

**AKŞAR REGÜLATÖRÜ T3 TÜNELİ (BİTLİS-HİZAN)  
DESTEK SİSTEMLERİNİN GÖRGÜL VE SAYISAL  
YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF SUPPORT SYSTEMS OF AKŞAR  
REGULATOR T3 TUNNEL (BİTLİS-HİZAN) BY  
EMPIRICAL AND NUMERICAL METHODS**

**YÜCEL DEMİRCAN**

**PROF.DR. H. HÜSNÜ AKSOY**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Jeoloji Mühendisliği Anabilimdalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır

2015

**YÜCEL DEMİRCAN'** ın hazırladığı “**Akşar Regülatörü T3 Tüneli (Bitlis-Hizan) Destekleme Sistemlerinin Görgül ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Reşat Ulusay

Başkan

.....

Prof. Dr. H. Hüsnü AKSOY

Danışman

.....

Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER

Üye

.....

Doç. Dr. Ergün TUNCAY

Üye

.....

Doç. Dr. Nihat S. IŞIK

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*Kızım, Deniz Demircan'a ithafen...*

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

20/08/2015

YÜCEL DEMİRCAN

## ÖZET

# AKŞAR REGÜLATÖRÜ T3 TÜNELİ (BİTLİS-HİZAN) DESTEK SİSTEMLERİNİN GÖRGÜL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

**Yücel DEMİRCAN**

**Yüksel Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. H. HÜSNÜ AKSOY**

**Ağustos 2015, 96 sayfa**

Bu tezde, Doğu Anadolu Bölgesinde, Bitlis ili Hizan ilçesi, Akşar köyü yakınlarında inşa edilecek “Akşar Regülatörü ve Nazar Hes” projesi kapsamında açılacak iletim tünellerinden biri olan, 2739 m uzunluğundaki T3 tünelinin, kaya kütlesi sınıflamaları yapılarak kazı destek sınıflarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada RMR ve RMQR gibi bilinen ve yeni geliştirilmiş görgül yöntemlerin yanı sıra, kapanma-sınırlama (Convergence-Confinement) yöntemi gibi analitik çözümlere de yer verilmiştir. Ayrıca, kazı çevresindeki kaya davranışı ve tünel destek sistemlerinin önerilmesinde, Phase<sup>2</sup> sonlu elemanlar programı kullanılarak bulunan sonuçlar doğrulanmıştır.

T3 tünel güzergahı üzerinde açılan 1+332 kilometrede AT2SK-2 ve 2+518 kilometrede AT2SK-3 no.lu araştırma sondajlarından, tünel kotunda alınan örneklerden analizlerde kullanılacak olan parametreleri belirlemek amacıyla kaya mekaniği laboratuvarında, tek eksenli sıkışma dayanımı, üç eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranının tayini amacıyla deneyler yapılmıştır. Sağlam kayanın (kaya malzemesinin) mühendislik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, kaya kütlesi sınıflamaları, tünel destek sınıflarının belirlenmesi ve sayısal modellerin oluşturulmasında başlıca girdiler olarak kullanılmışlardır.

Görgül yöntemler kullanılarak, tünel kazısı sırasında karşılaşılabilecek kaya kütlelerine ait sınıflar, RMR için “destek sınıfı III” ve RMQR için ise “destek sınıfı IV” olarak belirlenmiştir. Ayrıca tünel kazısı sırasında, tünel çevresinde gelişen deformasyonun, destek basıncına bağlı olarak değişim hesaplanmış ve deformasyon boy kesitinde ve zemin reaksiyon eğrilerinde gösterilmişlerdir. RMR ve RMQR‘ın önerdiği destek sistemleri, belirlenen destek sınıflarına göre, kaya desteği etkileşim grafikleri ayrı ayrı çizilmiş ve değerlendirilmiştir. Phase<sup>2</sup> programı kullanılarak destek sistemlerinin iki farklı kaya kütlesi içerisinde modelleri hazırlanmıştır. Sonuçlar, dayanım faktörü ve toplam yer değiştirme olarak sayısallaştırılmıştır. Buna göre, elasto-plastik kaya davranış modellerinde en büyük toplam yer değiştirmeler desteksiz koşullarda 1+332. km’de 0,15 m ve 2+518. km’de 0,17 m olarak gerçekleşmiştir. Destek sistemlerinin uygulanması halinde ise, toplam yer değiştirmelerin oldukça düştüğü görülmüş, yer değiştirmeler, 1+332 km’de 0,003 m ve 2+518 km’de 0,0048 m olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca destek-etkileşim grafiklerinden RMR kaya destek sisteminde 0,7 MPa ve RMQR destek sisteminde ise 3,3 MPa gibi yüksek destek basınçları elde edilmiştir.

Görgül, analitik ve sayısal çözümleme teknikleriyle değerlendirilen farklı iki kaya kütlesinde kullanılan farklı iki destek sınıfı (RMR ve RMQR) destekleme sisteminin bu tünel kazısı için oldukça güvenli olduğu, ancak RMQR destek önerisinin daha tutucu ve dolayısıyla daha yüksek güvenlik katsayısı verdiği görülmüştür. Ayrıca sayısal modellerde oluşan toplam deformasyonun oldukça küçük çıkması, görgül yöntemlerle belirlenen destek sınıflarının tünel kazısı sırasında uygulanması halinde oldukça güvenli olacağını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akşar-Nazar HES, boyuna deformasyon profili (LDP), destek karakteristiği eğrisi (SCC), kapanma-sınırlanma, kaya kütlesi sınıflamaları, nümerik model, tünel, zemin reaksiyon eğrisi (GRC).

## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATION OF SUPPORT SYSTEMS OF AKŞAR REGULATOR T3 TUNNEL (BİTLİS-HİZAN) BY EMPIRICAL AND NUMERICAL METHODS**

**Yücel DEMİRCAN**

**Degree of Master's in Geological Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. H. HÜSNÜ AKSOY**

**August 2015, 96 pages**

In this thesis, it is aimed to carry out rock mass classification and suggest excavation support classes for one of the conveyance tunnels of the T3 tunnel having a length of 2739 m, planned to be opened within the framework of the project “Akşar Regulator and Nazar HEPP” in the Eastern Anatolia, Bitlis Hizan Region.

The study covers known and newly developed empirical methods such as RMR and RMQR, respectively as well as the Convergence- Confinement method as analytical solution. Rock behaviour around the excavation and suggestion for tunnel support systems have been confirmed by the results of the Phase<sup>2</sup> finite element program.

In order to determine the parameters to be used in the analyses, samples were taken at the tunnel elevation from the investigation boreholes at the chainage 1+332 km, AT2SK-2 and at the chainage 2+518 km, AT2SK-3 of the T3 tunnel alignment, to carry out uniaxial and triaxial compressive strength tests, and to determine Young's moduli and Poisson's ratio at the rock mechanics laboratory. The results obtained for the engineering parameters of the intact rock were used as the main inputs of the rock mass classification, determination of tunnel support classes and generation of the numerical model.

Using empirical methods, the rock mass classes, that might be encountered during the excavation of the tunnel, were determined as “support class III” for RMR and “support class IV” for RMQR systems. Changes in the deformation around the tunnel were calculated

depending on the support pressure during the tunnel excavation, and longitudinal deformation profile and ground reaction curves were shown accordingly. On the basis of support classes proposed by RMR and RMQR systems, rock support interaction curves were drawn separately and evaluated. Models of the support system in two different rock masses were prepared and evaluated by Phase<sup>2</sup> program. The results were digitized as strength factor and total displacement. According to elasto-plastic behaviour of the modeled rock, maximum total displacements in unsupported conditions were realized 0,15 m at the chainage 1+332 km and 0,17 m at the chainage 2+518 km. On the other hand, the total displacement was observed to decrease, in case of application of the support system, accordingly. Displacements were realized as 0,003 m at the chainage 1+332 km and 0,0048 m at the chainage 2+518 km. Also, as seen from the rock - support interaction curves, quite high support pressures as 0,7 MPa and 3,3 MPa were generated by the RMR and the RMQR rock support systems, respectively.

Two different support class systems which are used in two different rock mass classification systems (RMR and RMQR), evaluated by empirical, analytical and numerical methods, for the tunnel excavation, were determined to be quite safe, however, a higher safety factor value was obtained for a more conservative recommendation of RMQR support. Also, quite small deformation values obtained from numerical models indicated that using the support classes determined by empirical methods during the tunnel excavation would provide a quite safe tunnel operation.

**Keywords:** Aksar-Nazar HEPP, longitudinal deformation profile (LDP), support characteristic curve (SCC), convergence-confinement, rock mass classifications, numerical model, tunnel, ground reaction curve (GRC).



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımın her aşamasında değerli katkı ve eleştirileriyle yol gösteren, bana sabırla her zaman vakit ayıran ve güven veren danışmanım, Sayın Prof. Dr. H. Hüsnü Aksoy, ayrıca önemli yorum ve değerlendirmeleri ile katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Reşat Ulusay ve Sayın Prof. Dr. Bahtiyar Ünver'e,

Ayrıca tezin hazırlanması sırasında arazi çalışmaları için her türlü lojistik desteği sağlayan Bitlis/Hizan, Akşar Regülatörü ve Nazar HES Şantiyesinde görev yapan Erges Mühendislik ve Müş. Ltd. Şti. yetkililerine ve personeline,

Çalışmada sayısal modellere ilişkin analizlerin Phase<sup>2</sup> sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilebilmesine lisanslı programlarını kullandırmak suretiyle katkı sağlayan Fugro-Sial Yerbilimleri Müşavirlik. ve Mühendislik Ltd. Şirketi yetkililerine,

Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarı teknisyenlerinden Ahmet Bay ve Özgür Erol'a laboratuvar çalışmalarında gösterdikleri ilgi ve yardımları için teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	ix
ŞEKİLLER .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı .....	1
1.2. İnceleme Alanının Yeri ve Ulaşım .....	1
1.3. Bölgede Yapılmış Jeolojik Araştırmalar .....	2
1.4. Çalışma Yöntemi .....	3
1.5. Tünel Tip Kesiti.....	4
2. BAŞLICA KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMLERİ.....	5
2.1. Kaya Kütleli Sınıflaması ve Tünel Destekleme Sistemleri.....	5
2.1.1. Q Kaya Sınıflama Sistemi .....	5
2.1.2. RMR Kaya Destekleme Sistemi .....	6
2.1.3. RMQR Sınıflama Sistemi.....	9
3. TÜNEL GÜZERGAHI VE CİVARININ JEOLJİSİ.....	13
3.1. Genel Jeoloji .....	13
3.1.1. Stratigrafi.....	13
3.1.2. Yapısal Jeoloji .....	17
3.1.3. Kıvrımlar .....	18
3.1.4. Faylar.....	18

3.2. Deprem Durumu .....	18
4. ARAZİ ÇALIŞMALARI.....	19
4.1. T3 Tüneli Araştırma Sondajları .....	19
5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI.....	23
5.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanım Deneyi .....	23
5.2. Üç Eksenli Sıkışma Deneyi .....	24
5.3. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Değerleri .....	26
5.4. Birim Hacim Ağırlığı .....	28
6. KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ .....	29
6.1. T3 Tünel Güzergahı Boyunca Karşılaşılan Litolojik Birimler .....	29
6.2. Kaya Kütle Sınıflamaları .....	29
6.2.1. Kaya Kütle Puanı (RMR) .....	29
6.2.2. Kaya Kütle Kalitesi Puanlama Sistemi (RMQR) .....	34
6.3. Kaya Kütle Parametreleri.....	35
6.3.1. Kaya Kütlelerinin Dayanımı .....	36
6.3.2. Kaya Kütlelerinin Deformasyon Modülü.....	36
6.3.3. Hoek ve Brown Görgül Yenilme Ölçütü ve Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI).....	37
7. T3 TÜNELİ KAYA DESTEK SINIFLARI VE DESTEKLEME SİSTEMLERİ .....	43
7.1. RMR Destek Sınıfı .....	43
7.1.1. RMR Tünel Destekleme Sistemi .....	44
7.2. RMQR Tünel Destekleme Sistemi .....	45
8. ANALİTİK ÇÖZÜMLEMELER .....	46
8.1. Sınırlamalar .....	46
8.2. Kapanma – Sınırlama Yöntemi .....	47
8.2.1. Boyuna Deformasyon Profili (LPD).....	48
8.2.2. Zemin Reaksiyon Eğrisi (GRC) .....	52

8.2.3. Destek Karakteristiği Eğrisi (SCC) .....	55
9. SAYISAL MODELLER .....	67
9.1. Phase <sup>2</sup> 'de Kullanılan Parametreler .....	67
9.2. Elastik Analiz .....	71
9.3. Plastik Analiz.....	71
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	89
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	96

## ÇİZELGELER

### Sayfa

Çizelge 2.1. Kaya kütlesi puanı (Kaya kütlesinin jeomekanik sınıflaması) [3] .....	7
Çizelge 2.2. Süreksizlik yüzeylerinin durumunun değerlendirilmesi için kılavuz [3] .....	7
Çizelge 2.3. Tünellerde süreksizlik doğrultusu ve eğiminin etkisi [3].....	8
Çizelge 2.4. Süreksizlik yönelimine göre düzeltme [3].....	8
Çizelge 2.5. Toplam puana göre kaya kütlesi sınıfları [3].....	8
Çizelge 2.6. Kaya kütlelerinin bozunma derecesiyle ilgili sınıflama [9] .....	8
Çizelge 2.7. RMQR Sistemi sınıflama parametreleri ve puanları [4, 11] .....	11
Çizelge 4.1. Sondaj özet tablosu.....	19
Çizelge 5.1. Tek eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçları .....	23
Çizelge 5.2. AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu sondajlara ait karotlar üzerinde yapılan üç eksenli sıkışma dayanımı laboratuvar deney sonuçları.....	24
Çizelge 5.3. AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu sondajlardan alınan karot örneklerine ait elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri .....	27
Çizelge 5.4. AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu sondajlardan alınan karot örneklerine ait birim hacim ağırlık deney sonuçları.....	28
Çizelge 6.1. Km: 1+332 ve km: 2+518'deki kaya kütleleri için RMR sınıflaması.....	34
Çizelge 6.2. 1+332 ve km: 2+518'de RMQR sınıflamasına göre RMQR değerleri .....	35
Çizelge 6.3. Süreksizlik yüzey koşulu puanlaması (SCR) ve Yapısal özellik puanlaması (SR) (Sönmez ve Ulusay, [24]'e göre).....	38
Çizelge 6.4. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerine göre $m_i$ ve $r$ değerleri .....	40
Çizelge 6.5. 110,0m (AT2SK-2) ve 150,0m (AT2SK-3) örtü yükü altında kaya kütlesi dayanım parametreleri. ....	41
Çizelge 6.6. Kaya kütlesi tasarım parametreleri.....	42
Çizelge 7.1. RMR puanına göre kazı ve kaya tünelleri için destek önerileri [3].....	44
Çizelge 7.2. RMQR sistemine göre kaya kütle kalitesi sınıfları [4].....	45

Çizelge 7.3. Tüneller için destek sistemi (D veya B; 10 m açıklık) [12, 13] .....	45
Çizelge 8.1. Kaplama ve püskürtme beton analiz değerleri .....	59
Çizelge 8.2. Kaya bulonu analiz değerleri [47] .....	61
Çizelge 8.3. Çelik iksa analiz değerleri [50] .....	63
Çizelge 8.4. Birleşik destek sistemi analiz değerleri .....	64
Çizelge 9.1. Phase <sup>2</sup> programı için esas alınan koşullar ve seçilen jeomekanik parametreler .....	68
Çizelge 9.2. Uygulanan destek sınıfı ve tünel kaya malzemesi davranışına göre tünel duvarındaki yer değiştirmeler .....	80

# ŞEKİLLER

## Sayfa

Şekil 1.1. Proje yeri bulduru haritası (KGM 11. Bölge Haritası-Google Maps/Nisan 2015)	2
Şekil 1.2. T3 tüneli kazı tip kesiti.....	4
Şekil 2.1. Pürüzlülük profilleri ve ilgili JRC değerleri [9] .....	12
Şekil 3.1. T3 Tünel güzergahı bölgesi jeoloji haritası ve açıklamaları (Şengün vd., [6]'den değiştirilmiştir) .....	14
Şekil 3.2. Tünel güzergahı jeolojik boy kesiti .....	15
Şekil 3.3. T-3 tüneli çıkış portalı yakınında Kuytu Formasyonuna ait şistlerden bir görünüm. .....	16
Şekil 3.4. Güneydoğu Anadolu tektonik kuşakları [2] .....	17
Şekil 3.5. Proje alanının deprem bölgeleri haritası, [15] .....	18
Şekil 4.1. AT2SK-2 no.lu sondajın tünel kotu ve çevresindeki koşulları gösteren jeoteknik log .....	20
Şekil 4.2. AT2SK-2 / Km: 1+332, Arpik formasyonu (115,0-120,0 m) .....	21
Şekil 4.3. AT2SK-3/ km: 2+518, Kuytu formasyonu (119,0-122,5 m) .....	21
Şekil 4.4. AT2SK-3 no.lu sondajın tünel kotu ve çevresindeki koşulları gösteren jeoteknik log .....	22
Şekil 5.1. a) AT2SK-2, b) AT2SK-3 no.lu sondalara ait karotlarda yapılan deneylerin Mohr çemberleri ve yenilme zarfları .....	24
Şekil 5.2. AT2SK-2 no.lu sondajda alınan karotlardan hazırlanan örnekler üzerinde yapılan 3 eksenli sıkışma deneyi sonuçlarından hazırlanmış p-q grafiği ve zarfı.....	25
Şekil 5.3. AT2SK-3 no.lu sondaja ait karotlardan hazırlanan örnekler üzerinde yapılan 3 eksenli sıkışma deneyi sonuçlarından hazırlanmış p-q grafiği ve zarfı.....	25
Şekil 5.4. AT2SK-2, 1 no.lu örneğe ait elastisite modülü ve Poisson oranı grafiği .....	26
Şekil 5.5. AT2SK-2, 2 no.lu örneğe ait elastisite modülü ve Poisson oranı grafiği.....	26
Şekil 5.6. AT2SK-3, 2 no.lu örneğe ait elastisite modülü ve Poisson oranı grafiği .....	27

Şekil 6.1. 1+332 ve 2+518 km'ler kaya malzemesinin dayanım puanları .....	30
Şekil 6.2. 1+332 ve 2+518 km'ler için RQD (%) puanı.....	30
Şekil 6.3. 1+332 ve 2+518 km'ler için süreksizlik aralığı puanları .....	31
Şekil 6.4. Arpik formasyonu süreksizlik ölçümleri (Schmidt eş alan projeksiyonu) .....	32
Şekil 6.5. Kuytu formasyonu süreksizlik ölçümleri (Schmidt eş alan projeksiyonu) .....	33
Şekil 6.6. Kantitatif GSI abağı (Sönmez ve Ulusay [24; 25]'den) ve bu çalışmada incelenen kaya kütlelerinin GSI değerleri .....	39
Şekil 6.7. AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu kuyulara ait kayaçlarda $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - \sigma_3$ ilişkisi.....	40
Şekil 6.8. 110 ve 150 m'ye kadar kaya kütleleri yenilme zarfları .....	41
Şekil 7.1. İncelenen kaya kütleleri için RMR sınıflamasına [3] göre desteksiz durma süreleri .....	43
Şekil 8.1. Kapanma –Sınırlama yöntemi analizleri (Carranza-Torres ve Fairhurst [32]'dan) .....	48
Şekil 8.2. Boyuna deformasyon profili [34]......	49
Şekil 8.3. AT2SK-2 sondajı tünel duvarı boyuna deformasyon profili.....	51
Şekil 8.4. AT2SK-3 sondajı tünel duvarı boyuna deformasyon profili.....	52
Şekil 8.5. Zemin reaksiyon eğrisi [7]. .....	53
Şekil 8.6. Destek sisteminin dengeyi sağlamak için tünel duvarındaki yer değiştirmeye gösterdiği tepki [7, 42]. .....	56
Şekil 8.7. İlerleyen tünel aynasına bağlı farklı konumlardaki deformasyon destek basıncı $P_i$ (ölçeksiz) [43]......	57
Şekil 8.8. Km: 1+332 zemin reaksiyon eğrisi (GRC) - RMR .....	64
Şekil 8.9. Km: 1+332 zemin reaksiyon eğrisi (GRC) - RMQR .....	65
Şekil 8.10. Km: 2+518 zemin reaksiyon eğrisi (GRC) - RMR .....	66
Şekil 8.11. Km: 2+518 zemin reaksiyon eğrisi (GRC) - RMQR .....	66
Şekil 9.1. Km: 1+332 (AT2SK-2)'de tünelin üzerindeki topoğrafya ile birlikte FEM ağı .	68
Şekil 9.2. Km: 2+518 (AT2SK-3)'de tünelin üzerindeki topoğrafya ile birlikte FEM ağı .	69



Şekil 9.3. km:1+332, $\sigma_1$ en büyük asal gerilme (kazısız) .....	70
Şekil 9.4. km: 2+518, $\sigma_1$ en büyük asal gerilme (kazısız) .....	70
Şekil 9.5. AT2SK-2 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMR-Elastik)..	72
Şekil 9.6. AT2SK-2 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMR-Elastik).....	73
Şekil 9.7. AT2SK-2 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMQR-Elastik)74	
Şekil 9.8. AT2SK-2 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMQR-Elastik).....	75
Şekil 9.9. AT2SK-3 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMR-Elastik)..	76
Şekil 9.10. AT2SK-3 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMR-Elastik).....	77
Şekil 9.11. AT2SK-3 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMQR-Elastik) .....	78
Şekil 9.12. AT2SK-3 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMQR-Elastik).....	79
Şekil 9.13. AT2SK-2 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMR-Plastik) 81	
Şekil 9.14. AT2SK-2 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMR-Plastik).....	82
Şekil 9.15. AT2SK-2 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMQR-Plastik) .....	83
Şekil 9.16. AT2SK-2 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMQR-Plastik).....	84
Şekil 9.17. AT2SK-3 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMR-Plastik) 85	
Şekil 9.18. AT2SK-3 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMR-Plastik).....	86
Şekil 9.19. AT2SK-3 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMQR-Plastik) .....	87
Şekil 9.20. AT2SK-3 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMQR-Plastik).....	88

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$a$	Hoek-Brown kaya kütlesi sabiti
$c$	Kohezyon (MPa)
$D$	Örselenme Faktörü
$D_f$	Örselenme Faktörü
$E_i$	Sağlam kayacın (kaya malzemesinin) elastisite modülü
$E_m$	Kaya kütlesinin deformasyon modülü (GPa)
$G_{rm}$	Kaya kütlesinin makaslama modülü (MPa)
$\Psi$	Dilatasyon Açısı
$K_\Psi$	Dilatasyon Katsayısı
$H$	Örtü kalınlığı veya tünel derinliği (m)
$m_i$	Hoek-Brown kaya malzemesi sabiti
$m_b$	Hoek-Brown azaltılmış malzeme sabiti
$P_i^{cr}$	Kritik destek basıncı (MPa)
$P_i$	Destek basıncı (MPa)
$R$	Tünel yarıçapı (m)
$R_r$	Süreksizlik pürüzlülük puanı (GSI)
$R_w$	Süreksizlik bozunma puanı (GSI)
$R_f$	Süreksizlik dolgu puanı (GSI)
$R_{BD}$	Bozunma derecesi
$R_{STS}$	Süreksizlik takımı sayısı
$R_{SA}$	Süreksizlik aralığı
$R_{SD}$	Süreksizliklerin durumu
$R_{SDA}$	Süreksizliğin açıklığı
$R_{SDD}$	Süreksizliğin dolgusu
$R_{SDP}$	Süreksizliğin pürüzlülüğü
$R_{SED}$	Su emme durumu
$R_{YASD}$	Yeraltısuyu sızma durumu
$s$	Hoek-Brown kaya kütlesi sabiti
$U_f^{wall}$	Dairesel iç kapanma (mm)

$U_r^{pl}$	GRC 'de dairesel deformasyon plastik bölümü (m)
$U_r^{el}$	GRC 'de dairesel deformasyon elastik bölümü (m)
$\nu$	Poisson oranı
$R_{pl}$	Plastik bölgenin yarıçapı (m)
$\sigma_0$	Uzak alan gerilmesi (kPa)
$S_0$	Ölçeklendirilmiş uzak alan gerilmesi (kPa)
$\phi$	İçsel sürtünme açısı ( $^{\circ}$ )
$\gamma$	Birim hacim ağırlık ( $kN/m^3$ )
$\sigma_h$	Düşey gerilme (MPa)
$\sigma_v$	Yatay gerilme (MPa)
$\varepsilon$	Birim deformasyon
$\sigma_1$	En büyük asal gerilme
$\sigma_3$	En küçük asal gerilme
$\sigma_{ci}$	Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı
$\sigma_{cm}$	Kaya kütesinin tek eksenli sıkışma dayanımı
$\tau$	Makaslama gerilmesi, makaslama dayanımı

## Kısaltmalar

GRC	Zemin reaksiyon eğrisi
GSI	Jeolojik dayanım indeksi
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği
JCS	Süreksizlik yüzeyi dayanımı
JRC	Süreksizlik yüzeyi pürüzlülük katsayısı
LDP	Boyuna deformasyon profili
RMR	Kaya kütle puanlaması
RMQR	Kaya kütle kalite puanlaması
RQD	Kaya kalite göstergesi
SCC	Destek karakteristiği eğrisi
SCR	Süreksizlik yüzey koşulu puanı
TKV	Toplam karot verimi

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, Bitlis ili Hizan ilçesinin güneyinde inşası planlanan Akşar Regülatörü ile Nazar Hidroelektrik santrali arasında 4 adet iletim tüneline 2739 m ile en uzun olan 3. tüneline (T3) kaya kütle sınıflarının ve gerekli destekleme sistemlerinin, görgül, analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak hesaplanması amaçlanmıştır. Tünel kazılarının geleneksel yöntemlerle (delme/patlatma) açılması öngörülmektedir.

İletim tüneline içinden geçeceği jeolojik birimlerin, bölgede yaygın olarak gözlenen ve araştırma sondajlarından alınan karot incelemelerine göre çoğunlukla metamorfik kayalardan oluştuğu gözlenmiştir.

Tünel kazısının başlamasından sonra, kazı sırasında değişen farklı kalitedeki kaya kütlelerine göre en uygun destek sınıflarının seçilerek, gerekli destek sınıflarının uygulanması, delme/patlatma ve ilerleme sırasında tünel çevresinde oluşabilecek deformasyonların veya aşırı sökümlerin engellenmesi bakımından önemlidir. Bu nedenle tünel duraylılığı için mevcut kaya kütlelerinde doğru seçilmiş kaya desteği kullanılmalıdır.

Bu çalışmada, sahada gözlenen farklı kaya kütleleri, araştırma sondajları ile jeoteknik anlamda loglanan karotlar ve proje için önceden hazırlanmış fizibilite raporu kullanılarak [1, 2], tünel kazısı sırasında uygulanacak destek sınıflarının 2 farklı görgül sınıflama sistemiyle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu sınıflamalardan biri, Bieniawski tarafından 1989 yılında önerilen Kaya Kalitesi Puanlama (RMR) sistemi [3], diğer sınıflama sistemi ise, 2014 yılında yayınlanan ve yeni kaya destekleme sistemi olarak Aydan vd. [4] tarafından geliştirilen Kaya Kütle Kalitesi Puanlama (RMQR) sistemidir. Ayrıca kazı sırasında tüneline kaya kütleleri içerisinde nasıl davranış gösterdiğinin analitik yöntemlerle açıklanması ve sayısal yöntemlerle de analiz sonuçlarının doğruluğunun denetlenmesi amaçlanmıştır.

## 1.2. İnceleme Alanının Yeri ve Ulaşım

Proje sahası; Bitlis ili Hizan ilçesinin yaklaşık 23 km güneydoğusunda, Sutopu Deresi'nin sağ sahilinde yer almaktadır. Akşar Mahallesi'ne ulaşan köy yolu, T3 tünel güzergahı üzerindedir. Proje sahasına devlet karayolu ağı (Şekil 1.1) ve köy yollarından yararlanılarak ulaşım hemen hemen her mevsim sağlanmaktadır.



Şekil 1.1. Proje yeri bulduru haritası (KGM 11. Bölge Haritası-Google Maps/Nisan 2015)

### 1.3. Bölgede Yapılmış Jeolojik Araştırmalar

Bitlis ili Hizan ilçesinin güneyinde yer alan çalışma alanının genel jeolojisi, yapısal jeolojisi ve araştırma konusuyla ilgili olan diğer jeoteknik incelemeleri kapsayan literatür araştırması yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, Şengün [5] tarafından 1984 yılında hazırlanan,

“Tatvan Güneyinin (Bitlis Masifi) Jeolojik/Petrografik/İncelenmesi.”ni içeren Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi’ne ve Şengün vd. [6] tarafından 1991 yılında, MTA için hazırlanmış olan “Bitlis Masifi Bitlis-Tatvan- Hizan Şirvan Dolayının Jeolojisi” raporuna ulaşılmıştır. Bu çalışmaların ayrıntılarına tünel güzergahı (inceleme alanı) jeolojisinin sunulduğu, Bölüm 3’de yer verilmiştir.

#### **1.4. Çalışma Yöntemi**

Akşar Regülatörü ve Nazar HES kapsamında yürütülen çalışmalar; arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları, görgül analizler, analitik analizler ve sayısal çözümler şeklinde sıralandırılabilir.

Araştırma sondajlarından ve kaya yüzleklerinden belirlenen kaya kütlelerinin süreksizlik durumu (RQD, aralık, açıklık, pürüzlülük, dolgu, bozunma ve devamlılık vb.) gibi özellikleri ile birlikte laboratuvar sonuçlarından elde edilen fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılarak, Kaya Kalitesi Puanlama (RMR) ve Kaya Kütle Kalitesi Puanlama (RMQR) kullanılarak kaya kütleleri sınıflamaları yapılmıştır.

Araştırma sondajlarından, iletim tüneline içerisinden geçeceği kaya kütlelerini temsil edebilecek derinlikte alınan karot örneklerinden, kaya malzemesinin mühendislik özelliklerini (üç eksenli sıkışma dayanımı, tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranları vb.) belirlemek amacıyla kaya mekaniği deneyleri yapılmış, kaya kütleleri ve tünel tasarım parametrelerinin hesaplamalarında veri tabanını oluşturmuştur.

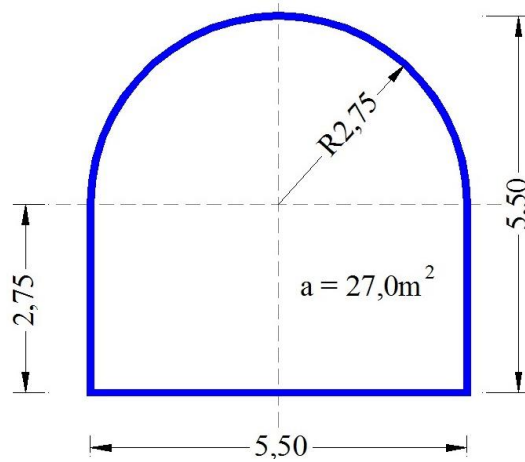
RMR ve RMQR gibi görgül yöntemlerin yanı sıra kapanma-sınırlama (Convergence-Confinement) yöntemi gibi analitik çözümlerle kaya kütlelerinin tünel kazısı sırasındaki elastik / plastik davranışı belirlenmeye çalışılmış, bunun için boyuna deformasyon profili ve zemin reaksiyon eğrileri çizilerek değerlendirilmiştir. Ayrıca RMR ve RMQR’ın kaya destek sınıflarının öngördüğü gibi, kaya bulonu, püskürtme beton, iksa ve kaplama beton gibi ilk ve ikincil destek sistemlerinin destek basıncına etkisi ve zemin reaksiyon eğrisi üzerinde kaya destek sisteminin etkileşimi belirlenmiştir.

Büro çalışmaları kapsamında, bölge önceden yapılmış jeolojik çalışmalar ve haritalar derlenmiş, bölgenin ve tüneline içerisinden geçeceği güzergahta karşılaşılabilecek jeolojik formasyonları gösteren plan haritaları sayısal olarak kesitleri hazırlanmıştır. Çalışmalar sırasında, Microsoft Office, AutoCAD ve Rocscience (Phase<sup>2</sup>) gibi programlar kullanılmıştır.

İlgili proje kapsamında, daha önce fizibilite ve kesin proje çalışmaları sırasında hazırlanmış olan “Akşar Regülatörü ve Nazar Hes Temel sondaj Kuyuları Araştırma Raporu” [1] ve “Akşar Regülatörü ve Nazar Hes Revize Fizibilite Raporu” [2] gibi çalışmalara esas oluşturacak kaynaklardan faydalanarak, tünel güzergahında yapısal, morfolojik sorunların (kıvrım-fay-heyelan-uyumsuzluklar vb.) olup olmadığı saha gezisi yapılarak yerinde gözlenmiştir. Bu aşamada, gerek yüzleklerden, gerekse “Akşar Nazar Enerji Üretim AŞ.” tarafından açtırılan mevcut araştırma sondajlardan yararlanılarak kaya kütlesi sınıflamalarında kullanılacak parametrelerin derlenmesi ve loglanması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda karot sandıkları yeniden gözden geçirilmiş, ayrışma durumu, süreksizliklerin sıklığı, süreksizliklerin ayrışma durumu ve dolgusu gibi analizlerde kullanılacak bilgiler değerlendirilmiştir. Karot sandıklarından tünel kotu ve çevresinden alınan karot örnekleri, mühendislik parametrelerinin (Tek eksenli sıkışma dayanımı, kohezyon, içsel sürtünme açısı, Poisson oranı ve Elastisite modülü vb.) belirlenmesi amacıyla Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarına gönderilmiştir.

### 1.5. Tünel Tip Kesiti

Akşar regülatöründen alınan suyu, Nazar hidroelektrik santraline iletecek tünellerden birisi olan T-3 tüneli, 2739 m uzunluğunda planlanmıştır. Tünel giriş eksen kotu 1120,1 m ve çıkış eksen kotu ise 1118,3 m’dir. T3 iletim tünelinin tip kesiti, uygun kazı yönteminin sağlayacak araç gereçler ve hidrolik ölçütler göz önünde bulundurularak atnalı olacak şekilde tasarlanmıştır. Tünelin kazı yarıçapı (r) 2,75 m, genişliği (D) 5,5 m ve yüksekliği (H) 5,5 m olarak seçilmiştir (Şekil 1.2). Tünelin tam ayna yüzeyinde ve delme/patlatma yöntemiyle kazılması planlanmaktadır.



Şekil 1.2. T3 tüneli kazı tip kesiti

## 2. BAŞLICA KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMLERİ

### 2.1. Kaya Kütleli Sınıflaması ve Tünel Destekleme Sistemleri

Kaya kütleli sınıflamaları, tünellerdeki destek ihtiyacının belirlenmesi amacıyla, özellikle tünel tasarımlarında görgül yaklaşımlar ile formülleyen Ritter (1879; Hoek vd.,1983)'den bu yana yaklaşık 100 yılı aşkın bir süredir gelişme göstermektedir.

Bir projenin fizibilite ve tasarım aşamalarında kaya kütleli ve hidrolojik özellikleri hakkında fazla ayrıntı mevcut olmasa bile, kaya kütleli sınıflandırma yöntemlerinin kullanılması oldukça büyük fayda sağlamaktadır. Ayrıca, kaya kütleli özelliklerinden, destek gereksiniminin önceden tahmin edilebilmesini ve kaya kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin tahmin edilmesini sağlar [7].

Bu tez kapsamında yaygın olarak kullanılan bir kaya kütleli sınıflaması ve destekleme sistemi olan RMR (Bieniawski [3]) ve yeni geliştirilmiş olan RMQR (Aydan vd. [4]) sistemleri görgül analizlerde kullanılmıştır. Ayrıca Q sınıflama sistemi de, Barton vd. [8] tarafından geliştirilen ve küme olarak kullanılan diğer bir kaya kütleli sınıflama sistemidir.

#### 2.1.1. Q Kaya Sınıflama Sistemi

Kaya kütleli sınıflandırması Q-Sistemi, Norveç Jeoteknik Enstitüsü tarafından, Barton vd. [8] tarafından 1974 'de geliştirilmiştir. Bu sistem İskandinavya'da 200 tünele ait vaka analizlerine dayanılarak önerilmiştir. Bu nicel bir sınıflama sistemi, tünel desteklenmesini de içeren bir mühendislik sistemidir. Q-Sistemi, altı farklı parametre kullanarak yapılan sayısal değerlendirmeye dayanmaktadır. Bu altı parametre kaya kütleli kalitesi Q'yu belirlemek için aşağıdaki gibi üç küme halinde gruplandırılmıştır [8].

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Burada;

RQD : Kaya kalitesi göstergesi (%)

J<sub>n</sub> : Eklem takımı sayısı

J<sub>r</sub> : Eklem pürüzlülük sayısı

J<sub>a</sub> : Eklem alterasyon sayısı

J<sub>w</sub> : Eklem su azaltma faktörü

SRF : Gerilim azaltma faktörü.



Farklı kaya koşulları için bu altı parametreye puanlar (sayısal değer) verilir. Q sisteminin amacı, tüneller ve yeraltı açıklıkları için destek sisteminin ilk görgül tasarımını yapmaktır. (RQD/Jn) değeri; blok boyutu veya farklı eklem takımlarının oluşturduğu kamanın boyutunu, (Jr/Ja) değeri; eklem yüzeyleri arasındaki pürüzlülük ve sürtünme ile dolgu malzemesini (bloklar arasındaki makaslama dayanımı), (Jw/SRF) değeri ise, etkin gerilmeyi ifade etmektedir [8].

Q sisteminde kaya kütlesi 9 grupta sınıflandırılmış ve kazı destek türleri önerilmiştir. Ancak Q sınıflama sistemi, parametrelerinden biri olan gerilim azaltma faktörü (SRF)'nün tayin edilebilmesi için yeterli gözlem ve veri olmaması nedeniyle bu tez kapsamında kullanılmamıştır.

### **2.1.2. RMR Kaya Destekleme Sistemi**

Jeomekanik sınıflama olarak da bilinen, RMR sınıflama sistemi, ilk kez 1972-1973 yılları arasında Bieniawski tarafından geliştirilmiştir [3]. Bu kaya kütlesi mühendislik sınıflaması, özellikle kaya mühendisliği uygulamaları için geliştirilmiş aşağıdaki parametreleri içermektedir.

- a) Sağlam kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı,
- b) Kaya kalite göstergesi (RQD),
- c) Süreksizliklerin aralığı,
- d) Süreksizliklerin durumu,
- e) Yeraltısuyu durumu,
- f) Süreksizliklerin yönelimi.

RMR kaya kütlesi sınıflama sisteminde; kaya kütlesi dayanımı, RQD ve süreksizlik aralığı parametreleri için verilecek puanlar, sistemin ilk önerildiği dönemde Çizelge 2.1'de verilen aralıklara göre kullanılmakta iken, 1989 yılından itibaren sınıflamanın ilk üç parametresiyle ilgili olarak getirilen ve daha duyarlı bir puanlama yapabilmek için Bölüm 6.2.1'de verilen "parametre-puan" grafiklerinden yararlanılarak doğrudan puanlama yapılabilmektedir. Sınıflandırmada süreksizlik yüzeylerinin durumu Çizelge 2.2'den, tünel kazısı sırasında süreksizliklerin eğim ve doğrultularının etkisi Çizelge 2.3 dikkate alınarak yapılacak olan düzeltmeyle (Çizelge 2.4) süreksizlik yönelimi düzeltilmesi yapılır. Düzeltilmiş toplam puanıyla kaya kütle sınıfı belirlenenen (Çizelge 2.5) kaya kütlesi içerisinde belirli

açıklıklarda kazılacak tüneller için desteksiz kalabilme süreleri Bölüm 7.1’de önerilen yöntemle bulunur.

Çizelge 2.1. Kaya kütlesi puanı (Kaya kütlesinin jeomekanik sınıflaması) [3]

Sınıflama Parametreleri ve Puanları									
Parameter			Puan Aralıkları						
1	Kaya malzemesi dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Düşük aralıklar için - tek eksenli sıkışma deneyi seçilmelidir		
		Tek eksenli sıkışma dayanımı	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Puan	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Puan		20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik aralığı		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Puan		20	15	10	8	5		
4	Süreksizliklerin durumu (Çizelge 2.2)		Çok pürüzlü yüzeyler, sürekli olmayan ayrılmamış, bozunmamış eklem yüzeyleri	Az pürüzlü, ayrılma 1<mm az bozunmuş eklem yüzeyleri	Az pürüzlü, ayrılma 1<mm bozunmuş eklem yüzeyleri	Kaygan yüzeyler veya <5mm kalınlıkta dolgulu veya 1-5 mm sürekli eklem yüzeyi	Yumuşak dolgu >5 mm kalınlıkta veya >5 mm sürekli eklem yüzeyi		
	Puan		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı su durumu	Tünelin her 10 m’lik kısmından gelen su (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Eklem su basıncı) / (En büyük asal gerilme)	0	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5		
		Genel Koşullar	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı		
	Puan		15	10	7	4	0		

Çizelge 2.2. Süreksizlik yüzeylerinin durumunun değerlendirilmesi için kılavuz [3]

Süreksizliklerin Sınıflandırılması için Kılavuz					
Süreksizliğin Uzunluğu (devamlılık)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Puan	6	4	2	1	0
Aralık (açıklık)	Yok	< 0,1 mm	0,1 – 1,0 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 (gouge)	Yok	Sert dolgulu < 5 mm	Sert dolgulu > 5 mm	Yumuşak dolgulu < 5 mm	Yumuşak dolgulu > 5 mm
Puan	6	4	2	2	0
Bozunma*	Bozunmamış	Az bozunmuş	Otra derecede bozunmuş	Bozunmuş	Tamamen bozunmuş
Puan	6	5	3	1	0

\* Süreksizlik sınıflandırılmasında kullanılan bozunma derecesinin tanımlanması için kullanılan ölçütler Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.3. Tünelde süreksizlik doğrultusu ve eğiminin etkisi [3]

Tünel Kazısı Sırasında Süreksizliklerin Eğim ve Doğrultu Yönelimlerinin Etkisi					
Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel	
Eğim yönünde ilerleme		Eğime karşı yönde ilerleme		Eğim 45-90°	Eğim 20-45°
Eğim 45-90°	Eğim 20-45°	Eğim 45-90°	Eğim 20-45°		
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil	Orta
Dip 0-20° : Uygun değil, doğrultuya bakılmaksızın					

Çizelge 2.4. Süreksizlik yönelimine göre düzeltme [3]

Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme						
süreksizliklerin doğrultu ve eğim yönelimi		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puan	Tünel ve Galeri	0	-2	-5	-10	-12
	Temel	0	-2	-7	-15	-25
	Şev	0	-5	-25	-50	-60

Çizelge 2.5. Toplam puana göre kaya kütlesi sınıfları [3]

Toplam Puanlardan Hesaplanmış Kaya Sınıfları					
Puan	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Destek Sınıfı	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya

Çizelge 2.6. Kaya kütlelerinin bozunma derecesiyle ilgili sınıflama [9]

Bozunma	Tanımlama	Sınıf
Bozunmamış (taze)	Kayada bozunmanın belirtileri gözlenmiyor: belki ana süreksizlik yüzeylerinde hafif renk değişimi.	I
Az bozunmuş	Kaya malzemesinde ve süreksizlik yüzeylerinde renk değişimi gözlenir. Bozunma nedeniyle tüm kayacın rengi değişmiş ve kaya taze halinden daha zayıf olabilir.	II
Orta derecede bozunmuş	Kayanın yarısından az bir kısmı toprak zemine dönüşerek ayrılmış ve/veya parçalanmış. Kaya, taze ya da renk değişimine uğramış, sürekli bir kütle veya çekirdek taşı halindedir.	III
Çok fazla bozunmuş	Kayanın tümü toprak zemine dönüşerek ayrılmış ve/veya parçalanmıştır. Ancak, orijinal kaya kütlelerinin yapısı halen korunmaktadır.	IV
Tamamen bozunmuş	Kayanın tümü ayrılmış ve/veya toprak zemine dönüşmüştür. Kaya kütlelerinin yapısı ve dokusu kaybolmuştur. Hacim olarak büyük bir değişiklik olmakla birlikte, zemin taşınmamıştır.	V

Sınıflandırma; desteksiz açıklık, ayakta kalma süresi, kemerlenme etkisi ve yeraltı açıklıkları için destek basıncı gibi birçok kullanışlı parametreyi tahmin etmek için kullanılır. Ayrıca bu sınıflama, kazı yöntemi ve kalıcı destek sistemlerinin seçiminde de kullanılabilir [10]. RMR sisteminde 5 sınıfa ayrılan kaya kütlesi sınıflaması ve kazı destek sınıfı önerilmiştir.

