



**KARAYOLU TÜNELLERİNDEKİ DEFORMASYONLARIN SONLU  
ELEMENLAR YÖNETİMİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ  
(AYDINCIK TÜNELİ, MERSİN)**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İREM KIZILDAĞ**

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİMDALI**

**MERSİN  
HAZİRAN- 2022**

**KARAYOLU TÜNELLERİNDEKİ  
DEFORMASYONLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ  
KULLANILARAK BELİRLENMESİ (AYDINCIK TÜNELİ,  
MERSİN)**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İREM KIZILDAĞ  
ORCID ID: 0000-0002-1778-8311**

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. KIVANÇ ZORLU ARAS  
ORCID ID:**

**MERSİN  
HAZİRAN - 2022**

## ÖZET

### KARAYOLU TÜNELLERİNDEKİ DEFORMASYONLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ (AYDINCİK TÜNELİ, MERSİN)

Karayolu tünelleri ulaşım konforu ve zaman yönetimi açısından yapılan en önemli mühendislik yapılarıdır. Bu yapıların tasarımından inşa aşamasına kadar her adımda çok yönlü düşünerek analizler yapılmalı ve doğru yöntemler kullanılarak proje ilerlemelidir. Projenin emniyetli bir şekilde ilerlemesi amacıyla tünelin açılacağı kaya ortamının tüm jeolojik ve jeomekanik özelliklerine hâkim olunmalı, bu özellikler dikkate alınarak tünel tasarımı yapılmalıdır. Kazı sırasında karşılaşılabilecek olan problemler ve oluşacak deformasyonlar için uygun destek sistemleri belirlenip, kazı işlemi kaya kütlesi duraylı bir hale geldikten sonra devam etmelidir.

Bu çalışmada New Austrian Tunnel Method (NATM) ile yapılan; Mersin-Anamur-13.B1.Hd. Devlet Yolu, Km:125+050 – 153+560 arasında bulunan ve Yeşilovacık – Aydınçık kesimini kapsayan T2 tüneline ait öngörülen destek sisteminin, gerilmelerin ve deformasyonların Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak modellenmesi amaçlanmıştır. Tünel genelleştirilmiş stratigrafik kesite göre Sipahili Formasyonunda ve kaya kütlesi ortamında açılmış olup çift tüplü ve uzunluğu 1885 metredir. Tünel alt yarı ve üst yarı olmak üzere 2 kademede kazılmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından yüklenici olarak atanan firmadan sağlanan verilere göre tünel güzergâhı şist, şeyl ve kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Bu birimler Rock Mass Rating (RMR) sınıflama sistemine göre çok zayıf, zayıf ve orta kaya sınıfındadır. Q sınıflama sistemine göre ise birimler çok fazla zayıf kaya ve çok zayıf kaya sınıfında bulunmaktadır. Yüklenici firma tarafından tünel portallarında birimleri temsil eden sondaj kuyularından alınan örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılarak jeolojik ve jeomekanik özellikler belirlenmiştir. Kaya kütlesinin süreksizlik özellikleri ile bir Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı (SCR) ve Yapısal Özellik Puanı (SR) belirlenerek GSI (Geological Strength Index) hesaplanmıştır. RMR ve Q değeri bir bütün olarak değerlendirilerek NATM ÖNORM 1994'a göre uygun kazı yöntemi ve destek sistemleri tanımlanmıştır. Kayaçlara ait Deformasyon Modülü (Erm), Elastik Modülü (Ei), mb, s ve a gibi parametreler Roclab 1.0 yazılımı ile hesaplanmıştır.

Destek sistemlerinin ve deformasyonların modellenmesi için Phase 2D (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) bilgisayar programı kullanılmış, uygun yenilme ölçütü olarak Hoek-Brown yenilme ölçütü seçilerek kaya kütlesinin parametreleri modele tanımlanmıştır. Her bir sınıf için belirlenen destek elemanları kademeli olarak modellenmiş ve oluşan deformasyonlar belirlenmiştir. Ayrıca kazı öncesi ve sonrası gerilim dağılımları da 2 boyutlu olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada tünel portalları çalışmanın dışında tutulmuştur. Modelleme sonucu belirlenen referans noktalarına göre tünel içerisinde beklenen en yüksek deformasyon kireçtaşı biriminde, en düşük deformasyon ise şist biriminde görülmüştür. Tünel içerisinde en yüksek deformasyonların görüldüğü yer tünelin tepe noktasıdır. Gerilme analizlerine göre, en yüksek gerilmeler kireçtaşı birimine en düşük gerilmeler ise şist birimine aittir. Kazı öncesi ve kazı sonrası gerilmelerin karşılaştırılmaları yapıldığında kazı sonrası gerilmelerin büyük ölçüde azaldığı gözlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre tünelde gözlenen deformasyon değerlerinin deformasyon toleransı içerisinde kaldığı ve destek sistemlerinin yeterli olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tünel, Deformasyon, Sonlu Elemanlar, Tünel Destek Sistemleri, Modelleme

**Danışman:** Prof. Dr. Kıvanç Zorlu Aras, Mersin Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

## ABSTRACT

### DETERMINATION OF DEFORMATIONS IN HIGHWAY TUNNELS USING THE FINITE ELEMENT METHOD (AYDINCIK TUNNEL, MERSIN)

Highways tunnels are the most important engineering structures in terms of transportation comfort and time management. From the design of these structures to the construction stage, analyzes should be made by considering all aspects and the project should proceed by using the right methods. In order for the project to proceed safely, all geological and geomechanical features of the rock environment where the tunnel will be opened should be mastered, and a tunnel design should be made considering these features. Appropriate support systems should be determined for the problems and deformations to be encountered in during the excavation, and the excavation process should continue after the rock mass becomes stable.

In this study, was made with NATM (New Austrian Tunnel Method); Mersin-Anamur-13.B1. Hd. which is located between the State Highway, Km:125+050 – 153+560 and covers the Yeşilovacık – Aydıncık section. It is aimed to model the deformations and the applied support system of the T2 tunnel, using FEM (Finite Element Method). According to the generalized stratigraphic section, the tunnel was dug in the Sipahili Formation and in the rock mass environment, with double tubes and a length of 1885 meters. The tunnel was excavated in 2 steps as the lower half and the upper half. According to the data provided by the company appointed as the contractor by KGM (General Directorate of Highways), the tunnel route consists of schist, shale and limestone units. These units are in the very weak, weak and medium rock class. Geological and geomechanical properties were determined by using laboratory experiments on the samples taken from the drillings representing the units in the tunnel portals by the contractor company. With these parameters, the rock mass was classified by choosing the RMR (Rock Mass Rating) and Q System from the classification systems. The discontinuity properties of the rock mass and the GSI (Geological Strength Index) were calculated. By evaluating the RMR and Q values as a whole, appropriate excavation method and support systems were defined according to ÖNORM 1994 NATM. Parameters such as Deformation Modulus ( $E_m$ ), Modulus of Elasticity ( $E_i$ ),  $\mu$ ,  $\nu$  and  $\alpha$  of the rocks were calculated with Roclab 1.0 software.

Phase 2D (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) computer program was used for modelling the support systems and deformations, and the parameters of the rock mass were defined in the model by choosing the Hoek-Brown failure criterion as the appropriate failure criterion. The support elements determined for each class were gradually modeled and the resulting deformations were determined. In addition, pre- and post-excavation stress distributions are also shown in 2 dimensions. In this study, tunnel portals were excluded from the study. According to the reference points determined as a result of the modeling, the highest deformation expected in the tunnel was observed in the limestone unit, and the lowest deformation was observed in the schist unit. The point where the highest deformations are seen in the tunnel is the peak of the tunnel. According to the stress analysis, the highest stresses belong to the limestone unit and the lowest stresses belong to the schist unit. When the pre-excavation and post-excavation stresses were compared, it was observed that the post-excavation stresses were greatly reduced. According to the results determined from the study, it was observed that the deformation values observed in the tunnel remained within the deformation tolerance and the support systems were sufficient.

**Keywords:** Tunnel, Deformation, Finite Element Method, Tunnel Support System, Modelling

**Advisor:** Prof.Dr.Kıvanç Zorlu Aras, Department of Geological Engineering, Mersin University, Mersin.

## TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi çalışmasını yapmamda en büyük katkısı olan; bilgisi, tecrübeleri ve tavsiyeleri ile bana hem mesleki hem de hayata dair yol gösteren çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Kıvanç ZORLU ARAS'a teşekkür ederim. Tez kapsamında gerekli verilerin elde edilmesini sağlayan Karayolları 5.Bölge Müdürlüğü 51.Şube Şefliği 'ne teşekkür ederim.

Ayrıca; tecrübelerini ve bilgilerini benimle paylaşarak, desteğini esirgemeyen Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliğin'de bulunan Dr. Ar. Gör Emre PINARCI'ya, tünel projesine ait gerekli bilgi ve verilerin sağlanmasındaki katkılarından dolayı Tünel Şefi Jeoloji Yüksek Mühendisi Çağlar AKKUŞ'a teşekkür ederim.

Son olarak bu çalışmadaki en büyük teşekkürün sahibi olan, sevgisi, maddi ve manevi desteği ile her zaman yanımda olan canım babam Sedat KIZILDAĞ'a ve canım annem Şerife KIZILDAĞ'a, verdiği güzel enerjisi ve sevgisiyle can dostum ALFA'ya teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
<b>İÇ KAPAK</b>	i
<b>ONAY</b>	ii
<b>ETİK BEYAN</b>	iii
<b>ÖZET</b>	iv
<b>ABSTRACT</b>	v
<b>TEŞEKKÜR</b>	vi
<b>İÇİNDEKİLER</b>	vii
<b>TABLolar DİZİNİ</b>	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b>	x
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b>	xii
<b>1.GİRİŞ</b>	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
1.2.Çalışma Alanın Özellikleri	2
1.2.1.Çalışma Alanının Konumu	2
1.2.2.İklim ve Bitki Örtüsü	3
1.2.3. Depremsellik	5
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI</b>	6
2.1. Önceki Çalışmalar	6
2.1.1. Tüneller ile İlgili Yapılan Çalışmalar	6
2.1.2. Bölgenin Jeolojisi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	8
2.2. Bölgenin Genel Jeolojisi	8
2.2.1. Stratigrafi	8
2.2.1.1. Sipahili Formasyonu	9
2.2.1.2. Hüdai Formasyonu	9
2.2.1.3. Çaltepe Formasyonu	9
2.2.1.4. Seydişehir Formasyonu	9
2.2.1.5. Büyükeceli Formasyonu	10
2.2.1.6. Akdere Formasyonu	10
2.2.1.7. Korucuk Formasyonu	10
2.2.1.8. Kırtıldağı Formasyonu	11
2.2.1.9. Mut çukuru Formasyonu	11
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b>	13
3.1. Kaya Kütleli Sınıflama Sistemlerinin Belirlenmesi	13
3.1.1. RMR (Rock Mass Rating System) Kaya Kütle Sınıflama Sistemi	14
3.1.2.Q Kaya Kütleli Sınıflama Sistemi	19
3.1.3. RMR ve Q Değerleri Arasındaki İlişki	24
3.1.4.Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	25
3.1.4.1.Hoek-Brown Görgül Yenilme Ölçütü	25
3.1.5.NATM (New Austrian Tunneling Method) Tünel İnşa Metodu	29
3.1.5.1. NATM'a Göre Kaya Sınıfının Belirlenmesi	31
3.2.Arazi Çalışmaları	33
3.2.1.Sondaj Çalışmaları	33
3.3. Laboratuvar Çalışmaları	35
3.3.3.1.Birim Hacim Ağırlık Deneyi	35
3.3.3.2.Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi	35
3.4. Jeomekanik Parametrelerin Belirlenmesi	36
3.4.1.Mi sabitinin belirlenmesi	36
3.4.2. Mb, s ve a Değerlerinin Belirlenmesi	37
3.4.3. Elastite Modülünün Belirlenmesi	38
3.4.4.Deformasyon Modülünün Belirlenmesi	39
3.4.5.Örselenme Faktörünün Belirlenmesi	39

	<b>Sayfa</b>
3.5.Deformasyon Ölçüm Yöntemlerinin Belirlenmesi	40
3.5.1.Total Station ile 3 Boyutlu Deformasyon Ölçümü	40
3.6.Deformasyonların Analiz Yöntemleri ve Modellenmesi	40
3.6.1.Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)	40
3.6.2. Phase 2D(Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) Programı	42
3.6.3.Phase 2D Programında Kullanılacak Girdi Parametrelerinin Belirlenmesi	42
<b>4. BULGULAR ve TARTIŞMA</b>	<b>43</b>
4.1. Arazi ve Laboratuvar Deneyleri	43
4.1.1. Sondaj Çalışmalarından Elde Edilen Parametreler	43
4.1.1.2.RQD( Rock Quality Designation) Değeri	43
4.1.2.Birim Hacim Ağırlık Deneyi	43
4.1.3.Tek Eksenli Basınç Deneyi	43
4.2.Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemlerinin Belirlenmesi	43
4.2.1.RMR Sınıflama Sistemi	43
4.2.2.Q Sınıflama Sistemi	44
4.2.3.Birimlerin Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	47
4.3. Jeomekanik Parametrelerin Belirlenmesi	51
4.3.1.Mi Sabitinin Belirlenmesi	51
4.3.2.Örselenme Faktörünün (De) Belirlenmesi	51
4.3.3.Elastiste Modülünün Belirlenmesi	51
4.3.4.Deformasyon Modülünün Belirlenmesi	51
4.3.5.Poisson Oranının Belirlenmesi	52
4.3.3. Roclab 1.0 Yazılımı ile Kaya Kütlelerine Ait Jeomekanik Parametrelerin Hesaplanması	52
4.5. Tünel Ait Kazı Yönteminin Belirlenmesi	54
4.6.Tünel Destek Sistemleri	54
4.6.1.Sürenler	55
4.6.2.Çelik İksa	56
4.6.3.Püskürtme Beton	58
4.6.4.Kaya Bulonları	59
4.7. NATM'a Göre Belirlenmiş Tünel Destek Elemanları ve Özellikleri	61
4.8. Modellemede Belirlenen Deformasyon ve Gerilim Noktaları	63
4.9.NATM 'a Göre Tünel Kazısı ve Destek Elemanlarının Modellenmesi	64
4.9.1. C2 Sınıfında Bulunan Şist'e Ait Destek Elemanları Modelleme Adımları	64
4.9.2.C2 Sınıfında Bulunan Şist Birimine Ait Deformasyon ve Gerilim Analizleri	68
4.9.3. C2 Sınıfında Bulunan Şeyl Birimine Ait Destek Elemanları Modelleme Adımları	71
4.9.4. C2 Sınıfında Bulunan Şeyl Birimine Ait Deformasyon ve Gerilim Analizleri	76
4.9.5. B3 Sınıfında Bulunan Kireçtaşı Birimine Ait Destek Elemanları Modelleme Adımları	79
4.9.6. B3 Sınıfında Bulunan Kireçtaşı Birimine Ait Deformasyon ve Gerilim Analizleri	83
<b>5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b>	<b>85</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>88</b>
<b>EKLER</b>	<b>90</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>91</b>

## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo 3.1.</b> RMR Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi'nin en son hali	15
<b>Tablo 3.2.</b> Süreksizlik yüzeyi koşulunun puanlandırılması için önerilen kılavuz	16
<b>Tablo 3.3.</b> Kaya Sınıfları ve Puanları	16
<b>Tablo 3.4.</b> Tünelde Süreksizlik Eğim ve Doğrultusunun Etkisi	16
<b>Tablo 3.5.</b> Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme	16
<b>Tablo 3.6.</b> RMR sistemine göre kazı ve tahkimat tipi	18
<b>Tablo 3.7.</b> Kaya Kalite Göstergesi (RQD	20
<b>Tablo 3.8.</b> Eklem Takımı Sayısı	20
<b>Tablo 3.9.</b> Eklem pürüzlülük sayısı	20
<b>Tablo 3.10.</b> Eklem alterasyon sayısı	21
<b>Tablo 3.11.</b> Eklem su azaltma faktörü	21
<b>Tablo 3.12.</b> Gerilim azaltma faktörü	22
<b>Tablo 3.13.</b> Q değerine göre kaya sınıfları	23
<b>Tablo 3.14.</b> Yeraltı kazıları için orjinal ve güncelleştirilmiş kazı destek oranları	23
<b>Tablo 3.15.</b> Blok boyutu tanımlamaları ve Jv parametresi aralıkları	26
<b>Tablo 3.16.</b> mi sabiti değerleri için kullanılan tablo	29
<b>Tablo 3.17.</b> Q,RMR ve NATM karşılaştırılması	31
<b>Tablo 3.18.</b> NATM'a göre kaya sınıflandırılması	32
<b>Tablo 3.19.</b> NATM'a göre kaya sınıflandırılması	33
<b>Tablo 3.20.</b> MR (Modulus Ratio) değer seçimi kılavuzu	39
<b>Tablo 4.1.</b> Kaya kütlelerine ait RMR Puanları	44
<b>Tablo 4.2.</b> Kaya Kütlelerinin RMR Puanı ile Sınıflandırılması	44
<b>Tablo 4.3.</b> Birimlerin Elastite Modülü Değerleri	51
<b>Tablo 4.4.</b> Birimlerin Deformasyon Modülü Değerleri	51
<b>Tablo 4.5.</b> Kaya kütlelerine ait Phase programında kullanılan girdi parametreleri	54
<b>Tablo 4.6.</b> C2 sınıfına ait tünel destek elemanlarının teknik özellikleri	63
<b>Tablo 4.7.</b> B3 sınıfına ait tünel destek elemanlarının teknik özellikleri	63



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Çalışma alanının yer bulduru haritası	3
Şekil 1.2. Tünel projesinin güzergahına ait uydu görüntüsü	3
Şekil 1.3. Mersin ili 1940-2021 yılları arası; ortalama sıcaklık değerleri	4
Şekil 1.4. Mersin ili 1940-2021 yılları arası; aylara göre yıllık yağış miktarı ortalaması	4
Şekil 1.5. Türkiye Deprem Tehlike Haritası	5
Şekil 1.6. Mersin ili Aydıncık ilçesi ve çevresi 5<M>10 Aralığında 1900-2022 yılları arasındaki depremler	5
Şekil 2.1. Aydıncık bölgesi genelleştirilmiş stratigrafi kesiti	12
Şekil 3.1. 1974 yılından günümüze kadar RMR kaya kütleli sınıflama sisteminde kullanılan parametreler	15
Şekil 3.2. RMR sisteminin 1989 versiyonunda tek eksenli sıkışma dayanımı, süreksizlik aralığı ve RQD parametrelerine ait puanların belirlenmesinde kullanılan grafikler	17
Şekil 3.3. RMR sistemine göre tahkimatsız durma süresi	17
Şekil 3.4. Q sistemi için güncelleştirilmiş destek abağı	19
Şekil 3.5. GSI Sınıflama Sistemi Abağı'nın "Sağlam ve Masif" kaya grubu eklendikten sonraki değiştirilmiş son hali	24
Şekil 3.6. Örselenme faktörünün belirlenmesi için kılavuz tablo	27
Şekil 3.7. Sondaj çalışmalarından bir görünüm	28
Şekil 3.8. Sondaj Çalışmalarından bir görünüm	29
Şekil 3.9. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deney Düzenegi	34
Şekil 3.10. Roclab programı ile mi sabitinin belirlenmesi	36
Şekil 3.11. Roclab programı ile Elastite Modülünün belirlenmesi	37
Şekil 3.12. Sonlu eleman analizinde kullanılan 2-boyutlu tipik elemanlar	38
Şekil 4.1. 140+320,47 km'ye ait ayna fotoğrafı	41
Şekil 4.2. 140+510,72 km'ye ait ayna fotoğrafı	45
Şekil 4.3. 141+309,42'ye ait ayna fotoğrafı	46
Şekil 4.4. 140+320,47 km 'de bulunan şist birimine ait Jeolojik Dayanım İndeksi	47
Şekil 4.5. 140+510,72 km 'de bulunan şeyl birimine ait Jeolojik Dayanım İndeksi	48
Şekil 4.6. 141+309,42 km 'de bulunan kireçtaşı birimine ait Jeolojik Dayanım İndeksi	49
Şekil 4.7. 140+320,47 km 'de bulunan şist birimine ait jeomekanik parametreler	50
Şekil 4.8. 140+510.72 km deki şeyl birimine ait jeomekanik parametreler	52
Şekil 4.9. 141+309,42 km'de bulunan kireçtaşı birimine ait jeomekanik parametreler	53
Şekil 4.10. NATM Destek Elemanları (Polat,2002)	53
Şekil 4.11. Süren uygulama şeması	54
Şekil 4.12. Süren delgisi uygulamasına ait bir görüntü	55
Şekil 4.13. Süren montajına ait bir görüntü	56
Şekil 4.14. Çelik İksa Tipleri	56
Şekil 4.15. Çelik İksa uygulamasına ait bir görüntü	57
Şekil 4.16. Çelik iksanın uygulanmış görüntüsü	57
Şekil 4.17. Püskürtme Beton uygulamasına ait bir görüntü	58
Şekil 4.18. Püskürtme Beton Uygularken Dikkat Edilmesi Gerekenler	59
Şekil 4.19. SN Bulon Tipi	59
Şekil 4.20. İBO Bulon Tipi	60
Şekil 4.20. Bulon delgisi açılma safhası	60
Şekil 4.21. Bulonlama işlemine ait bir görüntü	61
Şekil 4.22. Deformasyon ve gerilimler için referans noktaları	61
Şekil 4.23. Tünelin destek sistemleri ile 6 ağılı çözüme hazır hali (şist)	63
Şekil 4.24. Tünelin desteksiz ve doğal durumu	64
Şekil 4.25. Üst yarı kazısından önce sürenlerin aktif edilmesi	65
Şekil 4.26. Üst yarı kazısının yapılması	65
Şekil 4.27. Üst yarı kazısına kaya bulonlarının tanımlanması	66
Şekil 4.28. Alt yarı kazısının yapılması	66

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 4.29.</b> Çelik iksa ve püskürtme betonun kompozit olarak aktif edilmesi	67
<b>Şekil 4.30.</b> Alt yarıya ait kaya bulonlarının tanımlanması	68
<b>Şekil 4.31.</b> İvert betonunun alt yarıya tanımlanması	68
<b>Şekil 4.32.</b> Kazı ve Destekleme Sonrası Düşey Deplasmanlar (cm)	69
<b>Şekil 4.33.</b> Kazı Öncesi En Büyük Asal Gerilmeler ( $\sigma_1$ )	70
<b>Şekil 4.34.</b> Kazı sonrası en büyük asal gerilmeler( $\sigma_1$ )	70
<b>Şekil 4.35.</b> Kazı öncesi en küçük asal gerilmeler ( $\sigma_3$ )	71
<b>Şekil 4.36.</b> Kazı sonrası en küçük asal gerilmeler ( $\sigma_3$ )	71
<b>Şekil 4.37.</b> Tünelin destek sistemleri ile 6 ağılı çözüme hazır hali (şeyl)	72
<b>Şekil 4.38.</b> Tünelin desteksiz ve doğal durumu	72
<b>Şekil 4.39.</b> Üst yarı kazısından önce sürenlerin aktif edilmesi	73
<b>Şekil 4.40.</b> Üst yarı kazısının yapılması	73
<b>Şekil 4.41.</b> Üst yarı kazısına kaya bulonlarının tanımlanması	74
<b>Şekil 4.42.</b> Alt yarı kazısının yapılması	74
<b>Şekil 4.43.</b> Çelik iksa ve püskürtme betonun kompozit olarak aktif edilmesi	75
<b>Şekil 4.44.</b> Alt yarıya ait kaya bulonlarının tanımlanması	75
<b>Şekil 4.45.</b> İvert betonunun alt yarıya tanımlanması	76
<b>Şekil 4.46.</b> Kazı ve Destekleme Sonrası Düşey Deplasmanlar (cm)	77
<b>Şekil 4.47.</b> Kazı Öncesi En Büyük Asal Gerilmeler ( $\sigma_1$ )	77
<b>Şekil 4.48.</b> Kazı sonrası en büyük asal gerilmeler( $\sigma_1$ )	78
<b>Şekil 4.49.</b> Kazı öncesi en küçük asal gerilmeler ( $\sigma_3$ )	78
<b>Şekil 4.50.</b> Kazı sonrası en küçük asal gerilmeler ( $\sigma_3$ )	79
<b>Şekil 4.51.</b> Tünelin destek sistemleri ile 6 ağılı çözüme hazır hali (kireçtaşı)	79
<b>Şekil 4.52.</b> Tünelin desteksiz ve doğal durumu	80
<b>Şekil 4.53.</b> Üst yarı kazısından önce sürenlerin aktif edilmesi	80
<b>Şekil 4.54.</b> Üst yarı kazısının yapılması	81
<b>Şekil 4.55.</b> Üst yarı kazısına kaya bulonlarının tanımlanması	81
<b>Şekil 4.56.</b> Alt yarı kazısının yapılması	82
<b>Şekil 4.57.</b> Çelik iksa ve püskürtme betonun kompozit olarak aktif edilmesi	82
<b>Şekil 4.58.</b> Alt yarıya ait kaya bulonlarının tanımlanması	83
<b>Şekil 4.59.</b> Kazı ve Destekleme Sonrası Düşey Deplasmanlar (cm)	84
<b>Şekil 4.60.</b> Kazı Öncesi En Büyük Asal Gerilmeler ( $\sigma_1$ )	84
<b>Şekil 4.61.</b> Kazı sonrası en büyük asal gerilmeler( $\sigma_1$ )	84
<b>Şekil 4.62.</b> Kazı öncesi en küçük asal gerilmeler ( $\sigma_3$ )	85
<b>Şekil 4.63.</b> Kazı sonrası en küçük asal gerilmeler ( $\sigma_3$ )	85

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltma/Simge	Tanım
a	Malzeme Sabiti
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
c	Kohezyon
C	Santigrat
cm	Santimetre
cm <sup>3</sup>	Santimetreküp
dk	Dakika
D	Örselenme Faktörü
°	Derece
De	Eşdeğer çap
Em	Elastiste Modülü
Erm	Deformasyon Modülü
ESR	Kazı Destek Oranı
F	Yenilme Yüğü
Φ	İçsel Sürtünme Açısı
FF	Eklem Sıklığı
G	Gram
GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi
Is	Nokta Yüğü Dayanım İndeksi
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği
Ja	Eklem Yüzeyi Bozunma Değeri
Jn	Eklem Takımı Sayısı
Jr	Eklem Pürüzlülük Değeri
Jw	Eklem Su Azaltma Faktörü
Jv	Hacimsel Eklem Sayısı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
kN	Kilo Newton
L	Boy
N	Eklem Sayısı
m	Metre
m <sup>2</sup>	Metrekare
m <sup>3</sup>	Metreküp
mb	Boyutsuz Kaya Kütle Sabiti
mi	Boyutsuz Kaya Malzemesi Sabiti
mm	Milimetre
Mpa	Mega Pascal
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
MR	Modül Oranı
NATM	Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi
P	Yenilme Yüğü
Phase 2D	Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support
RMR	Kaya Kütleli Sınıflama Sistemi
RQD	Kaya Kalite Göstergesi
Rf	Dolgu Puanları
Rr	Süreksizlik
Rw	Bozunma
σ	Normal Gerilme
σc'	Tek Eksenli Basınç Dayanımı
σ1	Asal Gerilme
σ3	Yanal Gerilme
τ	Makaslama Dayanımı
s	Malzeme Sabiti

<b>Kısaltma/Simge</b>	<b>Tanım</b>
SCR	Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
SR	Yapısal Özellik Puanı
SRF	Gerilim Azaltma Faktörü
v	Hacim



## 1. GİRİŞ

Günden güne artış gösteren Dünya nüfusu ile birlikte doğru orantılı olarak mühendislik yapıları da çoğalmaktadır. Bu yapılar öncelikle insanların barınma ve ulaşım gibi temel ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik olarak tasarlanmaktadır. Bu ihtiyaçlardan birisi olan ulaşım; çeşitli yöntemlerle sağlanmaktadır. Bunlar, karayolu ulaşımı, denizyolu ulaşımı, havayolu ulaşımı ve demiryolu ulaşımıdır. Karayolu ulaşımı bu ulaşım çeşitleri içerisinde en sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Ancak yoğun nüfustan kaynaklı olarak trafik yoğunluğu ve topoğrafyadan kaynaklı olarak varış noktasının uzunluğu sebebiyle zaman yönetimi açısından bazı dezavantajlara sahiptir. Ulaşımı daha rahat ve kısa zaman içerisinde tamamlayabilmek amacıyla bazı mühendislik yapıları tasarlanmaktadır. Karayolu tünelleri de bu tasarımlarının en önemlilerinden bir tanesidir.

Tünel; Çevre kayaçları ile bir bütün olarak çalışan, bütünleşmiş bir jeoteknolojik sistemden oluşmuş yeraltı geçiş yapısıdır (Vardar,2013). Tüneller; karayolu tüneli, demiryolu tüneli, metro tüneli ve yaya tüneli gibi çeşitleri olan iki ucu açık yeraltı yapılarıdır. Bu yapılar zaman ve mesafeyi en verimli şekilde kullanmak ve daha yüksek standartlarda bir ulaşım sağlamak amacıyla tasarlanmaktadır. Tünellerin güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için, tasarım öncesinde ve esnasında bütün aşamaları sistematik olarak takip edilerek inşa edilmeli ve gerekli tüm adımlar bittikten sonra kullanıma hazır hale getirilmelidir. Tünel projelerinin başarılı ve emniyetli bir şekilde tamamlanabilmesi için mühendislik özellikleri detaylı olarak irdelenmelidir. Yeraltı kazısının yapılacağı kaya kütlesi veya zemin ortamının jeolojik ve yapısal özellikleri tüm detaylarıyla incelenmeli, jeomekanik parametreler belirlenerek kaya veya zemin sınıflaması doğru bir şekilde yapılmalıdır. Ayrıca tünel açma metodu, tünelin kazı yöntemi, tünelin geometrisi, tünel açımı sırasında karşılaşılan problemler, tünelde oluşan deformasyonlar ve tünel destek sistemleri bir bütün olarak değerlendirilmeli ve problemler için en uygun çözüm yöntemleri bulunarak proje ilerlemelidir.

Yeraltı kaya yapıları temelinde jeomekanik, mühendislik jeolojisi, genel jeoloji, jeofizik ve inşaat mühendisliğini bulunduran çok yönlü bir disiplin olarak tasarlanmaktadır (Vardar,2008). Tüneller gibi büyük mühendislik yapılarında karşılaşılan en kritik problemlerden birisi deformasyonlardır. Tünel üzerindeki gerilmeler, kaya kütlesi üzerinde yenilmeleri ve bunun sonucunda deformasyonları meydana getirmektedir. Yeraltında kazı yapılırken uygulanacak yöntemler ve destek sistemleri kayaların jeomekanik ve dayanım özellikleri tarafından yönetilmektedir (Özbek 2004). Tünelin ilk açım anından başlamak üzere her safhada deformasyonlar görülebilmektedir. Bu deformasyonların hızı ve sonucu geliştiği birime göre farklılıklar gösterir. Kimi kayalar artan deformasyonlar sonucunda yenilir, kimi kayalarda ise enerji sönümlenir ve deformasyonlar zamanla azalarak durur (Vardar, 2005). Bu yüzden deformasyonların sistemli ve periyodik bir şekilde, uygun yöntemler kullanılarak ölçülmesi gerekmektedir. Bu yöntemler jeodezik yöntemler ve jeoteknik yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Jeodezik ağılar oluşturularak yapılan ölçümlerde deformasyonlar belirli periyotlar ile elektronik uzaklık ve açıölçer yardımıyla ölçülerek bu zaman dilimleri arasında karşılaştırmalar yapılmaktadır. Diğer bir yöntem olan jeoteknik yöntemler deformasyon ölçümlerinde inklinometre, ekstansometre, konverjans ve gerilimölçerler kullanılmaktadır (Yalçınkaya ve Satır,2005). Bu ölçümler sonucunda uygun destek sistemleri ile gerekli önlemler alınarak ilerlenmesi gerekmektedir. Böylece deformasyonların tünele vereceği hasar kontrol altında tutulmalıdır. Tünel portallarında ve içerisindeki deformasyonlar, karmaşık bir problemi basite hale getiren Sonlu Elemanlar Metodu( SEM) tabanlı bilgisayar programları ile (Plaxis, Phase 2D,) modellenerek deformasyonların tünel içerisindeki dağılımları daha detaylı şekilde incelenme fırsatı bulunmaktadır. Böylece deformasyonlar daha somut bir hale getirilerek analiz edilmesi kolaylaşmaktadır.

### **1.1. Çalışmanın Amacı:**

Bu tez çalışmasında, ; Mersin-Anamur-13.Bl. Hd. Devlet Yolu, Km:125+050 – 153+560 bulunan Yeşilovacık – Aydınçık kesimindeki başlangıç km 139 + 924,97 ve bitiş km 141 + 719,97 olan tünel projesinin içerisindeki kaya kütlelerinde, jeolojik birimlerin değiştiği kilometre noktaları referans alınarak 3 farklı bölüme ayrılmış ve kaya kütle sınıflamaları buna göre yapılmıştır. Bu ayırım için km 140+312.53 ve 141+329.51 arası dikkate alınmıştır. Roclab 1.0 programı ile, tünel güzergahında bulunan 3 farklı bölüme (sektöre) ayrılmış olan kaya kütlelerine ait jeomekanik özellikler belirlenmiştir. Kaya sınıflamasından sonra belirlenen tahkimat elemanları ve kazı tasarımı bir SEM temeline dayanan Phase 2D programında modellenmiştir. Yapılan modelleme ile belirlenen koşullar altındaki deformasyonların düşey yöndeki dağılımı, kazı öncesi ve sonrası asal gerilimlerin değişimi 2 boyutlu olarak yorumlanmıştır.

### **1.1.Çalışma alanın özellikleri**

#### **1.2.1.Çalışma alanının konumu**

Çalışma alanı Mersin ilinin Orta Toroslar bölümündedir. Tez çalışmasına konu olan tünel mevcut Mersin-Antalya yolunda bulunmaktadır. Tünel projesi; Mersin-Anamur-13.Bl. Hd. Devlet Yolu, Km:125+050 – 153+560 Yeşilovacık – Aydınçık kesimini kapsamakta olup, Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 1.1).Tünel güzergahı Yanışlı- Sipahili arasında bulunmaktadır (Şekil 1.2.). Tünel sağ ve sol olmak üzere 2 tüpten oluşmaktadır. Sağ tüp km 139 + 825.05 ve 141 + 700.05 arasında olup 1885 metredir. Sol tüp ise km 139 + 924.97 ve 141 + 719.97 arasında olup 1795 metredir.



Şekil 1.1.Çalışma alanının yer bulduru haritası

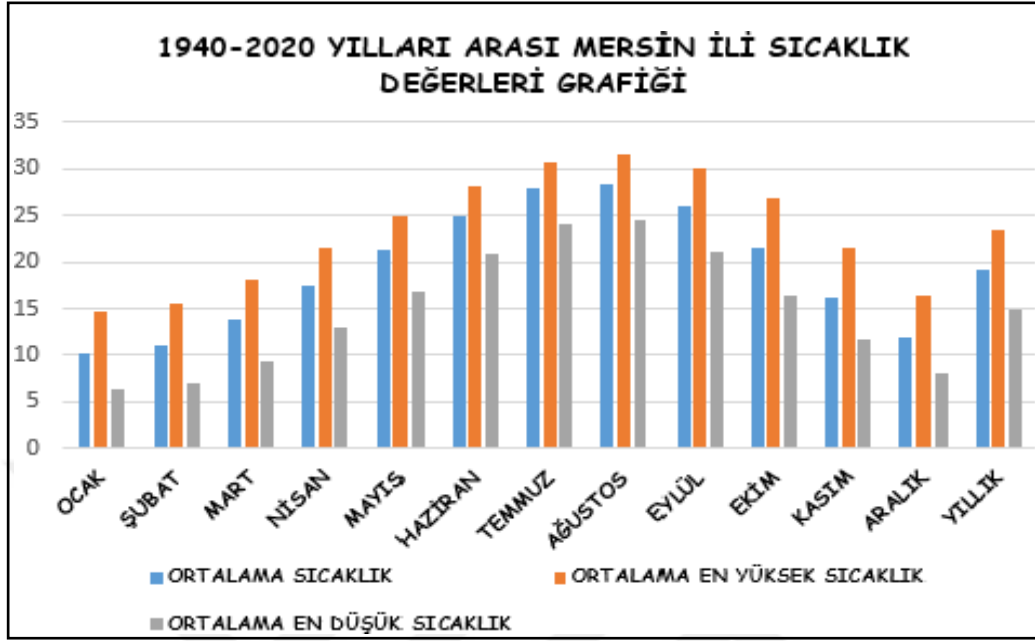


Şekil 1.2.Tünel güzergahına ait uydu görüntüsü

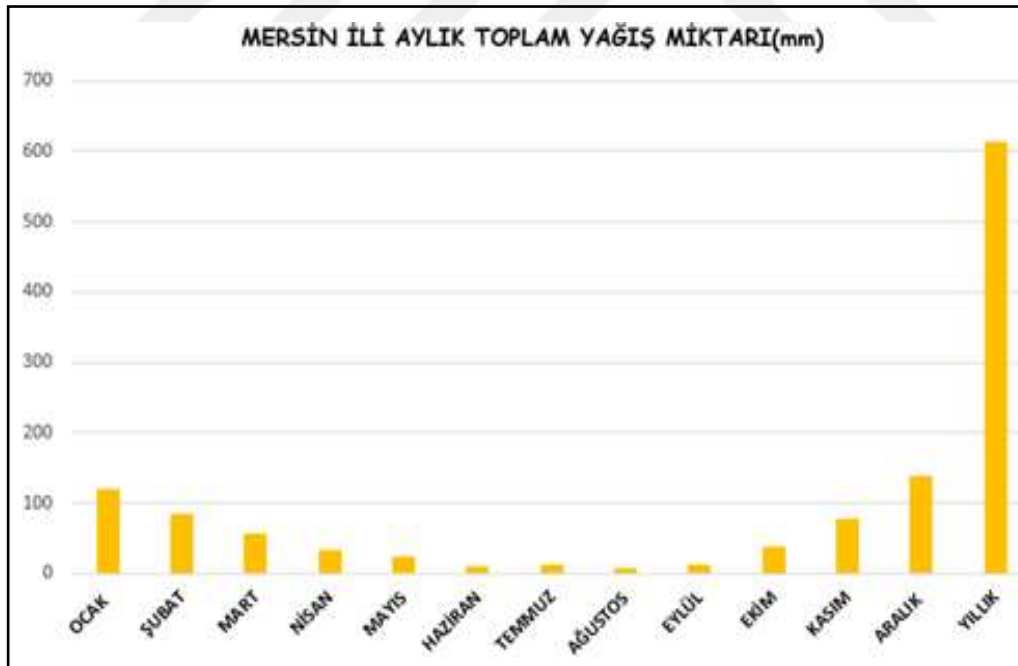
### 1.1.2. İklim ve Bitki Örtüsü

Çalışma bölgesinde Akdeniz iklimi hâkimdir. Akdeniz iklimi genel özellikleri itibari ile yazları sıcak ve kurak, kışları ise ılık ve yağışlıdır. Bölgeye hâkim olan bitkisi örtüsü genellikle makidir.1940-2021 yılları arası yapılan ölçümlerde en yüksek ortalama sıcaklık 30,8 C ve en düşük ortalama sıcaklık 6,4 C belirlenmiştir (Şekil 1.3.). Ortalama en yüksek sıcaklığın görüldüğü ay Ağustos ve ortalama en

düşük sıcaklığın gözleendiği ay ise Ocak ayıdır. Yıl içerisinde en yüksek yağış kapasitesine sahip aylar ise; Aralık, Ocak ve Şubat aylarıdır (Şekil 1.4.).



