformasyona izin verilmesini öngörür. NATM'ın en kritik özelliği, desteğin doğru zamanda sağlanmasıdır. Eğer destek sistemi deformasyona hiç izin verilmeden uygulanırsa, bu durum destek sisteminin aşırı yüklenmesine ve ekonomik verimliliğin düşmesine yol açar. Diğer yandan, aşırı deformasyonlar ve zemin bozulmaları ortaya çıkabilir.

Bu yöntemde, ilk aşamada (birincil) destek elemanları inşa edildikten sonra, zemin deformasyonları ve hareketlerinin durması beklenir. Ardından, ikincil destekleme sistemi inşa edilir. Bu yaklaşım, destek sistemlerinin etkinliğini ve ekonomik verimliliğini artırmayı hedefler.

4.7.2. Birincil Destekleme Sisteminde Kullanılan Elemanlar

Tünel destekleme sistemi genellikle iki ana bileşenden oluşur: birincil destekleme ve ikincil destekleme sistemleri. Birincil destekleme elemanları, mevcut kaya sınıfı ve jeolojik koşullara bağlı olarak çeşitli sistemlerden ve bunların kombinasyonlarından seçilir. Bu sistemler, tünel açma sürecinde karşılaşılan koşullara göre özelleştirilir ve uygulanır.

4.7.2.1. Püskürtme Betonu

Püskürtme beton, çevre kayanın gevşemesini engelleyen önemli bir taşıyıcı elemandır. Destekleme elemanları arasında en yüksek destek basıncını sağlayan püskürtme betondur.

4.7.2.2. Çelik Hasır

Beton tabakaları arasında, püskürtme beton kaplamanın yapısal ve statik bütünlüğünü sağlamak için çelik hasır kullanılacaktır. Çelik hasır, püskürtme beton ile kaya arasındaki bağı güçlendirilmesine, betonun sertleşme süresince stabilitesinin korunmasına, kayma mukavemetinin artırılmasına ve istenmeyen çatlakların önlenmesine yardımcı olur.

4.7.2.3. Çelik İksa

Çelik iksa, taze püskürtme betonun yük taşımaya başlamadan önce anında destek sağlar ve betonun mukavemet kazanmasının ardından çelik hasırla birlikte güçlendirici bir donatı oluşturur. Ayrıca, bu sistem, işçiler için ek bir psikolojik güvenlik unsuru sunar.

4.7.2.4. Süren Boruları veya Demir Çubukları

Ön kazıklı desteklemenin amacı, tünel aynası çevresinde şemsiyelenme vasıtasıyla destek sağlamaktır. Tünellerin tavanının tamamen ayrılmış kaya kütlesi içerisinde yer alması nedeniyle, sürenlerin önemi büyüktür.

4.7.2.5. Kaya Bulonları

Kaya bulonları, standart destekleme sisteminin bir parçası olarak düzenli bir şekilde kullanılır. Bu bulonlar, kayma mukavemetini artırarak kaya kütlelerinin dayanımını ve kalitesini yükseltir, tünel içerisindeki deformasyonları azaltır ve kaya dökülmelerini engeller. Kaya bulonlarının uzunlukları, tünel çevresinde oluşan plastik bölgenin yaklaşık 2 metre ötesine uzanacak şekilde belirlenmelidir.

4.7.3. İkincil Destekleme Sistemi

Tünel destekleme sistemleri genellikle birincil destekleme prensiplerine dayanarak tasarlanır; ancak, çeşitli nedenlerle ikincil destekleme sistemlerine de ihtiyaç duyulmaktadır:

- **Stabilite:** Püskürtme beton zamanla mukavemetini yitirebilir ve zeminlerin sıkışması veya uzun vadeli deformasyonlar ek yükler yaratabilir.
- **Su Geçirimsizliği:** Su sızıntılarını engellemek amacıyla ek önlemler gerekebilir.
- **İşletme Ekonomisi:** Sürtünme azalması, araç ve havalandırma sistemlerinin verimliliğini artırabilir.
- **Görünüm:** Tünelin estetik ve bakım gereksinimlerini karşılamak için.

4.8. Tünel Kazısının Sayısal Modellemesi

4.8.1. Tasarım Yöntemi ve Esasları

Yer altı yapılarında, değişik derinliklerde ve çeşitli davranışlar sergileyen jeolojik birimlerin bulunması, homojen olmayan üç boyutlu bir anizotropik gerilme ortamı oluşturur ve bu durum, tünel modelleme tasarımında birçok belirsizliği getirir. Tünel kazı yapılması sırasında ortaya çıkabilecek ikincil gerilmelerin dağılımını gerçek duruma yakın şekilde modellemek, sağlıklı bir tünel tasarımı yapılabilmesi için gereklidir. Ancak, gerçeğe uygun bir model oluştururken bazı varsayımların yapılması zorunludur. Farklı jeoteknik birimlerin jeoteknik ve jeomekanik parametreleri dikkate alınarak, kazı çevresindeki deformasyonlar ve uygun destek sistemleri sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu varsayımlar kullanılarak modellenilebilir.

Yer altı yapılarının tasarımı sırasında, yol güzergahı ve çevresindeki tüm formasyonlar, eklem takımları, fay hatları, kayaçların yönelimi ve eğimleri, zemin veya kayaçların parametrelerinin dağılımı, yer altı suyu seviyeleri gibi birçok faktörün durumu, konumu ve sayısal değerleri hakkında kapsamlı bilgi toplamak amacıyla jeoteknik etütler, saha ve laboratuvar çalışmaları yapılır. Ancak, kazı yöntemi ve destekleme önlemleri hakkında kesin kararlar yalnızca tünel kazısı sırasında sahada elde edilen verilerle verilebilir [33].

Tünel kazısını desteklemek için gerekli tasarım, çevredeki gerilmelerin üç boyutlu (x, y ve z) yeniden dağılımını ve kayaçların zamanla zayıflamasını dikkate alan dört boyutlu bir problem olarak ele alınmalıdır. Bu karmaşık tasarım süreci, mevcut deneyimler ve bilimsel-teknolojik gelişmelere dayalı olarak çeşitli yöntemlerle uygulanır. Bu çalışmada, analizler genellikle "Genelleştirilmiş Hoek-Brown" kriterine (Hoek, Carranza-Torres & Corkum, 2002) dayalı elastoplastik malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir[34].

4.8.2. Tünel Destek Sistemlerinin Analitik Çözümler ve Nümerik Analizler İle Belirlenmesi

Tünel destek sistemlerinin belirlenmesi için zemin-destek reaksiyon eğrilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Hoek ve Brown (1980) ile Hoek (2012) çalışmalarında sunulan eşitlikler kullanılmıştır (Çizelge 4.17.).

Çizelge 4.17. Kapalı sistem eşitlikleri (*Hoek ve Brown 1980; Hoek, 2012*)

Eşitlik	
σ_{cm} (1)	$\sigma_{cm} = \frac{2c' \cos \theta'}{1 - \sin \theta'}$
k (2)	$k = \frac{1 + \sin \theta'}{1 - \sin \theta'}$
P_{cr} (3)	$P_{cr} = (2P_0 - \sigma_{cm}) / (1 + k)$
u_{is} (4)	$u_{is} = r_0(1 + \nu)(p_0 - p_i) / E_m$
r_p ($p_i = 0$) (5)	$r_p = r_0 \left[\frac{2(p_0(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{k-1}}$
u_{ip} (6)	$u_{ip} = \left(\frac{r_0(1 + \theta)}{E_m} \right) [2(1 - \theta)(p_0 - p_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^2 - (1 - 2\theta)(p_0 - p_i)]$
ε (7)	$\varepsilon \% = \left(\frac{u_i}{r_0} \right) \times 100 = [0.2 - 0.25 \left(\frac{p_i}{p_0} \right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{2.4} \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{-2}]$
r_p (p_i) (8)	$\left(\frac{r_p}{r_0} \right) = (1.25 - 0.625 \left(\frac{p_i}{p_0} \right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{0.57})$
r_e = Plastik zon yarıçapı	σ'_1 = yenilme anındaki efektif aksenal gerilme
u_i = Yerdeğiştirme	σ'_3 = Efektif Yanal gerilme
r_e = Tünel yarıçapı	c' = kohezyon
p_i = Tahkimat basıncı	θ' = içsel sürtünme açısı
p_0 = arazi gerilmesi	ν = Poisson oranı
σ_{cm} = Kaya kütle dayanımı	
E_m = Deformasyon modülü	

Ayrıca destek sistemlerinin tahkimat basınçlarını belirlenmesi amacıyla Hoek ve Brown (1980) ile Brady ve Brown (1985) çalışmalarında sunulan eşitlikler dikkate alınmıştır (Çizelge 4.18.).

Çizelge 4.18. Tahkimat kapasite formülleri (Hoek ve Brown 1980; Brady ve Brown, 1985)

Destek sistemi özellikleri	Denklem
<p>Çelik iksa</p> <p>σ_{ys}: Akma dayanımı</p> <p>E_s: Elastisite modülü</p> <p>A_s: Kesit alanı (m^2)</p> <p>s_l: Tünel eksenine boyunca mesafe (m)</p> <p>r_o: Tünel yarıçapı (m)</p> <p>P_{ssmaks}: Maksimum destek basıncı</p> <p>K_{ss}: Rijitlik</p>	<p>$P_{ssmaks}=(A_s\sigma_{ys})/(s_l r_o^2)$ (9)</p> <p>$K_{ss}=(E_s A_s)/(s_l r_o^2)$ (10)</p>
<p>Kaya bulonu</p> <p>d_b: Bulon çapı (m)</p> <p>l: Bulon veya ankrajın serbest uzunluğu (m)</p> <p>E_s: Bulon Elastisite modülü</p> <p>s_c: Çevresel yönde bulon aralığı(m)</p> <p>s_l: Boyuna yönde bulon aralığı (m)</p> <p>T_{bf}: Bulon nihai yük</p> <p>P_{sbmaks}: Maksimum destek basıncı</p> <p>K_{ss}: Rijitlik</p>	<p>$P_{sbmaks}=(T_{bf})/(s_l s_c)$ (11)</p> <p>$K_{sb}=(E_s \pi d_b^2)/(4 s_l s_c)$ (12)</p>
<p>Püskürtme beton</p> <p>σ_{cc}: Tek eksenli basınç dayanımı</p> <p>E_c: Elastisite modülü</p> <p>ν: Poisson oranı</p> <p>T_c: Kaplama kalınlığı (m)</p> <p>R_o: Tünel yarıçapı (m)</p> <p>P_{scmaks}: Maksimum destek basıncı</p> <p>K_{ss}: Rijitlik</p>	<p>$P_{scmaks}=(\sigma_{cc}/2)(1-(r_o-t_c)/r_o^2)$ (13)</p> <p>$K_{sc}=(E_c(r_o^2-(r_o-t_c)^2))/(2(1-\nu^2)/(r_o t_c r_o^2)$ (14)</p>

Buna ek olarak, tünelde boyuna deformasyon eğrilerinin de belirlenmesi önem kazanmaktadır. Belirlenen her bir kaya sınıfı içinde tünel ayna deformasyon eğrisi ile Vlachopoulos ve Diederichs (2009) eşitlikleri çizdirilmiştir (Eşitlik 4.1.).

$$u_0^* = \frac{u_0}{u_{max}} = \frac{1}{3} e^{-0.15R^*}$$

$$u^* = \frac{u}{u_{max}} = u_0^* e^{X^*} \quad \text{for } X^* \leq 0 \text{ (kaya kütleinde)} \quad \text{Eşitlik 4.1.}$$

$$u^* = 1 - (1 - u_0^*) e^{-\frac{3X^*}{2R^*}} \quad \text{for } X^* \geq 0 \text{ (tünelde)}$$

$$R^* = R_p/R_T$$

Km:38+627.18 ile km:37+670 arasının değerlendirilmesi

Tünel giriş portal ile km:68+627 arasında geçilen kesimler için destek sistemi detayları Çizelge 4.19’da verilmektedir. Çizelge 4.19’da C4 sınıfında kullanılan destek sistemlerine ait tahkimat basınçları verilmiştir. Ayrıca yapılan hesaplamalar ile tünelde meydana gelen deformasyonlar, plastik zon, ayna deformasyonu ve kritik basınç ise Çizelge 4.20’de sunulmuştur. Bu kesimde örtü yüksekliği ortalama 15 m’dir. Bu kesimde arazi gerilmesi $P_0=0.020 \times 15=0,3$ MPa olarak hesaplanmış olup, kaya kütle dayanımı 0,1 MPa ve σ_{cm}/P_0 oranı ise 0,33 olarak elde edilmiştir. Tünelin bu bölümünde kritik tünel basıncı P_{cr} , 0,10 MPa olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, tünel iç yüzeyinde ölçülen yer değiştirme miktarı 1,8 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.22). Desteksiz durumda plastik zon yarıçapı ise 10,29 m ye kadar çıkmaktadır (Şekil 4.23). Ayrıca tünelde desteksiz durumdaki deformasyonlar incelendiğinde tünel aynasında 1,8 cm iken, tünel aynasının 1 m gerisinde bu değer 2,4 cm kadar çıkarken, tünel kazı aynasının 1 m önünde ise 1,5 cm elde edilmiştir. Tünel deformasyonları tünel aynasının 20 m gerisinde sabitlenmeden devam edeceği görülmektedir. Bu durum tünel ayna ve tavan stabilitesinin çok kritik olduğunu göstermektedir. Zemin-destek reaksiyon eğrilerinin çizdirildiği durumda ise, oluşan deformasyonların çok hızlı gelişeceği düşünülerek tünelde deformasyonlara izin verilmeden desteklerin yerleştirilmesi gerekmektedir. Aksi durumda, tünelde bir gevşeme zonu veya rahatlamaya sebebiyet verildiğinde, zemin reaksiyon eğrisi çok hızlı gelişeceğinden tünelde göçüklere sebebiyet verilecektir. Bu nedenle zemin-destek reaksiyon eğrisinde destekler yerleştirildiği durumda tünelde oluşacak deformasyonlar (u_{iy}) 1 cm olarak alınmıştır. Bu deformasyonların sınırlanması için de tünel ayna ve tavan stabilitesinin sağlanarak destekler yerleşene kadar deformasyonlar sınırlandırılmıştır.

Çizelge 4.19. C2 sınıfı destek sistemi detayları.