Bölüm 7.1.1’de, Akşar Regülatörü ve Nazar HES kapsamında kazılacak olan T3 iletim tüneline RMR kaya kütlesi sınıflaması ve kaya destek sistemleri kullanılmıştır.

### 2.1.3. RMQR Sınıflama Sistemi

Yeni bir kaya kütlesi sınıflaması olan RMQR sistemi, nicel çağdaş kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde kullanılan önemli parametreler de dikkate alınarak ve aynı işlevi gören bazı parametrelerin tekrarından kaçınılarak kaya kütlelerinin fiziksel durumunun daha iyi tanımlanması amacıyla Aydan vd. [4, 11] tarafından geliştirilmiştir. Japonya’da yapılmış arazi deneylerine ait veriler benzer amaçlı mevcut diğer bazı görgül ilişkilerin tahmin yetenekleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar deneysel olarak tayin edilen ve önerilen yöntemden tahmin edilen kaya kütlesi özellikleri arasında önemli düzeyde uyumun olduğunu göstermiştir [11]. Sistemin kullandığı parametreler ve kaya kütlesi sınıflama sistemleriyle ilişkileri aşağıdaki alt bölümlerde ana hatlarıyla sunulmuştur.

**a. Bozunma derecesi (BD);** Kayanın bozunması mineraller arasındaki bağların zayıflamasına ve bileşimlerini değiştirmelerine neden olmaktadır. Bozunma ayrıca, süreksizlik aralığını ve süreksizlik yüzeylerindeki killi dolgu malzemesini de etkileyen bir faktördür. Kaya malzemesinin kaya kütlesinin mekanik davranışını etkileyen bir bileşeni olması nedeniyle, mevcut diğer bazı sistemlerde süreksizliklerin yüzey özelliği olarak değerlendirilen bozunma ve/veya hidrotermal alterasyonun olumsuz etkisi, kaya malzemesinin bozunma derecesi (BD) adıyla RMQR’ın ana girdi parametrelerinden biri olarak dikkate alınmıştır [4, 11].

**b. Süreksizlik takım sayısı (STS);** Kaya kütlelerinin mühendislik tanımlamasında en yaygın olarak kullanılan süreksizlik özelliklerinden biri süreksizlik takım sayısıdır. Kaya kütleleri farklı türlerde süreksizlikler içermektedirler. Islanma-kuruma, donma-çözünme, ısınma - soğuma, kıvrımlanma ve faylanma süreçleri de yeni kırıklar oluşturabilmekte ve bu kırıklar mevcut süreksizlik takımlarıyla birleşebilmektedir. Bu nedenle, kaya kütlelerinin süreksiz doğası, RMQR Sistemi’nde Aydan vd. [4] tarafından sunulan örnekler esas alınarak tanımlanmaktadır [4, 11].

**c. Süreksizlik aralığı veya RQD (SA);** Süreksizlik aralığı (SA), süreksizliklerin geometrik bir özelliğidir. Mevcut kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde (örneğin RMR) eğer  $SA > 2,0-3,0$  m ise, kaya kütlesinin masif olduğu kabul edilmektedir. Bu tanım, yeraltı açıklıklarının çapı veya genişliği küçük olduğunda ( $< 6,0-8,0$  m) önemli olmayabilir. Bu nedenle, halen kullanılan SA tanımları mevcut durumla uyumlu olmayıp, yeraltı kaya yapılarının güncel boyutları da dikkate alınarak, bunların değiştirilmesi gerekmektedir. Bu husus gözetilerek, RMQR Sistemi içerisinde aralıklar ve puanlama sistemleri tekrar tanımlanmıştır [4, 11].

RMR sistemi'nde süreksizlik aralığının yanı sıra, RQD de kullanılmaktadır. Ayrıca SA ve RQD gibi birbirleriyle ilişkili iki girdi parametresinin birlikte kullanılarak puanlamaya ayrı katılmaları tekrarlamaya da neden olmaktadır. Bunun giderilmesi amacıyla ve RQD'nin sondajlarda yaygın şekilde ölçülen bir parametre olması dikkate alınarak, RMQR Sistemi'nde bu iki parametreden sadece birinin kullanılması önerilmektedir [4, 11].

**d. Süreksizliklerin durumu (SD);** Kaya kütlelerindeki süreksizliklerin oluşumu değişik koşullara ve bunların kökenlerine bağlı olup, tektonik süreçlerle oluşmamış süreksizlikler killi dolgu içermedikleri veya süreksizlik yüzeyleri bozunmadıkları sürece genellikle uygun yüzey özelliklerine sahiptirler. Eğer süreksizliklerin içinde dolaşan su çözünmüş silis, kalsit veya ferro-okistleri içeriyorsa, bunlar süreksizliklerin içini doldurup süresizlik yüzeylerin kaymasını sağlayabilirler. Bu durum dikkate alınarak, RMQR sisteminde süreksizliklerin durumu koşulu (SD) için birinci seçenek olarak gözlemi esas alan tanımlar ile puanlar önermiştir [4, 11].

**e. Yeraltısuyu sızma ve su emme durumları (TASD / SED);** Kaya kütlelerinin mekanik davranışını etkileyen diğer bir faktör de yeraltısuyudur. Bunun yanı sıra, kil içeren zayıf kayalar gibi bazı kaya türlerinin suyu elektriksel veya kimyasal olarak emerek malzeme özelliklerinde ciddi azalmaların ve/veya kazı aşamasında ve yeraltısuyu tablası derinliği değişimlerinde şişmenin olduğu durumların varlığı da bilinmektedir. Bu nedenle RMQR Sistemi'nde su koşulunun değerlendirilmesi amacıyla, örneğin RMR gibi diğer bazı sistemlerde kullanılan yeraltısuyu sızma durumunun (YASD) yanı sıra, kayaların su emme durumu (SED) da diğer bir parametre olarak dikkate alınmıştır [4, 11].

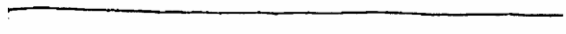
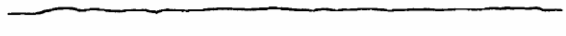
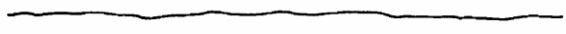





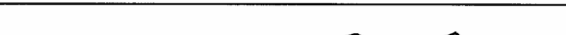

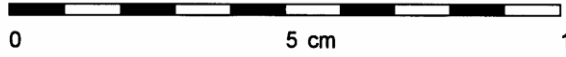
Yukarıda da belirtildiği gibi, başlıca 6 ana girdi parametresinden oluşan RMQR sisteminde RMQR değerleri 0 ile 100 arasında değişmekte olup, sistem altı kaya sınıfını içermektedir. RMQR kaya kütlesi sınıflaması, Çizelge 2.7'deki puanlama tablosu kullanılarak belirlenmektedir.

Kaya içerisinde açılan geniş yeraltı açıklıklarının destek sistemlerinin görgül tasarımı sıkışma ve kaya patlaması gibi gerilimden kaynaklanan yenilmeleri dengelemek için destek sistemleri önerilmiştir [12, 13]. T3 tünel kazısının RMQR'a göre belirlenen kaya destek sınıfları bölüm 7.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.7. RMQR Sistemi sınıflama parametreleri ve puanları [4, 11]

Bozunma derecesi (BD)	Taze	Lekeli yüzey	Az bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	İleri derecede bozunmuş	Tamamen bozunmuş					
Puan (R <sub>BD</sub> )	15	12	9	6	3	1-0					
Süreksizlik takımı sayısı (STS)	Yok (sağlam veya masif)	Tek takım+ gelişigüzel	İki takım+ gelişigüzel	3 takım + gelişigüzel	4 takım + gelişigüzel	Ezik veya paramparça olmuş					
Puan (R <sub>STS</sub> )	20	16	12	8	4	1-0					
Süreksizlik aralığı (SA) veya RQD (%)	Yok veya SA≥24 m	24m>SA≥6m	6 m>SA≥1,2 m	1,2 m >SA≥0,3 m	0,3 m>SA≥0,07 m	0,07>SA m					
Puan (R <sub>SA</sub> )	20	16	12	8	4	1-0					
Süreksizlikler in durumu (SD)	Süreksizlik yok	Kaynaklı veya kesikli	Pürüzlü	Göreceli olarak düz ve sıkı	İnce dolgulu veya ayırık kaygan yüzey (t < 5 mm)	Kalın dolgulu veya ayırık yüzey (t > 10 mm)					
Puan (R <sub>SD</sub> )	30	26	22	15	7	1					
veya alternatif olarak, "Süreksizlik Yok" ve "Kaynaklı veya Kesikli" sınıflarına girmeyen yüzeyler için											
Süreksizlik koşulu (SD) R <sub>SD</sub> = R <sub>SDA</sub> + R <sub>SDD</sub> + R <sub>SDP</sub>	Açıklık	Kapanık veya çok sıkı <0,1 mm	0,1-0,25 mm	0,25-0,5 mm	0,5-2,5 mm	2,5-10 mm	>10 mm				
	Puan (R <sub>SDA</sub> )	6	5	4	3	2	1				
	Dolgu	Dolgusuz	Sadece yüzey sıvaması	İnce sıvama < 1 mm	İnce dolgu 1 < t < 10 mm	Kalın dolgu 60 > t > 10 mm	Çok kalın dolgu veya makaslama zonu t > 60 mm				
	Puan (R <sub>SDD</sub> )	6	5	4	3	2	1-0				
	Pürüzlülük*	Tanımsal	Çok pürüzlü	Pürüzlü	Düz-dalgalı	Düz-düzlemsel	Kaygan	Makaslama bandı/zonu			
	ISRM [9] profil no.su , (Şekil 2.1)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1-0
Puan (R <sub>SDP</sub> )	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1-0	
Yeraltısuyu sızma durumu (YASD)	Kuru	Nemli	Islak	Damlama	Sürekli su akışı	Su basması					
Puan (R <sub>YASD</sub> )	9	7	5	3	1	0					
Su emme durumu (SED)	Su emmeyen	Kılcal etkiyle veya elektriksel su emme	Az su emen	Orta derecede su emen	Çok su emen	Aşırı su emip dağılan					
Puan (R <sub>SED</sub> )	6	5	4	3	2	1-0					

Süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük derecesi Şekil 2.1'de verilen süreksizlik yüzey profillerine en uygun olan görünümlere göre belirlenmiştir.

	$JRC = 0 - 2$
	$JRC = 2 - 4$
	$JRC = 4 - 6$
	$JRC = 6 - 8$
	$JRC = 8 - 10$
	$JRC = 10 - 12$
	$JRC = 12 - 14$
	$JRC = 14 - 16$
	$JRC = 16 - 18$
	$JRC = 18 - 20$
	

Şekil 2.1. Pürüzlülük profilleri ve ilgili JRC değerleri [9]

### **3. TÜNEL GÜZERGAHI VE CİVARININ JEOLJİSİ**

#### **3.1. Genel Jeoloji**

Genel jeoloji çalışmalarında ve tünel eksenini üzerindeki litolojik birimlerin tanımlanmasında, bölgede daha önce Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından yapılan çalışmalar esas alınmıştır. Öncelikle, MTA'nın bölgede yapmış olduğu jeoloji raporu ve haritaları derlenip [6], VAN L48-c2 no.lu 1/25000' lik jeoloji haritası üzerine tünel güzergahı ve kesiti işlenmiştir.

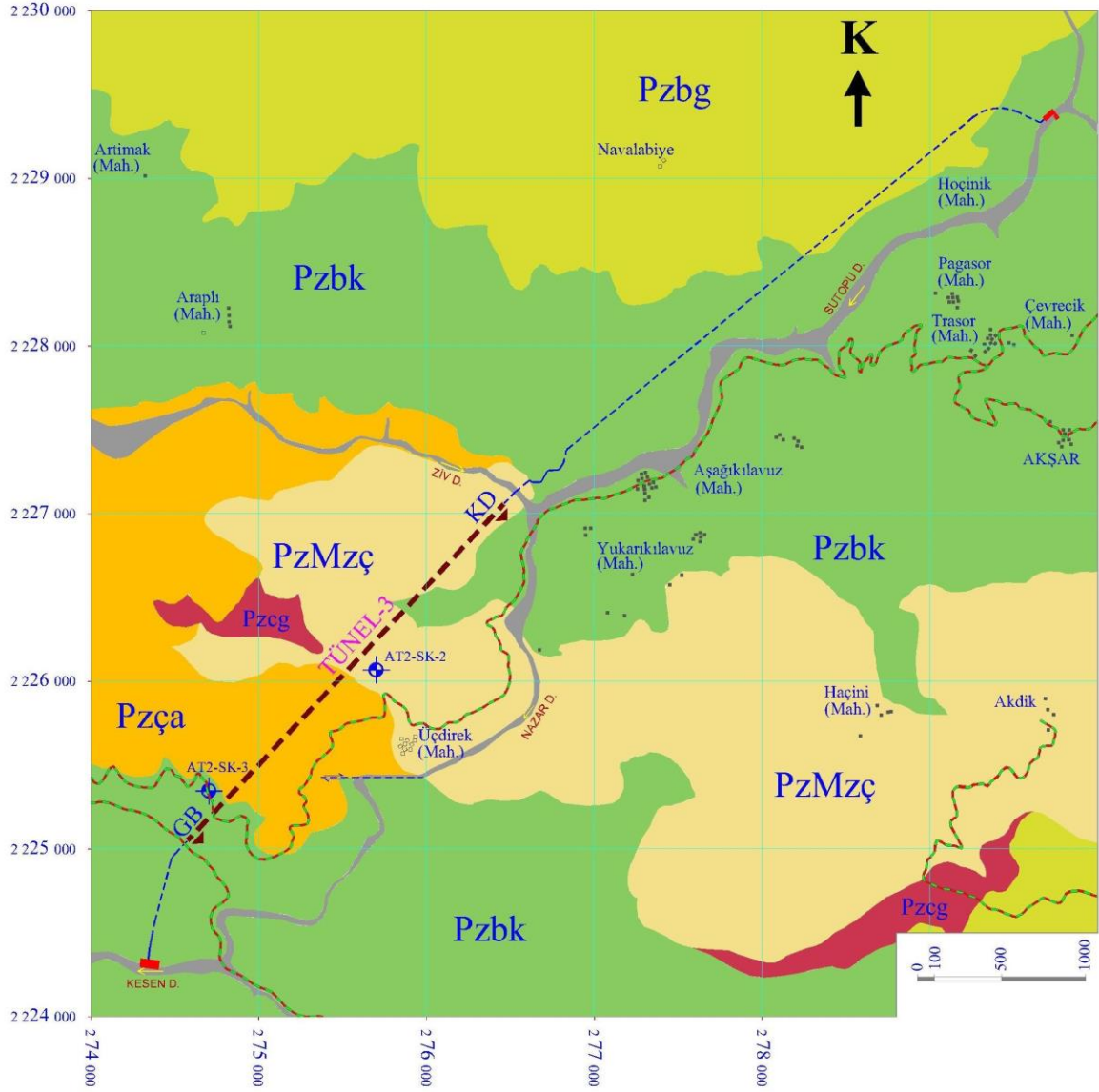
#### **3.1.1. Stratigrafi**

Proje alanına ilişkin genel ve stratigrafik jeoloji değerlendirmelerinde önceden bölgede Hacettepe Üniversitesi ve Maden Tetkik ve arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından yapılan çalışmalar [5, 6] esas alınmıştır. Ayrıca arazi çalışmalarında elde edilen veriler bu çalışmaların yardımıyla sayısallaştırılarak proje alanına ilişkin 1/25 000 ölçekli genel jeoloji haritası, jeolojik kesiti ve açıklamaları hazırlanmıştır (Şekil 3.1 ve 3.2).




Proje alanında, Yolcular Grubu kayaların üzerine transgressif aşma ile oturmuş, kahve yeşil, kahve kirli beyaz, yer yer mermer aratabakalı, kuvarsit, kuvarsist, mikaşist, filit ve kayrak topluluğu "Bitlis Grubu" adı altında toplanmıştır. Bitlis Grubu, alttan üste doğru; Kuytu, Gökçimen, Arpik ve proje alanı kapsamında olmayan Hask adlı dört formasyondan oluşmaktadır [6].

Buna göre, "Alt Metamorfikler" olarak da adlandırılan, amfibolit, paragnays / şist ile bunları kesen granitoid bileşimli kayalardan oluşan "Yolcular grubu" üzerine açısız uyumsuzlukla örten, tane boyutunun belirlediği, açık/koyu yeşil, bantlı, flişoid görünümlü, tabakalanmaya uygun yada aykırı gelişmiş yapraklanmalı kuvarsitlerden oluşmuş "Gökçimen formasyonu", pirit-kloritoyid-klorit şist / fillitlerden oluşan "Kuytu formasyonu; kuvarsit/kuvars şistlerden oluşan "Arpik formasyonu" nundan oluşan, Paleozoik – Mezozoik yaşlı "Bitlis Grubu" olarak adlandırılan istif gelir. Tüm istif Alpin metamorfizma sonrası aplit ve diyabaz daykları ile kesilmektedir [5, 6].

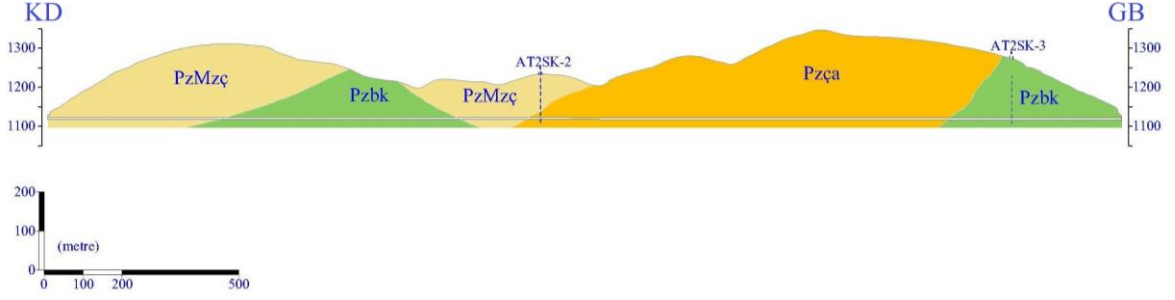




#### AÇIKLAMALAR

SENOZOYİK	Kuvaterner	<b>Qal</b>	Alüvyon (Kum, çakıl, blok)	 Sondaj Kuyusu  Yaklaşık Dokanak  Fay
PALEOZOYİK-MESOZOYİK	Üst Kretase Alt Permian	<b>PzMzç</b>	Çadırdağ Grubu : Volkanik arakatıkları bulunan karbonat kayaları	Çadırdağ Grubu
		<b>Pzcg</b>	Gelintaşı Formasyonu : Kuvarşlı kalkşist, kuvarşlı mermer ve fillit tabakaları	
	Orta-Üst Devonyen	<b>Pzça</b>	Arpık Formasyonu: Kuvars, kuvars şist, şistli kuvarsit ve kuvarşlı mermer	Bilis Grubu
		<b>Pzbc</b>	Kuytu Formasyonu: Kuvarsit, piritli fillit / klorit şist / kuvarsit, arjillit klorit şist / fillit /mermer ve klorit şist ile metaşeyl ardalanması	
Ordovisiyen Silüriyen	<b>Pzbg</b>	Gökçimen Formasyonu: Açık koyu-yeşil renklerde, banlı, filiş karakterli, iyi gelişmiş yapraklanmalı kuvarsit		

Şekil 3.1. T3 Tünel güzergahı bölgesi jeoloji haritası ve açıklamaları (Şengün vd., [6]'den değiştirilmiştir)



Şekil 3.2. Tünel güzergahı jeolojik boy kesiti

### 3.1.1.a Bitlis Grubu

#### Gökçimen Formasyonu:

Tane boyutunun belirlediği, açık/koyu yeşil renkli, bantlı, flişoid görünümlü, tabakalanmaya uygun ya da aykırı gelişmiş yapraklanmalı kuvarsitlerden oluşmuştur. Birimin yayılımı ve kalınlığı fazla değildir. Kalınlıkları sık sık kıvrımlanma ile artmıştır. Birim üste doğru kayatürü özelliklerini değiştirerek Kuytu formasyonuna geçer. Birimin yaşı üzerinde yer alan Arpik formasyonuna dayandırılarak, Orta Devoniyen öncesi olduğu belirtilmektedir [6]

Gökçimen Formasyonu'na (Pzbg), T3 tünel güzergahının kuzeyinde haritalanmıştır ve tünel kazısında karşılaşılacaktır.

#### Kuytu Formasyonu:

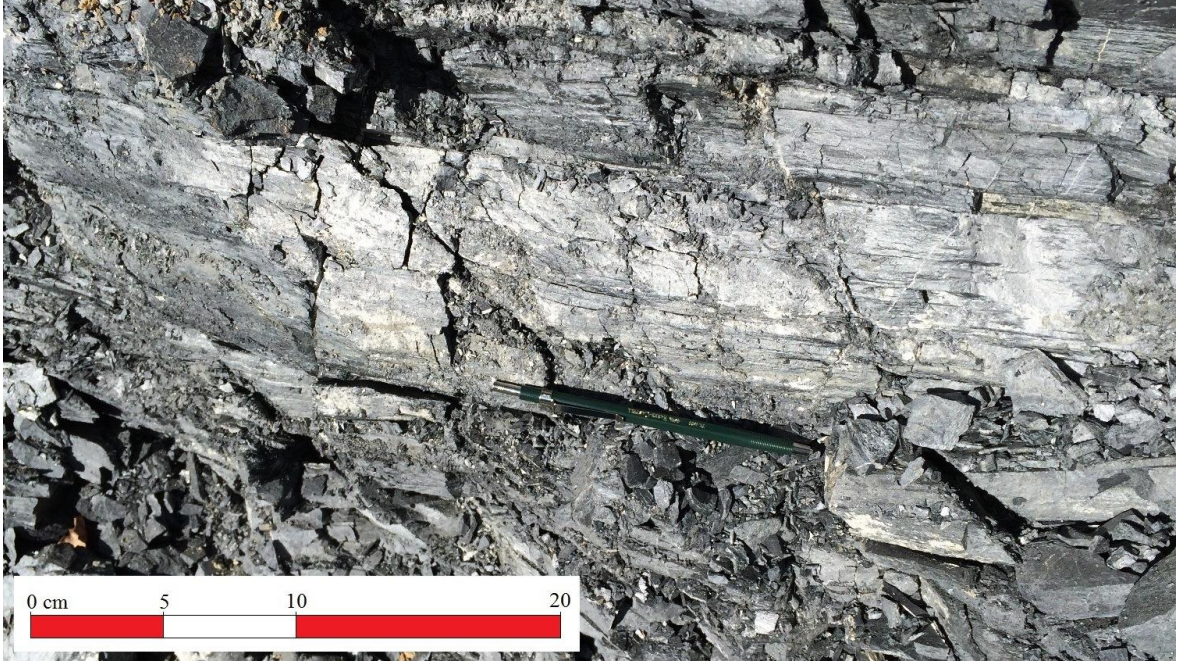
Kuvarsit, piritli fillit / klorit şist / kuvarsit, arjillit kloritoid şist / fillit / mermer ve klorit şist ile metaşeyl araldanmasından oluşmuştur (Şekil 3.3). Bu kaya türlerinin bir bölümü yanal geçişlidir. Bölgesel metamorfizma farkı nedeniyle, farklı bir kaya türü olarak değerlendirilmiştir

Kuytu formasyonu yer yer Yolcular Metamorfileri üzerine aşıl uyumsuzlukla oturur. Birimin yaşı Hizan yöresindeki arjillit ve piritli metaşeyller bağlı olarak Torosların "Bedinan Formasyonu"na benzerliği nedeniyle, Ordavisiyen-Silüriyen olarak düşünülmüştür [5].

#### Arpik formasyonu:

Kuvars, kuvars şist, şistli kuvarsit ve kuvarslı mermerden oluşmuş birimlerdir. Arpik formasyonu, Kuytu formasyonu ve Yolcular Grubu'na ait değişik litolojiler üzerine doğrudan oturmaktadır. Birimin yaşı, Şengün [5]'e göre Orta-Üst Devoniyen olarak verilmiştir.

Birim, T3 tünel ekseninin batısından başlayıp eksenini doğuya doğru kesmektedir. T3 Tünel kazı çalışmaları sırasında Arpik formasyonuna ait birimlerle karşılaşılması beklenmektedir.



şekil 3.3. T-3 tüneli çıkış portali yakınında Kuytu Formasyonuna ait şistlerden bir görünüm.

### 3.1.1.b adırdadığ Grubu

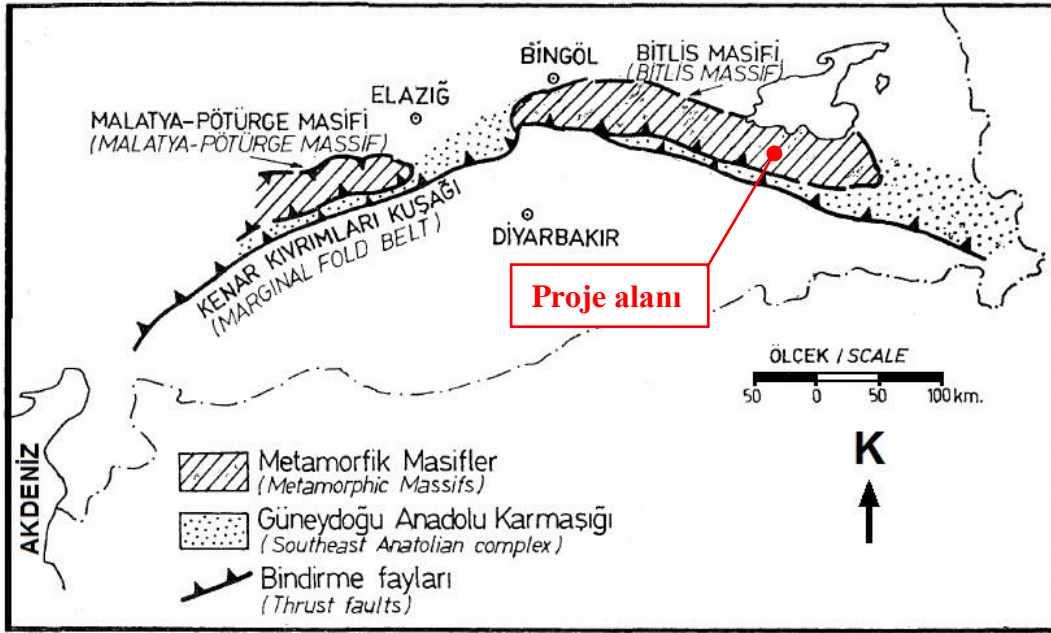
adırdadığ Grubu, proje alanınında T3 tünel ekseninin kuzeyinden güneybatıya doğru uzanan ve Yolcular Grubu'nun metamorfik kayaları üzerine gelir. Üst Birlik olarak da adlandırılan metamorfik/az metamorfik kayalar "Bitlis Grubu" ve "adırdadığ Grubu" olarak ayrılmıştır. Daha altında yer alan Bitlis Grubu kayalarından bu özellikleri ile ayrılır. Bu grubun proje sahası içerisinde gözlenen an alttaki yesi Permiyen yaşlı "Gelintaşı Formasyonu" olup, kuvarslı kalkşist, kuvarslı mermer ve fillatları kapsar. Formasyon, Arpik formasyonu ile giriktir. Birimin kalınlığı, kıvrımlanma nedeniyle tam olarak belirlenemese de, bazı yerlerde 250 m'ye ulaşmaktadır [6].

### 3.1.2. Yapısal Jeoloji

Bucher [14]'e göre Türkiye'deki orojenik kuşakların doğu ve güneydoğu Anadoludaki karşılıkları aşağıda sıralanmıştır.

- Kenar kıvrımları
- Orojenik Filiş Kuşağı
- Bitlis Masifi

Bitlis Masifi, Alpin yaşlı bir metamorfizma sonucu Alt-Kretase ile Oligosen aralığında oluşmuş bir sıkışma rejimine bağlı olarak gelişen bindirme fayları boyunca taşınmalarla bugünkü konumlarını kazanan metamorfik seriler üzerinde bulunur (Şekil 3.4). Bu kuşaklardan en kuzeydekini batıda Malatya – Pötürge ve doğuda Bitlis Masifi olarak adlandırılan metamorfikler oluşturur. Metamorfik masiflerin güneyinde Güneydoğu Anadolu Ofiyolit Kuşağı ve bunun da güneyinde ise yerli (otokton) Kenar Kıvrımları Kuşağı bulunmaktadır [5].



Şekil 3.4. Güneydoğu Anadolu tektonik kuşakları [2]

Bitlis Masifi, Alp-Himalaya zinciri üzerindeki Toros Orojenik Kuşağı'nın doğu bölümünde, Anadolu Plakası ile Arap-Afrika Plakası arasındaki muhtemel kenet kesiminde yer alır.

### 3.1.3. Kıvrımlar

Bölgede alt metamorfitleerde yapılmış çalışmalar, Alpin öncesi kıvrımlanma dönemlerinin varlığını işaret etmektedir. Ancak, izlenen foliasyonlar ile yaşı belirleyecek veriler sınırlı ve dolaylıdır. Görülen ve ölçülen tüm foliasyonların düşük seviyeli parajenezler içerdikleri görülmüştür. Yarı açık kıvrımlardan alınmış kanat düzlemlerinin doğrultu ve eğimleri de Alpin kıvrımlanmaya aittir [5].

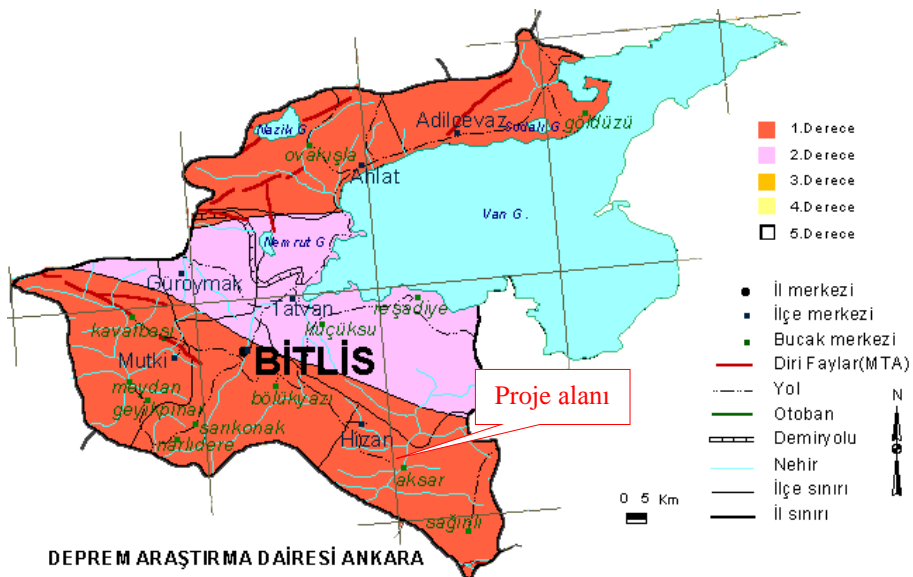
### 3.1.4. Faylar

Bölgede yapılan önceki çalışmalarda, metamorfizma ile eş zamanlı olarak geliştiği veya varlığı kesin saptanamayan, ancak dolaylı verilerle teorik olarak var olduğu düşünülen ilişkiler fay olarak haritalanmamıştır [5].

## 3.2. Deprem Durumu

Proje alanı ve yakın çevresi, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası (1996) verilerine göre 1. derece deprem bölgesi içerisinde yer almaktadır. Bu bölge için tanımlanan etkin yer ivmesi katsayısı  $A_0=0,4g$  olarak öngörülmüştür (Şekil 3.5).

Tünelin kotu yüzeyden itibaren 110-150 m derinde olduğundan, yüzey dalgalarının etkisinin tünelin açılacağı derinlikte düşük olacağı düşüncesiyle sayısal modellerde yer ivmesi katsayısı dikkate alınmamıştır.



Şekil 3.5. Proje alanının deprem bölgeleri haritası, [15]

## 4. ARAZİ ÇALIŞMALARI

### 4.1. T3 Tüneli Araştırma Sondajları

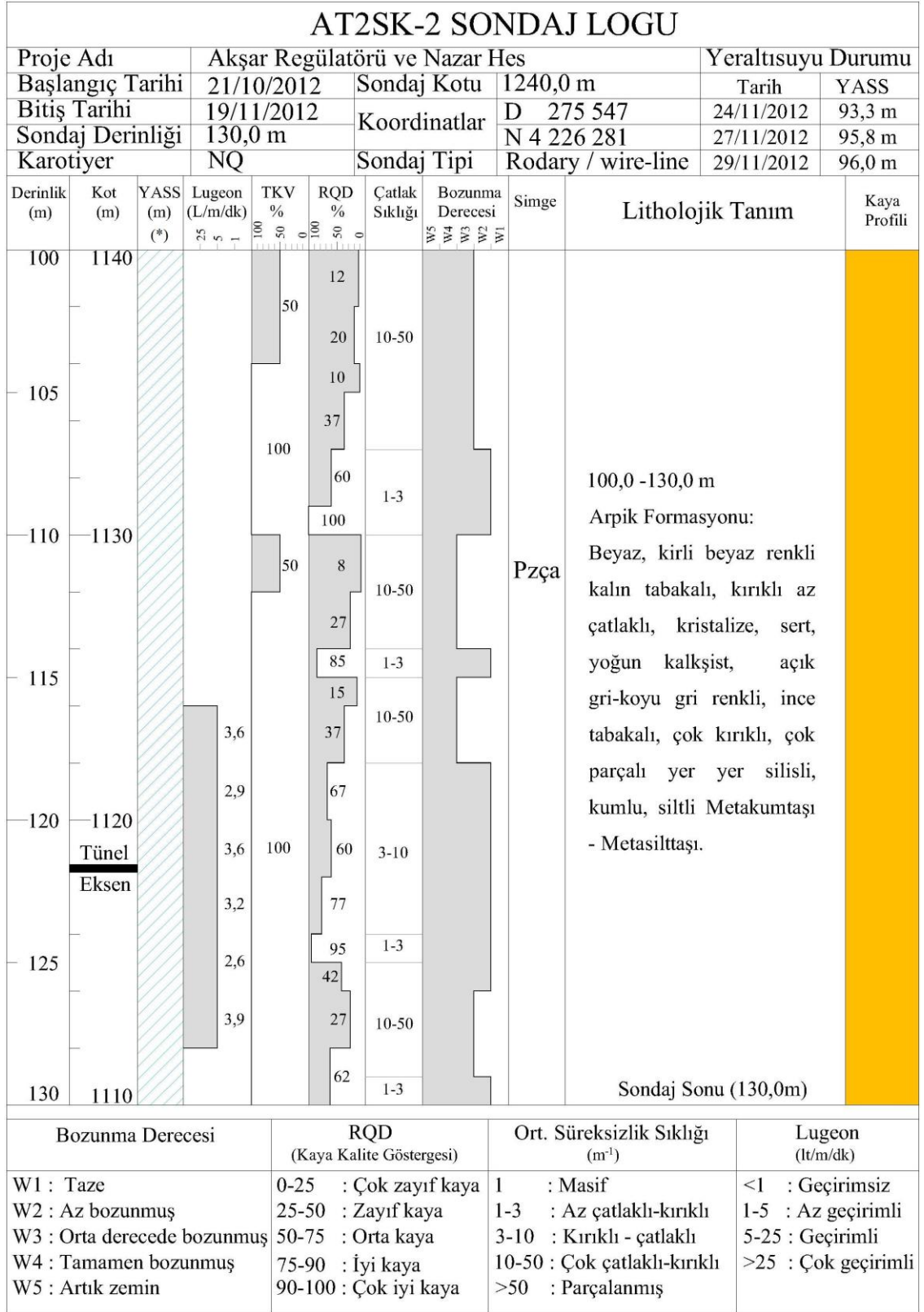
Tünel kazısı sırasında karşılaşılabilecek kaya kütlelerinin sınıflaması ve kazı destek sınıflarının belirlenmesi için, T3 tünel ekseninde toplam 252,5 m uzunluğunda 2 adet araştırma sondajı açılmış (Çizelge 4.1) ve yerleri jeoloji haritası ve kesitlerinde gösterilmiştir (bkz. Şekil 3.1 ve 3.2). Bu sondajlardan alınan karot örneklerinden laboratuvarında kaya malzemesinin kohezyon ( $c$ ), içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ), Young modülü-Poisson oranı ( $E_i-v$ ) ve kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı ( $\sigma_{ci}$ ) tayin edilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak daha sonra kaya kütleleri için dayanım ve deformasyon parametreleri hesaplanmıştır (Bölüm 6.3).

Sondajlar sırasında yeraltısuyu seviyesi derinliği de ölçülmüştür (Çizelge 4.1). Buna göre, tünel taban kotu yaklaşık 1116,5 m'de ve T3 tünelinin güneydoğusundan tünel güzergahı boyunca yaklaşık paralel olarak devam eden Sutopu Deresi'nin kotu ise yaklaşık 1030,0 m'dir. Hidrolik eğim nedeniyle yamaçlardaki suyun dereye doğru taşınması kot farkından dolayı sondajlarda rastlanılan yeraltısuyu seviyesinin sondaj suyu olduğu ve gerçek yeraltısuyu seviyesinin tünel taban kotundan daha derinde olduğu yorumlanmıştır. Bu nedenle analizlerde boşluk suyu basınçları hesaplamalara dahil edilmemiştir. Bu sondajlar sırasında kesilen birimlerin tanımları aşağıda sunulmuştur [1].

Çizelge 4.1. Sondaj özet tablosu

Sondaj No	Yeri	km	Derinlik (m)	Kot (m)	YASS (m)
AT2SK-2	T-3 Tünel Eksenine	1+332	130,0	1240,0	96,0 m
AT2SK-3	T-3 Tünel Eksenine	2+518	122,5	1230,0	70,0 m

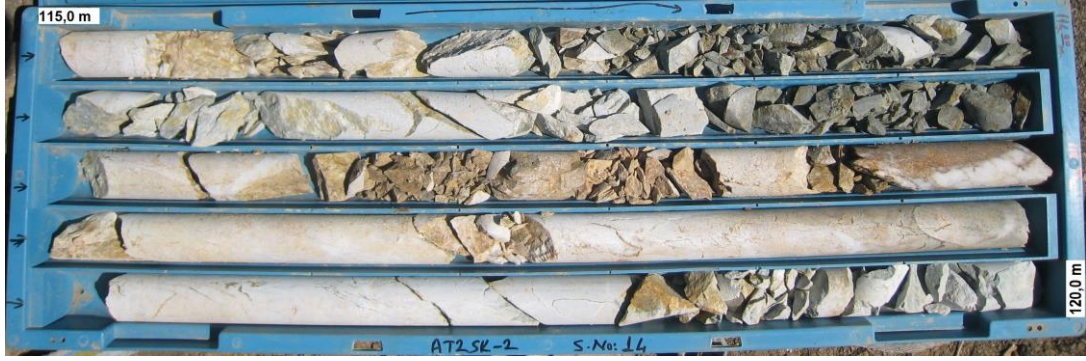
**AT2SK-2** sondajı; T3 tünel ekseninde, 1240,0 m kotunda ve 130,0 m derinliğinde düşey olarak açılmıştır. Bu araştırma sondajından alınan bilgiler, Şekil 4.1'de verilen jeoteknik logda sunulmuştur.



\*Bölüm 4.1 de açıklandığı üzere, ölçülen su seviyesi gerçek yeraltı su seviyesini yansıtmayıp operasyon suyu olarak kaydedilmiştir. Gerçek su seviyesi tünel kotundan daha aşağıdadır.

Şekil 4.1. AT2SK-2 no.lu sondajın tünel kotu ve çevresindeki koşulları gösteren jeoteknik log

Sondaj loglarına göre, toplam karot verimi (TKV); tünel kotu ve çevresinde % 50-100 arasında, kaya kalite göstergesi (RQD) ise Deere (1968) sınıflamasına göre ortalama olarak % 25-50 aralığında tespit edilmiştir. Kaya tünel kotunda genelde zayıf kaya niteliğindedir. Kaya kütlesi ISRM [9]'e göre, genelde az-orta derecede ayrılmıştır (bkz Çizelge 2.6). Yaklaşık tünel kotu civarındaki kaya kütlesinin genel görünümü Şekil 4.2'de verilmiştir. Kuyuda ölçülmüş yeraltısuyu seviyesi yüzeyden 96 m derinliktedir.



Şekil 4.2. AT2SK-2 / Km: 1+332, Arpik formasyonu (115,0-120,0 m)

**AT2SK-3** sondajı; T3 tünel güzergahı üzerinde, 1230,0 m kotunda ve 122,5 m derinliğinde düşey olarak açılmıştır.

Sondajda, TKV ana kayada % 50-100 arasında değişmektedir. RQD ise; Deere (1968) sınıflamasına göre ortalama olarak % 25-50 aralığında hesaplanmış ve kaya tünel kotunda genelde zayıf kaya niteliğindedir. Kaya kütlesinin, üst kotlarda ayrılmış olmasına rağmen, tünel kotunda ve çevresinde ISRM [9]'e göre, az ayrılmış olduğu görülmüştür (bkz. Çizelge 2.6).

Yaklaşık tünel kotu civarındaki kaya kütlesinin genel görünümünü, temsil eden karotlar, Şekil 4.3'de görülmektedir. Kuyuda ölçülmüş yeraltısuyu seviyesi derinliği 70 m'dir.



Şekil 4.3. AT2SK-3/ km: 2+518, Kuytu formasyonu (119,0-122,5 m)



Araştırma sondajından alınan bilgiler, Şekil 4.4'de jeoteknik logda sunulmuştur.