Şekil 1.3. Mersin ili 1940-2021 yılları arası ortalama sıcaklık değerleri (MGM,2022)



Şekil 1.4. Mersin ili 1940-2021 yılları arası; aylara göre yıllık yağış miktarı ortalaması (MGM,2022)



### 1.1.3. Depremsellik

AFAD (Türkiye’de Afet Acil Durum ve Yönetim Başkanlığı) tarafından yapılan çalışmalarda 1945, 1947, 1948, 1963, 1972 ve 1996 yıllarına ait Türkiye Deprem Haritası yayınlanmıştır. Zaman içerisinde bu haritalar yenilenip düzenlenerek 18 Mart 2018 tarihinde Resmi Gazetede yayınlanmış olup, 1 Ocak 2019 tarihinde de yürürlüğe girmiştir. En son yayınlanan haritaya göre ‘‘deprem bölgeleri’’ kavramı ortadan kaldırılmıştır. Deprem bölgeleri yerine en büyük yer ivmesi değerleri gösterilmiştir. Bu haritaya göre Mersin ili en büyük yer ivmesine 0.0 ve 0.1 aralığında düşük tehlikeli olarak değerlendirilmektedir (Şekil 1.5.). Bölgenin çevresinde 1900-2022 yılları arasındaki depremler Şekil 1.6.’da gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD,2018)



Şekil 1.6. Mersin ili Aydıncık ilçesi ve çevresi 5<M>10 Aralığında 1900-2022 yılları arasındaki depremler ( AFAD,2022)

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

### 2.1. Önceki Çalışmalar

#### 2.1.1. Tüneller ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Lauffer (1958), yaptığı çalışma ile tünellere ait ‘‘desteksiz açıklık boyutu’’ kavramını ortaya atmıştır. Desteksiz açıklık boyutu ile desteksiz durma süresinin kaya kütlelerinin özellikleri tarafından belirlendiğini savunmuştur. Tünel ekseninin yönelimi, tünel kesitinin şekli, kazı yöntemi ve destek yöntemi gibi başlıklar altında grafiklerle desteksiz açıklık boyutu ve ayakta kalma süresi hakkında ilişkiler ortaya koymuştur. Lauffer’ in ortaya attığı grafikler ve sınıflama yaygın olarak kullanılmamış, fakat daha sonra bu kavramların RMR sınıflama sistemine dâhil edilmesiyle yaygınlaşmıştır.

Müller vd. (1967), yaptıkları çalışmada tünellilik literatürüne NATM kavramını kazandırmışlardır. Bu yöntem kazı sonrası oluşacak yeni gerilim dağılımları ve deformasyonların yapılacak olan destekleme ile kayaya yönlendirilmesi temelini esas almaktadır. Bu çalışma grubu NATM’ ı bir tasarım felsefesi olarak ve ‘‘ İnce geçici bir destekleme yerleştirip, deformasyonlara izin vererek kaya basıncının düşürülmesi ve bu basıncın tüneli çevreleyen kayaya dağıtılması’’olarak tanımlamışlardır.

Bieniawski (1973), sedimanter kayalar içerisinde açılan tünellerde yaptığı gözlemler sonucunda RMR ( Rock Mass Rating) sistemini ortaya atmıştır. Bu sınıflama sistemi zaman içerisinde çok fazla modifikasyona uğrasa da sınıflamanın ön tasarım amacı ile sığ tünellere önerdiği destek sistemleri sıklıkla kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada ilk kez Lauffer (1958) tarafından öne sürülmüş olan tahkimatsız açıklık boyutu ile tahkimatsız durma süresi arasında bir ilişki kurmuş ve bir grafikte göstermiştir.

Barton vd. (1980), yaptıkları çalışmada kazının bulunduğu kaya ortamının eklem özelliklerine odaklanılarak yapıldığı bir Q sınıflama sistemi önermişlerdir. Bu sınıflama sisteminde RQD, Jn, Jr, Ja, Jw ve SRF gibi parametreler ile hesaplanan Q değeri 0.001 ile 1000 arasında değişmektedir. Tünelin açıklığı ve Q değeri bir abakta kesiştirilerek tünele ait geçici ve kalıcı destek sistemlerini belirlemişlerdir. Ayrıca Q sınıflama sistemi ek olarak kaya bulon ve ankraj boyutlarını tahmini, desteksiz durma süresinin belirlenmesi ve kaya kütlelerinin deformasyon modülünün tahmininde kullanılmaktadır.

Schubert vd. (2002), tünellerdeki deformasyon ölçüm yöntemlerinin sürekli olarak modifiye olduğunu ve bu ölçümlerin tünel projeleri için öneminden bahsetmişlerdir. Ölçümlerin grafiksel olarak değerlendirilmesinin uygun destek sistemleri hakkında önemli ipuçları vereceğini belirlemişlerdir. Çalıştıkları kaya kütleleri ile ilgili jeomekanik parametreler elde ederek kaya kütlelerinin davranışı ile deformasyonlar arasındaki bağlantıları detaylı bilgiler sunmuşlardır.

Özbek (2004), yaptığı doktora tezi çalışmasında Diyojen ve Kırgeçit-1 tünellerindeki kaya kütle özelliklerini belirleyerek RMR ve Q sınıflama sistemlerini kullanmıştır. Yenilme ölçütü olarak Hoek-Brown yenilme ölçütünü esas almış ve Phase 2D programı kullanılarak SEM yardımıyla tünelin destekleme sistemi olmadan önceki yer değiştirmeleri ölçülerek grafikleri yapılmıştır. Gözleme dayalı bir yöntem olan NATM ile kaya sınıfları ve uygun destekleme sistemleri belirlenmiştir.

Ak (2005), yaptığı yüksek lisans çalışmasında ampirik, analitik ve numerik olarak tünel tasarım yöntemlerinden bahsetmiştir. Çalışmanın devamında SEM'in temel prensiplerini anlatarak yer altı yapılarında kullanımını, bu kullanımın avantajlarını ve dezavantajlarını detaylı olarak aktarmıştır. Yaptığı uygulamada 2 boyutlu ve 3 boyutlu modelleme yapabilen Plaxis programını kullanmıştır. Devamında kazı öncesi ve sonrası malzemenin deformasyon dağılımlarını Plaxis programı aracılığı ile modellemiştir.

Çeçen (2007), yaptığı çalışmada jeoteknik yöntemlerle veriler elde etmiş, bu bilgileri analiz ederek İstanbul metrosu-Koska tünelleri ile ilgili deformasyon grafikleri çizmiştir. Bu deformasyonları irdeleyerek; deformasyonlara neden olan süreksizlik ve fay gibi yapısal özellikleri yorumlanmıştır. Yaptığı çalışmaların adımları neticesinde yüzey deformasyonlarını oluşturan etkin parametreleri belirlemiştir.

Satır (2007), yüksek lisans tez çalışmasında öncelikle tünel açma yöntemlerinden bahsetmiştir. Daha sonra tüneldeki deformasyonların belirlenmesindeki genel adımlara ve ölçüm yöntemleri hakkında genel bir bilgilendirme yapmıştır. Deformasyon ölçümlerini jeoteknik ve jeodezik olarak sınıflamıştır. Modellemede kullanacağı SEM hakkında bilgi vererek, ölçümlerini Plaxis programı kullanarak Trabzon tüneli üzerinde modelleyerek irdelemiştir. Yaptığı modelleme ile araziden alınan ölçümleri karşılaştırmıştır.

Doğruoğlu (2009), yüksek lisans tez çalışmasında, TBM yöntemi ile açılan İstanbul'daki Otogar-Bağcılar metro hattında çalışmıştır. Çalışmasında deformasyonları 3 farklı yöntem ile incelemiştir. Kullandığı yöntemler Chow, Gauss oturma eğrisi ve SEM dir. Daha sonra bu incelemeyöntemlerinin sonuçları hakkında kıyaslamalar yapmıştır. Çalışması sonucunda en güvenilir ve gerçeğeyakın ölçüm ve modelleme yönteminin SEM tabanlı bir program olan PLAXIS olduğunu belirlemiştir.

Dönder (2019), yüksek lisans tez çalışmasında Ordu ilinde bulunan Topçam tünelinin deformasyon modellemesini yapmıştır. Yaptığı bu modellemede Mohr-Coulumb yenilme kriterini kullanarak zemin parametrelerini programa aktarımını yapmıştır. Modelleme ile arazideki ölçüm sonuçlarını kıyaslamıştır. Kohezyon, içsel sürtüne açısı, rahatlama faktörü ve elastite modüllerini kendi aralarında çarparak 256 kombinasyon oluşturmuş ve bu kombinasyonlara ait analiz sonuçlarından deformasyonlara ait olasılık dağılım grafikleri belirlemiştir.

Yüceses (2019), yüksek lisans tez çalışmasında Çanakkale'deki Ayvacık-Küçükkuyu karayolundaki T1 tüneline incelemiştir. Tünel güzergâhının deprem kuşağında bulunması nedeni ile deformasyonların düzenli bir şekilde ölçülmesi ve takipte tutulması gerekmektedir. Deformasyonlar yatay ve düşey doğrultuda incelenmiştir. Bu incelemeler dikkate alınarak deformasyonlara neden olan

faktörler ve deprenselliğin deformasyonlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deprensellik ve deformasyonlar birlikte analiz edildikten sonra, projenin güvenli bir şekilde devam edebilmesi için tünel projesindeki gerekli destek sistemleri belirlenmiştir.

### **2.1.2. Bölgenin Jeolojisi ile İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar**

Demirtaşlı (1976), çalışmasında Toroslar bölgesini tamamen inceleyerek bölgeyi stratigrafik olarak karşılaştırma yapılabilecek formatta Doğu Toroslar, Orta Toroslar ve Batı Toroslar olarak üçe ayırmıştır ve Doğu Toroslarda yer alan bazı bölgeler ile Orta Toroslardaki bölgelerin benzerlik gösterdiğini vurgulamıştır.

Özgül (1976), yaptığı çalışmada Toros Kuşağının çeşitli bölümlerinden ve tektonik birliklerden bahsetmiştir. Bu tektonik birliklere ait isimlendirme, yaş bilgileri, stratigrafi ilişkileri ve metamorfizma özellikleri gibi konulara değinerek, birliklere ait enine kesitler sunmuştur.

Akay ve Uysal (1988), çalışmalarında farklı metamorfik, litolojik ve stratigrafik özellikler gösteren birbirinden değişik tektonik birliklerin Orta Torosları oluşturduğunu savunmuştur. Bu tektonik birliklerin 4 farklı sıkışma sistemi ile var olduğunu öne sürmüştür.

Koç (1996), yüksek lisans tezinde yaptığı çalışmada Orta Toroslarda bulunan tünel Aydıncık bölgesinin stratigrafisini ve jeotektoniğini yorumlamıştır. Bölge 12 adet farklı formasyona ayırılmış ve yaşları İnfakambriyen-Miyosen olarak belirlenmiştir. Çalışma alanından alınan arazi örneklerini incelenmiş ve birimlerin yaş, litoloji, sedimanlaşma ortamı ve metamorfizma gibi özellikleri belirlenmiştir. Koç (2003), ilerleyen yıllarda yaptığı doktora tezinde ise bölgeye ait olan Geyikdağı Tektonik Birliği ile Aladağ Tektonik birliğini inceleyerek Torosların tektonostratigrafisini ortaya koymayı amaçlamış ve bu birlikleri “Mezozooyik Çökeller” olarak ele alarak incelemiştir.

## **2.2. Bölgenin Genel Jeolojisi**

Çalışma alanı Doğu Toroslar, Orta Toroslar ve Batı Toroslar olarak üçe ayrılmış olan Toros Kuşağı içinden Orta Toroslar bölümünde yer almaktadır. Toroslar kuşağında yer alan tektonik birlikler; Alanya Birliği, Antalya Birliği, Aladağ Birliği, Geyikdağı Birliği, Bitlis-Pütürge Birliği, Bolcardağı Birliği ve Bozkırdağı Birliğidir. Çalışma yapılan alan ise Geyikdağı Tektonik Birliğinde bulunmaktadır. Bu tektonik birlik en yaşlı tabaka Sipahili Formasyonu olmak üzere gence doğru sırasıyla Hüdaî Formasyonu, Çaltepe Formasyonu, Seydişehir Formasyonu, Büyükeceli Formasyonu, Akdere Formasyonu, Korucuk Formasyonu ile Kırtıldağı Formasyonundan oluşmaktadır (Şekil 2.1.).

## **2.2.1. Stratigrafi**

### **2.2.1.1. Sipahili Formasyonu**

Formasyon ilk kez Demirtaşlı (1984) tarafından Aydıncık-Sipahili arasında bulunduğu için Sipahili formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bu formasyon farklı olan litoloji türünden dolayı diğer formasyonlardan kolayca ayırt edilmektedir. Önceki çalışmalarda formasyonun yaşının Alt Kambriyen olduğu düşünülse de bunu destekleyecek yeterli kanıtlar bulunamamış ve formasyon yaşının İnaKambriyen olduğu belirlenmiştir (Koç, 2003). Bölgede düşük dereceli metamorfizma özellikleri gösteren gri renkli ve sert yapılı kalkıştler, yeşilimsi gri ve ince tabakalı kloritşistler ve koyu gri, siyahımsı kireçtaşları hâkimdir.

### **2.1.1.2. Hüdai Formasyonu**

Bu bölge Batı Torosları kaplayan Hüdai Kuvarsitleriyle aynı litolojik yapıyı göstermesi sebebi ile Hüdai Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Aydıncık plajından başlayarak kuzeyde Çıra tepesine kadar uzanmakta ve Sipahili formasyonunu uyumlu olarak üzerlemektedir. Formasyonun yaşının stratigrafik olarak bulunduğu konum ve Orta Kambriyen yaşlı Çaltepe Formasyonunun birimi uyumlu olarak üzerlemesi nedeni ile Erken Kambriyen olduğu belirlenmiştir. Formasyon baskın karakter olarak adını aldığı kuvarsitleri barındırmaktadır. Kuvarsitler kahve-pembe veya kahve-beyaz renkli ve çapraz tabaklanmalıdır. Diğer bir tür olan siltaşları ise bordo-yeşil renkli ve ince tabakalı olarak bulunmaktadırlar (Koç, 2003).

### **2.1.1.3. Çaltepe Formasyonu**

Batı Toroslar bölgesinde bulunan formasyon, dolomitik kireçtaşı ve yumrulu kireçtaşı ile son bulur. Bu formasyon Dean ve Monod (1970) tarafından Çaltepe kireçtaşı olarak adlandırılmıştır (Özgül ve Gedik). Erken Kambriyen yaşlı Hüdai Formasyonu Çaltepe formasyonu tarafından uyumlu olarak üzerlenmektedir. Bölge diyajenetik değişimler ve metamorfizmaya uğramıştır. Bu sebeple bölgenin litolojisinin tanınması güçleşmiştir. Fakat genel özellikleri ele alındığında, formasyonun alt tabakası gri renkli dolomitik kireçtaşı üst tabakaya doğru ise pembe renkli kireçtaşlarından oluştuğu görülmektedir. Bölgede yaş kavramı için yapılan çalışmalarda Orta Kambriyen yaşlı Trilobidea cinsleri (Conocoryhpe ve Corynexochus) ve Brachiopod fosilleri bulunmuştur. Bu fosillerden yola çıkarak formasyon yaşının Orta Kambriyen olduğu sonucuna varılmıştır (Koç,2003).

### **2.1.1.4. Seydişehir Formasyonu**

Batı Toroslarda bulunan bölge genellikle şeyllerden oluşmaktadır. Batı Toroslar ve Orta Toroslarda Seydişehir formasyonunu Orta Kambriyen yaşlı olarak bulunan Çaltepe Formasyonu uyumlu

olarak üzerlemektedir (Gedik, 1980). Bölge sahip olduğu blok faylar ve çeşitli aşınmalar etkisiyle diğer farklı yaşlarda bulunan tabaklar ile uyumsuzluk göstermektedir. Bölgeye hâkim olan şeyller açık-koyu yeşil, açık-koyu kahve, siyah renkli olarak bulunmaktadır ve mikrokristalen yapı göstermektedirler. Formasyonun yaşına ilişkin yapılan çalışmalarda, Alt Ordovisyen ve Üst Kambriyen yaşı veren fosiller sebebiyle bölgeni yaşı Geç Kambriyen-Ordovisyen olarak belirlenmiştir (Koç,2003).

#### **2.1.1.5. Büyükeceli Formasyonu**

Bu formasyon Silifke-Anamur karayolu üzerinde ve çoğunlukla kireçtaşlarından oluşmaktadır. Büyükeceli formasyonu Geç Kambriyen-Ordovisyen yaşlı Seydişehir formasyonunu açısız uyumsuzlukla üzerlemektedir. Aynı zamanda ek olarak bu formasyon Silifke'nin batısındaki Alt Devoniyen yaşlı Sığırcık Formasyonunu da açısız olarak uyumsuzlukla üzerlemektedir. Formasyon kalınlığı net olarak ölçülemese de jeolojik kesitten yola çıkarak 350 m olduğu kanısına varılmıştır. Bölgeye genel olarak karbonatlar hakim olsa da yer yer kumtaşı seviyeleri gözlenmektedir ve sırasıyla konglomera, dolomitik kireçtaşı, kumtaşı ve yeniden dolomitik kireçtaşından oluşmaktadır. Büyükeceli formasyonun yaşı stratigrafik konumu ve bölgesel korelasyona göre Orta Devoniyen olarak belirlenmiştir (Koç,2003).

#### **2.1.1.6. Akdere Formasyonu**

Bu formasyon Aydıncık-Gülner yolu boyunca Enişdibi ve Sele mahallesi arasında bulunmakta ve Erken Karbonifer yaşlı Korucuk formasyonu tarafından uyumlu olarak üzerlenmektedir. Aynı zamanda faylanmalar ve aşınmalar sebebiyle Kırtıldağı formasyonu tarafından uyumsuz olarak bulunmaktadır. Akdere formasyonu litolojisi incelendiğinde kuvarsitik kumtaşı, silttaşı, şeyl ve kireçtaşından oluşmaktadır. Kireçtaşları koyu gri renkli, kuvarsitik kumtaşları pembe-beyaz renkli ve silt taşları yeşilimsi ve gri renklidir. Bölgenin yaşı referans alınan Brachypoda (Sprifer sp. Ve Atrypa sp.) ve Mercan (Zaprentis sp. Ve Hexagonoria sp. ) gibi fosillerden Geç Devoniyen olarak belirlenmiştir (Koç,2003).

#### **2.1.1.7. Korucuk Formasyonu**

Korucuk formasyonu, Sele mahallesi güneyinde Geç Devoniyen yaşlı Akdere formasyonu ile uyumlu olarak fakat Çömlekçi tepe güneyinde ise Orta Devoniyen yaşlı Büyükeceli formasyonu ile uyumsuz olarak bulunmaktadır. Demirtaşlı (1987), yaptığı çalışmada Korucuk formasyonunu 200 m olarak ölçmüştür. Bölgenin litolojisi tabandan yüzeye doğru, mercan ve bryzoa fosilleri içeren çakıllı-kumlu kireçtaşı, yeşilimsi-gri ince tabakalanmalı şeyl ile kumtaşları ve gri-koyu gri renkli kalın tabakalı kireçtaşlarından oluşmaktadır. Formasyonun yaşı Erken Karbonifer olarak belirlenmiştir (Koç,2003).

### **2.1.1.8. Kırtıldağı Formasyonu**

Demirtaşlı (1984) tarafından, gri renkli ve mikro fosil içeren kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşı Kırtıldağı formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bu formasyonun alt sınırı Erken Karbonifer yaşlı Korucuk Formasyonunu ve Geç Devoniyen yaşlı Akdere Formasyonu tarafından açısız uyumsuzlukla üzerlenmektedir. Demirtaşlı (1987b), Kırtıldağı Formasyonun kalınlığını 400 m olarak ölçmüştür. Bölgede genel olarak karbonatlar ve kuvarsitler hâkimdir. Litoloji alttan üste doğru detaylı olarak incelendiğinde kalın tabakalı ve sarımsı-kırmızımsı renkli kireçtaşı, orta kalın tabakalı ve pembe renkli kuvarsitler ve gri renkli orta –kalın tabakalı kireçtaşlarından oluşmaktadır. Kırtıldağı formasyonunun yaşı Geç Permiyen olarak belirlenmiştir (Koç,2003).

### **2.1.1.9. Mutçukuru Formasyonu**

Demirtaşlı (1984) ve Yüksel (1985) ayrı ayrı yaptığı çalışmalarda, Aydıncık-Anamur karayolu boyunca uzanan ve Aydıncığın kuzeydoğusunu üzerleyen bu alan için ‘‘Mutçukuru Formasyonu’’ adını kullanmıştır. Formasyonda hâkim olarak başlıca çakıl taşı, killi kireçtaşı, marn ve dolomitik kireçtaşı görülmektedir. Çakıllar genelde gri renkli ve iyi yuvarlanmış, kireçtaşları koyu gri renkli ve orta tabakalanmalı ve kireçtaşları ise bol kavkılı, açık-gri renkli olarak bulunmaktadır. Arazi çalışmaları ile bölgede bulunan fosiller tam bir yaş bilgisi sağlamamıştır fakat stratigrafik konuma göre bölgenin yaşı Geç Triyas olarak belirlenmiştir (Koç,2003).

Üst Sistem		Sistem		Seri / Kat		Formasyon		LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SENEZOYİK		Tersiyer		Alt Miyosen		Mut			
M E S O Z O Y İ K		Kretase		Kampaniyen- Maastrihtiyen		Yavça			Açık sarı, süt beyaz renkli, kalın tabakalı, masif, bol fosilli, resifal nitelikli kireçtaşı
				Hassancık kireçtaşı					Taban konglomera <b>Açısal Uyumsuzluk</b> Kireçtaşı, siltaşı ara seviyeli, açık kahve renkli kumtaşı
				Kırmızı renkli, ince tabakalı, bol globotruncanidli pelajik kireçtaşı					<b>Parakonkordans / düşük açılı uyumsuzluk</b>
				Bej-açık sarı renkli, kalın tabakalı, rudist kavkılı breşik kireçtaşı					<b>Açısal Uyumsuzluk</b>
		Jura		Lias		Alt			Bej-pembe renkli, orta tabakalı, mikritik kireçtaşı
		Malm		C e h e n e m d e r e					Açık gri, bej renkli, kalın tabakalı, miliolidli kireçtaşı
		Triyas		Üst		Marpakuru			Gri renkli, orta-kalın tabakalı dolomit
		Permian		Üst		Kirtildağı			Gri renkli, orta-kalın tabakalı dolomitik kireçtaşı, gri renkli, orta-kalın tabakalı, bol foraminiferli kireçtaşı ar dalanması
		Karbo.		Alt		Korucuk			Demirli kumtaşı seviyesi Megalodontlu kireçtaşı Monojenik konglomera Gri renkli, orta tabakalı dolomit, gri renkli orta-kalın tabakalı, kireçtaşı ar dalanması
		P A L E O Z O Y İ K		Devoniyen		Üst		Akidere	
Orta						Boydükeceli			Dolomitik kireçtaşı, Mizzi'a'lı kireçtaşı, kumtaşı, foraminiferli kireçtaşı ar dalanması
Alt						Sığircık			<b>Açısal uyumsuzluk</b> Dolomitik kireçtaşı, çamurtaşı arakatkılı, bol makro fosilli kireçtaşı
Silüriyen				Üst		Karayar			Kumlu kireçtaşı arakatkılı siltaşı, çamurtaşı, kuvars kumtaşı, bol makro fosilli kumlu kireçtaşı
				Alt		Hırmanlı			Breşik kireçtaşı, dolomit, dolomitik kireçtaşı
				Hüdaı		Çalpa Eğripinar			Konglomera, dolomit, kumtaşı <b>Açısal uyumsuzluk</b>
Kambriyen				Orta		Hüdaı			Dolomitik kireçtaşı, kireçtaşı, kuvars kumtaşı, siltaşı
				Alt		Hüdaı			Kireçtaşı, şeyl, siltaşı, kuvars kumtaşı ar dalanması
İnfa?-Pre Kambriyen				Sipahili					Kireçtaşı, şeyl, siltaşı, kuvars kumtaşı ar dalanması
									Ortoşeras'lı kireçtaşı seviyeli, yeşil-siyah renkli, ince tabakalı, graptolitli şeyl
							Konglomera, siltaşı-şeyl arakatkılı kuvars kumtaşı		
							<b>Açısal uyumsuzluk</b>		
							Gri renkli, kalın tabakalı dolomit, kireçtaşı		
							Kahve renkli, ince-orta tabakalı meta-şeyl arakatkılı, kahve, beyaz renkli, çapraz tabakalanmalı kuvarsit		
							<b>Uyumsuzluk</b>		
							Kalkşist, metakonglomera, fillat, metaşeyl ar dalanması		

Şekil 2.1. Aydınçık bölgesi genelleştirilmiş stratigrafi kesiti (Koç,2003)



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında; Mersin-Anamur-13.Bl.Hd. Devlet Yolu, Km:125+050 – 153+560 Yeşilovacık – Aydınçık karayolu tünelinin km 140+312.53 ve km 141+329.5 arasındaki kaya kütleleri jeolojik birimlerin değiştiği kilometre noktaları referans alınarak bölümlere ayrılmıştır. Her bir bölümün jeomekanik ve mühendislik özellikleri belirlenerek, RMR ve Q sistemine göre sınıflandırması yapılmıştır. Bu sınıflamalar dikkate alınarak destek sistemlerinin ve tünel içerisinde beklenen deformasyonların bir SEM teoremine dayanan Phase 2D programı ile modellenmesi yapılmıştır. Çalışma alanında kaya kütesine ait sınıflama özelliklerini belirlemek için arazide incelemeler ve değerlendirmeler yapılmıştır. Sınıflama sistemlerine ait gerekli parametrelerden olan süreksizlik özellikleri (devamlılık, açıklık, pürüzlülük vs.) hat etüdüleri ile belirlenmiştir. Tünel kazı işlemleri ve imalat aşamaları esnasında arazide gerekli fotoğraflamalar ve video çekimleri yapılmıştır. Analizlerde görgül bir yaklaşım olan Hoek-Brown yenilme ölçütü seçilmiştir. Elastite Modülü (Ei) ve Deformasyon Modülü (Erm) Roclab 1.0 yazılımı ile atanmıştır. Elde edilen parametreler ve kaya kütesinin sınıfı dikkate alınarak NATM prensibi ile uygun destek sistemleri ve kazı yöntemi öngörülmüştür. Bir sonraki adımda analiz için 6 ağırlık noktaları oluşturularak kaya kütesine ait Birim Hacim Ağırlık, Poisson Oranı, elastite modülü, deformasyon modülü, mb, s ve a gibi girdiler programa tanımlanmıştır. Kaya kütesine ait girdilerden sonra her bir kaya sınıfı için uygun destek sistemleri imalat sırasına göre adım adım eklenerek modellenmiştir. Destek sınıflarının tanımlanmasından sonra yapılan çözümleme ile olası deformasyonlar ve gerilim analizleri 2 boyutlu olarak ortaya konmuştur.

#### 3.1.Kaya Kütesi Sınıflama Sistemlerinin Belirlenmesi

Kaya kütleleri içerisinde gerçekleştirilen mühendislik yapılarına ait tasarım, kazıların emniyetli ve ekonomik olması açısından çok önemlidir. Kaya mühendisliğini de içerisinde alarak genel hatları ile jeoteknik tasarımlar analitik-sayısal, gözleme dayalı ve görgül olarak sınıflandırılmaktadırlar (Ulusay ve Sönmez,2007).

Kaya mekaniği alanında problem çözümlerinin kolaylaşması için gruplandırmalara gereksinim duyulmuştur. Bu ihtiyaçlar neticesinde çalışmalar yapılarak çeşitli sınıflama sistemleri belirlenmiştir. Bu sınıflama sistemleri gözlemler ve deneyimlerden faydalanılarak oluşturulmuş görgül sistemlerdir. Bieniawski (1988), kaya kütesi sınıflama sistemlerinin önemini aşağıdaki maddeler ile açıklamaktadır.

1. Kaya kütesinin davranış özelliklerini belirleyen parametreleri tayin etmek
2. Kaya kütesinin benzer özellik taşıyan bölgelerini ayırarak, farklı özellikteki kaya kütlelerini belirlemek
3. Mühendislik tasarımı için bir kılavuz oluşturmak
4. Tasarıma yönelik amaçlar için sayısal veriler elde etmek

5. Elde edilen veriler ile daha doğru mühendislik kararları verilmesi
6. Her kaya kütle sınıfının özelliklerinin anlaşılması amacıyla temel esaslar oluşturmak (Ulusay ve Sönmez,2007)
7. Bu bölümde yalnızca tünel için kullanılmış olan sınıflama sistemlerinden RMR VE Q sınıflama sistemine yer verilecektir.

### 3.1.1. Rock Mass Rating System (RMR) Kaya Kütle Sınıflama Sistemi

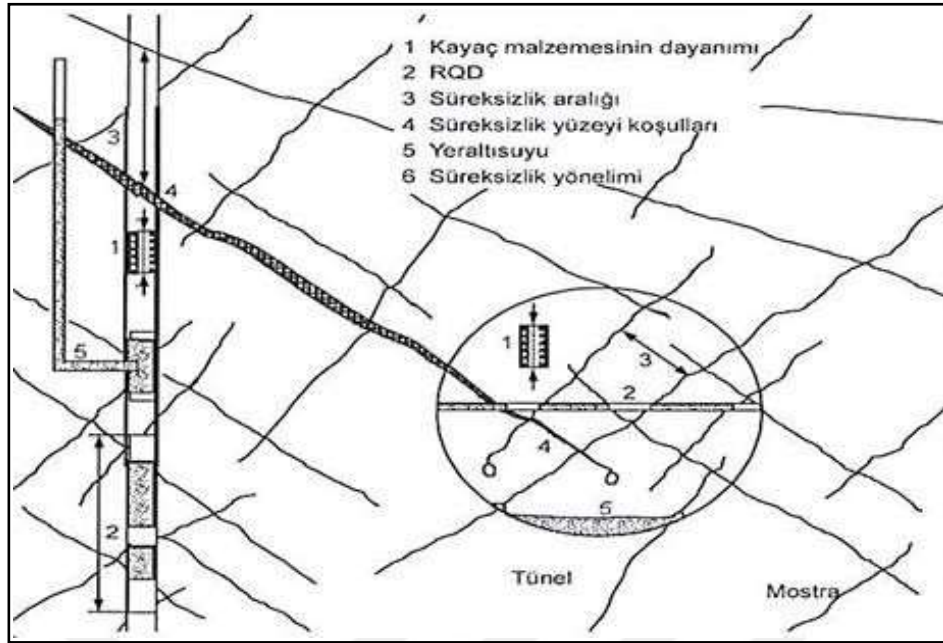
RMR ilk kez Bieniawski tarafından 1972-1973 yılları arasında çalışılmıştır. Bieniawski sedimanter kaya ortamında yaptığı tünel çalışmalarından edindiği tecrübeler ile bu sınıflama sistemini geliştirmiştir. Bu sistem yıllar içerisinde yapılan yeni gözlemler ve elde edilen veriler ile çeşitli modifikasyonlara uğramıştır. 1973-1989 yılları arasında tüneller, yer altı açıklıkları ve maden işletmeleri ile 351 adet uygulama ve yapılan deneyler sonucunda en son 1989 yılındaki şeklini almıştır (Ulusay ve Sönmez,2007) (Tablo 3.1.).

Sistemde ilk kez 1974 yılında Bienawski tarafından modifikasyonlar yapılmış ve 1973 yılında sınıflamanın ilk halindeki 8 olan parametre sayısı 6 ya düşürülmüştür (Şekil 3.1.). Kaya malzemesinin dayanımı, süreksizlik aralığı, RQD ve süreksizliklerin yönelimi gibi parametrelere ait puanlamalar 1973 'te önerilen haliyle aynı şekilde kullanılmaya devam edilmiş fakat bozunma, süreksizliklerin açıklığı ve devamlılığı gibi kriterler genel olarak "süreksizliklerin durumu" olarak tek bir başlık altında toplanmıştır. Ek olarak 1973 yılındaki halinde yeraltı suyu durumu (Tünelin 10 m' lik kısmından gelen su ) değerlendirmesindeki "yeraltı suyu akışı yok" ibaresi birleştirilmiştir.

1976 yılındaki modifikasyonda ise yalnızca tek eksenli basınç deneyimi parametresi kullanılan kaya malzemesi dayanımı puanlamasına yeni bir parametre olarak nokta yükü dayanım indeksi dâhil edilmiştir. Ek olarak dayanım puanlaması 10 dan 15 e yükseltilmiştir. Ayrıca kaya kütle sınıfının puanlaması I. Sınıf kaya grubu için 90-100 aralığında iken yapılan değişiklik ile 81-100 arasında olarak yeniden düzenlenmiştir. 1979 yılında süreksizlik aralığı, süreksizlik koşulu ve yeraltı suyu durumu gibi parametrelerin puanlamaları değişmiştir.

1989 yılında ise birçok kez modifiye edilen sistem son halini almış ve günümüze kadar kullanılmıştır (Tablo 3.1.). Bu son modifikasyonda da sisteme bir takım yenilikler getirilmiştir. Kaya malzemesinin dayanımı, RQD ve süreksizlik aralığı gibi parametrelerin puanlarının daha hassas bir sonuç vermesi için "parametre-puan" koşulu verilmiştir. Süreksizlik özellikleri hakkında süreksizliklerin aralığı, devamlılığı ve pürüzlülüğü gibi parametreler ISRM (1981) tarafından yapılan önerilere göre puanlanmasına karar verilmiştir (Tablo 3.2.).

RMR sınıflaması sonrası hesaplanan puana göre kaya sınıfı belirlenmektedir (Tablo 3.3.). Tünel için yapılan RMR sınıflamalarında tünelin güzergahındaki süreksizliklerin eğim ve doğrultu özelliklerine göre düzeltmeler ve puanlamalar yapılmaktadır (Tablo 3.4. ve Tablo 3.5.).



Şekil 3.1. 1974 yılından günümüze kadar RMR kaya kütlesi sınıflama sisteminde kullanılan parametreler (Hudson 1989'dan düzenlenerek Ulusay&Sönmez 2007)

Tablo 3.1. RMR Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi'nin en son hali(Bieniawski,1989)

1	<b>KAYAÇ DAYANIMI</b>	Nokta yükü İndeksi(Mpa)	>10	4-10	2-4	1-2	Düşük Aralık		
		Tek Eksenli basınç dayanımı (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	PUAN		15	12	7	4	2	1	0
2	<b>RQD(%)</b>		90-100	75-50	50-75	25-50	<25		
	PUAN		20	17	13	8	3		
3	<b>Süreksizlik Aralığı(m)</b>		>2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-2	<0,06		
	PUAN		20	15	10	8	5		
4	<b>Süreksizlik Durumu</b>		Çok kaba yüze Sürekli değil Ayrılmasız Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzey Ayrılma<1 mm Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzey Yumuşak Eklem yüzeyleri	Sürtünmeli Yüzeyler Fay Dolgulu <5 mm ve 1-5mm sürekli eklemeler	Yumuşak fay dolgusu >5 mm kalınlıkta ve açık eklemli >5 m devamlı süreksizlik		
	PUAN		30	25	20	10	0		
5	<b>Yeraltı suyu durumu</b>	Tünelde ilk 10 m den gelen su	YOK	<10 lt/dk	10-25lt/ dk	25-125 lt/ dk.	>1251 lt/ dk.		
		Eklemdeki su basıncı (veya) En büyük asal gerilme (veya)	0	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		

**Tablo 3.2.** Süreksizlik yüzeyi koşulunun puanlandırılması için önerilen kılavuz (Bieniawski,1989)

Parametre	PUANLAR				
	<1 mm	1-3mm	3-10 mm	10-20 mm	>20 mm
Süreksizliğin uzunluğu	(6) Yok	(4) <0.1 mm	(2) 0.1-1 mm	(1) 1-5 mm	(0) >5 mm
Süreksizlik açıklığı	(6) Çok pürüzlü	(5) Pürüzlü	(4) Az pürüzlü	(1) Düz	(0) Kaygan
Pürüzlülük	(6) Yok	(5) Sert Dolgu <5 mm	(3) >5 mm	(2) Yumuşak Dolgu <5 mm	(1) >5 mm
Dolgu	(6) Bozunmamış	(5) Az	(3) Orta Derece	(1) Bozunmuş	(0) Çok Bozunmuş
Bozunma	(6)	(5)	(3)	(1)	(0)

**Tablo 3.3.** Kaya Sınıfları ve Puanları

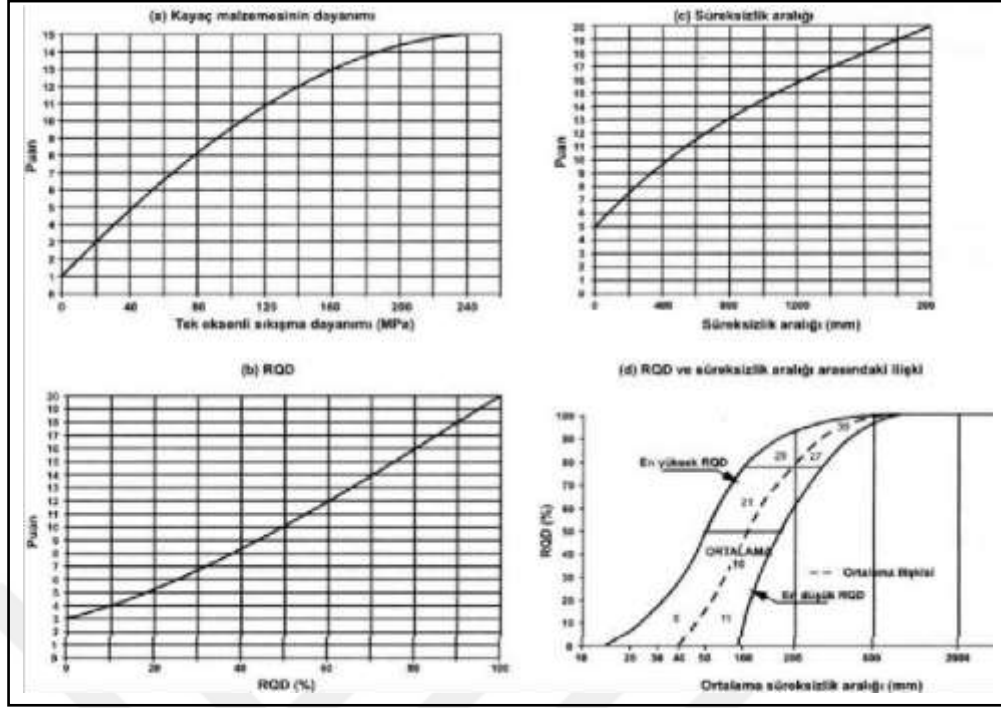
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Puan	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Sınıf No	I	II	III	IV	V

**Tablo 3.4.** Tünelde Süreksizlik Eğim ve Doğrultusunun Etkisi

Doğrultu Tünel Eksenine Dik				Doğrultu Tünel Eksenine Paralel		Doğrultuya bakılmaksızın, eğim 0°-20°
Eğim Yönünde İlerleme		Eğime Karşı Yönde İlerleme		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	Orta

**Tablo 3.5.** Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme

Süreksizliklerin Doğrultu ve Eğimi	Çok Uygun	Uygun	Orta	Uygun Değil	Hiç Uygun Değil
PUAN Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
Temeller	0	-2	-7	-15	-25
Şevler	0	-5	-25	-50	-60



Şekil 3.2. RMR sisteminin 1989 versiyonunda tek eksenli sıkışma dayanımı, süreksizlik aralığı ve RQD parametrelerine ait puanların belirlenmesinde kullanılan grafikler (Bieniawski,1989)

RMR sisteminin en son modifikasyona uğramış haline göre aşağıdaki parametreler esas alınmıştır.