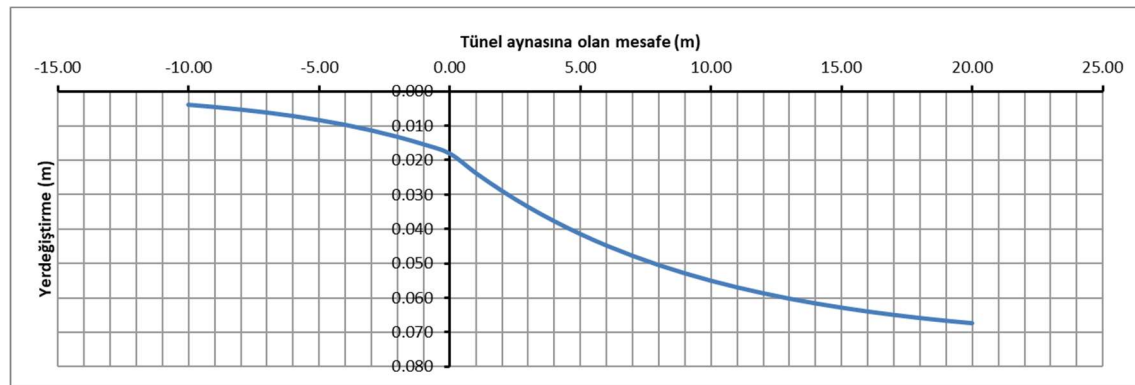
Destek Sınıfı	Püskürtme Beton (C25/30)		Çelik İksa (IPN 200)		Bulon (Ø28 mm)	
C2	t (m)	0.30	s (m)	1.0	s (m)	1.00x1.00
	E	26700	H (m)	0.20	L (m)	6.00
	v	0.2	A (m ²)	0.00334	D (mm)	32
	f _{ck}	25	I (m ⁴)	21.4e-006	E	2.00E+05
	f _{ctk}	2.5	E	2.00E+05	σ _t	0.225
	γ (MN/m ³)	0.024	v	0.15	σ _{tires}	0.0225
			f _{yd} (MPa)	365	Tür	IBO
			σ _{tk}	420	Tip	Fully Bonded

Çizelge 4.20. Destek Sistemi Basınçları

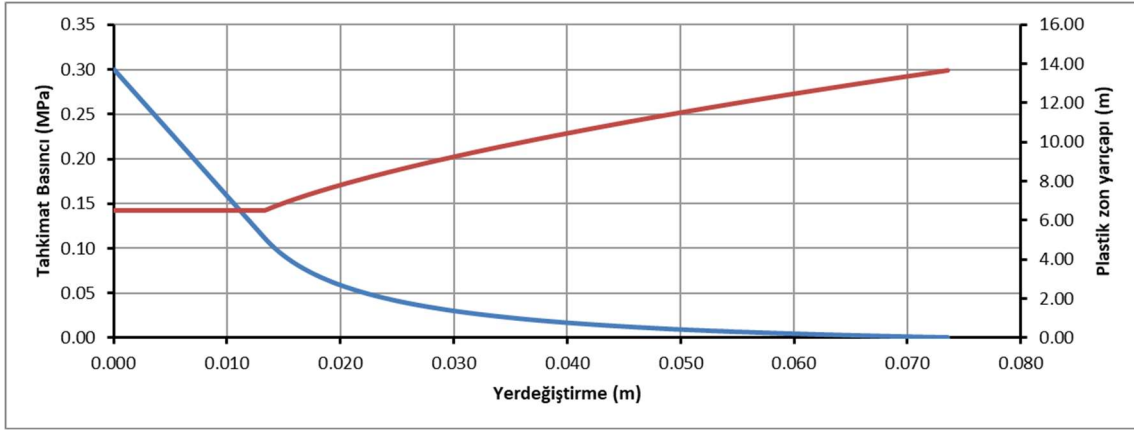
	p _{scmax}	K _{sc} (MPa/m)	u _{icmax} (m)
Shotcrete (ds=30 cm)	1.13	227	0.090
Steel rib (I 200)	0.187	16.36	0.096
Rock bolts	0.28	27.47	0.0951

Çizelge 4.21. Analitik çözüm sonuçları.

	σ _{cm}	P ₀	σ _{cm} /P ₀	r _p (m)	u _i (m)	u _{if} (m)	P _{cr}
C2 kaya sınıfı	0.16	0.3	0.13	13.65	0.07	0.18	0.11

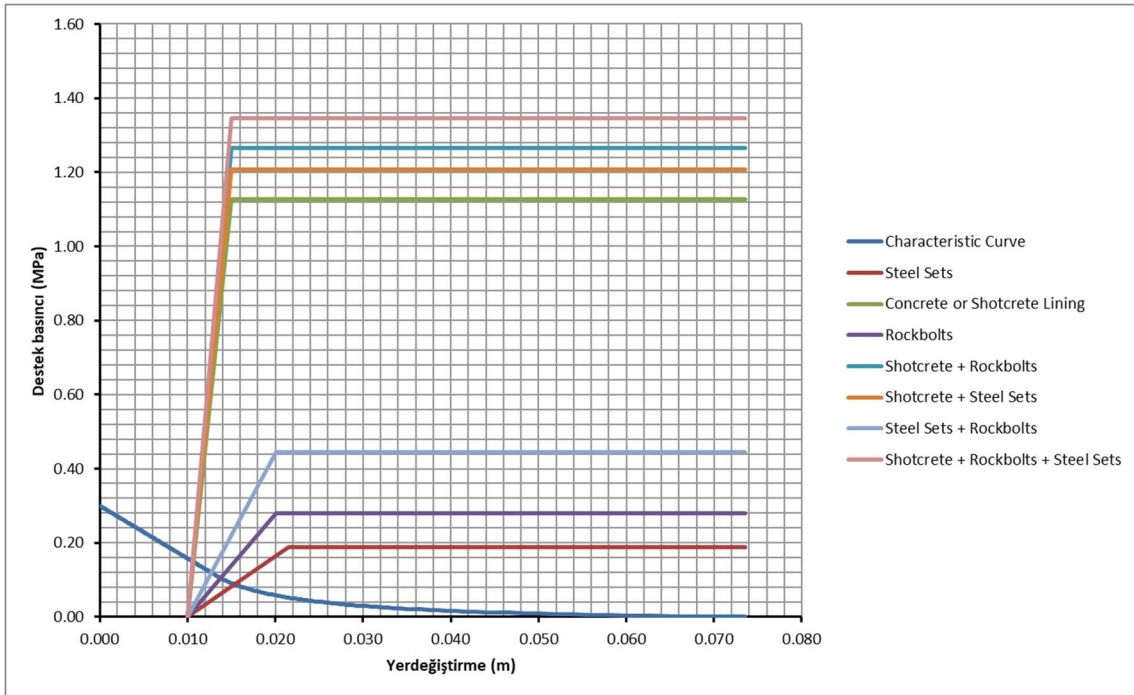


Şekil 4.22. Tünel boyuna deformasyon eğrisi-C2 sınıfı (Giriş kesimi)



— Plastik zon yarıçapı — Zemin karakteristik eğrisi

Şekil 4.23. Zemin karakteristik eğrisi ve plastik zon yarıçapı



Şekil 4.24. Zemin-destek reaksiyon eğrileri.

Km:38+770 ile çıkış potral kesiminin değerlendirilmesi

Km:38+770 ile çıkış portal kesimi için destek sistemi detayları Çizelge 4.22’de verilmektedir. Çizelge 4.23’te C4 sınıfında kullanılan destek sistemlerine ait tahkimat basınçları verilmiştir. Ayrıca yapılan hesaplamalar ile tünelde meydana gelen deformasyonlar, plastik zon, ayna deformasyonu ve kritik basınç ise Çizelge 4.45’te sunulmuştur. Bu kesimde örtü yükseliği ortalama 15 m’dir. Bu kesimde arazi gerilmesi $P_o=0.0225 \times 15=0,33$ MPa olarak hesaplanmıştır.

olup, kaya kütle dayanımı 0,1 MPa ve σ_{cm}/P_0 oranı ise 0,29 olarak elde edilmiştir. Bu tünel bölgesinde kritik tünel basıncı P_{cr} 0,10 MPa olarak ölçülmüş olup, tünel aynasında gözlenen yer değiştirme ise 1 cm olarak bulunmuştur (Şekil 4.25). Desteksiz durumda plastik zon yarıçapı ise 9 m ye kadar çıkmaktadır (Şekil 4.26). Ayrıca tünelde desteksiz durumdaki deformasyonlar incelendiğinde tünel aynasında 1,4 cm iken, tünel aynasının 1 m gerisinde bu değer 1,8 cm kadar çıkarken, tünel kazı aynasının 1 m önünde ise 1,2 cm elde edilmiştir. Tünel deformasyonları tünel aynasının 20 m gerisinde sabitlenmeden devam edeceği görülmektedir. Bu durum tünel ayna ve tavan stabilitesinin çok kritik olduğunu göstermektedir. Zemin-destek reaksiyon eğrilerinin çizdirildiği durumda ise, oluşan deformasyonların çok hızlı gelişeceği düşünülerek tünelde deformasyonlara izin verilmeden desteklerin yerleştirilmesi gerekmektedir. Aksi durumda, tünelde bir gevşeme zonu veya rahatlamaya sebebiyet verildiğinde, zemin reaksiyon eğrisi çok hızlı gelişeceğinden tünelde göçüklere sebebiyet verilecektir. Bu nedenle zemin-destek reaksiyon eğrisinde destekler yerleştirildiği durumda tünelde oluşacak deformasyonlar (u_{iy}) 1 cm olarak alınmıştır.

Çizelge 4.22. C2 sınıfı destek sistemi detayları

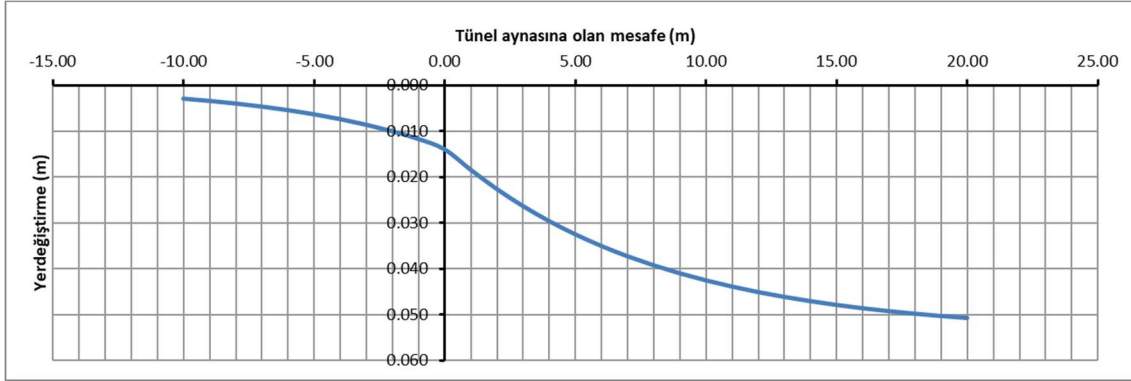
Destek Sınıfı	Püskürtme Beton		Çelik İksa		Bulon	
C2	t (m)	0.25	s (m)	1.0	s (m)	1.0x1.0
	E	26700	H (m)	0.2	L (m)	6.00
	v	0.2	A (m²)	0.00334	D (mm)	28
	σ_c	25	I (m⁴)	21.4E-6	E	2.00E+05
	σ_t	2.5	E	2.0E+6	F_t	0.225
	γ (MN/m³)	0.024	v	0.2	F_{tres}	0.0225
			σ_c	365	Tür	IBO
			σ_t	420	Tip	Fully Bonded

Çizelge 4.23. Destek sistemi basınçları

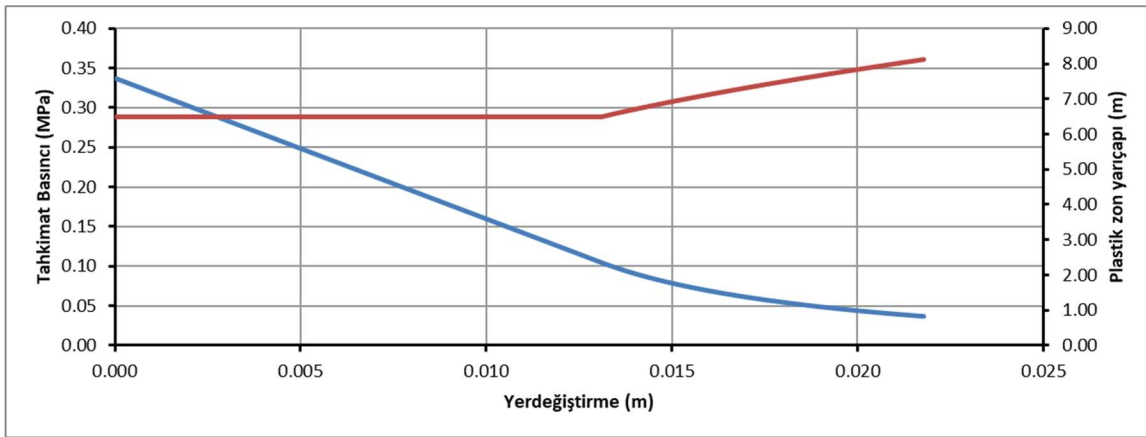
	p_{scmax}	K_{sc} (MPa/m)	u_{icmax} (m)
Shotcrete (ds=25 cm)	0.943	188	0.015
Steel rib (I 200)	0.187	16.36	0.021
Rock bolts	0.28	27.47	0.0201

Çizelge 4.24. Analitik çözüm sonuçları.

	σ_{cm}	P_0	σ_{cm}/P_0	r_p (m)	u_i (m)	u_{if} (m)	P_{cr}
C2 kaya sınıfı	0.24	0.33	0.118	11.92	0.054	0.014	0.11

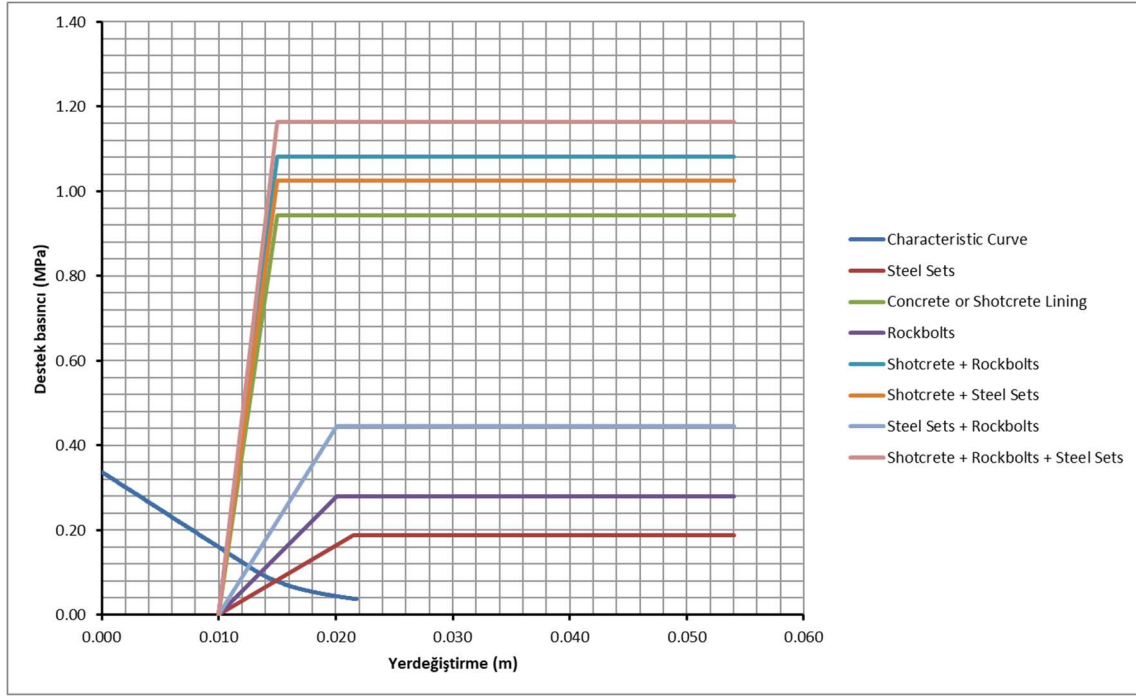


Şekil 4.25. Tünel boyunca deformasyon eğrisi-C2 sınıfı (Giriş kesimi).