AT2SK-3 SONDAJ LOGU												
Proje Adı		Akşar Regülatörü ve Nazar Hes					Yeraltısuyu Durumu					
Başlangıç Tarihi		20/10/2012		Sondaj Kotu		1230,0 m		Tarih		YASS		
Bitiş Tarihi		27/11/2012		Koordinatlar		D 274 738		27/11/2012		70,0 m		
Sondaj Derinliği		122,5 m		Sondaj Tipi		Rodary / wire-line						
Karotiyer		NQ										
Derinlik (m)	Kot (m)	YASS (m) (*)	Lugeon (L/m/dk)	TKV %	RQD %	Çatlak Sıklığı	Bozunma Derecesi	Simge	Litholojik Tanım	Kaya Profili		
											25	5
100	1130			50	7	>50			100,0 -122,5 m Kuytu Formasyonu: Kalkşist - meta-kumtaşı - meta-silttaşı; açık kahve - açık gri renkli, grafit şist bantları içeriyor.			
105			100	75	3-10							
				65								
				62								
110	1120		50	15	10-50							
			100	32								
			50	34	3-10							
			100	90								
115			50	0	>50							
				84	3-10							
				44								
120	1110		100	95	1-3							
122,5	1107,5			100					Sondaj Sonu (122,5m)			
Bozunma Derecesi			RQD (Kaya Kalite Göstergesi)			Ort. Süreksizlik Sıklığı (m <sup>-1</sup> )			Lugeon (lt/m/dk)			
W1 : Taze			0-25 : Çok zayıf kaya			1 : Masif			<1 : Geçirimsiz			
W2 : Az bozunmuş			25-50 : Zayıf kaya			1-3 : Az çatlaklı-kırıklı			1-5 : Az geçirimli			
W3 : Orta derecede bozunmuş			50-75 : Orta kaya			3-10 : Kırıklı - çatlaklı			5-25 : Geçirimli			
W4 : Tamamen bozunmuş			75-90 : İyi kaya			10-50 : Çok çatlaklı-kırıklı			>25 : Çok geçirimli			
W5 : Artık zemin			90-100 : Çok iyi kaya			>50 : Parçalanmış						

\*Bölüm 4.1 de açıklandığı üzere, ölçülen su seviyesi gerçek yeraltı su seviyesini yansıtmayıp operasyon suyu olarak kaydedilmiştir. Gerçek su seviyesi tünel kotundan daha aşağıdadır.

Şekil 4.4. AT2SK-3 no.lu sondajın tünel kotu ve çevresindeki koşulları gösteren jeoteknik log

Süreksizliklerin, sondajlara göre kaya kütlesi sınıflamasına esas olacak özellikleri Bölüm 6'da verilmiştir.

## 5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu araştırma sondajlarıyla tünel kotu ve çevresinden alınan karot örnekleri üzerinde kaya mekaniği laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Sondajlar tamamlandıktan 16 ay sonra karot sandıkları depodan tekrar çıkartılıp derlenen örnekler üzerinde sağlam kayanın mühendislik parametreleri belirlenmiştir. Bu dönem süresinde karot örneklerinin doğal nem içeriklerini kaybetmiş olmaları nedeniyle, dayanım parametrelerinde belirgin bir farklılığa neden olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Sondajlardan 47,6 mm (NQ) çapında olarak alınmış karotlar, laboratuvarda kesilerek deneylere uygun hale getirilmiş ve 50 ton'luk pres kullanılarak deneyler ISRM [9] tarafından önerilen yöntemlere uygun olarak yapılmıştır.

Karot örnekleri üzerinde kaya malzemesinin üç eksenli sıkışma dayanımı ( $c$  ve  $\phi$ ), tek eksenli sıkışma dayanımı ( $\sigma_{ci}$ ), elastisite modülü ( $E_i$ ), Poisson oranı ( $\nu$ ) ve örneklerin birim hacim ağırlıkları ( $\gamma$ ) ISRM [9] tarafından önerilen deney yöntemleri kullanılarak tayin edilmiş ve sonuçlar ilgili bölümlerde sunulmuştur.

### 5.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanım Deneyi

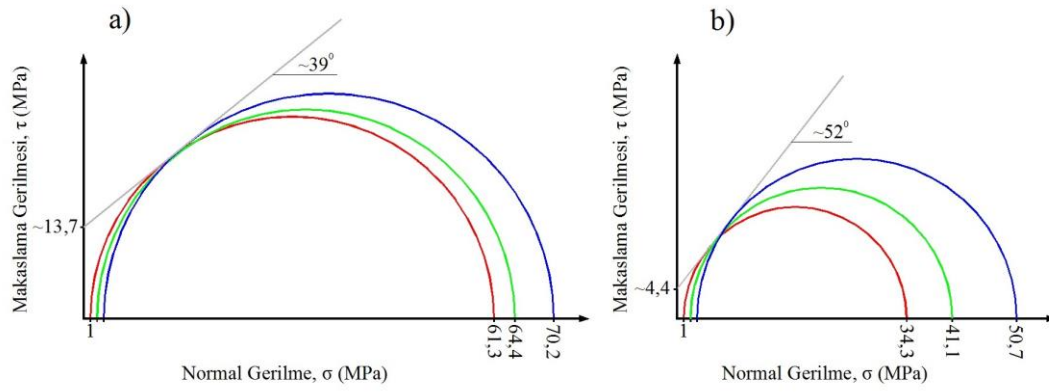
Araştırma sondajlarından tünel kotunda alınan karotlardan hazırlanan örnekler üzerinde toplam 8 adet deney yapılmıştır. AT2SK-2 no.lu sondaj karotlarından alınan örneklerden 4 adet deney yapılmış ve ortalama dayanım değeri 44,9 MPa, AT2SK-3 no.lu sondaj karotlarından alınan örneklerden ise yine 4 adet deney yapılmış ve ortalama dayanım değeri 38,3 MPa olarak bulunmuştur. Tek eksenli sıkışma dayanım deneyi sonuçları Çizelge 5.1' de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Tek eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçları

Sondaj No	Jeolojik birimler	Örnekleme derinliği (m)	$\sigma_c$ (MPa)
AT2SK-2	Arpik Formasyonu	124,10 - 124,50	33,0
		129,30 - 129,50	55,5
		123,45 - 123,60	59,4
		121,60 - 121,80	31,8
AT2SK-3	Kuytu Formasyonu	121,80 - 122,00	20,4
		121,30 - 121,60	53,2
		106,25 - 106,45	36,3
		118,00 - 118,30	43,5

## 5.2. Üç Eksenli Sıkışma Deneyi

AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu araştırma sondajlarından alınan, metamorfik kayalara ait karot örnekleri üzerinde herbir sondaj için üç örnekle 1 grup olmak üzere 2 grup deney yapılmıştır. Bu deneylere ait deney sonuçları AT2SK-2 ve AT2SK-3 için Çizelge 5.2’de sunulmuştur. Üç eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçlarına göre Mohr çemberi yenilme zarfı ilişkileri (kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri) AutoCAD programı yardımıyla çizilmiştir. Buna göre, AT2SK-2 no.lu sondajdan alınan: kuvars, kuvars şist, şistli kuvarsit ve kuvarslı mermerden oluşan birimlere ait karotlar için,  $c = 13,7$  MPa,  $\theta = 39^{\circ}$  ve AT2SK-3 no.lu sondajdan alınan: şistlerden ait karotlar için de  $c = 4,4$  MPa,  $\theta = 52^{\circ}$  değerleri belirlenmiştir. Ancak, Şekil 5.1a ve 5.1b’de görüldüğü gibi, bu çizimlerin sonuçları çok sağlıklı olarak elde etmeye yeterli olmaması nedeniyle, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin p-q grafiği çizilerek belirlenmesi tercih edilmiştir [16].



Şekil 5.1. a) AT2SK-2, b) AT2SK-3 no.lu sondalara ait karotlarda yapılan deneylerin Mohr çemberleri ve yenilme zarfları

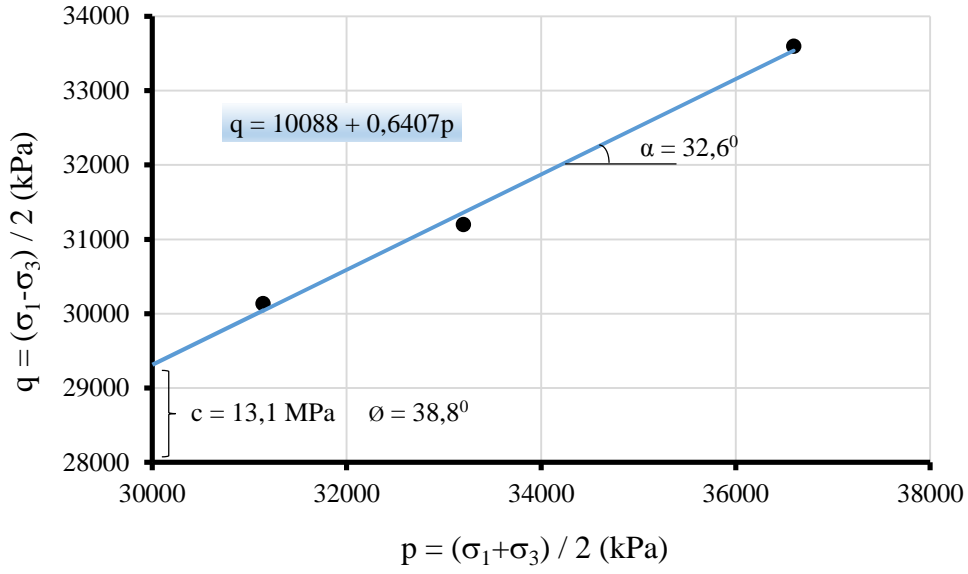
Çizelge 5.2. AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu sondajlara ait karotlar üzerinde yapılan üç eksenli sıkışma dayanımı laboratuvar deney sonuçları

Sondaj No	Örnekleme derinliği (m)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)
AT2SK-2	119,30 - 119,50	1,0	61,3
	120,60 - 120,75	2,0	64,4
	123,25 - 123,45	3,0	70,2
AT2SK-3	119,30 - 119,50	1,0	34,3
	120,00 - 120,25	2,0	41,1
	121,30 - 120,60	3,0	50,7

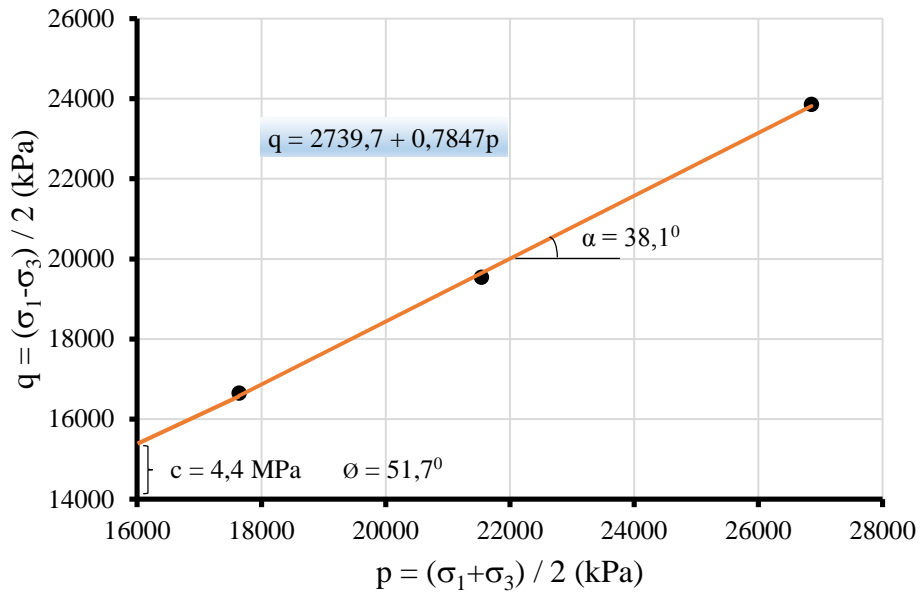
Makaslama dayanımı parametreleri, p-q yöntemine göre aşağıdaki ilişkilerle hesaplanmış, AT2SK-2 ve AT2SK-3 sondajlarına ait örnekler için sırasıyla Şekil 5.2 ve 5.3'de gösterilmiştir.

$$\phi = \sin^{-1}(\tan \alpha) \quad (2)$$

$$c = \frac{a}{\cos \phi} \quad (3)$$



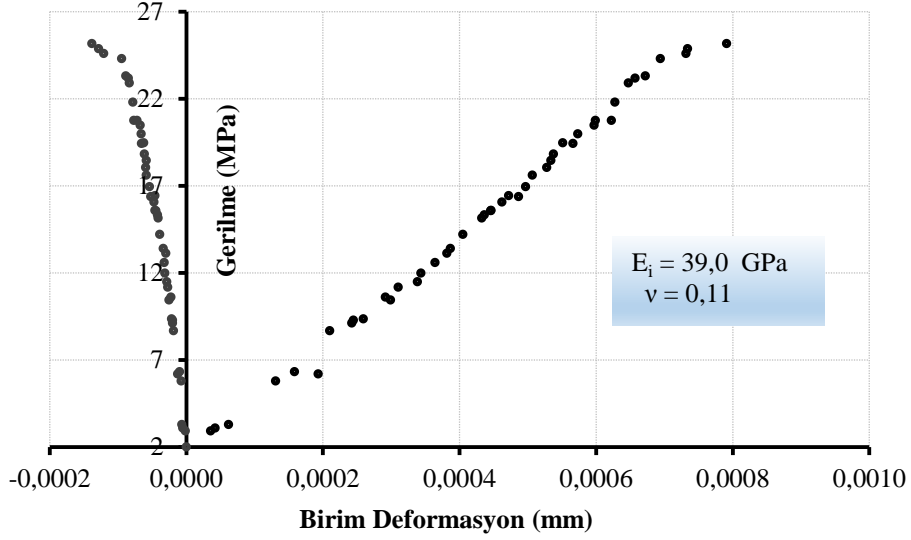
Şekil 5.2. AT2SK-2 no.lu sondajda alınan karotlardan hazırlanan örnekler üzerinde yapılan 3 eksenli sıkışma deneyi sonuçlarından hazırlanmış p-q grafiği ve zarfı



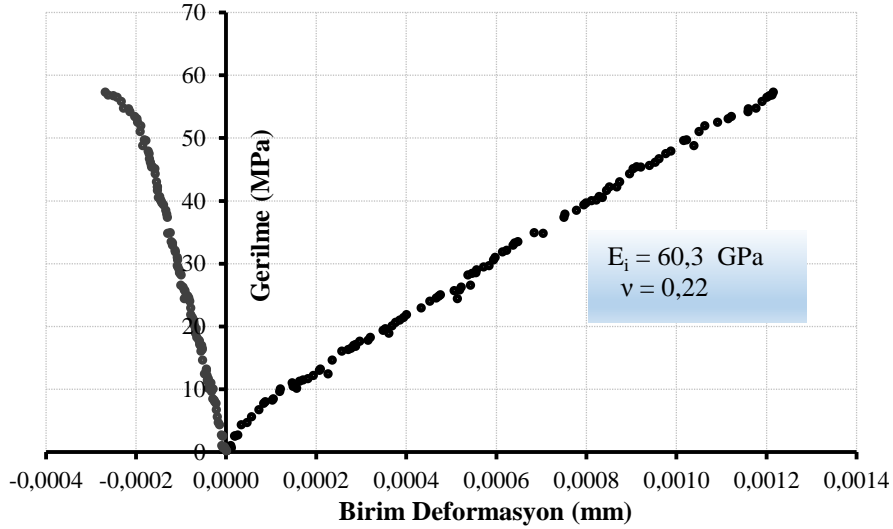
Şekil 5.3. AT2SK-3 no.lu sondajda ait karotlardan hazırlanan örnekler üzerinde yapılan 3 eksenli sıkışma deneyi sonuçlarından hazırlanmış p-q grafiği ve zarfı

### 5.3. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Değerleri

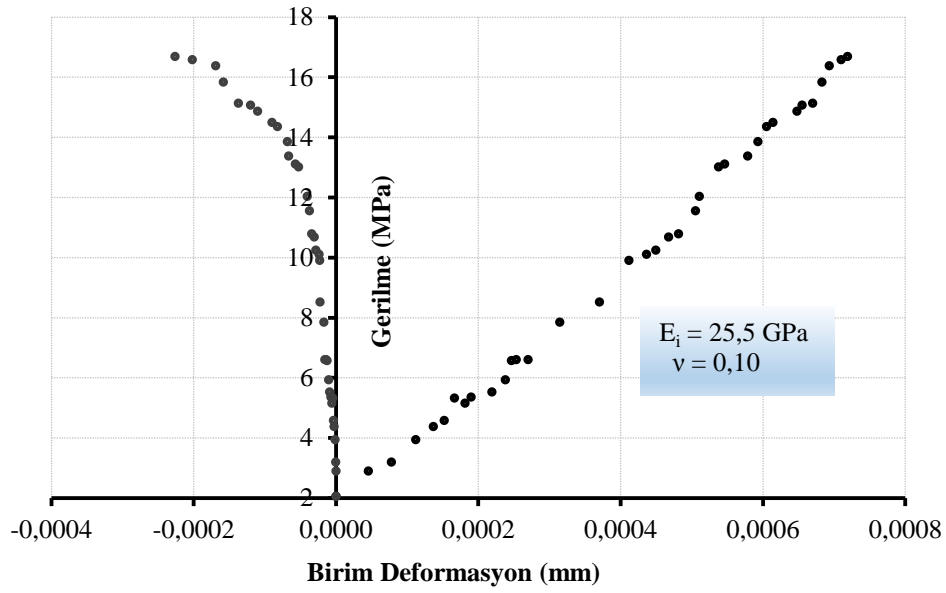
Tez çalışması kapsamında AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu araştırma sondajlarından tünel kotu çevresinden herbir sondajdan 2 adet olmak üzere alınan toplam 4 adet örnek üzerinde, elastisite modülü ve Poisson oranı değerlerini belirlemek amacıyla laboratuvarında deneyler yapılmıştır. Deneylerde 120  $\Omega$  'luk dirençli birim deformasyon ölçerler karot yüzeylerine yapıştırılmış ve 3 örnek üzerinde sonuca ulaşılabilmiş, sonuçlar Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Çizelge 5.3'de sunulmuştur.



Şekil 5.4. AT2SK-2, 1 no.lu örneğe ait elastisite modülü ve Poisson oranı grafiği



Şekil 5.5. AT2SK-2, 2 no.lu örneğe ait elastisite modülü ve Poisson oranı grafiği



Şekil 5.6. AT2SK-3, 2 no.lu örneğe ait elastisite modülü ve Poisson oranı grafiği

Çizelge 5.3. AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu sondajlardan alınan karot örneklerine ait elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri

Sondaj No	Derinlik (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü $E_i$ (GPa)	Poisson Oranı ( $\nu$ )
AT2SK-2	123,75 - 123,90	24,4	39,0	0,11
	119,00 - 119,40	25,0	60,3	0,22
AT2SK-3	119,70 - 119,85	27,6	-	-
	114,25 - 114,45	27,4	25,5	0,10

Bu çalışmada yapılacak analizlerde, AT2SK-2 no.lu sondajdan alınan karotlar için kaya malzemesi elastisite modülü ( $E_i$ ) güvenli tarafta kalabilmek amacıyla 39,0 GPa ve AT2SK-3 no.lu sondaj karotları için ise elastisite modülü ( $E_i$ ) için 25,5 GPa kullanılmıştır. Kaya malzemesi için AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu sondajların karotlarına ait Poisson oranları ( $\nu$ ) sırasıyla 0,11 ve 0,10 olarak elde edilmiş ancak çözümlenmelerde kaya kütlelerine ait Poisson oranları ( $\nu_m$ ) Hoek [17]'e göre sırasıyla 0,25 ve 0,30 olarak kullanılmıştır.

#### 5.4. Birim Hacim Ağırlığı

Tez çalışması kapsamında araştırma sondajlarından tünel kotu çevresinden alınan toplam 43 adet karot örneği üzerinde birim hacim ağırlık değerleri ISRM [9]'e göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda kaya malzemesinin birim hacim ağırlıkları AT2SK-2 no.lu sondajdan alınan karotlar için ortalama değer 25,5 kN/m<sup>3</sup>, AT2SK-3 no.lu sondajdan alınan karotlar için ise ortalama değer 27,0 kN/m<sup>3</sup> olarak bulunmuş ve sonuçlar Çizelge 5.4'de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu sondajlardan alınan karot örneklerine ait birim hacim ağırlık deney sonuçları

Deney No	AT2SK-2 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	AT2SK-3 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	24,8	27,0
2	25,2	27,0
3	27,3	27,2
4	27,1	27,0
5	24,1	27,0
6	24,8	27,6
7	24,9	26,8
8	24,7	27,2
9	24,4	27,4
10	26,6	26,9
11	25,0	27,2
12	25,2	27,1
13	26,8	27,1
14	24,9	27,4
15	28,8	27,0
16	23,9	26,7
17	25,1	26,5
18	24,6	27,1
19		27,4
20		26,9
21		27,0
22		27,4
23		26,9
24		26,3
25		26,7
<b>Ortalama:</b>	<b>25,5</b>	<b>27,0</b>

## **6. KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ**

### **6.1. T3 Tünel Güzergahı Boyunca Karşılaşılan Litolojik Birimler**

T3 tünelinin kazısı sırasında karşılaşılabacak kaya kütlelerinin sınıflandırılması, güzergah üzerinde yapılan sondajlardan alınan karot örnekleri ve arazi çalışmaları sonucunda yüzleklerden elde edilen bilgiler doğrultusunda yapılmıştır.

Tünel güzergahı üzerindeki AT2SK-2 no.lu sondaj kuyusu tünelin geçeceği 1+332 km üzerinde açılmıştır. Sondaj karotlarına göre tünelin, Arpik formasyonuna ait kuvars, kuvars şist, şistli kuvarsit ve kuvarslı mermerden oluşan birimler içerisinde geçmesi öngörülmektedir. Tünel ekseninde açılmış olan ikinci sondaj AT2SK-3 ise, tünel güzergahının 2+518 km'si üzerindedir. Sondajdan çıkan karot örneklerinde ise, bu kısımdaki tünel kazısı sırasında; kuvarsit, piritli fillit / klorit şist / kuvarsit, arjillit kloritoid şist / fillit / mermer ve klorit şist ile metaşeyl ardalanmasından oluşan Kuytu Formasyonuna (bkz. Şekil 3.3) ait birimlerle karşılaştırılması öngörülmektedir.

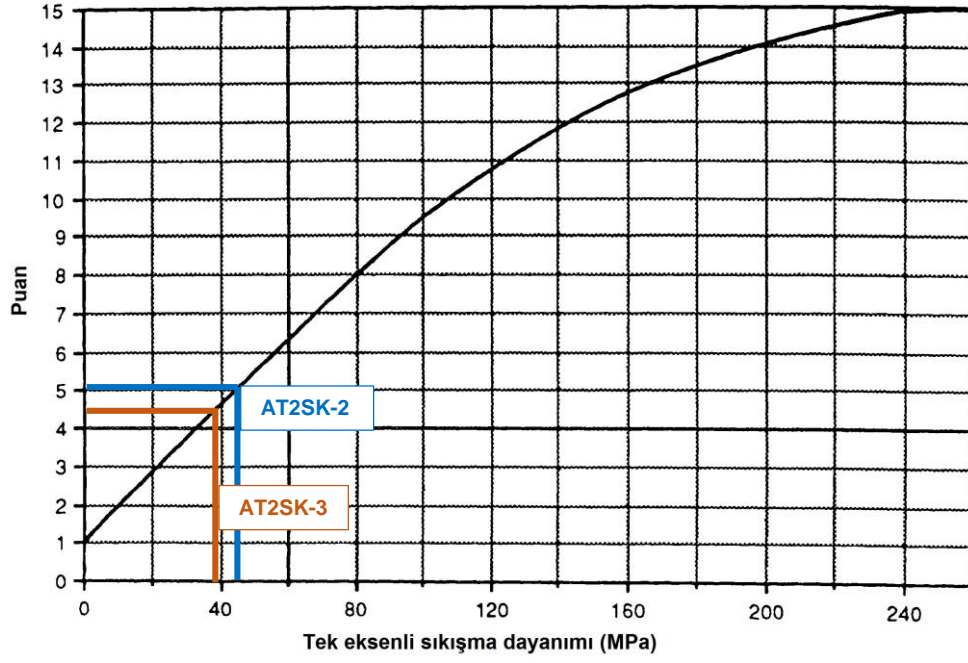
### **6.2. Kaya Kütleli Sınıflamaları**

#### **6.2.1. Kaya Kütleli Puanı (RMR)**

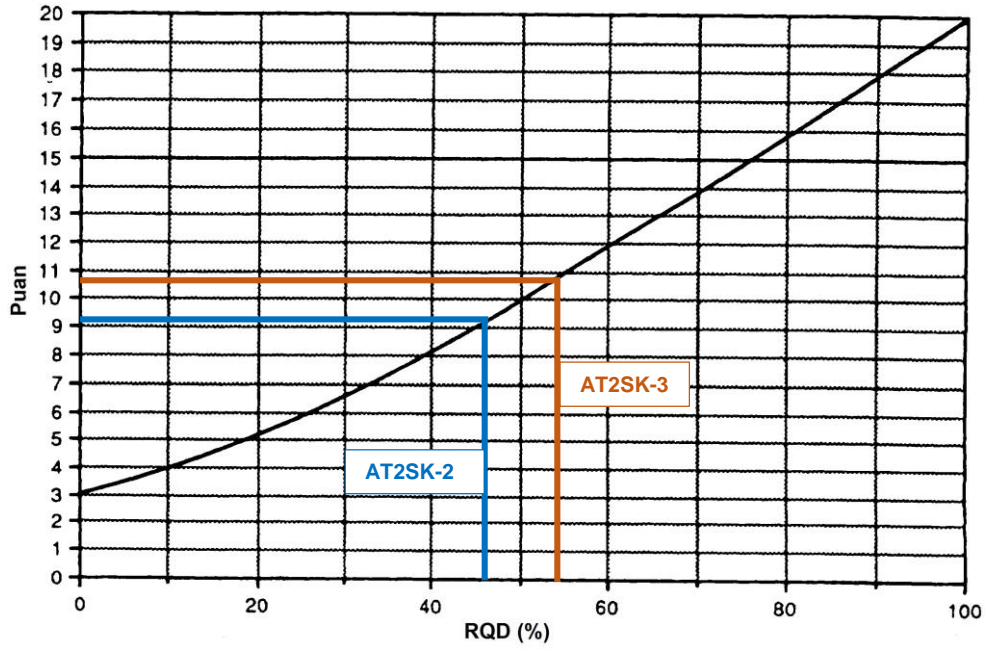
Tez kapsamında T3 iletim tünelinin, AT2SK-2 no.lu sondajdan 1+332 Km ve AT2SK-3 no.lu sondajdan ise, 2+518 km'si için RMR sınıflamaları yapılmıştır. Puanlamalarda sağlam kayaya ait tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri, RQD, süreksizliklerin açıklıkları, pürüzlülüğü, dolgusu ve aralığı ile birlikte eklem yüzeylerinin ve kayacın bozunma dereceleri karotlardan belirlenmiştir. Ayrıca, bozunma ve süreksizliklerin devamlılığı (uzunluğu) yüzlek vermiş aynı formasyona ait birimlerden de tahmin edilmeye çalışılmıştır.

RMR puanlamaları ise Bieniawski [3]'ye göre, tek eksenli sıkışma dayanım değerleri Şekil 6.1'den, RQD ve süreksizlik aralığı puanları ise sırasıyla Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 den belirlenmiştir.

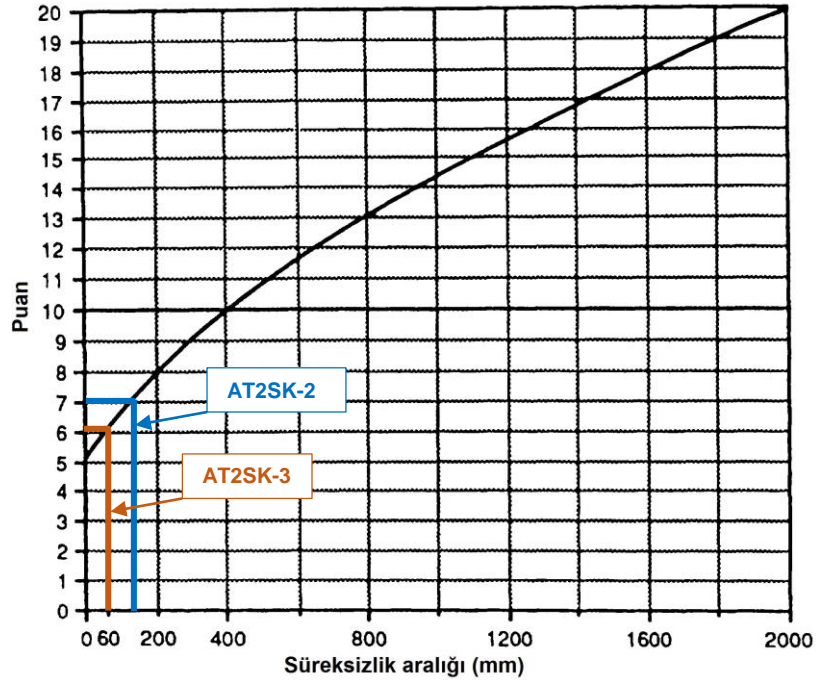




Şekil 6.1. 1+332 ve 2+518 km'ler kaya malzemesinin dayanım puanları



Şekil 6.2. 1+332 ve 2+518 km'ler için RQD (%) puanı



Şekil 6.3. 1+332 ve 2+518 km'ler için süreksizlik aralığı puanları

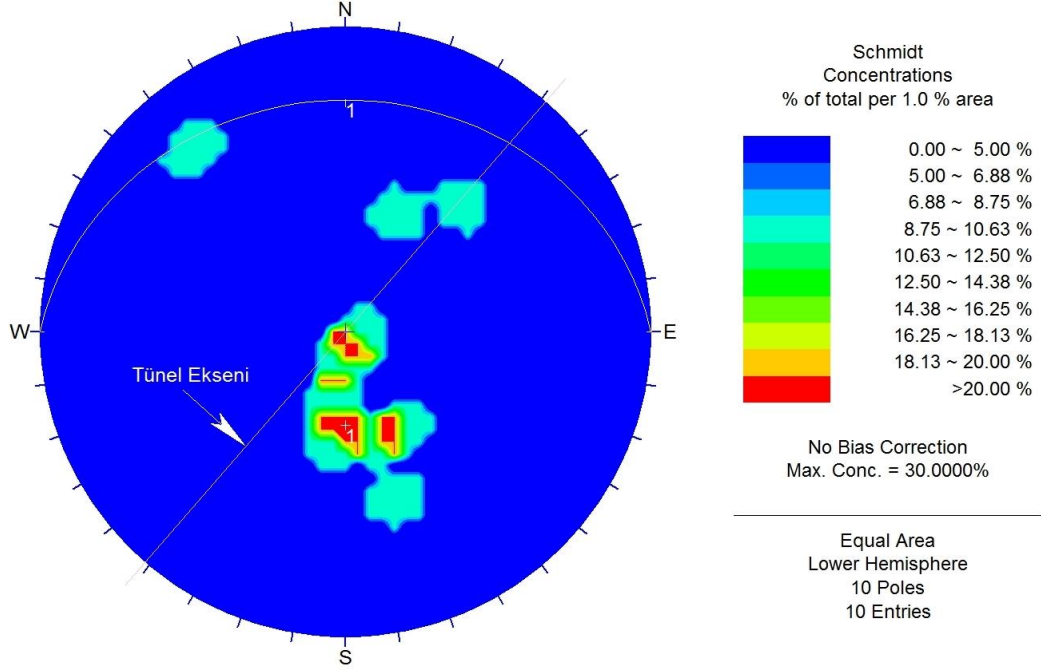
Süreksizliklerin durumu ile ilgili puanlar arazi ve sondaj karotlarında yapılan gözlemlere göre aşağıdaki şekilde (Çizelge 2.2'ye uygun olarak) belirlenmiştir:

	AT2SK-2		AT2SK-3	
	Km: 1+332	Puan	Km: 1+518	Puan
Süreksizliğin Uzunluğu (devamlılık)	3 - 10 m	2	3 - 10 m	2
Aralık (açıklık)	0,1–1,0 mm	4	< 0,1 mm	5
Pürüzlülük	Pürüzlü	5	Az pürüzlü	3
Dolgu	Sert dolgu	4	Sert dolgu	4
	< 5 mm		< 5 mm	
Bozunma (bkz. Çizelge 2.6)	Az bozunmuş	5	Az bozunmuş	5

Yeraltı suyu durumu ise, tünel kotunun yeraltı suyu seviyesinin üzerinde kalıyor olması nedeniyle her iki sondajla ilgili puanlamada “tamamen kuru” olarak belirlenmiş ve 15 puan ile değerlendirilmiştir.

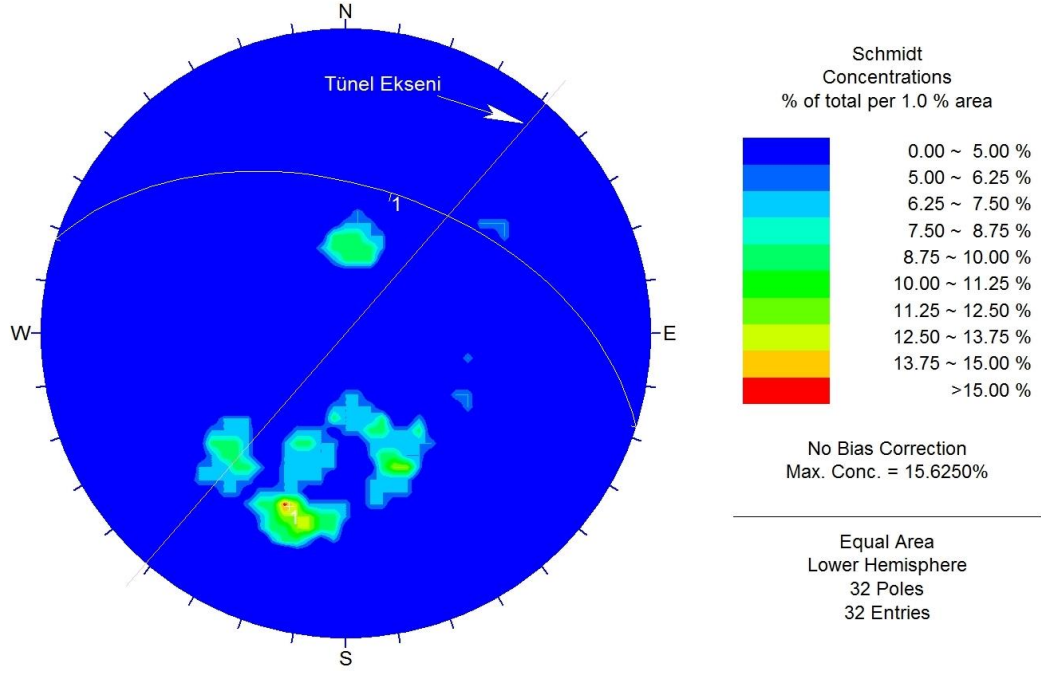
Süreksizlik yönelimine göre düzeltme puanlarının belirlenmesinde, Şengün vd. [6] tarafından arazide ölçülen süreksizlikler değerlendirilmiştir. Yüzleklere ölçülmüş bu süreksizlikler, eş alan Schmidt projeksiyon ağı üzerine yerleştirilerek ana süreksizlik yönelimleri ve bunların tünel eksenine göre konumları belirlenmiştir (Şekil 6.4 ve 6.5).

Tünel kazısının 1+332 km'sinde karşılaşılabacak olan Arpik formasyonuna ait ana süreksizlik yöneliminin  $25^0/360 - 28^0/336$  (eğim/eğimyönü) aralığında değiştiği görülmüş (Şekil 6.4), hakim süreksizlik olarak  $25^0/360$  süreksizlik seti, sınıflamada süreksizlik yönelimi düzeltmesinde kullanılmıştır.



Şekil 6.4. Arpik formasyonu süreksizlik ölçümleri (Schmidt eş alan projeksiyonu)

Tünel kazısının 2+518 km'sinde karşılaşılabacak olan Kuytu formasyonuna ait yüzleklerden alınan 32 adet süreksizlik ölçümü Schmidt projeksiyon ağı üzerine işlenmiş ve ana süreksizlik yönelimlerinin  $50^0/018 - 38^0/338$  (eğim/eğimyönü) aralığında değiştiği görülmüş (Şekil 6.5), hakim süreksizlik olarak  $50^0/018$  süreksizlik seti, sınıflamada süreksizlik yönelimi düzeltmesinde kullanılmıştır.



Şekil 6.5. Kuytu formasyonu süreksizlik ölçümleri (Schmidt eş alan projeksiyonu)

Şekil 6.4 ve 6.5’de görüldüğü gibi süreksizliklerin doğrultuları tünel eksenine açılı olarak konumlanmışlardır. Bu nedenle süreksizliklerin yönelimlerine göre düzeltmelerde, görünür eğim açısı aşağıdaki eşitlikten belirlenerek [18] kullanılmıştır.

$$\tan \beta = \tan \alpha \cdot \sin \delta \quad (4)$$

Burada; görünür eğim  $\beta$ , gerçek eğim  $\alpha$ , ve kesit ile eğimin doğrultusu arasındaki açı ise  $\delta$ ’dir.

Tünelin kazı yönü  $041^0$  olup, süreksizlerin eğim ve doğrultu yönelimlerine göre düzeltmesi; ana süreksizlik yönelimi Arpik formasyonu tünel eksenine açılı olarak konumlandığından, aynada süreksizliklerin görünür eğimi olan  $19^0$  için hesaplanarak yapılmıştır [18]. Böylece süreksizlik yönelimine göre düzeltme; eğim ve doğrultularına bakılmaksızın  $0^0$ - $20^0$  derece arasında olduğundan “uygun değil” olarak değerlendirilmiş olup genel RMR puanından -10 düzeltme yapılarak, kaya kütlelerinin düzeltilmiş RMR puanı 46 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 6.1).

Tünelin kazı yönü  $041^0$  olup, süreksizlerin eğim ve doğrultu yönelimlerine göre düzeltmesi; ana süreksizlik yöneliminin Kuytu formasyonu için tünel eksenine yaklaşık dik ve kazı yönüne doğru eğimli konumlandığından, aynada süreksizliklerin görünür eğimi  $48^0$  olarak hesaplanmıştır [18]. Buna göre süreksizlik yönelimine göre düzeltme  $45^0$ - $90^0$  derece

arasında olduğundan “çok uygun” olarak değerlendirilmiş ve genel RMR puanında düzeltme yapılmamıştır (Çizelge 6.1).

T3 Tüneli kazısı sırasında karşılaşılabilecek kaya kütlelerinin sınıflama parametreleri ve bunlara ait puanlamalar (RMR) Bieniawski [3]' ye göre AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu sondajlardan alınan karotlar ve laboratuvar deney sonuçları ile saha gözlemleri dikkate alınarak hesaplanmış ve Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Km: 1+332 ve km: 2+518’deki kaya kütleleri için RMR sınıflaması

Parametre	AT2SK-2		AT2SK-3	
	km: 1+332	Puan	km: 1+518	Puan
1 Kaya malzemesi dayanımı Tek eksenli sıkışma dayanımı	45 MPa	5	38 MPa	4
2 RQD	46 %	9	54 %	10
3 Süreksizlik aralığı	60-200 mm	7	< 60 mm	6
4 Süreksizliklerin durumu (bkz.Çizelge2.2)	Süreksizliğin Uzunluğu (devamlılık)	3 - 10 m	3 - 10 m	2
	Aralık (açıklık)	0,1 – 1,0 mm	< 0,1 mm	5
	Pürüzlülük	Pürüzlü	Az pürüzlü	3
	Dolgu	Sert dolgulu < 5 mm	Sert dolgulu < 5 mm	4
	Bozunma (bkz.Çizelge2.6)	Az bozunmuş	Az bozunmuş	5
5 Yeraltısuyu	Tamamen Kuru	15	Tamamen Kuru	15
<b>A RMR Sınıflama Parametrelerine göre Toplam Puan</b>		56		54
<b>B Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme</b>		-10		0
<b>C Toplam Puanlardan Hesaplanmış Kaya Sınıfları</b>	<b>Orta kaya</b>	46	<b>Orta kaya</b>	54
<b>D Kaya Sınıflarının Özellikleri</b>	<b>Destek Sınıfı</b>	<b>III</b>	<b>Destek Sınıfı</b>	<b>III</b>
	<b>Ortalama Desteksiz Kalabilme Süresi</b>	5,5 m açıklık için 55 saat		5,5 m açıklık için 500 saat

Bu sonuçlara göre, AT2SK-2 no.lu sondaj kuyusundan alınan karot örnekleri ve saha gözlemlerine göre yapılan kaya kalitesi puanlamasına sisteminde nihai RMR puanı **46**, AT2SK-3 no’lu sondaj kuyusunda ise nihai RMR puanı **54** olarak hesaplanmıştır.

### 6.2.2. Kaya Kütle Kalitesi Puanlama Sistemi (RMQR)

Sondajlardan alınan karotlar ve tünel güzergahı üzerindeki yüzlekler esas alınarak, T3 tüneli kazısı sırasında karşılaşılabilecek jeolojik formasyonların, kaya kütleleri sınıflama parametreleri RMQR [4, 11] sınıflama sistemine göre ayrı ayrı puanlaması yapılmış ve Çizelge 6.2’de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. 1+332 ve km: 2+518’de RMQR sınıflamasına göre RMQR değerleri

Sınıflama Parametresi	AT2SK-2	Puan	AT2SK-3	Puan
Bozunma derecesi (BD)	Az bozunmuş	9	Az bozunmuş	9
Süreksizlik takımı sayısı (STS)	İki takım + gelişigüzel	12	İki takım + gelişigüzel	12
Süreksizlik aralığı (SA) veya RQD (%)	RQD 46 %	4	RQD 54 %	4
Süreksizliklerin durumu (SD)				
Süreksizlik koşulu (SD) $RSD = RSDA + RSDD + RSDP$	Açıklık	0,1 – 0,25 mm	< 0,1 mm	6
	Dolgu	Sadece yüzey-sıvaması	Sadece yüzey-sıvaması	5
	Tanımsal Pürüzlülük bkz. Şekil 2.1, ISRM [9]’deki pürüzlülük profil no.su	Pürüzlü  8	Düz dalgalı  7	7
Yeraltısuyu sızma durumu (YASD)	Kuru	9	Kuru	9
Su emme durumu (SED)	Su emmeyen	6	Su emmeyen	6
<b>RMQR Sınıflama Parametrelerine göre Toplam Puan</b>		<b>58</b>		<b>58</b>
<b>Destek sınıfı</b>	Orta	<b>IV</b>	Orta	<b>IV</b>

RMQR sistemine göre AT2SK-2 ve AT2SK-3 sondajları için RMQR puanı **58** olarak hesaplanmıştır.

### 6.3. Kaya Kütlesi Parametreleri

Tünel kazısı sırasında karşılaşılabilecek kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi destek sınıflarının belirlenmesinde güvenli ve ekonomik bir kazı yapılabilmesi bakımından önemlidir. Kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon parametreleri gibi özellikleri tünel tasarımının önemli girdileridir. Bu parametreleri sahada belirlemek oldukça zor ve uzun süre alabilir. Bu nedenle, kaya kütlelerinin anılan parametreleri kaya malzemesinin mekanik özelliklerini kullanan görgül ilişkilerle belirlenebilmektedir.

Kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve deformasyon modülü gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi makaslama dayanımı parametreleri, birçok araştırmacıya göre farklı yöntemler kullanılarak hesaplanabilmektedir.

### 6.3.1. Kaya Kütlesinin Dayanımı

Mühendislik yapısı tasarımcılarının karşı karşıya kaldıkları en önemli sorunlardan biri kaya kütlesinin dayanımını tayin etmektir. Kaya kütlesi, ayırık blokların iç içe geçmesi ile meydana gelir. Bu bloklar ayrılmış veya farklı derecelerde altere olmuş ve bloklar arasındaki temas yüzeyleri temiz ve taze yüzeyden kille kaplanmış ve kayma yüzeyleri olabilir [19].

Kaya kütlesinin dayanımını laboratuvar deneyleri ile belirlemek mümkün değildir. Dolayısıyla dayanım sahada yapılan jeolojik gözlem ve ayrılmış kaya parçaları üzerinde veya kaya kütlesinden ayrılmış kaya bloklarında yapılan deneylerle belirlenebilir. Eklemlili kaya kütlelerinde görgül bir yenilme ölçütü geliştirmek için teorik çalışmaların sonuçları, model çalışmaları ve sınırlı sayıdaki dayanım değerleri kullanılarak Hoek ve Brown [20] tarafından kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Hoek [21]'de Bieniawski'nin [3] kaya kütlesi sınıflama sisteminin, görgül yenilme ölçütünde gerekli olan bir sabit olarak kullanılabilceğini önermiştir [19].

Bir çok araştırmacı kaya kütlesi dayanımının belirlenmesinde sayısal yaklaşımda bulunmuştur. Ancak bu tezde, kaya kütlesi tek eksenli sıkışma dayanımını ( $\sigma_{cm}$ ), kaya kütlesinin jeomekanik özelliklerinin tahmini amacıyla RMQRın kaya malzemesinin özellikleriyle birlikte kullanımı için geliştirilen ve Aydan vd. [4] tarafından aşağıda önerilen eşitlikten faydalanılarak hesaplanmıştır. Önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar, Aydan vd. [4] tarafından çok sayıda yerinde deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve bunların birbirlerine yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir. Buna göre, kaya kütlelerine ait tek eksenli sıkışma dayanım değerleri aşağıdaki eşitlikten, tünel kazısının 1+332 Km'sinde; 8,4 MPa ve 2+518 Km'sinde ise 7,2 MPa olarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{cm} = \frac{RMQR}{RMQR + 6(100 - RMQR)} C_i \quad (5)$$

### 6.3.2. Kaya Kütlesinin Deformasyon Modülü

Kaya kütlesinin deformasyon modülü, kaya kütlesi deformasyonunu içeren her türlü anlizler için önemli bir parametredir. Tünel çevresindeki kaya kütlesinin deformasyonu ilk destekleme ve kaplama beton tasarımı için önemlidir ve bu deformasyonun sayısal analizi için kaya kütlesinin deformasyonunun tahmin edilmesi gerekir. Yerinde deneylerle, bu parametrenin doğrudan belirlenmesi zaman alıcı, pahalı ve deney sonuçları tartışmalı olabilmektedir. İzotrop kaya kütlesi deformasyonunun belirlenmesi için kaya kütlesi değeri (RMR), tünel açma kalite indeksi (Q) ve jeolojik dayanım indeksi (GSI) gibi görgül

yöntemlerin kaya sınıflarının kullanılmasını önerilmektedir [22]. Kaya kütlelerinin deformasyon modülü ( $E_{rm}$ ), RMR ve kaya malzemesine ait elastisite modülünün de kullanıldığı aşağıda önerilen eşitlikten hesaplanmıştır. Önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar Aydan vd. [4] tarafından çok sayıda yerinde deney yapılarak mevcut bazı görgül ilişkilerden belirlenen değerlerle karşılaştırılmış, bu ilişkilerden Nicholson ve Bieniawski [23] tarafından önerilen ilişkinin arazi sonuçlarına en yakın değerleri verdiği görülmüştür. Buna göre, kaya kütlelerine ait deformasyon modülü değerleri, tünel kazısının 1+332 Km'inde; 4945,5 MPa ve 2+518 Km'inde ise; 4528,1 MPa olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{E_{rm}}{E_i} = 0,009e^{RMR/22,82} + 0,000028RMR^2 \quad (\text{Nicholson ve Bieniawski, [23]}) \quad (6)$$

### 6.3.3. Hoek ve Brown Görgül Yenilme Ölçütü ve Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Yakın aralıklı eklemlerle bölünmüş kaya kütlelerinin mekanik davranışının tahmini, laboratuvar deneyleri için gerekli olan örnek boyutlarının büyük olması nedeniyle kaya mekaniğinin temel sorunlarından biridir. Bu sorunu aşabilmek amacıyla kaya malzemeleri ve kaya kütleleri için önerilmiş olan görgül yenilme ölçütleri arasında yer alan Hoek-Brown yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ölçüt, çok sayıda süreksizlik seti içeren kaya kütlelerinin boyutsuz basit parametreler kullanarak, kaya kütlelerinin deformasyon modülü ve dayanımı hesaplanabilmektedir. Özellikle zayıf kaya kütlelerine uygulanmasıyla ilgili bazı sınırlamalar nedeniyle ilk kez önerildiği 1980' den bu yana farklı zamanlarda tekrar düzenlenmiş ve modifiye edilmiştir [24, 25, 26].

Eklemlili kaya kütlelerinin dayanımı, sağlam kaya parçalarının özelliklerine ve bu serbest parçaların farklı dayanım koşulları altında kaymasına ve dönmesine bağlıdır. Bu serbestlik sağlam kayanın geometrik şeklinin yanı sıra bu parçaları ayıran eklem yüzeylerinin durumu tarafından kontrol edilir. Köşeli, temiz, pürüzlü süreksizlik yüzeylerine sahip kaya parçalarının oluşturduğu kaya kütleleri, yuvarlak ayrılmış ve altere olmuş malzemeler tarafından çevrilmiş kaya kütlelerinden daha fazla dayanıma sahip olacaktır [19].

Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü, Sönmez ve Ulusay [24] tarafından "s" ve "a" gibi kaya parametrelerinin belirlendiği eşitliklerle ilgili önerileri yanı sıra, masif kaya kütleleri kavramını da dikkate alınarak yapılan güncelleme ile birlikte tekrar düzenlenen ölçüt sabitleri "b<sub>m</sub>", "b<sub>s</sub>", "m<sub>b</sub>", "s" ve "a", bu tez çalışmasında kullanılmıştır.

Ayrıca tünelde kullanılacak kazı tekniği delme patlatma ve/veya mekanik kazı olarak öngörüldüğünden, Sönmez ve Ulusay [26] tarafından patlatma hasarı ve gerilim boşalması



nedeniyle Hoek-Brown yenilme ölçütüne eklenen örselenme faktörü  $d_f$ , “denetimli patlatma-çok az hasarlı” koşulu için, Kendorski vd. [27]’e göre 0,95 alınmıştır.

GSI değeri arazide belirlenirken, uygulamadaki problemlerden biri patlatma hasarları ile ilgilidir. Kontrollü patlatma veya aşırı patlatma arasında kaya yüzeyinde önemli farklılıklar oluşmaktadır. GSI, mümkün olan en hasarsız, örselenmemiş kaya yüzeyinden tahmin edilmelidir.

Sönmez ve Ulusay [26]’ a göre SCR, mevcut her eklem takımı için metre başına eklem sayısının toplamı olarak tanımlanan hacimsel eklem sayısına ( $J_v$ ) bağlı bir değer olarak kabul edilmiş ve bu değer arttıkça kaya kütledeki ayrışma artmaktadır. Hacimsel eklem sayısı ( $J_v$ ) ya tünelde, mağarada yada yüzleklerden haritalamaya dayanır. Ancak hiçbir gözlem mevcut olmadığı durumda ise RQD veya süreksizlik frekansıyla karotlar kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu tezde, hacimsel eklem sayısı ( $J_v$ ) nın hesaplanmasında sondaj loglarından belirlenen RQD değeri alınmış ve  $RQD = 115 - 3,3J_v$  [28] bağıntısından faydalanılmıştır. Her iki sondaj için ayrı süreksizlik yüzey koşulları (SCR) seçilmiş ve sonuçlar Çizelge 6.3’te verilmiştir.

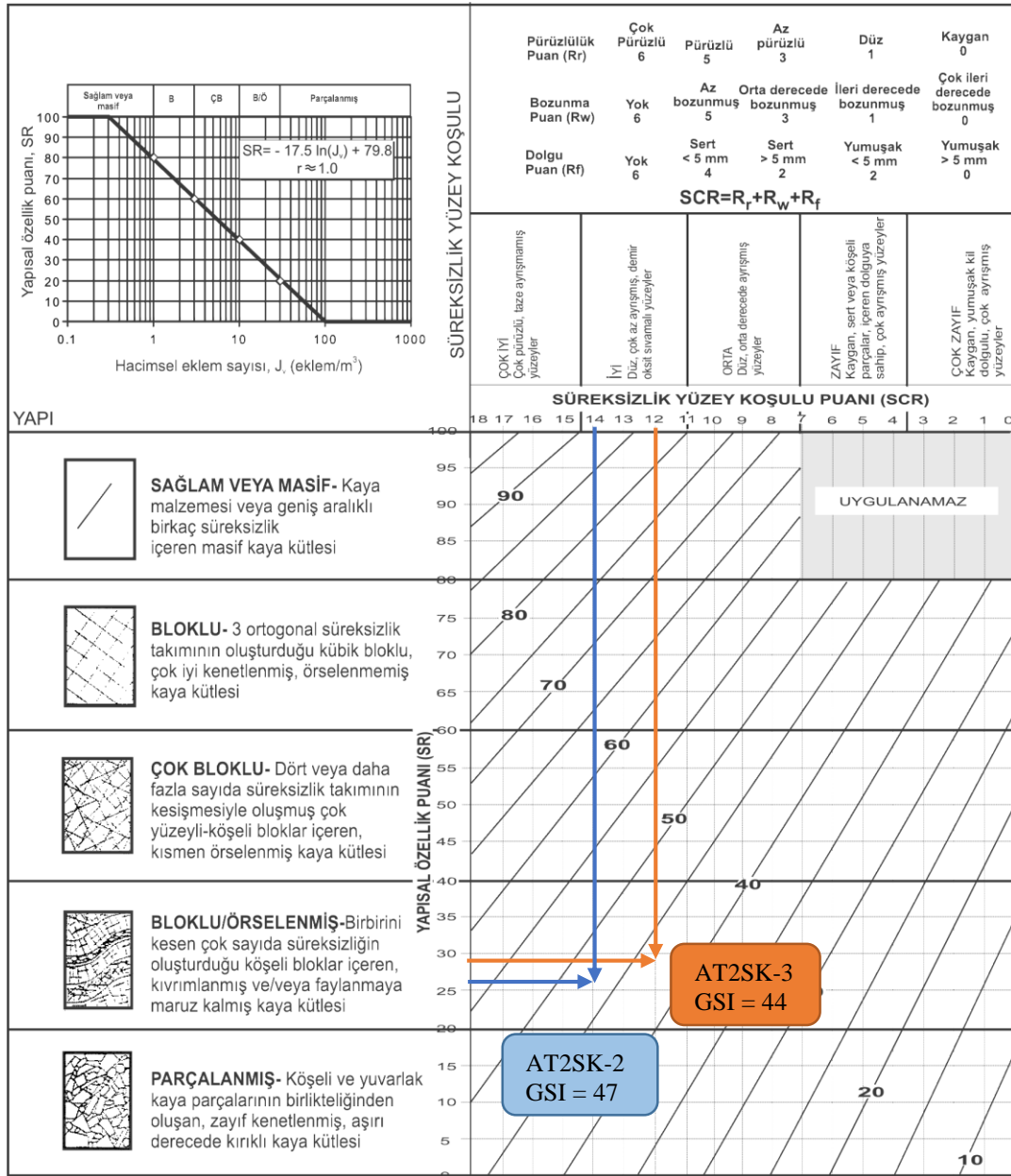
AT2SK-2 no.lu sondajda, 100-130 m arasındaki ortalama RQD %46 değerine göre  $J_v=20,9$  olarak hesaplanmıştır. Buna göre, yapısal özellik puanı 26,6 ve AT2SK-2 no.lu sondaj için jeolojik dayanım indeksi  $GSI=47$  olarak Şekil 6.7’den hesaplanmıştır.

AT2SK-3 sondajında, 100-122,5 m arasındaki ortalama RQD %54 değerine göre  $J_v=18,5$  olarak hesaplanmıştır. Buna göre, yapısal özellik puanı 28,8 ve AT2SK-3 için jeolojik dayanım indeksi  $GSI=44$  olarak Şekil 6.7’den hesaplanmıştır.

Yapısal özellik puanı ile (SR) hacimsel eklem sayısı ( $J_v$ ) arasındaki bağıntıdan  $SR = -17,5 \ln(J_v) + 79,8$  (Sönmez ve Ulusay [24]’den) hesaplanmıştır (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3. Süreksizlik yüzey koşulu puanlaması (SCR) ve Yapısal özellik puanlaması (SR) (Sönmez ve Ulusay, [24]’e göre)

Sondaj		ATSK-2	ATSK-3
Pürüzlülük puanı	$R_r$	Pürüzlü	Az pürüzlü
		5	3
Bozunma puanı	$R_w$	Az bozunmuş	
		5	5
Dolgu puanı	$R_f$	Sert dolgu < 5mm	
		4	4
SCR		14	12
$J_v$ (eklem/m <sup>3</sup> )		20,9	18,5
SR		26,6	28,8
GSI		47	44



Şekil 6.6. Kantitatif GSI abağı (Sönmez ve Ulusay [24; 25]'den) ve bu çalışmada incelenen kaya kütlesinin GSI değerleri

Kaya kütlesi sabitleri olan “ $b_m$ ”, “ $b_s$ ”, “ $m_b$ ”, “ $s$ ” ve “ $a$ ” Sönmez ve Ulusay [24] tarafından önerilmiş, aşağıdaki bağıntılardan hesaplanmıştır.

$$b_m = 3,14 \cdot \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 340(1 - d_f)}\right) + 28 \quad (7)$$

$$b_s = 0,67 \cdot \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 340(1 - d_f)}\right) + 9 \quad (8)$$

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_m}\right) \quad (9)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_s}\right) \quad (10)$$

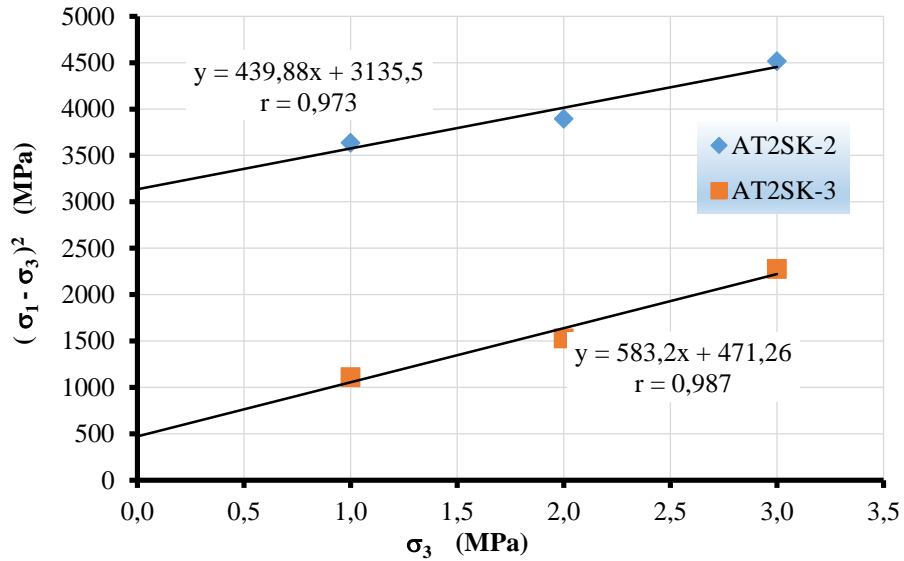
$$a = 0,5 \quad (11)$$

AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu araştırma sondajlarından alınan karotlar üzerinde yapılan üç eksenli sıkışma dayanım değerlerinin sonuçlarına göre kaya malzemesi için  $m_i$  sabiti, aşağıdaki genelleştirilmiş Hoek ve Brown eşitliğinden hesaplanmış ve Çizelge 6.4'de regresyon değeri ile birlikte (r) sunulmuştur. Ayrıca deney sonuçlarının doğrusal grafikleri çizilmiştir Şekil 6.8.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + s \sigma_{ci}^2)^{0.5} \quad (\text{Hoek [29]}) \quad (12)$$

Çizelge 6.4. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerine göre  $m_i$  ve r değerleri

	AT2SK-2	AT2SK-3
$m_i$	9,8	15,2
r	0,973	0,987

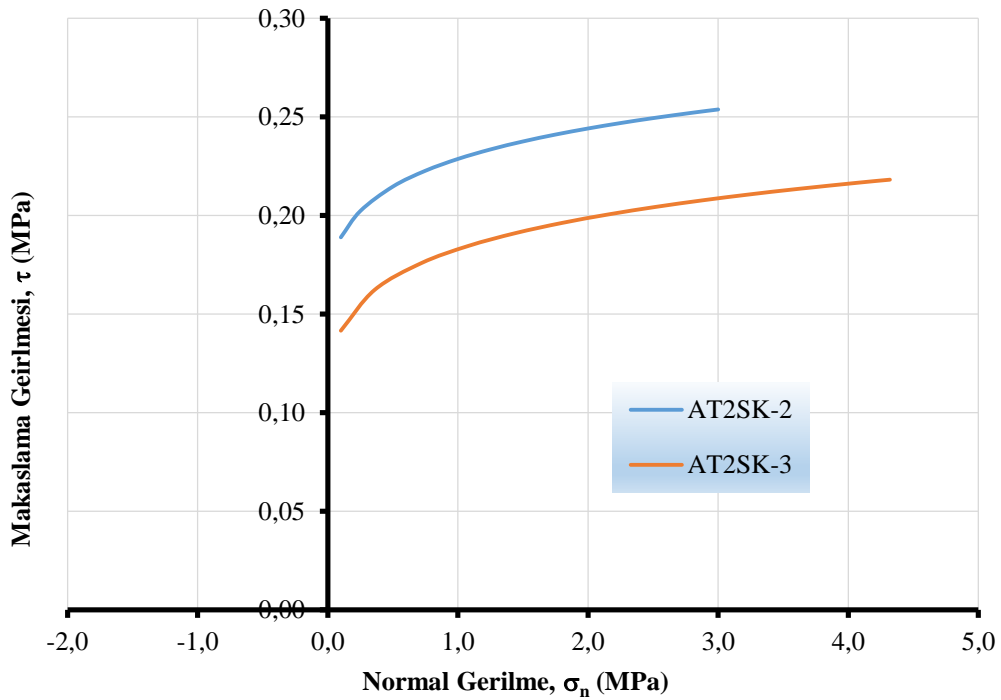


Şekil 6.7. AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu kuyulara ait kayalarda  $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - \sigma_3$  ilişkisi

Balmer, tarafından önerildiği biçimde (Hoek [17]'dan), T3 tünelinin güzergahı boyunca 1+332 ve 2+518 kilometreleri için, sırasıyla 110 ve 150 m kalınlıkta değişen örtü yükü altında farklı normal gerilme aralıkları seçilerek, her bir aralık için makaslama gerilmeleri, anlık kohezyon ( $c_i$ ), anlık içsel sürtünme açıları ( $\phi_i$ ) hesaplanmış (Çizelge 6.5) ve yenilme zarfları çizilmiştir (Şekil 6.9).

Çizelge 6.5. 110,0m (AT2SK-2) ve 150,0m (AT2SK-3) örtü yükü altında kaya kütlesi dayanım parametreleri.

Km: 1+332 / AT2SK-2				Km: 2+518 / AT2SK-3			
$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi_i$ ( $^\circ$ )	$c_i$ (MPa)	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi_i$ ( $^\circ$ )	$c_i$ (MPa)
0,10	0,189	85,4	17,7	0,100	0,142	85,8	12,8
0,25	0,202	81,4	18,6	0,360	0,162	79,0	14,4
0,50	0,215	75,3	19,6	0,720	0,176	70,9	15,5
0,75	0,223	69,8	20,2	1,080	0,185	63,9	16,3
1,00	0,229	64,8	20,7	1,440	0,191	57,9	16,8
1,25	0,234	60,3	21,2	1,800	0,196	52,7	17,3
1,50	0,238	56,2	21,5	2,160	0,201	48,3	17,6
1,75	0,241	52,6	21,8	2,520	0,204	44,4	18,0
2,00	0,244	49,3	22,1	2,880	0,208	41,1	18,3
2,25	0,247	46,3	22,3	3,240	0,211	38,3	18,5
2,50	0,249	43,7	22,6	3,600	0,213	35,7	18,8
2,81	0,252	40,7	22,8	4,080	0,217	32,8	19,0
3,00	0,254	39,1	22,9	4,320	0,218	31,5	19,2



Şekil 6.8. 110 ve 150 m'ye kadar kaya kütlesi yenilme zarfları

AT2SK-2 ve AT2SK-3 no.lu araştırma sondajlarından alınan karot örnekleri üzerinde yapılan deneylere ve Hoek-Brown yenilme ölçütünü esas olan boyutsuz malzeme sabitlerine dayanarak elde edilen, kaya kütlelerinin tasarım parametreleri Çizelge 6.6'da ayrı ayrı sunulmuştur.

Çizelge 6.6. Kaya kütleleri tasarım parametreleri

Sondaj Kuyuları		AT2SK-2	AT2SK-3
Kilometre		1+332	2+518
Tek eksenli sıkışma dayanımı	$\sigma_{ci}$ (MPa)	44,9	38,3
Kaya kütleleri dayanımı	$\sigma_{cm}$ (MPa)	8,4	7,2
Elastisite modülü	$E_i$ (GPa)	39,0	25,5
Deformasyon modülü	$E_m$ (GPa)	4,9	4,5
Jeolojik dayanım indeksi	GSI	47	44
Örselenme faktörü	$d_f$	0,95	
Birim hacim ağırlık	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	25,5	27,0
Kaya malzemesinin kohezyonu	$c$ (MPa)	13,1	4,4
Kaya malzemesinin içsel sürtünme açısı	$\phi$ (°)	38,8	51,7
Poisson oranı (kaya malzemesi/kaya kütleleri)	$\nu / \nu_m$	0,11/0,25	0,10/0,30
Boyutsuz malzeme sabiti	$m_i$	9,8	15,2
Boyutsuz malzeme sabiti	$m_b$	0,582	0,771
Boyutsuz malzeme sabiti	$s$	0,00053	0,00035
Boyutsuz malzeme sabiti	$a$	0,5	
Boyutsuz malzeme sabiti	$b_m$	18,772	
Boyutsuz malzeme sabiti	$b_s$	7,031	

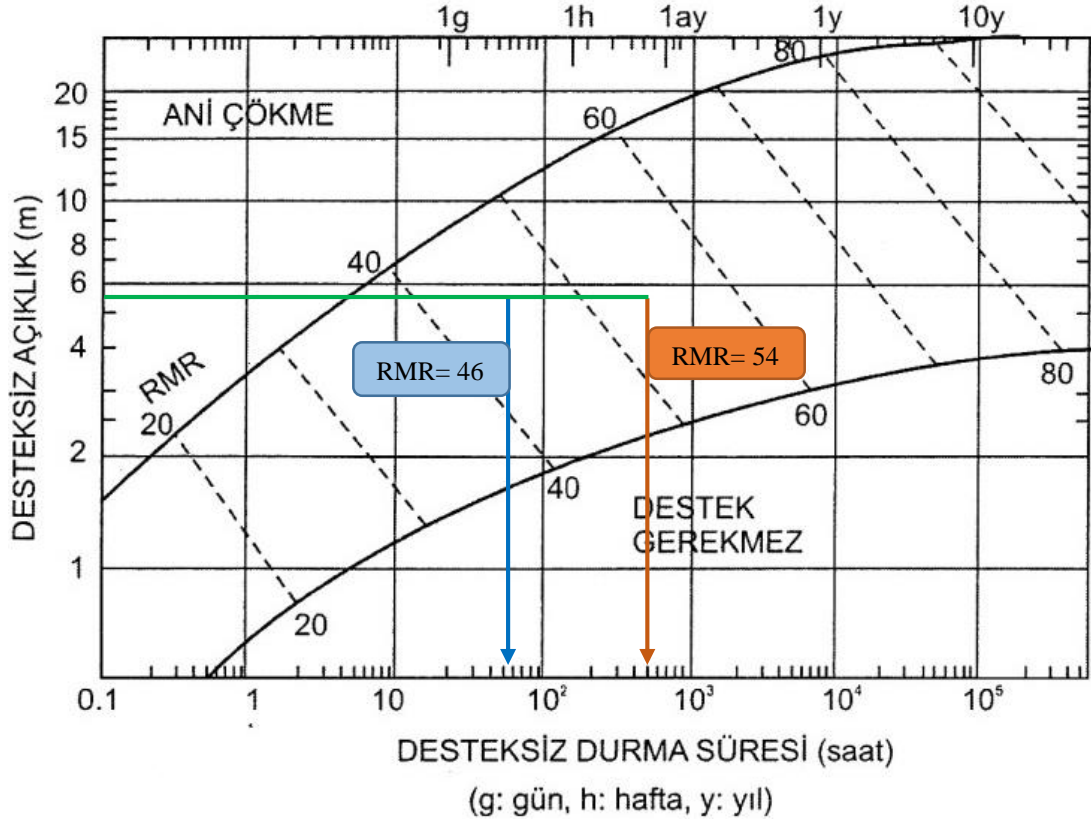
## 7. T3 TÜNELİ KAYA DESTEK SINIFLARI VE DESTEKLEME SİSTEMLERİ

Proje kapsamında kazısı planlanan T3 iletim tünelinin güzergahı boyunca yüzeylenen kaya kütlelerinden ve iki farklı kilometrede açılan AT2SK-2 (km: 1+332 ) ve AT2SK-3 (km: 2+518) no.lu araştırma sondajlarından alınan karot örneklerinin laboratuvar sonuçları ile birlikte kaya kütlesi kaliteleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu tezde iki farklı kaya kütlesi sınıflama sistemleri (RMR ve RMQR) kullanılarak kaya kütlesi puanı ve Hoek-Brown [30] kaya kütlesi görgül yenilme ölçü kullanılarak kaya kütlesinin tasarım parametreleri belirlenmiştir. Buna bağlı olarak da kaya destek sınıfları tayin edilmiştir.

### 7.1. RMR Destek Sınıfı

Her iki sondaj için de tünel kazısı sırasında karşılaşılabilecek kaya kütlesinin kaya sınıfı, “Orta Kaya - III” olarak belirlenmiştir (bkz. Çizelge 6.1). Belirlenen bu kaya kütle sınıfında kazılacak 5,5 m açıklık için ortalama desteksiz kalabilme süresi 1+332 Km’de 55 saat ve 2+518 Km’de ise yaklaşık 500 saat olarak hesaplanmıştır (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. İncelenen kaya kütleleri için RMR sınıflamasına [3] göre desteksiz durma süreleri

### 7.1.1. RMR Tünel Destekleme Sistemi

Kaya kütlesi sınıflama puanına göre, T3 tünelinin kazısı sırasında km: 1+332 karşılaşılabacak “Arpik Formasyonu”, km: 2+518 karşılaşılabacak “Kuytu Formasyonu” ve çevresindeki jeolojik birimler için önerilen destek sınıfları Çizelge 7.1’de taralı kısımda sunulmuştur.

Buna göre, her iki jeolojik birim için destek sınıfı, 60-41 nihai RMR aralığındaki orta kaya puanında olan III önerilmiştir.

Çizelge 7.1. RMR puanına göre kazı ve kaya tünelleri için destek önerileri [3]

Kaya Kütlesi Sınıfı	Kazı	Kaya Bulonu (20 mm çaplı tam enjeksiyonlu)	Püskürtme Beton	Çelik İksa
I Zayıf kaya (100 – 81)	Tam Kesit, 3,0 m ilerleme	Gerektiğinde noktasal kaya bulonu		
II İyi kaya (80 – 61)	Tam kesit 1,0-1,5 m ilerleme. Aynaya 20 m uzaklıkta desteği tamamla	Kemede yer yer 3,0 m uzunlukda bulon, 2,5 m aralıklı ara sıra hasır çelik	Gerektiğinde kemerde 5cm	Yok
III Orta kaya (60 – 41)	Üst yarıda ve altyarıda ilerleme. Üst yarıda 1,5-3,0 m ilerleme. Her patlatmadan sonra desteklemeye başla. Aynaya 10 m uzaklıkta desteği tamamla	Kemede ve duvarlarda 1,5-2,0 m aralıklı 4,0 m uzunlukta sistemli bulon, kemerde hasır çelik ile birlikte	Kemede 5-10 cm, yan duvarlarda 3cm	Yok
IV Zayıf kaya (40 – 21)	Üst yarıda ve altyarıda ilerleme. Üst yarıda 1,0-1,5 m ilerleme. Aynaya 10 m uzaklıkta kazı ile birlikte eşzamanlı destekleme	Kemede ve duvarlarda 1,0-1,5 m aralıklı 4,0-5,0 m uzunlukta hasır çelik ile birlikte.sistemli bulon	Kemede 10-15 cm, yan duvarlarda 10 cm	Gerektiğinde 1,5 m aralıklı hafif ila orta profiller
V Çok zayıf kaya (< 20)	Üst yarıda 0,5-1,5 m ilerleme, kazıyla eşzamanlı destek yerleştirilmeli. Patlatmadan hemen sonra püskürtme beton uygulanmalı	Kemede ve duvarlarda 1,0-1,5 m aralıklı 5,0-6,0 m uzunlukta hasır çelik ile birlikte.sistemli bulon, Tabanda bulon	Kemede 15-20 cm, yan duvarlarda 15cm, aynada 5cm.	0,75 m aralıklı orta ila ağır profiller, gerektiğinde süren, taban kapatılmalı

\* <25 MPa düşey gerilme koşullarında 10 metre çapında, del/patlat yöntemle ve açılan atnalı tünellerde

RMR destekleme sisteminde uygun görülen, tünel destek sınıfı III için, her 2,0 m’lik ayna ilerlemelerinde, 10,0 cm hasır çelikli püskürtme beton ve sistemli olarak, 1,5 m aralıklı, 4,0 metre uzunlukta kaya bulonları (delgi başlı bulonlar, IBO32N) uygulanacaktır.

## 7.2. RMQR Tünel Destekleme Sistemi

Her iki sondaj kuyusundan alınan karot örnekleri ve saha gözlemlerine göre “orta / IV” olarak belirlenen (bkz. Çizelge 6.2) kaya kütlesi puanı, RMQR sisteminde 60-41 aralığında yer almaktadır (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2. RMQR sistemine göre kaya kütle kalitesi sınıfları [4]

Kaya sınıfı	I	II	III	IV	V	VI
Kaya kütlesi tanımı	Sağlam veya kaya malzemesi	Çok iyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok zayıf
RMQR	$100 \geq \text{RMQR} > 95$	$95 \geq \text{RMQR} > 80$	$80 \geq \text{RMQR} > 60$	$60 \geq \text{RMQR} > 40$	$40 \geq \text{RMQR} > 20$	$20 \geq \text{RMQR}$

Aşağıdaki sunulmuş olan kaya kütlesi sınıflama (RMQR) sistemine göre tünellerde önerilen ilk destekleme tablosu gereğince T3 tüneli için Km: 1+332 (AT2SK-2) yakınlarında “Arpik Formasyonu” ve Km: 1+332 (AT2SK-3) yakınlarında “Kuytu Formasyonu” jeolojik birimlerin her ikisi de destek sınıfı IV olarak tanımlanmıştır. Buna göre, Aydan ve Ulusay [12] tarafından önerilen destek sistemleri aşağıda verilmiştir (Çizelge 7.3).

Çizelge 7.3. Tüneller için destek sistemi (D veya B; 10 m açıklık) [12, 13]

RMQR Aralığı	Kaya Bulonu		P.Betonu	Çelik İksa		Hasır Çelik	Beton Kaplama (mm)	Beton Taban	
	$L_b$ (m)	$e_b$ (m)	$t_s$ (mm)	Tipi	$e_r$ (m)			$t_i$ (mm)	Bulon L (m)
$100 \geq \text{RMQR} > 95$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$95 \geq \text{RMQR} > 80$	2-3	2,5	50	-	-	-	-	-	-
$80 \geq \text{RMQR} > 60$	3-4	2,0	100	Hafif	1,5	Evet	200	12	-
$60 \geq \text{RMQR} > 40$	4-5	1,5	150	Orta	1,2	Evet	300	300	-
$40 \geq \text{RMQR} > 20$	5-6	1,0	200	Ağır	1,0	Evet	500	500	5-6
$20 \geq \text{RMQR}$	6-7	0,5	250	Çok Ağır	0,8	Evet	800	800	6-7

\* Eğer,  $\text{RMQR} < 30$  MPa, sağlam kayada UCS 20 MPa'den küçük ve örtü kalınlığı 100 m'den fazlaysa, sıkışma sorunları ile karşılaşılabilir. Bu koşullar altında süren, aynaya bulon ve püskürtme beton gerekebilir.

RMQR destekleme sisteminde, çapı veya genişliği 10,0 m açıklığa kadar olan tünellerde uygun görülen tünel destek sınıfı IV için tünel kazısı sırasında sistemli olarak, 1,5 m aralıklı ve 4,5 m uzunlukta kaya bulonları (delgi başlı bulonlar, IBO32N), 15,0 cm kalınlığında hasır çelikli püskürtme betonu ve orta ağırlıkta çelik iksa uygun görülmektedir. Bu tünel için ayrıca 30 cm kaplama ve taban betonu da uygulanmalıdır (bkz. Çizelge 7.3). Bu destekleme sisteminde, çelik iksa tüm kesitte kullanılmış (kemer + kenar) ve I-140 olarak seçilmiştir. Ayrıca kazı ilerleme adımları ve iksa aralıkları 1,2 m kaplama beton kalınlığı ise 0,30 m donatılı olarak alınmıştır.



## 8. ANALİTİK ÇÖZÜMLEMELER

Akşar regülatörü ve Nazar HES projesi T3 tünelineki kaya davranışı bağlamında deformasyon–destek basıncı ilişkilerinin belirlenebilmesi için kapanma-sınırlanma yöntemini esas alan analitik çözümler kullanılması uygun görülmüştür. Diğer taraftan gerilme-deformasyon ve önerilen destek sistemlerinin denetlenmesi amacıyla sayısal model olarak ayrıntıları 9. Bölümde verilecek olan Phase<sup>2</sup> çözümleri de gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çözümlerde dikkate alınması gereken bazı sınırlamalar bulunmaktadır.

### 8.1. Sınırlamalar

Bu tez çalışmasında, incelenmesi planlanan T3 iletim tüneline sadece yeterli sondaj verileri ve karotları bulunan 1+332 ile 2+518 Km'ler arasındaki bölümü seçilmiş ve proje kapsamında yapılmış olan araştırma sondaj çalışmalarından uygun ortam ve koşullarda alınarak saklanan sınırlı sayıdaki karotlar değerlendirmeye alınabilmiştir.

Bölgede tüneline içerisinden geçeceği kaya kütlelerine etki edebilecek tektonik gerilmelerin yönlerinin tüneline kazısına etkisi ve bölgenin deprem riskine bağlı olarak belirlenen deprem ivmeleri, bu çalışmada statik koşullardaki stabilitenin incelenmesi amaçlandığı için Phase<sup>2</sup> sonlu elemanlar programında, modellerin analizlerinde deprem etkisi hesaba katılmamıştır.

T3 tüneline atnalı şekilde delme-patlatma yöntemi ile kazılması planlanmıştır. Ancak bu tezdeki analitik çözümlerde dairesel kesitli tüneller için geliştirilmiş hesaplama yöntemlerinden faydalanılmıştır. Tüneline dairesel olmaması durumunda zemin reaksiyon eğrisini oluşturmak için, Curran vd. [31] tarafından tüneline açıklığının kesit alanını kullanarak eşdeğer yarıçapın hesaplanması önerilmektedir. Alanı, A olan bir tüneline açıklığının, eşdeğer çapı (D) aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilmektedir.

$$D = \sqrt{4A/\pi} \quad (13)$$

Çalışmada, yarıçapı  $r = 2,75$  m olan atnalı kesitli tüneline eşdeğer yarıçapı, analitik çözümlerde kullanılmak üzere yukarıdaki eşitlikten yararlanılarak  $r = 2,93$  m olarak kullanılmıştır.

## 8.2. Kapanma – Sınırlama Yöntemi

Bu yöntem, kaya kütlelerinin kazı sırasında deformasyona bağlı olarak gelişen davranışının ve yerleştirilecek destek sistemleri ile etkileşimin analitik olarak belirlenmesinde kullanılmaktadır [32].

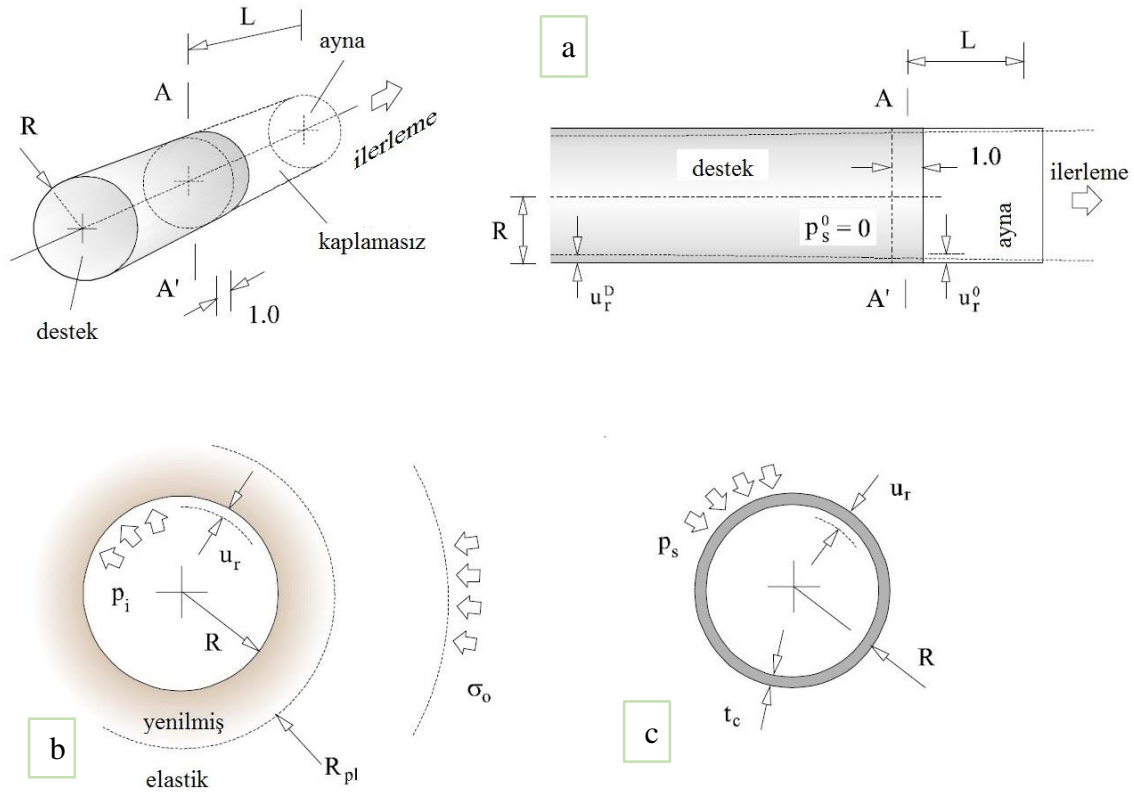
Kapanma-sınırlama yöntemi; izotropik yerinde gerilmeye tabi tutulduğunda ve açıklığın çevresi desteklendiğinde, izotropik malzeme içerisindeki dairesel silindirik açıklıkların elasto-plastik davranışının analitik çözümüne dayanır [32].

Kapanma-sınırlama yönteminin pratikte uygulaması, zemin ve desteğin her ikisinin birden deformasyon karakteristiklerinin bilinmesini gerektirir. Destek fabrikasyon malzemedan oluştuğu sürece (bulon, hasır çelik, beton, çelik iksa vb.), desteğin mekanik özellikleri sağlıklı olarak belirlenebilir. Bu durumda, kaya kütlelerinin kazı sırasındaki mekanik tepkisi de daha iyi görülebilir [32].

Eklemlerin varlığı, ortamdaki bozunma ve heterojenlik gibi etkiler ortam kayasının mekanik özelliklerini düşürür. Eklem ve destek problemlerini de kapsayan ölçekte süreksizlikler içeren kaya kütlelerinin mekanik özelliklerini tahmin etmek, kaya mekaniğinin önemli bir konusudur. İlgili özellikleri değerlendirmek için çeşitli görgül yöntemler önerilmiştir.

Eğer destek hemen tünel aynasının yakınına yerleştirilirse, destek maruz kalacağı nihai yükü taşıyamaz. Kazının çevresine dağılan yükün bir kısmı ayna tarafından taşınır. Yerleştirilen destek tünel aynasından uzaksa, ayna etkisi azalır ve destek tüm yükün büyük bir kısmını taşımak zorunda kalır. Eğer ayna destekten uygun bir uzaklıkta ise, destek tüm proje yükünü taşır.

Sorun, Şekil 8.1.a da gösterilmektedir. R yarıçaplı silindirik bir tünel kazısının, başlangıçta maruz kaldığı hidrostatik basınç altında, kaya kütlesi içerisinde ilerlediği kabul edilir. Destek A-A' kesitinde tünel aynasına L kadar uzaklıkta yerleştirilir (destek tünel eksenine yönünde birim uzunlukta olduğu varsayılmaktadır). Kapanma-sınırlama yöntemi, desteğin yerleştirildiği A-A' kesitinde (Şekil 8.1.a) desteğin yerleştirildiği anda kazının aynadan yeterince uzaklaşıp “ayna etkisi” ortadan kayboluncaya kadar, kaya kütlelerinden desteğe aktarılan yükün belirlenmesine izin verir.



Şekil 8.1. Kapanma –Sınırlama yöntemi analizleri (Carranza-Torres ve Fairhurst [32]'dan)

Zemin destek etkileşim analizi düzlemsel gerilme koşulları varsayılarak yapılır. (Deformasyonların tünel eksenine dik düzlemsel olduğu varsayılabilir). Şekil 8.1.b ve 8.1.c'de analizlerdeki değişkenlerle birlikte sırasıyla kazı ve destek sistemlerini görülmektedir. Kaya ve destek arasındaki yapısal etkileşim, Boyuna Deformasyon Profili (LPD) Zemin Tepki Eğrisi (GRC) ve Destek Karakteristiği Eğrisi (SCC) olmak üzere üç tipik eğrinin analiz edilmesiyle incelenebilir [33].