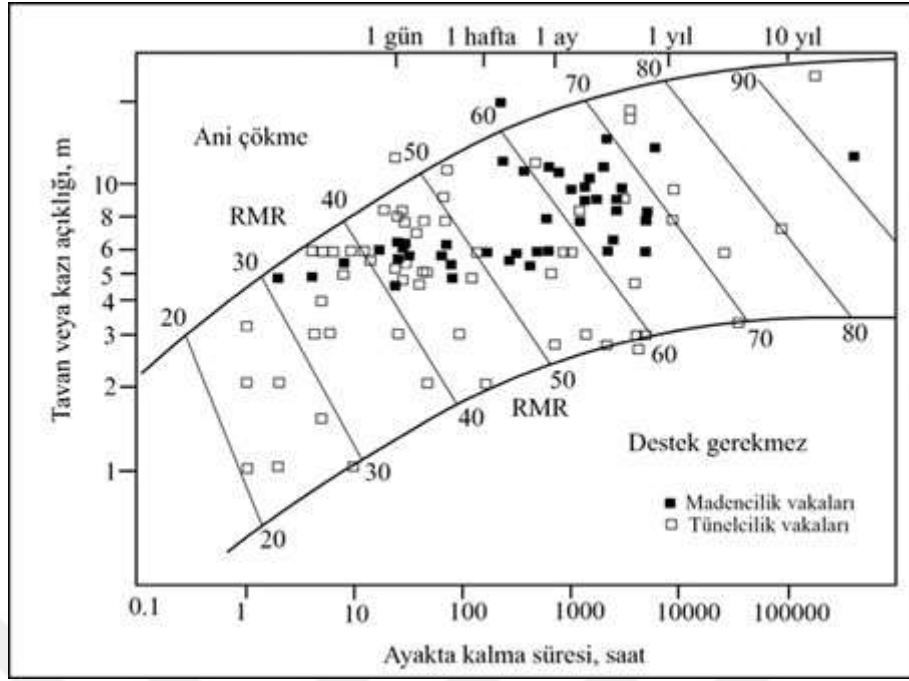
1. Kayaç Dayanımı (Tek Eksenli Basınç Dayanımı(MpA) ve Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (MPa)
2. RQD değeri ( Rock Quality Designation)
3. Süreksizlik aralığı
4. Süreksizlik koşulları (Açıklık, bozunma, pürüzlülük ve dolgu)
5. Yeraltı suyu durumu

RMR sınıflama sistemi kullanılırken kaya kütlelerinde benzer özellik gösteren birimler gruplandırılmalı ve ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Daha doğru ve güvenilir bir sınıflama sistemi yapabilmek için sınıflamanın 1989 yılındaki en son hali referans alınmalı fakat detaylı bir sınıflama için parametreler ayrı ayrı değerlendirilip puanlanmalıdır (Şekil 3.2.).

RMR sınıflama sistemi tünel, galeri ve madencilik gibi yeraltı kazılarında fazlasıyla uygulanmaktadır. Bu sınıflama sistemi ile kazı yöntemine göre tasarım amacıyla destek sistemi seçilmektedir (Tablo 3.6). Benzer özelliklere göre gruplandırılan her kaya grubu için, kaya yükü, desteksiz durma süresi, desteksiz açıklık boyutu gibi parametreler belirlenmektedir (Şekil 3.3.).

**Tablo 3.6.**RMR sistemine göre kazı ve tahkimat tipi (Ulusay ve Sönmez,2007)

Kaya Sınıfı	Kazı tipi	Tahkimat Tipi		
		Kaya Bulonu	Püskürtme Beton	Çelik İksa
<b>1-Çok Sağlam Kaya (RMR:100-81)</b>	Tam cephe kazı, 3m ilerleme	Genel olarak tahkimat gereksiz. Gerektiğinde yerel bulonlama.		
<b>2-Sağlam Kaya (RMR:80-61)</b>	Tam cephe kazı, 1- 1.5 m ilerleme. Kazı aynasından 20m geride tüm tahkimat yapılmalıdır.	Tavanda yerel bulonlama, Bulon uzunlukları 3m, aralıklar 2,5m olmalı, nadiren çelik hasırla tahkimat yapılır.	Gerektiğinde tavan kısmında 50mm kalınlıkta yapılır.	Gerekmez
<b>3-Orta Sağlam Kaya (RMR:60-41)</b>	Üst yarı alt yarı ayrı ayrı kazılır.5 m -3m'lik ilerleme yapılmalı, her patlatmanın ardından destekleme elmanı yerleştirilir. Kazı aynasından 10m geride tüm destekleme yapılır	4m uzunluk ve 1,5-2m aralıklı tavan ve yanlarda çelik hasırla birlikte yerleştirilir. Kazı aynasından 10 m geride destekleme yapılmalıdır.	Tavanda 50- 100mm yanlarda 30mm kalınlıkta yapılır	Gerekmez
<b>4-Zayıf Kaya (RMR:40-21)</b>	Üst yarı ve alt yarı ayrı ayrı kazılır. 1- 1.5 m'lik ilerleme yapılır. Kazı aynasından 10m geride kazıya paralel olarak destekleme yapılmalıdır	4-5m uzunlukta 1-1,5m aralıklarla çelik hasır ile birlikte olarak tavan ve yanlarda yapılır.	Tavanda 100-150mm kenarlarda 100 mm kalınlıkta yapılır.	Gerekiyorsa 1,5m aralıklarla hafif iksa kurulur.
<b>5- Çok Zayıf Kaya (RMR:20-0)</b>	Küçük kesitli kazılarla 0.5- 1.5m'lik ilerleme yapılır. Kazıya paralel olarak destekleme yapılır. Patlatmanın hemen ardından püskürtme beton uygulanmalıdır.	5-6 uzunluk, 1-1,5m aralıklarla ve çelik hasırla birlikte sistematik olarak tabana bulon yerleştirilir.	Tavana 150- 200mm yanlara 150mm ve kazı arına 50mm kalınlıkta yapılır	Çelik fırçalarla desteklenen 0,75 m aralıklı orta ve ağır iksa yapılır ve tabana ters kemer yerleştirilir.



Şekil 3.3. RMR sistemine göre tahkimatsız durma süresi

### 3.1.2. Q Kaya Kütle Sınıflama Sistemi

Q sınıflama sistemi 1970'li yılların başlarında Barton vd. (1974) tarafından ortaya atılmıştır (Ulusay 2013). Bu sınıflama sistemi kaya kütlelerinin süreksizlik özellikleri üzerinde değerlendirmeler yaparak sınıflamayı esas almaktadır. Bu sistem yeraltı kazılarının destek sistemlerinin belirlenmesinde ve özellikle tünel tasarımı için geliştirilmiştir. Q sistemine ait ana parametreler ve değerlendirme şekilleri aşağıdaki gibidir.

- 1) RQD: Kaya Kalite Göstergesi (Tablo 3.7.)
- 2) Jn: Eklem takımı sayısı (Tablo 3.8.)
- 3) Jr: Eklem pürüzlülük sayısı (Tablo 3.9.)
- 4) Ja: Eklem alterasyon sayısı (Tablo 3.10.)
- 5) Jw: Eklem su azaltma faktörü (Tablo 3.11.)
- 6) SRF: Gerilme azaltma faktörü (Tablo 3.12.)

Bu parametreler ile aşağıdaki eşitlikten Q değeri hesaplanmaktadır.

$$Q = RQD / J_n * (J_r / J_a) * (J_w / SRF) \quad (3.1.)$$

Verilen eşitlikte RQD/J<sub>n</sub> kaya kütlelerinin yapısını ve blok boyutunu, J<sub>r</sub>/J<sub>a</sub> dolgu veya dolgusuz durumda bulunan süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüklerini ve karakteristiklerini, J<sub>w</sub>/SRF ise gerilme

koşullarını temsil etmektedir (Ulusay 2013). Eşitlikten hesaplanan Q değeri ile kaya kütlelerinin sınırı belirlenmektedir (Tablo 3.13.).

**Tablo 3.7. Kaya Kalite Göstergesi (RQD)**

1.RQD DEĞERİ	KAYA KALİTE GÖSTERGESİ TANIMI
0-25	Çok Zayıf
25-50	Zayıf
50-75	Orta
75-90	İyi
90-100	Çok iyi

NOT:  $RQD < 10$  ise Q'nun hesaplamasında RQD için 10 gibi bir nominal değer kullanılmaktadır.

**Tablo 3.8. Eklem Takımı Sayısı**

2.EKLEM TAKIMI SAYISI	(Jn)
A. Masif eklem çok az veya hiç yok	0.5-1
B. Bir eklem takımı	2
C. Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	3
D. İki eklem takımı	4
E. İki eklem takımı gelişigüzel eklemeler	6
F. Üç eklem takımı	9
G. Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	12
H. Dört veya daha fazla eklem takımı gelişigüzel çok fazla sayıda küp şeker görünümünde	15
İ. Parçalanmış kaya toprak görünümünde	20

NOT: Kesişen tüneller için  $(3.0 \times J_n)$ , tünel girişleri için ise  $(2.0 \times J_n)$  kullanılmaktadır.

**Tablo 3.9. Eklem pürüzlülük sayısı**

A. Süreksiz eklemeler	4
B. Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3
C. Düz, dalgalı	2
D. Kaygan, dalgalı	1,5
E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1,5
F. Düz, düzlemsel	1,0
G. Kaygan, düzlemsel	0,5
H. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeteri kalınlıkta kil minerali içeren zon	1,0
İ. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek kalınlıkta kumlu ve çakıllı zon	1,0



**Tablo 3.10.** Eklem alterasyon sayısı

<b>EKLEM ALTERASYON SAYISI</b>	<b>Ja</b>	<b><math>\Phi</math>-(yaklaşık)</b>
a)Kaya-süreksizlik dokanağı		
A)Yüzeyler sıkı, sert, yumuşamayan geçirimsiz dolgu (epidotlar)	0.75	
B)Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1	25-30 °
C)Çok az değişime uğramış süreksizlik yüzeyleri	2	20-25 °
D)Siltli veya kumlu kil kaplamaları, yumuşamayan kil içeriği	3	20-25 °
E) Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama ve az miktarda şişen killer	4	8-16 °
b)10 cm'lik makaslamaadan önceki süreksizlik kaya dokanağı	4	25-30 °
F) Kum taneleri, kil içermeyen bozunmuş kaya		
G)Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil mineral dolgularım	6	16-24 °
H) Orta veya düşük derecede aşırı konsolidasyona maruz kalmış, yumuşayan kil mineral dolguları	8	12-16 °
J)Şişen kil mineralleri Ja'nın değeri şişen kil tane boyutundaki malzemenin miktarına ve su girişine bağlı	8-12	6-12 °
K,L,M) Bozunmuş veya parçalanmış kaya ve kil bantları ya da zonları	6-8	6-24 °
N)Siltli veya kumlu kil bantları veya zonları çok az kil	5.0	6-24 °
O,P,R) Kalın ve sürekli kil bantları veya zonları	10,13	6-24

**Tablo 3.11.** Eklem su azaltma faktörü

<b>EKLEM SU AZALTMA FAKTÖRÜ</b>	<b>Yaklaşık su basıncı (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>(Jw)</b>
Kısmi kazı veya düşük su geliri	<1	1.0
Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	1-2,5	0.66
Dolgunsuz eklemeler içeren sağlam kayada aşırı su geliri veya yüksek basınç	2,5-10	0.5
Aşırı su geliri veya yüksek basınç, eklem dolgularının ileri derecede yıkanması	2,5-10	0,33
Çok ileri derecede su geliri veya patlama	>10	0,2-0,05

**Tablo 3.12.** Gerilim azaltma faktörü

GERİLME AZALTMA FAKTÖRÜ	SRF(Süreksizlik Yüzey Koşulu)		
a)kazıyı kesen zayıf zonlar, tünel kazılırken kaya kütleinin gevşemesine neden olabilir			
A)Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren zayıflık zonları	10		
B) Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya zonları, çok gevşek çevre kayacı	5		
C)Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zon (kazı derinliği>50 m)	2.5		
D) Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı(herhangi bir derinlikte)	7.5		
E)Kil içermeyen dayanıklı bir kayada tek bir makaslama zonu(kazı derinliği ≤50m)	5.0		
F)Kil içermeyen dayanıklı bir kayada tek bir makaslama zonu ((kazı derinliği ≤50m)	2.5		
G)Gevşek ve açık eklemler, ileri derecede eklemler ‘’küp şeker’’ görünümlü	5.0		
b)dayanıklı kaya, kaya gerilmesi sorunları	$\sigma_c / \sigma_1$	$\sigma_c / \sigma_1$	(SRF)
H)Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemler	>200	<0,01	25
J)Orta derecede gerilme, uygun gerilme koşulları	200-10	0.01-0,3	1
K)Yüksek gerilme, çok sıkı yapı, genellikle duraylı, yan duvarlar açısından uygun olmayabilir	10-5	0,3-0,4	0,5-2
L)Masif kayada 1 saatlik bir süre sonrasında orta derecede dilimlenme	5-3	0,5-0.65	5-50
M)Masif kayada birkaç dakika sonra dilimlenme ve kaya patlaması	3-2	0.65-1	50-200
N)Masif kayada aşırı kaya patlaması ve ani deformasyon	<2	>1	200-400
c)Sıkışan kaya: Yüksek kaya basıncının etkisiyle düşük dayanımlı kayada plastik akma	$\sigma_c / \sigma_1$	(SRF)	
O)Az sıkıştıran gaz basıncı	1-5	5-10	
P)Aşırı sıkıştırıcı kaya basıncı	>5	10-20	
d)Şişen kaya:Suyun varlığına bağlı kimyasal şişme etkinliği		(SRF)	
R)Düşük şişme basıncı		5-10	
S)Çok yüksek şişme basıncı		10-15	

**Tablo 3.13.** Q değerine göre kaya sınıfları

Q değeri	Kaya Sınıfı
0.001-0.01	Son Derece Zayıf
0.01-0.1	Çok Fazla Zayıf
0.1-1	Çok Zayıf
1-4	Zayıf
4-10	Orta
10-40	Sağlam
40-100	Çok Sağlam
100-400	Çok fazla sağlam
400-1000	Son Derece Sağlam

Q sınıflama sistemi aşağıdaki amaçlar için kullanılmaktadır.

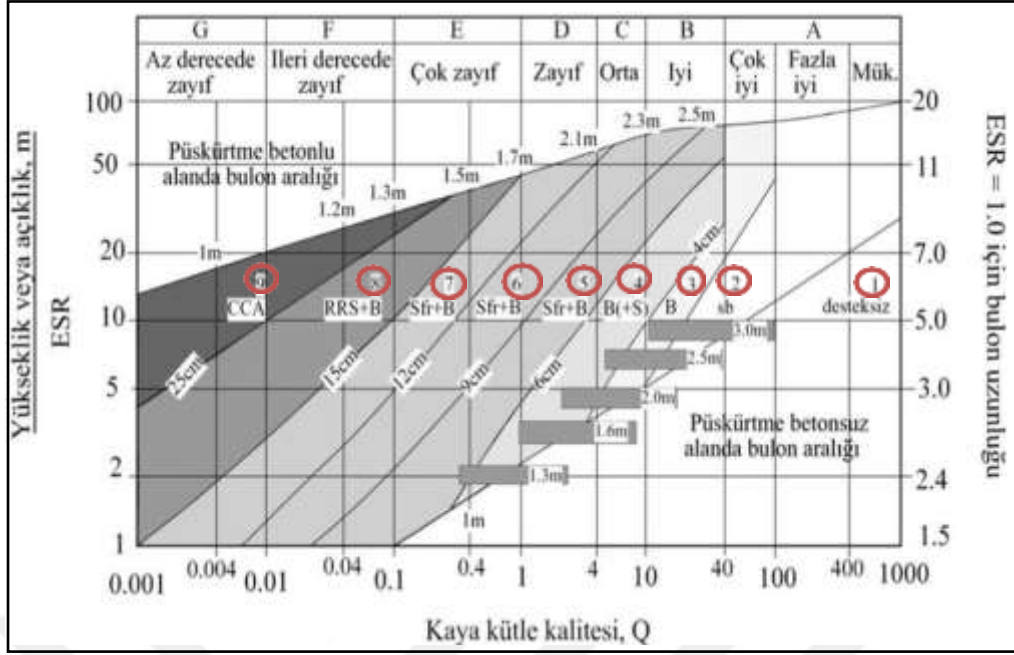
- 1) Destek sisteminin seçimi
- 2) En geniş desteksiz açıklığın( $B_{max}$ , m) ve tavan destek basıncının belirlenmesi
- 3) Kaya saplaması ve ankraj boyutlarının tahmini
- 4) Desteksiz durma süresinin tahmini
- 5) Kaya kütlelerinin deformasyon modülünün tahmini
- 6) Q sisteminin tünel açma makineleri ile yapılan kazıda kullanımı (TBM)
- 7) Permabilite ve enjeksiyon için (Ulusay ve Sönmez, 2002)

Tünelin destek sistemi elemanlarının güncelleştirilmiş Q destek abağı ile hesaplanmaktadır (Şekil 3.4.). Destek sisteminin belirlenmesi için Eşdeğer boyut “De” değeri belirlenmelidir. Kazı destek oranı (ESR) için kazının tipine göre Tablo 3.14.’ den seçim yapılmaktadır.

$$Eş\ değer\ boyut\ (De) = \frac{En,\ çap\ veya\ yükseklik(m)}{Kazı\ destek\ oranı(ESR)} \quad (3.2.)$$

**Tablo 3.14.** Yeraltı kazıları için orjinal ve güncelleştirilmiş kazı destek oranları ESR (Sönmez ve Ulusay,2007)

Kazı Tipi	Orjinal ESR	Güncelleştirilmiş ESR
A. Geçici Maden Kazıları	3-5	2.5
B. Düşey Bacalar	Daire Kesitli (2.5) / Kare Kesitli (2)	2.5
C. Kalıcı maden kazıları, Hidroelektrik santralleri, su tünelleri	1.6	2
D. Depolar, ufak yol ve demir yolları tüneller	1.3	1.2-1.3
E. Santral binası, ana yol ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, tünel portalları ve kesişim yerleri	1	0.9-1.1
F. Yer altı nükleer santralleri, metro istasyonları, Fabrikalar, spor ve sosyal tesisler	0.8	0.5-0.8



Şekil 3.4. Q sistemi için güncelleştirilmiş destek abağı (Grimstad ve Barton,1993)

#### Destek Kategorileri

1. Destek gerekmez
2. Yerel Bulonlama
3. Sistematik Bulonlama
4. Sistematik Bulonlama ( takviyesiz, püskürtme beton 4-10 cm)
5. Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton (5-9 cm)
6. Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton ve bulonlama, 9-12 cm
7. Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton ve bulonlama, 12-15 cm
8. Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton >15 cm çelik hasırlı püskürtme beton ve bulonlama
9. Beton kaplama

#### 3.2.3.RMR ve Q Değerleri Arasındaki İlişki

RMR ve Q sınıflama sistemi kaya kütlesi sınıflaması yapılırken 3 temel parametre olan kaya malzemesinin dayanımı, süreksizliklerin sürtünme özellikleri ve tanımlanan kaya bloklarının geometrisi esasına dayanır. Yapılan çalışmalarda her iki sistem için benzerlikler olsa da doğrudan ilişki olduklarını kanıtlayacak bir veri yoktur. Aralarındaki ilişki yalnızca bir sistem için elde edilen puandan diğer sistemin puanının tahmin edilmesidir. Bu dönüşüm ilk kez Bieniawski (1976) tarafından önerilmiştir.

$$RMR=9\ln Q+44 \quad (3.3.)$$

### 3.1.4.Hoek-Brown Görgül Yenilme Ölçütü

#### 3.1.4.1.Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Kayalar bölgesel olarak incelendiklerinde kaya malzemesi etken iken, daha detaylı ve geniş çaplı incelemeler yapıldığında süreksizlikler içeren kaya kütleleri olarak değerlendirilmeye başlamaktadırlar (Sönmez ve Ulusay,2007). Kaya kütlelerinin davranışı sonuç itibari ile hem süreksizlikler hem de kaya malzemesi tarafından kontrol edilmektedir. Bu sebepten dolayı bir kaya kütlelerine ait deformasyon ve dayanım gibi özelliklerin, süreksizlikler içeren kaya kütleleri dâhilinde incelenmesi gerekmektedir. Fakat bu ortamlardan kaya kütleleri boyutunda örnekler alınması oldukça zordur. Bu sebeple araştırmacılar tarafından görgül yenilme ölçütleri geliştirilmiştir. Bunlardan en çok kullanılan Hoek Brown yenilme ölçütüdür. Fakat ölçütün bazı sınırlamaları ve zayıf kaya kütlelerini tanımlamada olan yetersizliklerinden dolayı zaman içerisinde sürekli olarak değişikliklere uğramıştır. İlk uğradığı değişiklik 1983 yılında kaya kütlelerinin makaslama dayanımı için yapılmıştır. 1988 yılında yapılan ikinci değişiklik ise “m” ve “s” parametreleri ile ilgilidir. Bu parametreleri daha pratik bir şekilde hesaplamak amacıyla sahadan sağlanan veriler ile yenilme ölçütü arasında bir köprü oluşturmak için RMR sınıflama sisteminin 1976 yılındaki versiyonunu ölçüte dahil edilmiştir.1992 yılında yapılan değişiklikte ise “zayıf ve çok zayıf kaya” kütlelerine odaklanılmıştır. Hoek-Brown yenilme ölçütünün en son hali farklı kaya kütlelerinin dayanım özelliklerini daha sistematik ve anlaşılır bir biçimde ortaya koyarak görgül ilişkilerle açıklamaktadır. Ulusay ve Sönmez (1999) tarafından parametreleri ölçülen bir puanlama sistemi önerilmiş ve bu sebeple “Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı (SCR)” ve “Yapısal Özellik Puanı (SR)” olarak tanımlanan bu parametrelerin GSI eklenmesini önermişlerdir. Sonuç itibari ile Hoek vd. ile Sönmez ve Ulusay tarafından son kez modifikasyona uğramış ve bugünkü halini almıştır(Sönmez ve Ulusay,2007) (Şekil 3.5).

Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü;

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_1'} + S \right) a \quad (3.4.)$$

$\sigma_1'$ : En büyük asal gerilme

$\sigma_3'$ : En küçük asal gerilme

$\sigma_c$ : Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı

$m_b$ : Boyutsuz kaya kütleleri sabiti

$m_i$ : Boyutsuz kaya malzemesi sabiti

s ve a: Malzeme sabitleri

D: Örselenme faktörü ( $0 \leq D \leq 1$ )

GSI: Jeolojik dayanım indeksi, GSI sınıflama sistemi bağından belirlenmektedir.

GSI'nın günümüzde kullanılan hali ile verilen abakta eklem yoğunluğu ve süreksizliklerin yüzey koşuluna bağlı olarak, SR(Yapısal Puanı) ve SCR(Yüzey Koşulu Puanı) tayin edilmektedir. SR süreksizlik derecesini, SCR ise süreksizlik yüzey koşullarını belirlemede kullanılmaktadır.

SR puanını belirlemek için Palmstörn tarafından önerilen  $J_v$  (Hacimsel Eklem Sayısı) kullanılmaktadır. Bu parametre hat etütleri yardımı ile belirlenmektedir.  $J_v$  parametresine göre ISRM ve GSI için tanımlar yapılmaktadır (Tablo 3.15.). Fakat zayıf ve yoğun eklemli kaya kütlelerinde bu parametrenin tayini oldukça zordur. Böyle durumlarda koordinat sistemi mantığı ile üç boyutlu olarak (x, y, z) eklem sayıları ile süreksizlikler hesaplanmaktadır. Eğer bu şekilde ölçüm sağlanamıyorsa aşağıdaki parametreler ile hesaplamalar yapılmaktadır.

$$J_v = \left(\frac{N}{L}\right)^3 \text{ veya } J_v = \left(\frac{1}{S}\right)^3 \quad (3.5.)$$

N: Eklem sayısı, L: Ölçüm hattının uzunluğu,

S: Ortalama süreksizlik aralığı

$J_v$  parametresi aralıkları ile blok boyutları tanımlanabilmektedir.

**Tablo 3.15.** Blok boyutu tanımlamaları ve  $J_v$  parametresi aralıkları

ISRM Tanımları	$J_v$ (eklem/m <sup>3</sup> )	GSI için önerilen tanımlar
Çok büyük bloklar	<1	Bloklu(B)
Büyük bloklar	1-3	
Orta boy bloklar	3-10	Çok Bloklu
Küçük Bloklar	10-30	Bloklu/ Örselenmiş
Çok küçük bloklar	30-60	Parçalanmış
Parçalanmış/Ufalanmış	>60	

SCR puanı için 0 ile 18 arasında puanlar atanmıştır. SCR puanı aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (3.6.)$$

$R_r$ : Süreksizlik

$R_w$ : Bozunma

$R_f$ : Dolgu puanları

SR (Yapısal Puan) ve SCR (Yüzey Koşulu Puanı) GSI abağında tanımlanarak, kesim noktalarından GSI değeri belirlenmektedir.

Malzeme sabiti olan ‘a’ GSI'ın tüm değerleri için;

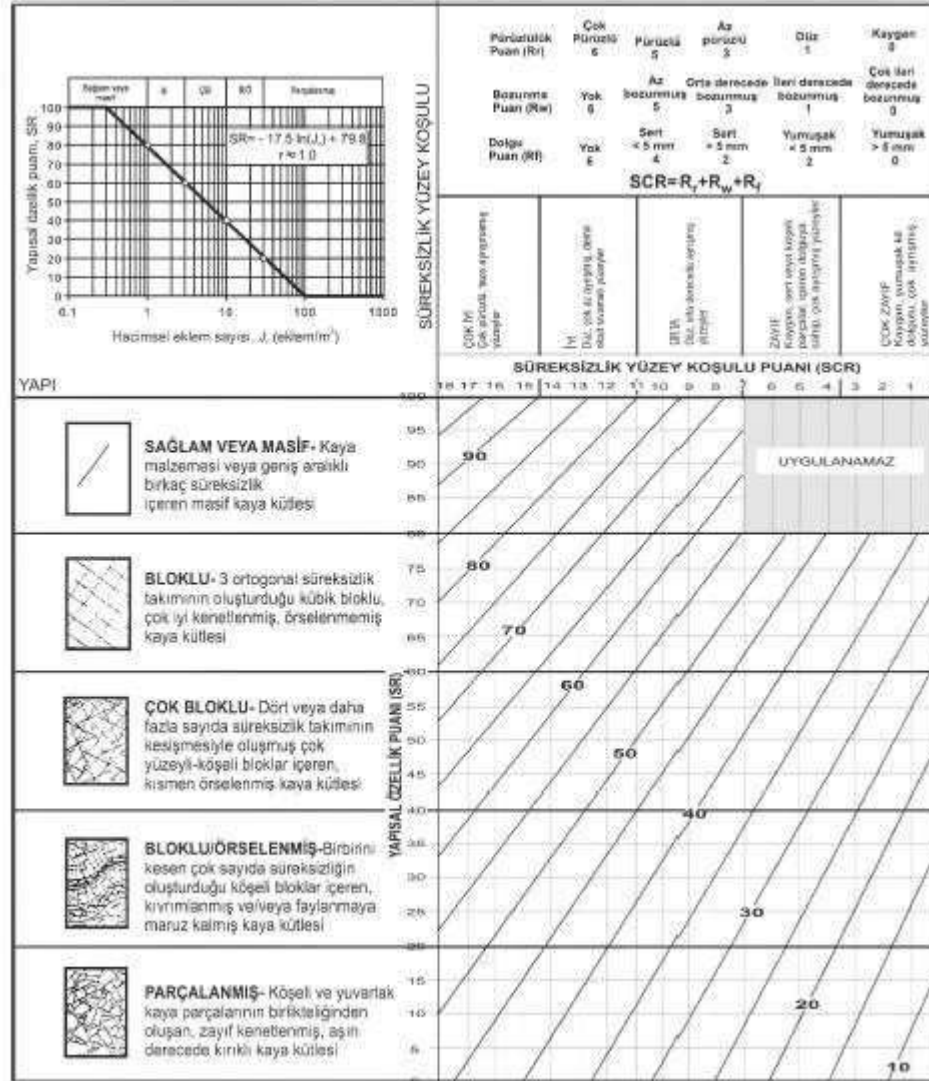
GSI > 30 için a=0.5

GSI < 30 için

$$a = 0.65 * GSI / 200 \quad (3.7.)$$

Daha sonra yapılan çalışmalarda ise tüm GSI değerleri için a sabiti aşağıdaki eşitlik ile elde edilmektedir.

$$a = \left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{6}\right)(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (3.8.)$$



Şekil 3.5. GSI Sınıflama Sistemi Abağı'nın "Sağlam ve Masif" kaya grubu eklendikten sonraki değiştirilmiş son hali (Sönmez ve Ulusay,2002)

Bu ölçütü geliştirenler tarafından göz önünde bulundurulmayan örselenme faktörü "D" ile gösterilmiştir. "D" ile belirtilen örselenme faktörü patlatma hasarı ve kazı sırasında gelişen gerilme boşalmasına maruz kalan kaya kütesinin örselenme derecesine bağlı bir faktördür (Şekil 3.6). Herhangi bir GSI değeri için s sabiti ise, D (Örselenme Faktörü) göz önünde bulundurulurken aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$S = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (3.9.)$$

Örselenme faktörü  $0 \leq D \leq 1$  Aralığındadır ve örselenmemiş kaya kütleleri için 0 alınırken, örselenmiş kaya kütlelerinde 1' e eşittir. Mb (Kaya Kütleli Sabiti), tüm GSI değerleri için aşağıdaki eşitlikten elde edilmektedir.

$$M_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (3.10.)$$

Kaya Kütlelerinin Görünümü	Kaya Kütlelerini Tanımı	Önerilen D Değeri
	Yüksek kaliteli denetimli patlama veya tünel açma makinasıyla yapılan kazı tüneli çevreleyen kaya kütlelerinde en düşük derecede örselenmeye neden olur.	D=0
	Düşük kaliteli kaya kütlelerinde (patlatma yapılmamış) mekanik olarak veya elle yapılan kazı, tüneli çevreleyen kaya kütlelerinde en düşük derecede örselenmeye neden olur. Sıkışan zemin sorunu önemli derecede taban kabarmasına yol açar ve soldaki fotoğraftaki gibi geçici bir taban betonu dökülmediği takdirde önemli düzeyde örselenme olur.	D=0 D=0.5 Taban betonu yok
	Çok kötü kaliteli patlatma sert kaya tünellerinde çevre kayasının 2-3 m içine nüfuz edecek şekilde şiddetli yerel hasara neden olur.	D=0.8
	İnşaat mühendisliğiyle ilgili şev kazılarında küçük ölçekli patlatma kaya kütlelerinde orta derecede hasara neden olur; özellikle denetimli patlatma yapılırsa kaya kütlelerinin görünümü soldaki fotoğraftaki gibidir. Bununla birlikte, gerilme boşalımı da bir miktar örselenme yaratır.	D=0.7 İyi patlatma D=1.0 Kötü (zayıf) patlatma
	Çok uzun açık işletme şevleri, üretim amaçlı aşırı patlatmadan ve örtü kazısı nedeniyle oluşan gerilmenin azalmasından dolayı önemli düzeyde örselenmeye maruz kalırlar. Daha yumuşak bazı kayalarda kazı işlemi ripperleme ve dozer ile yapılabilir ve bu durumda şevin maruz kalacağı örselenmenin derecesi daha düşük olur.	D=1.0 Üretim patlatması D=0.7 Mekanik kazı

Şekil 3.6. Örselenme faktörünün belirlenmesi için kılavuz tablo (Hoek-Brown,2002)

Mb (kaya kütleli sabiti) hesaplaması için kullanılan mi değeri ise, kaya türü ve doku özelliklerine göre seçilmektedir (Tablo 3.16.).



**Tablo 3.16.** mi sabiti değerleri için kullanılan tablo (Hoek Brown,2007)

Kaya Türü	Sınıf	Grup	Doku			
			İri	Orta	İnce	Çok İnce
SEDİMANTER	Kırıntılı		Konglomeralar 21±3	Kumtaşları 17±4	Silttaşları 7±2	Kilittaşları 4±2
	Kırıntısız	Karbonatlar	Kristalin 12±3	Sparatik Kireçtaşı 10 ±2	Mikritik Kireçtaşları 9±2	Dolomitler 9±3
		Evaporitler		Jips 8±2	Anhidrit 12±2	
		Organik	Tebeşir			7±2
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer 9±3	Hornfels 19±4 Metakumtaşı 19±3	Kuvarit 20±3	
	Düşük foliasyonlu		Migmatit 29±3	Amfibol 26±6		
	Foliasyonlu*		Gnays 28±5	Şistler 12±3	Fillitler 7±3	Sleytler 7±3
MAGMATİK	Plutonik	Açık renkli	Granit 32±2 Grandiyorit 29±3	Diyorit 25±5		
		Koyu renkli	Gabro 27±3 Norit 20±5	Dolerit 16±5		
	Hipabisal		Porfiriler 20±5		Diyabaz 15±5	Peridotit 25±5
	Volkanik	Lav		Riyolit 20±5 Andezit 20±5	Dasit 20±3 Bazalt 20±5	Obsidyen 19±3
Piroklastik		Aglomera 19±3	Breş 19±5	Tüf 19±5		

### 3.1.3. NATM (New Austurian Tunneling Method) Tünel İnşa Metodu

1957 ve 1965 yılları arasında Pacher, Rabcevicz ve Müller tarafından New Austrian Tunneling Method (NATM) geliştirilmiştir. Uygulamada NATM, kaya mekaniği ve inşaat ilkelerine, kaya destek tasarımına ve tünel kazısı sırasında izlemeye kadar çeşitli tünel açma yöntemlerinin bir kombinasyonunu içermektedir. Müller (1978), "NATM, tünelcinin takip etmeye çalıştığı bir dizi ilkeye sahip bir yöntemden çok bir tünel açma felsefesidir" fikrini savunmuştur. L.Von Rabcevizz ise bu yöntemi; geçici bir destekleme sistemi kurarak deformasyonlara izin vermek, tünelin içerisine doğru gelen kaya basıncını azaltarak gerilimi çevreye doğru yaymak, böylece son destekleme sisteminin üzerindeki yükü biraz kaldırmak olarak tanımlamıştır. Bu yöntemde göre deformasyonlar kazı esnasında ölçülecek ve

projedeki hesaplamalar ile kıyaslanacaktır (Karaođlan,2002). Bu yöntem kaya ve kazı sınıflarını A, B, C olarak sınıflandırmıştır. Fakat yine de bu yaklaşım öznel olduğu için kendisine sayısal bir taban oluşturma ihtiyacı duymuştur. Bu sebeple RMR (Bieniawski, 1989), RQD (Deere, 1963), GSI (Hoek ve Brown, 1997) ve Q (Barton, 2002) gibi kaya kütlelerini tüm özellikleri ile ele alan ve uluslararası kabul görmüş sınıflandırma sistemlerini kullanarak yapmaya çalışmıştır (Satıcı ve Topal, 2015). NATM genel olarak kazı yöntemi ya da destekleme sistemi olarak adlandırılmaz. Temelde tünelin her aşamasında göz önünde bulundurulması gereken temel tünel felsefelerinden birisidir. Bu felsefenin temel prensipleri Leopold Müller (1979) tarafından belirtildiği gibi şunlardır (Vardar,1979).

- 1) Tünelde esas yükü taşıyan kısım, tüneli çevreleyen kayanın kendisidir.
- 2) Kayanın ilksel sağlamlığı kazıdan sonra da muhafaza edilmelidir.
- 3) Gevşemeler kayanın taşıma direncini azaltacağı için mümkün olduğunca gevşemenin önüne geçilmelidir.
- 4) Deformasyonların engellenmesi için mümkün olduğunca kaya tek eksenli ve iki eksenli gerilme ortamı oluşturmaktan kaçınılmalıdır.
- 5) Koruyucu zon kayanın taşıma direncini azaltmadan oluşturulmalıdır.
- 6) Sağlamaştırma işlemleri doğru zamanlarda yapılmalıdır.
- 7) Kayacın desteksiz olarak kendini tutabilme kapasitesi doğru olarak belirlenmelidir.
- 8) Kayacın kazı sonrasındaki deformasyonlarının belirlenebilmesi için, arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmalı, konverjans ve deformasyonlar ölçülmelidir.
- 9) Sağlamaştırma boşluk yüzeyini bağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.
- 10) Destek kaplamaları ince kabuk şeklinde olmalıdır.
- 11) Tahkimat elemanları olarak tel kafes ve ankraj kullanılmalıdır.
- 12) Sağlamaştırmanın zamanı ve ölçümleri araçlarla tespit edilmelidir.
- 13) Tünel statik olarak bakıldığında sağlamaştırma kabuğu ve taşıyıcı zonun oluşturduğu bir halkadır.
- 14) Sağlamaştırma kabuğu halka şeklinde olmalıdır.
- 15) Halka(ring) en kısa zamanda oluşturulmalıdır.
- 16) Boşluk açılması ilksel gerilme durumunu bozarak yeni bir gerilim dağılımı oluşturur. Bunun en az değişmesi amacıyla ikincil gerilimler tek seferde oluşturulmalıdır.
- 17) Tünel en kesiti daire veya elips şeklinde olmalıdır.
- 18) Kalıcı sağlamaştırma kabuğu ince olmalı ve dış kabuk ile sürtünmesiz ve sıkı olarak bağlanmalıdır.
- 19) Geçici sağlamaştırma işlemi ile yapının stabilitesi sağlanmalıdır.
- 20) Yapım süreci içinde yönlendirme ve denetleme ölçümleri yapılmalıdır.
- 21) Çatlak suyu basıncı sistemin taşıma direncini düşürmemesi için drene edilmelidir.

### 3.1.4.1. NATM'a Göre Kaya Sınıfının Belirlenmesi

NATM' a göre kaya sınıflarının belirlenmesinde öncelikli olarak tünel kazısı yapılan kaya kütlelerinin karakteristik özellikleri belirlenmelidir. Sonrasında projede öngörülen özellikler ile uyumu kontrol edilmelidir. Ayna haritalamaları ve arazi çalışmaları sırasında elde edilen süreksizlik aralığı, süreksizlik devamlılığı, süreksizlik açıklıkları, süreksizlikler arasındaki dolgunun özellikleri, eğer var ise su sızıntıları ve bozuşma dereceleri belirlenmelidir. Belirlenen Q ve RMR değerine göre NATM'a ait kütle sınıflaması yapılmaktadır (Tablo 3.17.). NATM' da kaya sınıfları 3 ana grupta toplanmıştır. Bu gruplar kendi içerisinde de alt gruplara ayrılmaktadır (Tablo 3.18. ve Tablo 3.19.). NATM' a ait bir standart bir destek sistemi belirlenmiş olsa da, bu sistem deformasyonların izlenerek desteklenmesini esas almaktadır. Bu sebeple kazı öncesi, kazı sırasında ve sonrasında destekler için uygun görülen değişiklikler yapılabilir (Polat,2002).