Plastik zon yarıçapı Zemin karakteristik eğrisi

Şekil 4.26. Zemin karakteristik eğrisi ve plastik zon yarıçapı.



Şekil 4.27. Zemin-destek reaksiyon eğrileri.

4.9. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve FLAC Yazılımı

Sayısal analizler için FLAC3D programı kullanılmıştır. Flac3D, sonlu farklar yöntemini temel alan bir sayısal analiz yazılımıdır. (Itasca, 2002) [35] ve üç boyutlu olarak zemin, kayaç ve diğer yapı elemanlarını modelleme kapasitesine sahiptir. Tünel analizlerinde, yapısal elemanlar modele entegre edilebilir ve kazı işlemleri üst yarı, alt yarı ve invert olarak modellenebilir. Ayrıca, destek elemanları da modele dahil edilebilir.

Statik analizler için FLAC3D programı kullanılarak tünel kazı ve destek sistemleri modellenmiştir. Bu modeller, tünelde meydana gelen deformasyonlar ve yer değiştirmeleri incelemek amacıyla değerlendirilmiştir. Statik analizlerde elde edilen sonuçlar, kazı ve destek sistemlerinin etkinliğini ve doğruluğunu değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır, çünkü modeller, gerçek kazı ve destek sistemleriyle örtüşmektedir.

Statik analizlerin doğruluğunu değerlendirmek için, tünel kazı ve destek sistemlerinin etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Bu süreçte, normal arazi koşullarını yansıtan modeller oluşturulmuştur. Modelin başlangıç noktaları sıfır olarak belirlenmiş ve kazı işlemleri Y eksenine boyunca başlatılmıştır.

Modelleme sırasında, yerçekimi etkilerini simüle etmek amacıyla başlangıç gerilmeleri uygulanmıştır. Modelde, invert kısmı x, y ve z yönlerinde sabitlenmiş; sol ve sağ yüzeyler x yönünde, ön ve arka yüzeyler ise y yönünde sabitlenmiş, tavan kısmı ise serbest bırakılmıştır (Şekil 4.20). Sınır koşullarının açıklık etkileşimini önlemek için modelin derinliği, tünel çapının 13 m olduğu dikkate alınarak, tünelin yüksekliği veya genişliğinin en az 4 ila 5 katı kadar, yani 100 m olarak belirlenmiştir. Bu düzenlemeyle, modeldeki sınır koşulları uygun bir şekilde konumlandırılmıştır.

Analizlerde ilk olarak, tünel aynasında süren ve bulon bulunmayan durum için yer değiştirmeler incelenmiştir. Püskürtme beton, modele kabuk (shell) elemanı olarak entegre edilmiştir, iç kaplama betonu ise bölüm (zone) olarak tanımlanmıştır. Tünel aynasında uygulanan zemin çivileri bulon (cable bolt) olarak modele eklenmiştir. Püskürtme beton ve iç kaplama betonunun parametreleri Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26’da verilmiştir. Üç boyutlu analizlerde kullanılacak modelin ayrıntıları Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.25. Püskürtme betonunda kullanılan parametreler.

Ei (GPa)	Poisson Oranı(ν)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m³)
25	0,25	2500

Çizelge 4.26. İç kaplama betonunda kullanılan parametreler.

Ei (GPa)	Poisson Oranı(ν)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m³)
30	0,25	2500

Sürenler ise modele kazık elemanı (pile element) olarak girilmiştir. Burada umbrellaların Flac3D içerisinde pile element olarak tanımlanmasının uygun olduğunu belirtmişlerdir. Çizelge 4.27’de umbrellalarda kullanılan parametreler verilmektedir.

Çizelge 4.27. Süren parametreleri

Süren Çapı (m)	Poisson Oranı (ν)	E (GPa)
0,114	0,3	200

Tünelde kaya bulonları için tünel çevresindeki zemin parametrelerinin artırılması ile modele tanımlanmıştır. Bunun için bulonların ve zeminin enjeksiyon yapıldıktan sonraki zemin parametreleri hesaplanmıştır.

Bu yaklaşımda tünel çevresindeki zemin ve kaya bulonları tek bir birim olarak temsil edilmektedir. Bir anlamda tünel çevresindeki zeminin iyileştirildiği kabulü ile yeni zemin parametreleri hesaplanmaktadır (Çizelge 4.28).

Üç boyutlu analizlerde, tünel modellemesi üst yarı, alt yarı ve invert olarak üç farklı bölgeye ayrılmıştır. Modelleme sırasında, üst yarının ilerleme uzunluğu 1,0 m, alt yarıninki 2,0 m, invert kesiminin ise 4,0 m olarak belirlenmiştir. Yönelimler Y ekseninde 100 m, X ekseninde 70 m ve Z ekseninde -70 m olarak modellenmiştir. Model, 0,0,0 noktasına göre simetrik kabul edilmiştir. Y ekseninde 0 ve 100 noktasında, Z ekseninde -70 noktasında, X ekseninde ise 0 ve 70 noktasında sabitlemeler yapılmıştır. Modelde Mohr-Coulomb yenilme kriteri uygulanmıştır.

Üst yarıda tünel kazısına 60. metreden itibaren başlanmıştır. İlk olarak, üst yarıda 60 m'ye kadar kazı yapılmış, alt yarıda ise 40 m'ye kadar boşaltma gerçekleştirilmiştir. Destekleme yapılarak bu kesim modele dahil edilmiştir ve tünelin ilk 24 m'lik kısmında iç kaplama yapıldığı varsayılmıştır. Böylece, üst yarı, alt yarı, invert ve iç kaplama betonu için gerekli mesafe sağlanmıştır.

Devamında, üst yarıda 1 m'lik kademeler halinde kazı yapılmış; üst yarıda toplamda 8 m, alt yarıda 8 m ve invert bölümünde de 8 m kazı tamamlanmıştır. Bu süreçte, 9 m uzunluğunda 4,0 cm kalınlığında bir umbrella uygulanmış, ayna stabilitesi için 9 m uzunluğunda ayna zemin çivisi ve 30 cm kalınlığında püskürtme beton kullanılmıştır. Uygulanan umbrella ve zemin çivileri Şekil 4.30'de gösterilmiştir.

Hacimsel Modül (K):
$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

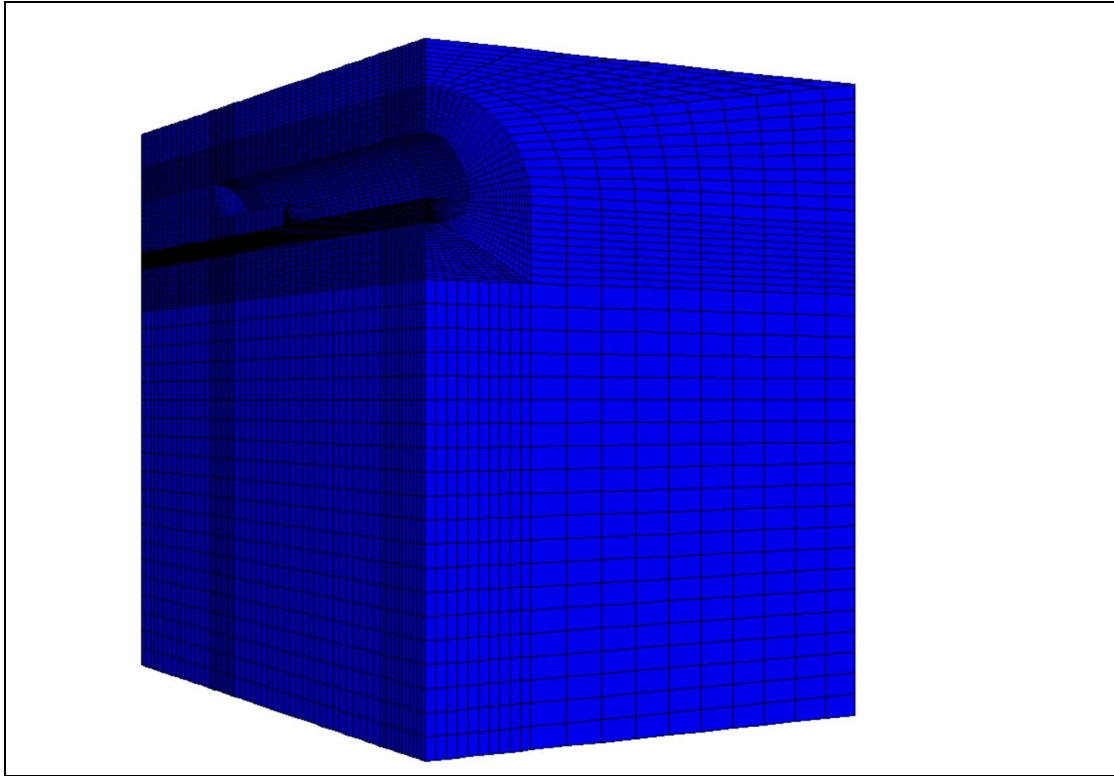
Kesme Modülü (G):
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Çizelge 4.28. Zemin parametreleri giriş kesimi

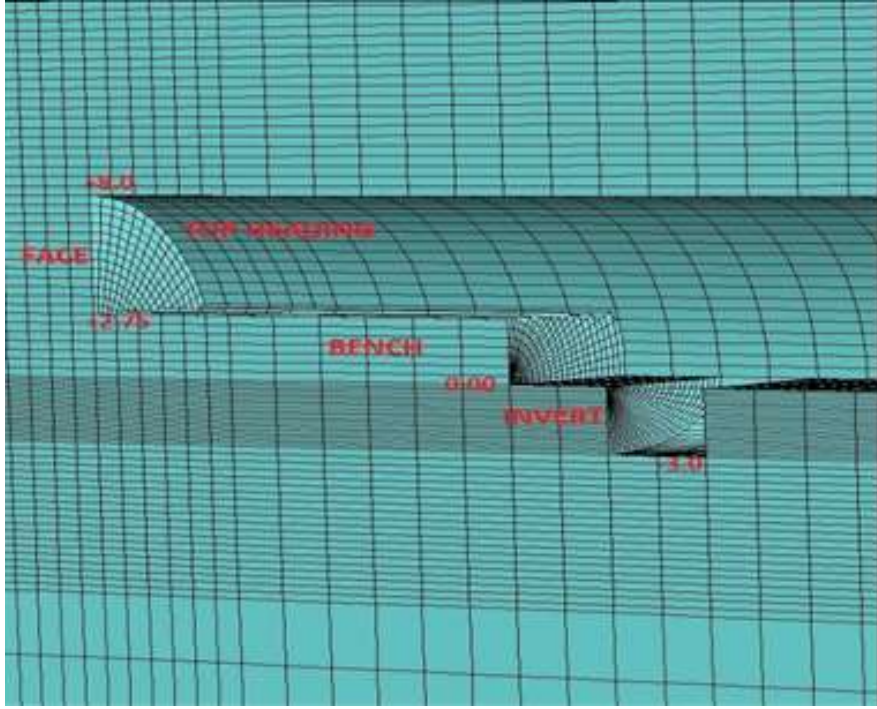
E (Deformasyon modülü, MPa)	Poisson Oranı (ν)	K (Hacimsel Modül, MPa)	G (Kesme Modülü,MPa)
120	0,3	100	46

Çizelge 4.29. Zemin parametreleri çıkış kesimi

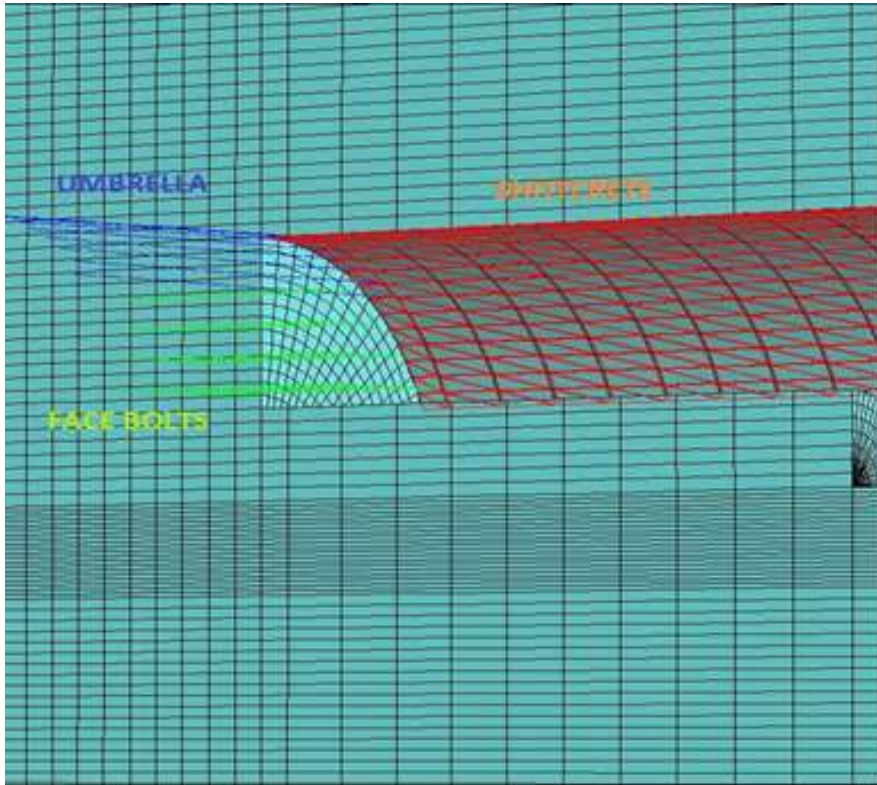
E (Deformasyon modülü, MPa)	Poisson Oranı (ν)	K (Hacimsel Modül, MPa)	G (Kesme Modülü,MPa)
150	0,3	125	57