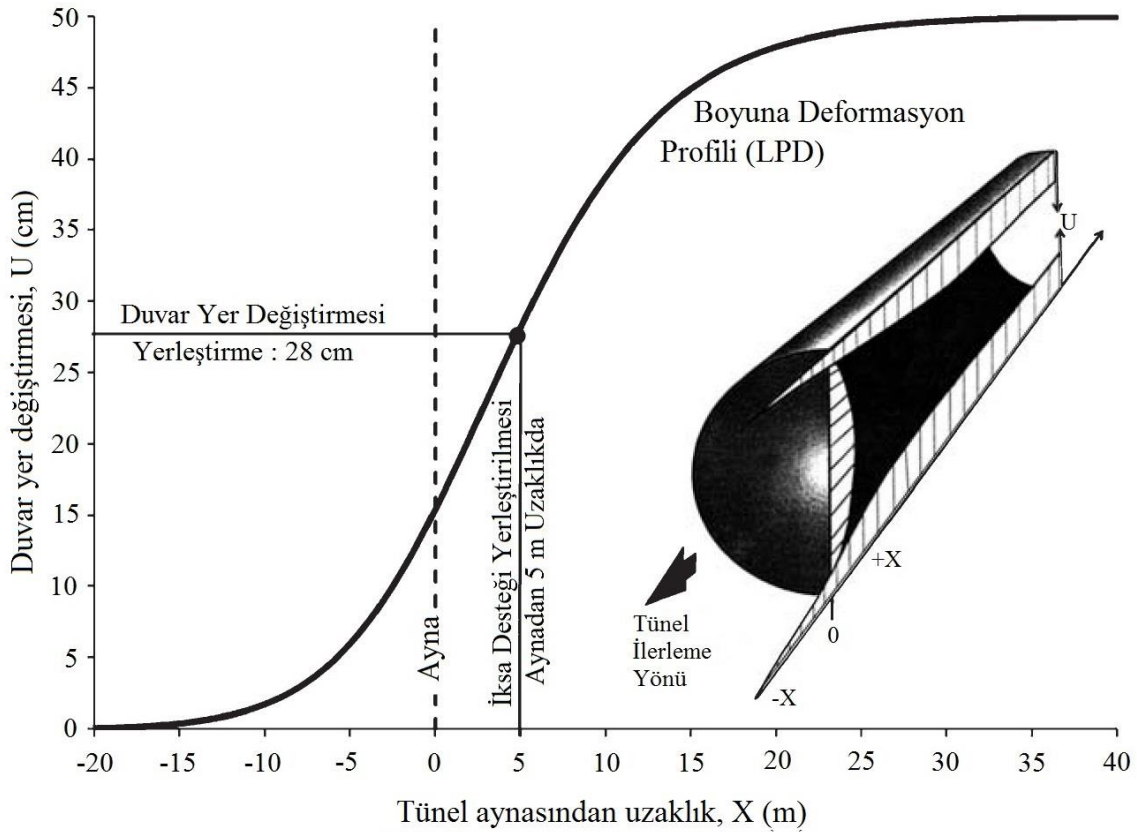
### 8.2.1. Boyuna Deformasyon Profili (LPD)

Desteği yerleştirmek için uygun zamanlamayı belirlemek veya tasarım amaçları için belirli yer değiştirme miktarıyla birlikte desteğin yerleştirilmesinin optimize edilmesi, boylamasına kapanma veya tünel için yer değiştirme profili oluşturulması için önemlidir. Tünel sınırındaki en yüksek radyal deformasyon bir bölümü belirli bir noktadan sonra ayna daha fazla ilerlemeden önce gerçekleşecektir. Tünel söz konusu noktanın ötesine ilerlerken, tünel sınırı içeri doğru ilerlemeye devam edecektir. Kapanma veya yer değiştirmenin, tünel aynasına uzaklığına karşı çizilen boykesiti, boyuna deformasyon profili olarak anılır (LDP).

Şekil 8.2 [34]' de bu kavram ile ilgili bir örnek verilmiştir. Bu örnekte, tünel yer değiştirmesinin, aynanın yaklaşık 15,0 m ilerisinde başladığını ve desteğin aynanın 5,0 metre gerisine yerleştirildiğinde 28,0 cm'e ulaştığı görülebilmektedir.

Boyuna deformasyon profili, kapanma-sınırlandırma yönteminin önemli bir bileşenidir. Tünel aynasının arkasındaki kaya kütesinin destekle ne kadar hızlı etkileşime girdiği hakkında fikir verir.

Kaya kütesini etkileyen uzak bölge gerilmelerinin homojen olduğu varsayıldığında tünel eksenine boyunca dairesel yer değiştirme profili (Eş.14-18)'de verilen eşitliklerden yararlanılarak hesaplanabilir.



Şekil 8.2. Boyuna deformasyon profili [34].

Aynadan X kadar uzaklaşıldığında dairesel yer değiştirme u olur. X mesafesi yeterince büyük olduğunda, dairesel yer değiştirme en büyük değerine ulaşır. X'in negatif değerleri için (aynanın ilerisinde) dairesel yer değiştirme azalır ve aynanın arkasındaki sonlu bir mesafede yer değiştirme sıfır olur [33].

Aynadaki ( $X^*=0$ ) en yüksek normalleştirilmiş plastik yarıçap  $R^* = R_p/R_T$  ( $R_p$ , plastik bölge yarıçapı ve  $R_T$ , tünel yarıçapı), ile normalleştirilmiş kapanma  $u_0^* = u_0/u_{max}$  arasındaki ilişki, Poisson oranı etkisini dikkate almadan en uygun bağıntı [34]:

$$u_0^* = \frac{u_0}{u_{max}} = e^{-0,15R^*} \quad (14)$$

$$R^* = \frac{R_p}{R_T} \quad (15)$$

Boyuna deformasyon profili için,  $X^* \leq 0$  ( $X^* = X/R_T$ ) ve  $X^* \geq 0$  azami normalleştirilmiş plastik bölgesi yarıçapının bir fonksiyonu olarak,

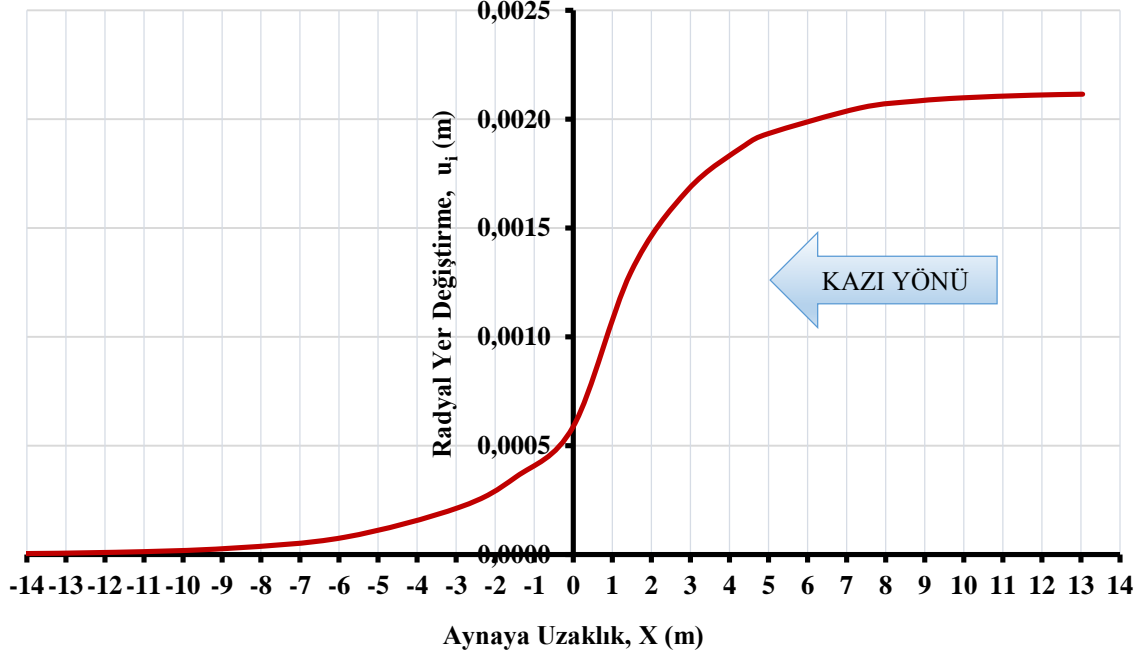
$$u_0^* = \frac{u_0}{u_{max}} \quad (16)$$

$$u^* = \frac{u}{u_{max}} = u_0^x \cdot e^{X^*} \quad X^* \leq 0 \text{ (kaya kütlesi içerisinde)} \quad (17)$$

$$u^* = 1 - (1 - u_0^x) \cdot e^{-\frac{3X^*}{2R^*}} \quad X^* \geq 0 \text{ (tünel içerisinde)} \quad (18)$$

Bu çalışmada, AT2SK-2 (km: 1+332) için hesaplanmış boyuna deformasyon profilinde (Şekil 8.3) aynadaki yer değiştirme yukarıda verilen ilişkiler (Eş. 14-18) kullanılarak, 0,0006 m gibi oldukça düşük bir yer değiştirme hesaplanmıştır. Bu kottaki kaya kütlesi, RMR tünel destekleme sistemine göre “sınıf III” olarak hesaplanmış ve buna göre tünel aynasının 10,0 m gerisinden, diğer bir ifadeyle tünel yer değiştirmesi 0,0021 m olduğunda destekleme yapılmıştır. RMQR sistemine göre ise, tünel destek sınıfı “sınıf IV” destek sistemi olarak belirlenmiş ve tünel aynasından 5,0 m uzaklıkta ve tünel yer değiştirmesinin 0,0019 m olduğu yerde destek yerleştirilmiştir.

Tünelin 1+332. Km’inde destek yerleştirilmediği takdirde beklenen en fazla yer değiştirme 0,0021 m gibi düşük bir değerdir. Ayna ile nihai yer değiştirmenin olduğu uzaklık yaklaşık olarak 13,0 m’dir.



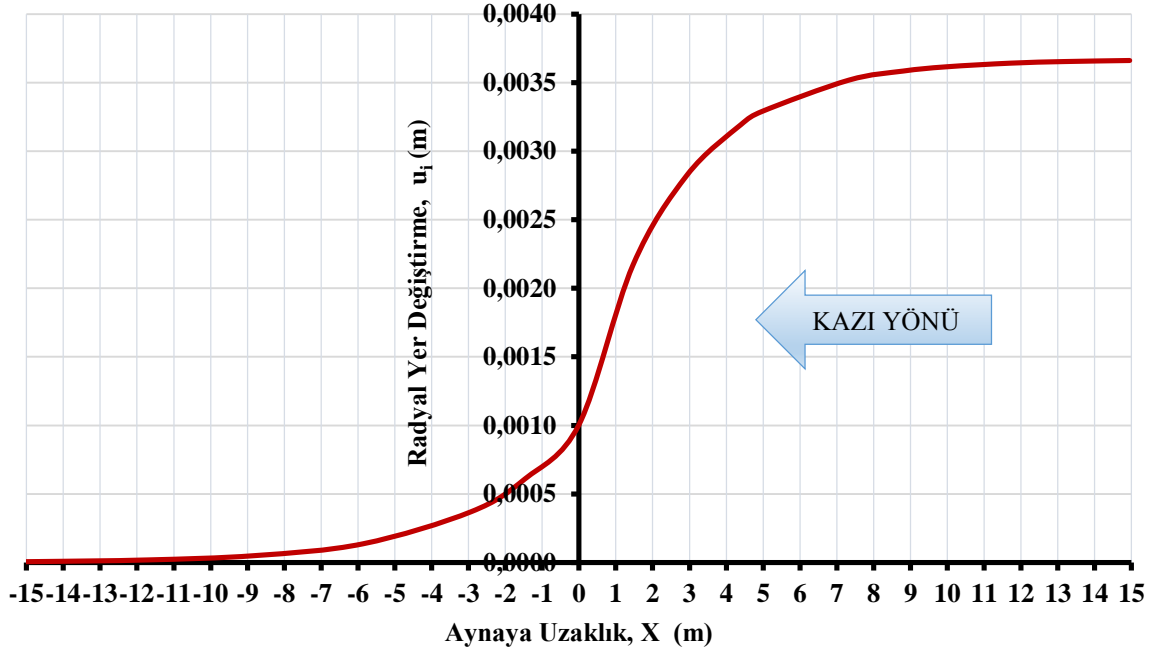
Şekil 8.3. AT2SK-2 sondajı tünel duvarı boyuna deformasyon profili

AT2SK-3 (Km: 2+518) için hesaplanmış boyuna deformasyon profilinde (Şekil 8.4) aynadaki yer değiştirme eşitlik 14-18'de verilen ilişkiler kullanılarak, 0,001 m gibi düşük bir değer hesaplanmıştır. Bu kottaki kaya kütlesi, RMR tünel destekleme sistemine göre “sınıf III” olarak hesaplanmış ve buna göre tünel aynasının 10,0 m gerisinden, diğer bir ifadeyle tünel yer değiştirmesinin 0,0036 m olduğunda destekleme yapılmıştır.

RMQR sistemine göre ise, tünel destek sınıfı “sınıf IV” olarak hesaplanmış ve tünel aynasından 5,0 m uzaklıkta, tünel yer değiştirmesi 0,0033 m olduğunda destek yerleştirilmiştir.

Tünelin 2+518 Km'sinde destek yerleştirilmediği takdirde beklenen en fazla yer değiştirme 0,0037 m'dir. Ayna ile nihai yer değiştirme olduğu uzaklık 15,0 m'dir.

Bu sonuçlara göre, T3 tüneli kazısının, 1+332 ve 2+518 Km'lerine karşılık gelen kaya kütlelerinde 2,93 m eşdeğer yarıçaplı tünelin duvarında düşük yer değiştirme beklenmektedir. RMR ve RMQR sistemlerine göre kaya destek sınıfları, aynadan itibaren oluşan yer değiştirmelerin kısa bir aralıkta ve düşük olması nedeniyle desteğin aynaya yakın seçilmesi önerilebilir.



Şekil 8.4. AT2SK-3 sondajı tünel duvarı boyunca deformasyon profili

### 8.2.2. Zemin Reaksiyon Eğrisi (GRC)

Şekil 10.5'te gösterilen zemin reaksiyon eğrisi (GRC), üniform uzak bölge gerilmesi ve üniform destek basıncı  $p_i$  altındaki R yarıçaplı dairesel açıklıkların çözümüyle elde edilir (bkz. Şekil 8.1.b).

Carranza-Torres ve Fairhurst [33]'e göre, kaya kütlelerinin Hoek-Brown [30] yenilme ölçütü kriterlerine uyduğunu kabul ettiğimizde, üniform destek basıncı  $p_i$  ve uzak bölge gerilmesi  $\sigma_0$  sırasıyla destek basıncı  $P_i$  ve uzak alan gerilmesi  $S_0$  ölçeklendirilebilir.

Kaya malzemesi ve kaya kütlesi parametreleri, tek eksenli sıkışma dayanımı  $\sigma_{ci}$ , sağlam kaya parametresi  $m_i$  ve kaya kütlesi sabitleri  $m_b$  (9),  $s$  (10) ve  $a$  ise 0,5 olarak (11) no.lu eşitliklerden alınmıştır.

Buna göre;

$$P_i = \frac{p_i}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad (19)$$

$$S_0 = \frac{\sigma_0}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad (20)$$

Kritik destek basıncının  $P_{cr}$ , Şekil 8.5’de zemin reaksiyon eğrisi üzerinde gösterildiği nokta kaya kütesinin elastik davranıştan plastik davranışa geçtiği nokta, diğer bir ifadeyle destek basıncı  $p_i \geq p_{cr}$  için kaya elastik kalır, ve  $p_i < p_{cr}$  için tünelin çevresindeki plastik bölgenin yarıçapı artar (bkz. Şekil 8.1.b).

Elastik sınır için ölçekli kritik (iç) basınç  $P_{cr}$  aşağıdaki ifadeden elde edilir:

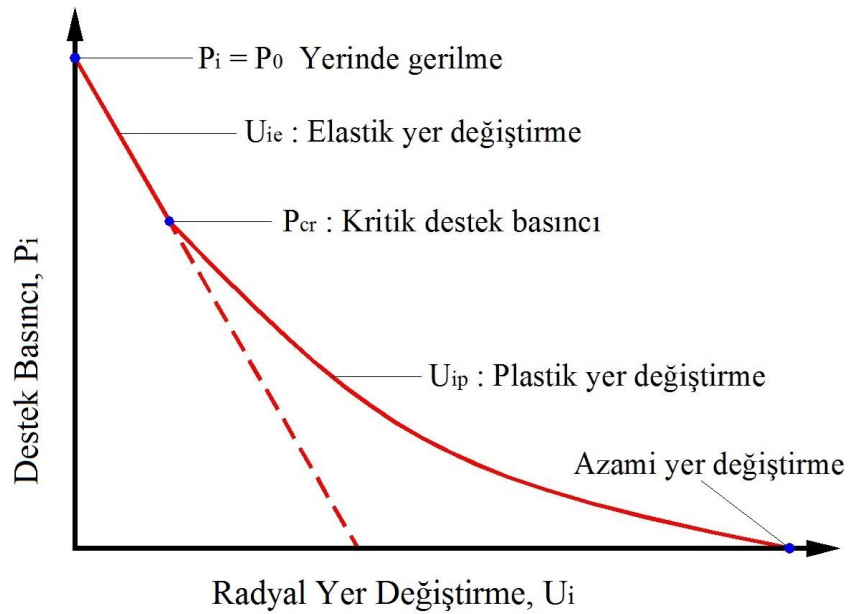
$$P_i^{cr} = \frac{1}{16} \left[ 1 - \sqrt{1 + 16S_0} \right]^2 \quad (21)$$

Gerçek kritik basınç,

$$P_i^{cr} = \left[ P_i^{cr} - \frac{s}{m_b^2} \right] m_b \sigma_{ci} \quad (22)$$

$p_i \geq p_{cr}$  durumunda GRC ‘nin elastik kısmını sağlayan (Şekil 8.5), dairesel yer değiştirme  $u_r^{el}$  ve destek basıncı arasındaki ilişkiyi veren eşitlik aşağıda sunulmuştur.

$$U_r^{el} = \frac{\sigma_0 - P_i}{2G_{rm}} R \quad (23)$$



Şekil 8.5. Zemin reaksiyon eğrisi [7].

Ayrıca düşey ( $\sigma_v$ ), yatay ( $\sigma_h$ ) [35, 36] ve uzak alan gerilmeleri ( $\sigma_0$ ) [33] aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_v = \sigma_z = \gamma.H \quad (24)$$



$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_z} \quad (25)$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \quad (26)$$

Yerinde ölçülmüş bir değer olmadığından kaya kütesine ait deformasyon modülünün yatay ve düşey yönlerde aynı olduğu kabul edilmiş ve Sheorey [37] tarafından önerilen yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranını (k) tahmin etmek için basitleştirilmiş bir eşitlik (27) kullanılmıştır.

$$k = 0,25 + 7E_h \left( 0,001 + \frac{1}{z} \right) \quad (27)$$

Burada z (m) yüzey itibaren derinlik ve  $E_h$  (GPa) yer kabuğunun yatay yönde ölçülen ortalama deformasyon modülüdür.

Kaya kütesine ait makaslama modülü  $G_{rm}$  ve aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır [38, 39].

$$G_{rm} = \frac{E_{rm}}{2(1+\nu)} \quad (28)$$

Destek basıncının  $p_i < p_{cr}$  olduğu durumda, tünel çevresinde gelişen plastik bölgenin  $R_{pl}$  genişliği, aşağıdaki bağıntıdan bulunur.

$$R_{pl} = R \exp \left[ 2 \left( \sqrt{P_i^{cr}} - \sqrt{P_i} \right) \right] \quad (29)$$

Zemin reaksiyon eğrisinin (Şekil 10.5) plastik kısmını tanımlamak için malzemenin akım kuralı gereklidir. Akım kuralı, biçim değişimi oluşturan birim deformasyon ve malzemenin içindeki plastik deformasyon meydana gelmesi ile oluşan hacim değişikliği arasındaki ilişkiyi belirler [40]. Yeraltı kazı uygulamalarında, ‘dilatasyon’ açısının hacimsel değişim büyüklüğü, dilatasyon açısı  $\psi$  ile birlikte, akış kuralının genelde doğrusal olduğu varsayılır. Eğer,  $\psi = 0^0$  ise malzeme plastik deformasyona bağlı hacimsel değişikliğe uğramaz. Eğer,  $\psi > 0^0$  ise, plastik deformasyona bağlı olarak malzemenin hacmi artar. Aşağıda belirtilen

bağıntıda “dilatasyon katsayısı”  $K_\psi$  ile karakterize edilen akım kuralı dilatasyon açısından hesaplanmıştır [33].

$$\psi = 0^\circ \Rightarrow K_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \Rightarrow K_\psi = 1 \quad (30)$$

Dilatasyon katsayısı ile karakterize edilen akım kuralı, zemin reaksiyon eğrisi (GRC) ‘nin plastik kısmı gösterilmiştir (bkz.Şekil 8.5).

Ayrıca,  $p_i < p_{cr}$  durumunda GRC ‘nin plastik kısmını sağlayan dairesel yer değiştirme  $u_r^{pl}$  ve destek basıncı arasındaki ilişkiyi veren eşitlik aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \frac{U_r^{pl}}{R} \frac{2G_{rm}}{\sigma_0 - P_i^{cr}} &= \frac{K_\psi - 1}{K_\psi + 1} + \frac{2}{K_\psi + 1} \left( \frac{R_{pl}}{R} \right)^{K_\psi + 1} \\ &+ \frac{1 - 2\nu}{4(S_0 - P_i^{cr})} \left[ \ln \left( \frac{R_{pl}}{R} \right) \right]^2 \\ &- \left[ \frac{1 - 2\nu}{K_\psi + 1} \frac{\sqrt{P_i^{cr}}}{S_0 - P_i^{cr}} + \frac{1 - \nu}{2} \frac{K_\psi - 1}{(K_\psi + 1)^2} \frac{1}{S_0 - P_i^{cr}} \right] \\ &\times \left[ (K_\psi + 1) \ln \left( \frac{R_{pl}}{R} \right) - \left( \frac{R_{pl}}{R} \right)^{K_\psi + 1} + 1 \right] \end{aligned} \quad (31)$$

$\nu$ , kaya kütesinin Poisson oranıdır.

### 8.2.3. Destek Karakteristiği Eğrisi (SCC)

Tünelin ilerleme yönündeki birim uzunluğunun desteklenen kısmı için Şekil 8.6’da gösterilen destek karakteristiği eğrisi, uygulanan gerilme  $P_s$  ve ortaya çıkan kapanma  $U_i$  arasındaki elastik ilişkiyle oluşturulabilir.

Uygulanacak desteğin elastik sıklığı  $K_s$  ile ifade edilirse, destek karakteristiği eğrisinin elastik kısmı aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$P_{sm} = K_s u_i \quad (32)$$

$K_s$  ‘in birimi, basınç/uzunluk olup, basınç MPa ile yer değiştirme ise metre cinsinden ifade edilmektedir. Destek karakteristiği eğrisinin plastik kısmı, desteğin yenilmeden önceki en yüksek basıncın  $P_{sm}$  belirlendiği nokta olarak kabul edilen noktadan yatay olarak başlar [33].

Tünel civarında oluşacak plastik bölgenin genişliği ve tünel çevresindeki deformasyonun miktarı, destek basıncı ( $P_i$ ) ile kontrol edilebilir. Bu destek, sistemli destekleme yani kaya bulunu, çelik iksa ve püskürtme beton veya kaplama beton ile sağlanabilir [41].

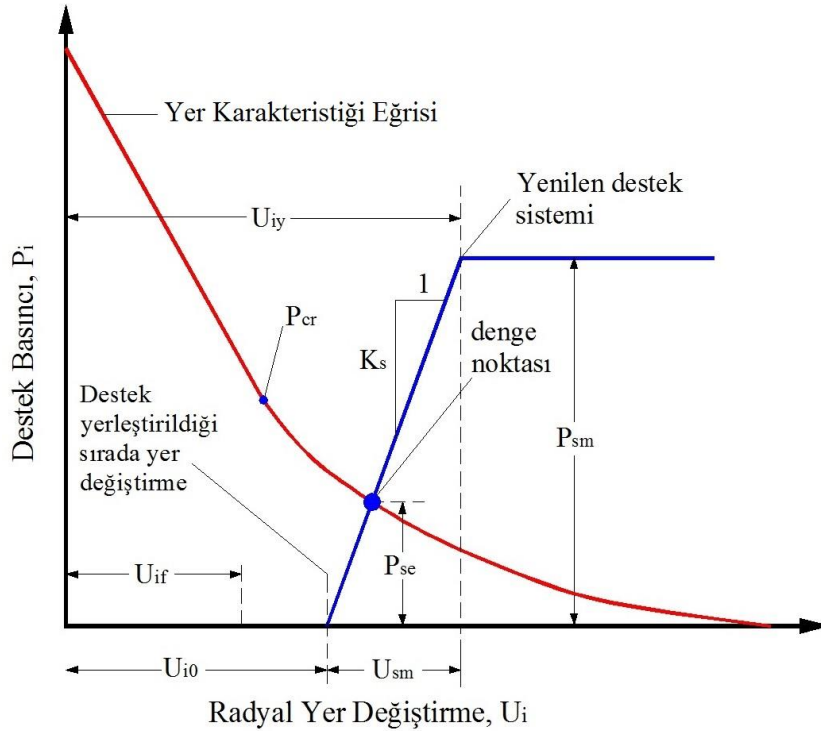
Aynanın gerisinde belirli bir uzaklığa desteğin yerleştirileceği düşünülürse, bu noktadaki yer değiştirme  $u_{i0}$ , Şekil 8.6'den görülebilir. Devam eden deformasyona, yerleştirilen desteğin reaksiyonu, o destek sisteminin sıklığına ( $K_s$ ) bağlıdır ve desteğin yenildiği yer değiştirme  $u_{iy}$ , Şekil 8.6'de gösterilmiştir [42].

$$u_{iy} = u_{i0} + \frac{P_{sm}}{K_s} \quad (33)$$

Eğer destek yeterli kapasiteye sahipse, destek etkileşim eğrisi zemin reaksiyon eğrisi ile tünel deformasyonun desteğe eşit olduğu denge noktasında kesişecektir. Desteğin güvenlik faktörü ( $F_s$ ), destek kapasitesinin talep noktası (denge noktası) oranı gibi tanımlanmıştır veya [42].

$$F_s = \frac{P_{sm}}{P_{se}} \quad (34)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 8.6. Destek sisteminin dengesi sağlamak için tünel duvarındaki yer değiştirmeye gösterdiği tepki [7, 42].

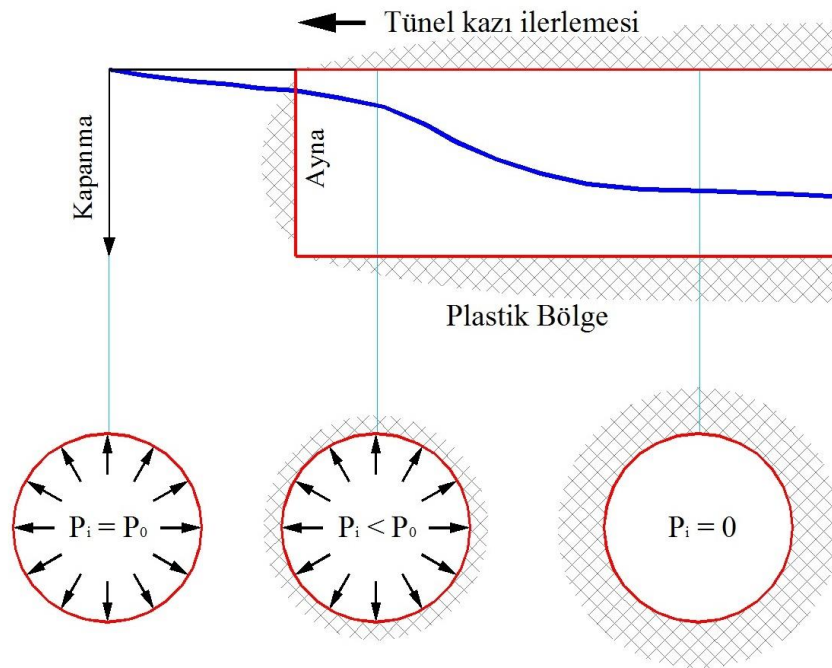
Kaya desteği etkileşimi, desteklenmeden ilerleyen tünel aynasının çevresinde oluşan deformasyonu ortaya koymaktadır.

Şekil 8.7’de görüldüğü gibi,  $P_i = P_0$  olması durumunda tünel duvarında yer değiştirme 0 olmakta,  $P_0 > P_i > P_{cr}$  durumunda elastik yer değiştirme,  $P_i < P_{cr}$  halinde ise plastik yer değiştirme meydana gelmektedir. En fazla yer değiştirme, destek basıncının 0 olması durumunda gerçekleşmektedir.

Desteklenmeyen bir tünel için, tünel aynasının “görünür bir destek basıncı” sağladığına dikkat edilmelidir. Duraylılığı sağlayan görünür destek basıncı, gerçek destek yerleştirilene değin yeterli bir ayakta kalma süresi sağlar [43].

Buna göre, görünür destek basıncı;

- i) Kaya kütlesi içerisinde aynadan belirli bir uzaklıkta yerindeki gerilmeye eşittir ( $P_i = P_0$ ).
- ii) Tünel aynasında yerinde gerilmenin yaklaşık olarak 1/4’üne eşittir.
- iii) Aynanın arkasında belirli bir mesafede giderek 0’a yaklaşır ( $P_i = 0$ ).



Şekil 8.7. İlerleyen tünel aynasına bağlı farklı konumlardaki deformasyon destek basıncı  $P_i$  (ölçeksiz) [43].

Bir tünel çevreleyen kaya kütlelerinin yenilmesi, mutlaka tünel çökeceği anlamına gelmez. Yenilen malzeme hala önemli bir dayanıma sahiptir ve plastik bölgenin kalınlığının tünel yarıçapı ile karşılaştırıldığında çok küçük olması koşuluyla, yenilmenin tek kanıtı birkaç taze çatlak ve çok az miktarda sökülme ve kavlaklanma olabilir [43].

Eğer büyük bir plastik bölge oluşur, tünel duvarlarında içe doğru büyük yer değiştirme meydana gelirse, yenilen kaya kütlelerinin gevşemesinin yol açacağı ciddi sökülme, kavlaklanma ve sonucunda desteklenmemiş tünelde çökmeye neden olabilir.

Desteğin birincil işlevi, tünel duvarlarında radyal yer değiştirmeleri kontrol etmek ve tünelin çökmesine yol açabilecek gevşemeleri önlemektir. Desteğin yerleştirilmesi (kaya bulonu, püskürtme beton kaplama veya çelik iksa) tüneli çevreleyen kayanın önemli bir aşırı gerilme etkisinde kalarak yenilmesine engel olmaz, ancak bu destek tünel deformasyonunu kontrol edilmesinde önemli bir rol oynar [43].

Aşağıda, Akşar regülatörü ve Nazar Hes projesi kapsamında açılacak olan T3 tüneline uygulanacak olan kaya destek sistemi elemanlarına ait (püskürtme beton, iksa, kaya bulonu ve kaplama beton) destek basınçları, elastik sıkılıkları ve birleşik destek basınçları ayrı ayrı hesaplanmıştır.

#### **a. Püskürtme Beton:**

Püskürtme beton, tünel destek elemanları içerisinde en yüksek destek basıncını sağlar ve kullanım kolaylığı bakımından etkili bir yöntemdir. Püskürtme beton yüksek kapasiteli ve esnek kullanımı nedeniyle yıllardır yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [44].

Bu destek tipinde, kayacın yüzeyine beton püskürtülerek destekleme sağlanır. Püskürtme beton kaya desteklemesinde aşağıda belirtilen çeşitli şekillerde kullanılabilir:

- a) Püskürtme beton 60-100 mm kalınlığa kadar tabakalar halinde uygulanır
- b) Hasır destekli püskürtme beton: Bu yöntemde tipik 5-6 mm çaplı çelik hasır yerleştirilmeden önce bir kat püskürtme betonu uygulanır. Daha sonra ikinci kat bazen da daha fazla kat püskürtme uygulanarak çelik hasır tamamen kapatılır.
- c) Hasır çelik, kafes kirişler veya çelik iksa ile birlikte kullanılır.

Tüm bu yöntemler; genellikle gevşek bloklu kaya kütlelerini tutturmak için, hasır çelik, çelik iksa ve kaya bulonu birleşimleri ile birlikte kullanılır [44].

Bu çalışmada; püskürtme beton RMR ve RMQR destekleme sistemlerinde, kaplama beton ise sadece RMQR destek sistemi analizlerinde kullanılmıştır (bkz. Çizelge 7.1 ve 7.3).

Bu analizlerde,

$\sigma_{cc}$  : Püskürtme betonun tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)

$E_c$  : Püskürtme betonun Young modülü (MPa)

$\nu_c$  : Püskürtme betonun Poisson oranı

$t_c$  : Kaplama kalınlığı (m)

$r_i$  : Eşdeğer tünel yarıçapı (m)

Azami destek basıncı [33];

$$P_{sc\max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[ 1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \quad (35)$$

Püskürtme betonun sıklığı [33];

$$K_{sc} = \frac{E_c}{(1 - \nu_c)r_i} \frac{r_i^2 - (r_i - t_c)^2}{(1 - 2\nu_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2} \quad (36)$$

Elde edilen sonuçlar Çizelge 8.1’de verilmiştir

Çizelge 8.1. Kaplama ve püskürtme beton analiz değerleri

Kaplama veya Püskürtme Beton		Püskürtme B. (RMR)	Püskürtme B. (RMQR)	Kaplama B. (RMQR)
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	$\sigma_{cc}$	20		25
Young modülü (MPa)	$E_c$	28.000		30.000
Poisson oranı	$\nu_c$	0,2		0,2
Kaplama kalınlığı (m)	$t_c$	0,1	0,15	0,3
Eşdeğer tünel yarıçapı (m)	$r_i$	2,93		
Hesaplamalar		Püskürtme B. (RMR)	Püskürtme B. (RMQR)	Kaplama B. (RMQR)
Azami destek basıncı (MPa)	$P_{sc\max}$	0,67	0,1	2,43
Elastik sıklık (MPa/m)	$K_{sc}$	522,8	794,4	1769,0
Azami yer değiştirme (m)	$U_{r\max}$	0,0013	0,0013	0,0014
Betonun en yüksek yenilme yer değiştirmesi (m), AT2SK-2 / AT2SK-3	$U_{iy}$	0,0034 0,0049	0,0032 0,0045	0,0033 0,0047
Birim deformasyon (%)		0,044	0,043	0,047

Genelde püskürtme betonla birlikte uygulanan “Hasır Çelik”, püskürtme betonun yapısal donatısı olarak uygulanır. Püskürtme beton ile kaya yüzeyi arasındaki adhezyon, püskürtme betonun prizini alıp sertleşene kadar stabilizasyon ve dayanımını sağlar, azami dayanımını artırır, aşırı gerilme ile gelişen çatlakları azaltır ve sınırlar, ancak yerleştirilmesi sırasında bir zaman kaybı söz konusudur [45].

Püskürme beton 5,0 cm'den az kalınlıkta yerel olarak uygulanacaksa, hasır çelik ihmal edilebilir [45].

Hasır çelik yaygın olarak püskürtme beton bulon ve çelik iksa kombinasyonu ile birlikte kullanıldığında kaya kütlelerinden gelen yükü bu taşıyıcı elamanlara dağıtır [46] ve tünelin uzun dönemde duraylılığını koruması açısından oldukça önemlidir.

Akşar Regülatörü ve Nazar Hes iletim tünellerinde, Q188/188 tipinde (grid açıklığı 15,0 cm, çelik çubuk çapı 6,0 mm ve ağırlığı 3,06 kg/m<sup>2</sup>) çelik hasır tasarlanmıştır. Ancak tünel destek sınıfının hesaplanmasında hasır çelik püskürtme betonun içerisinde donatı olarak öngörülmüştür. Bu nedenle hesaplamalara dahil edilmemiştir.

## **b. Kaya Bulonu**

Kaya bulonu, çağdaş tünelcilikte ana destek elemanlarından biridir. Kaya bulonları, tünel kazısı sırasında yer yer oluşan gevşek kaya bloklarını noktasal-bulonlama ile sabitlemek amacıyla kullanılmakta ve güvenliği sağladıktan sonra sistemli bir şekilde uygulanmaktadırlar.

Tamamen enjeksiyonlanmış bir bulon, yerleştirme sürecinde pasiftir ve enjeksiyonun adhezyonu tam olarak sağlamasından sonra kaya kütlelerinin deformasyonuna bağlı olarak aktif hale gelir.

Akşar-Nazar Hes projesi kapsamında tünel destek elemanı olarak uygulanan kaya bulonları, IBO R32N (injection bore bolt) enjeksiyonlu delgi başlı bulon tipinde seçilmiştir. Bu tip kaya bulonlarının içi boş ve delgi başlığı mevcuttur. Bulon ile delgi yapıldıktan sonra, enjeksiyon uygulanır. IBO genelde zayıf döküntülü ve/veya şişen kaya kütlelerinde bulon deliklerinin kapanma olasılığına karşı uygun bir destekleme sistemidir.

Bulon uygulamalarında kullanılan parametreler aşağıdaki gibidir:

- $d_b$  : Kaya bulonunun çapı (m)  
 $l$  : Kaya bulonunun serbest bölümünün uzunluğu (m)  
 $E_b$  : Kaya bulonunun Young modülü (MPa)  
 $s_c$  : Kaya bulonunun tünel çevresel aralığı (m)  
 $s_l$  : Kaya bulonunun tünel boyuna aralığı (m)  
 $T_{bf}$  : Kaya bulonuna ait nihai çekme direnci (MN)  
 $Q$  : Deformasyon yük sabiti (m/MN)

Delgi başlı kaya bulonu, IBO32N [47] bu çalışmada RMR ve RMQR destekleme sistemlerinin analizlerinde kullanılmıştır (Çizelge 8.2).

Çizelge 8.2. Kaya bulonu analiz değerleri [47]

IBO R32N tipi kaya bulonu verileri		RMR	RMQR
Uzunluk (m)	$L_{rb}$	4	4,5
Dış çap (m)	$d_{rb}$	0,032 / 0,0185	
Elastisite modülü (GPa)	$E_{rb}$	210.000	
Çekme deneyinden, nihai yenilme yükü kapasitesi (MN)	$T_{bf}$	0,254	
Çevresel aralık (m)	$s_{rc}$	2	1,5
Boyuna aralık (m)	$s_{rl}$	2	1,2
Deformasyon yükü sabiti (m/MN)	$Q$	0,02	
Hesaplamalar		RMR	RMQR
Azami destek basıncı (MPa)	$P_{sbmax}$	0,064	0,141
Elastik sıkılık (MPa/m)	$K_{sb}$	5,72	11,91
En yüksek yer değiştirme (m)	$U_{rmax}$	0,011	0,012
Bulonun en yüksek yenilme yer değiştirmesi (m), AT2SK-2 / AT2SK-3	$U_{iy}$	0,0132/0,0147	0,0138/0,0151
Birim deformasyon (%)		0,379	0,404

Sistemli kaya bulonu tarafından oluşturulan en yüksek destek basıncı [20, 33];

$$P_{sbmax} = \frac{T_{bf}}{s_c s_l} \quad (37)$$

Elastik sıkılık [33];

$$\frac{1}{K_{sb}} = s_c s_l \left[ \frac{4l}{\pi d_b^2 E_b} + Q \right] \quad (38)$$



Q, bulonun yük-deformasyon özelliği ile ilgili bir sabittir [20]. Şeyl içerisine uygulanmış, 1,83 m uzunlukta, 24,5 mm çapında enjeksiyonlu bulon değeri olan 0,02 alınmıştır.

Kaya bulonları kullanılırken, tüneli çevreleyen plastik bölgenin kalınlığı kontrol edilmeli ve bulonları örselenmemiş kaya'ya sabitlenmesini sağlamak için plastik bölgenin 1,5-2,0 m ötesinde uzatılmalıdır [48]. Ayrıca,  $s_c$  ve  $s_l$  aralığı genelde bulon boyunun yarısından az olmalıdır [42].

### c. Çelik İksa

Çelik iksalar, yeraltı kazılarında pasif destek olarak kullanılmaktadır. Pasif terimi, iksanın kaya bulonunda olduğu gibi, kaya ile hemen etkileşime girmemesiyle ilgilidir. Bu elemanlar, donatıların betonun parçası halinde gelmesine benzer şekilde, kaya kütlelerinin bir parçası haline gelir. Çelik iksa gibi pasif destekler, sadece kayanın içeri doğru hareketi sırasında oluşturduğu yüke karşılık verir. İlerleyen ayna kazısının biraz gerisine yerleştirildiğinde, kayanın kısa dönem hareketinin çoğu, iksanın yerleştirilene kadar tamamlanmış olur ve sadece tünel çevresinde ölü yük olarak adlandırılan yenilmiş kaya yükünü taşır [49].

Bu tez kapsamında yapılan analizlerde, sadece RMQR destek sistemi için I-140 profil kullanılmıştır. Profilin özellikleri Çizelge 8.3'de verilmiştir.

$\sigma_{ys}$  : Çelik iksanın yenilme dayanımı (MPa)

$E_s$  : Çelik iksanın Young modülü (MPa)

$A_s$  : İksanın kesit alanı ( $m^2$ )

$s_l$  : Tünel boyuna çelik iksa aralığı (m)

$r_i$  : Eşdeğer tünel yarıçapı (m)

Çelik iksanın azami destek basıncı [42];

$$P_{ss\max} = \frac{A_s \sigma_{ys}}{s_l r_i} \quad (39)$$

Çelik iksanın sıklığı [42];

$$K_{ss} = \frac{E_s A_s}{s_l r_i^2} \quad (40)$$

Çizelge 8.3. Çelik iksa analiz değerleri [50]

I 140 Çelik İksa		RMQR
Yenilme dayanımı (MPa)	$\sigma_{ys}$	365
Young modülü (MPa)	$E_s$	200.000
Kesit alanı (m <sup>2</sup> )	$A_s$	0,00182
Tünel boyuna aralık (m)	$s_l$	1,2
Eşdeğer tünel yarıçapı (m)	$r_i$	2,93
Hesaplamalar		RMQR
Azami destek basıncı (MPa)	$P_{ssmax}$	0,189
Elastik sıkılık (MPa/m)	$K_{ss}$	35,3
En yüksek yer değiştirme (m)	$U_{rmax}$	0,005
İksanın en yüksek yenilme yer değiştirmesi (m), AT2SK-2 / AT2SK-3	$U_{iy}$	0,0073/0,0086
Birim deformasyon (%)	%	0,183

#### d. Birleşik Destek Uygulaması

Yukarıda ayrı ayrı tanımlanan destek sistemlerinin birden fazlası aynı alana yerleştirilirse, herbirinin destek sıklıkları ayrı ayrı eklenerek toplam etkileri belirlenebilir [33]. İki desteğin olduğu durumda en yüksek destek basınçları  $P_{s1max}$  ve  $P_{s2max}$  ve elastik sıklıkları  $K_{s1}$  ve  $K_{s2}$  olan destekler tünelin bir kısmına yerleştirilir. Birlikte hareket eden iki sistemin sıklığı,  $K_s = K_{s1} + K_{s2}$  şeklinde hesaplanır. Bu değer, her iki destekten biri mümkün olan azami elastik deformasyona ulaşmaya kadar geçerli kalacağı varsayılmıştır.  $U_{imax}$  şu şekilde hesaplanır:  $U_{i1max} = P_{s1max} / K_{s1}$  ve  $U_{i2max} = P_{s2max} / K_{s2}$ . Birleşik destek sistemi bu noktada başarısız kabul edilir. Her iki destek birlikte hareket ettiğinde, en düşük destek basıncına ( $U_{imax}$ ) sahip olan destek birleşik destek basıncı belirler. Yerleştirilmiş tünel desteğinin devam eden deformasyona etkisi destek sisteminin sıklığına bağlıdır ( $K_s$ ).