**Tablo 3.17.**Q,RMR ve NATM karşılaştırılması

Q KAYA KÜTLE SINIFLAMASI (Barton vd.1974)	NATM KAYA KÜTLE SINIFLAMASI (ÖNORM B,2203)	RMR KAYA KÜTLE SINIFLAMASI (Bieniowski,1989)
SON DERECE SAĞLAM	A1 SAĞLAM	ÇOK İYİ
ÇOK FAZLA SAĞLAM		
ÇOK SAĞLAM	A2 ZAMANLA KIRILGAN	İYİ
SAĞLAM		
ORTA	B1 KIRILGAN	ORTA
ZAYIF	B2 ÇOK KIRILGAN	
ÇOK ZAYIF	B3 DOKUNTULU	
ÇOK FAZLA ZAYIF	C1 KAYA PATLAMALI	ZAYIF
	C2 BASKILI	ÇOK ZAYIF
	C3 ÇOK BASKILI	
ÇOK DERECE ZAYIF	C4 AKICI	ÇOK ZAYIF
	C5 ŞİŞEN KABARAN	

**Tablo 3.18.**NATM'a göre kaya sınıflandırılması (ÖNORM B2203,1994)

Kaya sınıfı		Açıklamalar	Destekleme
A	A1	Sağlam	Sonradan az sökülen kaya kütleleri: Bu sınıfta yer alan kaya kütleleri genellikle duraylı olup, elastik davranış gösterirler. Yersel iksa uygulanması durumunda, yer yer sığ göçükler oluşabilir. Göçükler genellikle izole olmuş, önemsiz eklem yapıları nedeni ile oluşur. Elastik deformasyon hızla azalır.
	A2	Zamanla kırılğan	
B	B1	Kırılğan	Sınırlı bölgelerde sistematik destek yapılmalıdır. Lokal olarak ön destekleme gerekebilir.
	B2	Çok kırılğan	<b>Gevrek Kaya Kütleleri:</b> Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin davranışları, yapısal veya çekme dayanımı azlığından dolayı, gevsemeye ve ayrılmaya yatkındır. Hemen hemen tüm çevrede, boşluk çevresinde ikincil gerilmeler, kaya kütlelerinin dayanımını biraz aşmakta, bununla beraber bu zayıflıklar içerilere ulaşmaktadır. İksa yapımının gecikmesi haline artan çökmeler olur
	B3	Döküntülü	Tünel tavanı ve duvarlarında aynada ve aynanın ilerletilmesinden önce monte Edilecek sistematik destekleme ve süren kullanımı gerekmektedir. Çelik iksa kullanılacaktır. Jeolojik şartlara göre yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerekebilir.
C	C1	Kaya patlamalı	<b>Baskılı Kaya Kütleleri</b> Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin, davranışları genellikle kaya basıncının yeniden dağılım süreci ve/veya deplasman sınırlamaları sonucunda oluşan gerilmelerin kaya dayanımından daha büyük olduğunu gösterir. Kaya kütleleri aşırı gerilme altında kalmasından dolayı kabuk atma, kesme ve boşluğa doğru akma gibi zayıflık mekanizmaları oluşturur. Çatlamaya veya dökülmeye eğimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenlere sahip kaya kütleleri bu gruba girmektedir. Bu gruba giren kaya kütleleri, davranış ve kendini tutma süreleri, su sızıntılarından olumsuz yönde etkilenmektedir.
			Sık yerleştirilmiş kaya bulonları ve çelik hasır gereklidir. Jeolojik şartlara göre yerinde dökme ve bir taban kemer betonu yapılmalıdır.

**Tablo 3.19.**NATM'a göre kaya sınıflandırılması (Devamı) (ÖNORM B2203,1994)

Kaya Sınıfı		Açıklamalar	Destekleme
C	C2	Baskılı Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin davranışları genellikle kaya basıncının yeniden dağılım süreci ve deplasman sınırlamaları sonucunda oluşan gerilmelerin kaya dayanımından daha büyük olduğunu gösterir. Kaya kütleleri aşırı gerilme altında kalmasından dolayı kabuk atma, kesme ve boşluğa doğru akma gibi zayıflık mekanizmaları oluşturur. Çatlamaya veya eğilmeye meyilli kaya kütleleri bu gruba girmektedir. Bu gruba giren kaya kütleleri davranışı ve kendini tutma süreleri su sızıntısından etkilenmektedir.	Tünel kesiti çevresinde sistematik destekleme yapılmalıdır. Jeolojik şartlara göre yerinde bir dökme kemer betonu yapılmalıdır.
	C3	Çok Baskılı	Tünel kesit çevresinde sistematik destekleme yapılmalıdır. Tavanda süren boru uygulanmalıdır. Üst kazısında geçici ring yarıkları gerekebilir.
	C4	Akıcı	Süren boru ve çelik levha tatbiki tavanda gereklidir. Bölümlere ayrılmış kesit kazısı püskürtme beton ile yapılmalıdır. Üst kazı aynasından geride taban kemeri gereklidir
	C5	Şişen	Tavanda süren boru ve çelik levha gereklidir. Bölümlere ayrılmış kesitkazısı püskürtme beton ile yapılmalıdır. Üst kazı aynasından geride taban betonu gereklidir.

### 3.2. Arazi Çalışmaları

Teze konu olan tünelin yapım aşamaları başlamadan önce, projenin gerçekleşeceği güzergâhtaki birimler ve jeolojik özellikleri incelenmiştir. Bu özellikler daha öncede bölgede yapılmış olan jeolojik çalışmalar ile birlikte değerlendirilerek yorumlanmıştır. Yapılan arazi çalışmalarında kaya kütesine ait süreksizlik özellikleri hat etüdü ile ölçüm yapılarak belirlenmiştir. Deformasyonların ve destek sisteminin modellenmesi için Phase 2D bilgisayar programında girdi olarak kullanılacak parametrelerin tayini ve kaya kütesinin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla sondaj kuyuları açılmıştır. Bu sondaj kuyularından laboratuvarında kullanılmak üzere örnekler alınmıştır. Tünel kazısı sırasında uygulanan patlatma ve mekanik kazı işleminden sonra ayna haritaları yapılmıştır. Bu ayna haritaları yardımıyla birimlerin dağılımlarını görmek için enine kesitler çizilmiştir.

#### 3.2.1.Sondaj Çalışmaları

Çalışma alanındaki bölgede TSM-750 sondaj makinesi ile rotary-sulu metodu ile tünel giriş portalında 2 ve çıkış portalında 1 adet 88.50 m' lik sondaj kuyuları açılmıştır (Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.). Bu sondajlardan sağlanan sonuçlar ve stratigrafik kesitte belirlenen birimler uyumlu olduğu için tünel içerisinde sondaj yapılmamıştır. Bu çalışmalardan her bir birimi temsil eden örnekler alınmıştır. Bu örnekler girdi parametrelerinin belirlenmesi için laboratuvar deneyleri yapılmak üzere alınarak muhafaza edilmiştir



Şekil 3.7.Sondaj çalışmalarından bir görünüm



Şekil 3.8.Sondaj çalışmalarından bir görünüm

### 3.3.Laboratuvar Çalışmaları

Çalışma alanında tünele ait sondaj kuyusundan alınan örnekler üzerinde kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler birim hacim ağırlık deneyi ve tek eksenli basınç deneyidir.

### 3.3.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Alınan örneklerin birim hacim ağırlıklarını özelliklerini amacıyla laboratuvar ortamına götürülmüştür. Elde edilen bu parametrede genellikle bir zeminin doğal durumdaki ağırlığının tüm hacmine oranı doğal birim hacim ağırlık ( $\gamma_n$ ) olarak tanımlanmaktadır.

$$\gamma = W/ V \quad (\text{kN/m}^3) \quad (3.11.)$$

### 3.3.2. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı bir kayanın üzerine uygulanan basınç yükleri ile kırılmaya karşı gösterdiği mukavemet olarak tanımlanmaktadır. Bir kayaya ait basınç dayanımının bilinmesi hem kaya kütlesi sınıflama sistemleri için hem de kaya ortamında yapılacak olan tasarım için son derece önemli bir parametredir. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımı  $\sigma_c$  ile ifade edilmektedir. Tek eksenli basınç dayanımından kayaya ait içsel sürtünme açısı ve kohezyon ( $c$ ) yaklaşık olarak hesaplanmaktadır. Kayaçların basınç dayanımı litolojisi, süreksizlik özellikleri, su içeriği, çimentolanma derecesi, ayrışma derecesi, yükseklik/Çap oranı ( $L/D$  için en uygun değer 2–2,5) gibi parametrelere bağlıdır.

Tek Eksenli Basınç Dayanımı deneyi yapılırken eksenel boyuttaki kaya örneğinin boyu ve çapı birbirine zıt iki yönde ayrı ayrı ölçülerek ortalaması alınır. Bu şekilde kaya örneğinin kesit alanı hesaplanır. Kaya örneği test makinesi üzerindeki yükseltme plakası üzerine hiç boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilerek 5 ile 10 dakika arasında yenilenecek şekilde sabit bir gerilme hızında sürekli olarak basınç uygulanır. Kaya örneği yenildiği anda basınç yüklemesi durdurulup deney aleti ekranından yükleme hızı, yükleme süresi ve yenilme anındaki yük okunur (Yaşar, 2000). Bu veriler, kayaçların poisson oranını belirlemede kullanılır. Ayrıca düşey genleşme oranlarının da ölçümü ile kayaç numuneleri için genleşme, gerilme diyagramları elde edilebilmekte ve buradan kayacın deformasyon özellikleri ile Young Modülü belirlenebilmektedir (Şekil 3.9.).



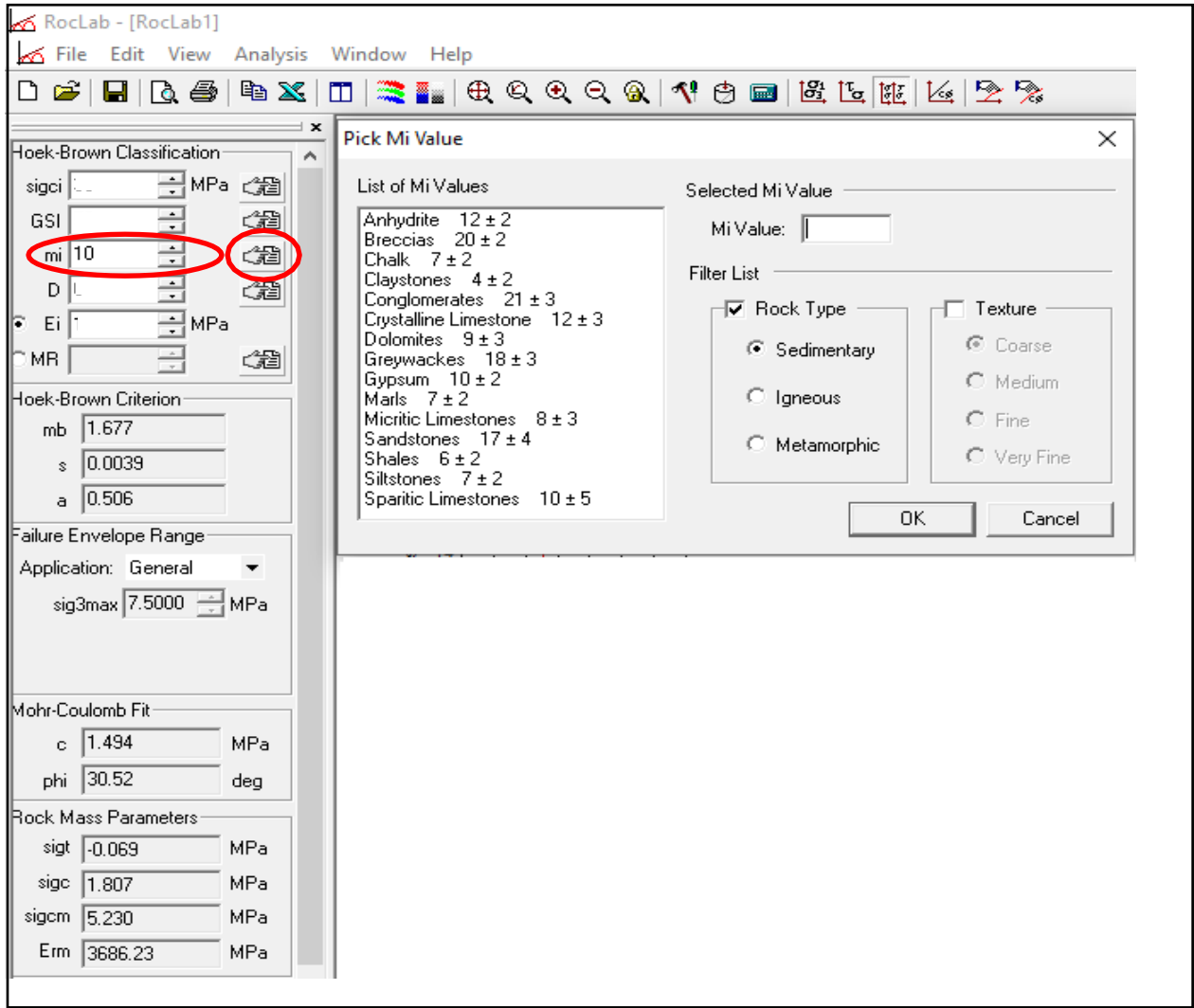
Şekil 3.9. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deney Düzeneği(Tuncay,2012)

### 3.4.Jeomekanik Parametrelerin Belirlenmesi

#### 3.4.1.Kaya Malzeme Sabiti (mi) Belirlenmesi

Kaya malzeme sabiti ( $m_i$ ), kaya türüne bağlı olarak gelişen jeolojik dayanım indeksi ve örselenme faktörüne bağlı olan bir katsayıdır (Emir,2017). Roclab 1.0 programında girdi parametresi olarak kullanılacak olan kaya kütlelerine ait  $m_i$  sabiti, programın içerisine referans olarak dahil edilmiş olan ve Hoek (2007) tarafından önerilmiş Tablo 3.16.' da bulunan değerler referans alınarak ve şekilde gösterilen adımlar takip edilerek belirlenmiştir. (Şekil 3.10).





Şekil 3.10. Roclab programı ile mi sabitinin belirlenmesi

### 3.4.2. Mb, s ve a Değerlerinin Belirlenmesi

Kaya kütlelerine ait elde edilen GSI, mi ve D değerlerinin elde edilmesinden sonra görgül eşitlikler kullanılarak mb, s ve a sabitleri hesaplanmaktadır.

Mb değeri için;

$$Mb = mi \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (3.12.)$$

S değeri için;

$$S = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (3.13)$$

a değeri için;

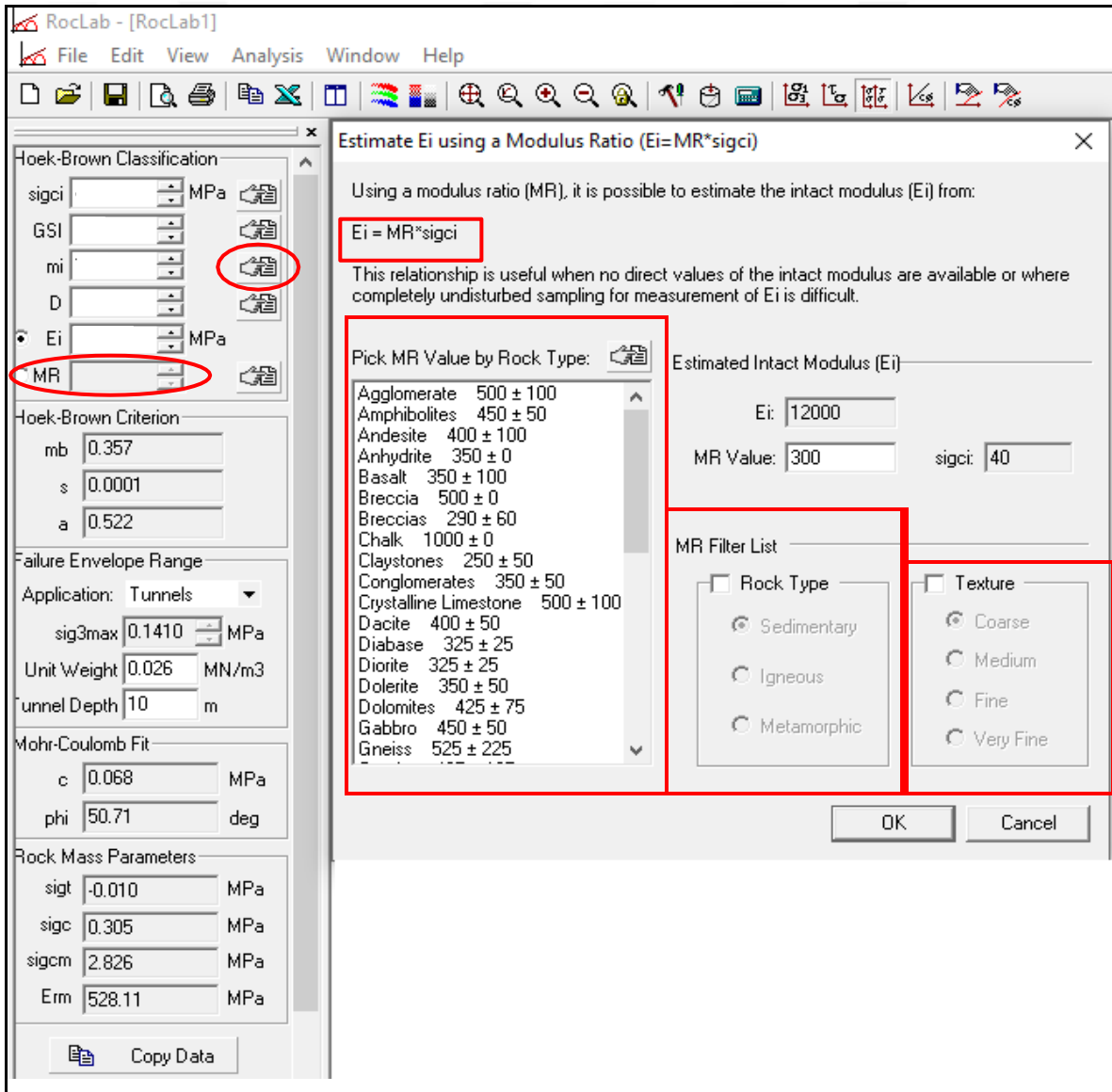
$$\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-20/3} \right) \quad (3.14.)$$

olarak hesaplanmaktadır. Roclab 1.0 programında bu bağıntılar referans olarak alınmaktadır. Girdi parametreleri Mi, GSI ve D değerleri bilindiğinde bu sabitler otomatik olarak hesaplanmaktadır.

### 3.4.3 Elastiste Modülünün Belirlenmesi

Hoek kanuna göre elastik malzemeler üzerlerine uygulanan basınca şekil değiştirerek tepki verirler ve basınç ortadan kalktığında tekrar eski hallerine dönerler. Bu malzemelerde gerilme ve birim deformasyon oranı sabittir. Linear ölçeklerde ise bu özellik ‘‘Elastiste modülü’’ olarak değerlendirilmektedir (Emir,2017). Bu parametre hesaplanırken, Hoek ve Diedrichs (2007) tarafından önerilen ve Roclab programının referans aldığı çalışmadan elde edilen bağıntı kullanılmıştır. Programa gerekli parametreler MR ( Modulus Ratio) ve  $\sigma_{ci}$  girilerek  $E_i$  (Elastiste Modülü) hesaplanmıştır (Şekil 3.7.).MR değerleri atamak için Tablo 3.25 esas alınmıştır.

$$E_i = MR * \sigma_{ci} \quad (3.15.)$$



Şekil 3.11. Roclab programı ile Elastiste Modülünün belirlenmesi

**Tablo 3.20.** MR (Modulus Ratio) değer seçimi kılavuzu (Sönmez ve Ulusay,2007)

Kaya türü	Sınıf	Grup	Yapı			
			İri	Orta	İnce	Çok ince
Sedimenter	Kırıntılı		Konglomera 300-400	Kumtaşı 200-350	Silttaşı 350-400	Kiltası 200-300 Şeyl 150-250 Marm 150-200
			Breş 230-350		Grovak 350	
	Kırıntısız	Karbonatlar	Kristalin kireçtaşı 400-600	Sparitik kireçtaşı 600-800	Mikritik kireçtaşı 800-1000	Dolomit 350-500
		Evaporitler		Jips (350) <sup>*</sup>	Anhidrit (350) <sup>*</sup>	
Organik					Tebeşir 1000+	
Metamorfik	Foliasyonsuz		Mermer 700-1000	Hornfels 400-700 Metakumtaşı 200-300	Kuvarsit 300-450	
	Az foliasyonlu		Migmatit 350-400	Amfibolit 400-500	Grays 300-750 <sup>*</sup>	
	Foliasyonlu <sup>*</sup>			Şist 250-1100 <sup>*</sup>	Filit Mikaşist 300-800 <sup>*</sup> Sleyt 400-600 <sup>*</sup>	
Magmatik	Plütonik	Açık	Granit 300-550	Diyorit 300-350 Grenodiyorit 400-450		
		Koyu	Gabro 400-500	Dolerit 300-400 Norit 350-400		
	Hipabisal		Porfiri (400) <sup>*</sup>	Diyabaz 300-350		
	Volkanik	Lav		Riyolit 300-500 Andezit 300-500	Dasit 350-450 Bazalt 250-450	
		Piroklastik	Aglomerata 400-600	Volkanik breş (500) <sup>*</sup>	Tuf 200-400	

### 3.4.4. Deformasyon Modülünün Belirlenmesi

Roclab 1.0 programı kullanılarak kaya kütlelerine ait girdi parametreleri *sigci*, *GSI*, *mi*, *D*, *Ei* değerleri girilmiştir. Bu girdiler kullanılarak deformasyon modülü hesaplanmıştır. Program bu hesaplama için Hoek ve Diederichs (2007) tarafından elastisite modülü bilinen kaya kütleleri için önerilen aşağıdaki bağıntıyı referans almıştır.

$$E_{rm} = E_i \left( 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right) \quad (3.16.)$$

Burada  $E_{rm}$ : Kaya kütlelerinin deformasyon modülü,  $E_i$ : Tek eksenli basınç değerleri ile bulunan kayaç malzemesine ait elastisite modülleri,  $D$ : Örselenme faktörü ve  $GSI$ : Jeolojik dayanım indeksidir.

### 3.4.5. Örselenme Faktörünün (De) Belirlenmesi

Jeolojik Dayanım İndeksi bölümünde anlatılan Şekil 3.6. da bulunan kılavuz bilgiler yardımı ve tünelin kazı yöntemi göz önünde bulundurularak Örselenme Faktörü (De) belirlenmiştir.

### **3.5.DEFORMASYON ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN BELİRLENMESİ**

Yer kabuğunda, volkanik ve tektonik hareketler sebebiyle meydana gelen tünel, köprü, baraj vb. büyük mühendislik yapılarında veya etraflarında meydana gelen yatay ve düşey yönlerde oluşan şekil değişikliklerine deformasyon denilmektedir. Bu deformasyonlar burulma, çökme, oturma, yükselme, açılma, dönme, genişleme, bükülme gibi şekillerde gözlenebilmektedir. Tünelde oluşan deformasyonlar, kazı aşamasında ve kazıdan sonra ortaya çıkan gerilmelere karşı zeminin göstermiş bir tepkidir (Seydanlıoğlu,2009). Tünelde gözlenen deformasyonların sebepleri olarak; tünelin açıldığı kaya veya zemin ortamının özellikleri, tünel açma metodu ve kemerlenme gösterilebilmektedir. Deformasyonlar için yapılan bu ölçümler inklinometre, ekstansometre, yersel lazer tarama (YLT), konverjans bulonu ölçümleri ile elektronik uzaklık ve açölçer ile yapılan ölçümlerdir.

#### **3.5.1.Elektronik Uzaklık ve Açölçer (Total Station) ile 3 Boyutlu Deformasyon Ölçümü**

Tünel deformasyonlarını ölçme yöntemlerinden biri olan elektronik uzaklık ve açölçer ile yapılan ölçümde, tünel tavanı ve yan duvarlara belirli mesafede deformasyon noktaları tahsis edilmektedir. Tesis edilen noktaların koordinatları 3 boyutlu olarak ( $y, x, z$ ) jeodezik ağ oluşturularak ölçüm yapılmaktadır. Deformasyonun doğru bir şekilde belirlenmesi ve analiz edilebilmesi için periyodik olarak ölçümler yapılmaktadır (Yalçinkaya M. ve Satır B.,2005) .Tünelde yapılan ilk ölçüm zaman olarak ( $t_0$ ) olarak ve bu periyod aralığında yapılan ilk ölçüm ( $y_0, x_0, z_0$ ) olarak değerlendirilmektedir. Düzenli bir şekilde tekrarlanan diğer ( $t_i$ ) zaman aralığı olarak, ölçümler ise ( $y_i, x_i, z_i$ ) olarak adlandırılmaktadır. Yapılan ölçümler referans olarak yapılan ilk kayıtlar ile karşılaştırılarak , ( $y_i-y_0, x_i-x_0, z_i-z_0$ ) noktaların deformasyonları belirlenmektedir (Satır.,2007). Noktaların ( $y$ ) ve ( $x$ ) koordinat farkları yatay yöndeki yer değiştirmeleri, ( $z$ ) koordinat farkları da düşey yöndeki yer değiştirmeleri göstermektedir.

### **3.6.DEFORMASYONLARIN ANALİZ YÖNTEMLERİ VE MODELLENMESİ**

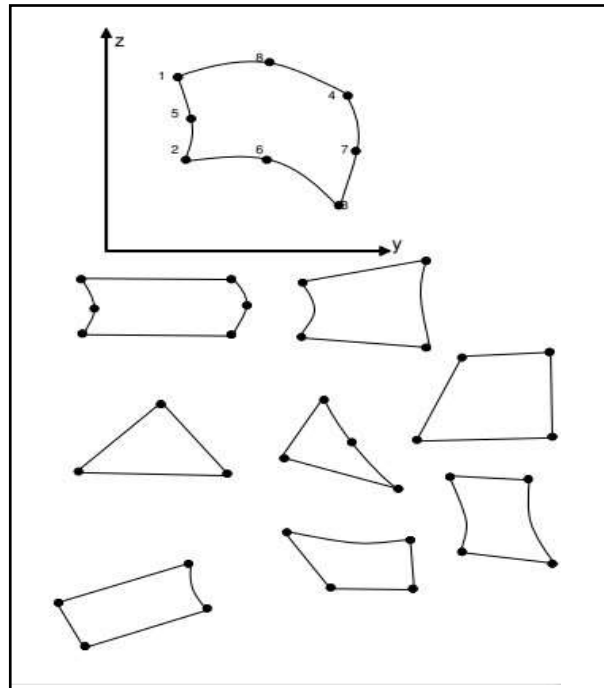
#### **3.6.1. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)**

SEM (Sonlu Elemanlar Metodu) ilk kez 1977 yılında Zienkiewicz tarafından cebirsel olarak tanımlanan problemlerin çözülmesi amacıyla ortaya atılmıştır (Zienkiewicz,1977). Bu yöntemde temel amaç karmaşık bir problemi daha basit hale getirerek çözümü kolaylaştırmaktır. Sonlu elemanlar dayandığı temel prensipler ve birçok yazılım programıyla senkronize olarak çalışması yönüyle günümüzde neredeyse bütün mühendislik alanlarında kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem sürekli halde bulunan bir sistemi veya yapıyı sonlu eleman adı verilen parçacıklara bölmektedir. Elemanların köşe

noktaları arasındaki bağlantıyı düğüm noktaları sağlamaktadır. Sonlu eleman metodunda probleme ait çözümler düğüm noktalarında yapılmaktadır (Şekil 3.12.). Çıkan sonuçlar elemanlar üzerinden interpolate edilerek oluşturulmaktadır (Dönder, 2019).

Jeoteknik alanında SEM ilk olarak 1966 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Reyes ve Deene (1966), yeraltı uygulamalarında Clough ve Woodward (1967) ise kaya ortamındaki yatay ve düşey gerilme analizleri için kullanmışlardır (Kökçüoğlu,2006).

Yeraltı yapılarında kullanılan SEM analizinde açıklığı çevreleyen malzemenin sınır şartlarının belirlenmesi oldukça zordur (Ak, 2005). Bu yüzden tüneli çevreleyen kaya birimi içinde modellenmesi yapılan alan homojen alt bölmelere ayrılır. Bu amaçla Kulhaway (1974) birim deformasyon şartları için yaptığı çalışmada sınır elemanlarının tünel merkezinden uzaklığının tünel yarıçapının 6 katı olması gerektiğini ileri sürmüştür. Problemin çözümüne ait sınır şartlarının belirlenmesinde en önemli faktörün tünelin açıldığı ortamın özelliklerinin, süreksizlik durumunun ve ortamdaki hidrojeolojik özelliklerin olduğunu belirtmiştir. (Smith, 1982; Kulhawy, 1974). Kripakov, (1974) ise SEM de eleman seçimini yapılması beklenen problem çözümüne ve tünel ortamının jeolojik özelliklerine bağlamıştır. Eğimli bir tabakalamaya sahip olan kaya kütlesi ortamındaki bir kesitin gerilme analizi yapılabilmesi için SEM analizinde küçük elemanlar kullanılması gerekmektedir. Gerilmelerin tekdüze bir özellik gösterdiği alanlarda büyük eleman, farklı gerilme dağılımı gösteren alanlarda ise küçük elemanlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada Rocscience (2008) tarafından geliştirilen “Phase2 v7.0” (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) sonlu elemanlar programı kullanılacak ve destek sistemleri modellenecektir. Bu modellemeye göre oluşan deformasyonlar ve gerilim dağılımları gösterilecektir.



Şekil 3.12. Sonlu eleman analizinde kullanılan 2-boyutlu tipik elemanlar (Ak, 1991)

### 3.6.2. Phase 2D (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) Programı

Phases 2D, iki boyutlu olarak yer altı açıklıklarının analizinde kullanılmaktadır. Bu bilgisayar programı odaklanılan problem tipine göre sınır elemanlar veya sonlu elemanlar yöntemi seçilerek uygulanmaktadır. Phases 2D programı Toronto üniversitesinde E. Hoek, J. L. Carvalho ve B.T. Corcum'un da içinde yer aldığı kaya mühendisliği grubu tarafından geliştirilmiştir (Kökçüoğlu,2006).

Deformasyonların doğru bir şekilde belirlenip analiz edilebilmesi için programda kullanılacak adımlar sistematik bir şekilde takip edilmelidir. İlk adım olarak öncelikle tünel kesiti bilgisayara çizilmektedir. Daha sonra bu tünel kesiti kare veya dikdörtgen bir sınır içine alınmaktadır ve modelleme yapılan kesitteki farklı tabakalar birbirinden ayrılmaktadır. Tünel ilk değerlendirme aşamasında hiçbir işlem yapılmadan yalnızca arazi gerilmeleri altında ve destek sistemleri olmadan değerlendirilir. Phase 2D programının mesh (element) oluşturma özelliği ile daha önce sınır sayısı (boundary element) girilmiş olan probleme ait sonlu eleman üçgeni oluşturulur. Sonlu elemanların kesiştiği yerler düğüm (nod) olarak tanımlanmaktadır. Düğümler deformasyonun yüksek olduğu yerlerde sık, düşük olduğu yerlerde ise seyrek bir şekilde otomatik olarak oluşturulmaktadır. Daha sonra kayanın sınıfına göre elde edilen uygun tahkimat sistemleri imalat sırasına göre ve onlara ait birim ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ ), elastisite modülü (MPa), poisson oranı ve dayanım gibi özellikleri tanımlanarak modellenir. Tünele ait bütün veriler programa girildikten sonra programın bilgileri değerlendirip hesaplaması beklenir. Programdan en büyük düzlemsel ana gerilmeler  $\sigma_1$  ( $\sigma_1$ ), en küçük düzlemsel ana gerilmeler  $\sigma_3$  ( $\sigma_3$ ) ve yer değişimleri (toplam yer değişimleri, x ve y eksenleri yönündeki yer değişimleri) hesaplanmaktadır. Program tüm bu işlemleri Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, Modifiye Hoek-Brown yenilme ölçütlerinden uygun olanın seçilmesi ile yapmaktadır (Hoek vd.1993).

### 3.6.3. Phase 2D Programında Kullanılacak Girdi Parametrelerinin Belirlenmesi

Belirlenen km aralıklarına göre sınıflaması yapılmış olan kaya kütesine ait girdi parametrelerinden; poisson oranı ( $\nu$ ), birim hacim ağırlık değeri ( $\gamma$ ) kaya kütesinin tek eksenli basınç dayanım değeri ( $\sigma_{ci}$ ) ve Deformasyon Modülü ( $E_{rm}$ ) değeri kullanılmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{ci}$ ) serbest basınç deneyi ile elde edilmiştir. Laboratuvar da yapılan birim hacim ağırlık deneyi ile birim hacim ağırlık deneyi elde edilmiştir. Elastisite modülü ( $E_i$ ) ve Deformasyon Modülü ( $E_{rm}$ ) değeri ise Roclab 1.0 yazılımı ile hesaplanmıştır. Kaya sınıfı ve NATM'nesas alınarak belirlendiği destek sistemlerinden kaya bulonu, püskürtme beton, çelik iksa ve sürenlere ait Elastisite Modülü ( $E_i$ ), Poisson Oranı ( $\nu$ ), Birim Hacim Ağırlık ( $\gamma$ ) gibi özellik değerleri girilmiştir. Ayrıca destek elemanları plastik olarak değerlendirilmiştir.

## **4. BULGULAR VE TARTIŞMA**

### **4.1. Arazi ve Laboratuvar Deneyleri**

#### **4.1.1. Sondaj Çalışmalarından Elde Edilen Parametreler**

##### **4.1.1.1. RQD( Rock Quality Designation) Değeri**

KGM tarafından görevlendirilen firma denetiminde tünel giriş ve çıkış portallarına TSM-750 makinesi ile rotary-sulu metodu kullanılarak yapılan sondajlarda Sipahili formasyonuna ait birimler kesilmiştir. Bu bölgelerde yapılan sondajda kaya kütlelerine ait RQD (Rock Mass Quality) değerleri hesaplanmıştır. Bu değer 140+320,47 km’de bulunan şist birimine ait RQD değeri %10, 140+510,72 km’de bulunan şeyl birimine ait RQD değeri %20 ve son olarak 141+309,42 km’ de bulunan kireçtaşı birimine ait RQD değeri %25 olarak hesaplanmıştır.

##### **4.1.1.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi**

Tüneldeki giriş ve çıkış portalları ile içerisine ait örneklerde kayalara ait fiziksel özelliklerin belirlenmesi için birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. 140+320,47 km de bulunan şist birimine ait birim hacim ağırlık 2,65 kN/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. 140+510,72 km deki şeyl portalına ait alınan örnekte ise 2,7 kN/m<sup>3</sup> ve 141+309,42 km’ deki kireçtaşına ait örnekte ise 2.73 kN/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır.

##### **4.1.1.3. Tek Eksenli Basınç Deneyi**

Alınan örnekler üzerinde yapılan deneylerden 140+320,47 km de bulunan şist birimine ait tek eksenli basınç dayanımı 30 MPa, 140+510,72 km de bulunan şeyl birimi için tek eksenli basınç dayanımı 55 MPa, 141+309,42 km de bulunan kireçtaşı için 68 MPa bulunmuştur.

### **4.2. Kaya Kütlelerinin Sınıflarının Belirlenmesi**

#### **4.2.1.RMR Sınıflama Sistemi**

Tünelin km 140+320,47 ve km 141+309,42 arası bölgeleri içerisinde bulunan 3 farklı bölüm olarak ayrılmış kaya kütlelerine ait parametrelerinin puanlandırılması ve temel RMR puanı hesaplanmıştır (Tablo 4.1.). Bu sınıflamaya göre şist birimi Çok Zayıf Kaya, şeyl birimi Zayıf Kaya ve kireçtaşı birimi Orta Kaya olarak belirlenmiştir (Tablo 4.2.)

**Tablo 4.1.** Kaya kütlelerine ait RMR Puanları

SINIFLAMA PARAMETRELERİ	140+320,47 km (Şist)	140+510,72 km (Şeyl)	141+309,42 km (Kireçtaşı)
<b>KAYAÇ DAYANIMI(MPA)</b>	30 Mpa (4)	55 (7)	68 (12)
<b>RQD(%)</b>	% 15 (3)	%15 (3)	%25 (3)
<b>SÜREKSİZLİK ARALIĞI(cm)</b>	<6 mm (5)	<6 (5)	6-20 (8)
<b>SÜREKSİZLİK DURUMU</b>			
a) Süreksizlik Uzunluğu	10-20 m (1)	3-10 m (2)	1-3 m (4)
b) Süreksizlik Açıklığı (mm)	1-5 mm (1)	1-5mm (1)	<0.1 mm (5)
c) Pürüzlülük	Kaygan (0)	Kaygan (0)	Kaygan (0)
d) Dolgu	Yumuşak Dolgu <5 mm (2)	Yumuşak Dolgu <5 mm (2)	Sert Dolgu >5 mm (2)
e) Bozunma	Bozunmuş (1)	Bozunmuş (1)	Orta Derece (3)
<b>YERALTI SUYU</b>	<10 (10)	<10 (10)	Yok (15)
<b>TOPLAM RMR</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>52</b>
<b>Süreksizlik Durumu için Düzeltme</b>	Olumsuz (-10)	Olumsuz (-10)	Olumsuz (-10)
<b>DÜZELTLMİŞ RMR</b>	<b>17</b>	<b>20</b>	<b>42</b>

**Tablo 4.2.**Kaya Kütlelerinin RMR Puanı ile Sınıflandırılması

Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
<b>Puan</b>	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
<b>Sınıf No</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>

#### 4.2.2. Q SINIFLAMA SİSTEMİ

140+320,47 km 'de bulunan şist birimine ait Q sınıflama sistemine ait hesaplama aşağıda yapılmıştır. Bu sınıflama sistemi için gerekli parametreler ve değerleri şunlardır.

- 1) RQD (Kaya Kalite Göstergesi) : 10



- 2)  $J_n$  (Eklem Takımı Sayısı) : 6
- 3)  $J_r$  (Eklem Pürüzlülük Sayısı) : 0.5
- 4)  $J_a$  (Eklem Alterasyon Sayısı) : 6
- 5)  $J_w$  (Eklem Su Azaltma Faktörü) : 1
- 6) SRF (Gerilim Azaltma Faktörü) : 7.5

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{f}{j} \times \frac{J_w}{SRF} = 0,019$$

Q değerine göre RMR değeri (  $RMR=9 \ln Q + 44$  ) : 8.3

RQD/  $J_n$ : 1,67

$J_r$ /  $J_a$ : 0,08

Eş değer boyut (De) :  $\frac{\text{Kazı genişliği, çapı veya yüksekliği}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}} = 12$

Maksimum tahkimatsız açıklık: 0,41 m

Q değeri ve RMR puanı ile yapılan değerlendirmede ÖNORM B 2203 1994 SONRASI yapılan Tablo 3.17 'e göre kazı sınıfı **C2 Baskılı** olarak belirlenmiştir (Şekil 4.1.).



**Şekil 4.1** 140+320,47 km'ye ait ayna fotoğrafı

140+510,72 km de bulunan şeyl birimine ait Q sınıflama sistemine ait hesaplama aşağıda yapılmıştır. Bu sınıflama sistemi için gerekli parametreler ve değerleri şunlardır.