Şekil 4.28. FLAC 3D ile oluşturulmuş olan nümerik analiz modeli

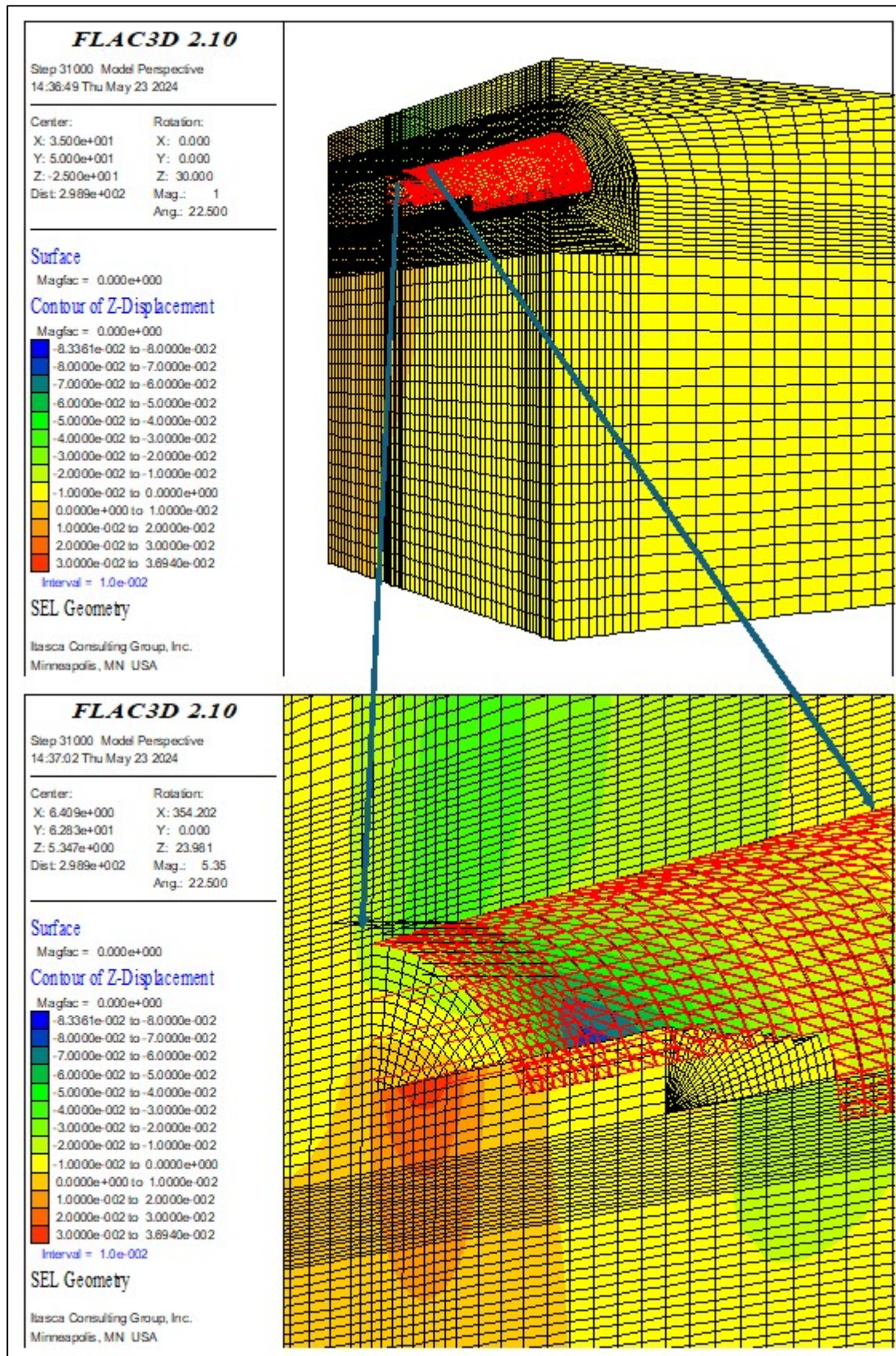


Şekil 4.29. Üst yarı, alt yarı ve invert kazı kademeleri

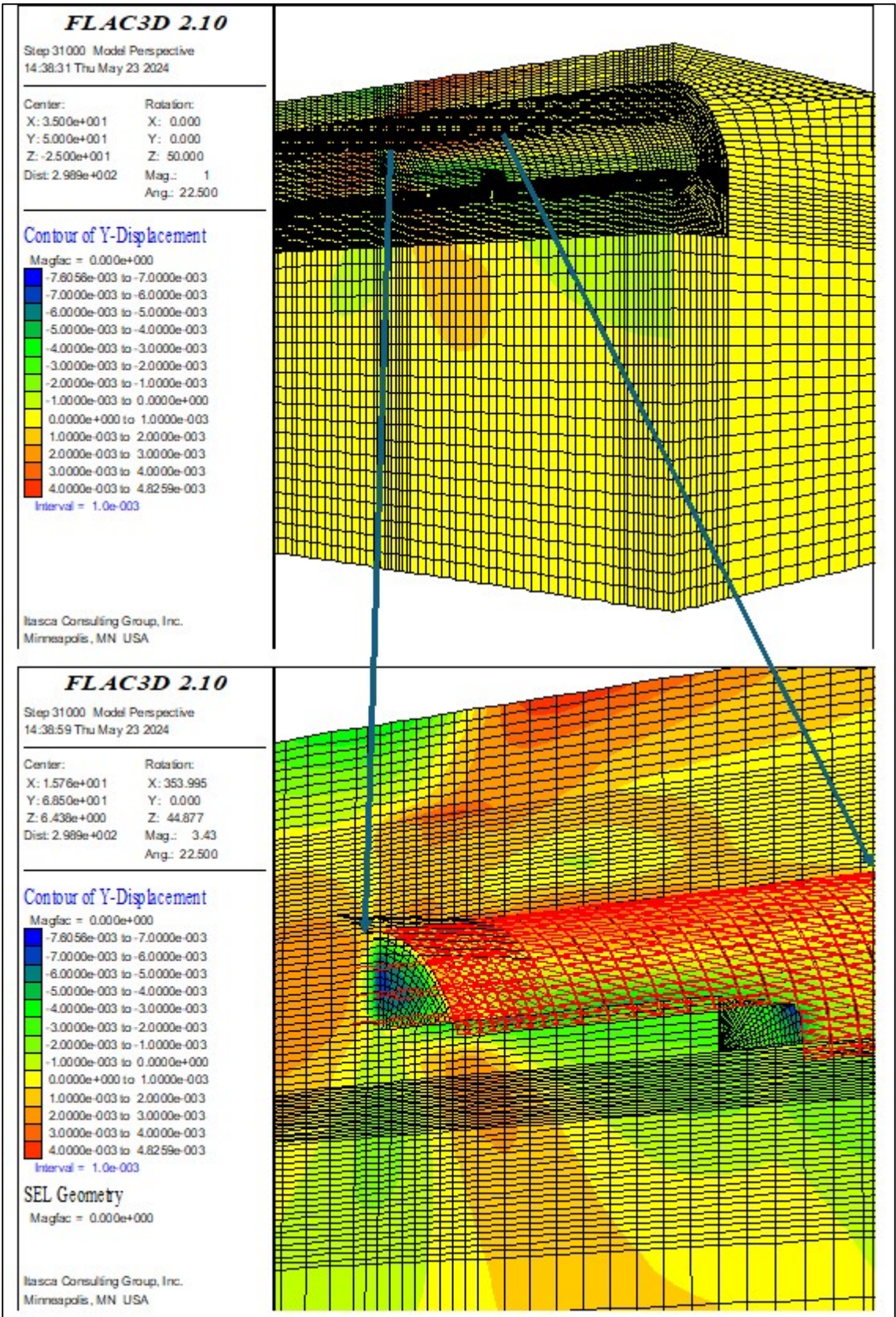


Şekil 4.30. Destek sistemi elemanları

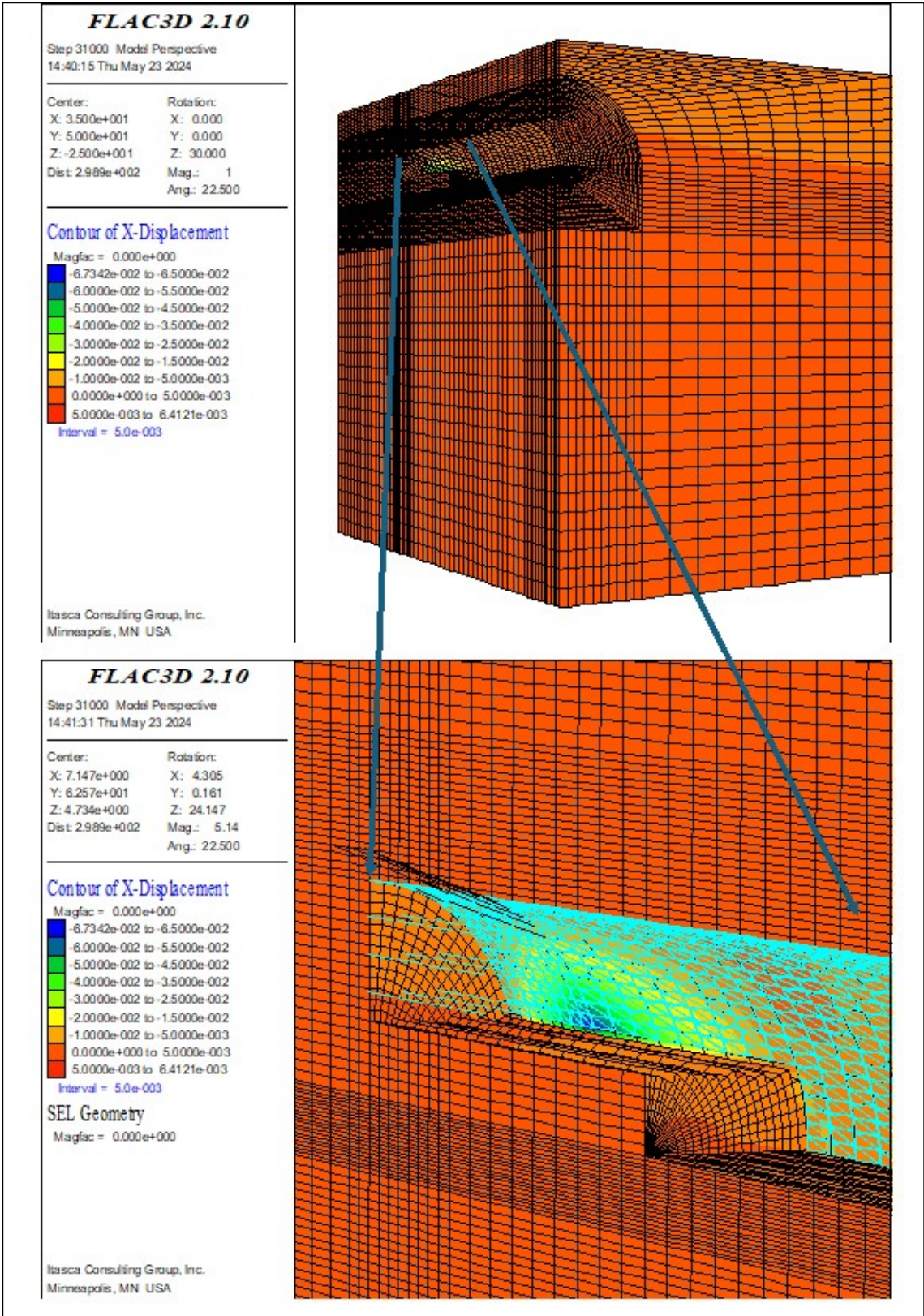
Tünel giriş kesimine ait nümerik analiz sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