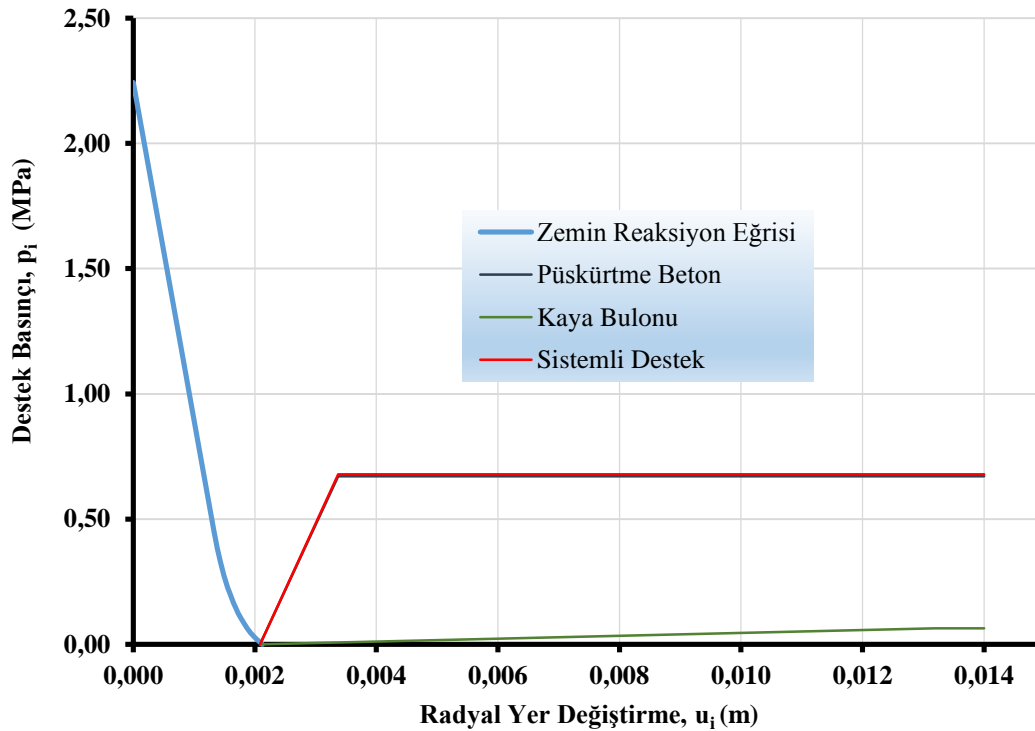
Birleşik destek sistemleri için yenilme; daha sıkı olan püskürtme beton, beton veya iksa destek sistemleri tarafından kontrol edilir. İki desteğin birlikte kullanılması dikkate alındığında, destek kapasitesi  $P_{smax}$  ve sıklığında  $K_s$  az bir iyileşme meydana gelir [33].

AT2SK-2 ve AT2-SK-3 no.lu sondajlar için ayrı ayrı çizilmiş olan grafikler, aynadan uzaklıkları destek sınıflarına göre belirlenmiş ve yerleştirilmiş olan sistemli destekler RMR için tünel aynasından 10,0 m ve RMQR için 5,0 m geride tamamlanmıştır. Birleşik destek sistemi analizleri Çizelge 8.4'te sunulmuştur.

Çizelge 8.4. Birleşik destek sistemi analiz değerleri

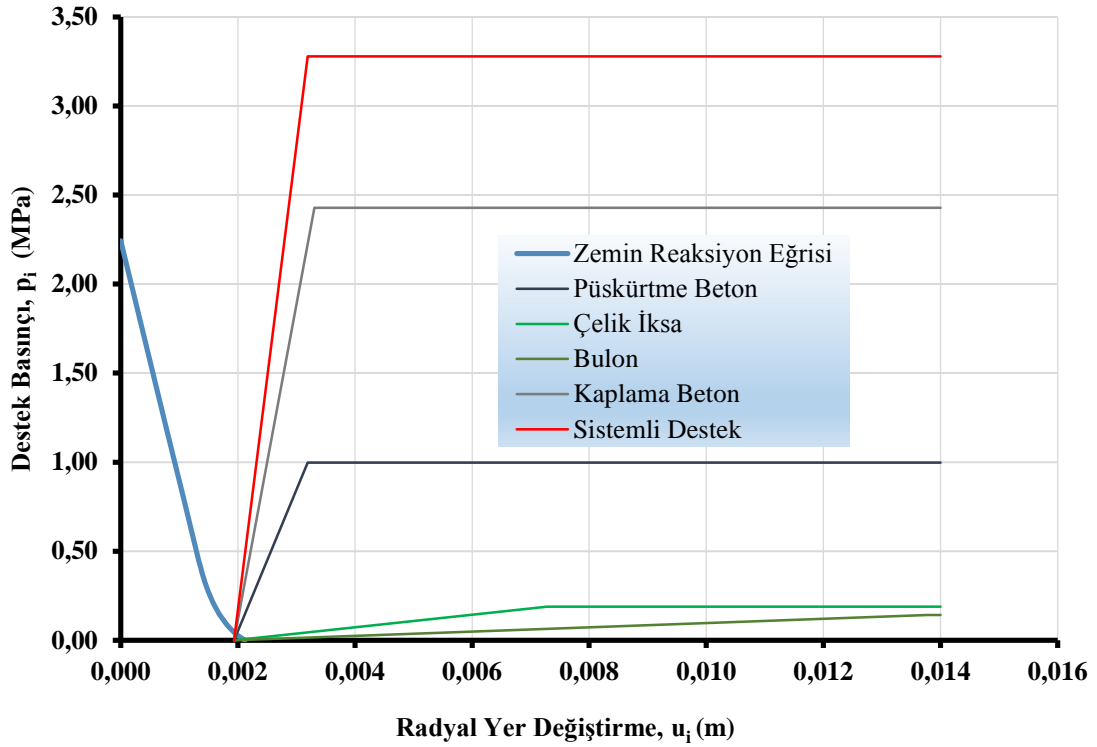
Birleşik Destek Sistemi			
Hesaplamalar		RMR	RMQR
Azami destek basıncı (MPa)	$P_{max}$	0,678	3,279
Elastik sıkılık (MPa/m)	$K_s$	528,6	2610,6
En yüksek yer değiştirme (m)	$U_{max}$	0,0013	0,0013
İksanın en yüksek yenilme yer değiştirmesi (m), AT2SK-2 / AT2SK-3	$U_{iy}$	0,0034/0,0049	0,0032/0,0045
Birim deformasyon (%)	%	0,044	0,075

Buna göre; Km: 1+332 (AT2SK-2)'de kaya kütesinin zemin reaksiyon eğrisi ile RMR kaya destekleme sistemi “destek III” uygulandığında birleşik destek sınıfına göre desteğin oluşturduğu azami birleştirilmiş iksa basıncının 0,68 MPa (bkz. Çizelge 8.4) olarak hesaplanmıştır. Bu iksa basıncı ile destekleme sisteminin, yeterli-güvenli olduğu ve herhangi bir yenilmenin söz konusu olmadığı görülmektedir (Şekil 8.8). Ayrıca kaya bulonunun püskürtme betona göre daha az bir destek basıncı oluşturduğu görülebilmektedir.



Şekil 8.8. Km: 1+332 zemin reaksiyon eğrisi (GRC) - RMR

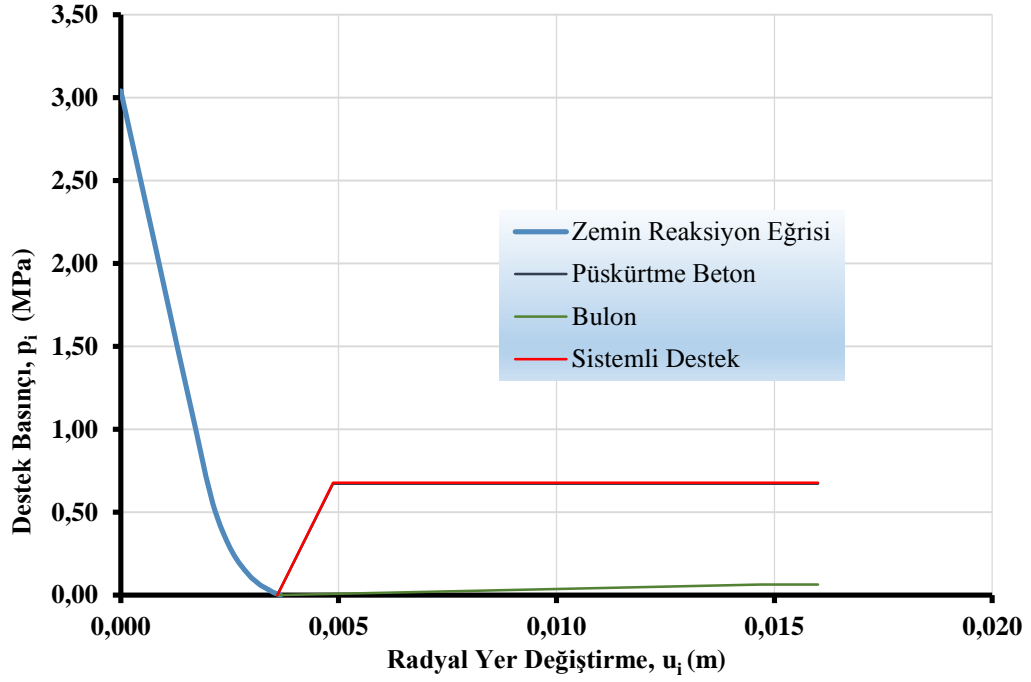
Km: 1+332 (AT2SK-2)'de kaya kütlesinin zemin reaksiyon eğrisi ile RMQR kaya destekleme sistemi “destek IV” uygulandığında, birleşik destek sınıfına göre desteğin oluşturduğu azami birleştirilmiş iksa basıncının 3,3 MPa (bkz. Çizelge 8.4) olarak hesaplandığı ve oldukça güvenli kaldığını, ayrıca herhangi bir yenilmenin söz konusu olmadığı görülmektedir (Şekil 8.9). Ayrıca en yüksek iksa basıncını büyükten küçüğe doğru sıralandığında, kaplama beton, püskürtme beton, çelik iksa ve son olarak da kaya bulonunun geldiği görülebilmektedir.



Şekil 8.9. Km: 1+332 zemin reaksiyon eğrisi (GRC) - RMQR

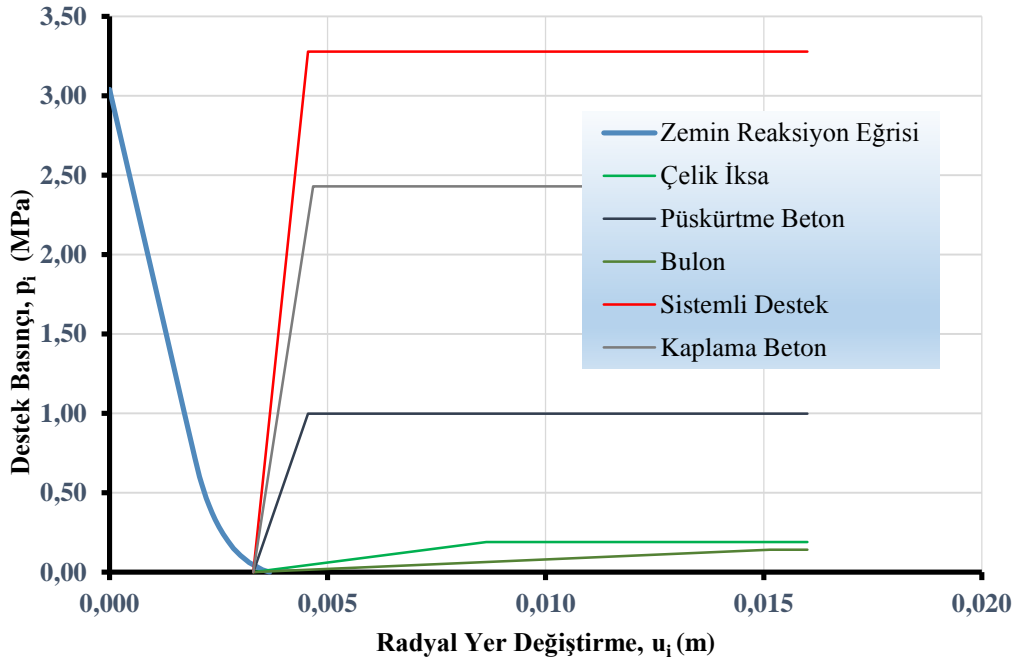
Km: 2+518 (AT2SK-3)'de kaya kütlesinin zemin reaksiyon eğrisi ile RMR kaya destekleme sistemi “destek III” uygulandığında birleşik destek sınıfına göre hesaplanan birleştirilmiş desteğin oluşturduğu azami iksa basıncı (bkz. Çizelge 8.4) 0,68 MPa'dır. Bu iksa basıncı, yeterli-güvenli olduğunu ve herhangi bir yenilmenin söz konusu olmayacağını göstermektedir (Şekil 8.10). Ayrıca kaya bulonunun püskürtme betona göre daha az bir destek basıncı oluşturduğu görülebilmektedir.

Km: 2+518 (AT2SK-3)'de kaya kütlesinin zemin reaksiyon eğrisi ile RMQR kaya destekleme sistemi “destek IV” uygulandığında, birleşik destek sınıfına göre birleştirilmiş desteğin desteğin oluşturduğu azami iksa basıncı (bkz. Çizelge 8.4) 3,3 MPa'dır.



Şekil 8.10. Km: 2+518 zemin reaksiyon eğrisi (GRC) - RMR

Destekleme sisteminin oldukça güvenli kaldığı ve herhangi bir yenilmenin söz konusu olmadığı görülmektedir (Şekil 8.11). Ayrıca en yüksek iksa basıncı büyükten küçüğe doğru sıralandığında, kaplama beton, püskürtme beton, çelik iksa ve son olarak da kaya bulonunun geldiği görülebilmektedir.



Şekil 8.11. Km: 2+518 zemin reaksiyon eğrisi (GRC) - RMQR

## 9. SAYISAL MODELLER

T-3 Tüneli'nin içerisinde geçeceği kaya kütlelerinin sonlu eleman modelini oluşturmak için bu tezde Fugro-Sial Yerbilimleri Müş. ve Müh. Ltd. Şirketinde lisanslı olarak kullanılmakta olan Phase<sup>2</sup> v8.0 bilgisayar programından faydalanılmıştır [51]. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile tünel kazısı sırasında oluşabilecek deformasyonların ve gerilim dağılımının kaya destekleme sistemlerine bağlı olarak nasıl tepki gösterdikleri değerlendirilebilmektedir.

### 9.1. Phase<sup>2</sup>'de Kullanılan Parametreler

Km: 1+332 (AT2SK-2) ve Km: 2+ 518 (AT2SK-3) olmak üzere iki farklı bölgedeki tünel kesitlerinde yapılan Phase<sup>2</sup> modellerinde, genelde yüzeye yakın sığ tüneller için kullanılan ve gerilme büyüklüklerinin ve yönlerinin topoğrafyanın etkisi ile şekillendiği “yerçekimi alan gerilmesi” seçilmiştir. Analizler, malzemenin elastik ve plastik (elasto-plastik) koşullardaki özelliklerine göre gerçekleştirilmiştir. Ayrıca genelleştirilmiş Hoek-Brown [30] yenilme ölçütü boyutsuz parametreleri ( $m_b$ ,  $s$  ve  $a$ ) ve Hoek-Brown malzeme sabiti ( $m_i$ ), jeolojik dayanım indeksi (GSI), kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma$ ), kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanım değerleri  $\sigma_{ci}$ , kaya kütlelerinin deformasyon modülü ( $E_m$ ), kaya kütlelerinin Poisson oranı ( $\mu$ ) laboratuvar çalışmaları sonucu elde edilen verilere göre belirlenmiştir. Dilatasyon açısı ( $\psi$ ) 1,0 olarak seçilmiş ve analizlerde dilatasyon katsayısı ( $K_\psi$ ) yaklaşık 1,0 olarak kullanılmıştır. Phase<sup>2</sup>'nin girdi parametreleri Çizelge 9.1'de iki farklı sondaj bölgesi için ayrı ayrı sunulmuştur.

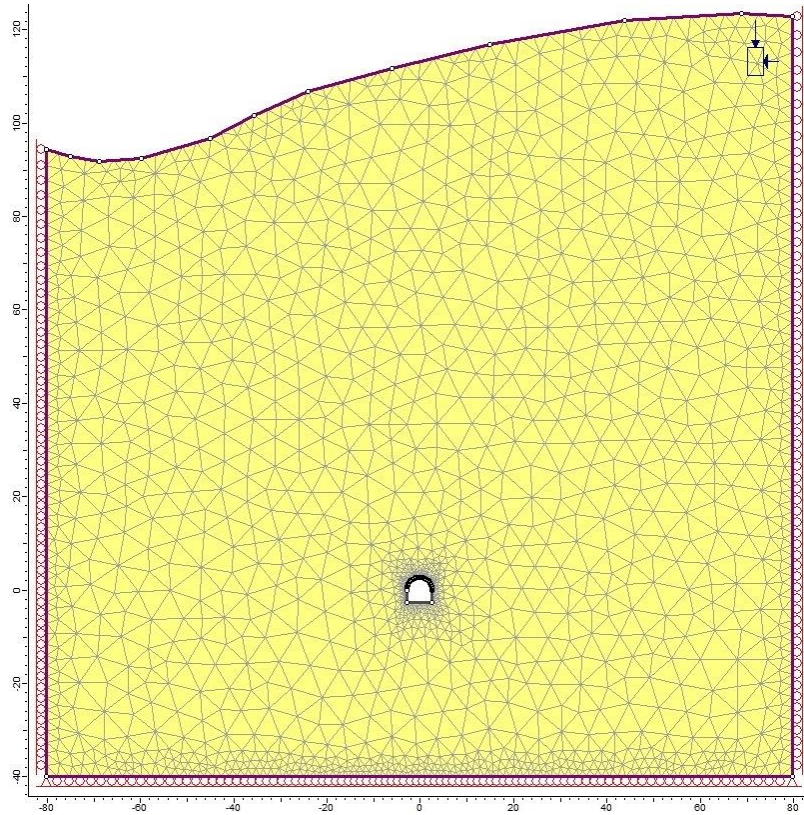
Tünel kazısı sırasında, Young modülü üzerindeki ardışık azalma miktarı gerçekçi bir şekilde hesaplanamadığından, kaya kütlelerinde plastik bölgenin gelişmesi sırasında oluşabilecek deformasyona bağlı gevşeme dikkate alınmamıştır. Analizlerde destek sistemleri düzlemsel gerilme koşullarında, kazıdan hemen sonra yerleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar çözümlerinde yeraltı açıklıkları çevresinde yaklaşık olarak 1 çap uzaklıktan sonra kaya davranışının boşluktan etkilenmediği bilindiği için [20], model konfigürasyonunun buna uygun olması ve tünel kesitinin arazideki görünümü dikkate alınarak tünel yan duvarları kısmında yatay yönde, tünel taban kısmında ise belirli bir uzaklıktan sonra düşey yönde yerdeğiştirme sınır koşulları uygulanmıştır. Yüzeyde ise hareket serbest bırakılmıştır.

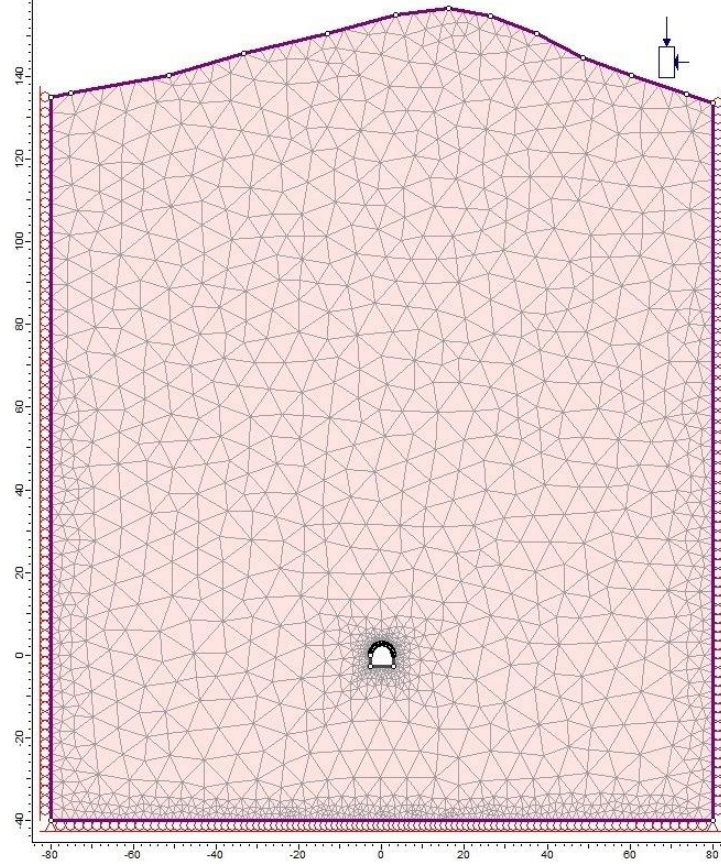
Çizelge 9.1. Phase<sup>2</sup> programı için esas alınan koşullar ve seçilen jeomekanik parametreler

Phase <sup>2</sup> v8.0		AT2SK-2 Km: 1+332	AT2SK-3 Km: 2+ 518
Jeolojik Birim		Kristalize Kireçtaşı	Şist
Alan gerilmesi		Yerçekimi	
Başlangıç eleman yükü		Arazi gerilmesi ve kütle kuvveti	
Elastik tipi		İzotropik	
Yenilme ölçütü		Genelleştirilmiş Hoek-Brown	
Malzeme tipi		Elastik ve Elasto-Plastik	
Toplam gerilme oranı	yatay/düşey düzlemde	0,6	0,5
	yatay/düşey düzlem dışında	0,6	0,5
Dilatasyon, Açısı / Katsayısı ( $\Psi / K_{\Psi}$ )		1 <sup>0</sup> / ~1	
Birim Hacim Ağ. MN/m <sup>3</sup>		0,0255	0,027
Kaya malzemesinin tek eksenli S.D. (MPa)		49,9	38,3
Elastisite ve deformasyon modülü, $E_i / E_m$ (GPa)		39/4,9	25,5/4,5
Poisson oranı (kaya malzemesi/kaya kütlesi)		0,11 /0,25	0,10/0,30
$m_b$		0,582	0,771
s		0,00053	0,00035
a		0,5	0,5

Proje kapsamında kazısı yapılacak olan T3 tünelinin, 1+332 ve 2+518 Km'ler için kullanılan Phase<sup>2</sup> modeline ait en kesitler ve sınır koşulları sırasıyla Şekil 9.1'de ve Şekil 9.2 gösterilmiştir.



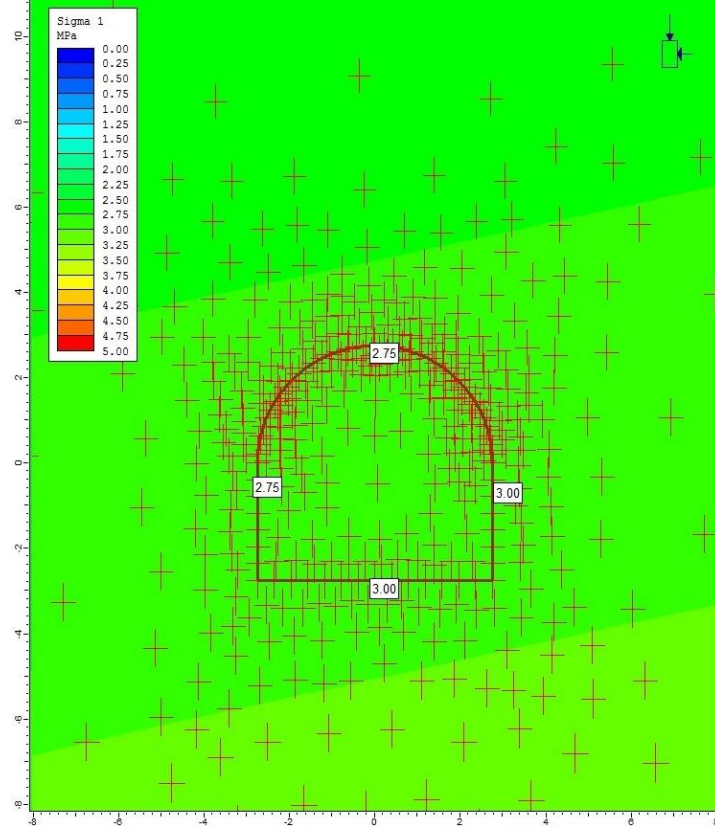
Şekil 9.1. Km: 1+332 (AT2SK-2)'de tünelin üzerindeki topoğrafya ile birlikte FEM ağı



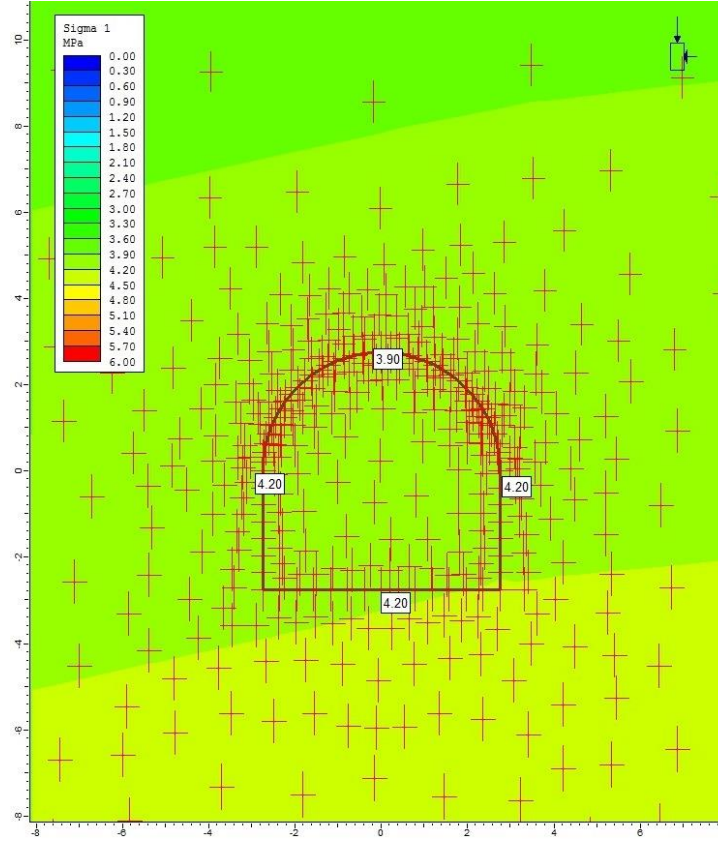
Şekil 9.2. Km: 2+518 (AT2SK-3)'de tünelin üzerindeki topoğrafya ile birlikte FEM ağı

Şekil 9.3 ve 9.4'te ise tünelin 1+332 ve 2+518 Km'lerindeki en büyük etkin asal gerilmelerin ( $\sigma_1$ ) kazı yapılmadan önceki dağılımları görülmektedir. Buna göre tünel çevresindeki etkin gerilmelerin 1+332 Km'de 2,8-3,0 MPa ve 2+518 Km' de ise 3,9-4,2 MPa aralığında değiştiği ve düşey yönde olduğu görülmektedir. Gerilme yönlerinin düşey olması, topoğrafyanın gerilme yönleri üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını göstermektedir.





Şekil 9.3. km:1+332,  $\sigma_1$  en büyük asal gerilme (kazısız)



Şekil 9.4. km: 2+518,  $\sigma_1$  en büyük asal gerilme (kazısız)

## 9.2. Elastik Analiz

Kaya kütlesinin elastik davranış gösterdiği durum için yapılan analizlerde, her iki sondaj yerinde RMR ve RMQR destek sistemlerine göre dayanım faktörünün yanı sıra, toplam yer değiştirme modelleri, destekli ve desteksiz analizler için gerçekleştirilmiştir.

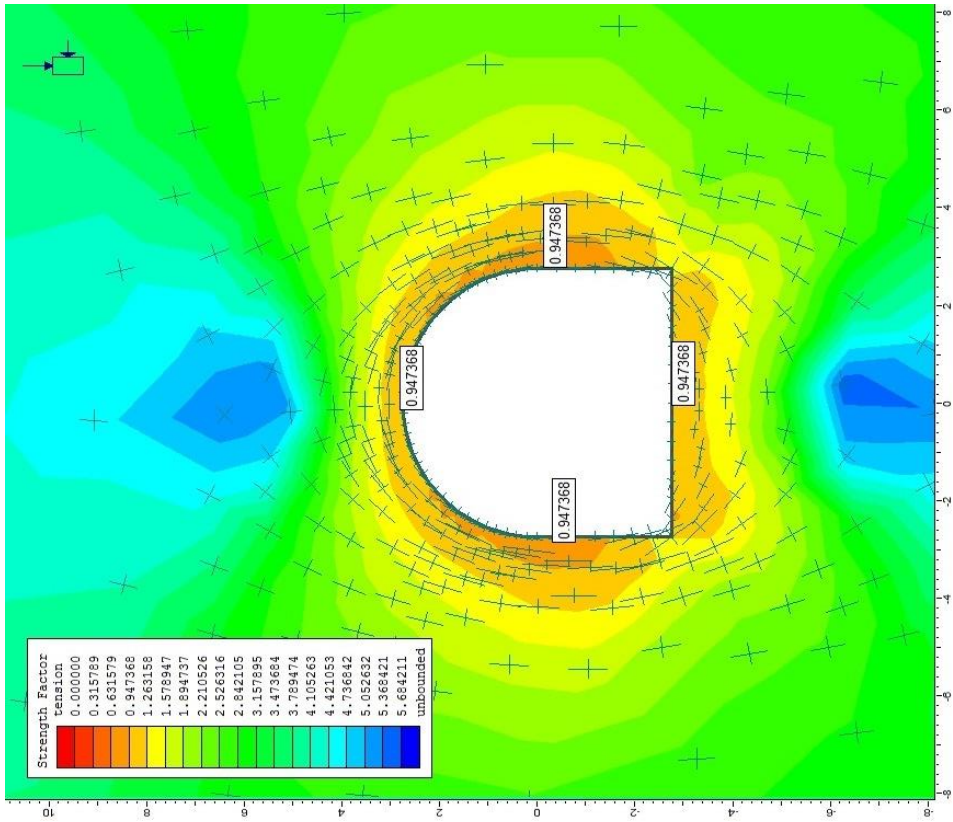
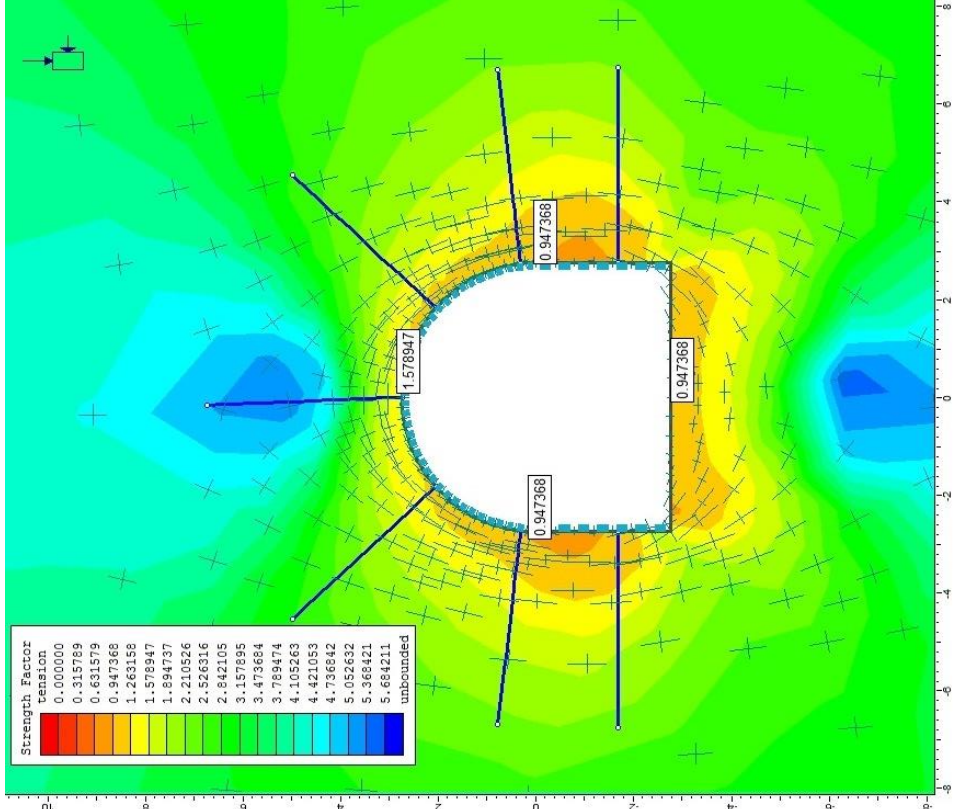
Tünel çevresindeki yerinde gerilmenin kaya kütlesi dayanımına bölünmesi ile hesaplanan dayanım faktörü, elastik malzeme durumunda aşırı gerilmeye izin verildiği için 1,0'den küçük olabilir. Bu durumda plastik malzeme koşulunda analizlerde tünel çevresinde kaya kütlesinin yenilebilir. Dayanım faktörünün 1,0'den büyük olması durumunda ise kaya kütlesi dayanımı tünel çevresindeki gerilmeden büyük olduğundan herhangi bir yenilme beklenmez (www.roscience.com). Aşağıda verilen, desteksiz-destekli elastik analizlerde de görüleceği gibi, kaya malzemesinin dayanımı, tünel kazı kesitinin bazı kısımlarında tünel çevresinde oluşan gerilmeden daha küçüktür ancak malzeme yenilmesi oluşmaz. Eğer dayanım faktörü Bu analizlerle, kaya kütlesinin farklı davranış koşullarında (elastik/plastik) destek sistemlerinin farklılıkları ortaya konulmuştur.

Aşağıda, Şekil 9.5 - 9.8'de tünelin 1+332 Km'sinde ve Şekil 9.9 - 9.12'de ise tünelin 2+518 Km'sinde karşılaşılabilecek kaya kütlesinin elastik malzeme koşulunda, tünel çevresinde gelişen gerilmelere bağlı olarak değişen "dayanım faktörü" ve "toplam yer değiştirme" ler, RMR ve RMQR kaya destek sistemlerinin desteksiz ve destekli olarak uygulandığı analiz çiftleri ile gösterilmiştir.

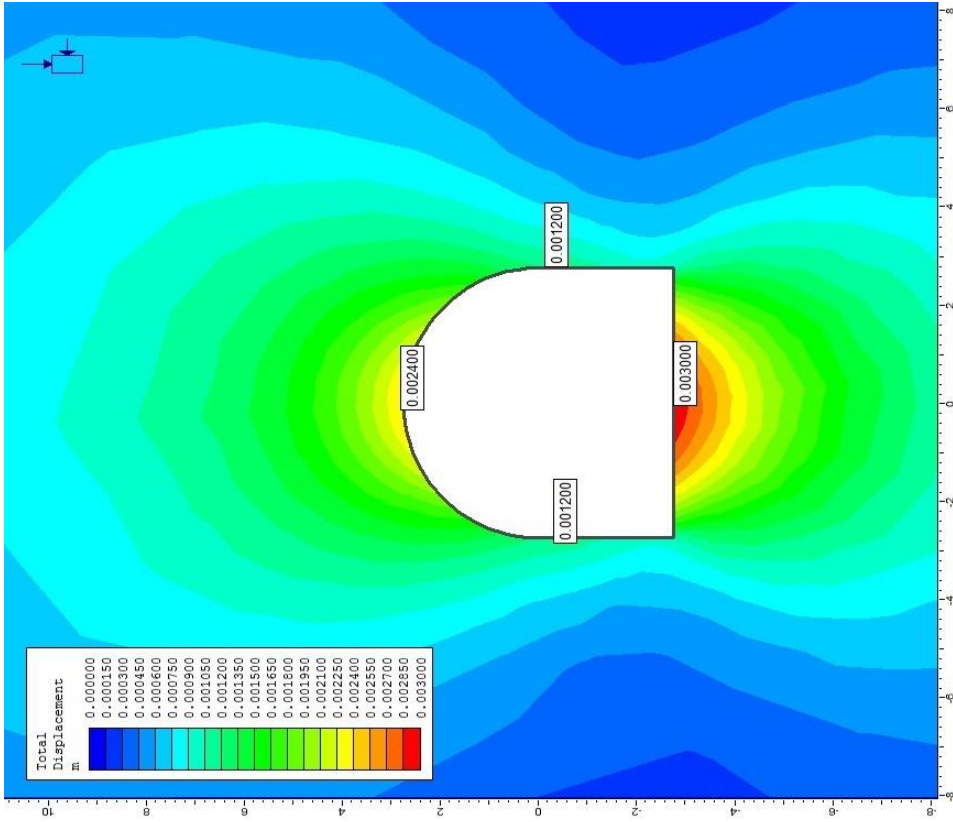
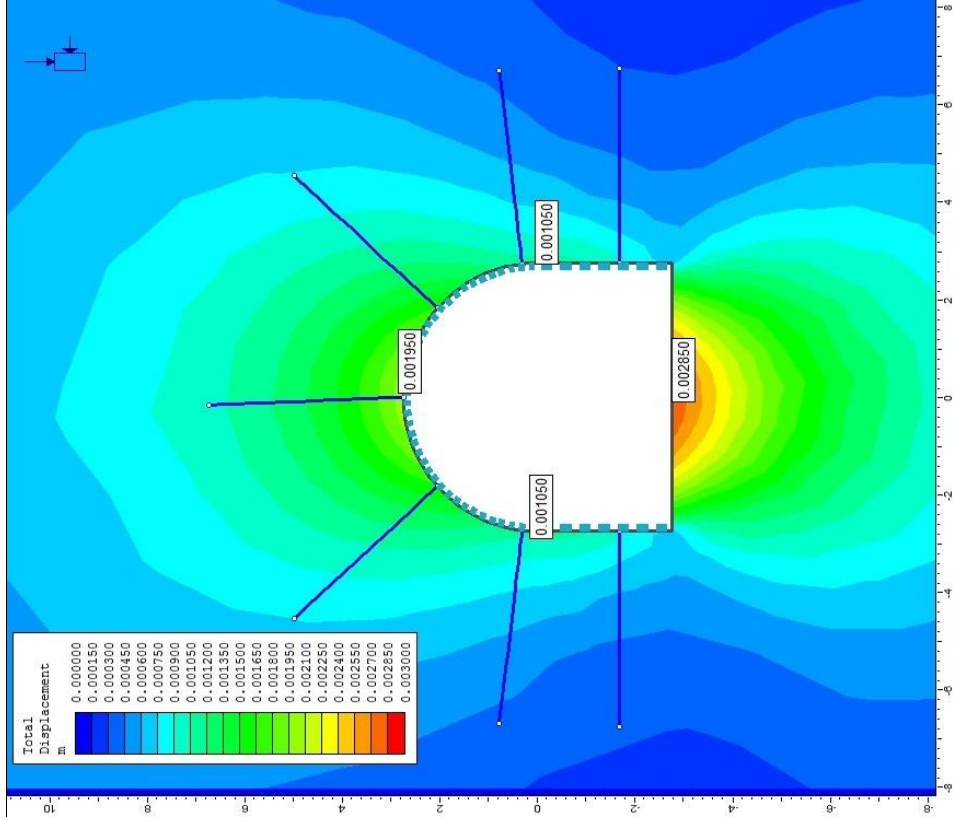
Elastik analizlerde desteksiz-destekli açıklıkların çevresinde toplam yer değiştirmeler 0,001 ila 0,0045 m arasında gerçekleşmekle birlikte dayanım faktörlerinin tünelin özellikle yan duvarlarında ve taban kısmında 1,0'in altına düştüğü görüldüğü için ilerideki evrelerde tünel çevresinde plastik davranış gelişeceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle desteksiz-destekli koşullar için plastik analizler gerçekleştirilmiştir.