- 1) RQD (Kaya Kalite Göstergesi) : 15
- 2)  $J_n$  (Eklem Takımı Sayısı) : 9

3)  $J_r$  ( Eklem Pürüzlülük Sayısı ) : 0,5



- 4) Ja (Eklem Alterasyon Sayısı) : 8
- 5) Jw (Eklem Su Azaltma Faktörü) : 0,66
- 6) SRF (Gerilim Azaltma Faktörü) : 2,5

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{j_a} \times \frac{J_w}{SRF} = 0,028$$

Q değerine göre RMR değeri (  $RMR=9 \ln Q + 44$  ) : 11,8

RQD/ Jn: 1,67

Jr/ Ja :0,06

Eş değer boyut (De) :  $\frac{\text{Kazı genişliği, çapı veya yüksekliği}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}} = 12$

Maksimum tahkimatsız açıklık: 0,48 m

Q değeri ve RMR puanı ile yapılan değerlendirmede ÖNORM B 2203 1994 SONRASI yapılan Tablo 3.17 'e göre kazı sınıfı **C2 Baskılı** olarak belirlenmiştir (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. 140+510,72 km'ye ait ayna fotoğrafı

141+309,42 km 'de bulunan kireçtaşıdan oluşan birimine ait Q sınıflama sistemine ait hesaplama aşağıda yapılmıştır. Bu sınıflama sistemi için gerekli parametreler ve değerleri şunlardır.

- 1) 1)RQD (Kaya Kalite Göstergesi) : 20
- 2) 2)Jn (Eklem Takımı Sayısı) : 6
- 3) Jr (Eklem Pürüzlülük Sayısı) : 1

- 4) Ja (Eklem Alterasyon Sayısı) : 3
- 5) Jw (Eklem Su Azaltma Faktörü) : 0.66
- 6) SRF (Gerilim Azaltma Faktörü) : 2,5

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{j_a} \times \frac{J_w}{SRF} = 0.293$$

Q değerine göre RMR değeri (  $RMR=9 \ln Q + 44$  ) : 33,0

RQD/ Jn: 3,33

Jr/ Ja :0,33

Eş değer boyut (De) :  $\frac{\text{Kazı genişliği, çapı veya yüksekliği}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}} = 12$

Maksimum tahkimatsız açıklık: 1.22 m

Q indeksi ve RMR puanı ile yapılan değerlendirmede ÖNORM B 2203 1994 SONRASI yapılan Tablo 3.17 'e göre kazı sınıfı **B3 Taneli** olarak belirlenmiştir (Şekil 4.3.) .

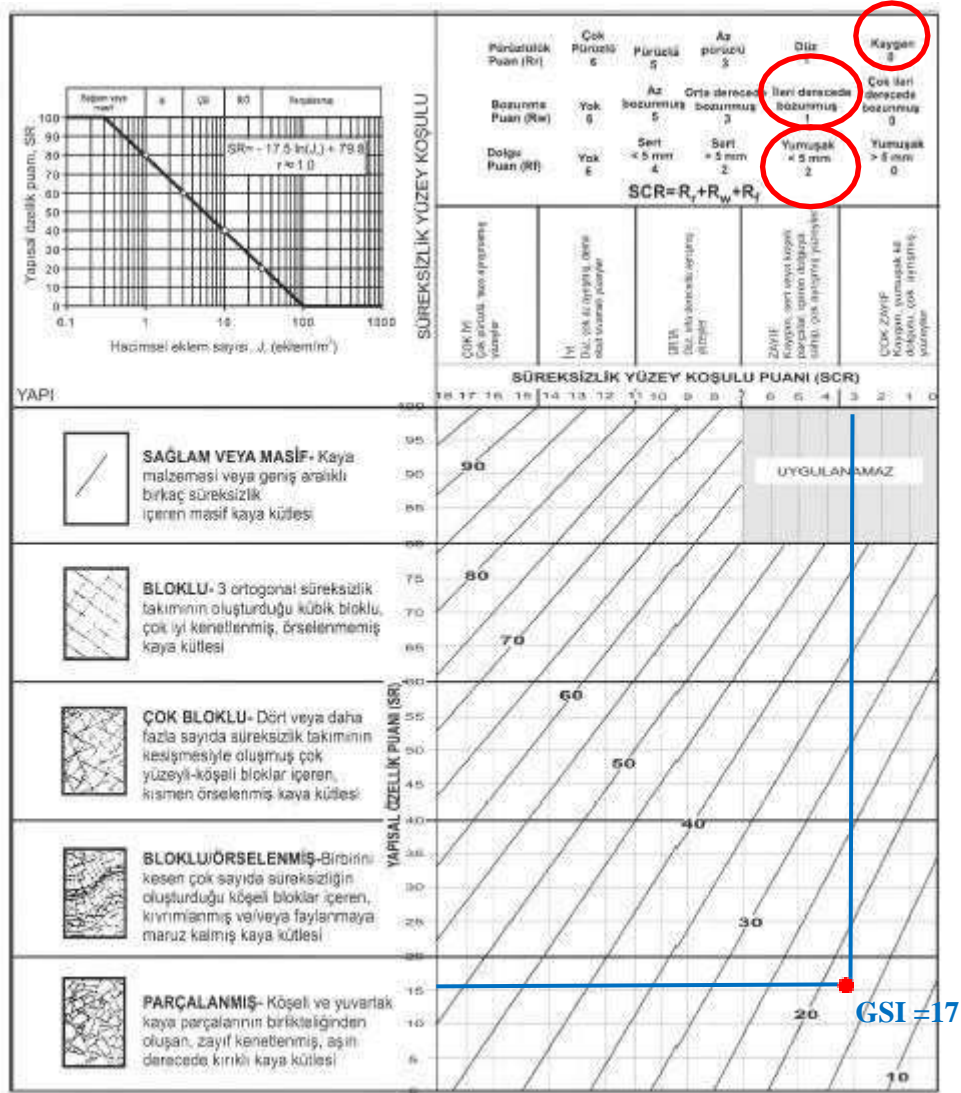


Şekil 4.3. 141+309,42'ye ait ayna fotoğrafı

#### 4.2.3. Kaya Kütlelerinin Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Çalışma alanında belirlenen kaya kütlesi sınıflama sistemlerine ait parametrelerin özellikleri dikkate alınarak GSI hesaplanmıştır. Bu özellikler Palmstörn tarafından önerilen hacimsel eklem sayısı (Jv) yardımı ile SR puanı hesaplanan ve Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından modifiye edilen GSI abağından faydalanılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Bu abağa göre SCR puanı ve Palmstörn

tarafından önerilen eşitliğe göre ise SR puanı elde edilmiştir. Bu iki puan değerlendirilerek bölümlere ait GSI belirlenmiştir (Şekil 4.4., Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.).



Şekil 4.4. 140+320,47 km 'de bulunan şist birimine ait Jeolojik Dayanım İndeksi

$$SR = 17,5 \ln (J_v) + 79,8 \quad (3.13.)$$

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (3.14.)$$

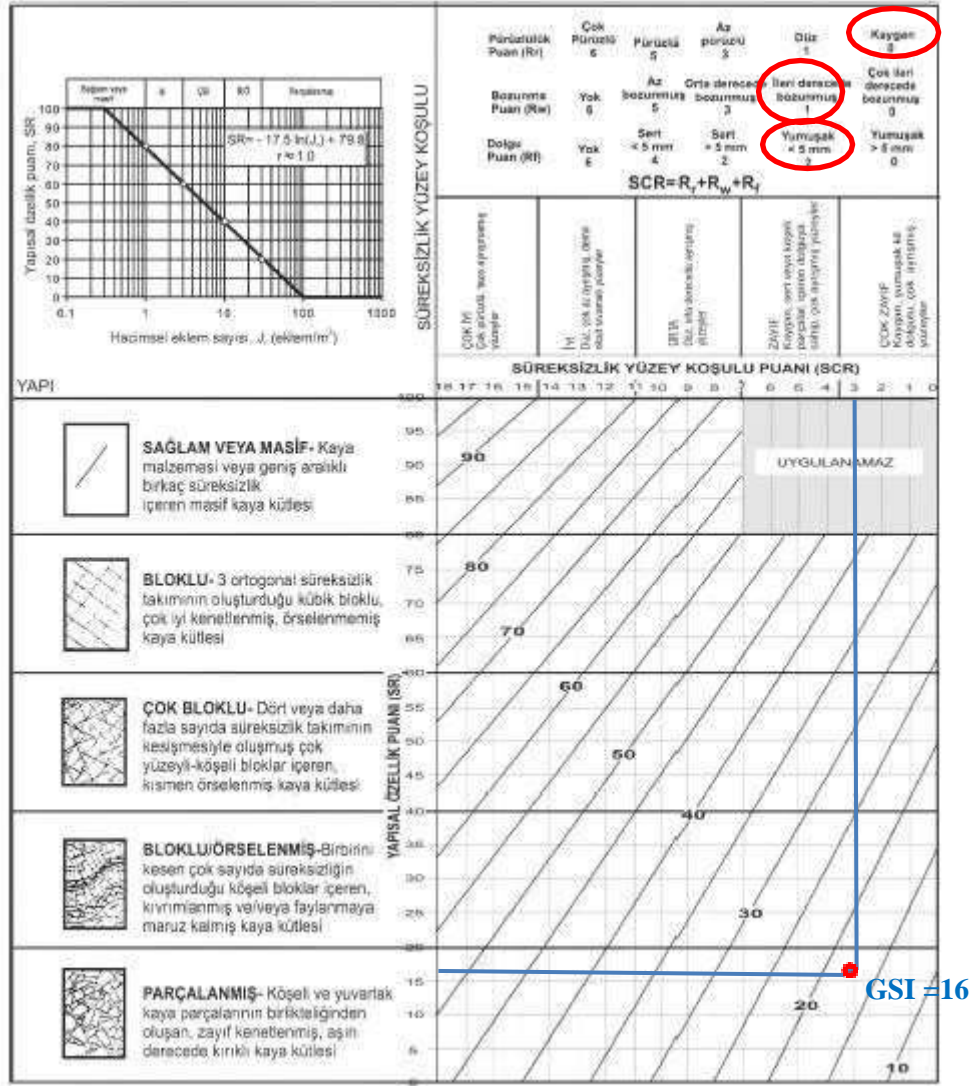
#### Şist Birimine ait GSI Hesaplaması:

$$SCR (\text{Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı}) = 0 (\text{Kaygan}) + 2 (\text{Yumuşak dolgu} < 5\text{mm}) + 1 (\text{Bozunmuş}) = 3$$

$$J_v = 38$$

$$SR (\text{Yapısal Özellik Puanı}) = -17,5 \ln (J_v) + 79,8 = 15,24$$

GSI= 17 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5.140+510,72 km ‘de bulunan şeyl birimine ait Jeolojik Dayanım İndeksi

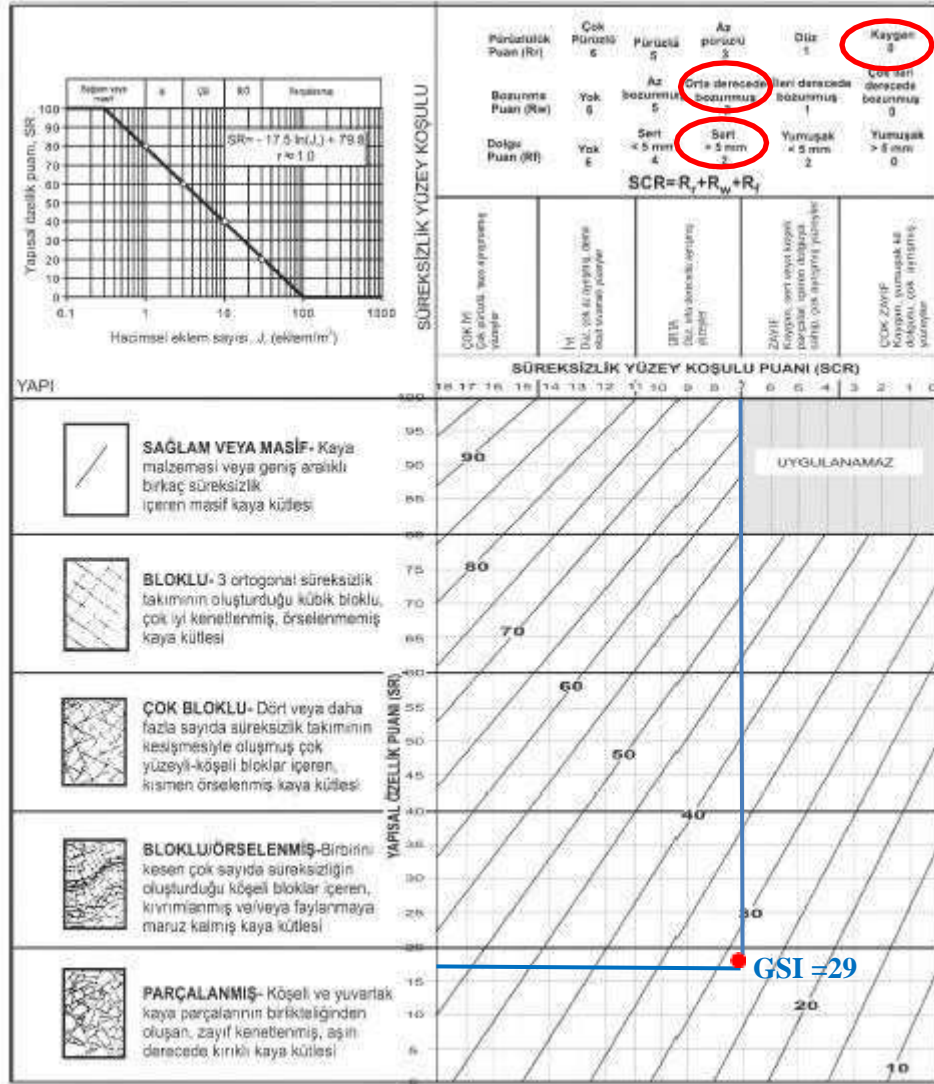
### Şeyl birimine ait GSI Hesaplaması

$$SCR= 0 (\text{Kaygan}) + 2 (\text{Yumuşak dolgu}<5\text{mm}) + 1 (\text{Çok Bozunmuş})=3$$

$$Jv= 39$$

$$SR= -17,5 \ln (39 )+79,8=15,68$$

GSI = 16 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. 141+309,42 km 'de bulunan kireçtaşı birimine ait Jeolojik Dayanım İndeksi

#### Kireçtaşı birimine ait GSI Hesaplaması

$$SCR = 0 (\text{Kaygan}) + 4 (\text{Sert dolgu } < 5 \text{ mm}) + 3 (\text{Orta Derece Bozunmuş}) = 7$$

$$J_v = 3$$

$$SR = -17,5 \ln(36) + 79,8 = 17,08$$

**GSI = 29** olarak hesaplanmıştır.

### 4.3. Jeomekanik Parametrelerin Belirlenmesi

#### 4.3.1. $m_i$ sabitinin Belirlenmesi

Roclab programı içerisine referans olarak dahil edilmiş olan ve Hoek (2007) tarafından önerilen Tablo 3.20 aracılığı ile değerleri belirlenmiştir. Buna göre 140+320,47 km 'de bulunan şist birimi için  $m_i$  değeri 9, 140+510,72 km 'deki şeyl birimi için  $m_i$  değeri 6 ve 141+309,42 km 'de bulunan kireçtaşı birimi için  $m_i$  değeri 10 olarak kullanılmıştır.

#### 4.3.2. Örselenme Faktörünün Belirlenmesi (De)

Örselenme faktörü tünelin kazı yöntemi patlatma ve mekanik kazı olduğu için Tablo 3.16 dan  $D=0,5$  olarak belirlenmiştir.

#### 4.3.3. Elastiste Modülünün Belirlenmesi

Kayalara ait elastiste modülleri tek eksenli basınç dayanımı ve MR parametreleri aracılığı ile Bölüm 3.4.3. 'de anlatıldığı gibi hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre 140+320,47 km 'de bulunan şist birimine ait  $E_i$  13500 MPa, 140+510,72 km 'de bulunan şeyl birimine ait  $E_i$  8000 MPa, 141+309,42 km 'de bulunan kireçtaşı birimine ait  $E_i$  34000 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 4.3.).

**Tablo 4.3.** Birimlerin Elastiste Modülü Değerleri

Birim	MR(Modulus Ratio)	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$E_i$
140+320,47 (Şist)	450	30	13500
140+510,72 (Şeyl)	500	40	8000
141+309,42 (Kireçtaşı)	500	68	34000

#### 4.3.4. Deformasyon Modülünün Belirlenmesi

Bölüm 3.4.4 de anlattığı yöntem ve Roclab 1.0 yazılımı ile kaya kütlelerine ait  $E_{rm}$  (Deformasyon Modülü) değerleri Tablo 4.4. 'da gösterildiği gibidir.

**Tablo 4.4.** Birimlerin Deformasyon Modülü Değerleri

Birimler(km)	$E_{rm}$ (MPa) Değerleri
140+320,47 (Şist)	371,67 MPa
140+510,72 (Şeyl)	215,06 MPa
141+309,42 (Kireçtaşı)	1306,25 MPa

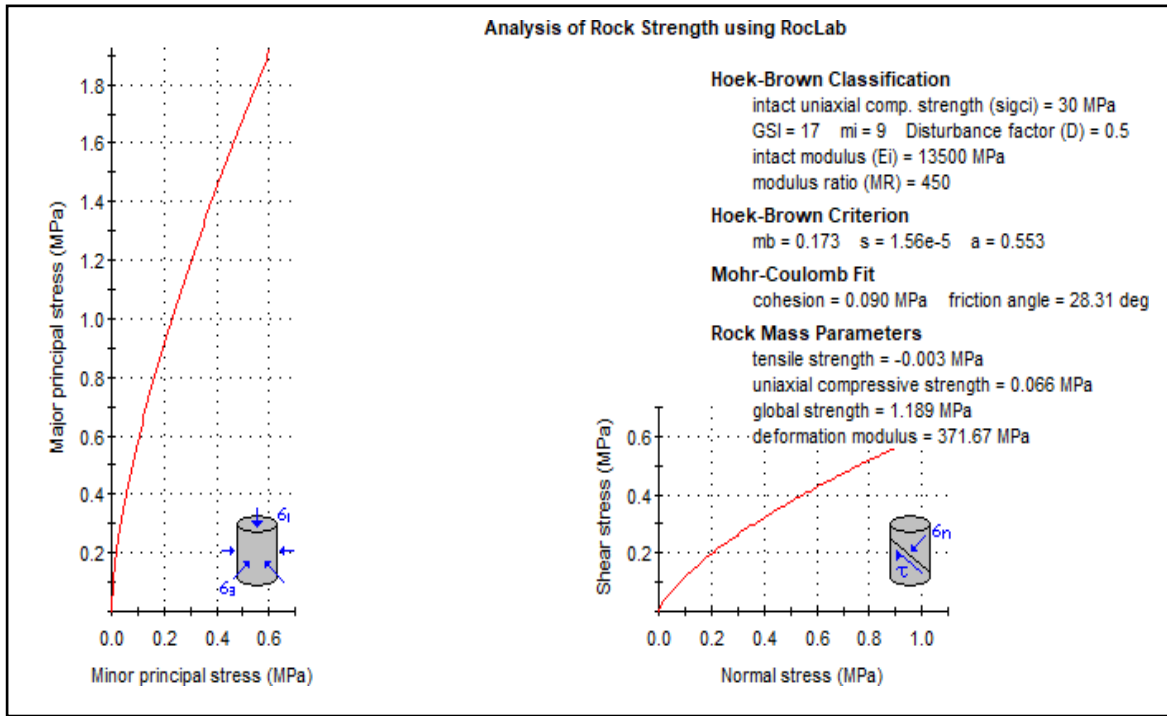


#### 4.3.5. Poisson Oranının Belirlenmesi

Poisson oranı( $\nu$ ) şist için 0.20, şeyl için 0.27 ve kireçtaşı için 0.30 olarak hesaplanmıştır.

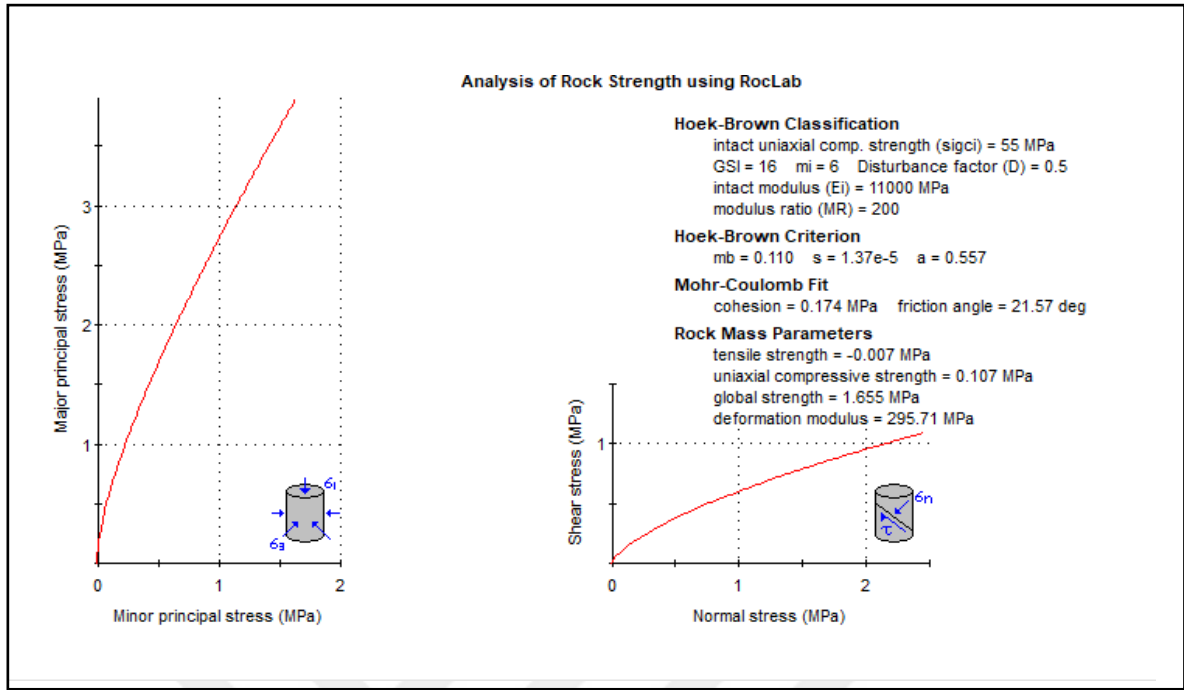
#### 4.4. Roclab 1.0 Yazılımı ile Kaya Kütlelerine Ait Jeomekanik Parametrelerin Hesaplanması

140+320,47 km 'de bulunan şist birimine ait GSI,  $m_i$ , MR ve D değerleri Roclab 1.0 yazılımında girdi olarak kullanılarak Hoek-Brown yenilme ölçütüne ait  $m_b$ ,  $s$ ,  $a$  ve deformasyon modülü parametreleri elde edilmiştir. Bu hesaplamalara göre  $m_b$  değeri 0.173,  $s$  değeri  $1.56e-5$  ve  $a$  değeri 0.553 ve deformasyon modülü 371,67 Mpa olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.7).



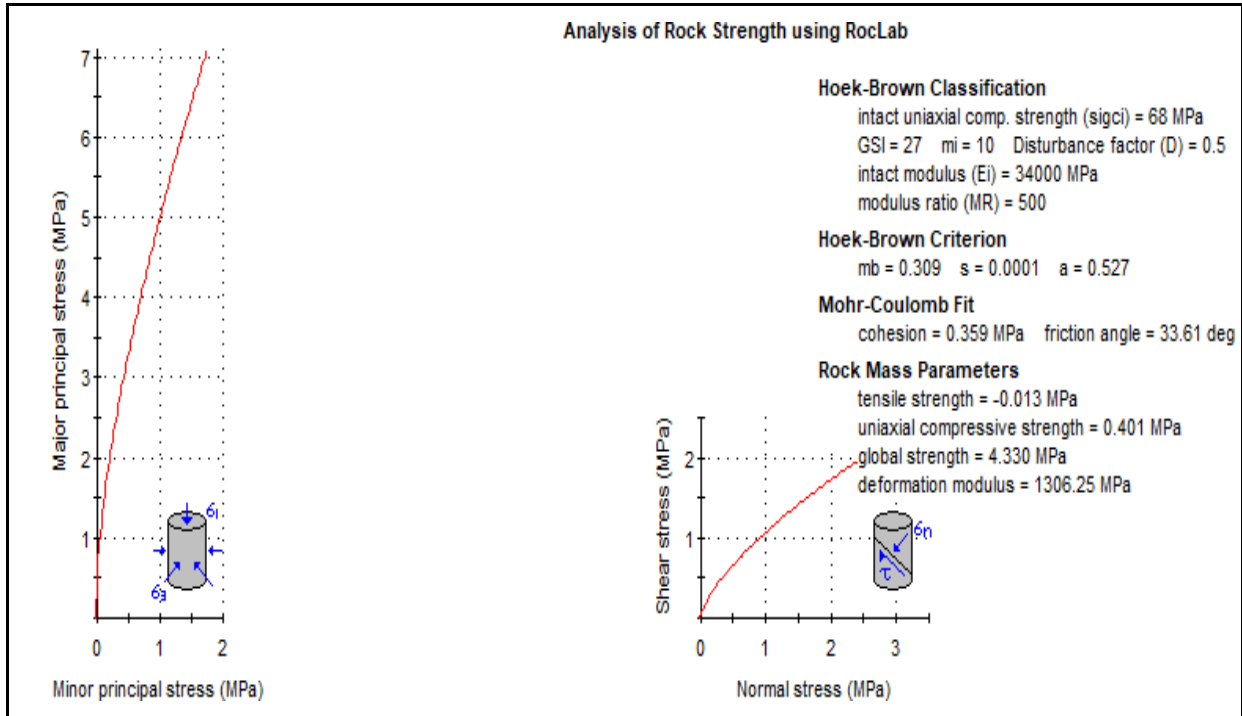
Şekil 4.7. 140+320,47 km 'de bulunan şist birimine ait jeomekanik parametreler

140+510,72 km 'de bulunan şeyl birimine ait GSI,  $m_i$ , MR ve D değerleri Roclab 1.0 yazılımında girdi olarak kullanılarak Hoek-Brown yenilme ölçütüne ait  $m_b$ ,  $s$ ,  $a$  ve deformasyon modülü parametreleri elde edilmiştir. Bu hesaplamalara göre  $m_b$  değeri 0.110,  $s$  değeri  $1.37e-5$  ve  $a$  değeri 0.557 ve deformasyon modülü 295,71 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.8.).



**Şekil 4.8.** 140+510,72 km deki şeyl birimine ait jeomekanik parametreler

141+309,42 km' de bulunan şeyl birimine ait GSI,  $m_i$ , MR ve D değerleri Roclab 1.0 yazılımında girdi olarak kullanılarak Hoek-Brown yenilme ölçütüne ait  $m_b$ ,  $s$ ,  $a$  ve deformasyon modülü parametreleri elde edilmiştir. Bu hesaplamalara göre  $m_b$  değeri 0.309  $s$  değeri 0.001 ve  $a$  değeri 0.527 ve deformasyon modülü 1306,25 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.9.).



**Şekil 4.9.** 141+309,42 km' de bulunan kireçtaşı birimine ait jeomekanik parametreler

**Tablo 4.5.** Kaya kütlelerine ait Phase programında kullanılan girdi parametreleri

Bölgümler	140+320,47 km şist	140+510,72 km şeyl	141+309,42 kireçtaşı
<b>Birim Hacim Ağırlık (<math>\gamma</math>)</b>	2.65 MPa	2.7 MPa	2.73 MPa
<b>Deformasyon Modülü(Erm)</b>	371.67 MPa	295.71 MPa	1306.25 MPa
<b>Poisson Oranı (<math>\nu</math>)</b>	0.20	0.27	0.30
<b>Tek Eksenli Basınç Dayanımı (<math>\sigma_{ci}</math>)</b>	30 MPa	55 MPa	68 MPa

#### 4.5. Tünel Kazı Yönteminin Belirlenmesi

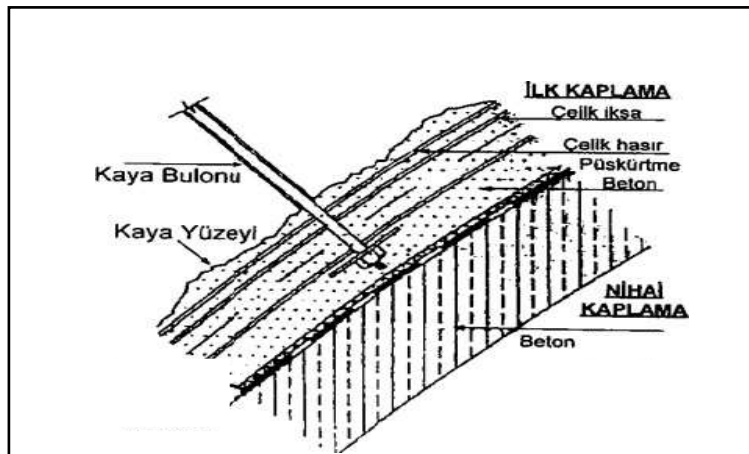
Tünelde kazı yöntemi büyük bir önem arz etmektedir. Bu kazı tekniğini doğru bir şekilde seçebilmek için çok sayıda parametreyi bir bütün olarak değerlendirmek gerekmektedir. Kazı tekniğine karar verirken değerlendirilen parametreler zemin veya kaya ortamının özellikleri, kaya sınıfına göre NATM'İN kazı sınıflaması, ilerleme hızı, maliyet ve emniyet gibi özelliklerdir. Tünelde ait kazı işlemleri genellikle aşağıdaki yöntemler kullanılarak yapılmaktadır (Uğurel,2010).

- 1)Delme - Patlatma Yöntemi,
- 2) Tünel Delme Makinesi Yöntemi (Tunnel Boring Machine-TBM)
- 3)Zemin Basınç Dengeleme Makinesi Yöntemi (Earth Pressure Balance Machine -EPBM)
- 4) Aç - Kapa Yöntemi

Bu tez çalışması kapsamındaki projede tünel kazı yöntemi olarak mekanik kazı ve patlatma metodu uygulanmıştır.

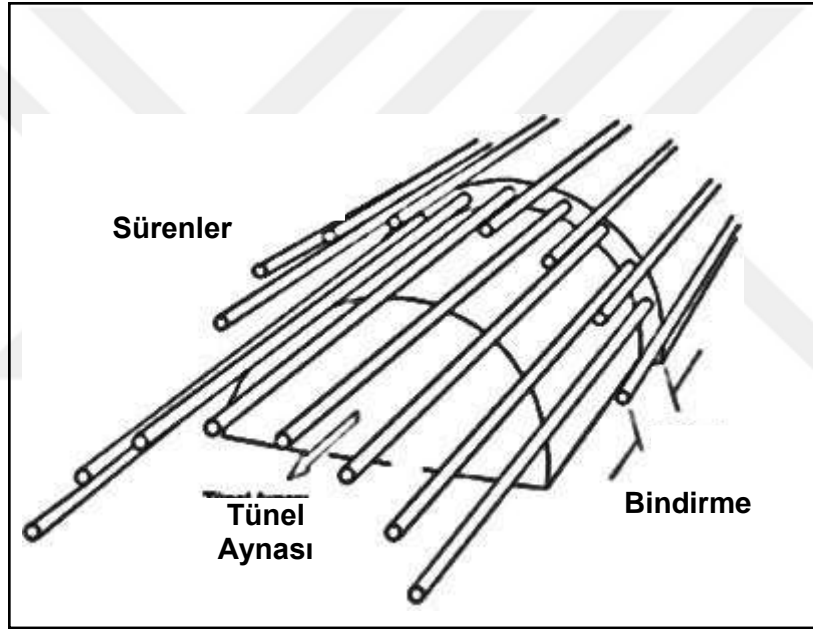
#### 4.6.Tünel Destek Sistemleri

NATM tünel destek elemanları çelik iksa, çelik hasır, püskürtme beton ve kaya bulonudur (Şekil 4.10.).

**Şekil 4.10.** NATM Destek Elemanları (Polat,2002)

#### 4.6.1. Sürenler

Sürenler, tünellerde kazı aşamasına geçilmeden önce tünel ekseninin tavan kısmında meydana gelebilecek olan çökme, malzeme akışı ve sökülme gibi durumları önlemek amacıyla kullanılmaktadırlar (Şekil 4.11., Şekil 4.12 ve Şekil 4.13.). Sürenler enjeksiyonlu veya enjeksiyonsuz olarak 2 farklı şekilde kullanılmaktadırlar. Uzun veya kısa olan sürenlerin kendi içerisinde avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Uzun sürenlerin her yeni kazıda kayanın kendini taşıyabilme süresini arttırır bu sebeple projenin daha güvenli ilerlemesini sağlamaktadır. Aynı ilerisinde bulonlama ile çalışarak deformasyonu azaltmaktadır. Kısa sürenler ise sulu olarak monte edilmesinden dolayı zeminin özelliklerinde değişmelere neden olmaktadır. Zemin şartlarının kötü olduğu durumlar göçmeler yaratabilmektedir.



Şekil 4.11. Süren uygulama şeması



Şekil 4.12. Süren delgisi uygulamasına ait bir görüntü

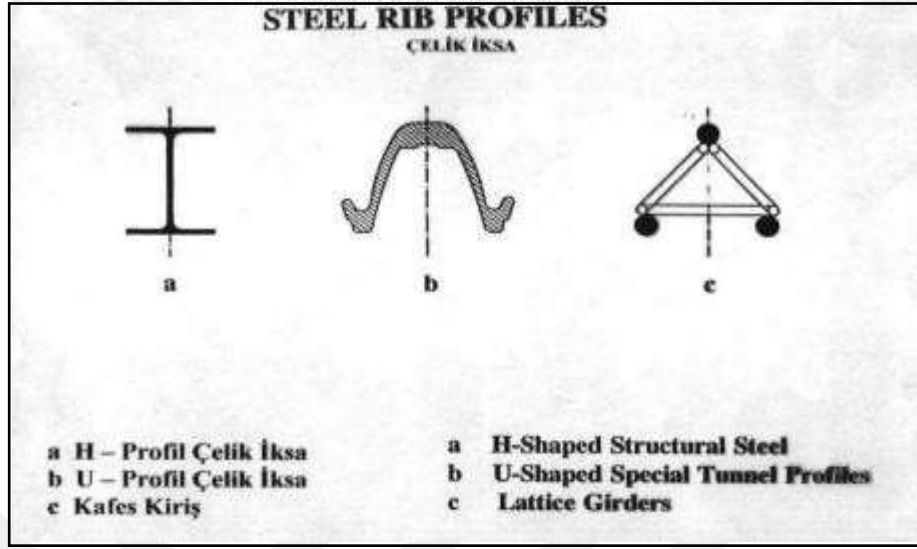


Şekil 4.13. Süren montajına ait bir görüntü

#### 4.6.2. Çelik İksa

Çelik iksalar şekil itibari ile tünelin geometrik modelinin oluşmasına yardımcı olarak, kazı sonrası oluşan deformasyonları önlemede önemli bir etkindirler. Çelik iksalar, püskürtme beton ve kaya bulonları bir bütün olarak çalışarak tünel üzerine gelen yükü taşımaktadırlar. Uygulanan çelik iksa tipleri buldukları kaya ortamına göre; I, H, U profil olarak belirlenmektedirler (Şekil 4.14.). Eğer kaya

ortamında deformasyon oranı yüksek ise U tipi çelik iksa kullanılmaktadır. Montajları yapılırken kaya ile iksa arasında hiç boşluk bulunmayacak şekilde monte edilmelidirler.



Şekil 4.14.Çelik İksa Tipleri



Şekil 4.15. Çelik İksa uygulamasına ait bir görüntü



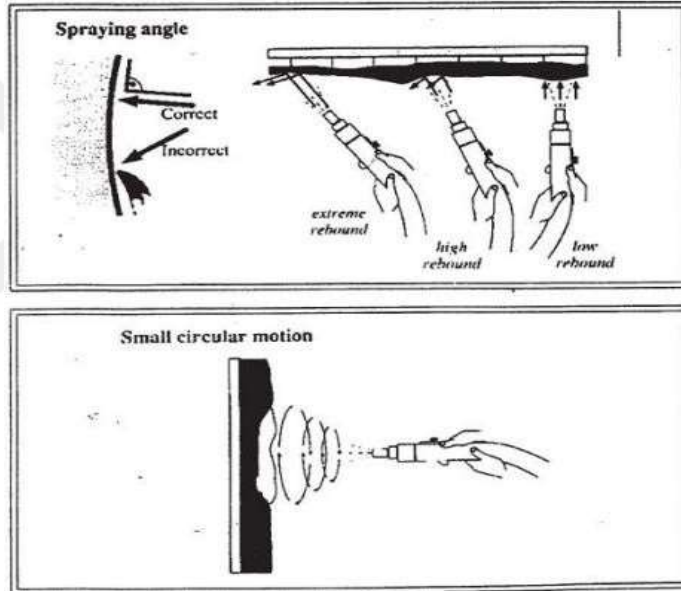
Şekil 4.16. Çelik iksanın uygulanmış görüntüsü

#### 4.6.3. Püskürtme Beton

Püskürtme beton portland çimentosu, su ve kum karışımından hazırlanan bir malzemedir. Dayanımı yüksek lastikler veya özel olarak üretilen saç borularla kullanım yerine iletilen ve önceden hazırlanmış yüzeye basınçlı olarak uygulanmaktadır (Bekişoğlu, 1993), (Şekil 4.17). ACI (Amerikan Beton Enstitüsü)'nin püskürtme beton tanımı ise; püskürtme harç veya betonun bir yüzeye yüksek hızda hava basıncıyla ve doğru bir açıyla püskürtülmesidir (Şekil 4.18). Püskürtme beton kayadaki süreksizliklerin arasını doldurularak kaya kütlelerinin dayanımını arttırmaktadır. Çöken ve duraylılığını yitiren tabaklar için kemerleşme sağlayarak deformasyonlarda azalma sağlamaktadır. Kazılan yüzeylerin hava ve su ile tepkimeye girmesini önleyerek bozunmayı önlemektedir (Yardımcı, 2012)



Şekil 4.17. Püskürtme Beton uygulamasına ait bir görüntü

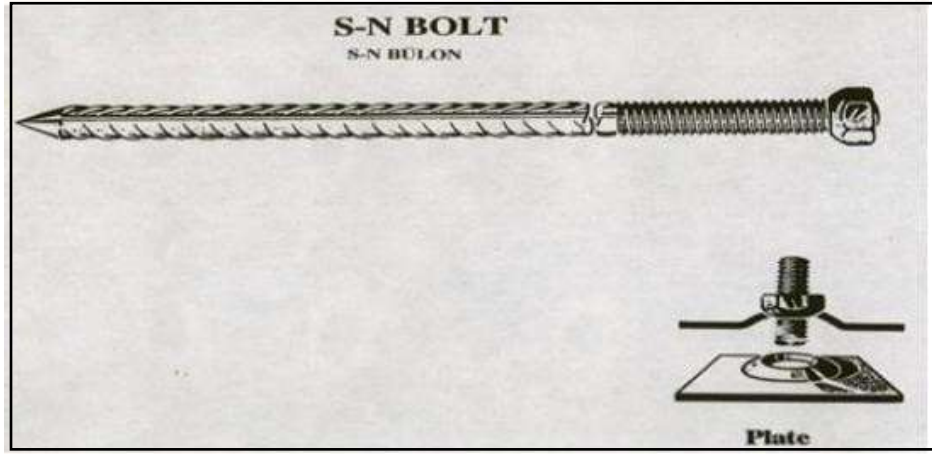


Şekil 4.18. Püskürtme Beton Uygularken Dikkat Edilmesi Gerekenler

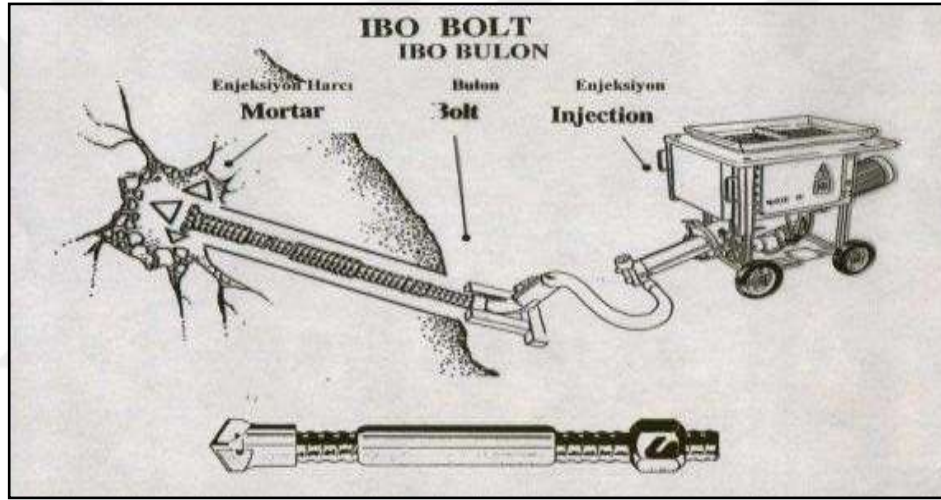
#### 4.6.4. Kaya Bulonları

Kaya bulonları tünellerin tahkimat sistemlerinde en önemli kısımlardan biridir. Kayanın dayanımını artırarak tünel çevresindeki kayanın gerilmelere yenilmesini engellemektedir. En çok tercih edilen bulon tipleri SN, PG, IBO ve Swellex tipi bulonlardır. SN bulonlar enjeksiyonlama işleminin bulon yerleştirilmeden önce yapılmaktadır (Şekil 4.19.). PG bulonlar SN bulonlar ile çok benzer olsa da çalışma prensibi olarak temel farkı enjeksiyonlamanın bulon delgisi yapıldıktan ve bulon deliğe yerleştirildikten sonra yapılmasıdır. İBO bulon ise deliğin açılma safhasının bulon tarafından yapıldığı tiptir (Şekil 4.20.). Malzeme bu durumda delik açıldıktan bulon yerleştirmeye kadar geçen sürede stabil olarak kalamamaktadır (Ertekin,2012).





Şekil 4.19. SN Bulon Tipi (Ertekin,2012)



Şekil 4.20. İBO Bulon Tipi (Ertekin,2012)



Şekil 4.20. Bulon delgisi açılma safhası



Şekil 4.21. Bulonlama işlemine ait bir görüntü

#### 4.7. Belirlenmiş Tünel Destek Elemanları

Tünele ait destek sistemlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi amacıyla Q sınıflama sistemi puanı, RMR sınıflama sistemi puanı ve bu iki sistemden elde edilen puanların ortak olarak değerlendirilmesi ile elde edilmiş olan NATM kazı ve destek sınıfına ait puanlamalara ait tüm destek sistemi önerileri değerlendirilmiştir.

140+320,47 km 'de bulunan şist birimi için Q değeri 0,019 RMR puanı 17 ve NATM ÖNORM(2003) kazı ve destek sınıflamasına göre **C2 Baskılı** olarak belirlenmiştir. Q değerine göre yapılan sınıflama sisteminde (8) numaralı bölgeye denk gelmektedir ( Tablo 3.17). Q abağına göre bu bölgeye kaya bulonlu, çelik iksalı, kafes takviyeli, 15-25 mm kalınlığında püskürtme beton önerilmiştir. RMR puanına göre ise bu birim çok zayıf kaya olarak tanımlanmıştır. Kazı aşamasındaki üst yarıda 0.5-1.5 m çoklu delgi ilerleme ve kazıyla birlikte destek yerleştirilerek patlatmadan hemen sonra püskürtme beton uygulanması önerilmiştir. Ayrıca kaya saplaması, çelik destek ve püskürtme beton ile destekleme unsuru belirlenmiştir. NATM kazı ve destek sistemine göre ise C2 sınıfına karşılık olarak tünel kesit çevresinde sistematik destekleme yapılması önerilmektedir. Bu özelliklere göre MPI 200 çelik iksa, çift kat çelik hasır,32 mm IBO bulon, enjeksiyonsuz sürenler,30 cm püskürtme beton ve invert betonu olarak belirlenmiştir.

140+510,72 km'de bulunan şeyl birimi için Q değeri 0,028, RMR puanı 20 ve NATM ÖNORM(2003) kazı ve destek sınıflamasına göre **C2 Baskılı** olarak belirlenmiştir. Q değerine göre yapılan sınıflama sisteminde (8) numaralı bölgeye denk gelmektedir (Tablo 3.17). Q abağına göre bu bölgeye kaya bulonlu, çelik iksalı, kafes takviyeli, 15-25 mm kalınlığında püskürtme beton önerilmiştir. RMR puanına göre ise bu birim çok zayıf kaya olarak tanımlanmıştır. Kazı aşamasındaki üst yarıda 0.5-1.5 m çoklu delgi ilerleme ve kazıyla birlikte destek yerleştirilerek patlatmadan hemen sonra püskürtme beton uygulanması önerilmiştir. Ayrıca kaya saplaması, çelik destek ve püskürtme beton ile destekleme unsuru belirlenmiştir. NATM kazı ve destek sistemine göre ise C2 sınıfına karşılık olarak tünel kesit çevresinde sistematik destekleme yapılması önerilmektedir. Bu özelliklere göre MPI 200 çelik iksa, çift kat çelik hasır,32 mm IBO bulon, enjeksiyonsuz sürenler, 30 cm püskürtme beton ve invert betonu olarak belirlenmiştir. C2 sınıfına ait destek elemanlarının özellikleri Tablo 4.5. de gösterilmiştir.

141+309,42 km'de bulunan kireçtaşı birimi için Q değeri 0,293, RMR puanı 45 ve NATM ÖNORM (2003) kazı ve destek sınıflamasına göre **B3 Taneli** olarak belirlenmiştir. Q değerine göre yapılan sınıflama sisteminde (7) numaralı bölgeye denk gelmektedir (Tablo 3.17). Q abağına göre bu bölgeye kaya bulonlu, çelik iksalı, kafes takviyeli, 12-15 kalınlığında püskürtme beton önerilmiştir. RMR puanına göre ise bu birim orta kaya olarak tanımlanmıştır. Bu sınıfa göre tavandan 1,0-1,5 m ilerleme yapılarak, kazıya uygun şekilde aynaya 10 m ye kadar gerekli tahkimat uygulanmalıdır. Ayrıca kaya saplaması, çelik destek ve tavan ile yan duvarlarda püskürtme beton ile destekleme unsuru belirlenmiştir. NATM kazı ve destek sistemine göre ise B3 Taneli sınıfına karşılık olarak "Tünel tavanı

ve duvarlarında aynada ve aynanın ilerletilmesinden önce monte edilecek sistematik destekleme gerekmektedir. Bu destekleme çelik iksa ve jeolojik şartlara göre yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerekebilir" önerisi yer almaktadır. Bu bilgiler ışığında B3 sınıfının destek elemanları olarak, I 160 tipi çelik iksa profil, çift katlı çelik hasır, 28 mm çapında PG tipi bulon, C20 sınıfı 25 cm seviyesi püskürtme beton sınıfı ve 3 m bindirmeli enjeksiyonsuz sürenler kullanılmıştır. B3 sınıfına ait destek elemanların özellikleri Tablo 4.6 de gösterilmiştir (Aygır, B. ve Gökçeoğlu C.,2020).

**Tablo 4.6.** C2 sınıfına ait tünel destek elemanlarının teknik özellikleri

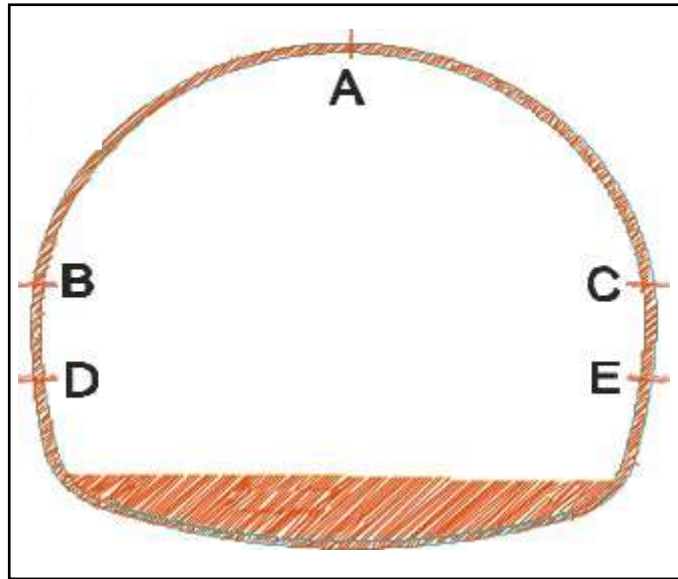
Püskürtme Beton(C20/ 30 cm )	Çelik İksa (MPI200)	IBO Bulon(32 mm)
Elastisite Modülü =17000 Mpa	Elastisite Modülü =200000 MpA	Elastisite Modülü =210000 MpA
Poisson Oranı =0.20	Poisson Oranı = 0.25	Bulon Kapasitesi Tb = 0.224 MN
Basınç Dayanımı =20 Mpa	Basınç Dayanımı =420 Mpa	Rezidüel Bulon Kapasitesi =0.02 mn
Çekme Dayanımı =1.6	Mpa Çekme Dayanımı =420	Mpa Öngerme Yüğü = 0 mn (pasif)

**Tablo 4.7.** B3 sınıfına ait tünel destek elemanlarının teknik özellikleri

Püskürtme Beton(C20/25 cm )	Çelik İksa (MPII160)	PG Bulon(28mm)
Elastisite Modülü =17000 mPa	Elastisite Modülü =200000 mPa	Elastisite Modülü =210000 mPa
Poisson Oranı =0.20	Poisson Oranı = 0.25	Bulon Kapasitesi Tb = 0.224 MN
Basınç Dayanımı =20 mPa	Basınç Dayanımı =420 mPa	Rezidüel Bulon Kapasitesi =0.02 mn
Çekme Dayanımı =1.6 mPa	Çekme Dayanımı =420	Mpa Öngerme Yüğü = 0 mn (pasif)

#### 4.8. Modellemede Belirlenen Deformasyon ve Gerilim Noktaları

Belirlenen kaya kütlelerine ait deformasyon ve gerilme ölçümleri için referans olarak A,B,C,D ve E noktaları belirlenmiştir. Öngörülen destek sistemi ile yapılan modellemeden sonra beklenen nihai deformasyonlar, kazı öncesi ve sonrası gerilim değişimleri bu noktalar üzerindeki değerler dikkate alınarak yorumlanacaktır (Şekil 4.17.).

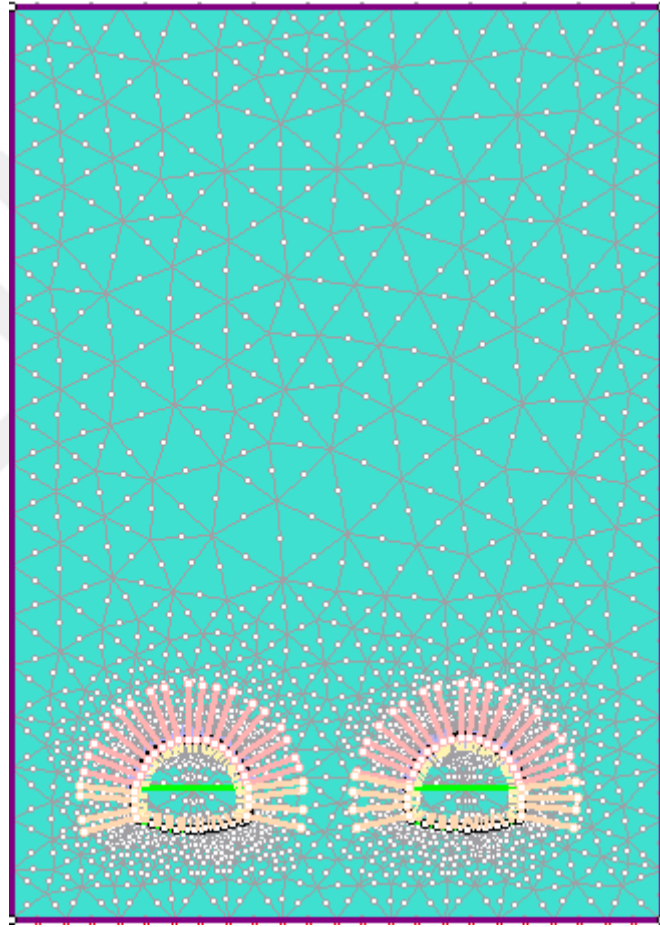


**Şekil 4.22.** Deformasyon ve gerilimler için referans noktaları

#### 4.9. Tünel Kazısı ve Destek Aşamaları Modelleme

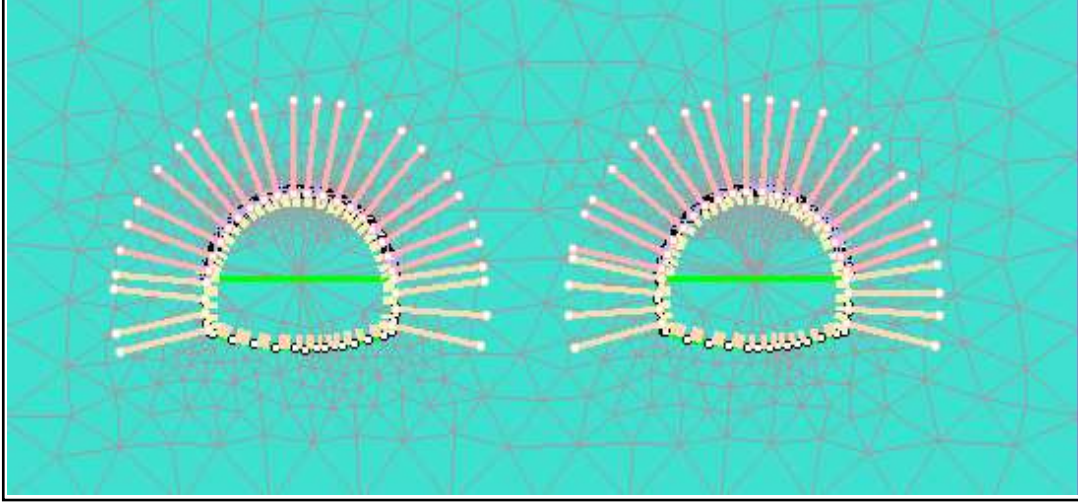
##### 4.9.1. 140+320,47 Km'de Bulunan Şist'e Ait Modelleme Aşamaları:

Destek sistemleri modellenmeden önce tünel çift tüplü olarak ve üzerindeki örtü kalınlığı dikkate alınarak 105 metre yükseklikte bir sınır içerisinde tasarlanmıştır. Bu adımdan sonra birimin jeomekanik özellikleri " *Define Material*" komutu ile modele tanımlanmıştır. Bu model hiçbir destek sistemi eklenmeden "Excavate" komutu ile yalnızca üst yarı kazısı yapılarak, deformasyonlar belirlenmiştir. Deformasyonların sönümlendiği seviye referans alınarak tünelin içerisinde bulunduğu sınır değeri azaltılarak en son haline getirilmiştir (Şekil 4.23.).



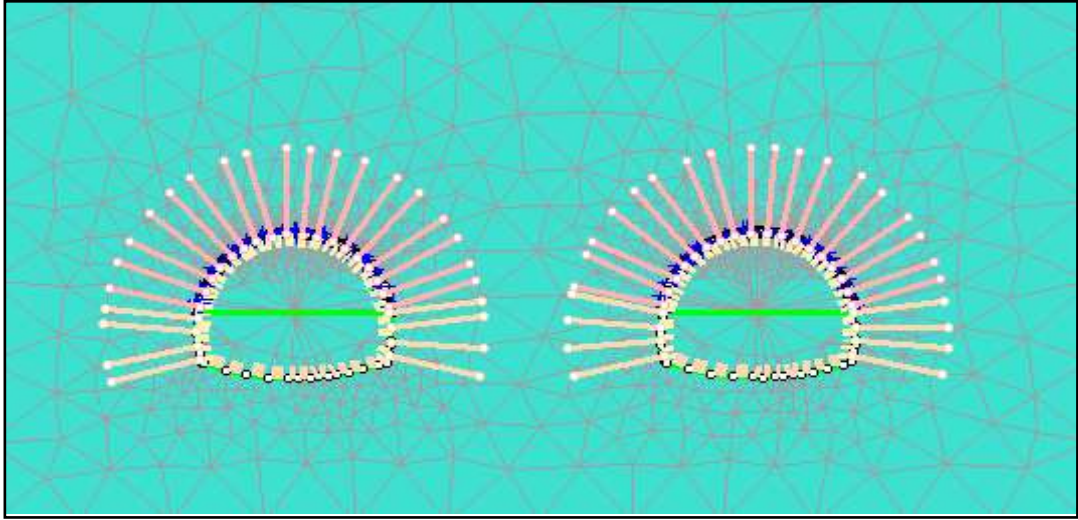
Şekil 4.23. Tünelin destek sistemleri ile 6 ağılı çözüme hazır hali

Modellemede Stage-1 olarak tanımlanan adımda tünel ortamının hiçbir işlem uygulanmamış ve doğal halidir. Tüm destek elemanlarının özellikleri girilmiş ve ancak henüz aktif edilmemiştir (Şekil 4.24.).



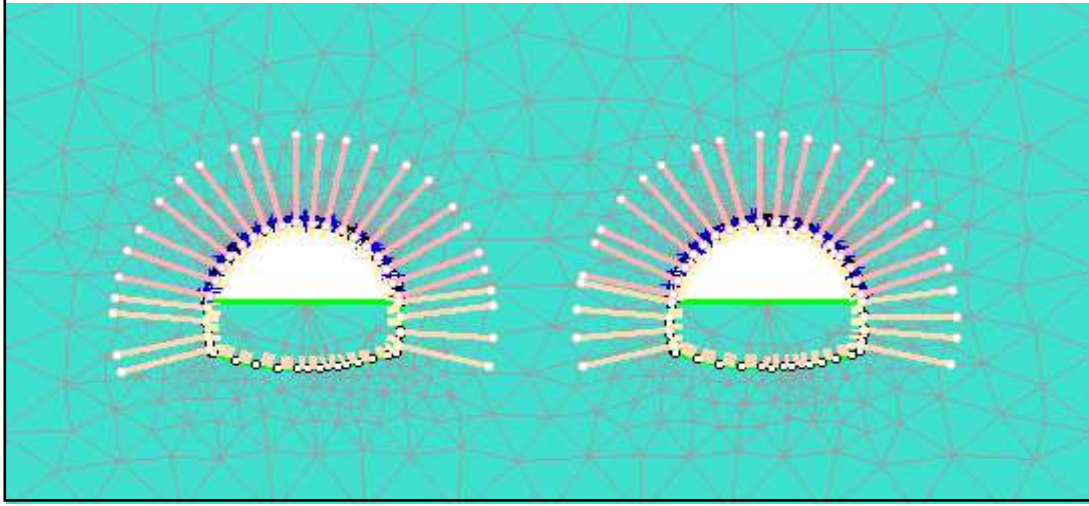
**Şekil 4.24.** Tünelin desteksiz ve doğal durumu

Stage-2 olarak tanımlanan adımda alt yarı kazısı yapılmadan önce ön tahkimat olarak sürenlerin 25 cm aralıklarla modellemeye eklenerek parametrelerinin girildiği ve aktif edildiği adımdır (Şekil 4.25.).



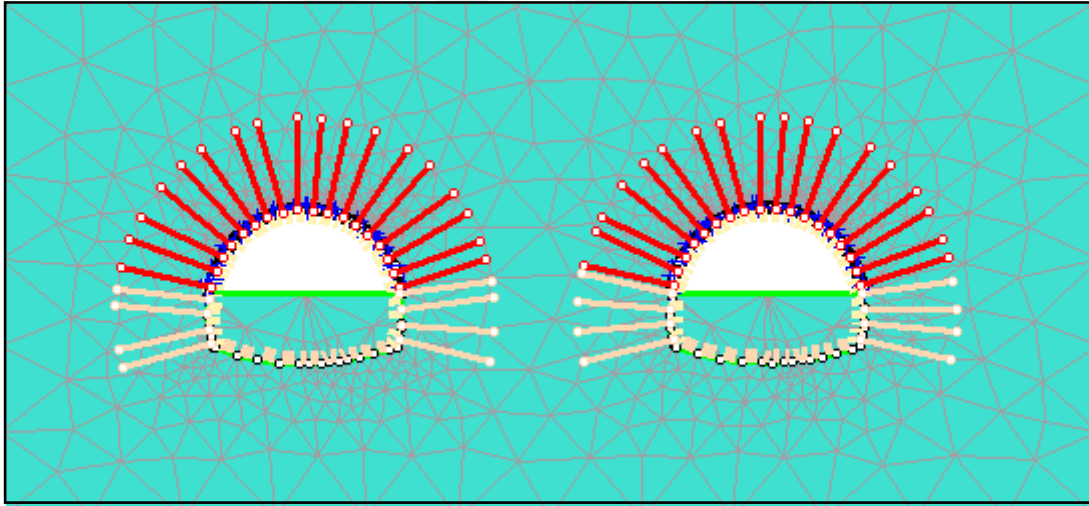
**Şekil 4.25.** Üst yarı kazısından önce sürenlerin aktif edilmesi

Stage 3 olarak tanımlanan adımda, sürenlerin aktif hale geçmesinden sonra üst yarı kazısı yapılmıştır (Şekil 4.26.).



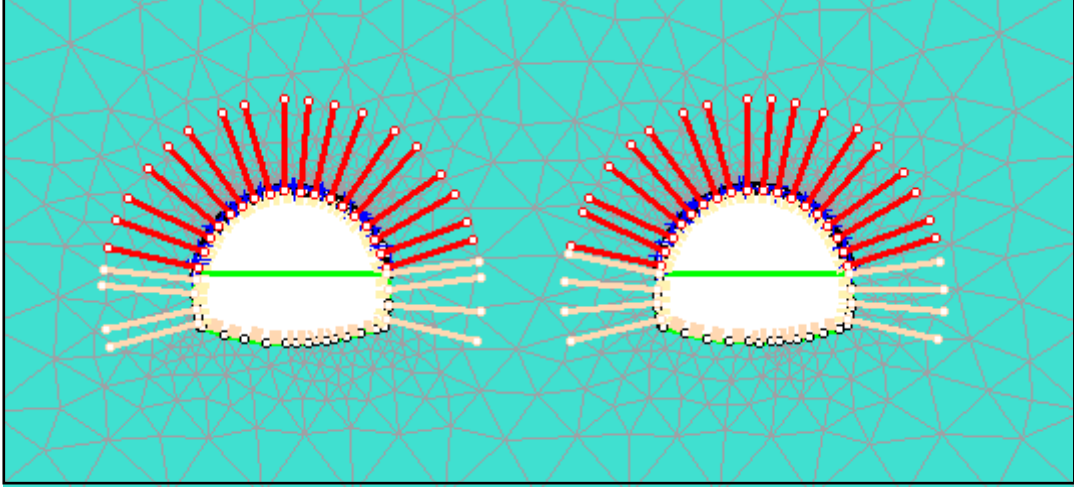
Şekil 4.26. Üst yarı kazısının yapılması

Stage 4 olarak tanımlanan adımda, üst yarı kazısından sonra özellikleri “ Fully Bonded” olarak seçilen 32 mm boyutundaki İBO bulonlar üst yarıya aktif edilmiştir (Şekil 4.27.).



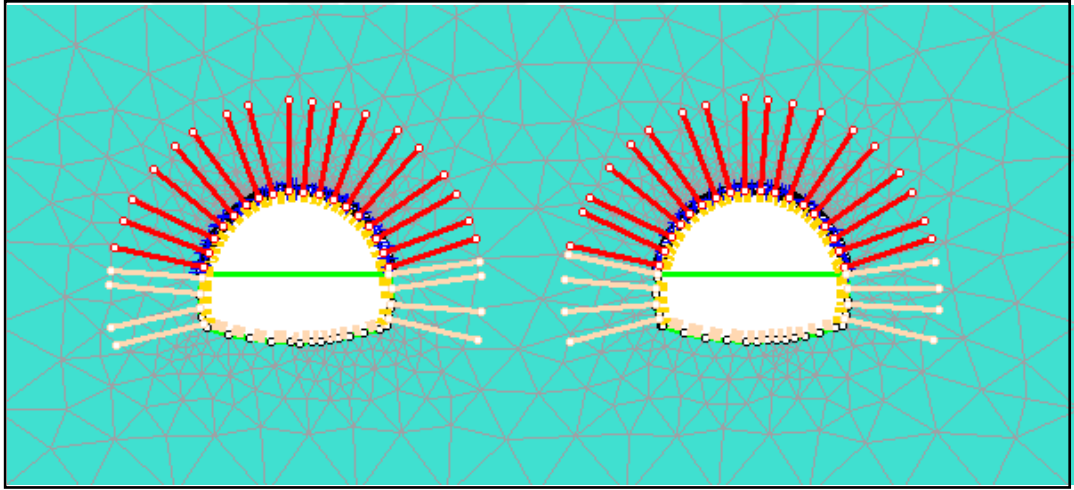
Şekil 4.27. Üst yarı kazısına kaya bulonlarının tanımlanması

Stage 5 olarak tanımlanan adımda, alt yarı kazısı yapılmıştır (Şekil 4.28.).



**Şekil 4.28.** Alt yarı kazısının yapılması

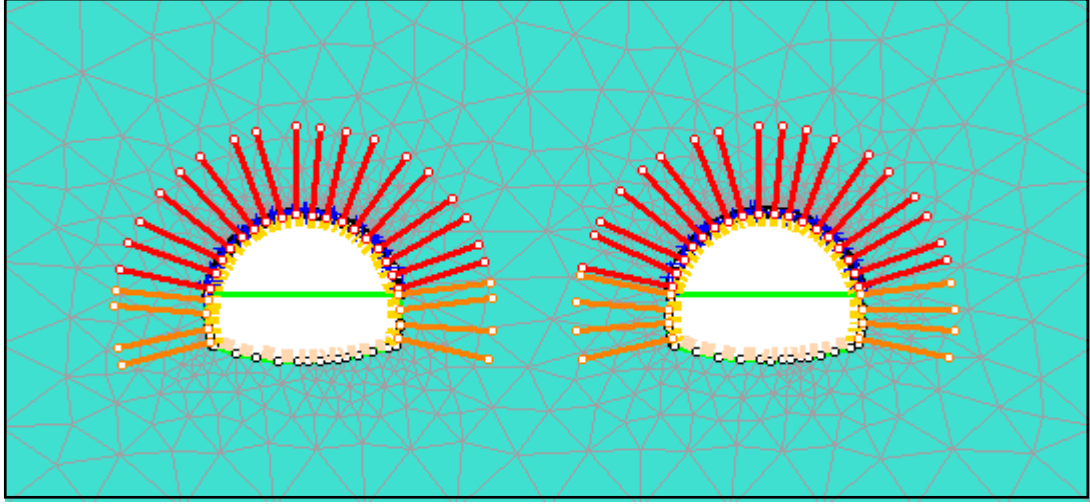
Stage 6 olarak tanımlanan adımda, özellikleri belirlenmiş çelik iksa ve püskürtme beton kompozit bir destek elemanı olarak eklenmiştir (Şekil 4.29.).



**Şekil 4.29.** Çelik iksa ve püskürtme betonun kompozit olarak aktif edilmesi

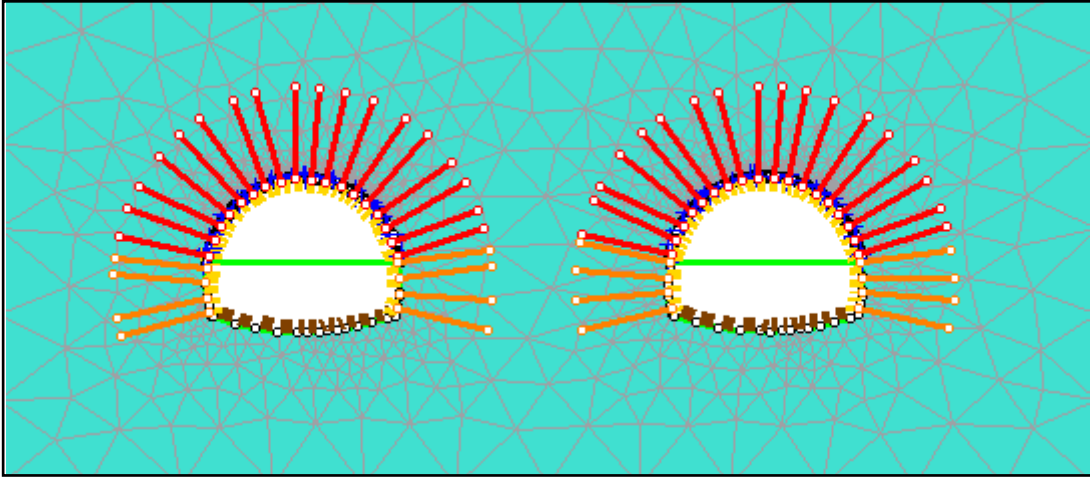
Stage 7 olarak belirlenen bu adımda alt yarıya ait 32 mm İBO bulon uygulaması yapılmıştır(Şekil 4.30.).





Şekil 4.30. Alt yarıya ait kaya bulonlarının tanımlanması

En son adım olarak eklenen Stage 8 aşamasında, alt yarıya invert beton uygulaması yapılmıştır (Şekil 4.31.).



Şekil 4.31. İvert betonunun alt yarıya tanımlanması

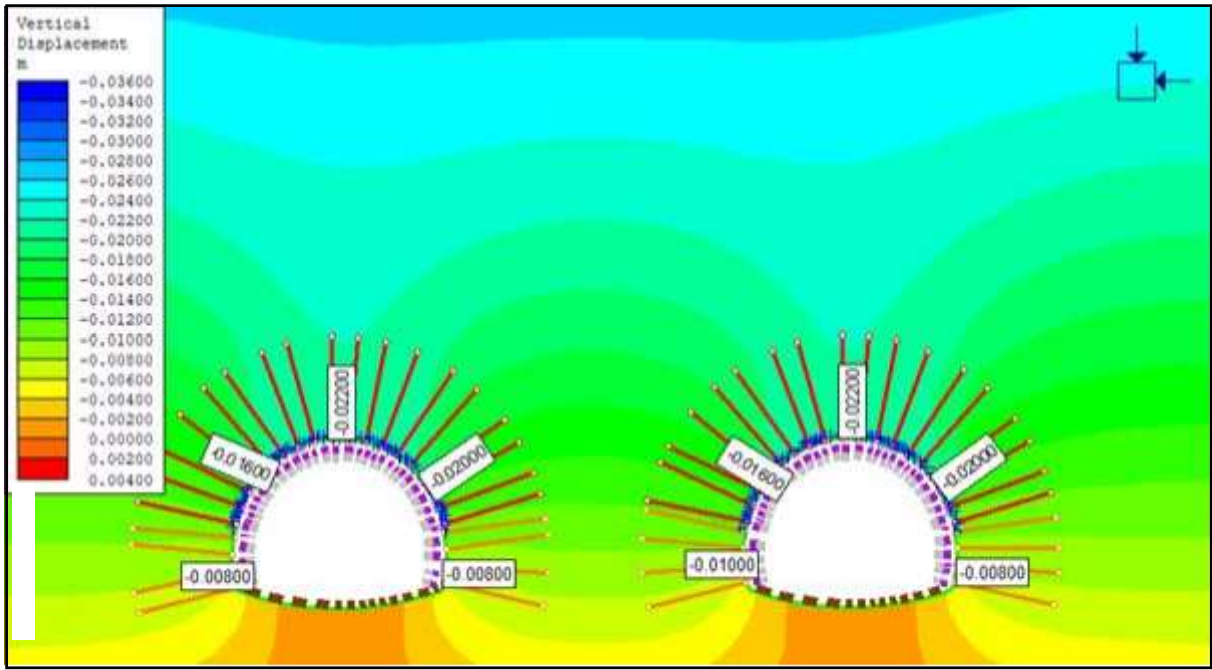
#### 4.9.2. Şist Birimine Ait Deformasyon ve Gerilim Analizleri

Şist bölgesi için yapılan modellemede beklenen düşey yönlü nihai deformasyonlar A,B,C,D ve E noktaları için belirlenmiştir. Bu noktalardaki ölçümlere sol tüp için, A noktasında 2.2 cm, B noktasında 1.6 cm, C noktasında 1 cm, D noktasında 0.8 cm ve E noktasında 0.8 cm olarak, sağ tüp için A noktasında 2.2 cm, B noktasına 1.6 cm, C noktasında 2 cm, D noktasında 1 cm ve E noktasında 0.8 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.32.)

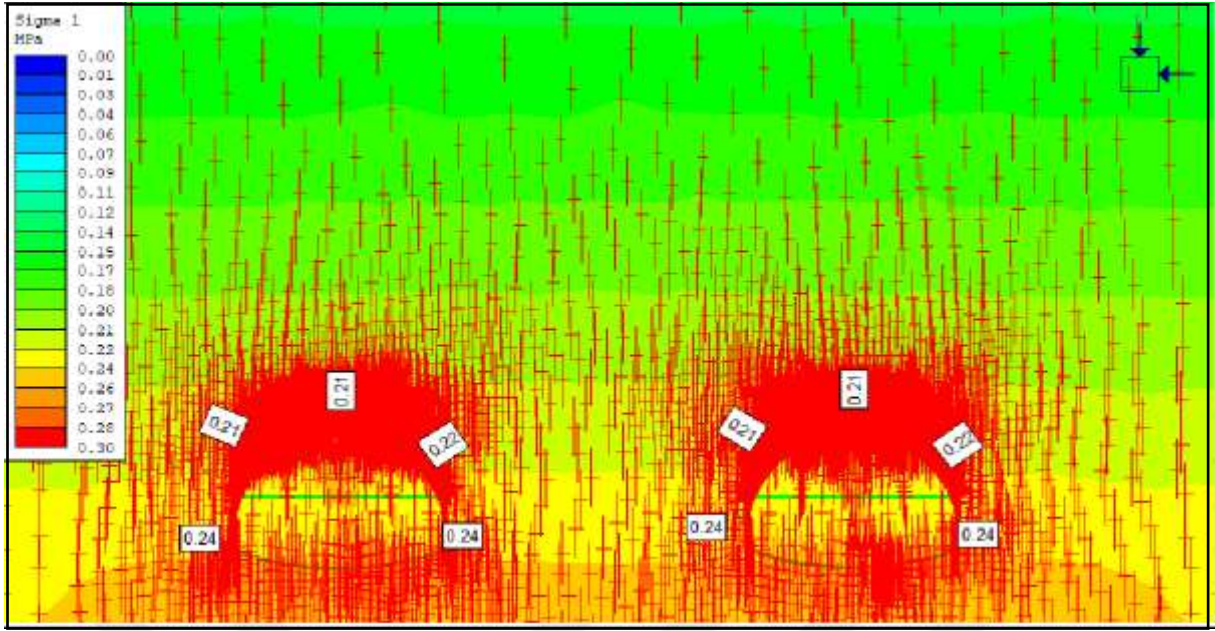
Kazı yapılmadan önce sol tüp için en büyük asal gerilmeler A,B,C,D ve E noktalarında sırasıyla 0.21 MPa, 0.21 MPa,0.22 MPa,0.24 MPa ve 0.24 MPa iken (Şekil 4.33.),kazı sonrası bu gerilmeler A noktasında 0.3 MPa, B noktasında 0.1 MPa, C noktasında 0.1 MPa, D noktasında 0.12 MPa ve E

noktasında 0.17 Mpa olarak azalmıştır (Şekil 4.34.).Sağ tüp için ise sırasıyla A, B, C, D ve E noktalarında sırasıyla 0.21 mPa, 0.21mPa, 0.22mPa,0.24 mPa ve 0.24 mPa olan en büyük asal gerilmeler(Şekil 4.33)., kazı sonrası sırasıyla 0.06 mPa,0.12 mPa ,0.02 mPa, 0.17 mPa ve 0.23 mPa olarak azalmıştır (Şekil 4.34.).

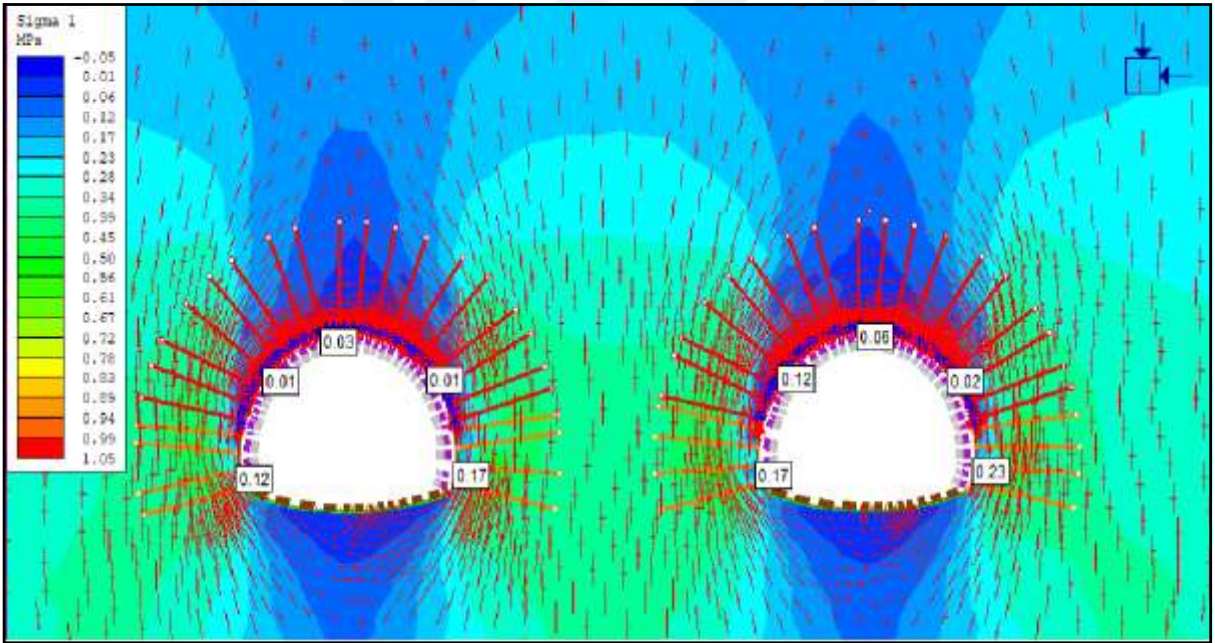
Kazı öncesi sol tüpte en küçük asal gerilmeler sırasıyla A, B, C, D ve E noktalarında sırasıyla 0.05 mPa, 0.06 mPa, 0.06 MPa , 0.06 MPa, ve 0.06 MPa iken (Şekil 4.35) kazı sonrası bu gerilmeler yalnızca E noktasında 0.02 olarak , A ,B, C, ve D noktalarında 0 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.36.). Sağ tüpte ise sırasıyla 0.05 MPa, 0.05 MPa , 0.05 MPa, 0.06 MPa ve 0.06 MPa olan en küçük asal gerilmelerin (Şekil 4.35.) ,kazı sonrası sırasıyla A noktasında 0.06 , B noktasında 0.03 , C noktasında 0, D noktasında 0.02 ve E noktasında 0.02 olarak azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.36).



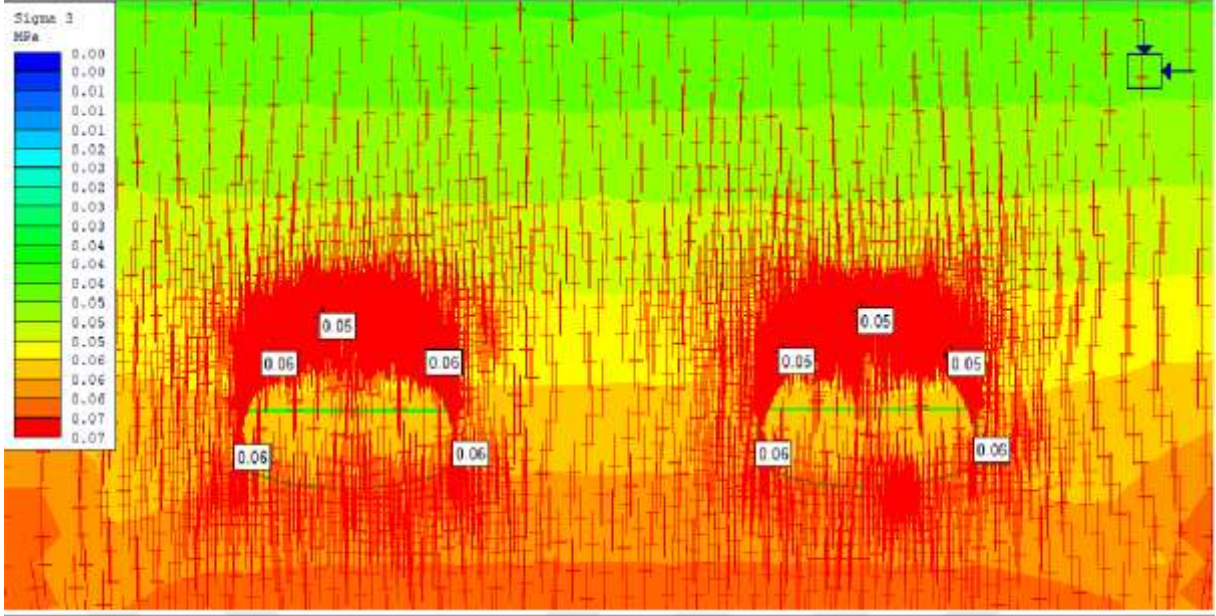
Şekil 4.32. Kazı ve Destekleme Sonrası Düşey Deplasmanlar (cm)



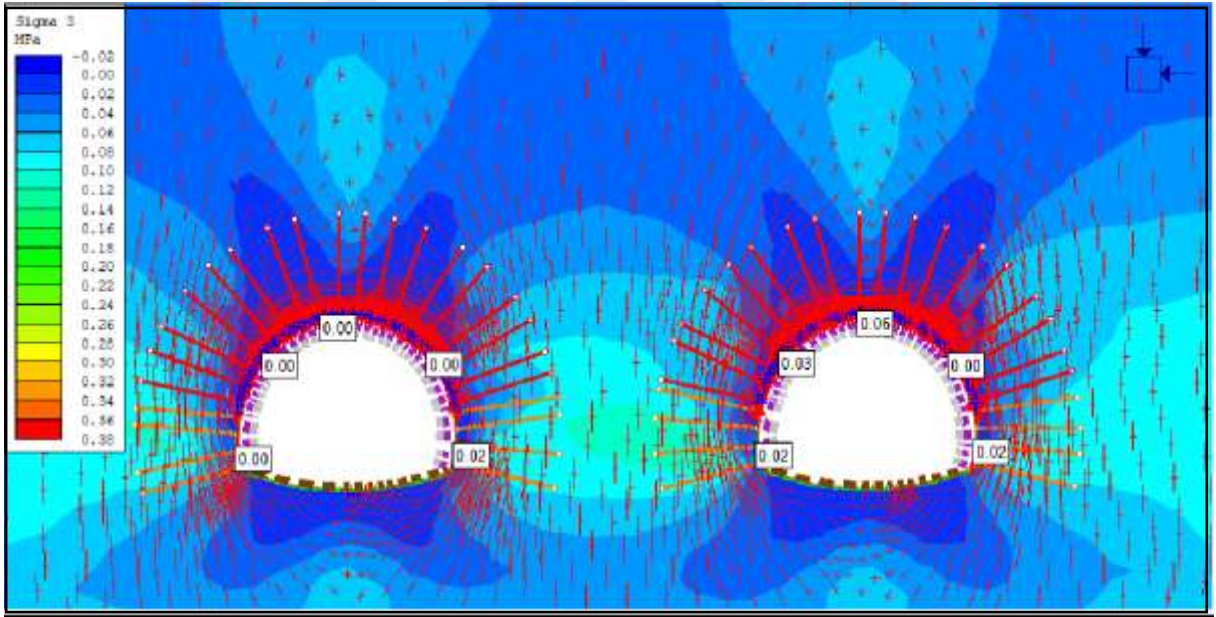
Şekil 4.33. Kazı Öncesi En Büyük Asal Gerilmeler ( $\sigma_1$ )



Şekil 4.34. Kazı sonrası en büyük asal gerilmeler ( $\sigma_1$ )



Şekil 4.35. Kazı öncesi en küçük asal gerilmeler ( $\sigma_3$ )



Şekil 4.36. Kazı sonrası en küçük asal gerilmeler ( $\sigma_3$ )

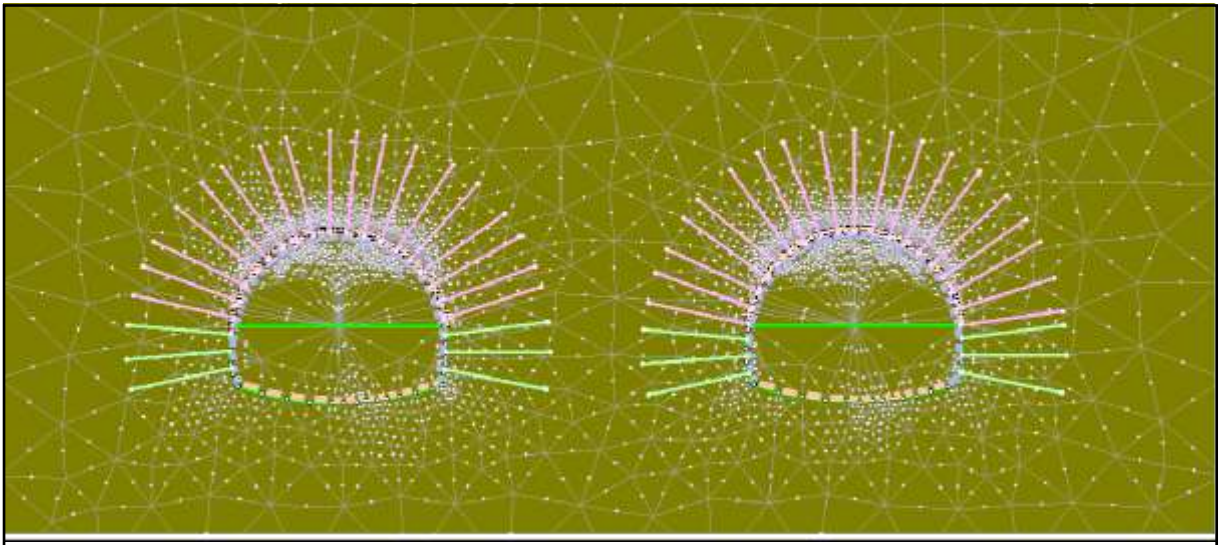
#### 4.9.3. 140+510,72 km' de Bulunan Şeyl Birimine Ait Modelleme Aşamaları:

Destek sistemleri modellenmeden önce tünel çift tüplü olarak ve üzerindeki örtü kalınlığı dikkate alınarak 136 metre yükseklikte bir sınır içerisinde tasarlanmıştır. Bu adımdan sonra birimin jeomekanik özellikleri “*Define Material*” komutu ile modele tanımlanmıştır. Bu model hiçbir destek sistemi eklenmeden “*Excavate*” komutu ile yalnızca üst yarı kazısı yapılarak, deformasyonlar belirlenmiştir. Deformasyonların sönümlendiği seviye referans alınarak tünelin içerisinde bulunduğu sınır değeri azaltılmış ve en son haline getirilmiştir (Şekil 4.37.).



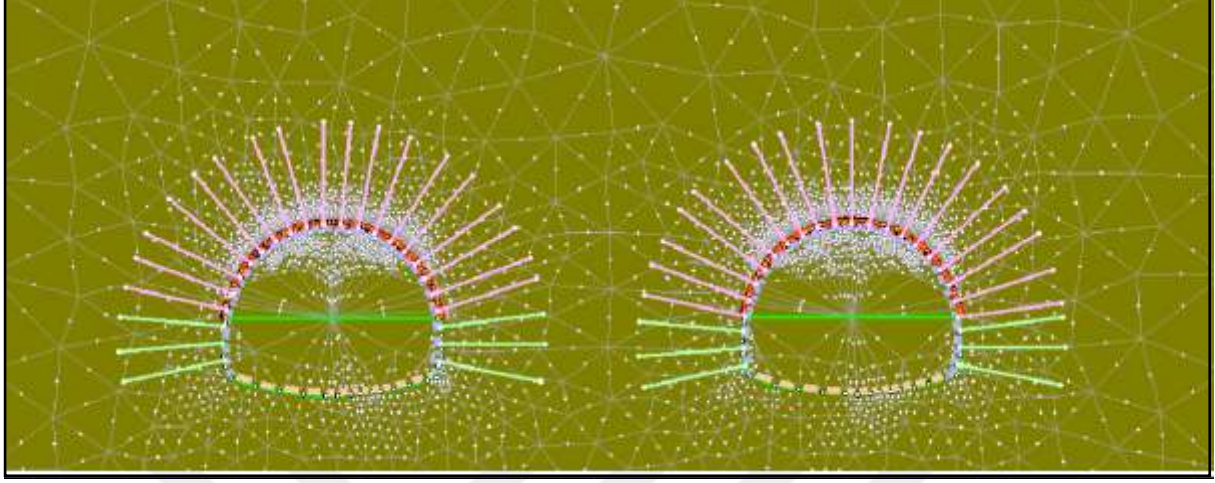
**Şekil 4.37.** Tünelin destek sistemleri 6 ağılı çözüme hazır hali

Modellemede Stage-1 olarak tanımlanan adımda tünel ortamının hiçbir işlem uygulanmamış ve doğal halidir. Tüm destek elemanlarının özellikleri girilmiş ve ancak henüz aktif edilmemiştir (Şekil 4.38.).



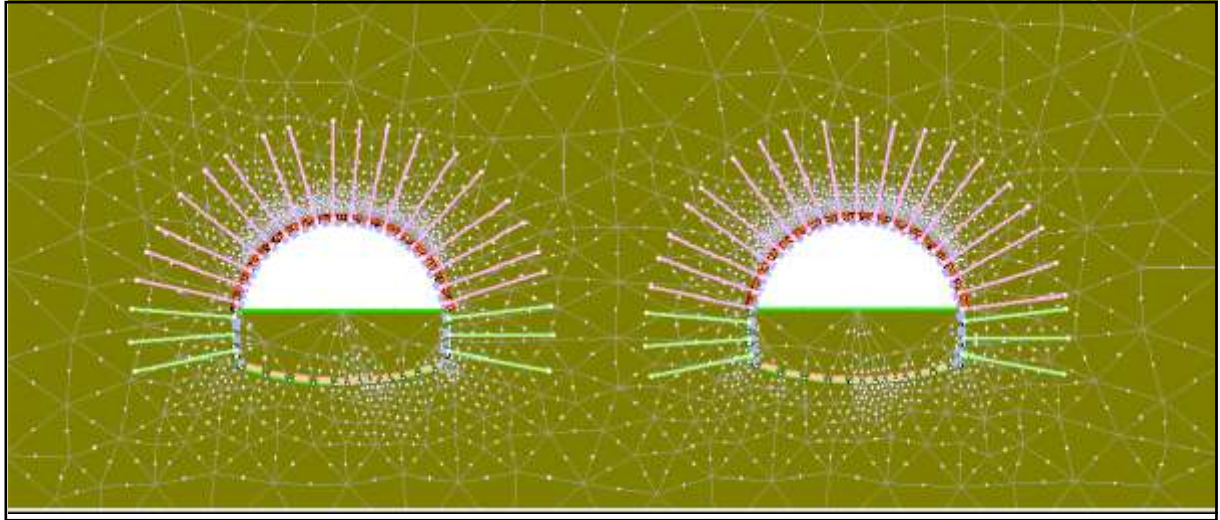
**Şekil 4.38.** Stage 1-Tünelin desteksiz ve doğal durumu

Stage-2 olarak tanımlanan adımda alt yarı kazısı yapılmadan önce ön tahkimat olarak sürenlerin 25 cm aralıklarla modellemeye eklenerek parametrelerinin girildiği ve aktif edildiği adımdır (Şekil 4.39.).



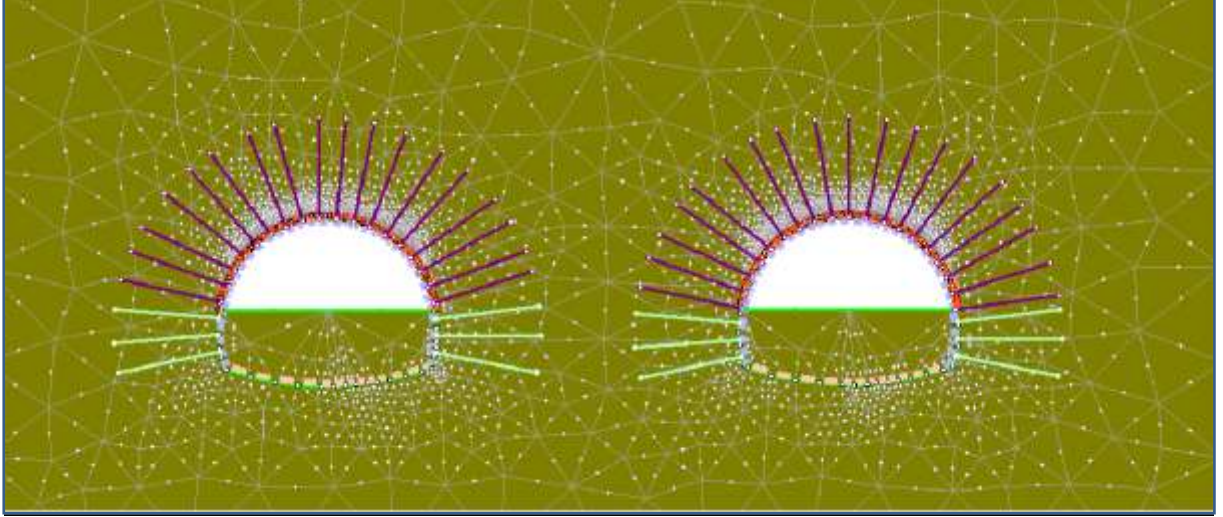
Şekil 4.39. Üst yarı kazısından önce sürenlerin aktif edilmesi

Stage 3 olarak tanımlanan adımda, sürenlerin aktif hale geçmesinden sonra üst yarı kazısı yapılmıştır (Şekil 4.40.).



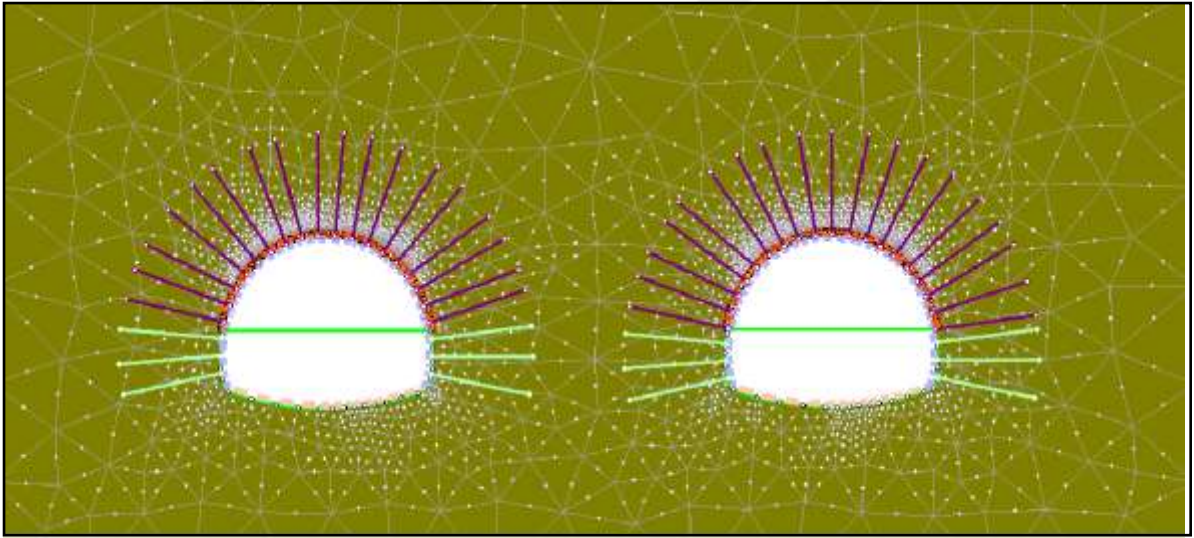
Şekil 4.40. Üst yarı kazısının yapılması

Stage 4 olarak tanımlanan adımda, üst yarı kazısından sonra özellikleri ‘‘ Fully Bonded’’ olarak seçilen 32 mm boyutundaki İBO bulonlar üst yarıya aktif edilmiştir (Şekil 4.41.).



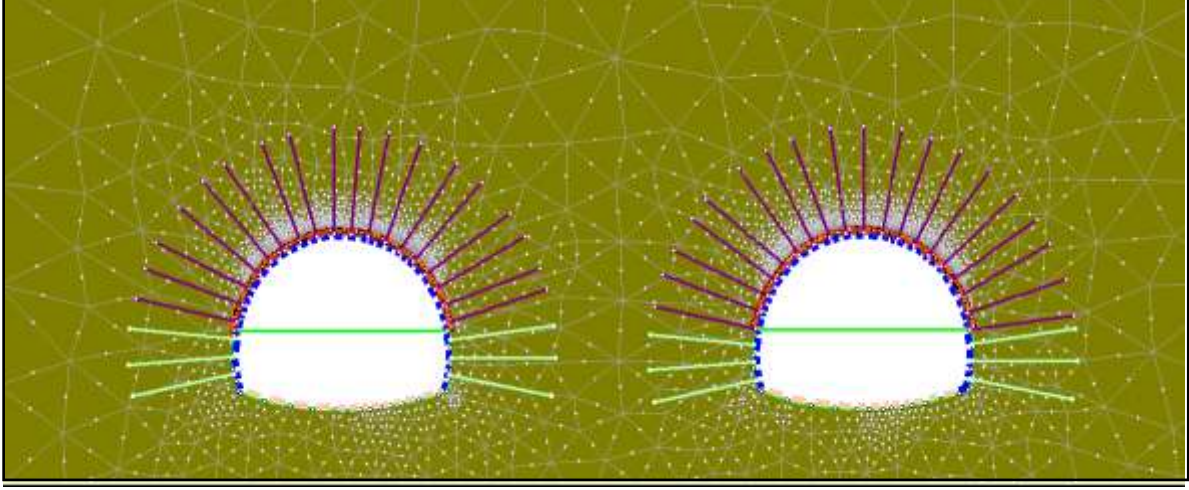
**Şekil 4.41.** Üst yarı kazısına kaya bulonlarının eklenmesi Stage

5 olarak tanımlanan adımda, alt yarı kazısı yapılmıştır (Şekil 4.42.).



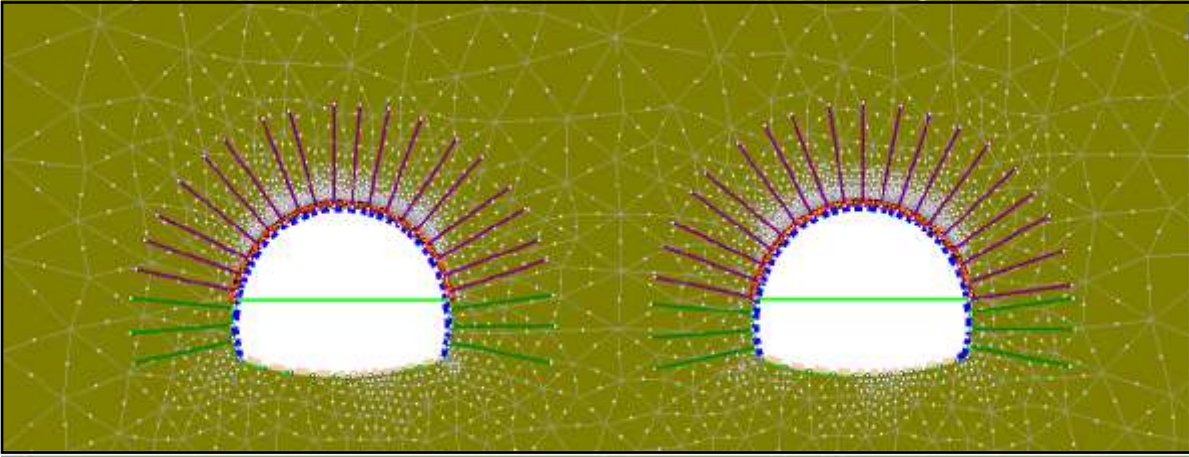
**Şekil 4.42.** Alt yarı kazısının yapılması

Stage 6 olarak tanımlanan adımda, özellikleri belirlenmiş çelik iksa ve püskürtme beton kompozit bir destek elemanı olarak eklenmiştir (Şekil 4.43.).



**Şekil 4.43.** Alt yarı kazısının yapılması

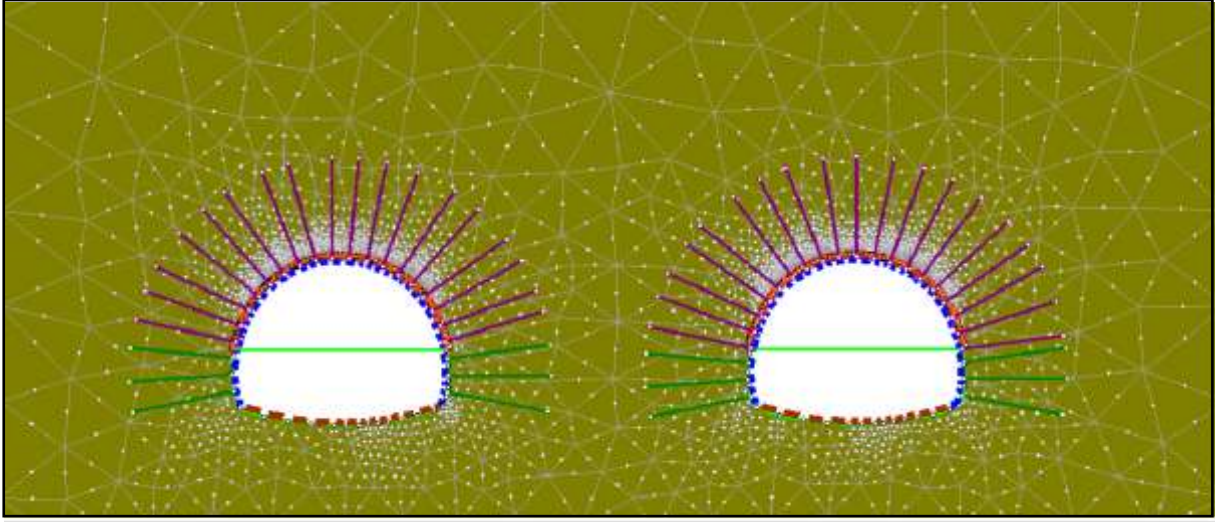
Stage 7 olarak belirlenen bu adımda alt yarıya ait 32 mm İBO bulon uygulaması yapılmıştır(Şekil 4.44.).



**Şekil 4.44.** Alt yarı kazısına kaya bulonlarının eklenmesi

En son adım olarak eklenen Stage 8 aşamasında, alt yarıya invert beton uygulaması yapılmıştır (Şekil 4.45.).





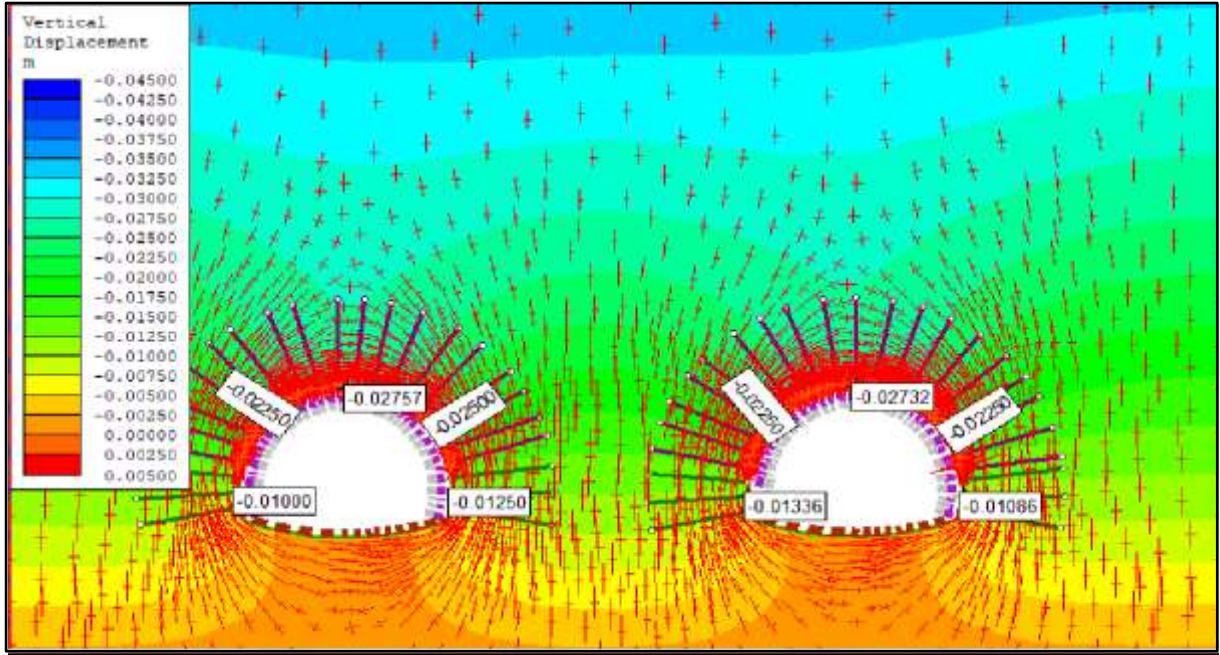
Şekil 4.45. İvert Betonun Alt Yarıya Tanımlanması

#### 4.9.4.140+510,72 km'de Bulunan Şeyl Birimine Ait Deformasyon ve Gerilme Analizleri

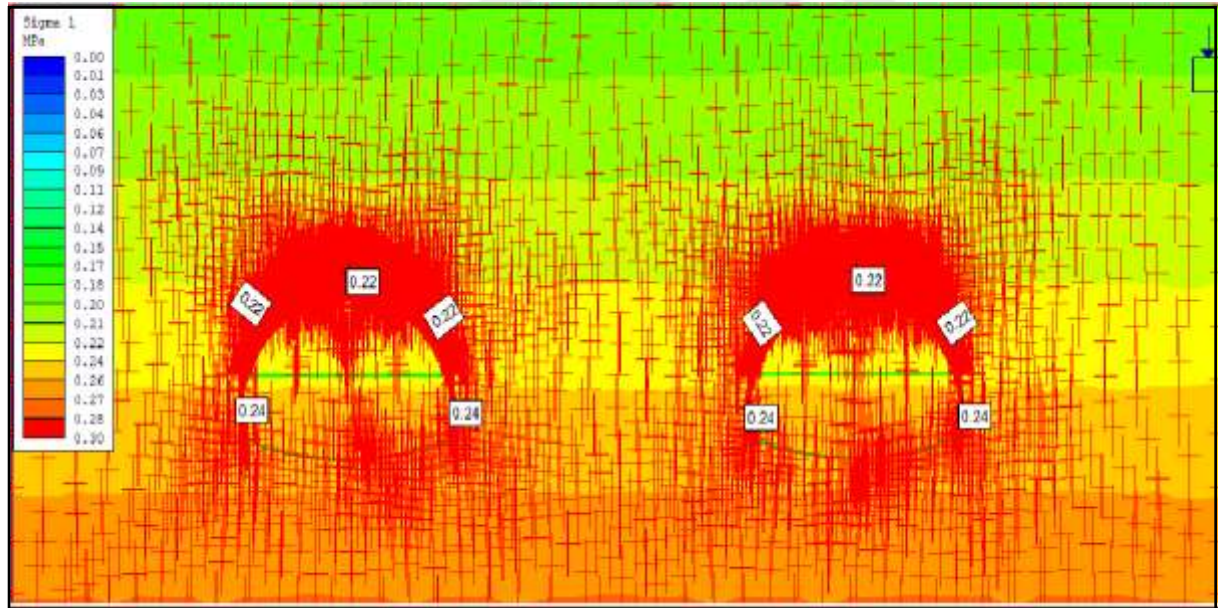
Şeyl bölgesi için yapılan modellemede beklenen düşey yönlü deformasyonlar A,B,C,D ve E noktaları için belirlenmiştir. Bu noktalardaki ölçümlere sol tüp için, A noktasında 2.7 cm, B noktasında 2.2 cm, C noktasında 2.5 cm, D noktasında 1 cm ve E noktasında 1.25 cm olarak, sağ tüp için A noktasında 2.7 cm, B noktasına 2.2 cm, C noktasında 2.2 cm, D noktasında 1.33 cm ve E noktasında 1 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.46).

Kazı yapılmadan önce sol tüp için en büyük asal gerilmeler sol tüp için A,B,C,D ve E noktalarında sırasıyla 0.22 MPa, 0.22 MPa,0.22 MPa,0.24 MPa ve 0.24 MPa iken (Şekil 4.47.),kazı sonrası bu gerilmeler A noktasında 0.01 MPa, B nok.tasında 0.30 MPa, C noktasında 0, D noktasında 0.12 MPa ve E noktasında 0.18 MPa olarak azalmıştır (Şekil 4.48.). Sağ tüp için ise sırasıyla A, B, C, D ve E noktalarında sırasıyla 0.22 MPa, 0.22 MPa, 0.22 MPa,0.24 MPa ve 0.24 MPa olan en büyük asal gerilmeler (Şekil 4.47.), kazı sonrası sırasıyla 0.02 MPa,0.012 MPa ,0.06 MPa, 0.15 MPa ve 0.19 MPa olarak azalmıştır (Şekil 4.48.).

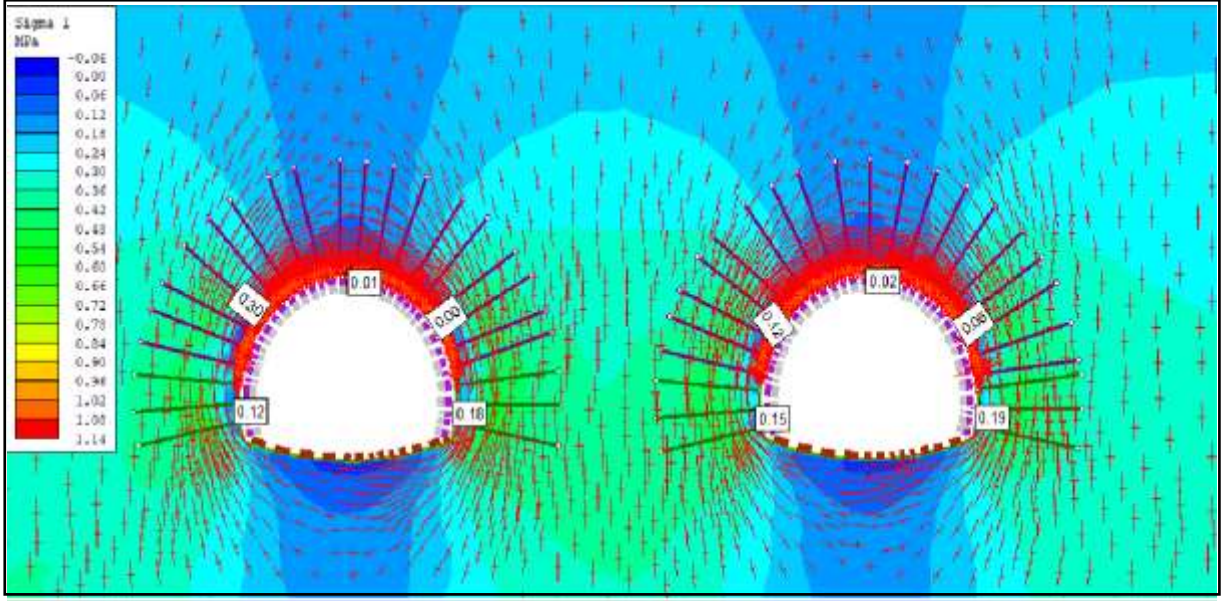
Kazı öncesi sol tüpte en küçük asal gerilmeler sırasıyla tüm noktalarda 0.10 MPa iken (Şekil 4.49.), kazı sonrası bu gerilmeler yalnızca E noktasında 0.03 olarak , A ,B, C, ve D noktalarında 0 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.50.). Sağ tüpte ise yine tüm noktalarda 0.10 MPa olan asal gerilmeler (Şekil 4.49.) ,kazı sonrası sırasıyla A noktasında 0.01 , B noktasında 0 , C noktasında 0, D noktasında 0.02 ve E noktasında 0.02 olarak azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.50).



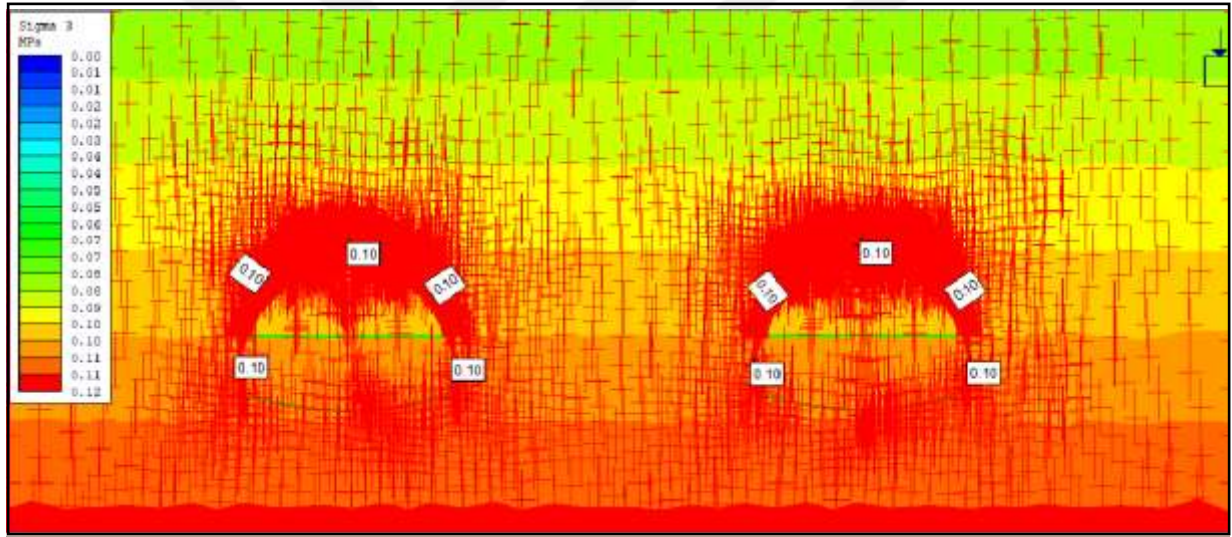
Şekil 4.46. Kazı ve Destekleme Sonrası Toplam Deformasyon Modeli



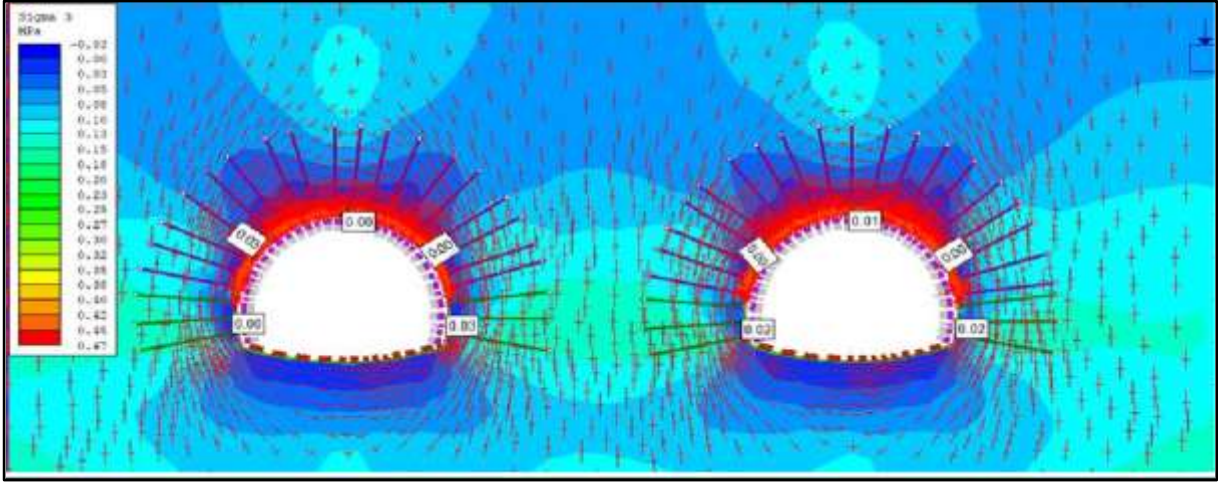
Şekil 4.47. Kazı Öncesi En Büyük Asal Gerilmeler



Şekil 4.48. Kazı sonrası en büyük asal gerilmeler



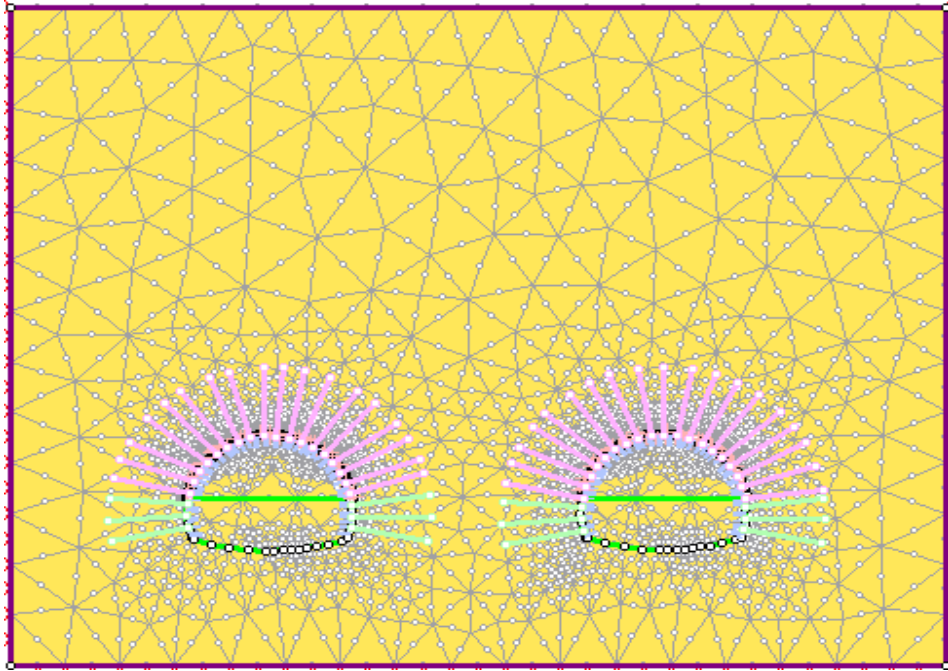
Şekil 4.49. Kazı öncesi en küçük asal gerilmeler



Şekil 4.50. Kazı sonrası En Küçük Asal Gerilmeler

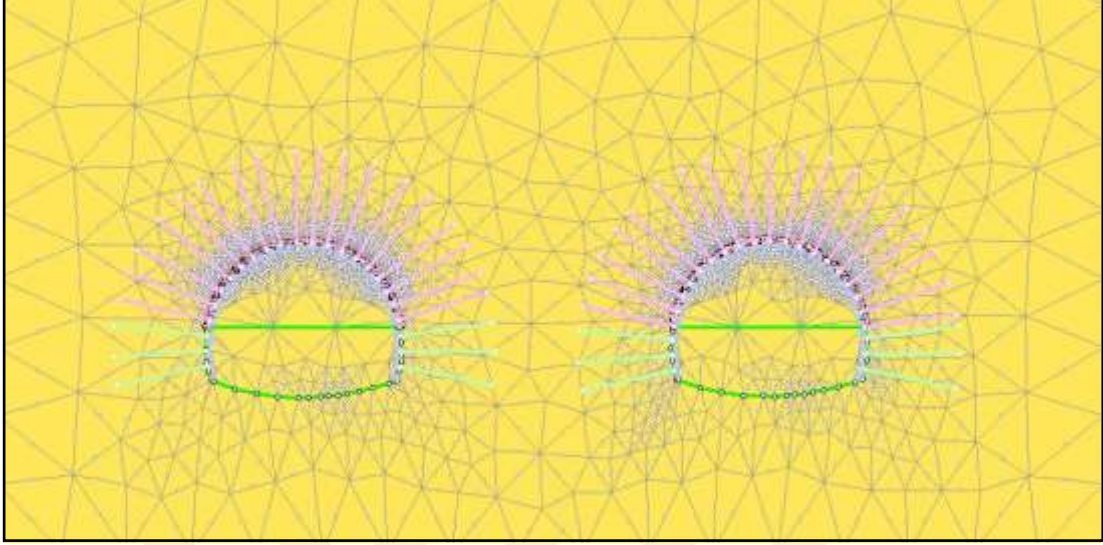
#### 4.9.5. 141+309,42 km'de Bulunan Kireçtaşı Birimine Ait Deformasyon ve Modelleme Aşamaları

Destek sistemleri modellenmeden önce tünel çift tüplü olarak ve üzerindeki örtü kalınlığı dikkate alınarak 150 metre yükseklikte bir sınıır içerisinde tasarlanmıştır. Bu adımdan sonra birimin jeomekanik özellikleri “*Define Material*” komutu ile modele tanımlanmıştır. Bu model hiçbir destek sistemi eklenmeden “*Excavate*” komutu ile yalnızca üst yarı kazısı yapılarak, deformasyonlar belirlenmiştir. Deformasyonların sönümlendiği seviye referans alınarak tünelin içerisinde bulunduğu sınıır değeri azaltılmış ve en son haline getirilmiştir (Şekil 4.51).



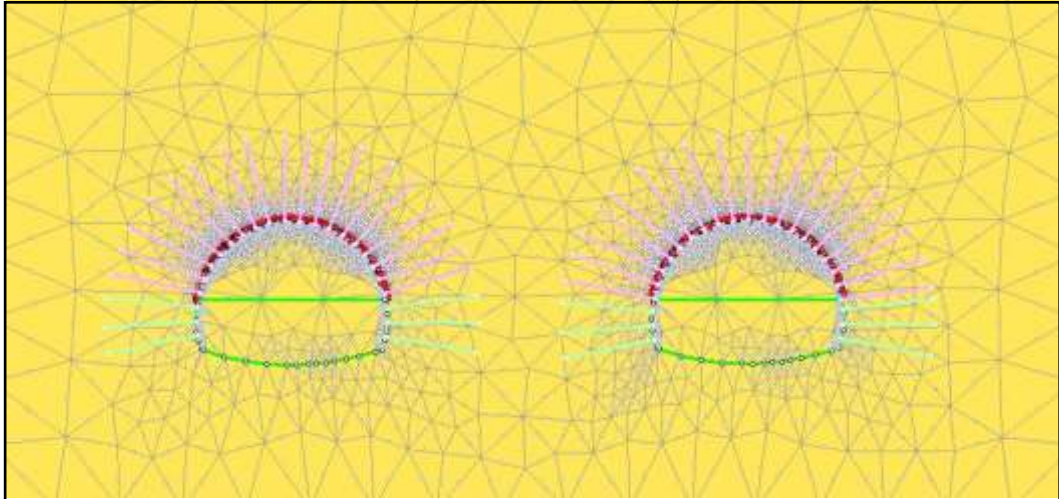
Şekil 4.51. Tünelin destek sistemleri 6 ağılı çözüme hazır hali

Modellemede Stage-1 olarak tanımlanan adımda tünel ortamının hiçbir işlem uygulanmamış ve doğal halidir. Tüm destek elemanlarının özellikleri girilmiş ve ancak henüz aktif edilmemiştir (Şekil 4.52.).



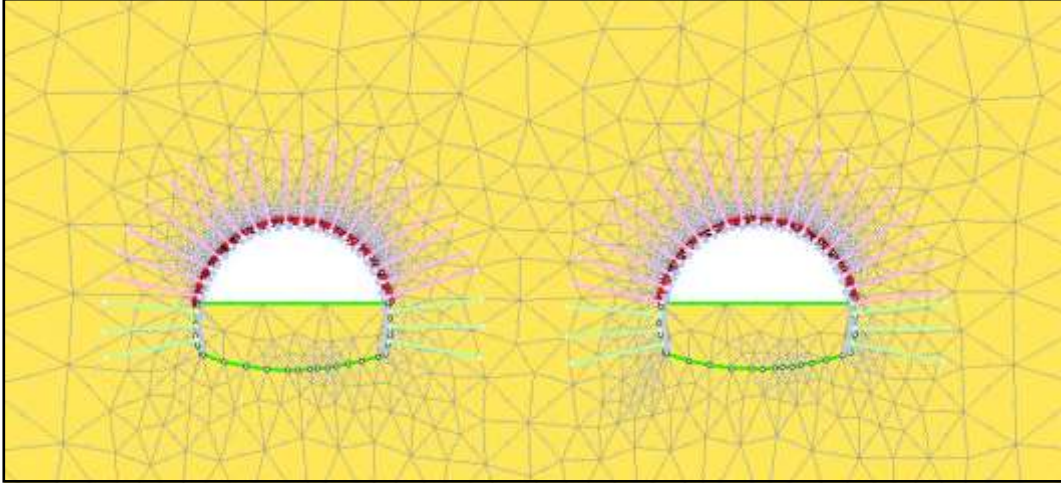
Şekil 4.52. Tünelin desteksiz ve doğal durumu

Stage-2 olarak tanımlanan adımda alt yarı kazısı yapılmadan önce ön tahkimat olarak sürenlerin 25 cm aralıklarla modellemeye eklenerek parametrelerinin girildiği ve aktif edildiği adımdır (Şekil 4.53.).



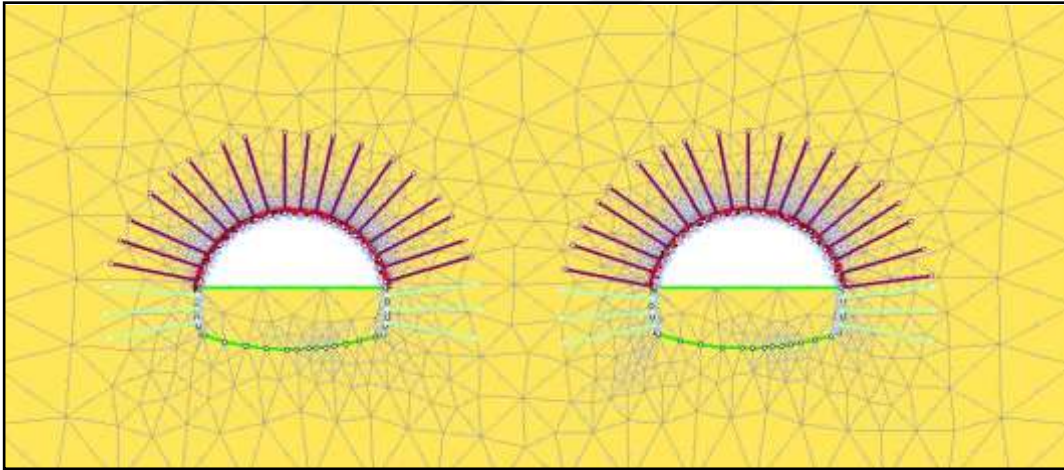
Şekil 4.53. Üst yarı kazısından önce sürenlerin aktif edilmesi

Stage 3 olarak tanımlanan adımda, sürenlerin aktif hale geçmesinden sonra üst yarı kazısı yapılmıştır (Şekil 4.54.).



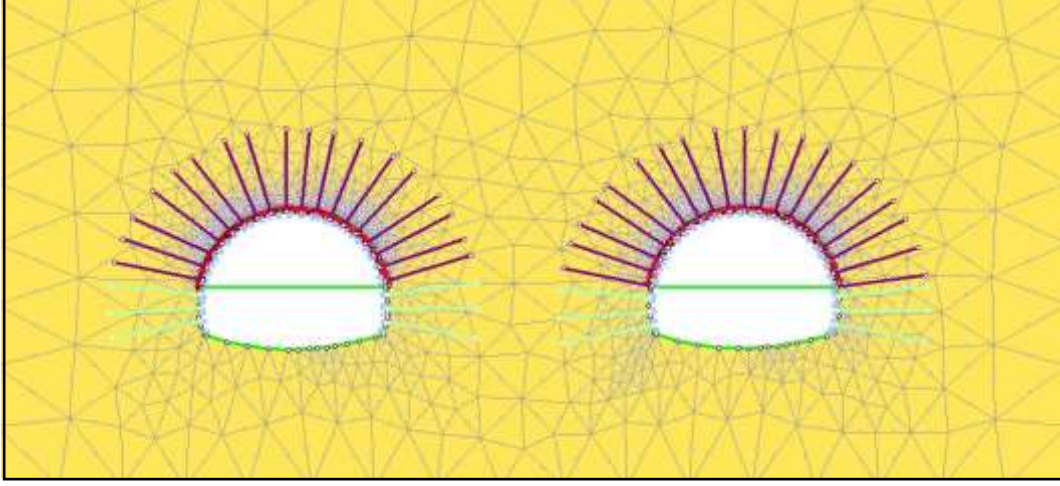
**Şekil 4.54.** Üst yarı kazısının yapılması

Stage 4 olarak tanımlanan adımda, üst yarı kazısından sonra özellikleri “ Fully Bonded” olarak seçilen 28 mm boyutundaki PG bulonlar üst yarıya aktif edilmiştir (Şekil 4.55.).



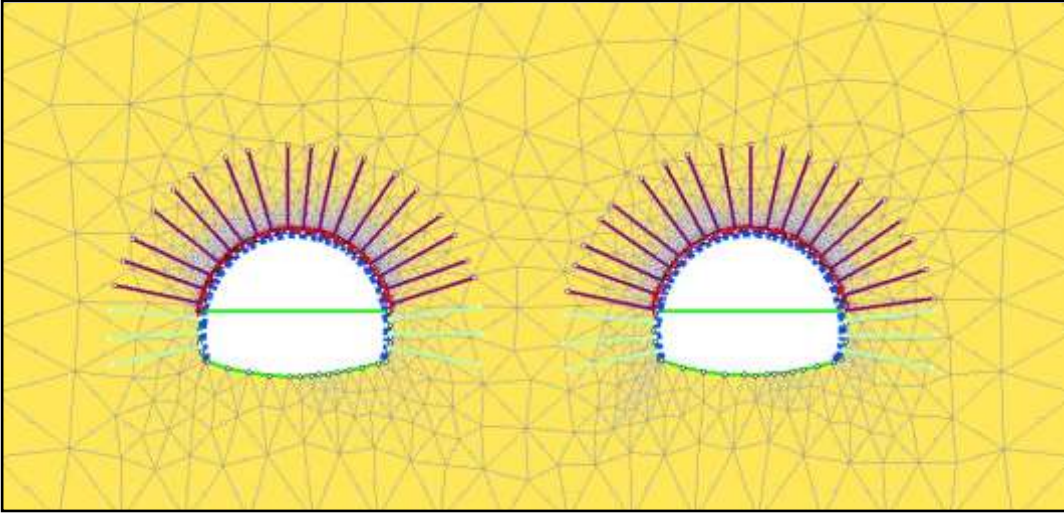
**Şekil 4.55.** Üst yarı kazısının yapılması

Stage 5 olarak tanımlanan adımda, alt yarı kazısı yapılmıştır (Şekil 4.56.).



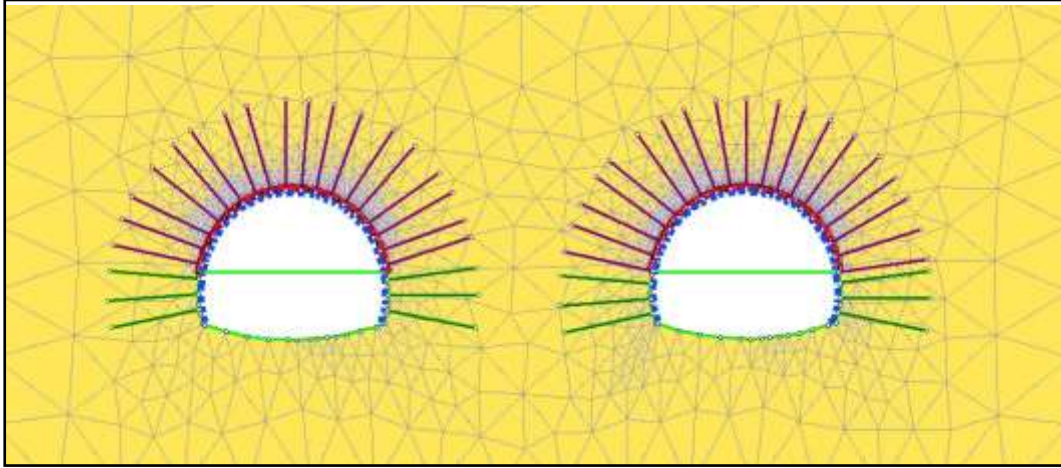
**Şekil 4.56.** Alt yarı kazısının yapılması

Stage 6 olarak tanımlanan adımda, özellikleri belirlenmiş çelik iksa ve püskürtme beton kompozit bir destek elemanı olarak eklenmiştir (Şekil 4.57.).



**Şekil 4.57.** Çelik iksa ve püskürtme betonun kompozit olarak aktif edilmesi

Stage 7 olarak belirlenen bu adımda alt yarıya ait 28 mm PG bulon uygulaması yapılmıştır (Şekil 4.58.).



Şekil 4.58. Alt yarı bulonlama işlemi

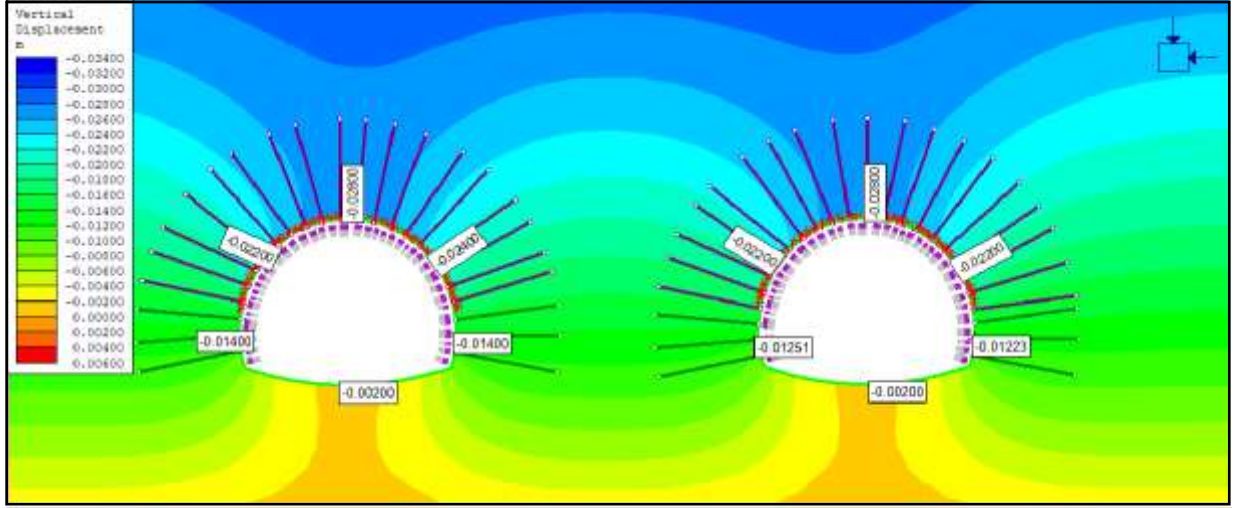
#### 4.9.6. Kireçtaşı Ait Deformasyon ve Gerilme Analizleri

Kireçtaşı bölgesi için yapılan modellemede beklenen düşey yönlü nihai deformasyonlar A,B,C,D ve E noktaları için belirlenmiştir. Bu noktalardaki ölçümlere sol tüp için, A noktasında 2.8 cm, B noktasında 2.2 cm, C noktasında 2.4 cm, D noktasında 1.4 cm ve E noktasında 1.4 cm olarak, sağ tüp için A noktasında 2.8 cm, B noktasında 2.2 cm, C noktasında 2.2 cm, D noktasında 1.25 cm ve E noktasında 1.23 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.59.).

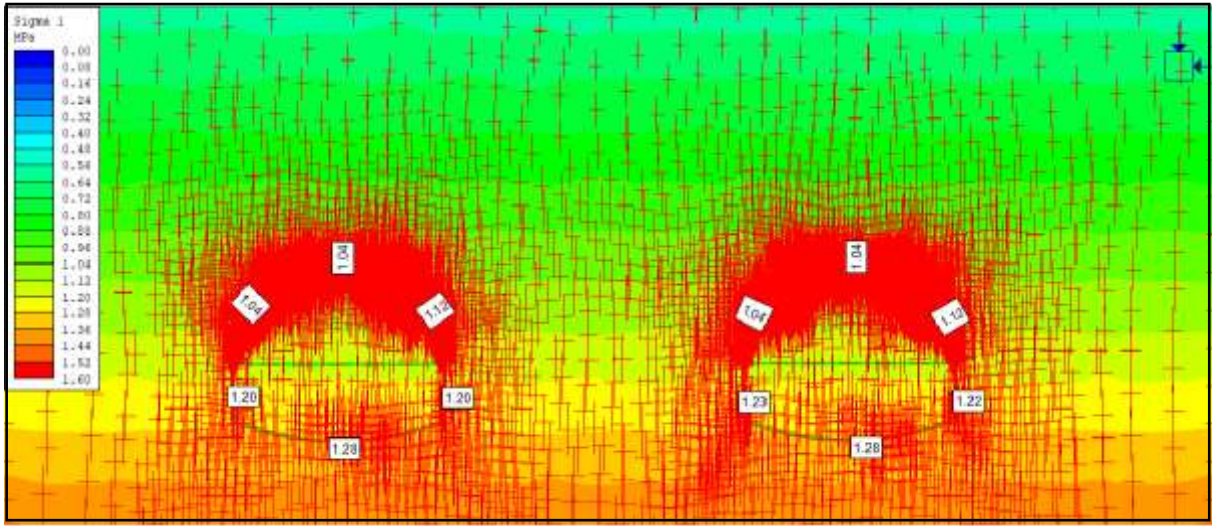
Kazı yapılmadan önce sol tüp için en büyük asal gerilmeler A,B,C,D ve E noktalarında sırasıyla 1.04 MPa, 1.04 MPa, 1.12 MPa, 1.20 MPa ve 1.20 MPa iken (Şekil 4.60.), kazı sonrası bu gerilmeler A noktasında 0.25 MPa, B noktasında 1.50 MPa, C noktasında 1.25 MPa, D noktasında 2.50 MPa ve E noktasında 2.25 MPa olarak belirlenmiştir. (Şekil 4.61.). Sağ tüp için ise sırasıyla A, B, C, D ve E noktalarında sırasıyla 1.04 MPa, 1.04 MPa, 1.12 MPa, 1.23 MPa ve 1.22 MPa olan en büyük asal gerilmeler (Şekil 4.60.), kazı sonrası sırasıyla 0.25 MPa, 1.50 MPa, 1.25 MPa, 2.44 MPa ve 2.28 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 4.61.).

Kazı öncesi sol tüpte en küçük asal gerilmeler sırasıyla A noktasında 0.46 MPa, B noktasında 0.46 MPa, C noktasında 0.46 MPa, D noktasında 0.53 MPa ve E noktasında 0.53 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.62.). Kazı sonrası bu gerilmeler yalnızca B noktasında 0.15 MPa, D noktasında 0.30 MPa, E noktasında 0.15 MPa, A ve C noktalarında 0 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.63.). Sağ tüpte ise sırasıyla A noktasında 0.42 MPa, B noktasında 0.45 MPa, C noktasında 0.46 MPa, D noktasında 0.53 MPa ve E noktasında 0.52 MPa olan asal gerilmeler (Şekil 4.62.) ,kazı sonrası sırasıyla A noktasında 0, B noktasında 0.15 MPa, C noktasında 0, D noktasında 0.17 ve E noktasında 0.12 olarak azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.63.).

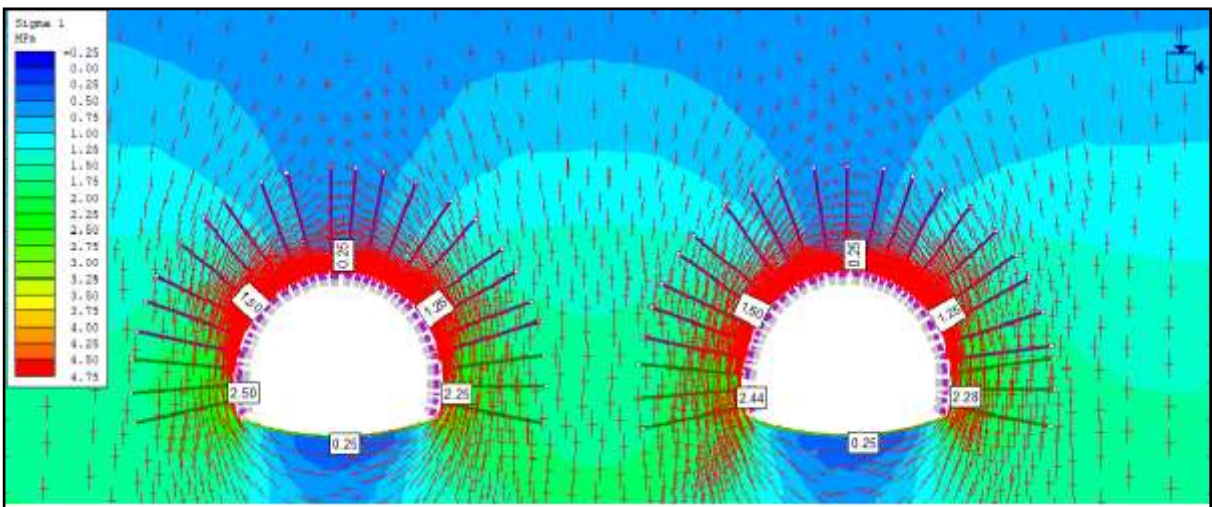




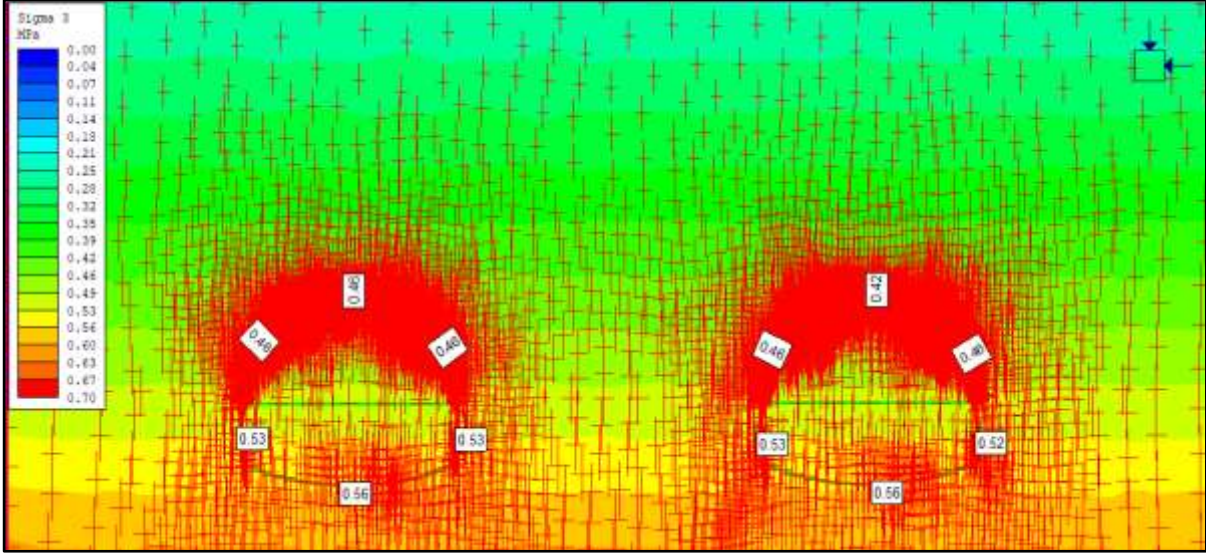
Şekil 4.59. Kazı ve Destekleme Sonrası Düşey Deplasmanlar



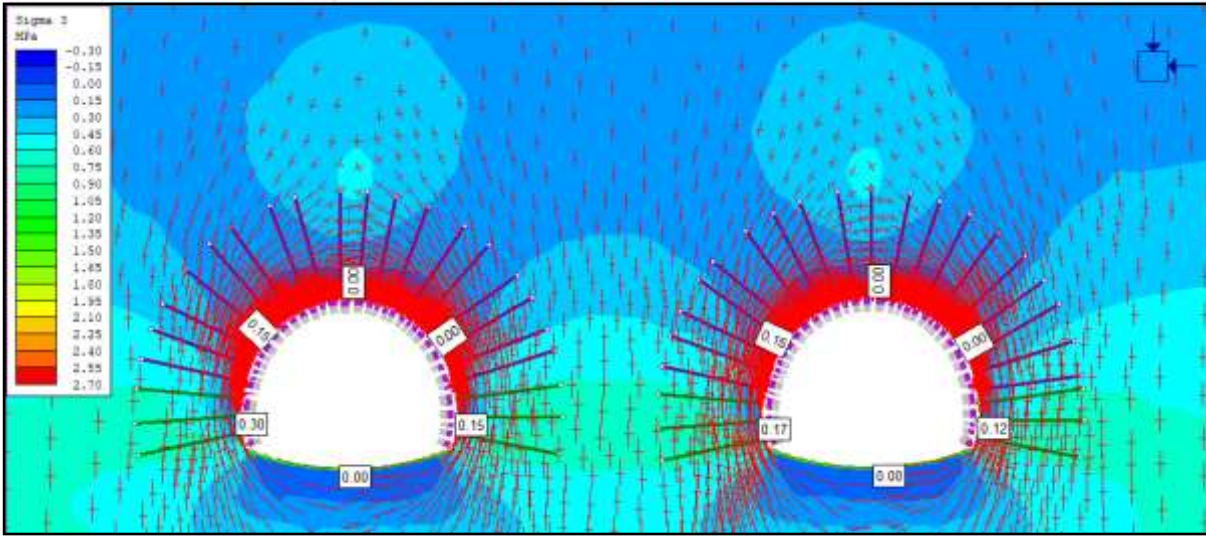
Şekil 4.60. Kazı Öncesi En Büyük Asal Gerilmeler



Şekil 4.61. Kazı ve Destekleme Sonrası En Büyük Asal Gerilmeler



Şekil 4.62. Kazı ve Destekleme Öncesi En Küçük Asal Gerilmeler



Şekil 4.63. Kazı ve Destekleme Sonrası En Küçük Asal Gerilmeler

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bir tünelin veya yeraltı kazısının inşa edilmeden önce içinde bulunduğu kaya veya zemin ortamının tüm özelliklerinin belirlenerek, bu mühendislik yapısı en güvenli ve en ekonomik olarak tasarlanmalıdır. Yeraltı kazısı ve tüneller taşıdığı riskler sebebi ile doğru bir kazı yöntemi ve destekleme sistemine ihtiyaç duymaktadır. Bu sistemler hakkında doğru karar verme mekanizması ise ortamın tüm özelliklerinin bilinerek doğru bir şekilde sınıflandırılmasından geçmektedir.

Tünellerin bulunduğu güzergâha ait yapılacak olan değerlendirmelerde kaya kütesine ait jeolojik ve jeomekanik özellikler son derece önemlidir. Tüm bu özellikler gerekli ölçümler ve deneyler

yapılarak sistematik olarak elde edilmelidir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda, kaya kütlelerinin sınıflaması yapılmalıdır. Bu aşamanın doğru yapılması destek sistemleri seçiminde nitelikli kararlar verilmesini sağlamaktadır. Böylece belirlenen destek elemanları ile tünel içerisindeki deformasyonlar kontrol altında tutularak, kaya ortamı duraylı hale getirilmektedir. Duraylılık hem bu mühendislik projesinin güvenli bir şekilde devam etmesi hem de ilerleyen zamanlarda karşılaşılabilecek olası tehlikeler için en önemli kriterdir. Bu çalışmada tünel portalları şev kazısı faktörünü de içerdiğinden ve yüksek deformasyon beklentisi nedeniyle modellemede oluşabilecek hataları en aza indirmek için çalışmanın dışında tutulmuştur.

Yeraltı kazılarının bilgisayar ortamında modellenmesi için birçok yazılım mevcuttur. SEM tabanlı Phase 2D programı çok yönlü bir analiz yaparak yeraltı açıklıklarında kazılan malzemeyi ve bulunduğu koşulları farklı prensiplere göre tasarlayabilmektedir. Bu modeller koşulların sayısal olarak ifade edilmesiyle projeye ait doğru öngörüler sağlamaktadır. Tünel güzergâhı boyunca bölümlere (sektörlere ) ayrılmış olan kaya kütlelerinin birim hacim ağırlığı, elastisite modülü, poisson oranı, deformasyon modülü vb. gibi özellikleri sisteme tanımlanarak bölümlerin özellikleri belirlenmektedir. Bu özellikler sayesinde kaya kütlelerinin sınıflaması yapılır ve destek sistemleri tasarlanır. NATM 'ın dayandığı tünelin belirli bir miktar deformasyonuna izin verip bu deformasyonu izleyerek desteklemenin yapılmasını esas aldığı düşünülürse, Phase 2D gibi programlarla yapılan tasarımın irdelenmesi yerinde olacaktır. Bu irdemeler ile destek elemanları veya elemanları uygulama metotları değiştirilerek daha farklı sonuçlara varılabilir. Bu nedenle verilerin doğru yöntemlerle elde edilmesi ve kullanılması doğru tasarımlar yapılmasını sağlayacaktır. Bu tasarımların dikkate alınması ile çıkacak olan problemler en aza indirgenecektir. Ancak kazı çevresindeki gerilmelerin dağılımları, oluşacak olan yenilmeleri ve deformasyonları daha net görerek yorumlayabilmek açısından bu sayısal modelleme programlarında yapılan analizlerin, kazıdan önce yapılması daha yerinde olacaktır.

NATM'ın dayandığı temele göre, tüneli çevreleyen kaya/zemin kütlelerini, süren, püskürtme beton, çelik hasır, çelik iksa ve kaya bulonları gibi destek elemanları kullanarak ince ve geçici bir destekleme uygulamak, böylece tünel çevresinde yükü taşıyacak bir sınır oluşturmaktır. Bu yöntem ile oluşacak deformasyonlara izin verilerek kaya kütlelerindeki gerilim azaltılır. Böylelikle son destekleme daha az yüklenir. Ancak kaya kütleleri sınıflamaları ve geçici destekler birer ön tasarım aracıdır. Gerekli görüldüğü koşullarda destek sistemlerinde değişiklik yapılabilir. Bu değişiklikler kazı ve imalat aşamasında karşılaşılan problemler veya beklentilere göre güncellenebilir. Tasarımda kullanılan kaya kütlelerine ait deformasyon modülü ve elastisite modülü gibi değerlerin belirlenmesinde görgül yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu farklı yaklaşımlar birbirlerinden farklı sonuçlar verebilmektedir. Tasarımda görgül yaklaşım kullanılarak belirlenecek parametreler için seçilecek olan yaklaşımın mümkün olduğunca doğru seçilmesi gerekmektedir. Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda daha farklı bir yaklaşım tipi seçilerek veya destek elemanlarının tasarımında yapılacak değişiklikler ile çeşitli sonuçlar elde edilebilir.

## **KAYNAKLAR**

Ak, E. (2005).Tünel Tasarımında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerilme ve Deformasyon Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

Akay, E ve Uysal Ş.,(1988) , ‘‘Orta Torosların Post-Eosen Neotektoniği.’’ MTA Dergisi,108, s57-68

Aygar, B. ve Gökçeoğlu, C.(2020). ‘‘Zayıf Zeminlerde Açılan Büyük Çaplı Bir Tünelin Destek Tasarımı(Çukurçayır-2 Tüneli)’’. Yeraltı Kaynakları Dergisi, Sayı. 18, Sayfa 97-117, Ankara

Barton, N., (2002). Some New Q-Value Correlations To Assist In Site Characterization And Tunnel Design, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, v39, p; 185–216

Bieniawski, Z. T.,(1973). ‘‘ Engineering classification of jointed rock masses.’’ Transactions of South African Institution of Civil Engineers, 15 (12), 335-344.

Bieniawski, Z.T., (1979). ‘‘The geomechanics classification in rock engineering application.’’ Proceedings 4th International Congress on Rock Mechanics, 2(1), 41-48, Montreux

Bieniawski,Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications,Canada

Clough, R.W., Woodward, R.J., ‘‘Analysis of embankment stres and deformation’’, Journal of soil mechanics and foundation division, ASCE 93, 529-549 (1967)

Çeçen, Ö.(2007).İstanbul Metrosu Koska Tünelleri Yüzey Deformasyon Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Dean W.T. And Monod O, (1970) The lower Paleozoic stratigraphy and Faunas of the Tuaurus Mountains near, Beyşehir, Turkey

Demirtaşlı, E.,(1984). ‘‘Staratigraphy and Tectonics of are between Silifke and Anamur, Central Taurus Mountains.’’Geology of Taurus Belt,s 101-118,Ankara

Demirtaşlı, E., (1987b),Silifke Batısındaki Büyükeceli, Korucuk ve Akdere arasında kalan bölgelerin jeolojisi MTA raporu, No:8769, Ankara

Doğruoğlu, T. (2009). TBM Metodu ile Açılan Tünellerde Meydana Gelebilecek Deformasyonların Sonlu Elemanlar Metodu ve Numerik Hesaplarla Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul Türkiye

Dönder, G.(2019). Topçam Tüneli Deformasyonlarının rastgele sonlu elemanlar metodu ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara

Güven, G.(2009). İstanbul Metrosu Otogar Kirazlı Arasının Mühendislik Jeolojisi ve Tünel Kazılarına Bağlı Deformasyonların Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Hoek, E. and Brown E. T.(1990). ‘‘Underground Excavations in Rock’’, New York, USA

Hoek, E. and Diederichs, M.S(2007) ‘‘ Empirical estimation of rock mass modulus.’’,International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences ,203–215

ISRM, Rock characterization, Testing & Monitoring (Editor: E.T. Brown, ISRM Suggested Methods): Pergamon Press, New York, 1981, 211p

Karaođlan, H.( 2002). Kaya zeminde tünel tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Koç, H. (2003). Aydıncık Yöresinin Tektonostratigrafisi ve Jeolojik Evrimi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana ,Türkiye

Kökçüoğlu, H. (2006). Sonlu Elemanlar Metodu ile Tünel Modellemesi ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Kripakov, N. P., Sun, M. C. & Donato, D. A. 1994. Automation of a progressive failure procedure for analysis of underground mine pillar designs. Proc. of IS\* Int. Conf. on Ground Control in Mining., 59-68

Kun, M. (2010). Zayıf Kayalarda ve Faylı Zonlarda Tünel Açma Tasarım ve Gereksinimlerinin Araştırılması ve Çözümlemesi

Lauffer, H.,(1958). Gebirgsklassificierung für deb stullenbau,Germany

Mersin ili 1940-2021 yılları arası; ortalama minimum ve maksimum sıcaklık değerleri(2022). 13 Mart 2022 tarihinde [www.mgm.gov.tr](http://www.mgm.gov.tr) adresinden erişildi.

Mersin ili 1940-2021 yılları arası; aylara göre yıllık yağış miktarı ortalaması (2022). 13 Mart 2022 tarihinde [www.mgm.gov.tr](http://www.mgm.gov.tr) adresinden erişildi.

ÖNORM B2203, Untertagebauarbeiten Werkvertragsnorm, Österreichischer Normen, Österreich, 1994.

Özbek, A .(2004). Tünel Kazı Deformasyonlarının Modellenmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye

Özgül, N.,(1976), ‘ Torosların Temel Jeolojik Özellikleri’ ’Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni,s-65-78

Özgül, N., 1976, Toroslar’ın bazı temel jeoloji özellikleri; Türkiye Jeol. Kur. Bült., 19/1, 65-78.

Panthee, S.,Singh, P.K, Kainthola A. And Panthee T.K (2016). ‘ Control of rock joint parameters on deformation of tunnel opening.’’ Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,489-498

Polat, D. (2010). NATM Metodu Kullanılarak Tünel Tasarımı ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Reyes, S.F. ve Deene,(1966). “Elastic rustic analysis of underground openings by the finite element method”, 1 st congress of the international society of rock mechanics, Lisbon, 477-486 (1966).

Rock Mass Strength Analysis Using the Hoek-Brown Failure Criterion (2007). www.rocscience.com 14 Nisan 2022 tarihinde erişildi.

Singh, B. and Goel R. (2011). Engineering Rock Mass Classification for Tunelling, Foundations and Landslides, India

Satıcı, Ö. ve Topal, T.(2005). ‘ Tünel Açma Yöntemlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Sınıflama Sistemleri ile Değerlendirilmesi .’’Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Cilt 39, Sayı 1, 45 – 57

Tuncay, E. (2012). Kayaç Mekaniği Ders Notları, Hacettepe Üniversitesi, Adana, Türkiye

Ulusay, R ve Sönmez H. (2007). Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, Ankara, Türkiye

Ünsal, N. ve Dönder, G.(2013). ‘Topçam Tüneli Deformasyonlarının Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Hesaplanması’’Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Sayfa 115-127,Ankara.

Vardar, M. (2013).‘Dünyada ve Türkiye’de Tünelcilik, ’Türkiye Tünelcilik Semineri, İstanbul

Vardar, M.,Koçak B. (2008).’’Yeraltı kaya yapılarının denetimi ve yönlendirilmesinde uzman sistem oluşturulması. İtü Dergisi Cilt:7, Sayı:1, 41-52

Yalçınkaya, M. ve Satır B.(2005). ‘ Tünellerde Oluşan Hareketlerin Farklı Ölçü Yöntemleri ve Sonlu Elemanlar

Yöntemiyle Belirlenmesi. 'Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 2.Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Yardımcı, E. (2012). Tünellerde Destek Sistemleri ve Güçlendirme Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Yüceses, O. (2019). Karayolu Tünellerindeki Jeoteknik ve Jeodezik Yöntemlerle Deformasyon Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale On sekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye

Yüksel, M., (1985). Aydıncık Bölgesinin Jeolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Zienkiewicz, O.C(1977). "Finite element method", McGraw-Hill, London, 20-42, 93-118

**EK- 1 TÜNELİN JEOLJİ KESİTİ**