Şekil 4.31. Düşey deformasyon

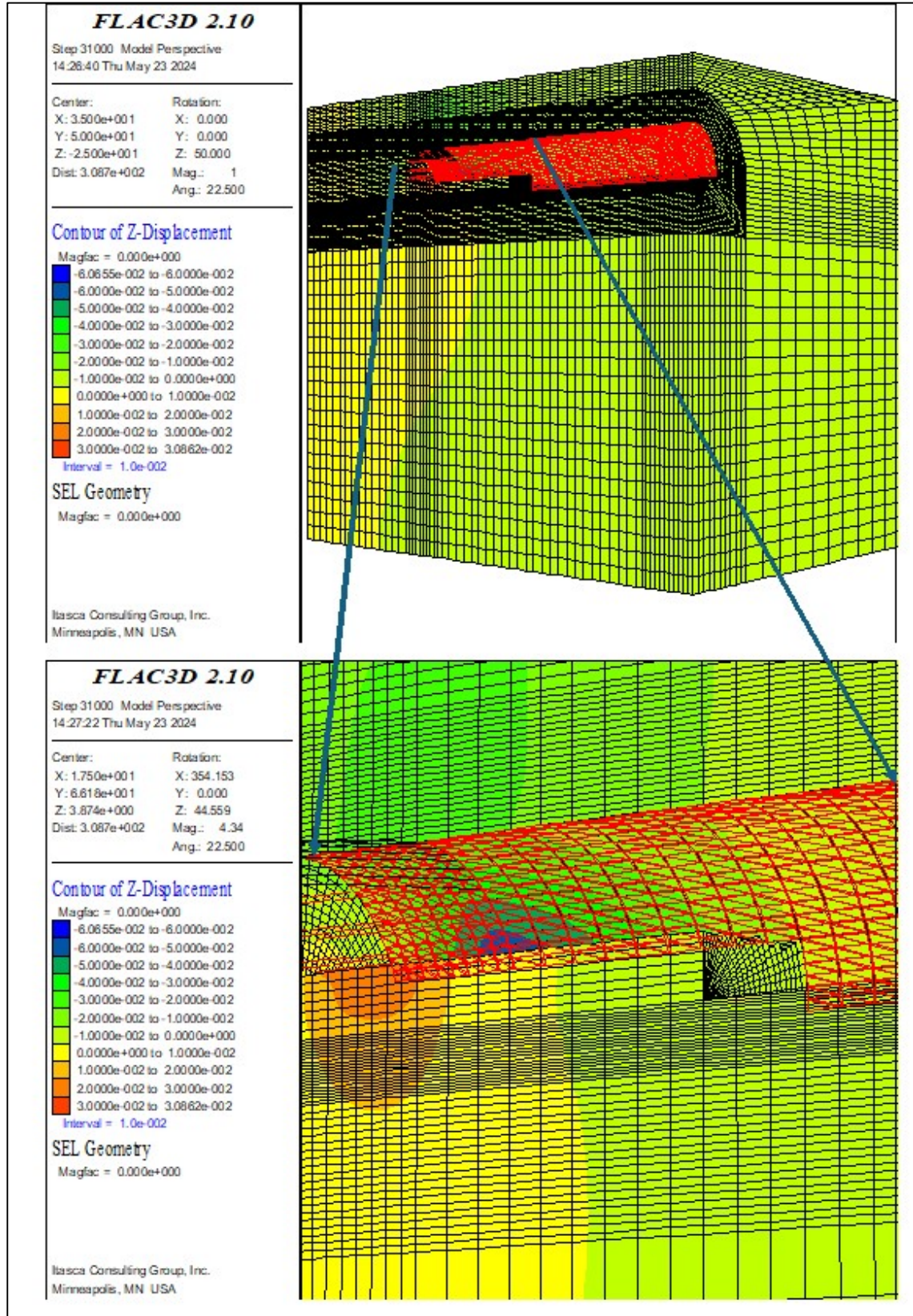


Şekil 4.32. Boyuna deformasyon

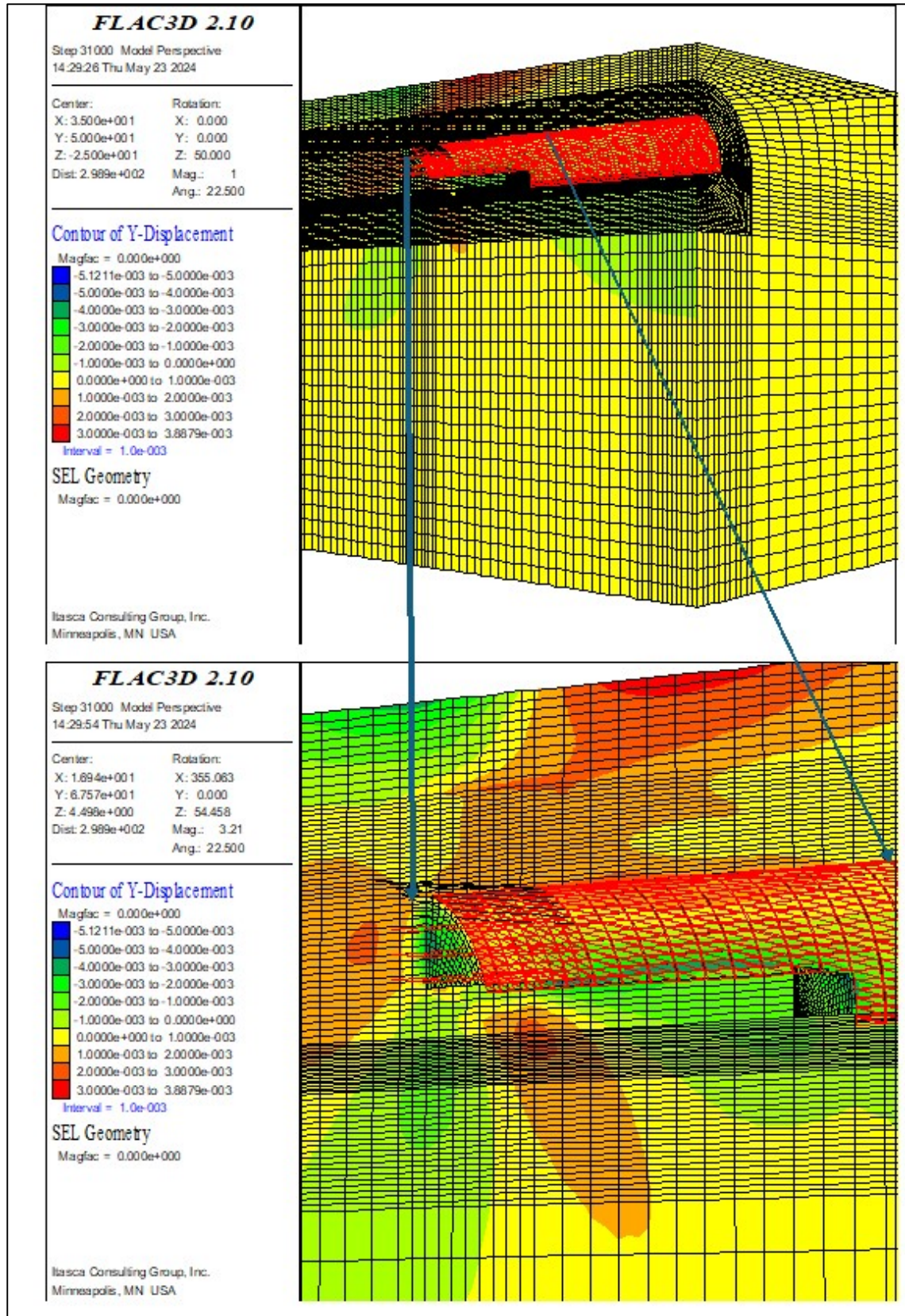


Şekil 4.33. Yatay yer değiştirme.

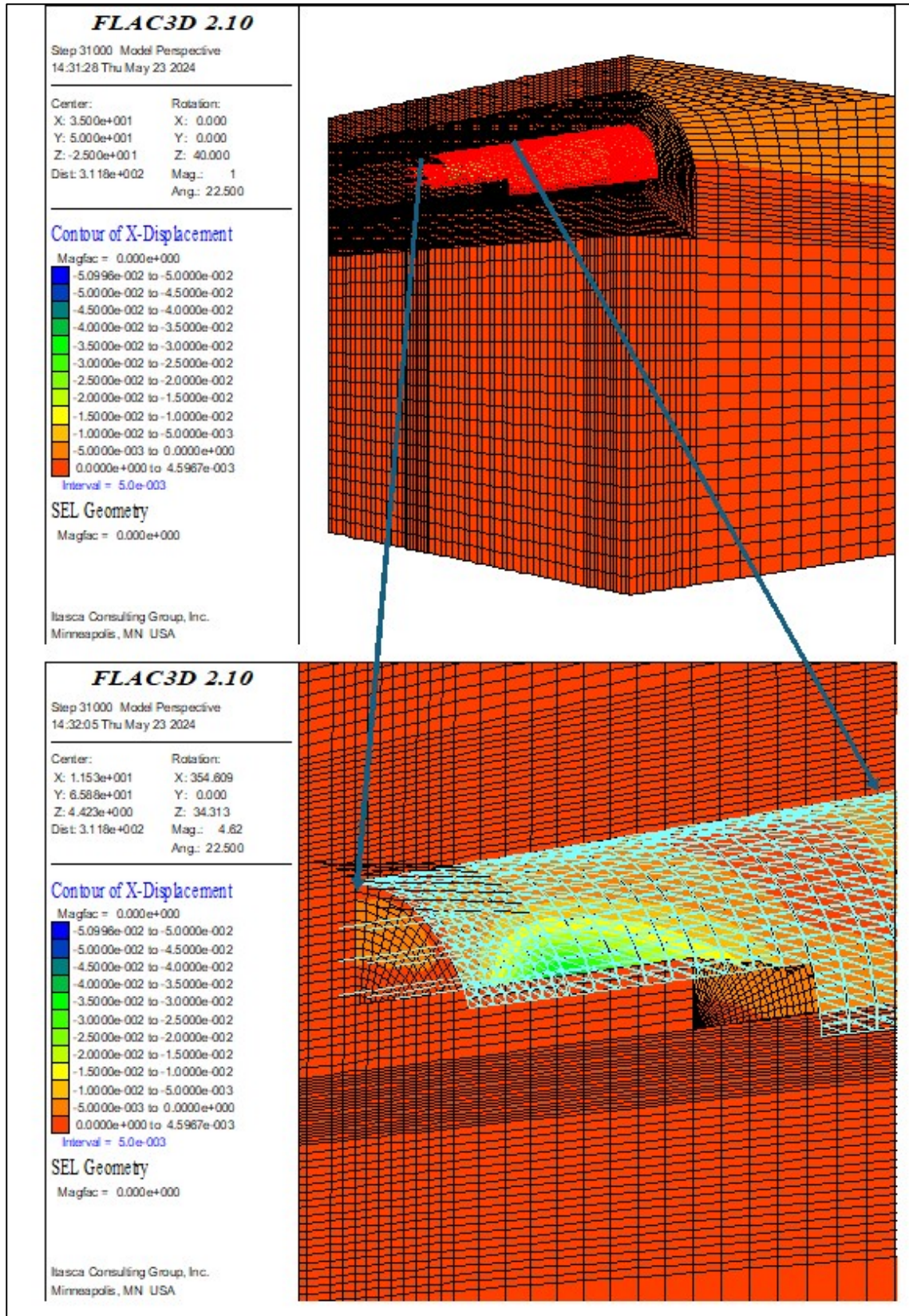
Tünel çıkış portal kesimi için yapılan analizler aşağıdaki Şekillerde verilmiştir.



Şekil 4.34. Düşey yer değiştirme.



Şekil 4.35. Boyuna yer değiştirme



Şekil 4.36. Yatay yer değiştirme

4.10. Analizlerin Değerlendirilmesi

Tünel giriş kesimi için yapılan analiz sonuçlarına göre tünelde düşey yönde (Z) maksimum 8,3 cm deformasyon meydana gelirken, Y yönünde yani tünel aynasında 7,6 mm, ve yatay yönde (X) yönünde ise maksimum 6,7 cm deformasyon meydana gelmektedir.

Tünel çıkış kesimi için yapılan analiz sonuçlarında ise, tünelde düşey yönde (Z) maksimum 6,06 cm deformasyon meydana gelirken, Y yönünde yani tünel aynasında 5,1 m, ve yatay yönde (X) yönünde ise maksimum 5,0 cm deformasyon meydana gelmektedir.

Görüleceęi gibi, belirlenen destek sistemleri ile tünelde stabilite sağlanmaktadır. Ayrıca tünel kazı kademelerinin yani üst yarı, alt yarı ve invert şeklinde ardışık olarak kazının yapılması da stabilite açısından önemlidir. Buna ek olarak tünel aynasında çakılan fiber ayna bulonları ile tünel tavanına çakılan sürenlerin stabilite üzerinde olumlu bir etki yaptığı da görülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma kapsamında sığ tünellerde tünel destek sistemleri incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında

- a) Sığ tünellerde tünel ayna ve tavan stabilitesinin son derece önemli olduğu ortaya konmuştur.
- b) Tünel ayna ve tavan stabilitesi için ayna bulonlarının ve tavan için sürenlerin gerekli olduğu görülmüştür.
- c) Bu tür sığ tünellerde kesinlikle tünelde ciddi bir deformasyona izin verilmeden destek sistemlerinin tamamlanması gerekmektedir. Aksi takdirde tünelde yaşanacak büyük deformasyonların yüzeye yansımaları kaçınılmazdır. Bu durumda tünelde daha ciddi deformasyonların ve göçüklerinde yaşanması mümkündür.
- d) Tünel destek sistemleri belirlenirken genelde ekonomik olması açısından bir miktar deformasyona müsaade edilmesi ve sonrasında azalan basınca göre daha ekonomik ve esnek bir tahkimat önerilir. Ancak zayıf zeminlerde açılan sığ tünellerde bu durumda duraylı bir tünelin açılması mümkün gözükmemektedir. Zira deformasyona müsaade etmek her zaman istenilen sonuçları vermeyecek, kayanın kendi yükünü taşıması diğer bir ifade ile kemerleşmenin oluşması mümkün olmayıp ve tünelde bir göçüğe neden olabilecektir. Bu tür zeminlerde deformasyonları minimum düzeyde tutarak desteklerin hemen yapılması gerekmektedir. Ayrıca ringin daha açık bir ifade ile üst yarı, alt yarı ve invert kazılarının arada mesafe bırakılmadan hemen tamamlanması son derece önemlidir.
- e) Üç boyutlu analizlerde tüm tahkimat elemanlarının açık biçimde tariflenmesi ve analizlerin bu şekilde gerçekleştirilmesi daha ekonomik tünel tasarımlarının yapılması mümkün olabilecektir.
- f) Bu çalışmadan elde edilen sonuçların daha fazla vaka çalışmaları ile denenmesi ve sonuçlarının karşılaştırılması, gelecekte daha da fazla ihtiyaç duyulacak yeraltı yapılarının ekonomik biçimde imal edilmesine imkan sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. *Karayolları Genel Müdürlüğü Balıkesir-Edremit Devlet Yolu Evciler Varyantı Tüneli Etüt ve Proje Hizmet Alım İşi Proje Raporları, Ağustos 2019.*
2. 10.04.2024]; Bursa Bölge Haritası]. Available from: <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Bolgeler/14Bolge/Harita.aspx>.
3. [cited 07.07.2024 07.07.2024]; Available from: <https://earth.google.com/web/>.
4. <https://balikesir.meb.gov.tr/www/arazi-yapisi/icerik/6#:~:text=Bal%C4%B1kesir%C2%B4de%20Marmara%2C%20Akdeniz,mer%C2%B4a%20ve%20%C3%A7ay%C4%B1rl%C4%B1kt%C4%B1r> 11.04.2024].
5. 11.03.2024]; Available from: <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=BALIKESIR>.
6. *Google Earth*. [cited 07.07.2024 07.07.2024]; Available from: <https://earth.google.com/web/@0,-5.52602839,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r/data=OgMKATA>.
7. *LuoBu Y. Vd., Longitudinal deformation profile of a tunnel in weak rock mass by using the back analysis method. Tunnelling and Underground Space Technology 2018, 71, 478-493.*
8. Aygar, E.B. and C. Gokceoglu, *Analytical solutions and 3D numerical analyses of a shallow tunnel excavated in weak ground: a case from Turkey. International Journal of Geo-Engineering, 2021. 12: p. 9.*
9. Aygar, E.B. and C. Gokceoglu, *Analytical solutions and 3D numerical analyses of a shallow tunnel excavated in weak ground: a case from Turkey. International Journal of Geo-Engineering, 2021. 12: p. 9.*
10. Akgün, H., Koçkar, M.K., *Methodology for tunnel and portal support design in mixed limestone, schist and phyllite conditions: a case study in Turkey. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2003, 40, 173-196.*
11. *Xing Yan vd., Effect of rock mass and discontinuity mechanical properties and delayed rock supporting on tunnel stability in an underground mine. Engineering Geology 2018, 238, 62-75.*
12. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/diri_fay_haritalari/balikesir.pdf 18.05.2024].