## 9.3. Plastik Analiz

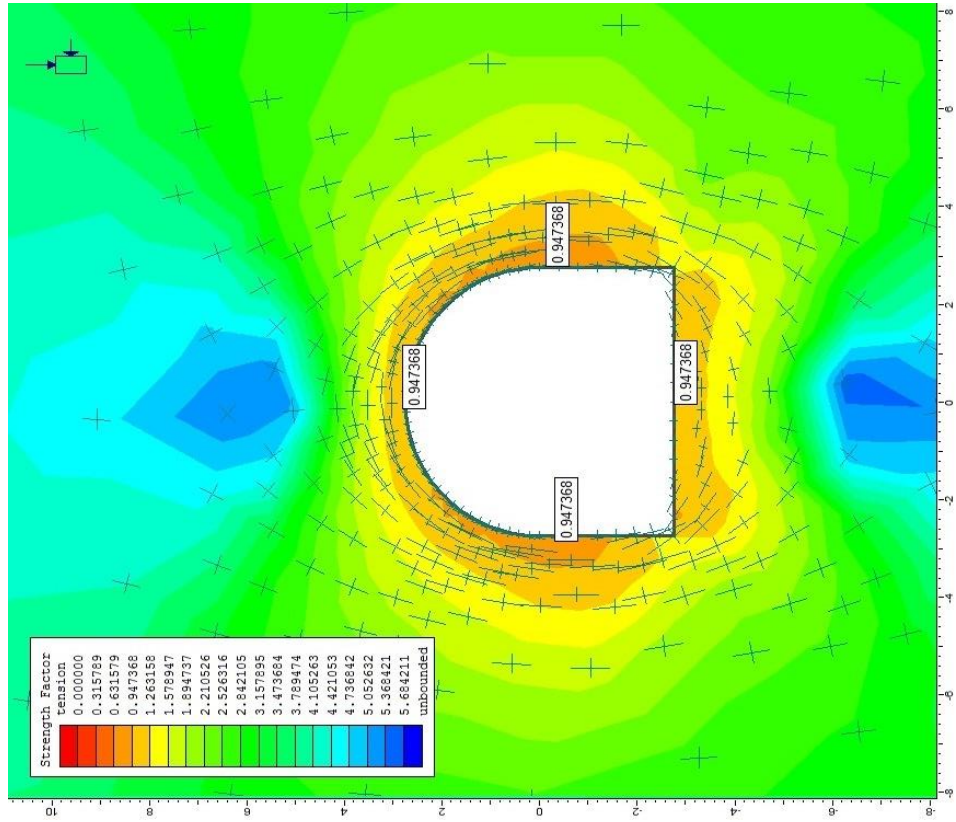
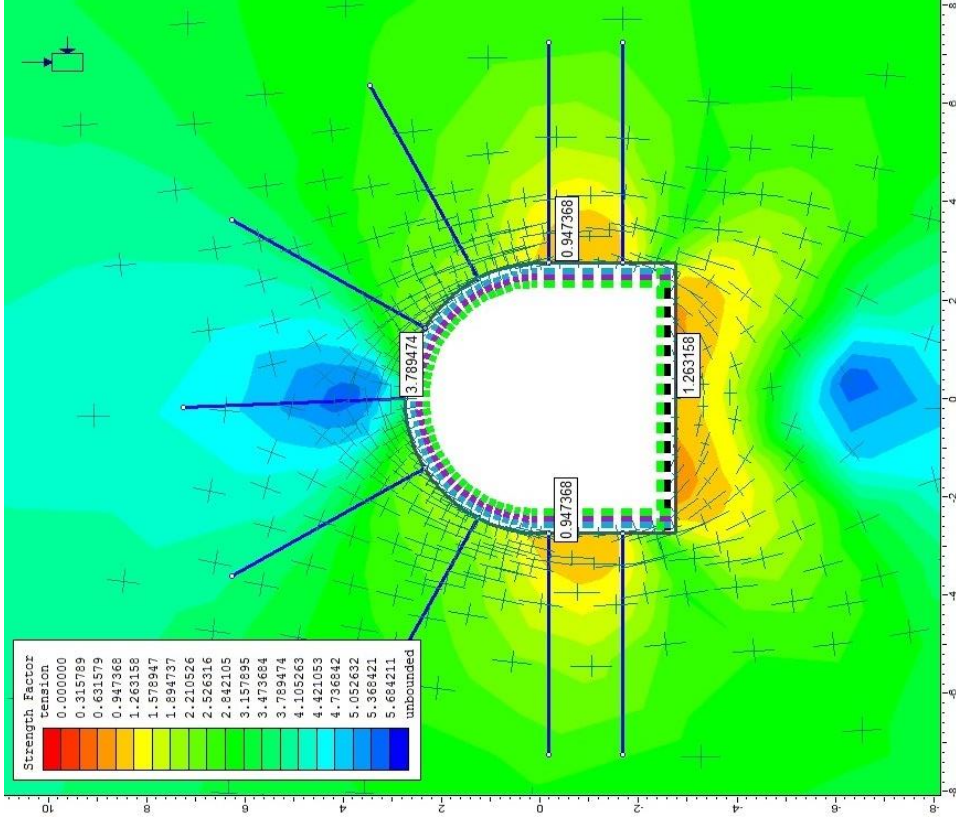
Tünel kazısı sırasında, kazı çevresinde oluşacak gerilmelerin dağılımını görmek için plastik analiz yapılmıştır. Phase<sup>2</sup> programı kullanılarak hazırlanan modeller üzerinden tünel desteklenmeden önce ve destekleme yapıldıktan sonra tavanda, kenar duvarlarda ve tabanda ölçülen toplam yer değiştirmeler Çizelge 9.2'de sunulmuştur.



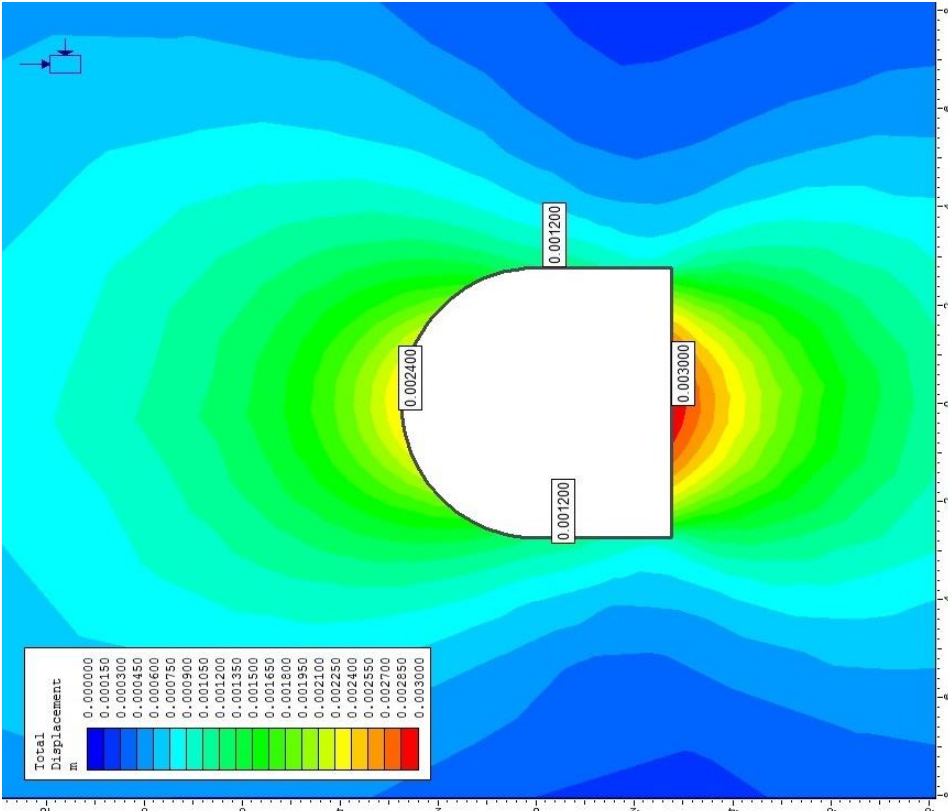
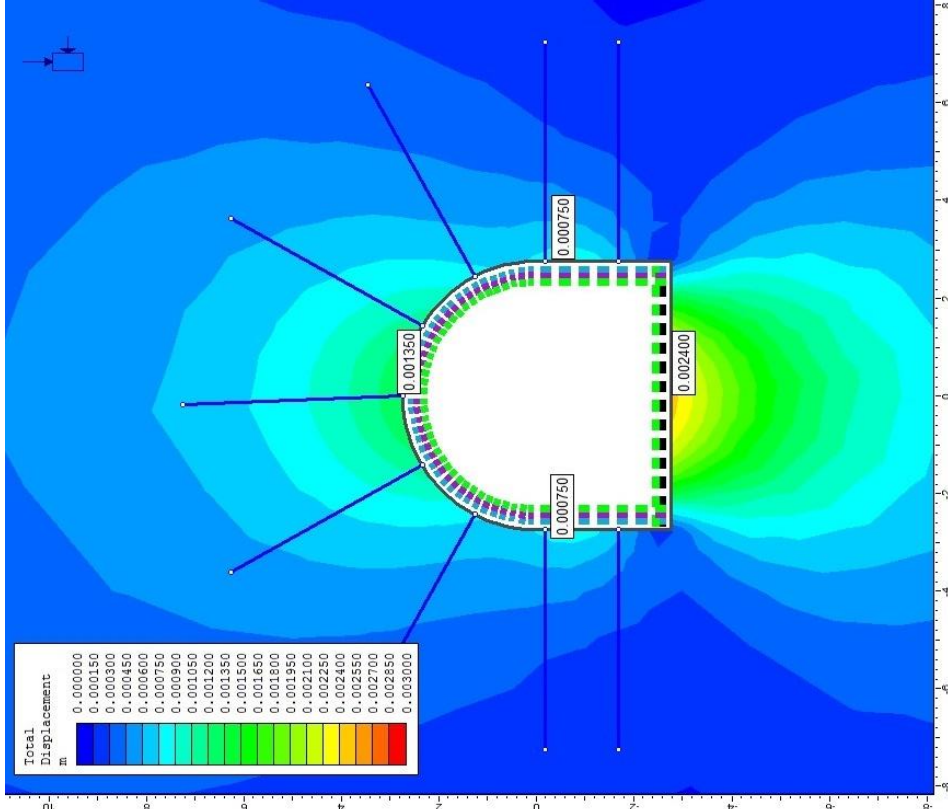
Şekil 9.5. AT2SK-2 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMR-Elastik)



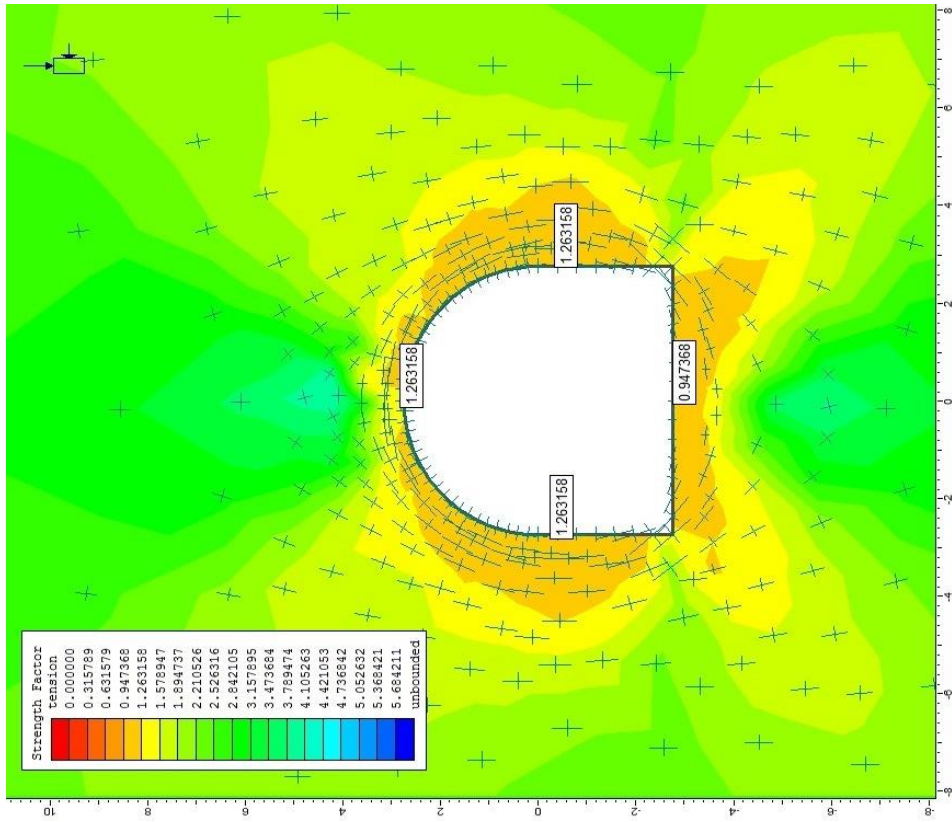
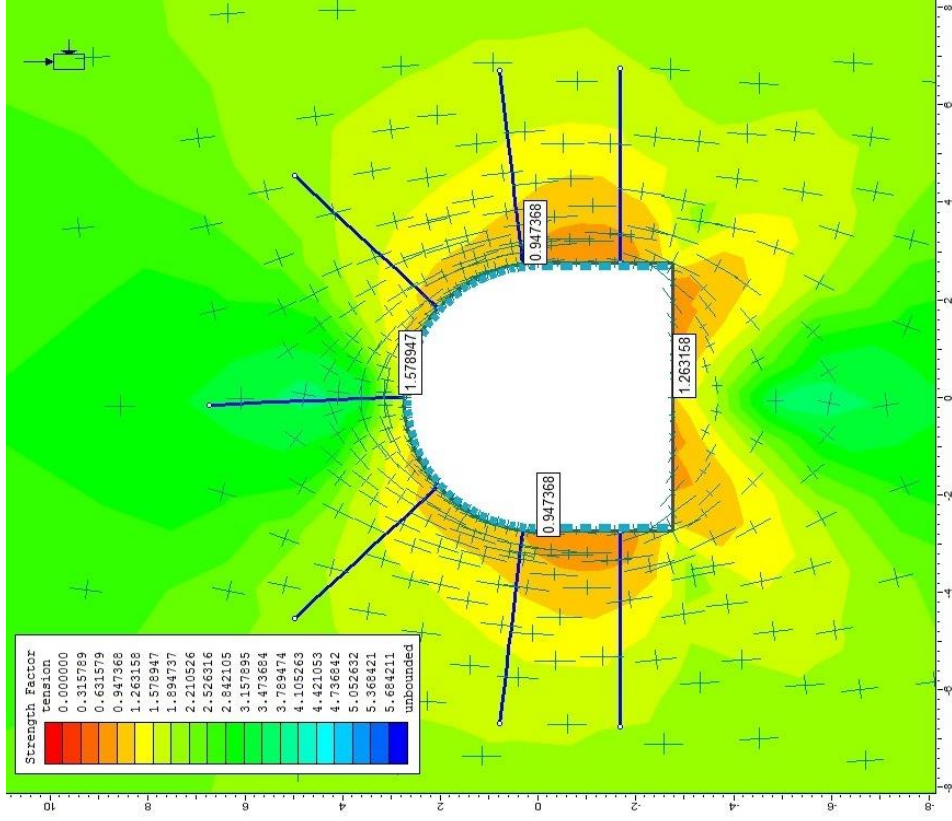
Şekil 9.6. AT2SK-2 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMR-Elastik)



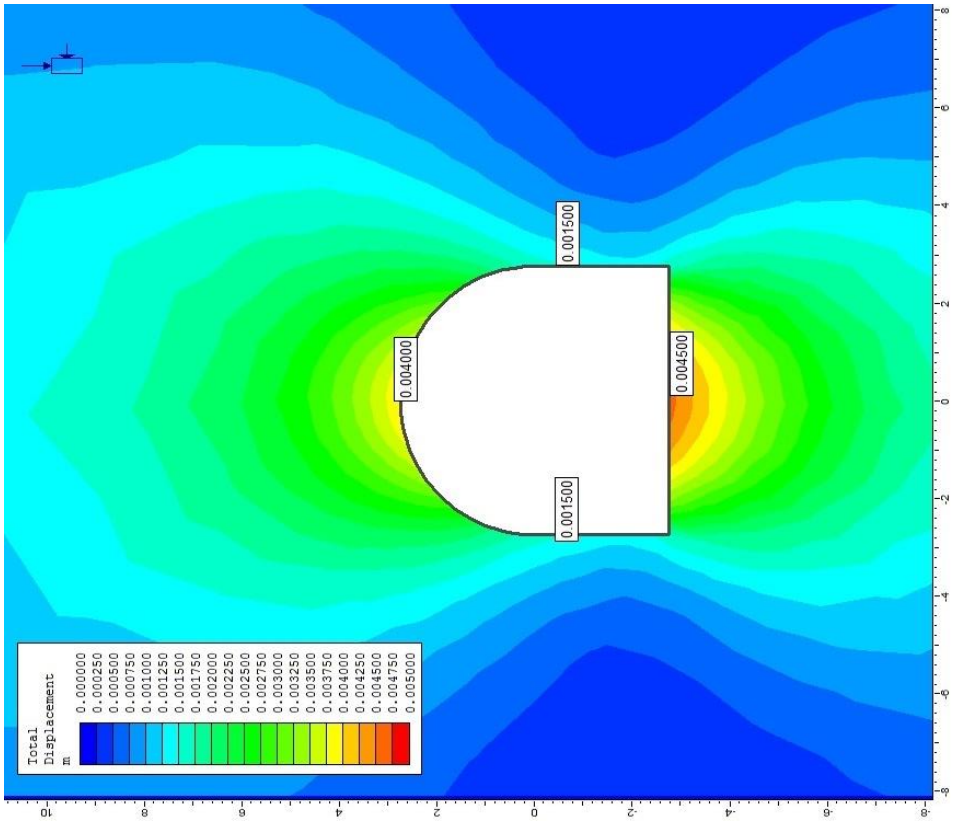
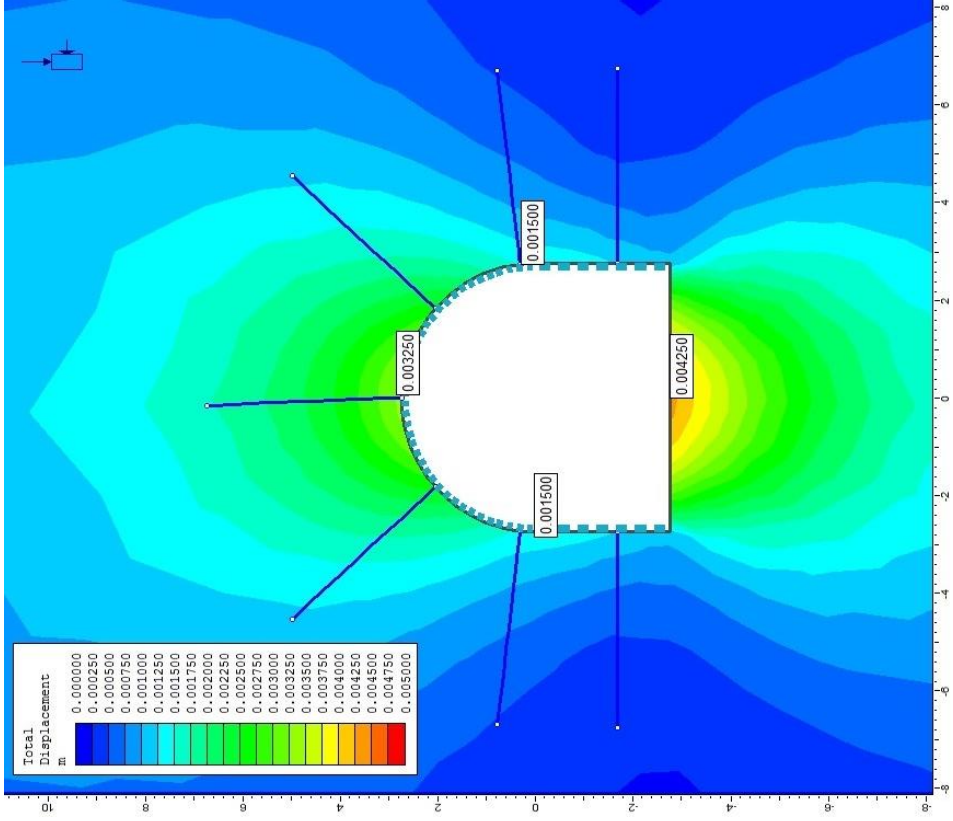
Şekil 9.7. AT2SK-2 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMQR-Elastik)



Şekil 9.8. AT2SK-2 sondaj yeri için toplam yer değişirme, desteksiz-destekli (RMQR-Elastik)

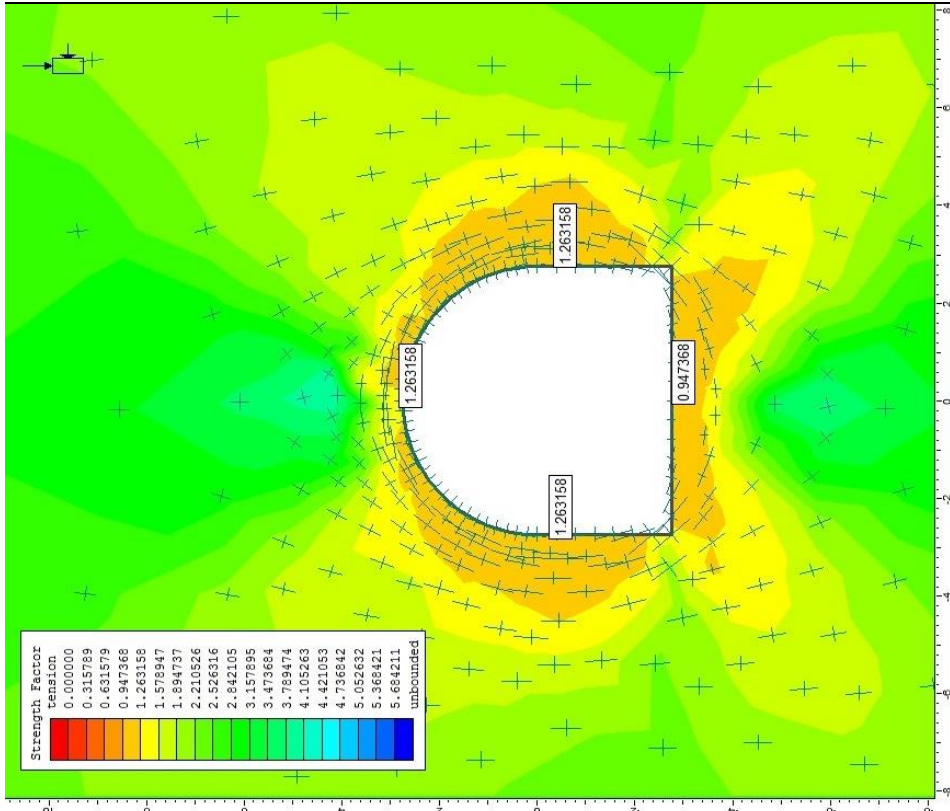
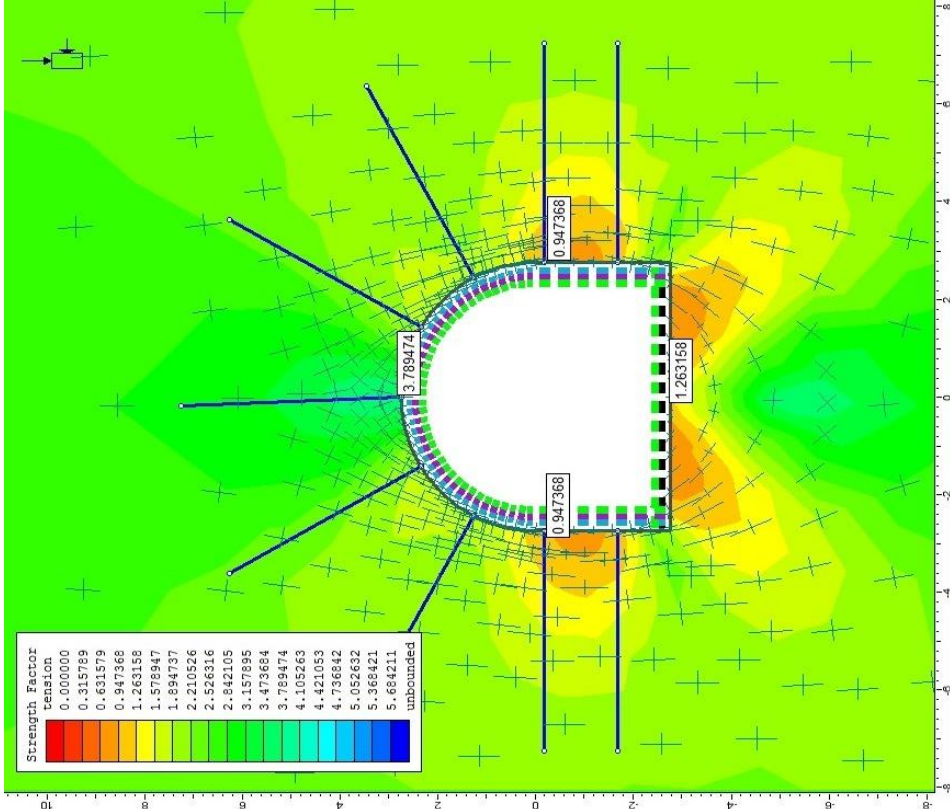


Şekil 9.9. AT2SK-3 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMR-Elastik)

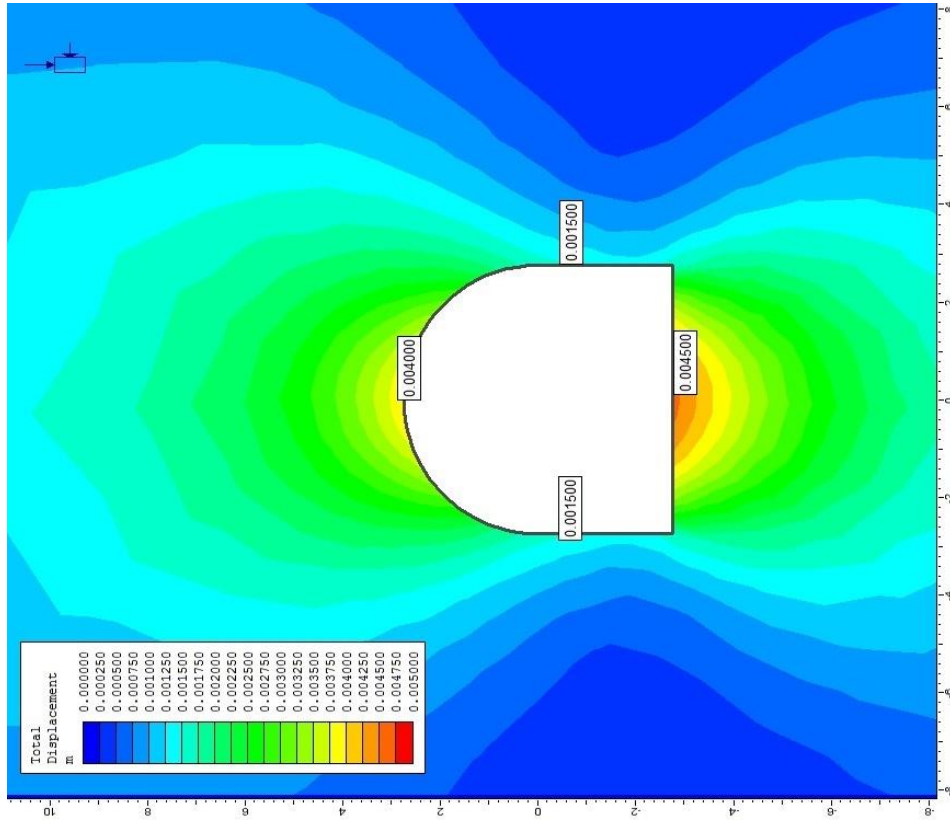
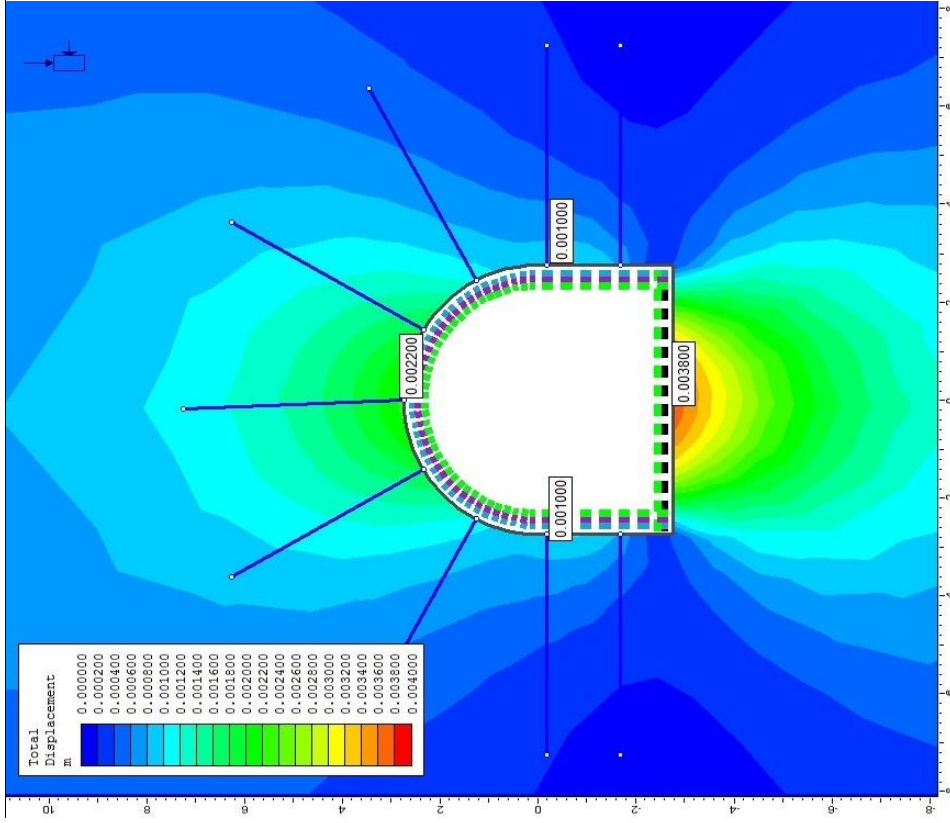


Şekil 9.10. AT2SK-3 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMR-Elastik)





Şekil 9.11. AT2SK-3 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMQR-Elastik)



Şekil 9.12. AT2SK-3 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMQR-Elastik)

Plastik analizlerde tanımlanan ideal elasto-plastik malzeme koşulunda artık ve doruk parametreler eşit alınmıştır. Ayrıca makaslama gerilmesi altındaki malzemedeki hacim artışına (www.roscience.com) bağlı olarak dilatasyon katsayısı yaklaşık 1,0 olarak alınmıştır.

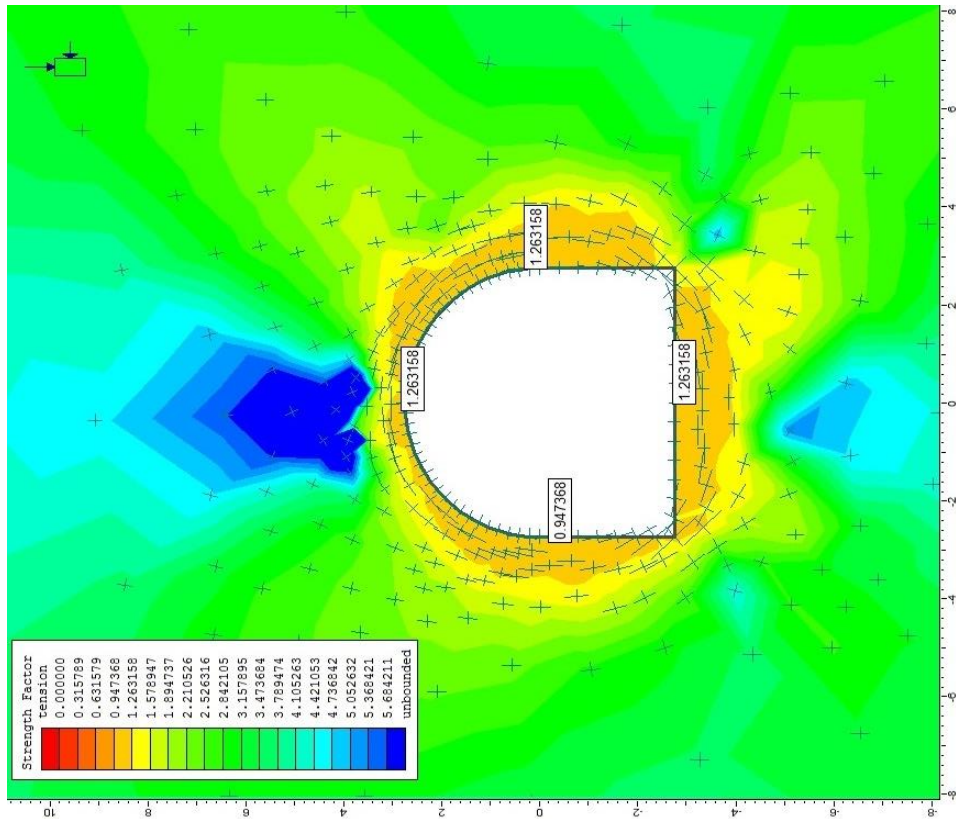
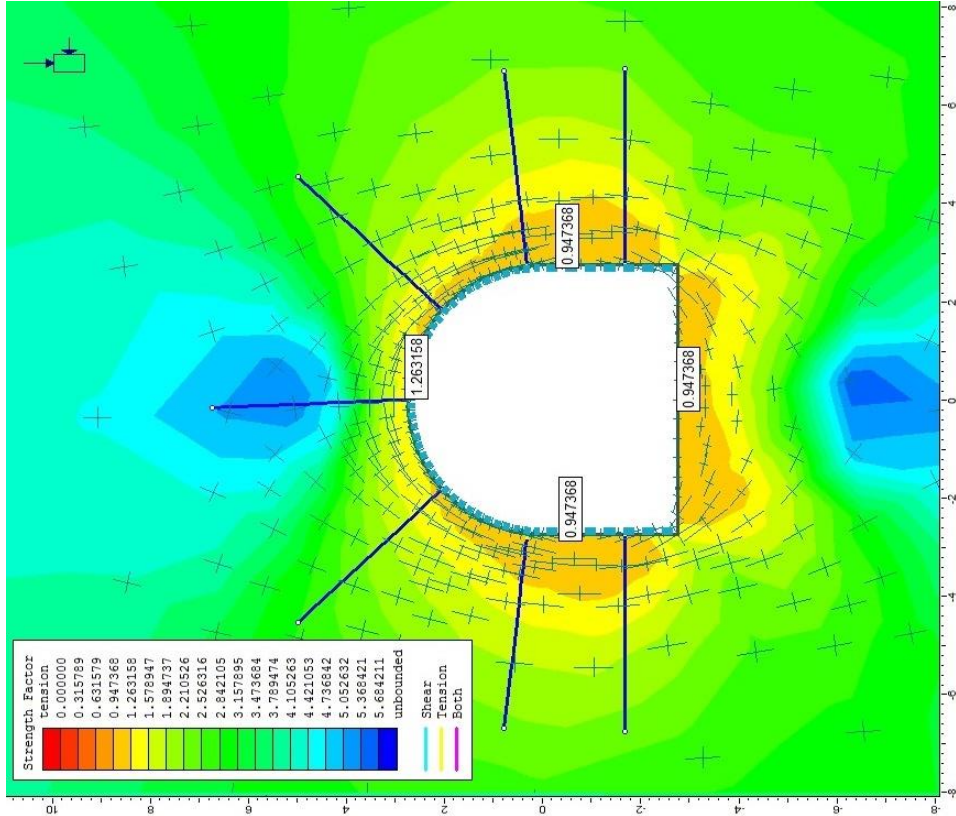
Aşağıda, Şekil 9.13 - 9.16 arasında tünelin 1+332 Km'sinde ve Şekil 9.17 - 9.20 arasında ise; tünelin 2+518 Km'sinde karşılaşılabilecek kaya kütlesi içerisindeki plastik malzeme koşulunda tünel çevresinde gelişen gerilmelere bağlı olarak değişen "dayanım faktörü" ve "toplam yer değiştirmeler, RMR ve RMQR kaya destek sistemlerinin desteksiz ve destekli olarak uygulandığı analiz çiftleri ile birlikte gösterilmiştir.

Plastik analizlerde desteksiz koşullarda toplam yer değiştirme tünel duvarında 0,17'ye m kadar ulaştığı halde destek uygulanması durumunda toplam yer değiştirme 0,001 m'ye kadar düşmektedir. Bu da önerilen destek sisteminin anlamlı olduğunu göstermektedir.

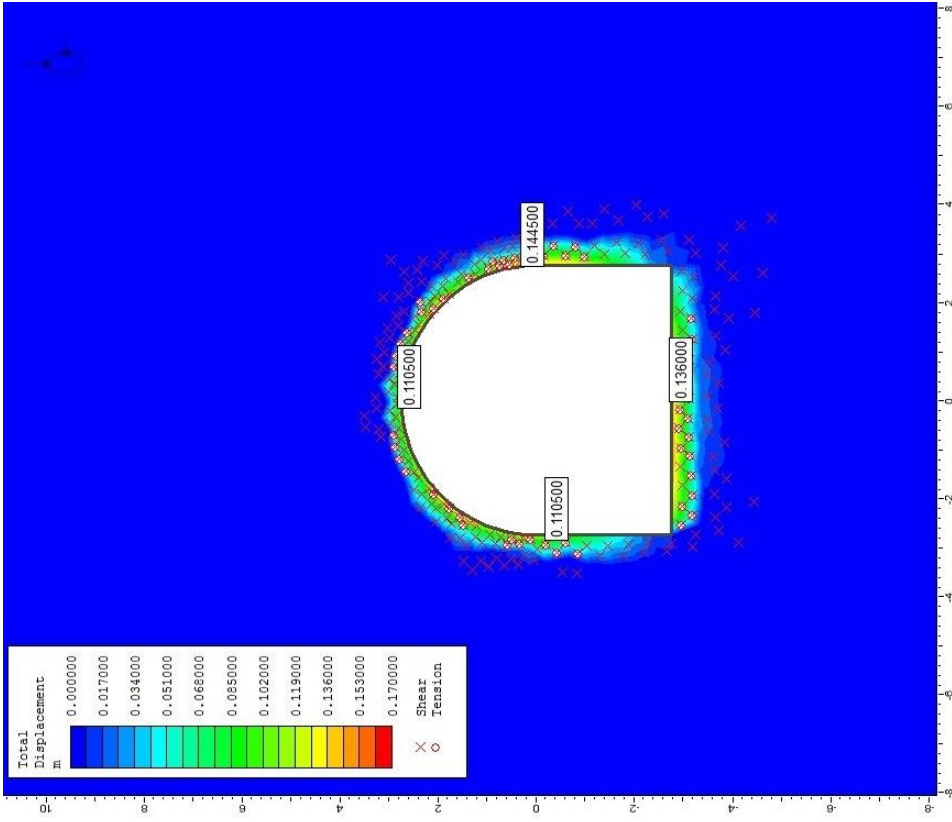
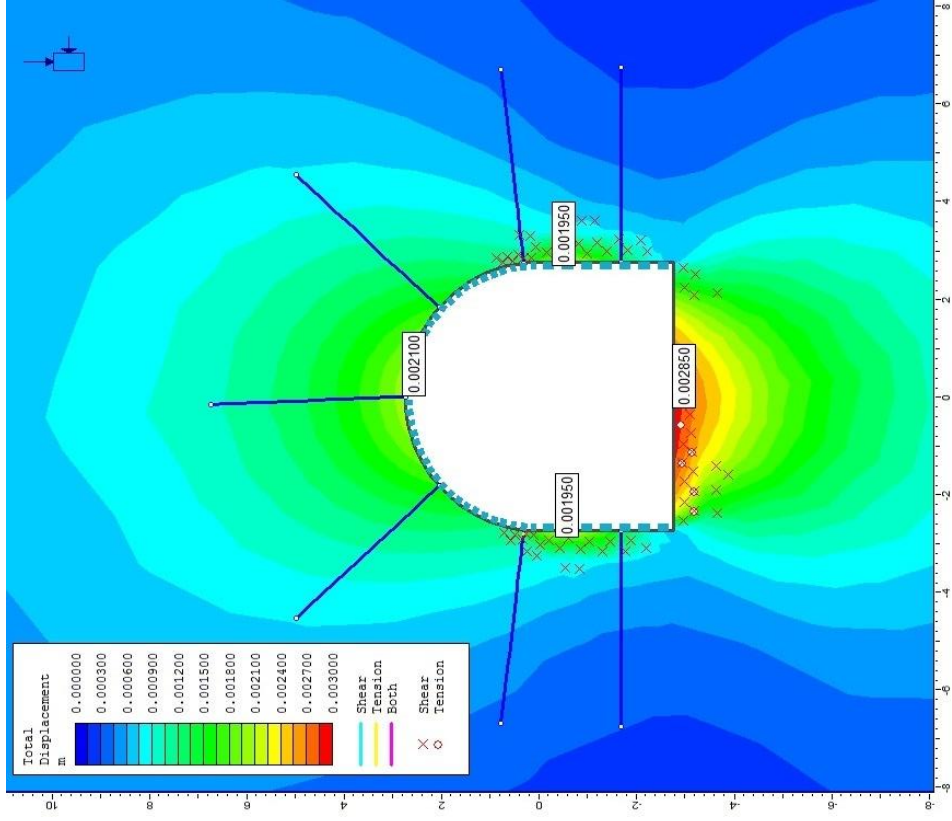
Tünelin 1+332 ve 2+518 Km'sinde karşılaşılabilecek kaya kütlesinin elastik ve elasto-plastik malzeme koşullarında tavan, yan duvarlar ve tabanında meydana gelen toplam yer değiştirmeler hazırlanan modellerle belirlenmiştir. Desteksiz ve kaya destek sistemlerinin (RMR-RMQR) önerdiği şekilde uygulanan destekli modellerde toplam yer değiştirme miktarları aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir (Çizelge 9.2).