13. *Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması*. 11.04.2024]; Available from: <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>.
14. *Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem- Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi*. 11.04.2024]; Available from: <http://udim.koeri.boun.edu.tr/zeqmap/hgmmmap.asp>.
15. *ISRM, Rock Characterization, Testing and Monitoring (Editor: E.T. Brown, ISRM Suggested Methods): Pergamon Press, Oxford, England, 1981, 211 p.*
16. Sosa, G., et al., *Abdominal compartment syndrome*. *Disease-a-Month*, 2019. **65**(1): p. 5-19.
17. *Rocscience, Roclab v1.0 Rock Mass Strength Analysis Using the Generalized Hoek-Brown Failure Criterion, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada, 2002.*
18. Rubenstein, J.H., et al., *AGA Clinical Practice Guideline on Endoscopic Eradication Therapy of Barrett's Esophagus and Related Neoplasia*. *Gastroenterology*, 2024. **166**(6): p. 1020-1055.
19. Z.T. Bieniawski, "Engineering classification of jointed rock masses," *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, 335-344. 1973.
20. Z.T. Bieniawski, "Rock mass classification in rock engineering," *In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema. 1976.*
21. Z.T. Bieniawski, *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley. 1989.
22. Hoek.E, Marinos P. Benissi M. *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens schist formation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 1998;57(2):151-60.
23. Hoek E., Marinos P., Marinos V., *Geological Strength Index (GSI). A Characterization Tool For Assessing Engineering Properties for Rock Masses. Published In: Underground Works 97 Under Special Conditions, Eds. Romana, Perucho & Olalla, Lisbon: Taylor And Francis, 2007, 13-21.*
24. N. R. Barton, F. Løset, R. Lien, J. Lunde, "Application of the Q-system in design decisions," *In Subsurface space, (ed. M. Bergman) 2, 553-561. New York: Pergamon.1981.*
25. N.Barton, "Application of Q-system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses," *In Workshop on Norwegian Method of Tunnelling (pp. 66-84). New Delhi, India,1993.*

26. Barton, N. ve Grimstad, E., *The Q-System Following Twenty Years of Application in NTM Support Selection, Felsbau, 1994, 428-436.*
27. Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., Corkum, B., *Hoek Brown Failure Criterion-2002 Edition, 5. Kuzey Amerika Kaya Mekaniği Sempozyumu, Toronto, Canada, 2002, 1, pp. 267-273.*
28. J. Rabcewicz, L., "The New Austrian Tunneling Method", *Water Power, 1964, 453-457.*
29. Ulusay, R.; Sönmez, H., *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 2007, 60, (2), p 99.*
30. Cai M, Kaiser PK, Tasaka Y, Minamic M., *Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. Int J Rock Mech Min Sci 2007, 44:247–65.*
31. Hoek, E. and M.S. Diederichs, *Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006. 43(2): p. 203-215.*
32. Ulusay, R.; Sönmez, H., *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 2007, 60, (2), p 99.*
33. Goricki, A., Schubert, W., Riedmueller, G., "New Developments for the Design and Construction of Tunnels in Complex Rock Masses", *Paper 3A 01 – Sinorock Symposium, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 4, No.3, CD-ROM, 2004 Elsevier Ltd.*
34. Hoek, E., Carranza-Torres, C. ve Corkum, B., 2002. *Hoek-Brown Failure Criterion 2002 Edition, Proceedings of the NARMS-TAC, Mining Innovation and Technology Toronto, Canada, 2002, 267-273.*
35. *Itasca Consulting Group, Inc. (2002) FLAC3D — Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions, Ver. 2.1. Minneapolis: Itasca.*
36. Devesa, S.S., W.J. Blot, and J.F. Fraumeni, Jr., *Changing patterns in the incidence of esophageal and gastric carcinoma in the United States. Cancer, 1998. 83(10): p. 2049-53.*

EKLER

EK-1. Tablolar

I. Temel RMR Sınıflama Parametreleri ve Puanlama								
Kaya Dayanımı,	Nokta Yükleme Dayanımı	>10	4-10	2-4	1-2	Daha düşük değerler için TEB değeri tercih edilir		
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	1
Puan		15	12	7	4	2	1	0
Kayaç Kalite Göstergesi, RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
Puan		20	17	13	8	3		
Süreksizlik aralığı		>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
Puan		20	15	10	8	5		
Süreksizliklerin durumu		Çok kaba yüzeyler Sürekli değil Ayrılma yok. Sert eklem yüzeyleri.	Az kaba yüzeyler Ayrılma<1 mm Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma <1 mm Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu <5 mm veya 1-5 mm açık eklemler, sürekli eklemler	Yumuşak fay dolgusu >5 mm kalınlıkta veya açık eklemler >5 mm devamlı süreksizlikler		
Puan		30	25	20	10	0		
Yeraltısuyu	Tünelin 10 m'lik kısmından gelen su	Yok	< 10	10-25	25-125	> 125		
	Genel su durumu	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı		
Puan		15	10	7	4	0		
TEMEL RMR								
II. Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme								
Süreksizliklerin Doğrultu ve Eğimi		Çok Olumlu	Uygun	Orta	Uygun Değil	Hiç Uygun Değil		
Puan	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12		
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25		
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60		
III. Düzeltmiş RMR Değeri								
RMR								

Kaya Türü	Sınıf	Grup	İri	Orta	İnce	Çok ince	
SEDİMANTER	Klastik		Konglomera (22)	Kumtaşı (19)	Silttaşı (9)	Kiltaşı (4)	
	Klastik Olmayan	Organik	Grovak (18)				
		Karbonatlı	Tebeşir Taşı (18) Kömür (18)				
		Kimyasal	Breş (20)	Sparitik Kireçtaşı (10)	Mikritik Kireçtaşı (8)	Jips (16)	Anhidrit (13)
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer (9)	Hornfels (19)	Kuvarsit (24)		
	Düşük Foliasyonlu		Migmatit (30)	Amfibolit (31)	Milonit (6)		
	Foliasyonlu*		Gnays (33)	Şist (10)	Fillit (10)	Sleyt (9)	
MAGMATİK	Açık Koyu		Granit (33)	Granodiyorit (30)	Diyorit (28)	Gabro (27)	Norit (22)
	Püskürük püroklastik			Dolerit (19)	Riyolit (16)	Obsidyen (19)	Dasit (17)
			Aglomera (20)	Breş (18)	Tüf (15)		

Parantez içindeki değerler tahminidir.

* Bu değerler, foliasyona dik yönde deneye tabi tutulmuş kaya malzemeleri için olup, yenilmenin foliasyon düzlemi boyunca gerçekleşmesi halinde mi önemli ölçüde farklı olacaktır.

Kaya Sınıfı	Kazı Tipi	Destek Tipi		
		Kaya Bulonu	Püskürtme Beton	Çelik İksa
I-Çok iyi kaya, RMR: 81-100	Tam kesit, 3 metre ilerleme	Genellikle kaya bulonu haricinde destek gerekmez.		
II-İyi kaya, RMR: 61-80	Tam kesit, 1.0-1.5 metre ilerleme. Aynaya 20 metre kala tam destek.	Kemerin her 2-3 metresinde 2-2.5 metre mesafeli kaya sapslamaları, yer yer çelik hasır.	Gerektiğinde tavan kemerinde 50 mm.	-
III-Orta kaya, RMR: 41-60	Üstyarı altyarı ilerleme. Üstyarıda 1.5-3.0 m ilerleme. Her patlatmadan sonra ön destekleme. Aynaya 10 m mesafeye kadar tam destek.	Tavan kemerinde ve duvarlarda 3-4 metre uzunlukta 1.5-2 metre aralıklı sistematik kaya sapslaması ve tavanda	Tavan kemerinde 50-100 mm, yan duvarlarda 30 mm.	-
IV-Zayıf kaya, RMR:21-40	Altyarı üstyarı şeklinde ilerleme. Üstyarıda 1.0-1.5 m ilerleme, kazıya uygun şekilde aynaya 10 m mesafeye kadar gerekli destek.	4-5 m uzunluğunda, 1-1.5 m aralıklı sistematik kaya sapslaması, tavan ve duvarlarda çelik hasır.	Tavan kemerinde 100-150 mm ve yan duvarlarda 100 mm	Gereken yerde 1.5 m aralıklı yer yer hafif profiller
V-Çok zayıf kaya, RMR: <20	Üstyarıda 0.5-1.5 m çoklu delgi ilerleme. Kazıyla birlikte destek yerleştirilmeli. Patlatmadan hemen sonra püskürtme beton uygulanmalı.	5-6 m uzunluğunda, 1-1.5 m aralıklı sistematik kaya sapslaması, tavan ve duvarlarda çelik hasır ile birlikte. Taban kemerinde ise kaya sapslaması.	Tavan kemerinde 150-200 mm, yan duvarlarda 150 mm, aynada 50 mm.	Gerektiğinde, 0.75 m aralıklı profiller, çelik iksa ve sürenlerle beraber. Tam halka taban kemeri.

KAYA KALİTE GÖSTERGESİ (RQD)

KOŞUL		RQD
A	Çok Zayıf	0-25
B	Zayıf	25-50
C	Orta	50-75
D	İyi	75-90
E	Çok İyi	90-100

EKLEM TAKIMI SAYISI (Jn)

KOŞUL		Jn
A	Masif veya birkaç eklem	0,5-1,0
B	Tek eklem seti	2
C	Tek eklem seti ve düzensiz eklemler	3
D	İki eklem seti	4
E	İki eklem seti ve düzensiz eklemler	6
F	Üç eklem seti	9
G	Üç eklem seti ve düzensiz eklemler	12
H	Dört veya daha fazla set, düzensiz, ileri derecede eklemli, küp şeker görünümlü	15
J	Parçalanmış kaya, zemin benzeri	20

Not: Kesişen Tünellerde (3xJn), Tünel girişlerinde (2xJn) kullanılır.

EKLEM PÜRÜZLÜLÜK SAYISI [36]

KOŞUL		Jr
(a) Süreksizlik-kaya dokanağı ve (b) 10 cm'lik bir makaslamadan önceki süreksizlik-kaya dokanağı		
A	Süreksiz eklemler	4
B	Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3
C	Düz, dalgalı	2
D	Kaygan, dalgalı	1,5
E	Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1,5
F	Düz, düzlemsel	1
G	Kaygan, düzlemsel	0,5

(c) Makaslanmış kesimde süreksizlik-kaya dokanağı yok

H	Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon	1,0
J	Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kumlu, çakıllı ya da parçalanmış zon	1,0

Not: İlgili eklem takımının ortalama aralığı 3m'den büyük ise, Jr'ye 1,0 eklenebilir.

Not: Çizgiselliklerin en düşük dayanımı verecek şekilde yönlendirilmesi koşuluyla çizgisellik içeren düzlemsel ve kaygan süreksizlik yüzeyleri için Jr=0,5 alınabilir.

EKLEM ALTERASYON SAYISI (Ja)

KOŞUL		Ja	Φ (yaklaşık)
(a) Kaya-süreksizlik dokanağı (mineral dolgusu yok, sadece yüzey kaplaması)			
A	Yüzeyler sıkı, sert, yumuşamayan geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars veya epidot)	0,75	-
B	Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1	25°-30°
C	Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri. Yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vb.	2	20°-25°
D	Siltli veya kumlu kil kaplamaları, çok az ve yumuşamayan kil içeriği	3	20°-25°
E	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama (örneğin kaolinit veya mika). Ayrıca klorit, talk, jips, grafit vd. ile az miktarda şişen killer	4	8°-16°

(b) 10 cm'den küçük makaslama zonunda süreksizlik teması (ince mineral dolgusu)

F	Kumlu parçalar, kil içermeyen ayrıışmış kaya	25-30	4
G	Güçlü bir şekilde aşırı konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineralli dolgular (devamlı, <5mm)	16-24	6
H	Orta ve düşük derecede aşırı konsolidasyona maruz kalmış, yumuşayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı <5mm)	12-16	8
J	Şişen kil mineralleri-örneğin montmorillonit (sürekli <5mm) Ja, sayısı şişen kil tane büyüklüğüne ve su içeriğine bağlıdır.	6-12	8-12

(c) Makaslama durumunda süreksizlik yüzeylerinin teması yok (kalın mineral dolguları)

K,L,M	Bozunmuş veya parçalanmış kaya ve kil bantları ya da zonları (kil koşulunun tanımı için G,H ve J'ye bakınız)	6,8 veya 8-12	6°-24°
N	Siltli veya kumlu kil bantları veya zonları, çok az kil (yumuşamayan)	5	-
O,P,R	Kalın ve sürekli kil bantları veya zonları (kil koşulunun tanımlanması için G,H ve J'ye bakınız)	10, 13 veya 13-20	6°-24°

EKLEM SU AZALTMA FAKTÖRÜ (Jw)

	KOŞUL	Yaklaşık su basıncı (kgf/cm ²)	Jw
A	Kısmi kazı veya düşük su geliri (örneğin genel olarak <5 lt dk.)	1	1
B	Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	1-2,5	0,66
C	Dolgunsuz eklemler içeren sağlam kayada aşırı su geliri veya yüksek basınç	2,5-10	0,5
D	Aşırı su geliri veya yüksek basınç, eklem dolgularının ileri derecede yıkanması	2,5-10	0,33
E	Çok ileri derecede su geliri veya patlama sırasında zamanla azalan yüksek su basıncı	10	0,2-0,05
F	Zamanla azalmaksızın devam eden son derece fazla su geliri veya su basıncı	>10	0,1-0,05

GERİLİME AZALTMA FAKTÖRÜ (SRF)




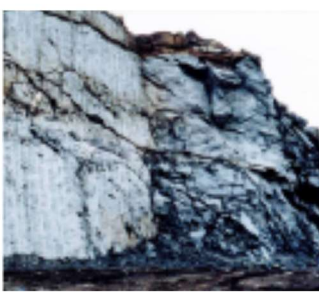

	KOŞUL	SRF	
(a) Tünel açılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek kazıyı kesen zayıf zonlar:			
A	Kil veya kimyasal olarak ayrıışmış kaya içeren zayıflık zonları, çok gevşek çevre kayası (herhangi bir derinlikte)	10,0	
B	Kil veya kimyasal olarak ayrıışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği ≤50 m)	5,0	
C	Kil veya kimyasal olarak ayrıışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği >50 m)	2,5	
D	Kil içermeyen dayanımlı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7,5	
E	Kil içermeyen dayanımlı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği ≤50 m)	5,0	
F	Kil içermeyen dayanımlı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği >50 m)	2,5	
G	Gevşek ve açık eklemler, ileri derecede eklemli "küp şeker" görünümü (herhangi bir derinlikte)	5,0	
(b) Dayanımlı kaya, kaya gerilmesi sorunları:		$\frac{\sigma_c}{\sigma_t}$	
H	Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemler	>200 <0,01	SRF 2,5

j	Orta derecede gerilme, uygun gerilme koşulları	200-10 0,01-0,3	1
K	Yüksek gerilme, çok sıkı yapı, genellikle duraylı, yan duvarlar açısından uygun olmayabilir.	10-5 0,3-0,4	0,5-2,0
L	Masif kayada 1 saatlik bir süre sonrasında orta derecede dilimlenme	5-3 0,5-0,65	5-50
M	Masif kayada birkaç dakika sonra dilimlenme ve kaya patlaması	3-2 0,65-1,0	50-200
N	Masif kayada aşırı kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon	3-2 0,65-1,0	50-200

[1] Sıkışan kaya: Yüksek kaya basıncının etkisiyle düşük dayanımlı kayada plastik akma:

		$\sigma\Phi/\sigma_{ci}$	SRF
O	Az sıkıştıran kaya basıncı	1-5	5-10
P	Aşırı sıkıştırıcı kaya basıncı	>5	10-20
(c) Şişen kaya: Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme etkinliği:			SRF
R	Düşük şişme basıncı		5-10
S	Çok yüksek şişme basıncı		10-15

Q	Grup	Sınıflama
0,001-0,01	3	Son derece zayıf
0,01-0,1		Aşırı zayıf
0,1-1		Çok zayıf
1-4	2	Zayıf
4-10		Orta
10-40		İyi
40-100	1	Çok iyi
100-400		Aşırı iyi
400-100		Son derece iyi

Kaya Kütlesinin Görünümü	Kaya Kütlesinin Tanımı	Önerilen "D" Değeri
	<p>Yüksek kaliteli denetimli patlatma veyatünel açma makinesiyle yapılan kazı, tünelin çevresindeki kaya kütlelerinde en düşük derece örselenmeye yol açar.</p>	<p>D=0</p>
	<p>Düşük kaliteli kaya kütlelerinde (patlatma yapılmamış) mekanik olarak veya elle yapılan kazı, tüneli çevreleyen kaya kütlelerinde en düşük derecede örselenmeye neden olur. Sıkışan zemin sorunu önemli derecede taban kabarmasına yol açar ve soldaki fotoğraftaki gibi geçici bir taban betonu dökülmediği takdirde önemli miktarda örselenme olur.</p>	<p>D=0 D=0.5 Taban Betonu Yok</p>
	<p>Çok kötü kaliteli patlatma sert kaya tünellerde çevre kayasının 2-3 m içine nüfuz edecek şekilde şiddetli yerel hasara neden olur.</p>	<p>D=0.8</p>
	<p>Mühendislik şevlerinde küçük ölçekli patlatmalar, orta derece kaya kütleleri hasarına neden olur özellikle kontrollü patlatma yapılırsa kaya kütlelerinin görünümü soldaki fotoğraftaki gibidir. Ancak, stres rahatlaması bazı bozulmalara yol açar.</p>	<p>D= 0.7 İyi patlatma D=1.0 Kötü patlatma</p>
	<p>Çok büyük açık ocak işletme şevlerinde, üretim amaçlı aşırı patlatmadan ve örtü kazısı nedeniyle oluşan gerilmenin azalmasından dolayı önemli düzeyde örselenmeye maruz kalırlar. Daha yumuşak bazı kayalarda kazı işlemi ripperleme ve dozer ile yapılabilir ve bu durumda şevin maruz kalacağı örselenmenin derecesi daha düşük olur.</p>	<p>D= 1.0 Üretim patlatması D=1.0 Mekanik kazı</p>

ÖNORM B 2203 (Ekim 1994 sonrası)	
A1	Sağlam
A2	Sonradan az sökülen
B1	Gevrek
B2	Çok gevrek
B3	Taneli
C1	Dağ atma
C2	Baskılı
C3	Çok baskılı
C4	Akıcı
C5	Şişen

EK-2. Sondaj Logları

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)		NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	LAB. DENEYİ Lab. Test	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test		GRAFİK Graph		JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength	AYRISMA / Weathering	SÜREKSİZLİK / Disc.	KAROT%(TCR) / T.Corr	RQD%			
					Darbe Sayısı Numb. Of Blows													
					0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N	10 20 30 40 50									
1	K	150							0.00-38.00m; ŞAPÇI VOLKANİTİ	and ✓ ✓				53	0			
2	K	150							Çok zayıf - zayıf dayanımlı, bej - kıvılcımsı kahverengi, orta derecede ayrılmış ANDEZİTİK TÜF; yer yer andezit ara seviyeli	and ✓ ✓				80	0			
3	K	150							Süreksizlikler genel olarak orta aralıkta, düzlemsel - az pürüzlü, dolgunuz - yüzeysel sıvımalı, orta çok ayrılmış niteliktedir.	and ✓ ✓				53	0			
4	K	150								and ✓ ✓				67	0			
5	K	150								and ✓ ✓				67	0			
6	K	150								and ✓ ✓				77	70			
7	K	150								and ✓ ✓				47	40			
8	K	150								and ✓ ✓				23	17			
9	K	150								and ✓ ✓								
10	K	150								and ✓ ✓								
11	K	150								and ✓ ✓								
12	K	150								and ✓ ✓								
					SÜREKSİZLİK ARALIĞI / Spacing		AYRISMA / Weathering		KAYA KALİTESİ TANIMI / RQD									
R6	AŞIRI SAĞLAM	Ext. Strong	1	AŞIRI KAPALI	<2cm	W1	TAZE	Fresh	%0-25	ÇOK ZAYIF	V. Poor							
R5	ÇOK SAĞLAM	Very Strong	2	ÇOK KAPALI	2-6cm	W2	AZ AYRISMIŞ	Slightly W.	%25-50	ZAYIF	Poor							
R4	SAĞLAM	Strong	3	KAPALI	6-20cm	W3	ORTA D. AYR.	Mod. Weath.	%50-75	ORTA	Fair							
R3	ORTA SAĞLAM	Mod. Strong	4	ORTA	20-60cm	W4	ÇOK AYR.	Highly W.	%75-90	İYİ	Good							
R2	ZAYIF	Weak	5	GENİŞ	60-200cm	W5	TÜMÜYLE AYR.	Comp. Weat.	%90-100	ÇOK İYİ	Excellent							
R1	ÇOK ZAYIF	Very Weak	6	ÇOK GENİŞ	200-600cm	W6	ARTIK ZEMİN	Soil										
R0	AŞIRI ZAYIF	Ext. Weak	7	AŞIRI GENİŞ	>600cm													
					İRİ TANELİ / Coarse Grained		İNCE TANELİ / Fine Grained		İRİ TANELİ / Coarse Grained									
N: 0-2	ÇOK YUMUŞAK	V. Soft	N: 0-4	ÇOK GEVŞEK	V. Soft	%5	PEK AZ	Slightly	%5	PEK AZ	Slightly							
N: 3-4	YUMUŞAK	Soft	N: 5-10	GEVŞEK	Soft	%5-15	AZ	Little	%5-20	AZ	Little							
N: 5-8	ORTA KATI	M. Stiff	N: 11-30	ORTA SIKI	M. Stiff	%15-35	ÇOK	Very	%20-50	ÇOK	Very							
N: 9-15	KATI	Stiff	N: 31-50	SIKI	Stiff	%35	VE	And										
N: 16-30	ÇOK KATI	V. Stiff	N: >50	ÇOK SIKI	V. Stiff													
N: >30	ŞERT	Hard																
SPT	STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test	K	KAROT NUMUNESİ Core Sample		Logu Yapan / Logged By	Kontrol / Checked By		Onay / Approved By										
BST	BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test	P	PRESİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test		İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign		İsim-İmza / Name-Sign										
UD	ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample	k	PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test															

Evciler Tüneli

SONDAJ No : SK-6
Borehole
SAYFA No : 2/3
Page

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)	NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test					JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength	AYRISMA / Weathering	SÜREKSİZLİK / Disc.	KAROT%(TCR) / T.ConeR	ROD%
			Darbe Sayısı Numb. Of Blows		GRAFIK Graph									
			0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N	10							
13	K	150											90	33
14	K	150											100	87
15														
16	K	150											23	17
17	K	150											40	40
18														
19	K	150											27	0
20	K	150											40	40
21														
22	K	150											80	67
23	K	150											100	100
24														
25	K	150											93	67
26	K	150											67	60
27														
28	K	150											80	73
29	K	150											67	60
30														
31	K	150											67	53
32	K	150											53	47
SPT STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test			K	KAROT NUMUNESİ Core Sample			Logu Yapan / Logged By	Kontrol / Checked By		Onay / Approved By				
BST BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test			P	PRESSİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test			İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign		İsim-İmza / Name-Sign				
UD ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Uncisturbed Sample			k	PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test										

Evciler Tüneli

SONDAJ Borehole No : SK-6
SAYFA Page No : 3/3

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)	NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	LAB. DENEYİ Lab. Test	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test					JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength	AYRISIMA / Weathering	SÜREKSİZLİK / Disc.	KAROT%(TCR) / T.ConeR	ROD%
				Darbe Sayısı Numb. Of Blows			GRAFIK Graph								
				0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N	10 20 30 40 50							
33	K	150													
34	K	150										77	47		
35	K	150										100	81		
36	K	150										100	100		
37															
KUYU SONU;37.50m															
38															
39															
40															
41															
42															
43															
44															
45															
46															
47															
48															
49															
50															
51															
52															
SPT	STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test	K	KAROT NUMUNESİ Core Sample	Logu Yapan / Logged By		Kontrol / Checked By		Onay / Approved By							
BST	BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test	P	PRESSİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test	İsim-İmza / Name-Sign		İsim-İmza / Name-Sign		İsim-İmza / Name-Sign							
UD	ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample	k	PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test												

Evciler Tüneli

SONDAJ Borehole No : SK-7
SAYFA Page No : 1/4

PROJE ADI / Project Name	: Evciler Tüneli	BAŞ.BİT.TAR. / Start Finish Date	: -
SONDAJ YERİ / Boring Location	: Gövde	MUH. BÖR. DER. / Casing Depth	: Yok
KİLOMETRE / Chainage	: 38+720	YASS ve ÖLÇÜM TARİHİ / GWL & Date	: Su Yok
SONDAJ DERİNLİĞİ / Boring Depth	: 66.50m	KOOR. SİSTEMİ / Coord. System	: ITRF96 30°
DELİK ÇAPLI / Hole Diameter	: 89mm	KOORDİNAT / Coordinate (N-S) X	: 538 164
SONDAJ MAK. & YÖNT. / D.Rig & Met.	: D-500 Rotary	KOORDİNAT / Coordinate (W-E) Y	: 4 389 148
SONDÖR / Driller	: -	SONDAJ KOTU / Elevation (m)	: 299

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)	NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	LAB. DENEYİ Lab. Test	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test						JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength AYRISMA / Weathering	SÜREKSİZLİK / Disc.	KAROT%(TCR) / T.CorrR	ROD%
				Darbe Sayısı Numb. Of Blows			GRAFİK Graph								
				0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N	10	20						
1	K	150								0.00-66.50m; ŞAPÇI VOLKANİTİ			27	0	
2	K	150								Çok zayıf - zayıf dayanımlı, bej - kıvılcıklı kahverengi, orta derecede ayrılmış ANDEZİTİK TUF; yer yer andezit ara seviyeli			23	0	
3															
4	K	150								Süreksilimler genel olarak orta aralıkta, düzensel - az pürüzlü, dolgunsuz - yüzeysel sıvımalı, orta çok ayrılmış niteliktedir.			17	0	
5	K	150											13	0	
6															
7	K	150											30	0	
8															
9	K	150											20	0	
10															
11	K	150											23	0	
12													70	20	

DAYANIMLILIK / Strength			SÜREKSİLİK ARALIĞI / Spacing			AYRISMA / Weathering			KAYA KALİTESİ TANIMI / ROD		
R6	AŞIRI SAĞLAM	Ext. Strong	1	AŞIRI KAPALI	<2cm	W1	TAZE	Fresh	%0-25	ÇOK ZAYIF	V. Poor
R5	ÇOK SAĞLAM	Very Strong	2	ÇOK KAPALI	2-6cm	W2	AZ AYRISMIŞ	Slightly W.	%25-50	ZAYIF	Poor
R4	SAĞLAM	Strong	3	KAPALI	6-20cm	W3	ORTA D. AYR.	Mod. Weath.	%50-75	ORTA	Fair
R3	ORTA SAĞLAM	Mod. Strong	4	ORTA	20-60cm	W4	ÇOK AYR.	Highly W.	%75-90	İYİ	Good
R2	ZAYIF	Weak	5	GENİŞ	60-200cm	W5	TÜMÜYLE AYR.	Comp. Weat.	%90-100	ÇOK İYİ	Excellent
R1	ÇOK ZAYIF	Very Weak	6	ÇOK GENİŞ	200-600cm	W6	ARTIK ZEMİN	Soil			
R0	AŞIRI ZAYIF	Ext. Weak	7	AŞIRI GENİŞ	>600cm						

İNCE TANELİ / Fine Grained			İRİ TANELİ / Coarse Grained			İNCE TANELİ / Fine Grained			İRİ TANELİ / Coarse Grained		
N: 0-2	ÇOK YUMUŞAK	V. Soft	N: 0-4	ÇOK GEVŞEK	V. Soft	%5	PEK AZ	Slightly	%5	PEK AZ	Slightly
N: 3-4	YUMUŞAK	Soft	N: 5-10	GEVŞEK	Soft	%5-15	AZ	Little	%5-20	AZ	Little
N: 5-8	ORTA KATI	M. Stiff	N: 11-30	ORTA SIKI	M. Stiff	%15-35	ÇOK	Very	%20-50	ÇOK	Very
N: 9-15	KATI	Stiff	N: 31-50	SIKI	Stiff	%35	VE	And			
N: 16-30	ÇOK KATI	V. Stiff	N: >50	ÇOK SIKI	V. Stiff						
N: >30	SERT	Hard									

SPT STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test	KAROT NUMUNESİ Core Sample	Logu Yapan / Logged By	Kontrol / Checked By	Onay / Approved By
BST BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test	PRESSİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign
UD ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample	PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test			

Evciler Tüneli

SONDAJ Borehole No : SK-7
SAYFA Page No : 2/4

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)	NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test				JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength	AYRISMA / Weathering	SÜREKSİZLİK / Disc.	KAROT%(TCR) / T.ConeR	ROD%
			Darbe Sayısı Numb. Of Blows		GRAFIK Graph								
			0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N							
13	K	150										53	17
14	K	150										87	53
15	K	150										70	50
16	K	150										13	0
17	K	150										13	0
18	K	150										30	0
19	K	150										30	0
20	K	150										20	0
21	K	150										27	0
22	K	150										23	0
23	K	150										27	0
24	K	150										27	0
25	K	150										27	X
26	K	150										13	0
27	K	150										13	7
28	K	150											
29	K	150											
30	K	150											
31	K	150											
32	K	150											
SPT STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test			K	KAROT NUMUNESİ Core Sample			Logu Yapan / Logged By	Kontrol / Checked By			Onay / Approved By		
BST BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test			P	PRESSİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test			İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign			İsim-İmza / Name-Sign		
UD ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Uncisturbed Sample			k	PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test									

Evciler Tüneli

SONDAJ Borehole No : SK-7
SAYFA Page No : 4/4

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)	NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	LAB. DENEYİ Lab. Test	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test					JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength	AYRISMA / Weathering	SÜREKSİZLİK / Disc.	KAROT%(TCR) / T.ConeR	ROD%
				Darbe Sayısı Numb. Of Blows			GRAFIK Graph								
				0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N	10 20 30 40 50							
53	K	150													
54	K	150													
55	K	150													
56	K	150													
57	K	150													
58	K	150													
59	K	150													
60	K	150													
61	K	150													
62	K	150													
63	K	150													
64	K	150													
65	K	150													
66	K	50													
67															
68															
69															
70															
71															
72															
KUYU SONU:66.50m															
SPT	STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test	K	KAROT NUMUNESİ Core Sample						Logu Yapan / Logged By	Kontrol / Checked By	Onay / Approved By				
BST	BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test	P	PRESSİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test						İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign				
UD	ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample	k	PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test												

Evciler Tüneli

SONDAJ Borehole No : SK-8
SAYFA Page No : 1/3

PROJE ADI / Project Name	: Evciler Tüneli	BAŞ.BİT.TAR. / Start Finish Date	: -
SONDAJ YERİ / Boring Location	: Çıkış Portalı (Sağ Tüp)	MUH. BOR. DER. / Casing Depth	: Yok
KİLOMETRE / Chainage	: 38+795	YASS ve ÖLÇÜM TARİHİ / GWL & Date	: Su Yok
SONDAJ DERİNLİĞİ / Boring Depth	: 36.00m	KOOR. SİSTEMİ / Coord. System	: ITRF96 30°
DELİK ÇAPI / Hole Diameter	: 89mm	KOORDİNAT / Coordinate (N-S) X	: 538 108
SONDAJ MAK. & YÖNT. / D.Rig & Met.	: D-500 Rotary	KOORDİNAT / Coordinate (W-E) Y	: 4 389 192
SONDÖR / Driller	: -	SONDAJ KOTU / Elevation (m)	: 277

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)	NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	LAB. DENEYİ Lab. Test	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test					JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength R4	AYRIŞMA / Weathering W2-W3	SÜREKSİZLİK / Disc. 2-3	KAROT%(TCR) / T.ConeR	ROD%
				Darbe Sayısı Numb. Of Blows			GRAFİK Graph								
				0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N	10 20 30 40 50							
1	K	150							0.00-36.00m; YÜREKLİ DASİTİ				13	0	
2	K	150							Sağlam dayanımlı, siyah - koyu gri renkli, az - orta derecede ayrılmış DASİT; ileri derecede eklemli, tamamen parçalanmış				10	0	
3									Süreksizlikler genel olarak çok kapalı - kapalı, düzlemsel - az pürüzlü, dolgunsuz, orta ayrılmış niteliktedir.				13	0	
4	K	150											20	0	
5	K	150											27	0	
6	K	150											10	0	
7	K	150											10	0	
8	K	150											10	0	
9	K	150											10	0	
10	K	150											33	0	
11	K	150													
12															

DAYANIMLILIK / Strength			SÜREKSİZLİK ARALIĞI / Spacing			AYRIŞMA / Weathering			KAYA KALİTESİ TANIMI / ROD		
R6 AŞIRI SAĞLAM	Ext. Strong	1 AŞIRI KAPALI	<2cm	W1 TAZE	Fresh	%0-25	ÇOK ZAYIF	V. Poor			
R5 ÇOK SAĞLAM	Very Strong	2 ÇOK KAPALI	2-6cm	W2 AZ AYRIŞMIŞ	Slightly W.	%25-50	ZAYIF	Poor			
R4 SAĞLAM	Strong	3 KAPALI	6-20cm	W3 ORTA D. AYR.	Mod. Weath.	%50-75	ORTA	Fair			
R3 ORTA SAĞLAM	Mod. Strong	4 ORTA	20-60cm	W4 ÇOK AYR.	Highly W.	%75-90	İYİ	Good			
R2 ZAYIF	Weak	5 GENİŞ	60-200cm	W5 TUMÜYLE AYR.	Comp. Weat.	%90-100	ÇOK İYİ	Excellent			
R1 ÇOK ZAYIF	Very Weak	6 ÇOK GENİŞ	200-600cm	W6 ARTIK ZEMİN	Soil						
R0 AŞIRI ZAYIF	Ext. Weak	7 AŞIRI GENİŞ	>600cm								

İNCE TANELİ / Fine Grained			İRİ TANELİ / Coarse Grained			İNCE TANELİ / Fine Grained			İRİ TANELİ / Coarse Grained		
N: 0-2	ÇOK YUMUŞAK	V. Soft	N: 0-4	ÇOK GEVŞEK	V. Soft	%5	PEK AZ	Slightly	%5	PEK AZ	Slightly
N: 3-4	YUMUŞAK	Soft	N: 5-10	GEVŞEK	Soft	%5-15	AZ	Little	%5-20	AZ	Little
N: 5-8	ORTA KATI	M. Stiff	N: 11-30	ORTA SIKI	M. Stiff	%15-35	ÇOK	Very	%20-50	ÇOK	Very
N: 9-15	KATI	Stiff	N: 31-50	SIKI	Stiff	%35	VE	And			
N: 16-30	ÇOK KATI	V. Stiff	N: >50	ÇOK SIKI	V. Stiff						
N: >30	SERT	Hard									

SPT	STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test	K	KAROT NUMUNESİ Core Sample	Logu Yapan / Logged By	Kontrol / Checked By	Onay / Approved By
BST	BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test	P	PRESSİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign
UD	ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample	k	PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test			

Evciler Tüneli

SONDAJ Borehole No : SK-8
SAYFA Page No : 3/3

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)	NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	LAB. DENEYİ Lab. Test	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test				GRAFİK Graph	JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength	AYRISMA / Weathering	SÜREKSİZLİK / Disc.	KAROT%(TCR) / T.Corr	ROD%
				Darbe Sayısı Numb. Of Blows			N								
				0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm									
33	K	150													
34	K	150											12	0	
35	K	150											15	0	
36															
37															
38															
39															
40															
41															
42															
43															
44															
45															
46															
47															
48															
49															
50															
51															
52															
SPT STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test								K	KAROT NUMUNESİ Core Sample	Logu Yapan / Logged By	Kontrol / Checked By	Onay / Approved By			
BST BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test								P	PRESSİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign			
UD ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample								k	PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test						

Evciler Tüneli

SONDAJ No : SK-9
Borehole
SAYFA No : 1/1
Page

PROJE ADI / Project Name	: Evciler Tüneli	BAŞ.BİT.TAR. / Start Finish Date	:
SONDAJ YERİ / Boring Location	: Çıkış Portalı (Sol Tüp)	MUH. BOR. DER. / Casing Depth	: Yok
KİLOMETRE / Chainage	: 38+800	YASS ve ÖLÇÜM TARİHİ / GWL & Date	: Su Yok
SONDAJ DERİNLİĞİ / Boring Depth	: 36.00m	KOOR. SİSTEMİ / Coord. System	: ITRF96 30°
DELİK ÇAPİ / Hole Diameter	: 89mm	KOORDİNAT / Coordinate (N-S) X	: 538 083
SONDAJ MAK. & YÖNT. / D.Rig & Met.	: D-500 Rotary	KOORDİNAT / Coordinate (W-E) Y	: 4 389 170
SONDÖR / Driller	: -	SONDAJ KOTU / Elevation (m)	: 280

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)	NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	LAB. DENEYİ Lab. Test	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test										JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength AYRIŞMA / Weathering	KAROT%(TCR) / T-CoreR		
				Darbe Sayısı Numb. Of Blows			GRAFİK Graph												
				0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N	10	20	30	40	50							
1	K	150														0.00-36.00m: YÜREKLİ DASİTİ		23	0
2	K	150														Sağlam dayanımlı, siyah - koyu gri renkli, az - orta derecede ayrılmış DASİT; ileri derecede eklemli, tamamen parçalanmış		43	0
3																Süreksizlikler genel olarak çok kapalı - kapalı, düzlemsel - az pürüzlü, dolgunuz, orta ayrılmış niteliktedir.		40	0
4	K	150																47	0
5	K	150																53	0
6	K	150																50	0
7	K	150																47	0
8	K	150																40	0
9																			
10	K	150																	
11	K	150																	
12																			

DAYANIMLILIK / Strength	SÜREKSİLİK ARALIĞI / Spacing	AYRIŞMA / Weathering	KAYA KALİTESİ TANIMI / RQD
R6 AŞIRI SAĞLAM Ext. Strong	1 AŞIRI KAPALI <2cm	W1 TAZE Fresh	%0-25 ÇOK ZAYIF V. Poor
R5 ÇOK SAĞLAM Very Strong	2 ÇOK KAPALI 2-6cm	W2 AZ AYRIŞMIŞ Slightly W.	%25-50 ZAYIF Poor
R4 SAĞLAM Strong	3 KAPALI 6-20cm	W3 ORTA D. AYR. Mod. Weath.	%50-75 ORTA Fair
R3 ORTA SAĞLAM Mod. Strong	4 ORTA 20-60cm	W4 ÇOK AYR. Highly W.	%75-90 İYİ Good
R2 ZAYIF Weak	5 GENİŞ 60-200cm	W5 TUMÜYLE AYR. Comp. Weat.	%90-100 ÇOK İYİ Excellert
R1 ÇOK ZAYIF Very Weak	6 ÇOK GENİŞ 200-600cm	W6 ARTIK ZEMİN Soil	
R0 AŞIRI ZAYIF Ext. Weak	7 AŞIRI GENİŞ >600cm		

İNCE TANELİ / Fine Grained	İRİ TANELİ / Coarse Grained	İNCE TANELİ / Fine Grained	İRİ TANELİ / Coarse Grained
N: 0-2 ÇOK YUMUŞAK V. Soft	N: 0-4 ÇOK GEVŞEK V. Soft	%5 PEK AZ Slightly	%5 PEK AZ Slightly
N: 3-4 YUMUŞAK Soft	N: 5-10 GEVŞEK Soft	%5-15 AZ Little	%5-20 AZ Little
N: 5-8 ORTA KATI M. Stiff	N: 11-30 ORTA SIKI M. Stiff	%15-35 ÇOK Very	%20-50 ÇOK Very
N: 9-15 KATI Stiff	N: 31-50 SIKI Stiff	%35 VE And	
N: 16-30 ÇOK KATI V. Stiff	N: >50 ÇOK SIKI V. Stiff		
N: >30 SERT Hard			

SPT STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test	KAROT NUMUNESİ Core Sample	Logu Yapan / Logged By	Kontrol / Checked By	Onay / Approved By
BST BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test	P PRESSİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign
UD ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample	k PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test			

Evciler Tüneli

SONDAJ No : SK-9

SAYFA No : 2/3

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)	NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	LAB. DENEYİ Lab. Test	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test				GRAFİK Graph	JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength	AYRISMA / Weathering	KAROT%(TCR) / T.Corer	ROD%
				Darbe Sayısı Numb. Of Blows										
				0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N							
13	K	150							Sağlam dayanımlı, siyah - koyu gri renkli, az - orta derecede ayrılmış DASİT; ileri derecede eklemli, tamamen parçalanmış	✓			60	0
14	K	150								✓			33	0
15										✓				
16	K	150							Süreksizlikler genel olarak çok kapalı - kapalı, düzlemsel - az pürüzlü, dolgunsuz, orta ayrılmış niteliktedir.	✓			33	10
17	K	150								✓			47	0
18										✓				
19	K	150								✓			20	0
20	K	150								✓			20	0
21										✓				
22	K	150								✓			67	0
23	K	150								✓			53	0
24										✓				
25	K	150								✓			67	0
26	K	150								✓			33	0
27										✓				
28	K	150								✓			20	0
29	K	150								✓			27	0
30										✓				
31	K	150								✓			23	0
32	K	150								✓			32	0

SPT STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test	K	KAROT NUMUNESİ Core Sample	Logu Yapan / Logged By	Kontrol / Checked By	Onay / Approved By
BST BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test	P	PRESSİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign
UD ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample	k	PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test			

Evciler Tüneli

SONDAJ Borehole No : SK-9
SAYFA Page No : 3/3

SONDAJ DERİNLİĞİ Boring Depth (m)	NUMUNE CİNSİ Sample Type	Manevra Boyu Run	LAB. DENEYİ Lab. Test	STANDART PENETRASYON DENEYİ Standart Penetration Test				JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	PROFİL Profile	DAYANIMLILIK / Strength R4	AYRISMA / Weathering W2-W3	SÜREKSİZLİK / Disc. 2-3	KAROT%(TCR) / T.Corr	ROD%					
				Darbe Sayısı Numb. Of Blows			N								GRAFİK Graph				
				0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm									10	20	30	40	50
-33	K	150																	
-34	K	150												10					
-35	K	150												0					
-36																			
-37																			
-38																			
-39																			
-40																			
-41																			
-42																			
-43																			
-44																			
-45																			
-46																			
-47																			
-48																			
-49																			
-50																			
-51																			
-52																			
Sağlam dayanımlı, siyah - koyu gri renkli, az - orta derecede ayrılmış DASİT; ileri derecede eklemli, tamamen parçalanmış Süreksizlikler genel olarak çok kapalı - kapalı, düzlemsel - az pürüzlü, dolgunuz, orta ayrılmış niteliktedir.																			
KUYU SONU; 36.00m																			
SPT	STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test	K	KAROT NUMUNESİ Core Sample																
BST	BASINÇLI SU TESTİ Water Pressure Test	P	PRESSİYOMETRE DENEYİ Pressuremeter Test																
UD	ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample	k	PERMEABİLİTE DENEYİ Permeability Test																
				Logu Yapan / Logged By	Kontrol / Checked By				Onay / Approved By										
				İsim-İmza / Name-Sign	İsim-İmza / Name-Sign				İsim-İmza / Name-Sign										

EK-3. Karot Sandık Fotoğrafları

SK-5 Sondaj









SK-6 Sondajı







SK-7 Sondajı







SK-8 Sondajı





SK-9 Sondaji