Çizelge 9.2. Uygulanan destek sınıfı ve tünel kaya malzemesi davranışına göre tünel duvarındaki yer değiştirmeler

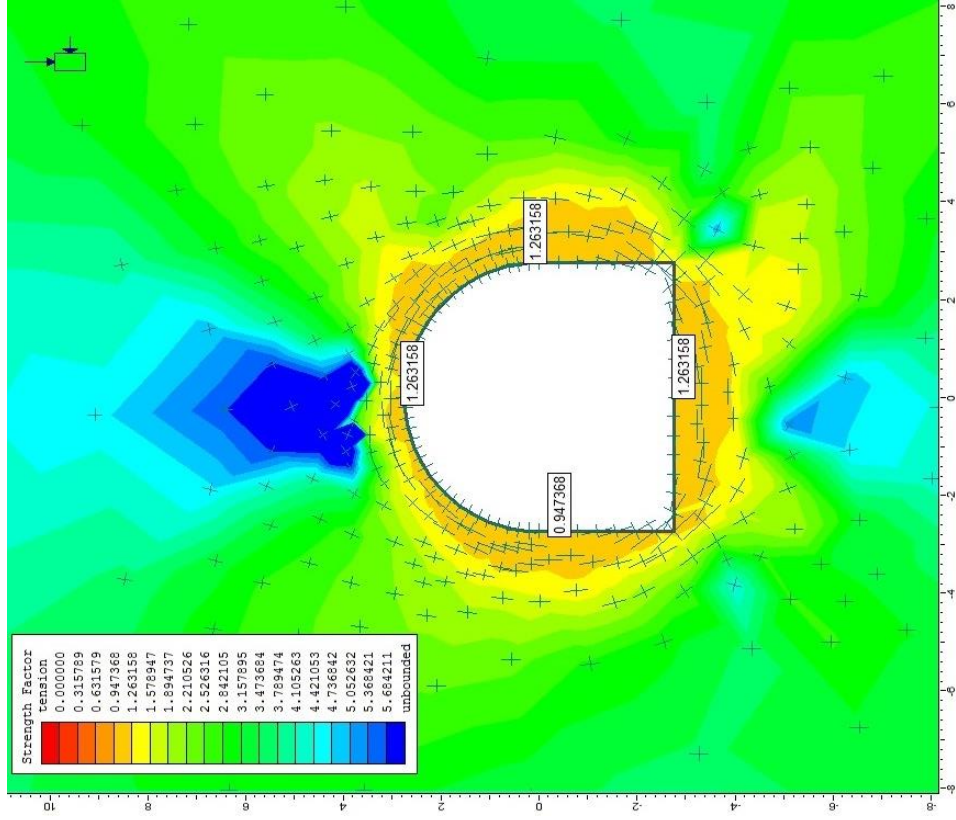
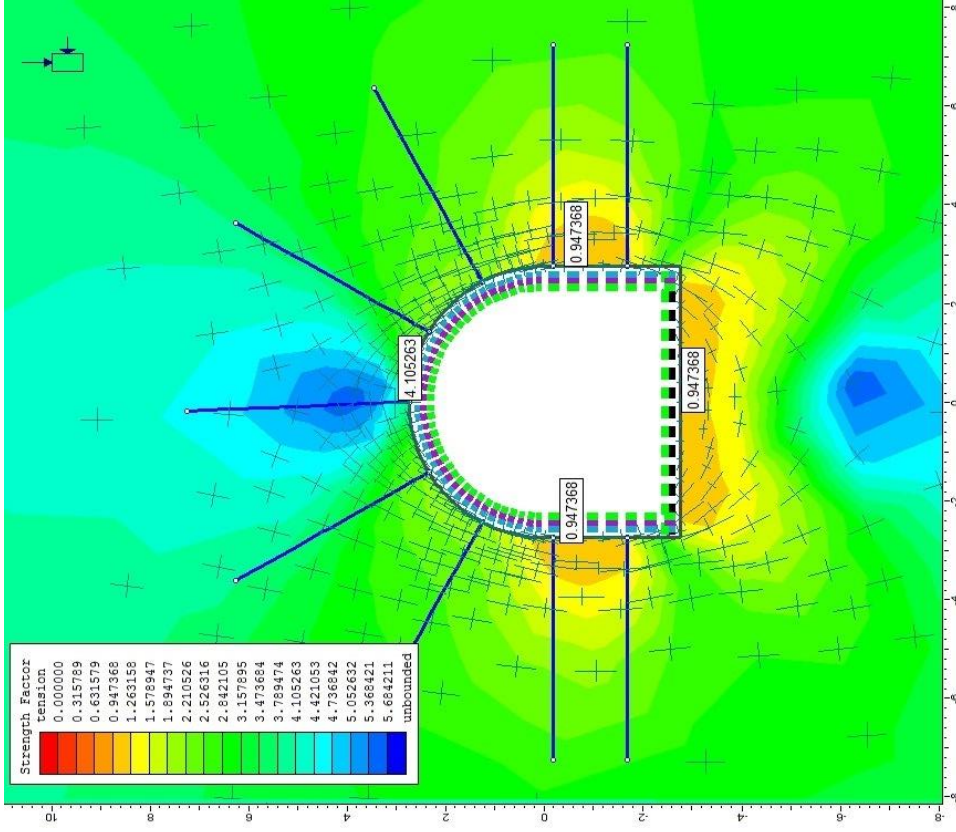
Km	Destek sistemi malzeme davranışı	Desteksiz			Yenilen eleman sayısı	Destekli			Yenilen eleman sayısı
		Toplam yer değiştirme (m)				Toplam yer değiştirme (m)			
		Tavan	Yan duvar	Taban		Tavan	Yan duvar	Taban	
1+332	RMR-Elastik	0,0024	0,0012	0,003	-	0,002	0,001	0,003	-
	RMQR-Elastik					0,0014	0,0008	0,0024	-
	RMR-Plastik	0,11	0,145	0,136	283 eleman	0,0021	0,002	0,003	124 eleman / 1 bulon
	RMQR-Plastik					0,0014	0,0009	0,0026	93 eleman
2+518	RMR-Elastik	0,004	0,0015	0,0045	-	0,0033	0,0015	0,0043	-
	RMQR-Elastik					0,002	0,001	0,0038	-
	RMR-Plastik	0,09	0,17	0,01	237 eleman	0,0036	0,0011	0,0048	129 eleman / 10 bulon
	RMQR-Plastik					0,0023	0,0013	0,0043	59 eleman



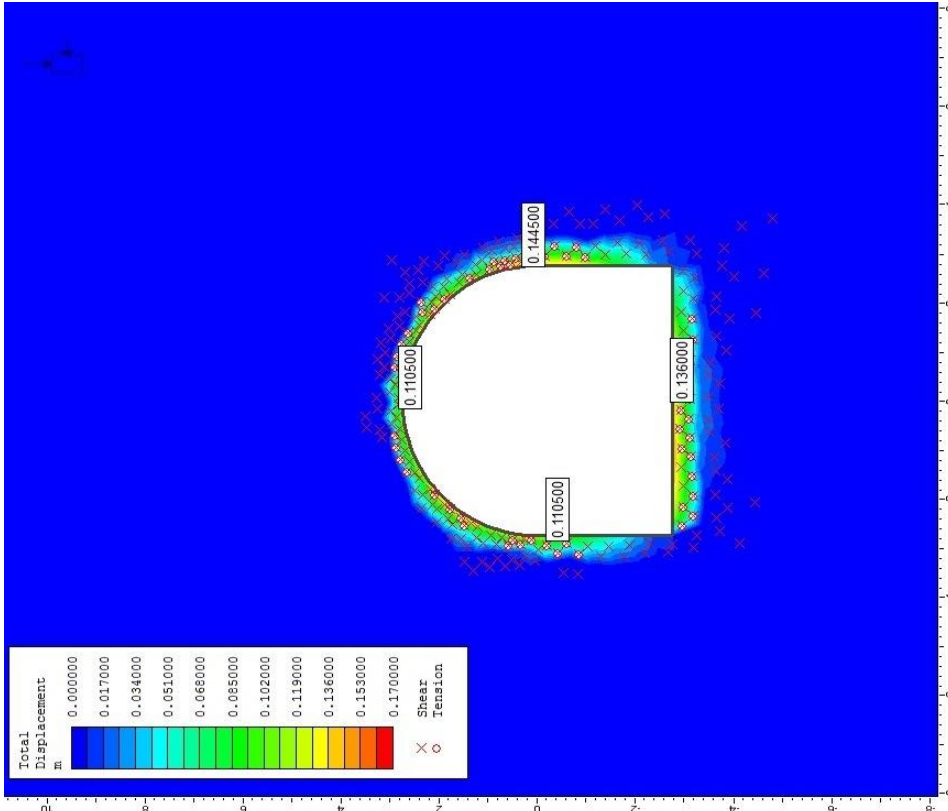
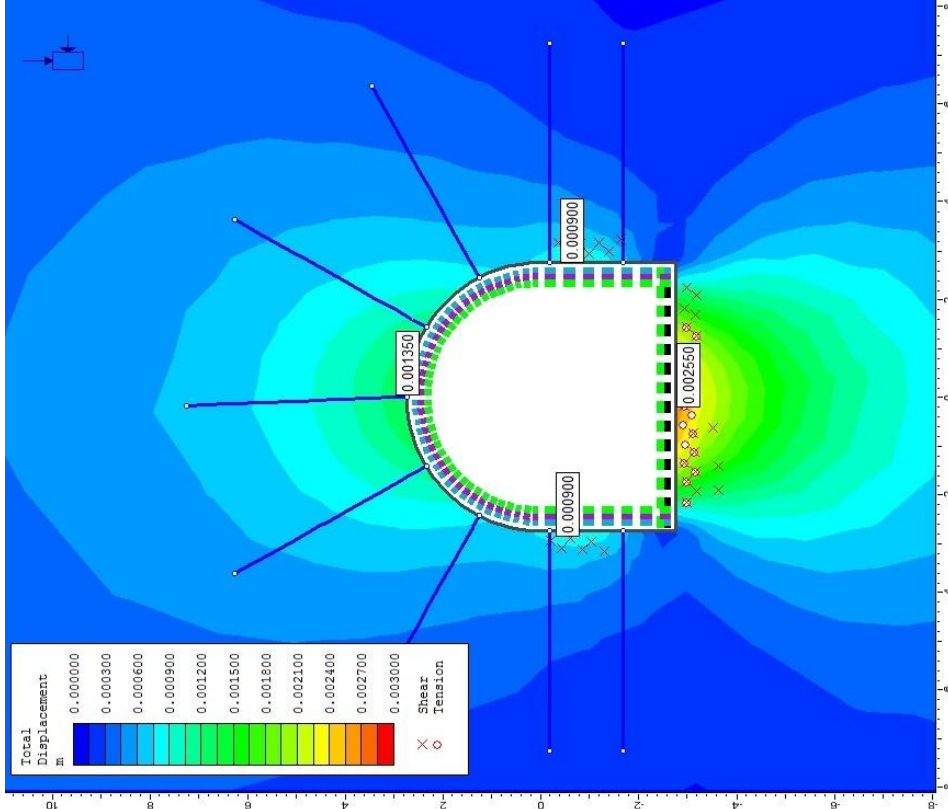
Şekil 9.13. AT2SK-2 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMR-Plastik)



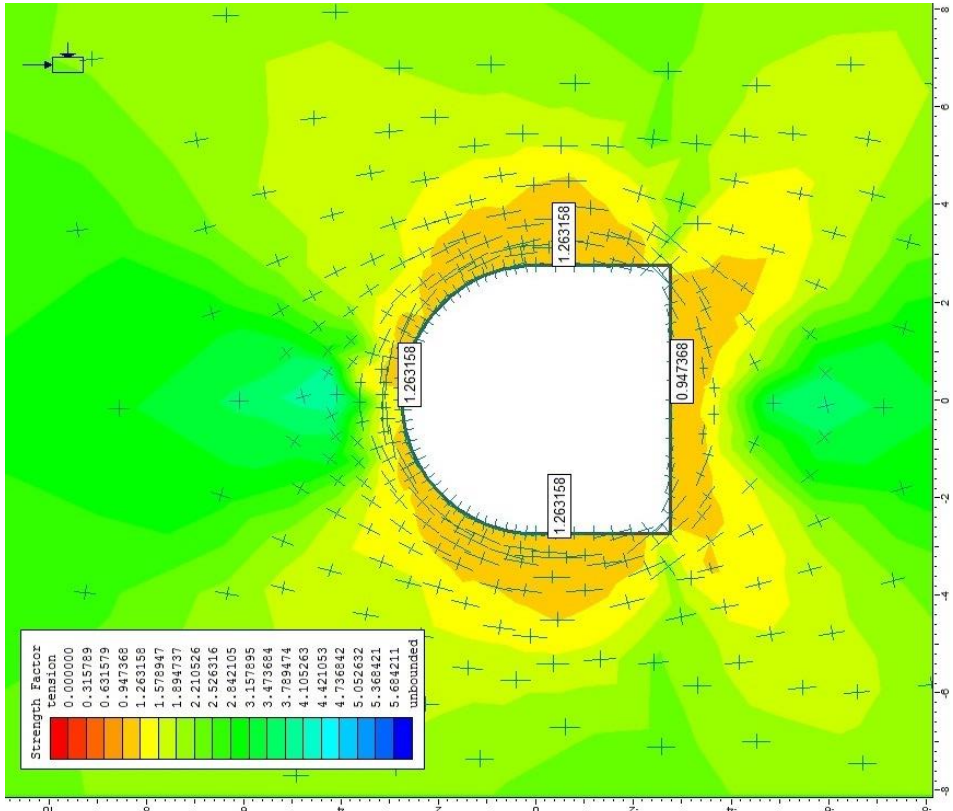
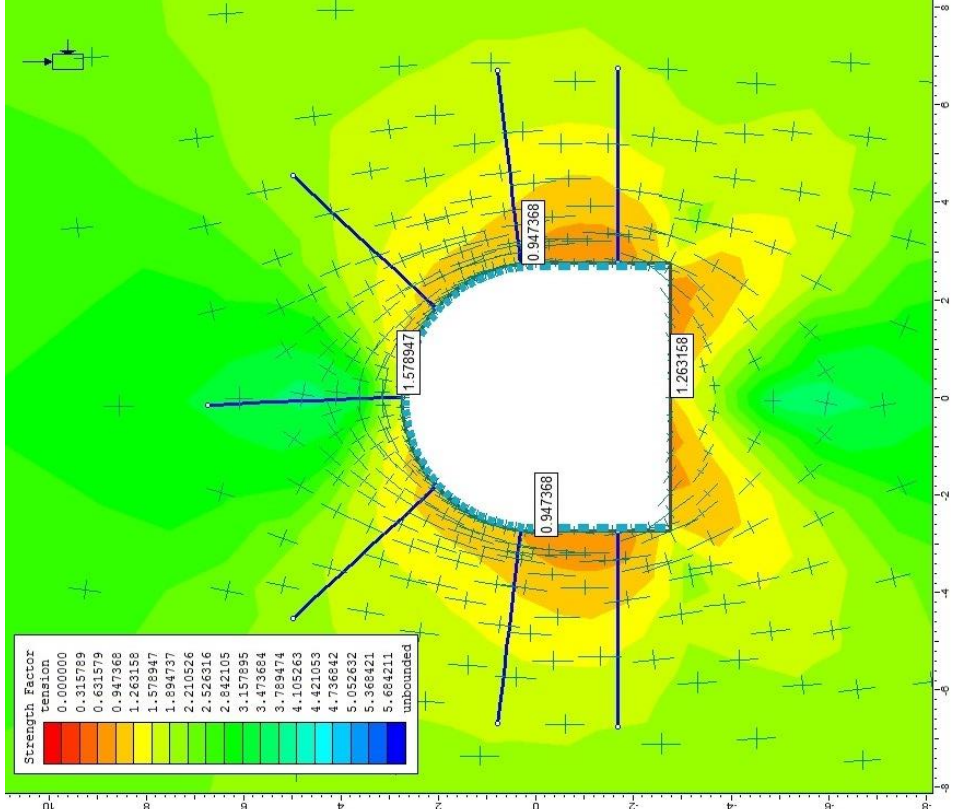
Şekil 9.14. AT2SK-2 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMR-Plastik)



Şekil 9.15. AT2SK-2 sondej yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMQR-Plastik)

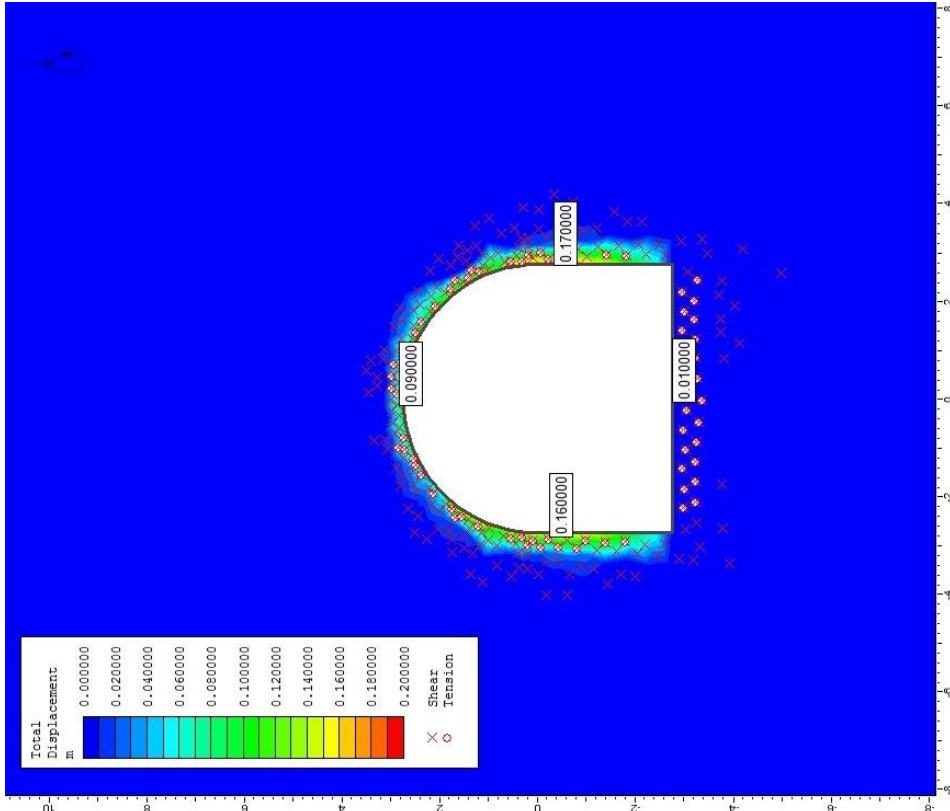
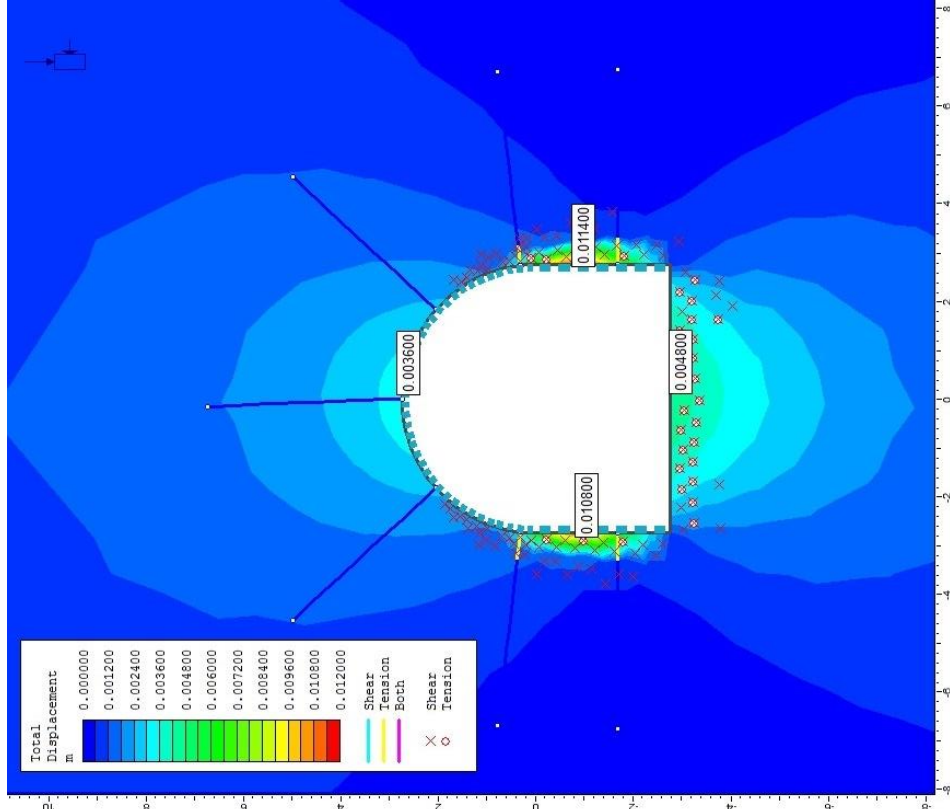


Şekil 9.16. AT2SK-2 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMQR-Plastik)

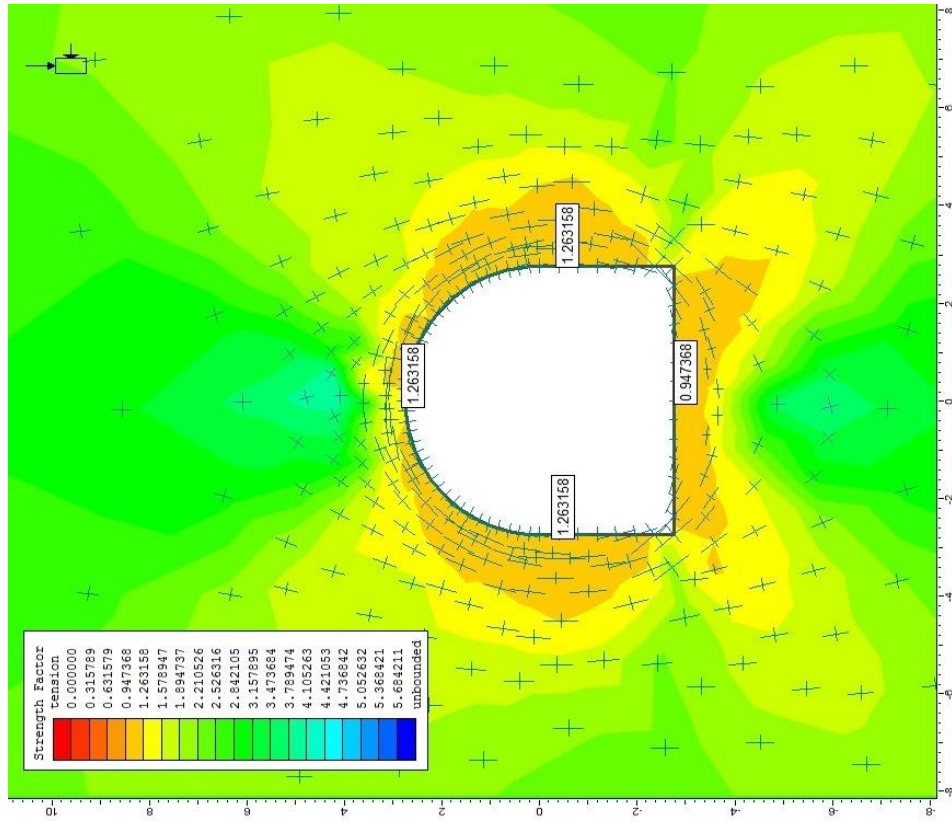
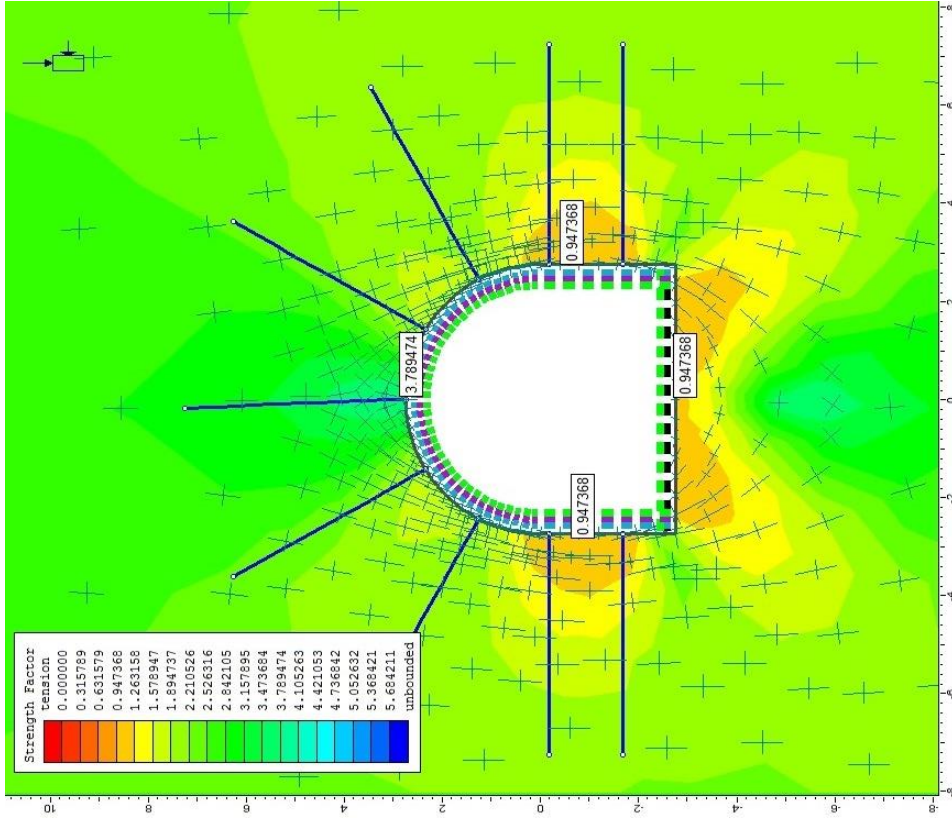


Şekil 9.17. AT2SK-3 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMR-Plastik)

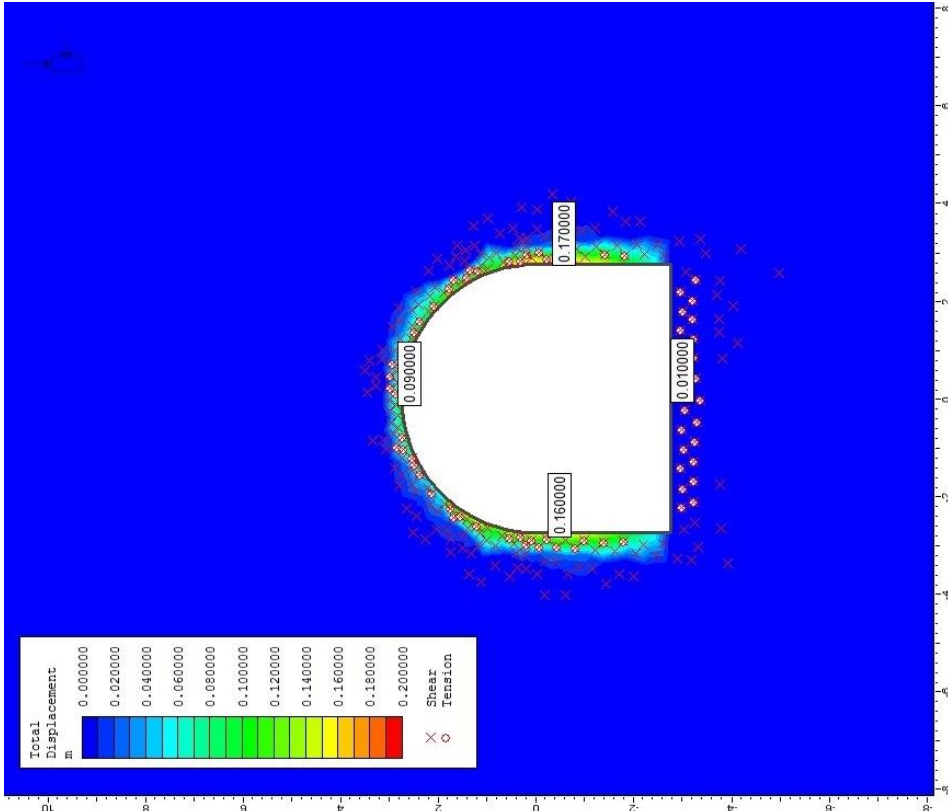
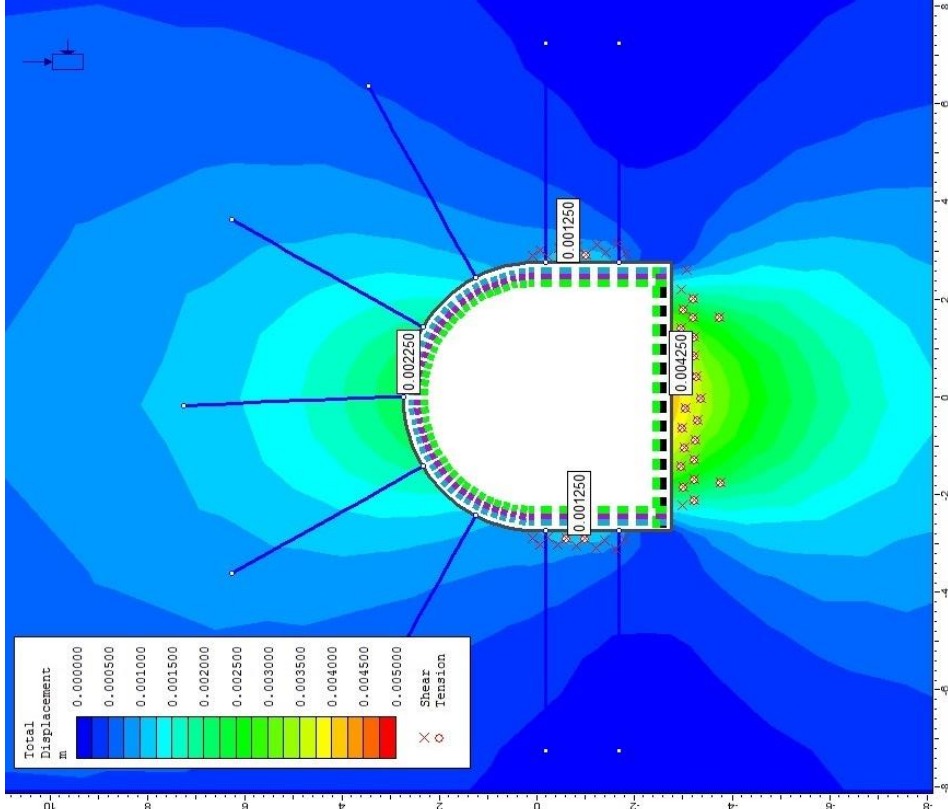




Şekil 9.18. AT2SK-3 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMR-Plastik)



Şekil 9.19. AT2SK-3 sondaj yeri için dayanım faktörü desteksiz-destekli (RMQR-Plastik)



Şekil 9.20. AT2SK-3 sondaj yeri için toplam yer değiştirme, desteksiz-destekli (RMQR-Plastik)

## 10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Akşar regülatörü ve Nazar HES kapsamında açılacak üç tünelden birisi olan T3 iletim tüneline güzergahı üzerinde yapılan 2 adet araştırma sondajına bağlı olarak, tüneline içerisinde geçeceği kaya kütlelerinin RMR VE RMQR sistemlerine göre sınıflamaları yapılmıştır. Kaya kütlesi izotrop kabul edilmiş ve boşluk suyu basıncı hesaba dahil edilmemiştir.

RMR, kaya kütlesi sınıflama değerleri, tünel kazısının 1+332 (AT2SK-2)'Km'sinde 46 ve 2+528 (AT2SK-3)'Km'sinde ise, 54 olarak belirlenmiştir. Buna göre her iki tünel kilometresinde tünel kazısı sırasında uygulanacak kaya destek sınıfı "Orta kaya /sınıf-III" olarak belirlenmiştir

RMQR, kaya kütle kalitesi sınıflaması değerleri ise tünel kazısının, 1+332 (AT2SK-2) ve 2+528 (AT2SK-3) kilometrelerinde yapılan değerlendirmelerin her ikisinde de 58 olarak öngörülmüştür. Buna göre tünel kazısı sırasında uygulanacak destek "sınıf Orta /sınıf-IV" olarak belirlenmiştir.

Analitik çözümlenmelerde, AT2SK-2 no.lu sondaja ait karot örneklerinden elde edilen tasarım parametreleri kullanılarak oluşturulmuş boyuna deformasyon profilinde; kazı sırasında aynada oluşan yer değiştirme 0,0006 m ve en büyük yer değiştirme ise aynadan yaklaşık 13,0 m geride 0,0021 m olarak bulunmuştur. Kazı sırasında tünel çevresinde oluşacak plastik bölgenin yarıçapı  $p_i = 0$  (desteksiz) koşulunda 3,6 m olarak hesaplanmıştır. RMR sisteminin önerdiği şekilde destek aynadan 10 m geride oluşturulduğunda, tüneline oluşacak yer değiştirme 0,002 m, RMQR destek sisteminin aynadan 5,0 m geriye yerleştirilmesi halinde ise yer değiştirme 0,0019 m olarak bulunmuştur.

AT2SK-3 no.lu sondaja ait karot örneklerinden elde edilen tasarım parametreleri kullanılarak oluşturulmuş boyuna deformasyon profilinde ise; kazı sırasında aynada oluşan yer değiştirme 0,001 m ve en büyük yer değiştirme ise aynadan yaklaşık 15,0 m geride 0,0037 m olmaktadır. Kazı sırasında tünel çevresinde oluşması beklenen plastik bölgenin yarıçapı  $p_i = 0$  koşulunda 3,8 m'dir. RMR sisteminin önerdiği şekilde destek aynadan 10 metre geride oluşturulduğu takdirde tüneline oluşacak yer değiştirmenin 0,0036 m'ye, RMQR destek sisteminin aynadan 5,0 metre geriye yerleştirilmesi halinde ise yer değiştirmenin 0,0033 m'ye ulaşması beklenmektedir.

Analitik çözümlenmelerde belirlendiği gibi, T3 tüneline kazısı sırasında beklenen kaya kütlesi, RMR ve RMQR kaya destek sistemlerinin önerdiği şekilde uygulandığında, RMR

destek sisteminin 0,7 MPa ve RMRQR destek sistemini ise 3,3 MPa gibi yüksek destek basınçlarının elde edildiği kaya destek etkileşim eğrilerinden görülmüştür. RMQR kaya destekleme sistemi RMR sistemine göre aynaya 5 m daha erken yerleştirilmesine rağmen destek basıncı göz önünde bulundurulduğunda oldukça güvenli kalmıştır.

Yapılan çalışmada, tünel etrafındaki kaya kütlelerinin zamana ve deforme olmasına bağlı olarak dayanım özelliklerinin azalması dikkate alınmamıştır. İleride yapılması düşünülen çalışmalarda süreksizlikler ile birlikte tüneli çevreleyen kaya kütleleri özelliklerindeki dikkate alınması önerilmektedir.

Kontrol edilebilmesi mümkün olmayan kısıtlar nedeniyle çok az sondaj ve arazi jeolojik verisi kullanılmak zorunda kalmıştır. Bu nedenle, tezde verilen sonuçların, temel kavramların uygulanması şeklinde dikkate alınması doğru olacaktır.

Gerek kapanma-sınırlama, gerekse sayısal analizlerde kazı açıklığının desteğin uygulanması ile birlikte düşük deformasyon gösterdiği ve destek sistemlerinin başarılı bir şekilde deformasyonu azalttığı görülmektedir.

Yapılan analitik ve sayısal analizler; kazının aynada tamamlanmasıyla desteklenmesi arasında geçen süre içerisinde daha büyük bir deformasyon aralığının oluşması halinde, kaya destek sınıfları ile belirlenen sistemli desteklerin daha belirgin olarak farklılık göstereceğini ortaya koymuştur.

## KAYNAKLAR

- [1] Yersu Mühendislik ve Müşavirlik Ltd. Şti., *Akşar Regülatörü ve Nazar Hes Temel Sondaj Kuyuları Araştırma Raporu*, Akşar Nazar Enerji Üretim A.Ş., Diyarbakır, 18s, **2012**.
- [2] Pro-Sem Mühendislik Mimarlık Müşavirlik Ltd. Şti., *Akşar Regülatörü ve Nazar Hes Revize Fizibilite Raporu*, Akşar Nazar Enerji Üretim A.Ş., 81 s, **2011**.
- [3] Bieniawski, Z. T., *Engineering Rock Mass Classifications*, John Willey and Sons, p. 237, **1989**.
- [4] Aydan, Ö., Ulusay, R., Tokashiki, N., A New Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, pp.1255-1276, **2014**.
- [5] Şengün, M., *Tatvan Güneyinin (Bitlis Masifi) Jeolojik/Petrografik/ incelenmesi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü “Doktora Tezi”. Ankara, **1984**.
- [6] Şengün, M., Çağlayan, M. A., Sevin, M., Bitlis Masifi Bitlis-Tatvan- Hizan Şirvan Dolayının Jeolojisi, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeolojik Etütleri Dairesi, Rapor No: 9105, Ankara, **1991**.
- [7] Hoek, E., Kaiser, P.K, Bawden, W.F, Support of Underground Excavations in Hard Rock, Balkema, Rotterdam, p.225, **1995**.
- [8] Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J., Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 6 (4), pp. 189-239, **1974**.
- [9] ISRM, *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*, R. Ulusay, J.A. Hudson (ed.), Suggested Methods prepared by the ISRM Commission on Testing Methods, Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, p. 628, **2007**.
- [10] Singh, B. ve Goel, R.K., *Tunnelling in Weak Rocks*, Hudson, J.A. (Ed.). Elsevier Geo-Engineering Book Series, Vol. 5, p. 489, **2006**.

- [11] Aydan, Ö., Ulusay, R., Tokashiki, N., Yeni bir kaya kütlesi sistemi: Kaya Kütle Kalitesi Puanlama (RMQR) Sistemi ve kaya kütlelerinin jeomekanik özelliklerinin tahmininde uygulanması, *KAYAMEK 2014: XII Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, 7-9 Mayıs 2014, Afyonkarahisar, s. 165-174, **2014**.
- [12] Aydan, Ö., Ulusay, R., An application of RMQR Classification System to rock-support design for underground caverns and tunnels. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Underground Excavations for Transportation*, N. Bilgin, H. Çopur, C. Balcı (eds.), 29-30 November 2013, İstanbul, pp. 387-398, **2013**.
- [13] Aydan, Ö., Ulusay, R., Rock Mass Quality Rating (RMQR) System: Its application to estimation of geomechanical characteristics of rock masses and to rock support selection for underground caverns and tunnels, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Asian Rock Mechanics Symposium-ARMS8 (An ISRM International Symposium)*, Sapporo, Japan, Paper No. SCD1-3 (on CD), **2014**.
- [14] Bucher, N. H., Deformation in Orogenic Belts, *Geol. Soc. Amer.*, Special Paper, 62, 343-368, **1955**.
- [15] Anonim, depbölge/bitlis, <http://www.deprem.gov.tr/sarbis/depbolge/bitlis.gif>, (Haziran, **2014**).
- [16] Fell, R. and Jeffery, R. P., Determination of drained shear strength for slope stability analysis. *In Soil Slope Instability and Stabilisation*, B. F. Wolker and R. Fell (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 53-70, **1987**.
- [17] Hoek, E., Rock mass properties for underground mines, *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*, Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), p. 20, **2001**.
- [18] Weijermars, R., *Structural Geology and Map Interpretation*, Lecture In Geoscience, Alboran Science Publishing, Amsterdam, p. 378, **2011**.
- [19] Hoek, E., *Practical Rock Engineering*, Dept of Mining Engineering, University of Chile, October 14-18, p. 225, **1996**.
- [20] Hoek, E., and Brown, E. T., *Underground Excavations in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, London, p.527, **1980**.
- [21] Hoek, E., Strength of jointed rock masses, 23rd. Rankine Lecture. *Géotechnique* 33 (3), pp. 187-223, **1983**.

- [22] Hoek, E., Diederichs, M. S., Empirical Estimation of rock Mass Modulus, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Elsevier, 43 (2006) pp. 203-215, **2005**.
- [23] Nicholson G. A., and Bieniawski Z. T., A non-linear deformation modulus based on rock mass classification. *Int. J. Mining and Geological Engineering*, 8, pp. 181-202, **1990**.
- [24] Sönmez. H. ve Ulusay, R., A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies, *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 26 (2002), pp. 77-99, Ankara, **2002**.
- [25] Ulusay, R., Sönmez, H., *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri*, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları, No: 60, Ankara, 243 s, **2002**.
- [26] Sönmez H. ve Ulusay R., Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, No 36 (1999) pp. 743-760, **1999**.
- [27] Kendorski, F. S., Cummings, R. A., Bieniawski, Z. T. and Skinner, E. H., Rock mass classification for block caving mine drift support, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Congress on Rock Mechanics*, ISRM, Melbourne, pp. B51-B63, **1983**.
- [28] Palmstrom, A., The Volumetric Joint Count – A Useful and Simple Measure of The Degree of Rock Mass Jointing, *IV Congress International Association of engineering Geology*, Volume 2, New Delhi, pp. 221-228, **1982**.
- [29] Hoek, E., Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 12 (3), pp. 227-229, **1990**.
- [30] Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., and Corkum, B., Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada, Vol 1, pp. 267-273, **2002**.
- [31] Curran, J.H., Hammah, R.E., Yacoub, T.E., A Two-Dimensional Approach For Designing Tunnel Support In Weak Rock, *Proceedings of the 56th Canadian Geotechnical Conference*, Winnepeg, Manitoba, Canada, p.6, **2003**.



- [32] Carranza-Torres, C. and Fairhurst C., Analysis of tunnel support requirements using the Convergence-Confinement method and the Hoek-Brown rock failure criterion, *An International Conference on Geological and Geotechnical Engineering*, Melbourne, Australia, p.10, **2000**.
- [33] Carranza-Torres, C. and Fairhurst C., Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15 (2), pp. 187-213, **2000**.
- [34] Vlachopoulos, N. and Diederichs, M., Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels, *Rock mechanics and rock engineering*, pp. 131-146, **2009**.
- [35] Bray, B.H.G., Brown, E.T., *Rock Mechanics for Underground Mining*, Kluwer Academic Publisher, USA, p. 628, **2004**.
- [36] Panthi, K. K., Evaluation of Rock Bursting Phenomena In A Tunnel In the Himalayas, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 71, pp.761-769, **2012**.
- [37] Sheorey, P.R., A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 31(1), pp. 23-34, **1994**.
- [38] Pariseau, W. G., *Design Analysis in Rock Mechanics*, University of Utah Department of Mining Engineering, Balkema, Taylor & Francis e-Library, 2006. Salt Lake City, Utah, USA, p. 560, **2006**.
- [39] Goodman, R.E., *Introduction to Rock Mechanics*, Second edition, John WILEY and Sons, p. 562, **1989**.
- [40] Atkinson, J., *An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations*, New York: Mc Graw-Hill Book Company, **1993**.
- [41] Anonim, Tunnels in weak rock, [https://www.rocscience.com/hoek/corner/12\\_Tunnels\\_in\\_weak\\_rock.pdf](https://www.rocscience.com/hoek/corner/12_Tunnels_in_weak_rock.pdf), (Haziran, **2014**).
- [42] Anonim, Rock Support Interaction Analysis for Tunnels, <https://www.rocscience.com/library/rocnews/winter2012/Rock-Support-Interaction-Analysis-for-Tunnels-Hoek.pdf>, (Haziran, **2014**).

- [43] Anonim, RocSupport Tutorial Manual, [https://www.rocscience.com/help/roc-support/webhelp4/pdf\\_files/RocSupport\\_Tutorial\\_Manual.pdf](https://www.rocscience.com/help/roc-support/webhelp4/pdf_files/RocSupport_Tutorial_Manual.pdf), (Haziran, **2014**).
- [44] Palmstöm, A., and Nilsen, B., Engineering Geology and rock Engineering, Oslo, Norway: NBG, **2000**.
- [45] Geoconsult / Tekfen Impresit J.V., *Training Lectures on Engineering Geology and NATM Tunneling*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Volume-2, Ankara, **1994**.
- [46] Hjalmarsson, E. H., *Tunnel Support Use of Lattice Girders in Sedimentary Rock*, A.A Balkema, Rotterdam, p. 272, **2011**.
- [47] Anonim, mai\_self-drilling bolts, [http://www.minovausa.com/pdfs/products/mai\\_sdbolts.pdf](http://www.minovausa.com/pdfs/products/mai_sdbolts.pdf), (Nisan, **2015**).
- [48] Hoek, E., Tunnel support in weak Rock, *Symposium of Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, Taiwan, November 20-22, p. 13, **1998**.
- [49] Hoek, E., David, F.Wood., Support in Underground Hard Rock Mines, *Underground Support System*. Volume 35, pp. 1-6, **1987**.
- [50] Anonim, IKSA\_TR, [http://www.kocaerhadde.com/MediaLibrary/11743/pdf/IKSA\\_TR\\_mail.pdf](http://www.kocaerhadde.com/MediaLibrary/11743/pdf/IKSA_TR_mail.pdf), (Haziran, **2015**).
- [51] Anonim, Phase2 v9.0, <https://www.rocscience.com/products/3/support>, (Kasım, **2014**).

# ÖZGEÇMİŞ

## Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Yücel DEMİRCAN  
Doğum Yeri : Kırıkkale / Hasandede  
Medeni Hali : Bekar  
E-Posta : ycl.demircan@gmail.com  
Adresi : Onur sk., 06570 Maltepe / ANKARA

## Eğitim

Lise : Ankara Atatürk  
Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

## Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce (İyi), Almanca (Orta)

## İş Deneyimi

- Erges Mühendislik ve Müş. Ltd. Şti.; HES planlama ve proje / Jeolog.
- Mega Mühendislik ve Müş. Ltd. Şti.; KGM tünel müşavlik hizmetleri ve Halkalı – Bulgaristan DLH hızlı tren projesi, planlaması ve projelendirilmesi / Kontrol Mühendisi.
- Pöyry Energy (Önceden, Verbundplan GmbH); Beton baraj, enerji tünelleri, tüneller, karayolu ve açık kazıların planlaması ve projelendirilmesi / Jeolog.
- Astaldi S.p.A.; Bolu dağı otoyolu tünel yapımı / Jeolog.
- Knauf; Endüstriyel hammaddeler / Jeolog.
- SİAL-Fugro; Büyük İstanbul içme suyu projesi Melen sistemi / Kontrol Mühendisi.

## Deneyim Alanları

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

### Tezden Üretilmiş Yayınlar

### Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar