

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZONGULDAK ÇEVRESİNDE AÇILAN KARAYOLU TÜNELLERİNİN ÇEVRE
KAYA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE DURAYLILIĞININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZEYNEL DERİN

MART 2018

BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZONGULDAK ÇEVRESİNDE AÇILAN KARAYOLU TÜNELLERİNİN ÇEVRE
KAYA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE DURAYLILIĞININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynel DERİN

DANIŞMAN

: Prof. Dr. Melih GENİŞ

ZONGULDAK

Mart 2018

KABUL:

Zeynel DERİN tarafından hazırlanan "ZONGULDAK ÇEVRESİNDE AÇILAN KARAYOLU TÜNELLERİNİN ÇEVRE KAYA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE DURAYLILIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 09/03/2018

Danışman: Prof. Dr. Melih GENİŞ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü



Üye: Doç. Dr. M. Erdinç BİLİR

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü



Üye: Doç. Dr. G. Gülsev UYAR

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./...../2018


Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Zeynel DERİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZONGULDAK ÇEVRESİNDE AÇILAN KARAYOLU TÜNELLERİNİN ÇEVRE KAYA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE DURAYLILIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Zeynel DERİN

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Melih GENİŞ

Mart 2018, 137 sayfa

Zonguldak ilini Ankara'ya bağlayan devlet karayolu güzergâhının çift yönlü olması için çalışmalar devam etmektedir. Bu amaçla günümüzde hizmet veren Sapça tüneline paralel yeni tüp ve Üzülmaz tünellerinin kazı çalışmaları tamamlanmıştır. Tünel güzergâhı boyunca seçilen kesitler için duraylılık değerlendirmesi yapılmıştır. Kaya malzemesinin dayanım ve deformasyon özellikleri laboratuvar çalışmaları ile bulunmuştur. RMR ve Q gibi kaya kütlesi sınıflama sistemleri kullanılarak kaya kütlesi puanları tespit edilmiştir. Sonra kaya kütlesine ilişkin dayanım ve deformasyon özellikleri çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen görgül eşitliler yardımıyla belirlenmiştir. Elde edilen veriler, iki boyutlu sonlu elemanlar çözümleme yöntemlerini esas alan bilgisayar programlarında kullanılarak yerdeğiştirme miktarları, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri belirlenmiştir. Ayrıca tünel kazısının çeşitli aşamalarında uygulanan tahkimatın duraylılığı da değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Tünel, duraylılık, sayısal çözümler.

Bilim Kodu: 607.01.00



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

STABILITY ASSESMENT AND DETERMINATION OF ROCK MASS PROPERTIES OF ROADWAY TUNNELS AROUND ZONGULDAK

Zeynel DERİN

**Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mining Engineering**

Thesis Advisor: Prof. Dr. Melih GENİŞ

March 2018, 137 pages

The studies about extension to double roadway of existing state roadway from Zonguldak to Ankara has been continued. In this purpose, excavations of tunnel tube parallel of existing Sapça Tunnel and Üzulmez tunnels have just been completed. Stability assessment for selected regions along to the tunnels route were performed. Strength and deformation properties of rock material by laboratory studies were obtained. Rock mass ratings were estimated by rock mass classification systems such as RMR and Q. Then, strength and deformation properties of rock mass is obtained by using empirical equations proposed by various researchers. Displacement and failure zones around openings were calculated by using obtained data into two dimensional computer code based finite element method. Furthermore, support stabilities at the different stages of excavation were evaluated.

Key Words: Tunnel, stability, numerical analyses.

Science Code: 607.01.00



TEŞEKKÜR

Yazar, Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Anabilim Dalı'nda tamamlamış olduğu bu çalışmada tez süresi boyunca yapıcı öneri ve eleştirileri ile yapmış olduğu tüm değerli katkılarından dolayı tez danışmanı Prof. Dr. Melih GENİŞ (BEÜ)'e sonsuz teşekkürlerini sunar.

Tez çalışması süresince yazara derin bilgisiyle önerilerde bulunan ve duraylılık değerlendirmeleri bölümünde göstermiş olduğu değerli katkılarından dolayı Prof. Dr. Ömer AYDAN (Ryukyu Üniversitesi)'a çok teşekkür eder.

Tez çalışmalarını yürüttüğü tünellerde yaptıkları yardımlardan dolayı Karayolları Genel Müdürlüğü 15. Bölge Müdürlüğü'ne, arazi çalışmaları sırasında yardımlarından dolayı KGM Kontrol Şefi İnşaat Yük. Müh. Suat Cüre'ye, ENEZ İnşaat Proje Müdürü İnşaat Müh. Selçuk Genç'e ve tüm proje çalışanlarına teşekkürü bir borç bilir. Ayrıca çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen ve elim bir trafik kazasında yaşamlarını kaybeden Zeynep Aybüke Baraş (Jeoloji Mühendisi) ve Ahmet Güney (Ateşçi)'i saygı ve rahmetle anar.

BEÜ Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Sait KIZGUT (BEÜ)'a, değerli jüri üyeleri Doç.Dr. M. Erdinç BİLİR (BEÜ)'e, Doç Dr. G. Gülsev UYAR (HÜ)'a, deneysel çalışmalardaki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Özgür YILMAZ (BEÜ)'a ve tekniker Hasan ANGIN (BEÜ)'a içten teşekkürlerini sunar.

Hayatı boyunca yazardan hiçbir şekilde emeğini esirgemeyen ve tüm çalışmaları sırasında her türlü desteklerinden dolayı kıymetli ailesi ve değerli eşi Göksu DERİN'e sonsuz teşekkürü bir borç bilir.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 KONUNUN ÖNEMİ.....	1
1.2 TEZİN AMACI.....	1
1.3 TEZİN KAPSAMI.....	2
BÖLÜM 2 ÇALIŞMA YAPILAN TÜNELLERİN VE SAHA JEOLJİSİNİN TANITIMI.....	3
2.1 SAPÇA TÜNELİ.....	3
2.2 ÜZÜLMEZ TÜNELLERİ.....	5
BÖLÜM 3 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI.....	9
3.1 TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIM DENEYİ.....	10
3.2 DOLAYLI ÇEKME (BRAZILIAN) DENEYİ.....	12
3.3 STATİK ELASTİK SABİTLER DENEYİ.....	18

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4 KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	21
4.1 JEOMEKANİK SINIFLAMA SİSTEMİ (RMR).....	22
4.2 TÜNELCİLİK NİTELİĞİ SINIFLAMA SİSTEMİ (Q)	28
4.3 SAPÇA VE ÜZÜLMEZ TÜNELLERİNİN KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	35
BÖLÜM 5 TÜNELLERDE UYGULANAN KAZI YÖNTEMLERİ VE KULLANILAN TAHKİMAT TÜRLERİ.....	41
5.1 TÜNELLERDE UYGULANAN KAZI TAHKİMAT YÖNTEMLERİ.....	43
5.1.1 B1 Kazı Tahkimat Yöntemi.....	43
5.1.2 B2 Kazı Tahkimat Yöntemi.....	45
5.1.3 B3 Kazı Tahkimat Yöntemi.....	47
5.1.4 C2 Kazı-Tahkimat Yöntemi.....	49
5.1.5 C3 Kazı Tahkimat Yöntemi.....	52
5.2 TÜNELLERDE KULLANILAN TAHKİMAT MALZEMELERİ.....	59
5.2.1 Demir Bağ.....	59
5.2.2 Kaya Saplamaları.....	61
5.2.2.1 SN Tipi Kaya Saplaması.....	61
5.2.2.2 IBO Tipi Kaya Saplaması.....	62
5.2.3 Çelik Hasır.....	62
5.2.4 Püskürtme Beton.....	63
BÖLÜM 6 TÜNELLERİN DURAYLILIK DEĞERLENDİRMELERİ.....	65

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
6.1 BİRİNCİL GERİLME ALANININ TAHMİNİ.....	65
6.2 SAYISAL MODELLEME ÇÖZÜMLEMELERİ.....	67
6.2.1 Açıklık Geometrisi ve Sınır Koşulları.....	67
6.2.2 Modelleme Aşamaları.....	69
6.2.3 Yük Dağılımı ve Tahkimatın Modellenmesi.....	73
6.3 DURAYLILIK DEĞERLENDİRMELERİ.....	73
6.3.1 Sapça Tüneli Duraylılık Değerlendirmeleri.....	73
6.3.1.1 Sapça Tüneli 1 no.lu kesit.....	73
6.3.1.2 Sapça Tüneli 2 no.lu kesit.....	77
6.3.1.3 Sapça Tüneli 3 no.lu kesit.....	83
6.3.1.4 Sapça Tüneli 4 no.lu kesit.....	86
6.3.1.5 Sapça Tüneli 5 no.lu kesit.....	89
6.3.2 Üzülmez Tünelleri Duraylılık Değerlendirmeleri.....	94
6.3.2.1 Üzülmez Tüneli 1 no.lu kesit.....	94
6.3.2.2 Üzülmez Tüneli 2 no.lu kesit.....	101
6.3.2.3 Üzülmez Tüneli 3 no.lu kesit.....	111
6.3.2.4 Üzülmez Tünelleri 4 no.lu kesit.....	118
BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	127
KAYNAKLAR.....	131
BİBLİYOGRAFYA.....	135
ÖZGEÇMİŞ.....	137



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Sapça tüneli Ankara tarafı girişinin görünümü.....	3
Şekil 2.2 Sapça tünelinin konum haritası.....	4
Şekil 2.3 Sapça tüneli incelenen kesitlerin ve uygulanan kazı tahkimat yöntemlerinin gösterimi.....	4
Şekil 2.4 Üzülmez tünellerinin Ankara tarafı girişinin görünümü.....	5
Şekil 2.5 Üzülmez sağ ve sol tünellerinin konum haritası.....	6
Şekil 2.6 Üzülmez sol tüneline incelenen kesitlerin ve uygulanan kazı tahkimat yöntemlerinin gösterimi.....	6
Şekil 2.7 Üzülmez sağ tüneline incelenen kesitlerin ve uygulanan kazı tahkimat yöntemlerinin gösterimi.....	7
Şekil 3.1 Sapça tüneline alınan bloklardan elde edilen karotların görünümü.....	9
Şekil 3.2 Üzülmez tünellerinden alınan bloklardan elde edilen karotların görünümü.....	10
Şekil 3.3 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonunda kaya bloğunun görünümü.....	11
Şekil 3.4 Dolaylı çekme dayanımı deneyinden bir görünüm.....	15
Şekil 3.5 Statik elastik sabitler deneyinden bir görünüm.....	18
Şekil 3.6 Teğetsel Young modülünün hesaplanması.....	19
Şekil 4.1 Kaya malzemesi, süreksizlik ve kaya kütlesi kavramlarını tanımlayan şematik kesit.....	22
Şekil 4.2 RMR kaya kütlesi puanlama sisteminde kullanılan parametreler.....	23
Şekil 5.1. Tünellerde uygulanan üst yarı kazısından bir görünüm.....	42
Şekil 5.2 Tünellerde uygulanan üst yarı kazısının görünümü.....	42
Şekil 5.3 Tünellerde uygulanan alt yarı kazısından bir görünüm.....	43
Şekil 5.4 B1 Kazı destek sınıfına ait pafta örneği.....	44
Şekil 5.5 B2 kazı destek sınıfının pafta örneği.....	46
Şekil 5.6 B3 Kazı destek sınıfının pafta örneği.....	48

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.7 C2 Kazı destek sınıfının pafta örneği.....	50
Şekil 5.8 C3 Kazı destek sınıfının pafta örneği.....	53
Şekil 5.9 Çelik boru şemsiye kemer yönteminden bir görünüm.....	55
Şekil 5.10 Çelik boru şemsiye kemer yönteminden başka bir görünüm.....	56
Şekil 5.11 Kılavuz matkap ve çelik borunun üzerinde sabit kalan kendi matkabı.....	56
Şekil 5.12 6 m lik çelik borulardan bir görünüm.....	56
Şekil 5.13 3 m'lik çelik borulardan bir görünüm.....	57
Şekil 5.14 Çelik boru şemsiye kemer yönteminin önden görünümü.....	57
Şekil 5.15 Yükselen demir bağların arına yerleştirilmesinden bir görünüm.....	58
Şekil 5.16 Çelik boru şemsiye kemer yönteminin profilden görünümü.....	58
Şekil 5.17 Çelik boru şemsiye kemer yönteminin A-A kesitinden görünümü.....	59
Şekil 5.18 Demir bağlardan bir görünüm.....	60
Şekil 5.19 Demir bağlardan başka bir görünüm.....	60
Şekil 5.20 SN kaya tipi saplaması uygulamasından bir görünüm.....	61
Şekil 5.21 SN tipi kaya saplamasından bir görünüm.....	62
Şekil 5.22 IBO tipi kaya saplamalarından bir görünüm.....	63
Şekil 5.23 Q221/221 türü çelik hasır.....	63
Şekil 5.24 Püskürtme beton uygulamasından bir görünüm.....	64
Şekil 5.25 Püskürtme beton uygulama anıadan bir görünüm.....	64
Şekil 6.1 Sapça tüneli için birincil gerilme tahmini.....	66
Şekil 6.2 Üzülmez tüneli için birincil gerilme tahmini ve ölçüm yapılan fay aynası.....	66
Şekil 6.3 Çözümlemelerde esas alınan taban kemersiz tünel kesiti.....	68
Şekil 6.4 Sapça tüneli için sonlu elemanlar ağı.....	68
Şekil 6.5 Üzülmez tüneli için sonlu elemanlar ağı.....	69
Şekil 6.6 Sapça tüneli sayısal çözümleme aşamaları.....	70
Şekil 6.7 Üzülmez tüneli sayısal çözümleme aşamaları.....	70
Şekil 6.8 Üzülmez tüneli 4. kesit için sayısal çözümleme aşamaları.....	71
Şekil 6.9 Sapça 1. kesit en büyük asal birincil gerilme dağılımı.....	74
Şekil 6.10 Sapça tüneli 1. kesiti toplam yerdeğiştirme miktarı.....	74
Şekil 6.11 Sapça tüneli 1. kesiti saplamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	75

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.12 3 no.lu saplamada oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	76
Şekil 6.13 Tünel kaplama elemanlarında oluşan aksenal kuvvet dağılımları.....	76
Şekil 6.14 Sapça 2. kesit en büyük asal gerilme dağılımı.....	77
Şekil 6.15 Sapça 2. kesit en küçük asal gerilme dağılımı.....	78
Şekil 6.16 Sapça tüneli 2. kesiti toplam yerdeğiştirme miktarı.....	79
Şekil 6.17 Sapça tüneli 2. kesiti güvenlik katsayısı.....	80
Şekil 6.18 Sapça tüneli 2. kesiti saplamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	80
Şekil 6.19 5 no.lu saplamada oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	82
Şekil 6.20 Tünel kaplamasında oluşan aksenal kuvvet dağılımları.....	82
Şekil 6.21 Sapça 3. kesit en büyük asal birincil gerilme dağılımı.....	83
Şekil 6.22 Sapça tüneli 3. kesiti toplam yerdeğiştirme miktarı.....	84
Şekil 6.23 Sapça tüneli 3. kesiti güvenlik katsayısı.....	84
Şekil 6.24 Sapça tüneli 3. kesiti saplamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	85
Şekil 6.25 5 no.lu saplamada oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	86
Şekil 6.26 Tünel kaplamasında oluşan aksenal kuvvet dağılımları.....	86
Şekil 6.27 Sapça tüneli 4. kesiti toplam yerdeğiştirme miktarı.....	87
Şekil 6.28 Sapça tüneli 4. kesiti güvenlik katsayısı.....	87
Şekil 6.29 Sapça tüneli 4. kesiti saplamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	88
Şekil 6.30 5 no.lu saplamada oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	89
Şekil 6.31 Tünel kaplama elemanlarında oluşan aksenal kuvvet dağılımları.....	89
Şekil 6.32 Sapça 5. kesit en büyük asal gerilme dağılımı.....	90
Şekil 6.33 Sapça tüneli 5. kesiti toplam yerdeğiştirme miktarı.....	91
Şekil 6.34 Sapça tüneli 5. kesiti saplamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	91
Şekil 6.35 6 no.lu saplamada oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	93
Şekil 6.36 Tünel kaplamasında oluşan aksenal kuvvet dağılımları.....	93
Şekil 6.37 Üzülmez tüneli 1 no.lu kesitinde farklı kazı ve tahkimat aşamaları için açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme dağılımları.....	94
Şekil 6.38 Üzülmez tüneli 1 no.lu kesiti için en küçük asal gerilme dağılımları.....	97
Şekil 6.39 Üzülmez tüneli 1 no.lu kesiti için toplam yerdeğiştirme dağılımları.....	97
Şekil 6.40 Üzülmez tüneli 1 no.lu kesitinde saplamalarda oluşan aksenal çekme gerilmesi dağılımları.....	101

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.41 Sol tüpte bulunan 5 no.lu SN saptamada oluşan aksenal gerilmenin saptama uzunluğunca değişimi.....	100
Şekil 6.42 Tünel kaplamasında (1. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları.....	100
Şekil 6.43 Tünel kaplamasında (2. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları.....	101
Şekil 6.44 Üzülmez tüneli 2 no.lu kesitinde farklı kazı ve tahkimat aşamaları için açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme dağılımları.....	102
Şekil 6.45 Üzülmez tüneli 2 no.lu kesiti için en küçük asal gerilme dağılımları.....	104
Şekil 6.46 Üzülmez tüneli 2 no.lu kesiti için toplam yerdeğiştirme dağılımları.....	105
Şekil 6.47 Üzülmez tüneli 2. kesitinde saptamalarda oluşan aksenal çekme gerilmesi dağılımları.....	107
Şekil 6.48 Üzülmez tüneli 2. kesitinde saptamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	107
Şekil 6.49 Sol tüpte bulunan 23 no.lu SN saptamada oluşan aksenal gerilmenin saptama uzunluğunca değişimi.....	109
Şekil 6.50 Sol tüpte bulunan 8 no.lu IBO saptamada oluşan aksenal gerilmenin saptama uzunluğunca değişimi.....	109
Şekil 6.51 Tünel kaplamasında (1. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları.....	110
Şekil 6.52 Tünel kaplamasında (2. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları.....	110
Şekil 6.53 Tünel kaplamasında (3. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları	110
Şekil 6.54 Üzülmez tüneli 3 no.lu kesiti için en büyük asal gerilme dağılımları.....	111
Şekil 6.55 Üzülmez tüneli 3 no.lu kesiti için en küçük asal gerilme dağılımları.....	112
Şekil 6.56 Üzülmez tüneli 3 no.lu kesiti için toplam yerdeğiştirme dağılımları.....	112
Şekil 6.57 Üzülmez tüneli 3 no.lu kesiti için yenilme bölgeleri.....	113
Şekil 6.58 Üzülmez tüneli 3. kesitinde saptamalarda oluşan aksenal çekme gerilmesi dağılımları.....	114
Şekil 6.59 Üzülmez tüneli 3. kesitinde saptamalarda ve kaplamada oluşan yenilme dağılımları.....	116
Şekil 6.60 Sol tüpte bulunan 6 no.lu SN saptamada oluşan aksenal gerilmenin saptama uzunluğunca değişimi.....	116
Şekil 6.61 Sol tüpte bulunan 4 no.lu IBO saptamada oluşan aksenal gerilmenin saptama uzunluğunca değişimi.....	117

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.62 Tünel kaplamasında (1. tabaka) oluşan aksenal kuvvet.....	117
Şekil 6.63 Tünel kaplamasında (2. tabaka) oluşan aksenal kuvvet.....	117
Şekil 6.64 Tünel kaplamasında (3. tabaka) oluşan aksenal kuvvet.....	118
Şekil 6.65 Üzülmez tüneli 4 no.lu kesitinde farklı kazı ve tahkimat aşamaları için açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme dağılımları.....	119
Şekil 6.66 Üzülmez tüneli 4 no.lu kesiti için en küçük asal gerilme dağılımları.....	121
Şekil 6.67 Üzülmez tüneli 4 no.lu kesiti için toplam yerdeğiştirme dağılımları.....	122
Şekil 6.68 Üzülmez tüneli 4. kesitinde saplamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.....	123
Şekil 6.69 Sağ tüpte bulunan 5 no.lu SN saplamada oluşan aksenal gerilmenin saplama uzunluğunca değişimi.....	125
Şekil 6.70 Sol tüpte bulunan 4 no.lu IBO saplamada oluşan aksenal gerilmenin saplama uzunluğunca değişimi.....	125
Şekil 6.71 Tünel kaplamasında (1. tabaka) oluşan aksenal kuvvet	125
Şekil 6.72 Tünel kaplamasında (2. tabaka) oluşan aksenal kuvvet.....	126
Şekil 6.73 Tünel kaplamasında (3. tabaka) oluşan aksenal kuvvet.....	126



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı için önerilen sınıflandırma.....	12
Çizelge 3.2 Sapça tüneli siltaşı kaya örnekleri için tek eksenli basınç dayanım deneyi değerleri.....	13
Çizelge 3.3 Üzülmez tünelleri kumtaşı kaya örnekleri için tek eksenli basınç dayanım deneyi değerleri.....	14
Çizelge 3.4 Üzülmez tünelleri siltaşı kaya örnekleri için tek eksenli basınç dayanım deneyi değerleri.....	15
Çizelge 3.5 Sapça tüneli siltaşı kaya örnekleri için dolaylı çekme dayanımı deneyi değerleri.....	16
Çizelge 3.6 Üzülmez tünelleri kumtaşı kaya örnekleri için dolaylı çekme dayanımı deneyi değerleri.....	17
Çizelge 3.7 Üzülmez tünelleri siltaşı kaya örnekleri için dolaylı çekme dayanımı deneyi değerleri.....	19
Çizelge 3.8 Sapça tüneli için hesaplanan teğetsel young modülü.....	20
Çizelge 3.9 Üzülmez tünelleri için hesaplanan young modülü.....	20
Çizelge 4.1 Jeomekanik Sınıflama Sistemi'nde Kaya Kütleli Puanı'nın (RMR) belirlenmesinde kullanılan değişkenler ve puanları.....	24
Çizelge 4.2 Sapça tüneli için incelenen kesitlerde RMR sınıflama puanları.....	26
Çizelge 4.3 Üzülmez tüneli için incelenen kesitlerde RMR sınıflama puanları.....	27
Çizelge 4.4 Q sisteminin girdi parametreleri ve değerleri.....	29
Çizelge 4.5 Sapça tüneli için incelenen kesitlerde Q sınıflama puanları.....	33
Çizelge 4.6 Üzülmez tüneli için incelenen kesitlerde Q sınıflama puanları.....	34
Çizelge 4.7 Sapça ve Üzülmez tünellerinde kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının hesaplanması için kullanılan eşitlikler.....	35
Çizelge 4.8 Sapça ve Üzülmez Tünellerinde kaya kütlelerinin deformasyon modülünün hesaplanması için kullanılan eşitlikler.....	36
Çizelge 4.9 Sapça tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütleli tek eksenli basınç dayanımı..	37

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.10 Sapça tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi deformasyon modülü.....	37
Çizelge 4.11 Üzülmez Sol Tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı.....	38
Çizelge 4.12 Üzülmez Sağ Tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı.....	38
Çizelge 4.13 Üzülmez Sol Tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi deformasyon modülü.....	39
Çizelge 4.14 Üzülmez Sağ Tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi deformasyon modülü.....	39
Çizelge 4.15 Sapça tüneline incelenen kesitlerde hesaplanan tek eksenli çekme dayanımı, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı.....	40
Çizelge 4.16 Üzülmez sol tüneline incelenen kesitlerde hesaplanan tek eksenli çekme dayanımı, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı.....	40
Çizelge 4.17 Üzülmez sağ tüneline incelenen kesitlerde hesaplanan tek eksenli çekme dayanımı, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı.....	40

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

σ_{ci}	: Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı
F	: Örneğin kırılma yükü
A	: Silindirik örneğin kesit alanı
σ_c	: Tek eksenli basınç dayanımı
σ_{tB}	: Kaya malzemesi örneğinin dolaylı çekme (Brazilian) dayanımı
D	: Deney örneğinin çapı
t	: Brazilian deney örneğinin kalınlığı
E_i	: Kaya malzemesinin Young (elastisite) modülü
σ_L	: Eksenel gerilme
ϵ_L	: Eksenel birim şekil değiştirme
J_a	: Eklem alterasyon sayısı
J_r	: Eklem pürüzlülük sayısı
J_n	: Eklem takımı sayısı
J_w	: Eklem su azaltma faktörü
Q'	: Değiştirilmiş Q
σ_{cm}	: Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı
E_m	: Kaya kütlelerinin Young (elastisite) modülü
γ	: Birim hacim ağırlığı
σ_{tm}	: Kaya kütlelerinin çekme dayanımı
c_i	: Kaya malzemesinin kohezyonu
c_m	: Kaya kütlelerinin kohezyonu
ϕ_i	: Kaya malzemesinin içsel sürtünme açısı
ϕ_m	: Kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı
k	: En büyük yatay birincil gerilme oranı
k_z	: En küçük yatay birincil gerilme oranı

SİMGELER (devam ediyor)

P_h : Yatay birincil gerilme

P_v : Düşey birincil gerilme

KISALTMALAR

GSI : Jeolojik Dayanım İndeksi

ISRM : Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği

KGM : Karayolları Genel Müdürlüğü

NATM : Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi

NGI : Norveç Jeoteknik Enstitüsü

Q : Tünelcilik Niteliği Sınıflama Sistemi

RMR : Kaya Kütle Puanı

RQD : Kaya Kalite Göstergesi

SN : Stone Norfors

SRF : Gerilme Azaltma Faktörü

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bu bölümde yazılan tez konusunun önemi, amacı ve kapsamı sunulacaktır.

1.1 KONUNUN ÖNEMİ

Ülkelerin kalkınma seviyelerinden biri olan karayolları ağı giderek büyümektedir. Zaman zaman karayollarının açılması sırasında arazi topografyasından kaynaklanan problemlerle karşılaşmaktadır. Özellikle arazi topografyasının fazla eğimli olduğu Karadeniz Bölgesinde karayolları ağında güvenli trafiğin sağlanması amacıyla tünel ve viyadük yapımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Zonguldak bölgesinde yapımı devam eden 4 adet tünel ve yakın çevrelerinde projelendirme aşamasında birkaç tünel bulunmaktadır. Tünel çalışmaları kazı ve tahkimat aşamalarından oluşup uygun kazı yöntemleri ve tahkimat sistemlerinin tasarımı proje aşamasında yapılmaktadır. Özellikle proje aşamasında kaya kütlesi özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanmaması tünel kazısı sırasında bazı öngörülmeyen duraysızlık problemlerini oluşturabilmektedir. Ayrıca kazı yöntemlerinin doğru seçilmesi de tünel açma süreleri ve maliyetleri üzerinde olumlu etkileri olacağı kaçınılmazdır (Geniş ve Derin 2016).

1.2 TEZİN AMACI

Ülkemizde başta madencilik, ulaştırma, hidroelektrik santralleri olmak üzere değişik amaçlı yeraltı açıklığı kazıları yapılmaktadır. Özellikle ulaştırma alanının başında metro, karayolu ve demiryolu tünelleri gelmektedir. Zonguldak ilini Ankara'ya bağlayan devlet karayolu güzergahının çift yönlü olması için çalışmalar başlatılmıştır. Bu amaçla yöremizde kazısı biten Sapça 2. tüp tüneli ve Üzülmaz tünellerinin açıldığı geçkide bulunan kaya malzemesi ve kütlesi özelliklerinin belirlenerek söz konusu tünellerin duraylılık değerlendirmelerinin yapılması amaçlanmıştır. Duraylılık açısından sorun oluşturabilecek tünel geçkisi bölgeleri belirlenerek tahkimat gereksinimleri ortaya konacaktır (Geniş ve Derin 2016).

1.3 TEZİN KAPSAMI

Tez kapsamında, Sapça ve Üzülmez tünellerinin ve çalışma alanlarının jeolojisi tanıtılmıştır. Sapça ve Üzülmez tünellerinde belirlenen kesitlerin analizlerinin yapılabilmesi amacıyla tünellerin belirli metrelerinden kaya bloğu örnekleri alınmış ve laboratuvar ortamında deneylere tabi tutulmuştur. Deney sonuçları ve tünel arınlarında yapılan çeşitli kaya sınıflandırmaları, çeşitli yazarların bağıntılarında yerine konularak tünellerin açıldığı kaya kütlelerinin ve young modülünün dayanımının tahminlerinde bulunulmuştur. Elde edilen değerler sayısal çözümlerinde girdi olarak kullanılmış ve tünellerin duraylılık analizleri yapılmıştır.



BÖLÜM 2

ÇALIŞMA YAPILAN TÜNELLERİN VE SAHA JEOLJİSİNİN TANITIMI

Bu bölümde tez çalışmasına konu olan tünellerin konumları, tünellerde analizi yapılmak üzere seçilen kesitler ve analizi yapılan sahaların jeolojisinin tanıtımı yapılacaktır.

2.1 SAPÇA TÜNELİ

Ankara-Zonguldak karayolu istikametinde Zonguldak'a girişteki ilk tünel olan Sapça tüneli 19+959.0-20+602.40 km'leri arasında çift şeritli karayolu projesi kapsamında mevcut olan tünele paralel tünel olarak kazılmıştır (Şekil 2.1).



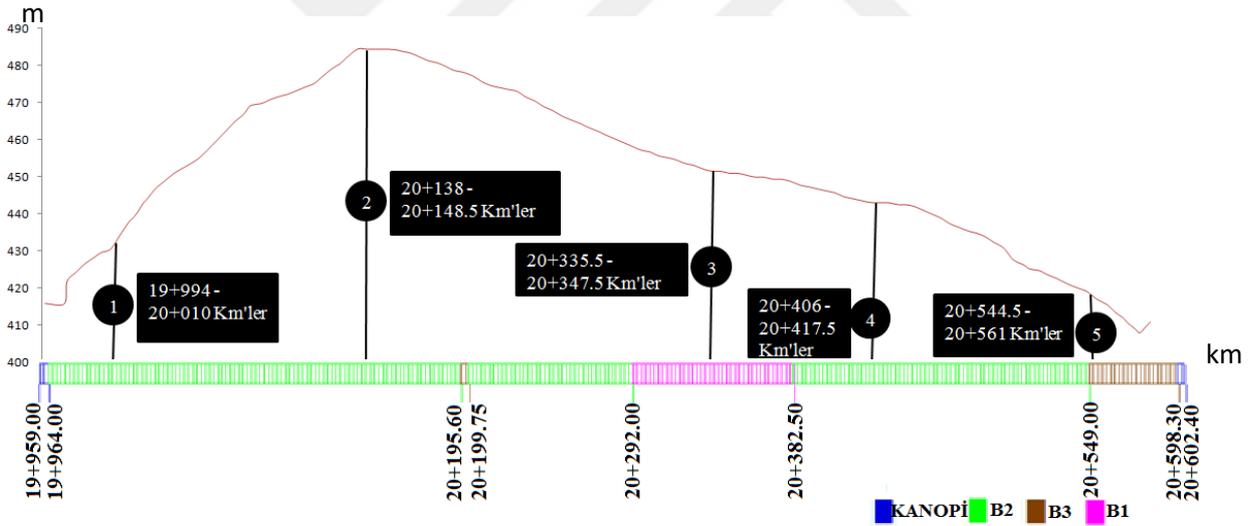
Şekil 2.1 Sapça tüneli Ankara tarafı girişinin görünümü.

Sapça tünelinin konum haritası Şekil 2.2'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.2 Sapça tünelinin konum haritası (Google Earth 2017).

Yapılan analizlerde Sapça tüneli 5 kesitte incelenmiştir. Şekil 2.3'te incelenen kesitler ve tünel boyunca uygulanan kazı tahkimat yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Sapça tüneli incelenen kesitlerin ve uygulanan kazı tahkimat yöntemlerinin gösterimi

Sapça Tüneli güzergâhı ve yakın çevresinde, Alt Kretase yaşlı Kilimli formasyonu yüzeylenmektedir. İnaltı formasyonunun üzerine uyumlu olarak gelen Kilimli formasyonu; kumlu kireçtaşı, kumtaşı, silttaşı, kıltaşı, killi kireçtaşı ve marndan oluşmaktadır. Birimin rengi gri, kurşuni ve sarımsı bej renklidir. Tabakalar ince-orta kalınlıktadır. Sapça tünel güzergâhında Kilimli formasyonunun Sapça üyesi yüzeylenmektedir. Kumtaşı, kıltaşı, silttaşı araldanmasından meydana gelen birimde az miktarda kumlu ve killi kireçtaşı seviyeleri

bulunur. Kumtaşı taneleri kuvars, glokon, metamorfik kaya parçası ve magmatik kaya parçalarından oluşmaktadır. Genellikle gri ve yeşil renklidir (Mega Müh. 2011 a).

2.2 ÜZÜLMEZ TÜNELLERİ

Ankara-Zonguldak istikametinde Zonguldak'a girişteki ikinci tünel olan Üzülmez tünelleri 30+374.00-31+003.70 km'leri arasında çift şeritli karayolu projesi kapsamında çift tünel olarak kazılmıştır. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere çalışma boyunca Ankara'dan geliş yönüne göre sol tarafta kalan tünele Üzülmez Sol Tüneli, sağ tarafta kalan tünele Üzülmez Sağ Tüneli denilecektir.



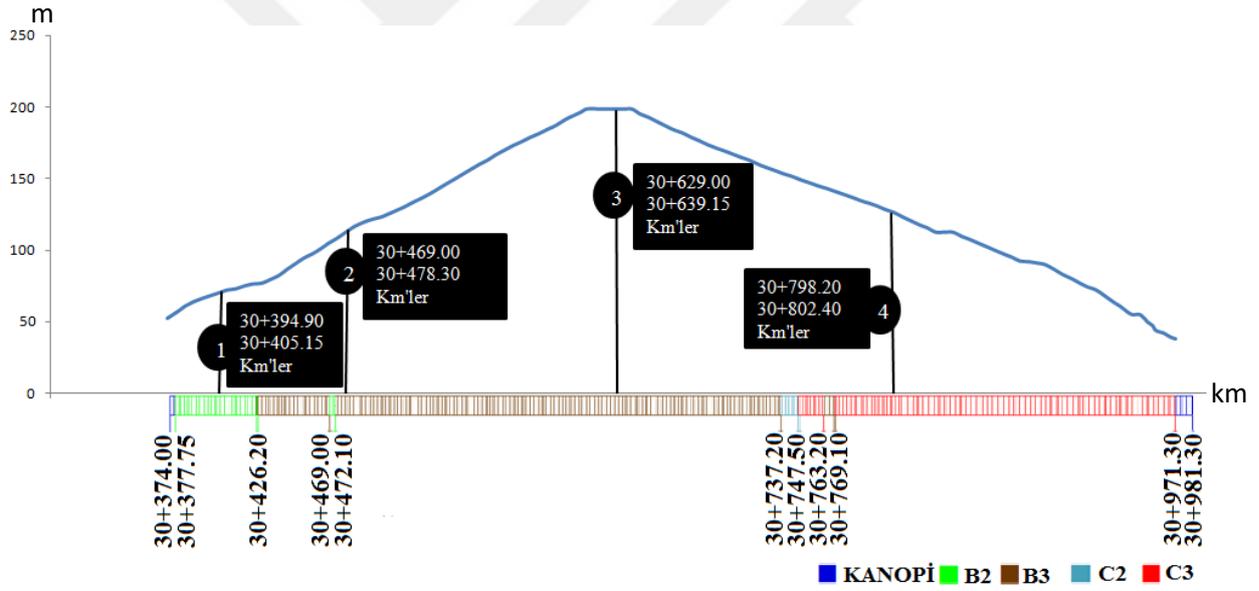
Şekil 2.4 Üzülmez tünellerinin Ankara tarafı girişinin görünümü.

Üzülmez sağ ve sol tünellerinin konum haritası Şekil 2.5'te gösterildiği gibidir.

Üzülmez sol tüneli 30+374.00-30+981.30 km'leri arasında açılmıştır. Yapılan analizlerde incelenen kesitler ve tünel boyunca uygulanan kazı tahkimat yöntemleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

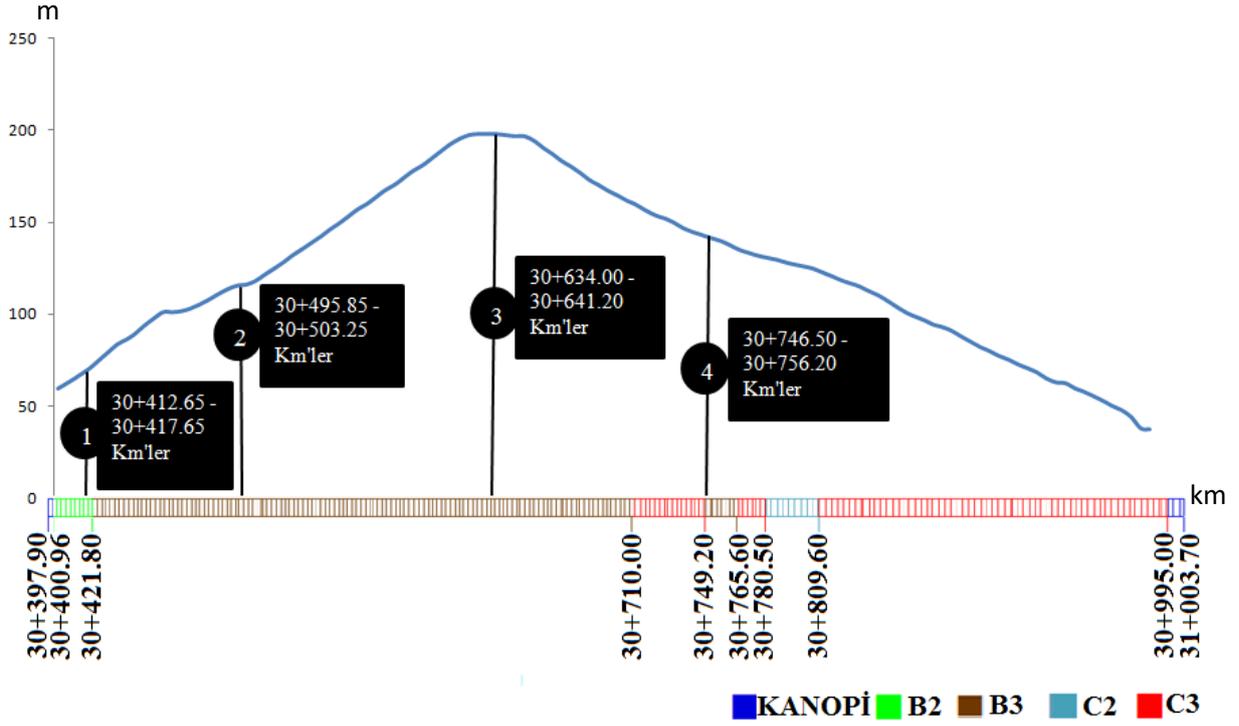


Şekil 2.5 Üzülmaz sağ ve sol tünellerinin konum haritası.



Şekil 2.6 Üzülmaz sol tüneline incelenen kesitlerin ve uygulanan kazı tahkimat yöntemlerinin gösterimi.

Üzülmaz sağ tüneli 30+397.90-31+003.70 km'leri arasında açılmıştır. Yapılan analizlerde incelenen kesitler ve tünel boyunca uygulanan kazı tahkimat yöntemleri Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Üzülmez sağ tüneline ilişkin kesitlerin ve uygulanan kazı tahkimat yöntemlerinin gösterimi.

Üzülmez sol ve sağ tünelleri güzergâh ve yakın çevresinde Karbonifer (Namuriyen) yaşlı Alacağzı formasyonu yüzeylemektedir. Alacağzı formasyonu kömür damarlı şeyl, çamurtaşı ve kumtaşları; yeşil, kirli sarı, siyah renkli, kumtaşı-silttaşı-kiltaşı ardalı olarak oluşmaktadır. Üzülmez dolayında 5 m'ye kadar ulaşan karbonatlı denizel girdiler gözlenmektedir. Birim, sığlaşma ve karasallaşma sürecinin ilk belirtilerini gösterir. Yanal uzanımları fazla olmayan bir özellik gösteren, delta düzlüğü çökelleri olarak izlenmektedir. Alacağzı Formasyonu, Zonguldak ve batısındaki mostralarda tektonik nedenlerle daha aktif alanlarda daha şistli yapıda görülür. Kumtaşları, kilttaşları ve silttaşları genellikle killi-karbonatlı bir çimento ile tutturulmuş olup hava ile temasta birim kolaylıkla dağılmaktadır. Kilttaşı, laminalanma (çok ince katmanlanma) ile 1-3 cm katmanlanma göstermesine karşın, silttaşları 5-20 cm, kumtaşları ise 10 cm ile 2 m arasında değişen tabakalanmalar göstermektedir (Mega Müh. 2011 b).

BÖLÜM 3

LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Ankara-Zonguldak karayolunda açılan Sapça ve Üzülmez Tünellerinin kazısı sırasında birçok kaya bloğu alınmıştır. Bu bölümde kaya malzemelerinin mekanik özellikleri hakkındaki laboratuvar deneyleri ve sonuçları hakkında bilgiler verilecektir.

Araziden alınan kaya bloklarından laboratuvarında, karot alma makinesi kullanılarak NX tipi karotiyer ile karot örnekleri alınmıştır. Karot örnekleri, yapılacak deneylere uygun boyutlarda taş kesme makinesinde kesilmiştir ve karotlara yüzey düzeltme işlemleri uygulanarak Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği (ISRM) tarafından önerilen yöntemlere uygun olarak örnekler hazırlanmış ve kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Sapça tünelinin kazı ilerlemesi tabakaların doğrultu ve eğimine paralellik göstermektedir. Tünelin açıldığı güzergâh boyunca genellikle silttaşı gözlenmiştir. Tünelin Ankara yönünden girişi, 28, 100, 330, 400, 560. m'leri ve çıkışından birçok sayıda kaya bloğu alınmıştır. Sapça tüneline ait karotlar “S” harfi ile belirtilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Sapça tüneline alınarak elde edilen karotların görünümü.

Üzülmez tünelleri, Ankara Zonguldak yönünde açılırken genellikle kumtaşı ve kalınlıkları 10 cm ile 150 cm arasında değişen kömür damarlarından geçtiği gözlemlenmiştir. Ayrıca tünellerin Zonguldak tarafındaki çıkışına doğru silttaşı tabakalarından geçtiği gözlemlenmiştir. Tünelin girişi, 100, 270, 320, 415, 460, 520. m'leri ve çıkışından birçok sayıda kaya bloğu alınmıştır. Üzülmez tüneline ait karotlar “U” harfi ile belirtilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Üzülmez tünellerinden alınan bloklardan elde edilen karotların görünümü.

3.1 TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIM DENEYİ

Bu deney, silindirik şekle sahip kaya malzemesi bloğu örneklerinin dayanımı ve kaya kütlesi sınıflamalarında, ayrıca tasarımda yaygın biçimde kullanılan tek eksenli basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılır (Ulusay vd. 2011).

Deney için yükseklik/çap oranı 2.5–3.0 değerinde ve NX (54 mm) çapa sahip düzgün silindirik biçimli örnekler kullanılmıştır. Deney sırasında örnek üzerine sürekli olarak sabit bir gerilme hızında yük uygulanmıştır. Bu değer, 0.5–1.0 MPa/s olacak şekilde ayarlanmıştır. Sapça tüneline 27 ve Üzülmez tünellerinden 22 tane olmak üzere toplam 49 tane karot için tek eksenli basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneye ilişkin bir görünüm Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonunda kaya bloğunun görünümü.

Deney örneğinin tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilmektedir (ISRM 2007, Ulusay vd. 2001).

$$\sigma_{ci} = F/A \quad (3.1)$$

Burada, σ_{ci} kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), F yenilme anında kaydedilen yük (N) ve A silindirik örneğin kesit alanı (mm^2) olarak tanımlanmıştır.

ISRM (2007) tarafından önerilen tek eksenli basınç dayanımına ilişkin sınıflama Çizelge 3.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.1 Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı için önerilen sınıflandırma (ISRM 2007).

σ_{ci} (MPa)	Dayanım sınıfı
< 6	Çok düşük
6-20	Düşük
20-60	Orta
60-200	Yüksek
> 200	Çok yüksek

Sapça Tüneli için silttaşı örneklerinde yapılan deney sonuçlarına göre, hesaplanan kaya malzemesi dayanımlarından elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı değeri 61.96 ± 22.50 MPa olarak bulunmuştur (Çizelge 3.2).

Sapça Tüneli'nin kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı değeri Çizelge 3.1'den görüleceği üzere ISRM (2007) tarafından önerilen sınıflama sistemine göre orta ile yüksek dayanım sınıfı arasındadır.

Üzülmez Tünelleri güzergâhından alınan kumtaşı blokları için hesaplanan kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı deneyi değeri Çizelge 3.3'te görüldüğü gibidir. Silttaşı için yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları ise Çizelge 3.4'teki gibidir.

Üzülmez tünellerinin dayanımı Çizelge 3.1'den görüleceği üzere ISRM (2007) tarafından önerilen sınıflama sistemine göre orta ile yüksek dayanım sınıfı arasındadır.

3.2 DOLAYLI ÇEKME (BRAZILIAN) DENEYİ

Bu deney, disk şeklinde hazırlanmış kaya örneklerinin çapsal yükleme altında çekilme dayanımlarının dolaylı yoldan tayini amacıyla yapılır. Bu yöntemle, silindirik kaya örneklerinin uçlarından sabitlenerek çekilmesi şeklinde uygulanan doğrudan çekme deneyine göre, genellikle biraz daha yüksek çekme dayanımları elde edilmektedir. Bununla birlikte, örneklerin deneye hazırlanması ve deneyin yapılışı açısından daha pratik olması nedeniyle, dolaylı çekme (brazilian) yöntemi daha yaygın şekilde kullanılmaktadır (Ulusay vd. 2011). Deney yöntemi olarak ISRM (2007) önerdiği yöntemler esas alınmıştır.

Çizelge 3.2 Sapça tüneli silttası kaya örnekleri için tek eksenli basınç dayanım deneyi değerleri.

Örnek No.	Örnek Çapı (mm)	F (kN)	σ_{ci} (MPa)
S4-d1	54	139.5	60.9
S4-d2	54	68.6	29.9
S4-d3	54	146.4	63.9
S4-d4	54	72.1	31.5
S1-d1	54	144.3	63.0
S1-d2	54	115.8	50.6
S1-d3	54	154.0	67.3
S1-d4	54	113.8	49.7
S2-d1	54	116.2	50.7
S2-d2	54	103.0	45.0
S2-d3	54	128.5	56.1
S2-d4	54	129.3	56.5
S3-d1	54	181.5	79.2
S3-d2	54	132.9	58.0
S3-d3	54	139.1	60.7
S5-d1	54	64.4	28.1
S5-d2	54	152.1	66.4
S6-d3	54	215.6	94.0
S7-d1	54	162.3	70.9
S7-d2	54	107.6	47.0
S8-d1	54	242.6	105.9
S8-d2	54	194.4	84.9
S9-d2	54	141.3	61.7
S9-d3	54	193.5	84.5
S9-d4	54	182.1	79.6
S9-d5	54	149.4	71.6
SÇ-d1	54	275.4	120.3
Ortalama:		141.9	62.0
Standart sapma:		±22.50	

Bu deneyde, NX tipi karot çaplı ve boyu yaklaşık olarak yarıçapa eşit örnekler ile yükleme çeneleri kullanılmıştır. Yükleme çeneleri, disk şeklindeki örneğin yanal yüzeyine karşılıklı olarak alt ve üstten yaklaşık 10°'lik bir yay boyunca yük uygulamaya uygun olmalıdır. Örnekler, 200 N/s yükleme hızında yüklenmiştir. Deney esnasından bir görünüm Şekil 3.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 Üzülmez tünelleri kumtaşı kaya örnekleri için tek eksenli basınç dayanım deneyi değerleri.

Örnek No.	Örnek Çapı (mm)	F (kN)	σ_{ci} (MPa)
U1-d1	54	275.7	120.4
U1-d2	54	119.2	52.1
U2-d1	54	212.8	92.9
U4-d1	54	130.5	57.0
U4-d2	54	179.4	78.3
U4-d3	54	157.4	68.7
U5-d2	54	115.9	50.6
U5-d3	54	229.8	100.4
U6-d1	54	123.9	54.1
U7-d1	54	189.8	82.9
U7-d3	54	122.5	53.5
U7-d4	54	29.2	12.7
U9-d1	54	147.0	64.2
U9-d2	54	118.0	51.5
UÇ1-d1	54	130.0	56.8
UÇ1-d2	54	179.0	78.2
UÇ1-d3	54	135.0	59.0
Ortalama:		152.6	66.7
Standart sapma:		±24.29	

Deney örneğinin dolaylı çekme dayanımı aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilmektedir (ISRM 2007).

$$\sigma_{tB} = 0.636 \frac{F}{D*t} \quad (3.2)$$

Burada, σ_{tB} kaya malzemesi örneğinin dolaylı çekme dayanımı (MPa), F örneğin kırılma yükü (N), D örneğin çapı (mm), t örneğin kalınlığı (mm) olarak tanımlanmıştır.

Sapça tüneline alınan kaya bloklarından hazırlanan 34 tane kaya örneği için dolaylı çekme dayanımı deneyi yapılmıştır. Hesaplanan kaya malzemesi dolaylı çekme dayanımlarından elde edilen ortalama dolaylı çekme dayanımı değeri 7.35 ± 3.38 MPa olarak bulunmuştur. Sapça tüneli siltaşı kaya birimi örneklerine ait dolaylı çekme dayanımı değerleri Çizelge 3.5'te sunulmuştur .

Çizelge 3.4 Üzülmez tünelleri silttaşı kaya örnekleri için tek eksenli basınç dayanım deneyi değerleri.

Örnek No.	Örnek Çapı (mm)	F (kN)	σ_{ci} (MPa)
U8-d1	54	232.0	101.3
U8-d2	54	266.0	116.2
UÇ2-d1	54	144.0	62.9
UÇ2-d2	54	172.0	75.1
UÇ2-d3	54	124.0	54.1
Ortalama:		187.6	81.9
Standart sapma:		±26.12	



Şekil 3.4 Dolaylı çekme dayanımı deneyinden bir görünüm.

Üzülmez tünellerinden alınan kaya bloklarından hazırlanan 33 tane kumtaşı ve 9 tane silttaşı kaya örneği için dolaylı çekme dayanımı deneyi yapılmıştır. Üzülmez tünelleri kum taşı kaya örnekleri için hesaplanan çekme gerilme değerleri Çizelge 3.6'da ve silttaşı kaya örnekleri için hesaplanan çekme gerilme değerleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Sapça Tüneli silttaşlı kaya örnekleri için dolaylı çekme dayanımı deneyi değerleri.

Örnek No.	Çap, D (mm)	Kalınlık, t (mm)	F (kN)	σ_{tB} (MPa)
S4-b1	54	35.40	27	8.98
S4-b2	54	36.20	25	8.13
S4-b3	54	28.55	13	5.36
S4-b4	54	27.25	14	6.05
S2-b1	54	27.35	10	4.31
S2-b2	54	30.15	11	4.30
S2-b3	54	30.95	30	11.42
S2-b4	54	29.40	20	8.01
S2-b5	54	28.15	35	14.64
S3-b1	54	29.10	25	10.12
S3-b2	54	29.15	15	6.06
S3-b3	54	29.30	10	4.02
S3-b4	54	27.60	13	5.55
S5-b1	54	31.50	10	3.74
S5-b2	54	33.35	11	3.88
S5-b3	54	28.65	30	12.33
S5-b4	54	36.40	20	6.47
S5-b5	54	31.65	35	13.02
S6-b1	54	31.20	23	8.68
S6-b2	54	35.05	17	5.71
S6-b3	54	37.35	24	7.57
S6-b4	54	33.85	19	6.61
S6-b5	54	33.75	23	8.03
S8-b1	54	30.25	25	9.73
S8-b2	54	33.45	14	4.93
S8-b3	54	29.60	15	5.97
S9-b1	54	27.95	9	3.79
S9-b2	54	34.25	6	2.06
S9-b3	54	34.30	21	7.21
S9-b4	54	35.80	8	2.63
S9-b5	54	32.55	14	5.07
SÇ-b1	54	36.15	42	13.68
SÇ-b2	54	33.10	37	13.17
SÇ-b3	54	36.20	33	10.74
Ortalama.				7.35
Standart sapma:				±3.38

Çizelge 3.6 Üzülmez tünelleri kumtaşı kaya örnekleri için dolaylı çekme dayanımı deneyi değerleri.

Örnek No.	Çap, D (mm)	Kalınlık, t (mm)	F (kN)	σ_{tB} (MPa)
U1-b1	54	40.00	34	10.01
U1-b2	54	35.80	35	11.51
U1-b3	54	35.10	33	11.07
U1-b4	54	37.15	35	11.10
U2-b1	54	36.95	30	9.56
U2-b2	54	35.05	24	8.06
U2-b3	54	32.55	15	5.43
U2-b4	54	32.70	17	6.12
U4-b1	54	27.70	15	6.38
U4-b2	54	34.70	35	11.88
U4-b3	54	31.00	29	11.02
U4-b4	54	30.20	25	9.75
U4-b5	54	33.45	40	14.08
U5-b1	54	28.05	31	13.02
U5-b2	54	35.00	40	13.46
U5-b3	54	36.55	43	13.86
U5-b4	54	38.45	27	8.27
U6-b1	54	34.70	50	16.97
U6-b2	54	29.90	3	1.18
U6-b3	54	37.15	4	1.27
U6-b4	54	28.15	33	13.81
U7-b1	54	33.60	35	12.27
U7-b2	54	33.85	27	9.39
U7-b3	54	35.95	41	13.43
U7-b4	54	43.25	28	7.62
U9-b1	54	32.80	19	6.82
U9-b2	54	30.30	16	6.22
U9-b3	54	30.20	16	6.24
U9-b4	54	29.95	15	5.90
U9-b5	54	32.15	27	9.89
UÇ1-b1	54	33.35	20	7.06
UÇ1-b2	54	30.95	19	7.23
UÇ1-b3	54	29.05	21	8.51
Ortalama				9.3
Standart sapma:				±3.61

Çizelge 3.7 Üzülmez tünelleri siltaşı kaya örnekleri için dolaylı çekme dayanımı deneyi değerleri.

Örnek No.	Çap, D (mm)	Kalınlık, t (mm)	F (kN)	σ_{tB} (MPa)
U8-b1	54	30.55	29	11.18
U8-b2	54	31.25	26	9.80
U8-b3	54	31.40	29	10.88
U8-b4	54	29.20	25	10.08
UÇ2-b1	54	29.15	36	14.55
UÇ2-b2	54	29.85	20	7.89
UÇ2-b3	54	28.80	22	9.00
UÇ2-b4	54	28.50	40	16.53
UÇ2-b5	54	30.90	20	7.62
Ortalama				10.8
Standart sapma:				±2.97

3.3 STATİK ELASTİK SABİTLER DENEYİ

Bu deney, silindirik şekle sahip sağlam kaya karot örneklerinin tek eksenli yükleme koşulunda “gerilme-birim deformasyon” eğrilerinin çizilmesi ve Young modülü ile Poisson oranının belirlenmesi amacıyla yapılır (Şekil 3.5) (Ulusay vd. 2011).



Şekil 3.5 Statik elastik sabitler deneyinden bir görünüm.

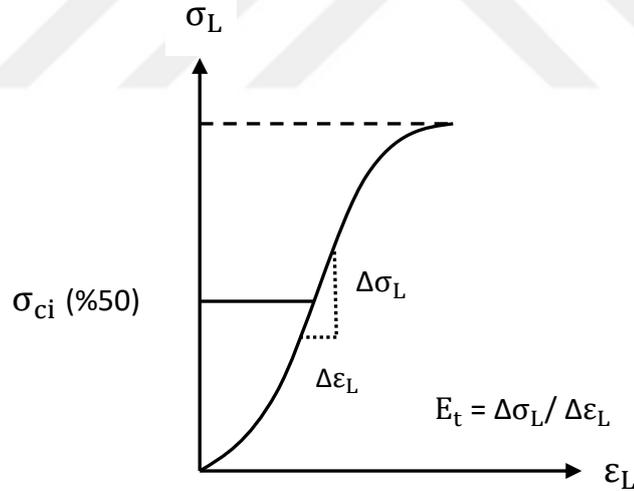
Silindirik kaya örneğine uygulanan yük, örnek üzerinde sabit bir gerilme artışı yaratacak şekilde olmalıdır. Yenilme, 5-10 dakikalık bir yükleme süresince veya yükleme 0.5-1.0 MPa/s hızı seviyesinde olmalıdır.

$$E_i = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L} \quad (3.3)$$

Burada kaya malzemesinin, Young modülü E_i , tek eksenli gerilme σ_L , eksenel birim şekil değiştirme ε_L oranı olarak ifade edilmektedir (Gerçek 2005).

Eksenel Young modülü, eksenel gerilme artışının neden olduğu eksenel birim şekil değiştirme artışına oranı olup literatürde dört farklı Young modülü (elastisite modülü) tanımlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda hesaplamalar teğetsel young modülüne göre yapılmıştır.

Teğetsel (Tanjant) Young modülü (E_t): σ_L - ε_L eğrisinin belirli bir gerilme seviyesindeki eğimidir. Bu gerilme seviyesi genellikle tek eksenli basınç dayanımının yaklaşık %50'sidir (Şekil 3.6) (Gerçek 2005).



Şekil 3.6 Teğetsel Young modülünün hesaplanması (Gerçek 2005).

Sapça tünelinin geçtiği silttaşlı biriminden alınan 6 tane karot örneğine uygulanan statik elastik sabitler deneyine göre hesaplanan teğetsel young modülü değerleri Çizelge 3.8'de verilmiştir. Hesaplanan kaya malzemesi teğetsel young modülü değerlerine göre elde edilen ortalama teğetsel young modülü değeri 18.36 ± 9.26 GPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.8 Sapça tüneli için hesaplanan teğetsel young modülü.

Örnek No:	E_i (GPa)
S4-d4	13.842
S3-d4	14.670
S5-d4	19.947
S6-d2	25.000
S9-d5	10.417
SÇ-d2	35.677
Ortalama	18.36
Standart sapma	±9.26

Üzülmez tünellerinin geçtiği kumtaşı ve silttaşı biriminden alınan 6 tane karot örneğine uygulanan statik elastik sabitler deneyine göre hesaplanan teğetsel young modülü değerleri aşağıda verilmiştir. Hesaplanan kaya malzemesi teğetsel young modülü değerlerine göre elde edilen ortalama teğetsel young modülü değeri 17.41 ± 2.78 GPa olarak bulunmuştur (Çizelge 3.9).

Çizelge 3.9 Üzülmez tünelleri için hesaplanan young modülü.

Örnek No:	E_i (GPa)
U1-d3	17.295
U4-d4	22.703
U5-d4	20.822
U8-d4	16.150
UC1-d4	16.125
UC2-d4	16.671
Ortalama	17.41
Standart sapma	±2.78

BÖLÜM 4

KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri, mühendislik tasarımının doğrudan yapılmasını sağlayacak bir yöntem olarak düşünülmemelidir. Bu sistemler, son tasarımın yapılabilmesi için tasarım hedefleri ve sahanın jeolojisi de dikkate alınarak, gözleme dayanan, analitik ve nümerik çözümlene teknikleriyle birlikte kullanılmalıdır. Bu sistemler doğru bir şekilde kullanıldıkları zaman ön tasarımda yararlı birer araç olabilmektedir (Ulusay 2010).

Ankara-Zonguldak karayolunda açılan Sapça ve Üzülmüş tünellerinde kaya kütlelerinin özelliklerini belirlemek için Jeomekanik Sınıflama Sistemi (RMR) (Bieniawski 1989) ve Tünelcilik Niteliği Sınıflama Sistemi (Q) (Barton vd. 1974) sistemleri kullanılmıştır (Geniş ve Derin 2016).

Kaya malzemesi; kaya kütlelerinde eklem, tabakalanma, şistozite, fay vb. gibi doğal süreksizliklerin arasında kalan ve malzemenin çekme dayanımının azalmasına neden olabilecek herhangi bir kırık veya zayıflık düzlemi içermeyen değişik boyutlardaki kaya parçalarıdır. Kaya malzemesinde bazen mikro kırıklar bulunmakla birlikte, bunlar süreksizlik veya kırık olarak göz önünde bulundurulmazlar. Bu kaya parçaları, birkaç milimetreden metrelerce uzunluğa kadar olabilirler ve genellikle bunların tüm doğrultular boyunca özdeş olarak davrandıkları kabul edilir (Ulusay ve Sönmez 2007).

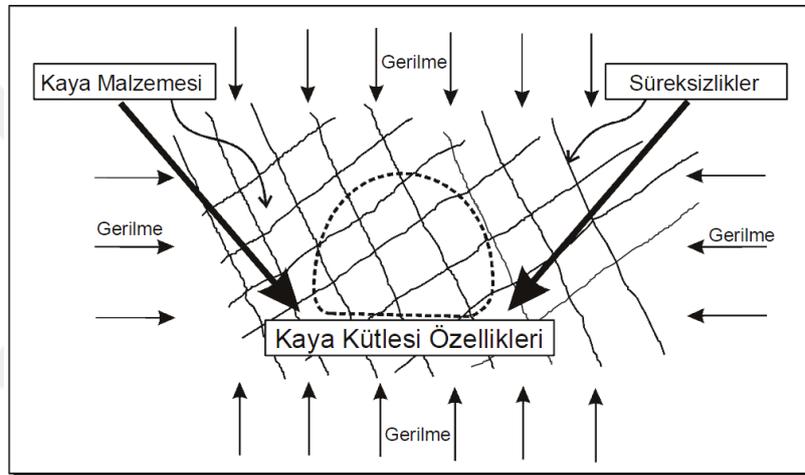
Süreksizlik; kaya kütlelerinde çekme dayanımına sahip olmayan veya çok düşük çekme dayanımına sahip tabakalanma düzlemi, eklem, fay, makaslama zonu, dilinim vb. gibi jeolojik anlamda zayıflık düzlemlerinin tümünü içeren genel bir kavramdır. Bu kavram, süreksizliğin yaşı, geometrisi ve kökeni gibi hususları içermez. Bununla birlikte, bazı durumlarda jeolojik kökenli doğal süreksizlikler ile sondaj, patlatma ve kazı gibi işlemler sırasında oluşturulan yapay süreksizliklerin ayırt edilmesi önem taşır (Ulusay ve Sönmez 2007).

Süreksizliklerin özellikleri, konumları ve yönelimleri kaya kütlelerinin deformasyon, dayanım, geçirgenlik vb. gibi özelliklerini, dolayısıyla kaya mühendisliği uygulamalarını

önemli derecede etkiler. Süreksizliklerin üç boyutlu karmaşık yapısı, süreksizlik ağı veya kaya yapısı olarak adlandırılır (Ulusay ve Sönmez 2007, Geniş ve Derin'den 2016).

Kaya kütlesi, süreksizlik ağı ile kaya malzemesinin birlikte oluşturdukları kütle veya sistemdir. Kaya kütlelerinde süreksizliklerle sınırlanan kaya malzemesi blokları, taze kaya malzemesinden bozunmuş (ayrışmış) kayaya kadar değişik özellik sergileyebilir. Kaya kütlelerinin belirli gerilme altındaki davranışı, genellikle kaya malzemesine ait bloklar ile süreksizlikler arasındaki etkileşim tarafından denetlenir (Ulusay ve Sönmez 2007, Geniş ve Derin'den 2016).

Kaya malzemesi, süreksizlikler ve kaya kütlesi arasındaki ilişki, Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

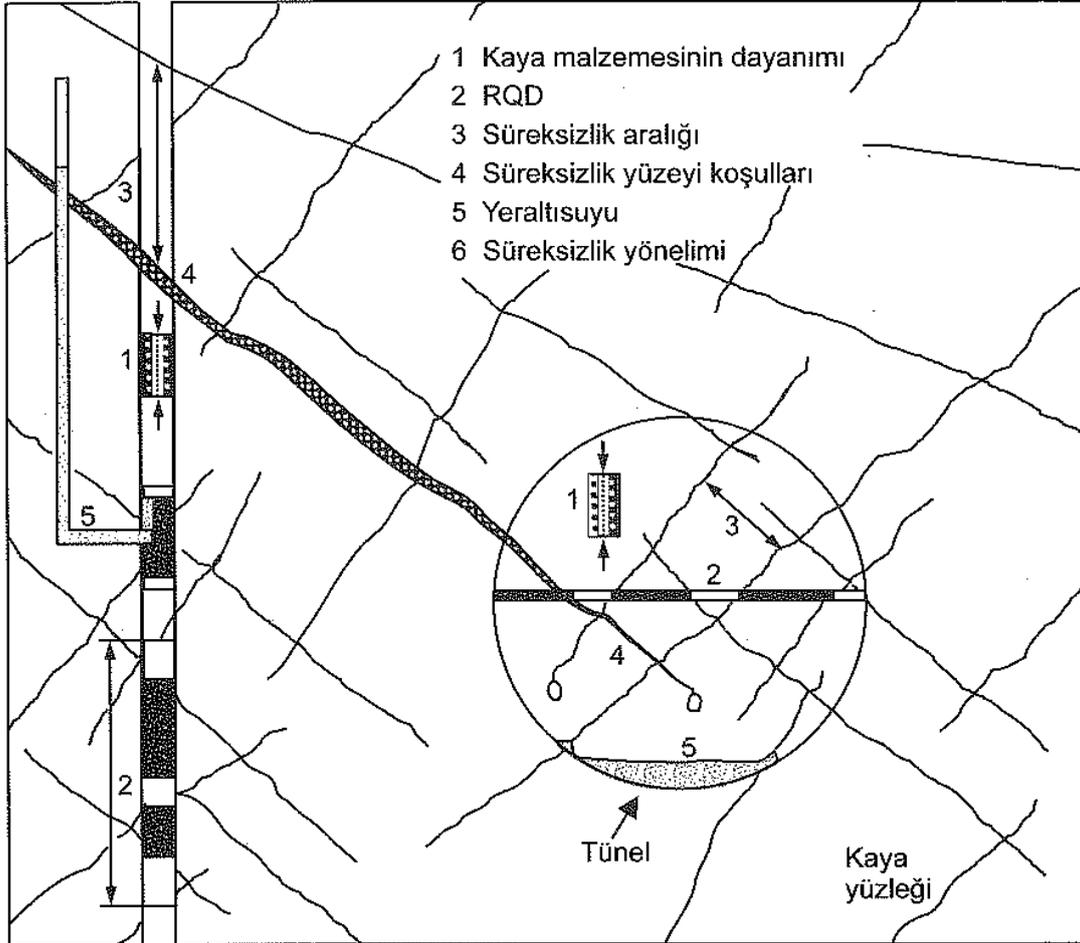


Şekil 4.1 Kaya malzemesi, süreksizlik ve kaya kütlesi kavramlarını tanımlayan şematik kesit (Hudson 1989; Ulusay ve Sönmez'den 2007).

4.1 JEOMEKANİK SINIFLAMA SİSTEMİ (RMR)

Jeomekanik Sınıflama Sistemi, Bienawski tarafından 1972-1973 yılları arasında geliştirilmiştir (Bienawski 1973; Ulusay'dan 2010). Sistem, 1973'ten 1989 yılına kadar yeni verilerle desteklenerek bazı değişikliklere uğramış ve son şeklini 1989 yılında almıştır (Bienawski 1989; Ulusay'dan 2010). Tüneller, büyük yeraltı açıklıkları (odalar), maden işletmeleri, şevler ve temellerle ilgili birden çok değişik uygulamadan derlenen verilerin ve yapılan gözlemlerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi, yöntemin bugünkü şeklini almasında en önemli araçlar olmuştur (Ulusay 2010).

RMR sistemine göre kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında aşağıda belirtilen 6 parametre esas alınmaktadır (Şekil 4.2) (Ulusay 2010). Bunlar: kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı, RQD, süreksizliğin aralığı, süreksizliğin durumu (devamlılık, pürüzlülük, dolgu, açıklık), yeraltı suyu koşulları, süreksizliğin yönelimidir.



Şekil 4.2 RMR kaya kütlesi puanlama sisteminde kullanılan parametreler (Hudson 1989; Ulusay'dan 2010).

Sistemin uygulanması aşamaları:

- Geçki boyunca kaya kütlesi “yapısal bölge”lere ayrılır.
- Her bir yapısal bölge için, 6 değişirge belirlendikten sonra veri toplama formuna işlenir.
- Jeomekanik Sınıflama Sistemi puanlama çizelgeleri veya grafikleri kullanılarak ilk 5 değişkenin puanları tayin edilir. Bunların toplamına “Temel RMR” denilmektedir (Bieniawski 1989; Gerçek'ten 2000).

Bieniawski tarafından 1989 yılında önerilen jeomekanik sınıflama sisteminin (RMR) şematik gösterimi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Jeomekanik Sınıflama Sistemi'nde Kaya Kütlesi Puanı'nın (RMR) belirlenmesinde kullanılan değişkenler ve puanları (Bieniawski 1989, Gerçek'ten 2000).

a) Sınıflama değişkenleri ve puanları.

DEĞİŞTİRGE			DEĞER ARALIKLARI VEYA TANIMLAR						
1	Sağlam Kaya Malzemesinin Dayanımı (MPa)	Nokta yükü dayanım indeksi	>10	4-10	2-4	1-2	Daha düşük aralık için tek eksenli basınç dayanımı deneyi önerilir		
		Tek eksenli basınç dayanımı	>250	100-250	50-100	25-50	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Puan	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD Kaya Niteliği Göstergesi		% 90-100	% 75 – 90	% 50 – 75	% 25 – 50	< % 25		
	Puan		20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik aralığı		> 200 cm	60-200 cm	20-60 cm	6-20 cm	< 6 cm		
	Puan		20	15	10	8	5		
4	Süreksizliklerin durumu		Çok pürüzlü yüzeyler	Hafifçe pürüzlü yüzeyler	Hafifçe pürüzlü yüzeyler	Kaygan yüzeyler veya	Ayrılma >5 mm veya 5 mm'den kalın ve yumuşak fay dolgusu Devamlı		
			Ayrılma yok	Ayrılma	Ayrılma	Ayrılma: 1-5 mm veya			
			Bozunmamış	< 1 mm	< 1 mm	5 mm'den ince fay dolgusu			
Puan		30	25	20	10	0			
5	Yeraltı Suyu Durumu	Tünelin 10 mm'lik kısmına gelen su miktarı	Yok	< 10 lt	10 – 25 lt	25-125 lt	> 125 lt		
		Ekleme suyu basıncı / Büyük asal gerilme oranı	Veya 0	Veya < 0.1	Veya 0.1 – 0.2	Veya 0.2 -0.5	Veya > 0.5		
		Genel durum	Veya Tamamen kuru	Veya Nemli	Veya Islak	Veya Damlama	Veya Akan su		
	Puan		15	10	7	4	0		

Çizelge 4.1 (devam ediyor).

b) Süreksizliklerin durumunun detaylı olarak puanlandırılması.

DEĞİŞTİRGE		DEĞER ARALIKLARI VEYA TANIMLAR				
4.a	Süreksizliklerin Boyu (Devamlılık)	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
	Puan	6	4	2	1	0
4.b	Süreksizlik Yüzeylerinin Ayrılması (Açıklık)	Yok	< 0.1 mm	0.1-1 mm	1–5 mm	> 5 mm
	Puan	6	5	4	1	0
4.c	Süreksizlik Yüzeylerinin Pürüzlülüğü	Çok Pürüzlü	Pürüzlü	Hafifçe Pürüzlü	Düz	Kaygan
	Puan	6	5	3	1	0
4.d	Süreksizlik Dolgusu	Yok	Kıatı Dolgu		Yumuşak Dolgu	
			< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
	Puan	6	4	2	2	0
4.e	Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunması (Ayrışması)	Bozunmamış	Hafifçe Bozunmuş	Orta Derece Bozunmuş	Çok Bozunmuş	Tamamen Ayrışmış
	Puan	6	5	3	1	0

Sapça ve Üzölmez Tünellerinde incelenen kesitlerde elastiste (Young) modülü hesabı için “Temel RMR” hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar Sapça Tüneli için Çizelge 4.2 ve Üzölmez Tünelleri için Çizelge 4.3'de hesaplamalar verilmiştir.

Çizelge 4.2 Sapça tüneli için incelenen kesitlerde RMR sınıflama puanları.

		1. KESİT		2. KESİT		3. KESİT		4. KESİT		5. KESİT	
		19+994-20+010 Km'ler arası		20+138-20+148.5 Km'leri Arası		20+332.5 - 20+347.5 Km'ler arası		20+406 - 20+417.40 Km'ler arası		20+544.50 - 20+561 Km'ler arası	
A.Sınıflama değişkenleri ve puanları											
1	Kayacın Tek Eksenli Basınç Dayanımı (σ_c)	46,55 - 62,85		46,55 - 62,85		46,55 - 62,85		58.93	95.41	58.93	95.41
	Puan	5.4	6.7	5.4	6.7	5.4	6.7	6.4	9.2	6.4	9.2
2	Kayaç Kalite Göstergesi, RQD	%68.8 - %78.7		%58,9 - %65,5		%29,2 - %62,2		%49 - %52.3		%25,9 - %32,5	
	Puan	13.7	15.7	11.7	13	6.7	12.4	10	10.5	6	7
3	Süreksizlik Aralığı	6-20 cm	20-60 cm	6-20 cm	20-60 cm	<6 cm	6-20 cm	<6 cm	6-20 cm	<6 cm	6-20 cm
	Puan	8	10	8	10	5	8	5	8	5	8
4	Yeraltı Suyu	10-25 lt	<10 lt	<10 lt		<10 lt	0 lt	<10 lt		<10 lt	
	Puan	7	10	10		10	15	10		10	
B. Süreksizliklerin durumunun puanlandırılması											
Süreksizliğin uzunluğu (devamlılığı)		3-10 m	1-3 m	3-10 m	1-3 m	1-3		1-3		1-3 m	
Puan		2	4	2	4	4		4		4	
Süreksizlik Açıklığı		1-5 mm		>5 mm	0.1-1 mm	1-5	0.1-1 mm	1-5		1-5 mm	
Puan		1		0	4	1	4	1		1	
Pürüzlülük		Hafifçe Pürüzlü	Pürüzlü	Pürüzlü		Düz	Pürüzlü	Düz	Pürüzlü	Pürüzlü	
Puan		3	5	5		1	5	1	5	5	
Dolgu		Yumuşak D. (<5 mm)	Katı D. (<5 mm)	Yumuşak D. (<5 mm)	Katı D. (<5 mm)	Yumuşak D. (<5 mm)	Katı D. (<5 mm)	Yumuşak D. (<5 mm)	Katı D. (<5 mm)	Katı D. (<5 mm)	
Puan		2	4	2	4	2	4	2	4	4	
Bozunma		Orta derecede ayrılmış	Hafifçe bozunmuş	Orta derecede ayrılmış	Hafifçe bozunmuş	Hafifçe Bozunmuş		Orta derecede bozunmuş	Hafifçe bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Hafifçe bozunmuş
Puan		3	5	3	5	5		3	5	3	5
Temel RMR(min):		45.1		47.1		40.1		42.4		44.4	
Temel RMR(max):		60.4		56.7		64.1		56.7		53.2	
Temel RMR (ortalama):		52.8		51.9		52.1		49.55		48.8	

Çizelge 4.3 Üzülmez tüneli için incelenen kesitlerde RMR sınıflama puanları.

		1. Kesit		2. Kesit		3. Kesit		4. Kesit	
		30+412.65 ile 30+417.65 Km'ler Arası		30+495.85 ile 30+503.25 Km'ler Arası		30+634.00 ile 30+641.20 Arası		30+746.50 ile 30+756.20 Km'ler Arası	
A.Sınıflama değişkenleri ve puanları									
1	Kayacın Tek Eksenli Basınç Dayanımı (σ_c)	74.23	92.91	74.23	92.91	74.23	92.91	57.85	75.47
	Puan	7.7	9.1	7.7	9.1	7.7	9.1	6.4	7.8
2	Kayaç Kalite Göstergesi, RQD	35.8	49.0	22.6	32.5	22.6	32.5	12.7	29.2
	Puan	7.6	9.9	5.7	7.0	5.7	7.0	4.4	6.8
3	Süreksizlik Aralığı	6-20 cm	20-60 cm	6-20 cm	20-60 cm	<6 cm	6-20 cm	<6 cm	6-20 cm
	Puan	8	10	8	10	5	8	5	8
4	Yeraltı Suyu	<10 lt	10-25 lt	10-25 lt	<10 lt	10-25 lt	<10 lt	<10 lt	
	Puan	10	7	7	10	7	10	10	
B. Süreksizliklerin durumunun puanlandırılması									
Süreksizliğin uzunluğu (devamlılığı)		3-10 m	1-3 m	3-10 m	1-3 m	3-10 m	1-3 m	1-3 m	
Puan		2	4	2	4	2	4	4	
Süreksizlik Açıklığı		> 5 mm	1-5 mm	> 5 mm	1-5 mm	1-5 mm		> 5 mm	1-5 mm
Puan		0	1	0	1	1		0	1
Pürüzlülük		Düz	Pürüzlü	Düz	Hafifçe Pürüzlü	Hafifçe Pürüzlü	Çok Pürüzlü	Pürüzlü	
Puan		1	5	1	3	3	6	5	
Dolgu		Yumuşak D. (>5 mm)	Yumuşak D. (<5 mm)	Yumuşak D. (>5 mm)	Yumuşak D. (<5 mm)	Yumuşak D. (<5 mm)		Yumuşak D. (>5 mm)	Yumuşak D. (<5 mm)
Puan		0	2	0	2	2		0	2
Bozunma		Çok Bozunmuş		Çok Bozunmuş		Çok Bozunmuş	Orta Derecede Bozunmuş	Çok Bozunmuş	Orta Derecede Bozunmuş
Puan		1		1		1	3	1	3
Temel RMR (min):		37.3		32.4		34.4		35.8	
Temel RMR (max):		49.0		47.1		50.1		47.6	
Temel RMR (ortalama):		43.2		39.8		42.3		41.7	

4.2 TÜNELCİLİK NİTELİĞİ SINIFLAMA SİSTEMİ (Q)

Q veya NGI (Norwegian Geotechnical Institute-Norveç Jeoteknik Enstitüsü) sistemi olarak bilinen bu sistem, Barton et al. tarafından 1974 yılında geliştirilmiştir. Sistem uzun yıllar kullanıldıktan sonra, sistemin destek türlerinin seçimine yönelik bölümü Grimstad ve Barton tarafından 1993 yılında yeniden düzenlenmiştir (Ulusay 2010).

Kaya tünelcilik kalitesi Q, birbirinden bağımsız 6 parametrenin fonksiyonu olarak aşağıdaki ifadeden hesaplanmaktadır (Ulusay ve Sönmez 2007).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (4.1)$$

Burada: RQD, kaya kalite göstergesi; J_n , eklem takımı sayısı; J_r , eklem pürüzlülük sayısı; J_a , eklem alterasyon sayısı; J_w , eklem su azaltma faktörü; SRF, gerilme azaltma faktörüdür.

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.1'de, "RQD/ J_n " kaya kütlelerinin yapısını ve blok boyutunu, " J_r/J_a " dolgu veya dolgusuz süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük ve süreksizlik karakteristiklerini dolayısıyla makaslama dayanımını ve " J_w/SRF " etkin gerilme koşullarını ifade etmektedir. Bu sistem, mevcut tünellerden elde edilen 1000'den fazla olaya ait tecrübeler esas alınarak geliştirilmiştir. Gerilme azaltma faktörü (SRF) ile ilgili olarak, Grimstad ve Barton (1993), Barton ve Grimstad (1994) tarafından gerçekleştirilen bir değişiklik dışında; Q sistemi önemli bir değişikliğe maruz kalmamıştır (Ulusay ve Sönmez 2007). Eşitlik 4.2'de "Q" değiştirilmiş Q'yu ifade etmektedir.

Q sınıflama sisteminde kullanılan parametreler aşağıdaki Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Sapça ve Üzülmez Tünellerinde her bölge için Çizelge 4.4'te okunan parametreler Eşitlik 4.1'de yerine konularak Q sınıflama sistemi değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar Sapça Tüneli için Çizelge 4.5'te, Üzülmez Tünelleri için Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.4 Q sisteminin girdi parametreleri ve değerleri (Barton vd. 1974 ve Barton 2000, Ulusay ve Sönmez 2007'den).

1. RQD (%)	KAYA KALİTE GÖSTERGESİ TANIMI
0-25 25-50 50-75 75-90 90-100	A. Çok zayıf B. Zayıf C. Orta D. İyi E. Çok iyi (mükemmel)
Not: (1) RQD<10 (0 dahil) ise Q'nun hesaplanmasında RQD için 10 gibi nominal bir değer kullanılır. RQD için 100, 95, 90... vb. gibi 5'lik aralıklar yeterlidir.	
2. EKLEM TAKIMI SAYISI	(J_n)
A. Masif, eklem çok az veya hiç yok	0.5-1.0
B. Bir eklem takımı	2
C. Bir takımı ve gelişigüzel eklemeler	3
D. İki eklem takımı	4
E. İki eklem takımı ve 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
I. Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20
Not: (2) Arakesitler (kesişen tüneller) için (3.0 x J _n) kullanılır. (3) Tünel girişleri için (2.0 x J _n)	
3. EKLEM PÜRÜZLÜLÜK SAYISI	(J_r)
(a) Süreksizlik-kaya dokanağı ve (b) 10 cm'lik bir makaslamadan önceki süreksizlik-kaya dokanağı	
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
Not: (4) Bu sıralamada tanımlamalar, küçük ve ara ölçekli özellikleri göstermektedir.	
(c) Makaslanmış kesimde süreksizlik-kaya dokanağı yok	
H. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon	1.0
I. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıktaki kumlu, çakıllı ya da parçalanmış zon	1.0

Çizelge 4.4 (devam ediyor).

<p>Not: (5) İlgili eklem takımının ortalama aralığı 3 m'den büyük ise, J_r'ye 1.0 eklenebilir. (6) Çizgiselliklerin en düşük dayanımı verecek şekilde yönlendirilmesi koşuluyla, çizgisellik içeren düzlemsel ve kaygan süreksizlik yüzeyleri için $J_r = 0.5$ alınabilir. (7) J_r ve J_a sınıflaması, yönelim ve makaslama dayanımı ($\tau = \sigma_n \tan (J_r / J_a)$) açısından duraylılık için hiç uygun olmayan eklem takımına veya süreksizliklere uygulanır.</p>		
4. EKLEM ALTERASYON SAYISI	J_a	Φ (yaklaşık)
(a) Kaya-süreksizlik dokanağı (mineral dolgusu yok, sadece yüzey kaplaması)		
A. Yüzeyler sıkı, sert, yumuşamayan geçirimsiz dolgu (örneğin, kuvars veya epidot)	0.75	–
B. Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1	25-30°
C. Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri. Yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vb.	2	20-25°
D. Silti veya kumlu kil kaplamaları, çok az ve yumuşamayan kil içeriği	3	20-25°
E. Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama (örneğin kaolinit veya mika). Ayrıca klonit, talk, jips, grafit vd. ile az miktarda şişen killer	4	8-16°
(b) 10 cm'lik makaslama öncesi süreksizlik kaya dokanağı (ince mineral dolguları)		
F. Kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vd.	4	25-30°
G. Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı < 5 mm)	6	16-24°
H. Orta ve düşük derecede konsolidasyona maruz kalmış, yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli ancak kalınlığı < 5 mm)	8	12-16°
J. Şişen kil mineralleri, örneğin; montmorillonit (sürekli, ancak kalınlığı < 5 mm) J_a 'nın değeri şişen kil tane boyutundaki malzemenin miktarına ve su girişine bağlı	8-12	6-12°
(c) Makaslama durumunda süreksizlik yüzeylerinin teması yok (kalın mineral dolguları)		
K, L, M. Bozunmuş veya parçalanmış kaya ve kil bantları ya da zonları (kil koşulunun tanımı için G, H ve J'ye bakınız)	6-8 veya 8-12	6-24°

Çizelge 4.4 (devam ediyor).

N. Siltli veya kumlu kil bantları veya zonları, çok az kil (yumuşamayan)	5.0	–
O, P, R. Kalın ve sürekli kil bantları veya zonları (kil koşulunun tanımlanması için G, H ve J'ye bakınız)	10-13 veya 13-20	6-24°
5. EKLEM SU AZALTMA FAKTÖRÜ	Yaklaşık su basıncı (kgf/cm²)	J_w
A. Kısmi kazı veya düşük su geliri (örneğin, genel olarak < 5 l/dk)	< 1	1.0
B. Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	1-2.5	0.66
C. Dolgusuz eklemeler içeren sağlam kayada aşırı su geliri veya yüksek basınç	2.5-10	0.5
D. Aşırı su geliri veya yüksek basınç, eklem dolgularının ileri derecede yıkanması	2.5-10	0.33
E. Çok ileri derecede su geliri veya patlama sırasında zamanla azalan yüksek su basıncı	> 10	0.2-0.05
F. Zamanla azalmaksızın devam eden son derece fazla su geliri veya su basıncı	> 10	0.1-0.05
Not: (8) C, D, E ve F'deki faktörler kaba tahminlerdir. Eğer drenaja yönelik önlemler alınır, J _w artar.		
(9) Buz oluşumundan kaynaklanabilecek özel sorunlar dikkate alınmamıştır.		
6. GERİLME AZALTMA FAKTÖRÜ	SRF	
(a) Tünel açılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek kazıyı kesen zayıf zonlar		
A. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren zayıflık zonları, çok gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	10	
B. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği ≤ 50 m)	5	
C. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği > 50m)	2.5	
D. Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7.5	
E. Kil içermeyen dayanıklı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği ≤ 50 m)	5.0	
F. Kil içermeyen dayanıklı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği > 50 m)	2.5	
G. Gevşek ve açık eklemeler, ileri derecede eklemli "küp şeker" görünümü (herhangi bir derinlikte)	5.0	

Çizelge 4.4 (devam ediyor).

(b) dayanıklı kaya, kaya gerilmesi sorunları	σ_{ci}/σ_t	$\sigma_\theta/\sigma_{ci}$	SRF
H. Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemler	> 200	< 0.01	2.5
J. Orta derecede gerilme, uygun gerilme koşulları	200-10	0.01-0.3	1
K. Yüksek gerilme, çok sıkı yapı, genellikle duraylı, yan duvarlar açısından uygun olmayabilir.	10-5	0.3-0.4	0.5-2
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 dinamik deformasyon	< 2	> 1	200-400
<p>Not: (11) Oldukça yönser (anizotrop) bakir gerilme alanı (ölçülebilirse) $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ koşulunda σ_c $0.75 \sigma_c$'ye, $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ ise $0.5\sigma_c$'ye düşürülür. Burada σ_c, tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_1 ve σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilmeler, σ_θ en büyük teğetsel gerilmedir (elastik kuramdan tahmin edilen).</p> <p>(12) Tavan yüksekliğinin genişliğinden az olduğu durumlarla ilgili birkaç vaka kaydı mevcuttur. Bu gibi durumlar için SRF'nin 2.5'ten 5'e artırılması önerilir (H maddesine bakınız).</p>			
(c) Sıkışan kaya: Yüksek kaya basıncının etkisiyle düşük dayanımlı kayada plastik akma	$\sigma_\theta/\sigma_{ci}$	SRF	
O. Az sıkıştıran kaya basıncı	1-5	5-10	
P. Aşırı sıkıştırıcı kaya basıncı	> 5	10-20	
<p>Not: (13) Sıkışan kaya vakaları $H > Q^{1/3}$ derinlik koşulunda meydana gelebilir (Singh vd., 1993). Kaya kütlelerinin basınç dayanımı $\sigma_{cm} = 0.7\gamma Q^{1/3}$ (MPa) eşitliğinden tahmin edilebilir. Burada γ, kayanın birim hacim ağırlığıdır (kN/m^3) (Singh, 1993).</p>			
(d) Şişen kaya: Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme etkinliği	SRF		
R. Düşük şişme basıncı	5-10		
S. Çok yüksek şişme basıncı	10-15		

Çizelge 4.5 Sapça tüneli için incelenen kesitlerde Q sınıflama puanları.

1. KESİT		2. KESİT		3. KESİT		4. KESİT		5. KESİT	
19+994-20+010 Km'ler arası		20+138-20+148.5 Km'leri Arası		20+332.5 - 20+347.5 Km'ler arası		20+406 - 20+417.40 Km'ler arası		20+544.50 - 20+561 Km'ler arası	
TANIM	DEĞER	TANIM	DEĞER	TANIM	DEĞER	TANIM	DEĞER	TANIM	DEĞER
1.Kaya Niteliği Belirteci	RQD	1.Kaya Niteliği Belirteci	RQD	1.Kaya Niteliği Belirteci	RQD	1.Kaya Niteliği Belirteci	RQD	1.Kaya Niteliği Belirteci	RQD
Orta	68.8	Orta	58.9	Zayıf	29.2	Zayıf	49	Zayıf	25.9
İyi	78.7	Orta	65.5	Orta	62.2	Orta	52.3	Zayıf	32.5
2. Eklem Takımı Sayısı	Jn	2. Eklem Takımı Sayısı	Jn	2. Eklem Takımı Sayısı	Jn	2. Eklem Takımı Sayısı	Jn	2. Eklem Takımı Sayısı	Jn
Üç eklem takımı	9	İki eklem takımı ve gelişigüzel eklem	6	Üç eklem takımı	9	İki eklem takımı ve gelişigüzel eklem	6	Bir eklem takımı	2
Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklem	12	Üç eklem takımı	6	Üç eklem takımı	9	Üç eklem takımı	9	İki eklem takımı ve gelişigüzel eklem	6
3. Eklem Pürüzlülük Sayısı	Jr	3. Eklem Pürüzlülük Sayısı	Jr	3. Eklem Pürüzlülük Sayısı	Jr	3. Eklem Pürüzlülük Sayısı	Jr	3. Eklem Pürüzlülük Sayısı	Jr
		Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5	Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5	Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5	Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5
Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5	Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3	Düz, dalgalı	2	Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5	Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5
4. Eklem Yüzeysel Ayrışma Sayısı	Ja	4. Eklem Yüzeysel Ayrışma Sayısı	Ja	4. Eklem Yüzeysel Ayrışma Sayısı	Ja	4. Eklem Yüzeysel Ayrışma Sayısı	Ja	4. Eklem Yüzeysel Ayrışma Sayısı	Ja
Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1	Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri.	2	Yüzeyler sıkı, sert, yumuşamayan geçirimsiz dolgu	0.75	Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1	Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1
				Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1			Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri.	2
5. Eklem Su Azaltma Faktörü	Jw	5. Eklem Su Azaltma Faktörü	Jw	5. Eklem Su Azaltma Faktörü	Jw	5. Eklem Su Azaltma Faktörü	Jw	5. Eklem Su Azaltma Faktörü	Jw
Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	0.7	Kısmi kazı veya düşük su geliri	1	Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	0.66	Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	0.66	Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	0.66
Kısmi kazı veya düşük su geliri	1			Kısmi kazı veya düşük su geliri	1				
6. Gerilme Azaltma Faktörü	SRF	6. Gerilme Azaltma Faktörü	SRF	6. Gerilme Azaltma Faktörü	SRF	6. Gerilme Azaltma Faktörü	SRF	6. Gerilme Azaltma Faktörü	SRF
Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği <=50 m)	5	Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7.5	Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği <=50 m)	5	Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği <=50 m)	5	Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği <=50 m)	5
						Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7.5	Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7.5
Qmin	1.2	Qmin	0.98	Qmin	0.64	Qmin	0.72	Qmin	0.29
Qmax	2.6	Qmax	2.18	Qmax	3.69	Qmax	1.73	Qmax	3.22
Q(ort)	1.9	Q(ort)	1.58	Q(ort)	2.16	Q(ort)	1.22	Q(ort)	1.75
Q'min	8.6	Q'min	7.36	Q'min	4.87	Q'min	8.17	Q'min	3.24
Q'max	13.1	Q'max	16.4	Q'max	18.4	Q'max	13.1	Q'max	24.4
Q' (ort)	10.9	Q' (ort)	11.9	Q' (ort)	11.6	Q' (ort)	10.6	Q' (ort)	13.8

Çizelge 4.6 Üzülmez tüneli için incelenen kesitlerde Q sınıflama puanları.

1. KESİT		2. KESİT		3. KESİT		4. KESİT	
30+412.65 ile 30+417.65 Km'ler Arası		30+495.85 ile 30+503.25 Km'ler Arası		30+634.00 ile 30+641.20 Km'ler Arası		30+746.50 ile 30+756.20 Km'ler Arası	
TANIM	DEĞER	TANIM	DEĞER	TANIM	DEĞER	TANIM	DEĞER
1.Kaya Niteliği Belirteci	RQD	1.Kaya Niteliği Belirteci	RQD	1.Kaya Niteliği Belirteci	RQD	1.Kaya Niteliği Belirteci	RQD
Zayıf	35.8	Zayıf	22.6	Zayıf	22.6	Çok Zayıf	12.7
Zayıf	49.0	Zayıf	32.5	Zayıf	32.5	Zayıf	29.2
2. Eklem Takımı Sayısı	Jn	2. Eklem Takımı Sayısı	Jn	2. Eklem Takımı Sayısı	Jn	2. Eklem Takımı Sayısı	Jn
İki eklem takımı	4	İki eklem takımı	4	İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	6	İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	6
İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	6	İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	6	Üç eklem takımı	9	Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	12
3. Eklem Pürüzlülük Sayısı	Jr	3. Eklem Pürüzlülük Sayısı	Jr	3. Eklem Pürüzlülük Sayısı	Jr	3. Eklem Pürüzlülük Sayısı	Jr
Düz, dalgalı	2	Düz, dalgalı	2	Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	2	Düz, dalgalı	2
Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3	Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3	Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3	Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3
4. Eklem Yüzeği Ayrışma Sayısı	Ja	4. Eklem Yüzeği Ayrışma Sayısı	Ja	4. Eklem Yüzeği Ayrışma Sayısı	Ja	4. Eklem Yüzeği Ayrışma Sayısı	Ja
Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri.	2	Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri.	2	Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri.	2	Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri.	2
Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama	4	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama	4	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama	4	Şişen kil mineralleri	12
5. Eklem Su Azaltma Faktörü	Jw	5. Eklem Su Azaltma Faktörü	Jw	5. Eklem Su Azaltma Faktörü	Jw	5. Eklem Su Azaltma Faktörü	Jw
Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	0.66	Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem	0.66	Kısmi kazı veya düşük su geliri	1	Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem	0.66
		Kısmi kazı veya düşük su geliri	1			Kısmi kazı veya düşük su geliri	1
6. Gerilme Azaltma Faktörü	SRF	6. Gerilme Azaltma Faktörü	SRF	6. Gerilme Azaltma Faktörü	SRF	6. Gerilme Azaltma Faktörü	SRF
Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7.5	Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7.5	Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7.5	Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7.5
						Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren zayıflık zonları, çok gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	10
Qmin	0.26	Qmin	0.17	Qmin	0.13	Qmin	0.01
Qmax	1.62	Qmax	1.63	Qmax	1.08	Qmax	0.97
Q(ort)	0.94	Q(ort)	0.90	Q(ort)	0.61	Q(ort)	0.49
Q'min	2.98	Q'min	1.88	Q'min	0.94	Q'min	0.18
Q'max	18.38	Q'max	12.19	Q'max	8.13	Q'max	7.30
Q' (ort)	10.68	Q' (ort)	7.03	Q' (ort)	4.53	Q' (ort)	3.74

4.3 SAPÇA VE ÜZÜLMEZ TÜNELLERİNİN KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanım ve deformasyon modülünün belirlenmesi için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen görgül ilişkiler kullanılmıştır. Sapça ve Üzülmez Tünellerinde kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının hesaplanması için kullanılan eşitlikler Çizelge 4.7’de, kaya kütlelerinin deformasyon modülünün hesaplanması için kullanılan eşitlikler Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Sapça ve Üzülmez tünellerinde kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının hesaplanması için kullanılan eşitlikler.

Araştırmacılar	Eşitlik (GPa)
Yudhbir et al. (1983)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \left[\exp\left(7.65 \times \frac{RMR - 100}{100}\right) \right]$
Aydan and Dalgıç (1998)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \left[\frac{RMR}{RMR + \beta \cdot (100 - RMR)} \right] (\beta = 6)$
Ramamurthy (1986)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \left[\exp\left(\frac{RMR - 100}{18.5}\right) \right]$
Kalamaris and Bieniawski (1995)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \left[\exp\left(\frac{RMR - 100}{24}\right) \right]$
Sheorey (1997)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \left[\exp\left(\frac{RMR - 100}{20}\right) \right]$
Barton (1995)	$\sigma_{cm} = 0.7 \times \gamma \times Q^{1/3}$
Hoek and Brown (1980)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \sqrt{e^{\frac{(RMR-100)}{9}}}$
Goel (1994)	$\sigma_{cm} = \frac{5.5 \gamma Q^{1/3}}{B^{0.1}}$
Bhasin and Grimstad (1996)	$\sigma_{cm} = \left(\frac{\sigma_{ci}}{100}\right) 7\gamma Q^{1/3}$
Trueman (1998)	$\sigma_{cm} = 0.5 e^{0.06 RMR}$
Barton (2000)	$\sigma_{cm} = 5 \gamma \left(Q \frac{\sigma_{ci}}{100}\right)^{1/3}$

Çizelge 4.8 Sapça ve Üzülmez Tünellerinde kaya kütleinin deformasyon modülünün hesaplanması için kullanılan eşitlikler.

Araştırmacılar	Eşitlik
Nicholson and Bieniawski (1990)	$E_m = \frac{E_i}{100} \left[0.0028RMR^2 + 0.9 \exp\left(\frac{RMR}{22.82}\right) \right]$
Aydan and Kawamoto (2000)	$E_m = E_i \cdot \left[\frac{RMR}{RMR + \beta \cdot (100 - RMR)} \right] \quad (\beta = 6)$
Hoek and Diederichs (2006)	$E_m = E_i \cdot \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{(60+15D-GSI)/11}} \right) \quad (D=0)$
Mitri et al. (1994)	$E_m = E_i \cdot \left\{ 0.5 \cdot \left[1 - \cos\left(\pi \cdot \frac{RMR}{100}\right) \right] \right\}$
Sönmez vd. (2006)	$E_m = E_i \times 10^{[(RMR-100)(100-RMR)/400] \exp(-RMR/100)}$
Barton (1995)	$E_m = 10 \cdot Q^{1/3}$
Bieniawski (1973)	$E_m = 2 \cdot RMR - 100 \quad (RMR > 50)$
Read et al. (1999)	$E_m = 0.1 \times \left[\frac{RMR}{10} \right]^3$
Serafim and Pereira (1983)	$E_m = 10^{[(RMR-10)/40]}$
Aydan et al. (1997)	$E_m = 0.0097 \cdot RMR^{3.54}$
Hoek and Brown (1997)	$E_m = 10^{[(GSI-10)/40]} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}$
Grimstad and Barton (1993)	$E_m = 25 \log Q$
Barton (2002)	$E_m = 10 \cdot Q_c^{1/3}$

Sapça tüneline belirlenen kesitlerde hesaplanan kaya kütleinin tek eksenli basınç dayanımı Çizelge 4.9’da, deformasyon modülü değerleri ise Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Sapça tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı.

Araştırmacılar	1. Kesit	2. Kesit	3. Kesit	4. Kesit	5. Kesit
Yudhbir et al. (1983)	*1.47	*1.38	*1.40	*1.63	*1.54
Aydan and Dalgıç (1998)	8.58	8.34	8.39	10.86	10.58
Ramamurthy (1986)	4.25	4.06	4.11	5.05	4.85
Kalamaris ve Bieniawski (1995)	7.64	7.37	7.43	9.43	9.14
Sheorey (1997)	5.15	4.94	4.99	6.19	5.97
Barton (1995)	2.25	2.11	2.34	1.98	2.22
Hoek and Brown (1980)	3.96	3.78	3.82	4.68	4.49
Goel (1994)	*24.76	*25.50	*25.28	*25.10	*27.20
Bhasin and Grimstad (1996)	12.28	11.55	12.82	15.30	17.12
Trueman (1998)	11.84	11.26	11.39	9.78	9.35
Barton (2000)	13.12	12.34	13.69	12.69	14.54
σ_{cm} (MPa)	7.68	7.30	7.67	8.44	8.69
*En büyük ve en küçük değerler dikkate alınmamıştır.					

Çizelge 4.10 Sapça tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi deformasyon modülü.

Araştırmacılar	1. Kesit	2. Kesit	3. Kesit	4. Kesit	5. Kesit
Nicholson and Bieniawski (1990)	2.40	3.66	2.91	2.62	3.30
Aydan and Kawamoto (2000)	2.24	3.42	2.72	2.49	3.16
Hoek and Diederichs (2006)	*0.97	*1.46	*1.16	*1.01	*1.26
Mitri et al. (1994)	7.74	11.91	9.44	8.73	11.09
Sönmez vd. (2006)	6.68	10.17	8.08	7.25	9.13
Barton (1995)	*12.39	*11.65	*12.93	10.69	12.05
Bieniawski (1973)	5.50	3.80	4.20	N/A	N/A
Read et al. (1999)	14.68	13.98	14.14	*12.17	*11.62
Serafim ve Pereira (1983)	11.72	11.16	11.28	9.74	9.33
Aydan et al. (1997)	12.12	11.44	11.60	9.71	9.20
Hoek and Brown (1997)	6.50	6.19	6.26	6.42	6.15
Grimstad and Barton (1993)	6.97	4.97	8.36	2.16	6.08
Barton (2002)	10.13	9.53	10.57	9.80	11.05
E_m (GPa)	7.74	8.18	8.03	6.96	8.01
*En büyük ve en küçük değerler dikkate alınmamıştır.					

Üzülmez tünellerinde belirlenen kesitlerde hesaplanan kaya kütlesinin tek eksenli basınç dayanımı Üzülmez Sol Tüneli için Çizelge 4.11'de ve Üzülmez Sağ Tüneli için Çizelge 4.12'de, deformasyon modülü değerleri ise Üzülmez Sol Tüneli için Çizelge 4.13'te ve Üzülmez Sağ Tüneli için Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.11 Üzülmez Sol Tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı.

Araştırmacılar	1.Kesit	2.Kesit	3.Kesit	4.Kesit
Yudhbir et al. (1983)	2.74	*1.30	*1.10	0.75
Aydan and Dalgıç (1998)	14.29	10.24	9.47	7.33
Ramamurthy (1986)	7.46	4.42	3.92	2.86
Kalamaris and Bieniawski (1995)	12.98	8.66	7.90	6.02
Sheorey (1997)	8.94	5.51	4.93	3.65
Barton (1995)	*2.30	2.16	1.28	*0.61
Hoek and Brown (1980)	6.98	4.07	3.60	2.62
Goel (1994)	*28.61	*19.61	*17.56	*9.41
Bhasin and Grimstad (1996)	19.26	18.07	10.66	4.48
Trueman (1998)	13.80	7.71	6.76	5.53
Barton (2000)	15.15	14.54	8.58	3.94
σ_{cm} (MPa)	11.29	8.38	6.34	4.13
*En büyük ve en küçük değerler dikkate alınmamıştır.				

Çizelge 4.12 Üzülmez Sağ Tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı.

Araştırmacılar	1.Kesit	2.Kesit	3.Kesit	4.Kesit
Yudhbir et al. (1983)	*1.08	*0.83	*1.01	*0.77
Aydan and Dalgıç (1998)	9.38	8.28	9.08	7.10
Ramamurthy (1986)	3.87	3.22	3.68	2.85
Kalamaris and Bieniawski (1995)	7.82	6.79	7.53	5.87
Sheorey (1997)	4.87	4.11	4.66	3.61
Barton (1995)	1.91	1.81	1.55	1.43
Hoek and Brown (1980)	3.55	2.94	3.38	2.61
Goel (1994)	*26.40	*22.14	*18.62	*17.34
Bhasin and Grimstad (1996)	15.93	15.14	12.95	9.53
Trueman (1998)	6.66	5.43	6.31	6.10
Barton (2000)	12.83	12.19	10.42	8.92
σ_{cm} (MPa)	7.42	6.66	6.62	5.34
En büyük ve en küçük değerler dikkate alınmamıştır.				

Sapça ve Üzülmez tünellerinin kaya kütlesinin tek eksenli çekme dayanımı, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı, Aydan et al. (2012) tarafından önerilen görgül bağıntılardan hesaplanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir

Çizelge 4.13 Üzülmez Sol Tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi deformasyon modülü.

Araştırmacılar	1.Kesit	2.Kesit	3.Kesit	4.Kesit
Nicholson and Bieniawski (1990)	3.24	2.49	2.26	*1.79
Aydan and Kawamoto (2000)	2.96	2.45	2.27	1.85
Hoek and Diederichs (2006)	*1.38	*0.93	*0.83	1.96
Mitri et al. (1994)	10.08	8.62	7.94	6.40
Sönmez vd. (2006)	8.92	6.79	6.06	4.62
Barton (1995)	11.84	*11.52	6.98	3.42
Bieniawski (1973)	10.60	N/A	N/A	N/A
Read et al. (1999)	*16.91	9.48	*8.17	*6.42
Serafim and Pereira (1983)	13.57	7.76	6.84	5.64
Aydan et al. (1997)	14.32	7.24	6.07	4.57
Hoek and Brown (1997)	9.30	5.32	4.69	3.62
Grimstad and Barton (1993)	5.50	4.62	N/A	N/A
Barton (2002)	11.15	10.85	6.57	3.08
E_m (GPa)	9.23	6.56	5.52	3.91
*En büyük ve en küçük değerler dikkate alınmamıştır.				

Çizelge 4.14 Üzülmez Sağ Tüneli için belirlenen kesitlerde kaya kütlesi deformasyon modülü.

Araştırmacılar	1.Kesit	2.Kesit	3.Kesit	4.Kesit
Nicholson and Bieniawski (1990)	1.93	1.91	2.15	*2.18
Aydan and Kawamoto (2000)	1.94	1.98	2.17	2.22
Hoek and Diederichs (2006)	*0.71	*0.72	*0.79	2.46
Mitri et al. (1994)	6.80	6.84	7.59	7.73
Sönmez vd. (2006)	5.17	4.91	5.68	5.74
Barton (1995)	*9.80	*9.65	*8.48	*7.88
Bieniawski (1973)	N/A	N/A	N/A	N/A
Read et al. (1999)	8.03	6.28	7.54	7.25
Serafim and Pereira (1983)	6.74	5.54	6.40	6.20
Aydan et al. (1997)	5.95	4.45	5.52	5.27
Hoek and Brown (1997)	4.62	3.80	4.39	3.80
Grimstad and Barton (1993)	N/A	N/A	N/A	N/A
Barton (2002)	9.23	9.09	7.99	6.89
E_m (GPa)	5.60	4.98	5.49	5.28
En büyük ve en küçük değerler dikkate alınmamıştır.				

Sapça ve Üzülmez tünellerinin kütlelerinin tek eksenli çekme dayanımı;

$$\sigma_{tm} = \frac{RMR}{RMR+6(100-RMR)} \times \sigma_{tB} \quad (4.2)$$

Sapça ve Üzülmez tünellerinin kaya kütlelerinin kohezyonu;

$$c_m = \frac{RMR}{RMR+6(100-RMR)} \times c_i \quad (4.3)$$

Sapça ve Üzülmez tünellerinin kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı ise;

$$\phi_m = \left(0.3 + 0.7 \frac{RMR}{100}\right) \times \phi_i \quad (4.4)$$

formülleriyle hesaplanmıştır.

Sapça tüneline incelenen kesitlerde hesaplanan tek eksenli çekme dayanımı, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı Çizelge 4.15'te, Üzülmez sol tünellerinde incelenen kesitlerde hesaplanan tek eksenli çekme dayanımı, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı Çizelge 4.16'da, sağ tünel için Çizelge 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.15 Sapça tüneline incelenen kesitlerde hesaplanan tek eksenli çekme dayanımı, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı.

	1. Kesit	2. Kesit	3. Kesit	4. Kesit	5. Kesit
σ_{tm} (MPa)	1.17	1.16	1.11	0.97	1
c_m (MPa)	1.42	1.38	1.32	1.21	1.17
ϕ_m (°)	32.12	31.384	30.91	30.08	29.83

Çizelge 4.16 Üzülmez sol tüneline incelenen kesitlerde hesaplanan tek eksenli çekme dayanımı, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı.

	1. Kesit	2. Kesit	3. Kesit	4. Kesit
σ_{tm} (MPa)	1.87	0.89	1.04	1.06
c_m (MPa)	0.97	0.69	0.64	0.57
ϕ_m (°)	32.98	29.72	28.98	27.86

Çizelge 4.17 Üzülmez sağ tüneline incelenen kesitlerde hesaplanan tek eksenli çekme dayanımı, kohezyonu ve içsel sürtünme açısı.

	1. Kesit	2. Kesit	3. Kesit	4. Kesit
σ_{tm} (MPa)	1.23	0.72	0.99	1.09
c_m (MPa)	0.64	0.56	0.62	0.60
ϕ_m (°)	28.89	27.56	28.59	28.41

BÖLÜM 5

TÜNELLERDE UYGULANAN KAZI YÖNTEMLERİ VE KULLANILAN TAHKİMAT TÜRLERİ

Eski çağlarda kayalar içerisindeki doğal açıklıklarda oturan insanlar, zamanla kayaları kazarak yeraltı açıklıkları oluşturmuşlardı. Gerek madencilik, gerekse de diğer amaçlarla yapılan ilkel kazılarda kayalar keski ve tokmak yardımıyla kazılmaktaydı. 19. yüzyıla kadar kazı teknolojisindeki en önemli gelişme, karabarutun ilk defa Martin Wiegel tarafından Almanya'da 1613 yılında kullanılmasıyla olmuştur. Karabarut, keski kullanılarak elle açılan deliklere dolduruluyor, ağaç tıkaçlarla sıkılıyor ve patlatılıyordu. Bu yüzden delme patlatma yönteminin başlangıcı olarak 1613 yılı kabul edilir (Gerçek 2000).

20. yüzyıl itibariyle gelişen teknolojiyle birlikte birçok tünel açma yöntemi bulunmuştur. Bunlardan biri de “Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)” dir. Tünelcilikte, yeni bir anlayışın ortaya çıkmasına yol açan NATM, tünelin içerisinde açıldığı kaya kütlelerini kendi kendini taşıtma ilkesine dayanır. NATM’ın prensibi, en uygun kazı ve sağlamlaştırma yöntemleri kullanılarak kazı sonrasında oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların, kaya yapısının duraylılığını bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlamlığını olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendini tutan ve taşıyan duraylı bir sistem oluşturulmasıdır (Köse vd. 2007).

Ankara-Zonguldak yönünde sırasıyla açılan Sapça ve Üzülmez tünellerinin açılması sırasında uygulanan kazı yöntemleri ve kullanılan tahkimat uygulamaları bu bölümde anlatılacaktır.

Sapça ve Üzülmez tünellerinde kazı, delme patlatma yöntemi ve hidrolik kırıcı yardımıyla üst ve alt yarı kazısı olarak iki aşamada yapılmıştır. Bunlardan birincisi üst yarı kazısıdır (Şekil 5.1). Tünelde yapılan kazı işleminde tünelin tavan kısmında oluşabilecek aşırı deformasyonların önlenmesi amacıyla yapılan öncelikli kazı işlemine “Üst Yarı” kazısı denilmektedir (Şekil 5.2). İkincisi ise alt yarı kazısıdır (Şekil 5.3). Tünelde yapılan kazı işleminde tünelin taban kısmında oluşabilecek aşırı deformasyonların önlenmesi amacıyla üst

yarı kazısını emniyetli bir mesafeden takip ederek yapılan ikincil kazı işlemine “Alt Yarı” kazısı denilmektedir.

Sapça ve Üzülmez tünellerinde kazı, genel olarak delme-patlatma yöntemiyle yapılmıştır. Fakat çevre kayacın çok kırıklı ve akıcı olduğu yerlerde göçüklere neden olunmaması için hidrolik kırıcı ile ilerleme yapılmıştır.



Şekil 5.1 Tünellerde uygulanan üst yarı kazısından bir görünüm.



Şekil 5.2 Tünellerde uygulanan üst yarı kazısının görünümü.



Şekil 5.3 Tünellerde uygulanan alt yarı kazısından bir görünüm.

5.1 TÜNELLERDE UYGULANAN KAZI TAHKİMAT YÖNTEMLERİ

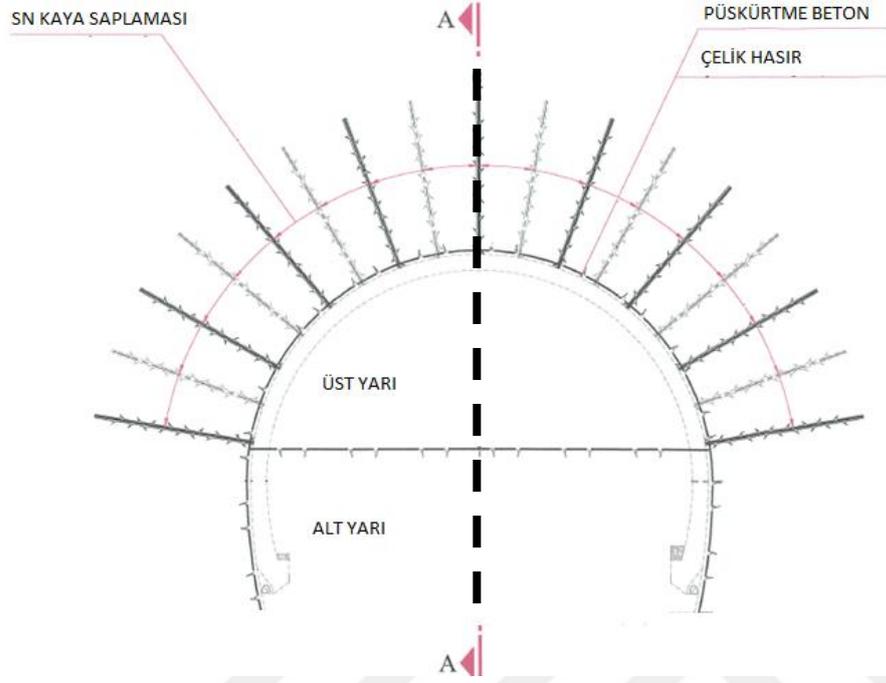
Bu bölümde Sapça ve Üzülmöz tünellerinde Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM)'nün teknik şartnamesine göre uygulanan kazı tahkimat yöntemlerinin sunumu yapılacaktır.

5.1.1 B1 Kazı Tahkimat Yöntemi

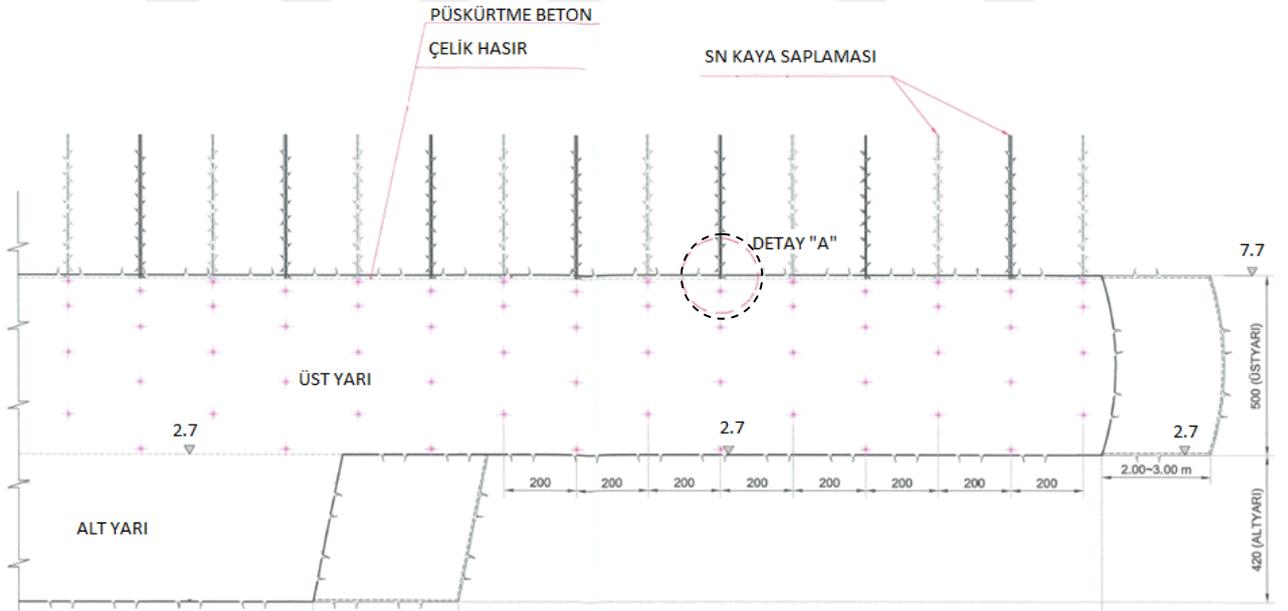
Bu sınıf kaya kütlelerinin davranışı "gevrek" olarak adlandırılır. Deformasyonlar çok küçüktür ve zamanla çok hızlı azalır. Patlamadan sonra oluşan çatlaklar ve kavlaklar yer yer tünel tavanında ve yan duvarların üst kısmında yenilmelere neden olur (KGM 2013).

Kazı en kesiti üst yarı kazısı ve alt yarı kazısı olarak iki aşamada gerçekleştirilmektedir. İlerleme adımı uzunluğu üst yarı kazısında 2-3 m arasında, alt yarıda ise 4 m olmaktadır. İlerleme adımı uzunluğu kayanın tahkimatsız durma süresine, tahkimatsız açıklığa, tahkimat malzemelerinin yerleştirme süresine bağlı olarak ayarlanmalıdır. Kazı için delme patlatma gerekmektedir (KGM 2013).

Sınırlı bölgelerde sistematik tahkimat gerekmektedir. Lokal olarak ön tahkimat gerekebilir. Tahkimat arından en fazla bir ilerleme adımı geriden monte edilecektir. Tehlikeli alanların tahkimatı hemen yapılmalıdır (Şekil 5.4) (KGM 2013).

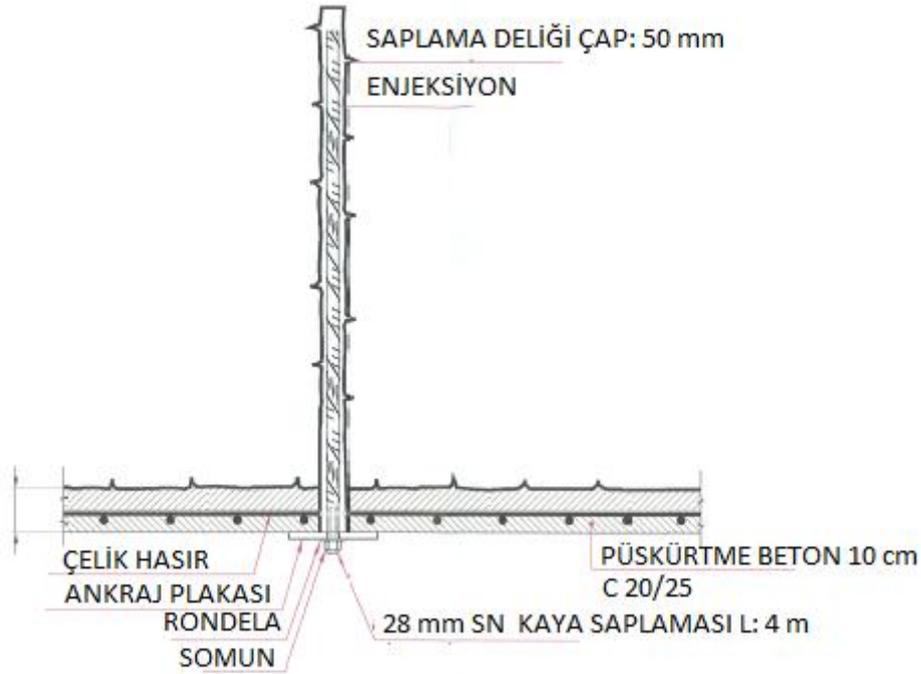


a) Enine kesit.



b) Boyuna kesit.

Şekil 5.4 B1 Kazı destek sınıfına ait pafta örneği.



c) Detay "A"nın gösterimi (b şıkkı).

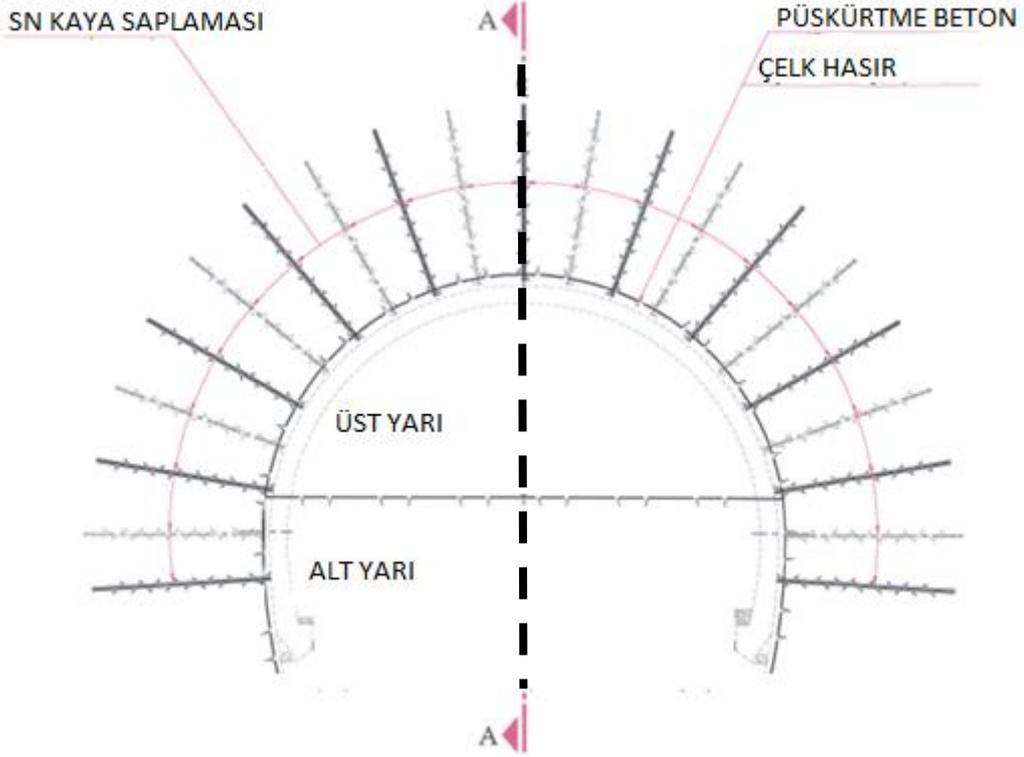
Şekil 5.4 (devam ediyor).

5.1.2 B2 Kazı Tahkimat Yöntemi

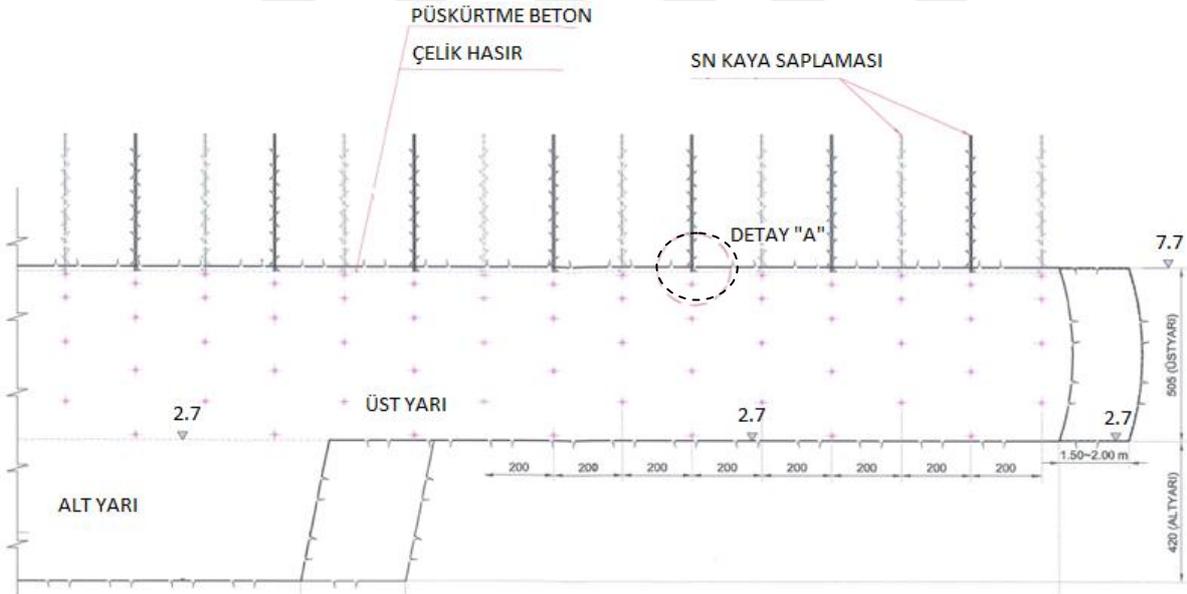
Bu sınıf kaya kütlelerinin davranışı "çok gevrek" kaya kütlesi olarak adlandırılmaktadır. Tünel tahkimatının zamanında yapılması halinde deformasyonlar hızla azalır. Zamanında tahkimat yapılmaması veya destekleme elemanlarının yetersiz olması halinde kazı arını yan kayacında daha geniş çaplı deformasyonlar ve buna bağlı olarak yenilmeler meydana gelir (KGM 2013).

Kazı tünel kesitine bağlı olarak aşamalı olarak yapılır. İlerleme adımı uzunluğu, tahkimatsız durma süresi ve tahkimatsız açıklığa bağlı olarak belirlenir. İlerleme adımı üst yarı kazısında 1.5-2 m, alt yarıda ise 3-3.5 m'den fazla olmamalıdır. Kazı genellikle bölgesel patlatma ile yapılmaktadır (KGM 2013).

Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik tahkimat gerekmektedir (Şekil 5.5). Gerektiğinde tavanda süren kullanılmalıdır. Süren için delme ve benzeri işlemlerin arındaki veya tavandaki kaya kütlesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenmelidir (KGM 2013).

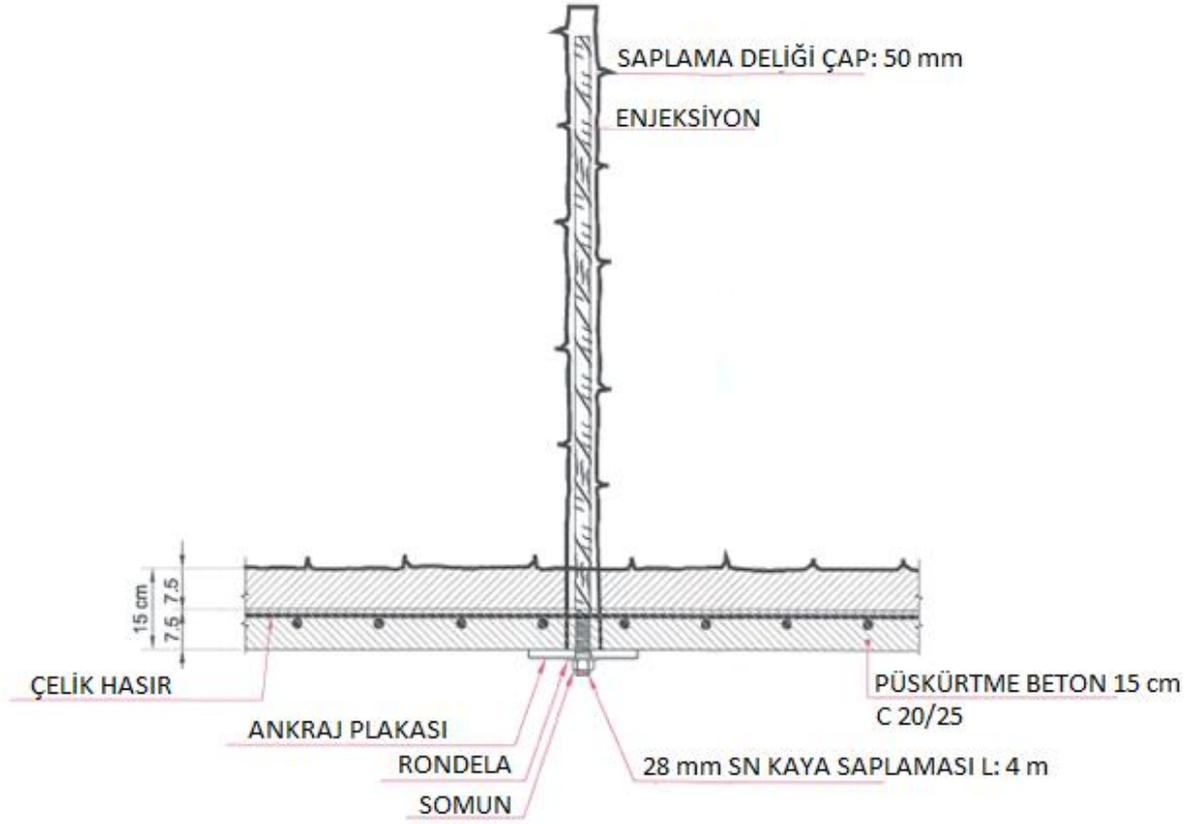


a) Enine kesit.



b) Boyuna kesit.

Şekil 5.5 B2 kazı destek sınıfının pafta örneği.



c) Detay "A" nın gösterimi (b şikkı).

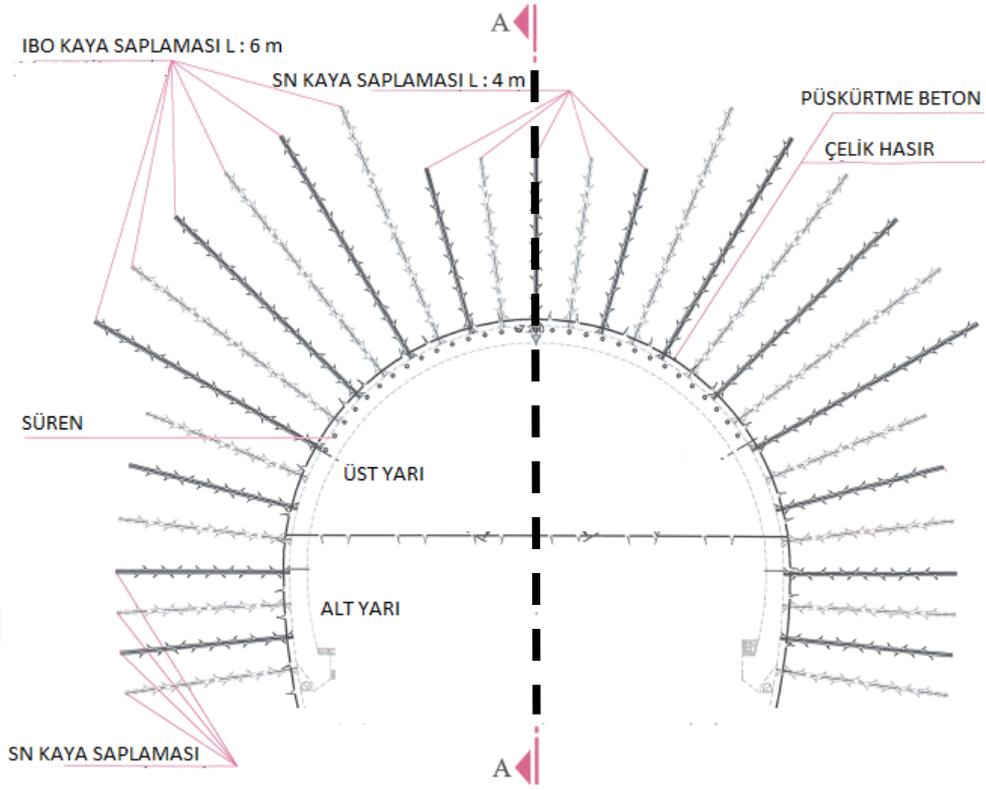
Şekil 5.5 (devam ediyor).

5.1.3 B3 Kazı Tahkimat Yöntemi

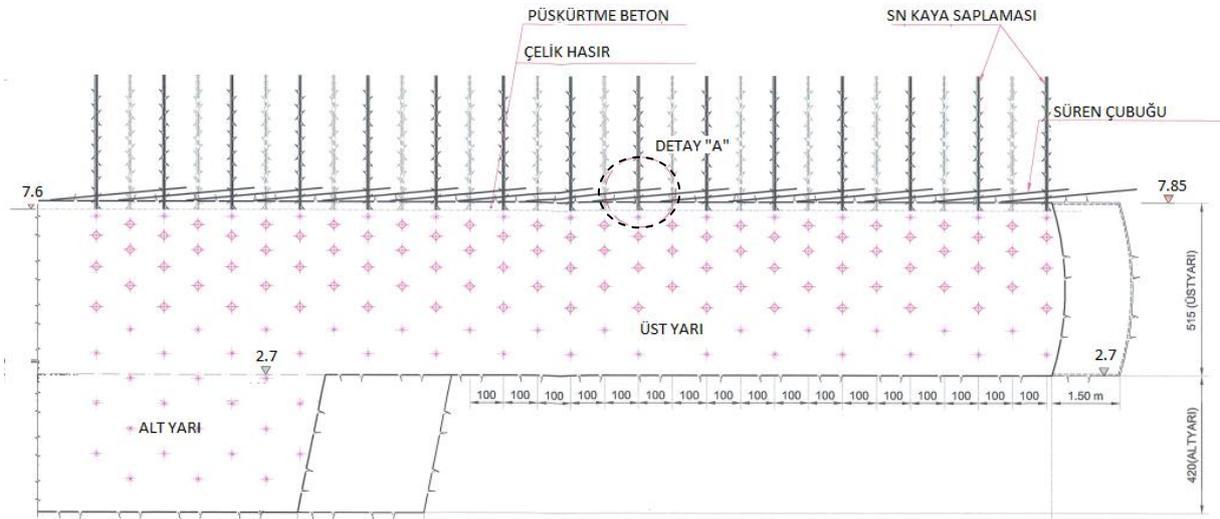
B3 sınıfı kaya kütesinin davranışı "taneli" kaya kütesi olarak adlandırılmaktadır. Aşamalı kazıda bile çevre kaya malzemesinde dökülmeler meydana gelir. Kohezyonun az olması ve az çimentolaşma kazı arınının duraysızlaşmasına neden olmaktadır (KGM 2013).

Aşamalı kazı ile ilerleyebilmek için kaya kütesini iyileştirici, tahkimatsız durma süresini artırıcı önlemler alınmalıdır. İlerleme adımı uzunluğu üst yarı kazısında 1.25-1.50 m, alt yarıda ise 3 m'den fazla olmamalıdır. Kazı genellikle bölgesel patlatma ile yapılır, titreşime hassas kaya kütlelerinde hidrolik kırıcı kullanılmalıdır. Taban kazısı ve bir taban beton kemeri yapılması gerekli olabilir (Şekil 5.6) (KGM 2013).

Tünel tavanı ve yan duvarlarda, arında ve arının ilerletilmesinden önce monte edilecek sistematik tahkimat gerekmektedir. Süren kullanımı yerel olarak gerekebilir. Sistematik demir bağ kullanılmalıdır. Jeolojik şartlara göre, üstyarı arınından 100-150 m'den daha geride olmamak üzere, yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerekebilir (KGM 2013).

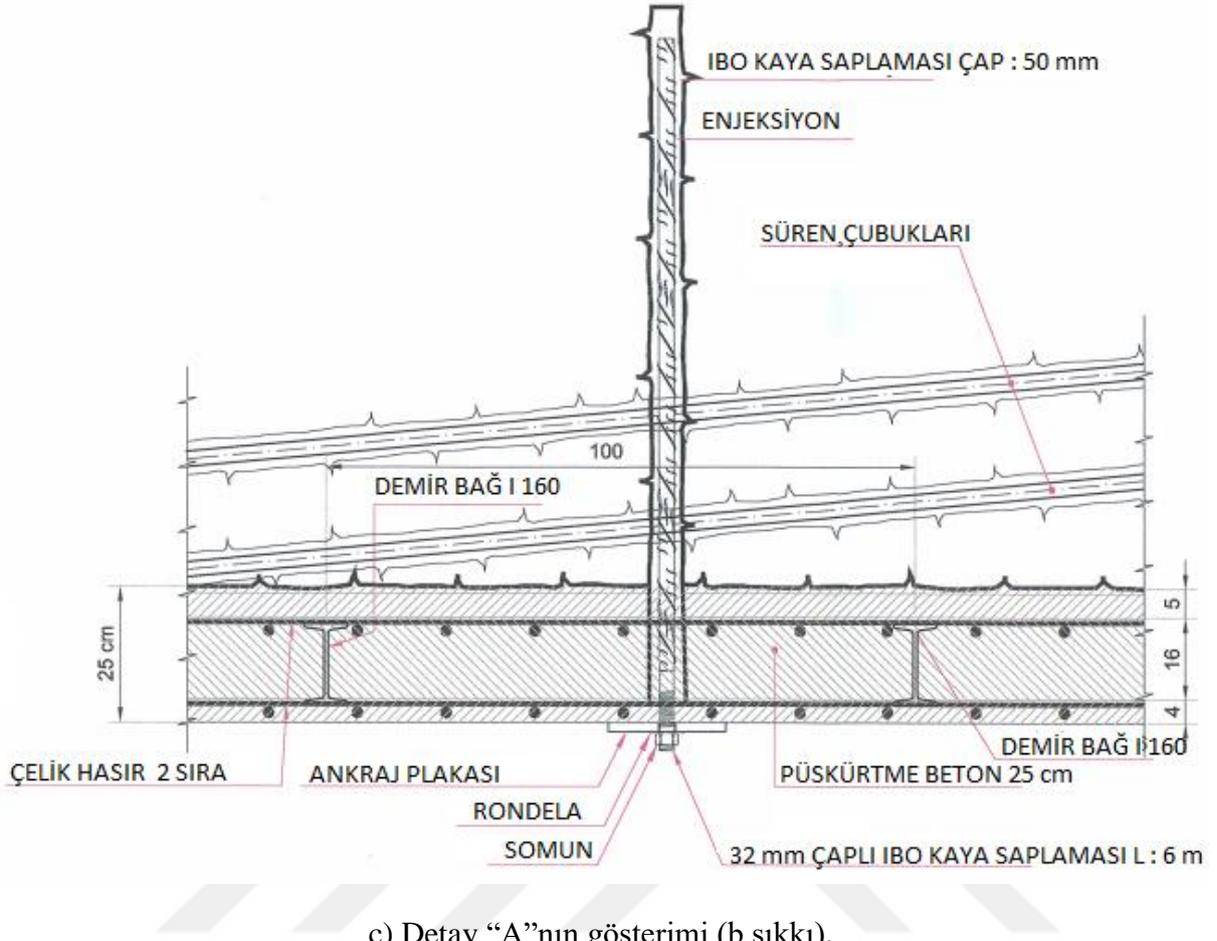


a) Enine kesit.



b) Boyuna kesit.

Şekil 5.6 B3 Kazı destek sınıfının pafta örneği.



c) Detay "A"nın gösterimi (b şıkkı).

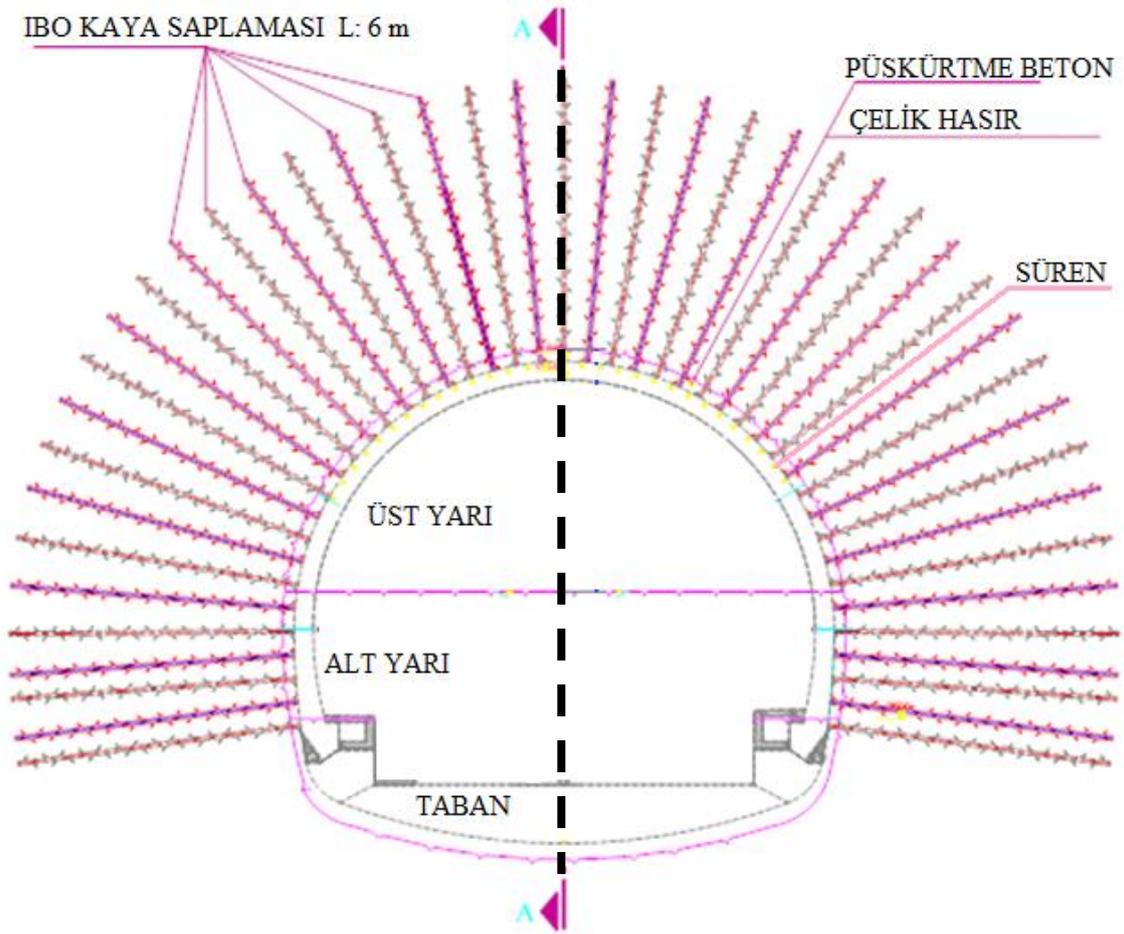
Şekil 5.6 (devam ediyor).

5.1.4 C2 Kazı Tahkimat Yöntemi

C2 sınıfı kaya kütlelerini davranışı "baskılı" kaya kütleleri olarak adlandırılmaktadır. C2, kazı arınıcı çevreleyen kaya kütleleri içerisinde daha derinlere uzanan plastik yenilme bölgeleri oluşumu ile tanımlanabilir. Bu kaya kütlelerinde orta derecede fakat belirgin olarak uzun süren ve yavaş son bulan deformasyonlar gözlenir. Plastik davranışlı yüksek kohezyonlu kaya kütlelerinde gerilme gözlenir (KGM 2013).

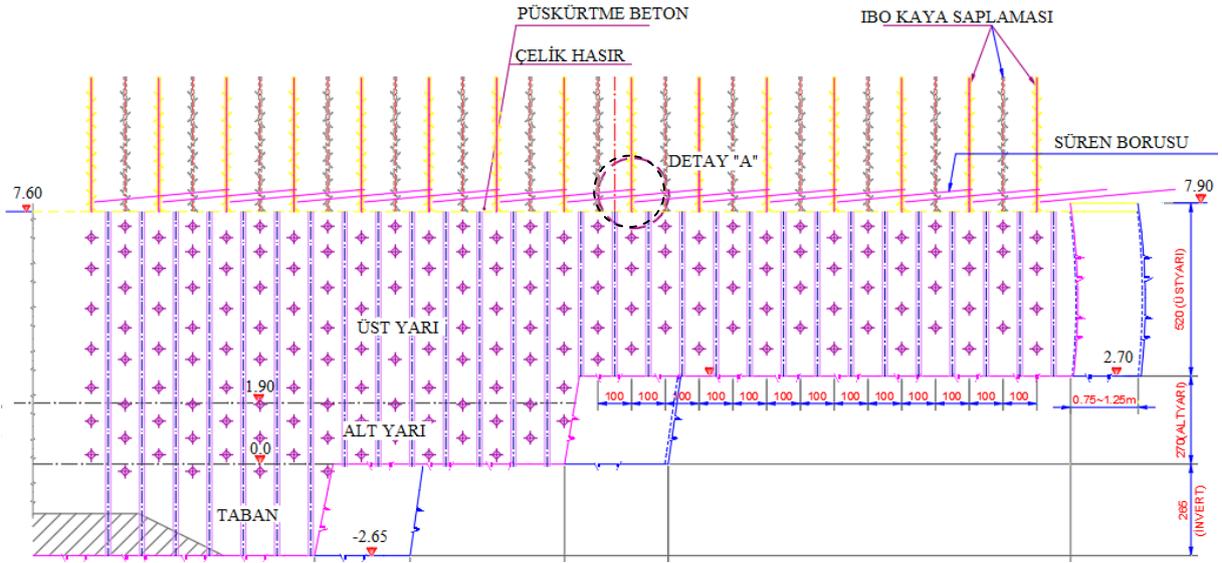
Tünel kazısının; üst yarı, alt yarı ve taban kazısı olarak aşamalandırılması gerekebilir. Tünel giriş çıkış bölgelerindeki özel durumlar hariç, üst yarı kazısı kendi içerisinde bölümlere ayrılabilir. Üst yarı kazısı arınıcı bir destekleme gövdesi gerekir. İlerleme adımı uzunluğu üst yarıda 0.75-1.25 m, alt yarıda 2 m'den fazla olmamalıdır (Şekil 5.7). Kazı bölgesel patlatma ve hidrolik kırıcı yöntemleriyle yapılabilir. Kazıdan hemen sonra püskürtme beton kaplaması gerekebilir (KGM 2013).

Tüm kesit çevresinde sistematik tahkimat gerekmektedir. Her ilerleme adımında tahkimat sistemi tamamlandıktan sonra bir sonraki ilerleme adımına geçilmelidir. Tünel tavanında süren uygulaması gerekmektedir. Süren uygulaması için delgi sırası ve sonrasında, arın ve tavadaki kaya kütlelerinin olumsuz etkilenmesi önlenmelidir. Destekleme elemanlarının görevi yenilme bölgelerini sınırlamaktır. Jeolojik şartlara uygun olarak üst yarı arınından 50-100 m'den daha geride olmamak üzere taban kemeri gerekmektedir (KGM 2013).

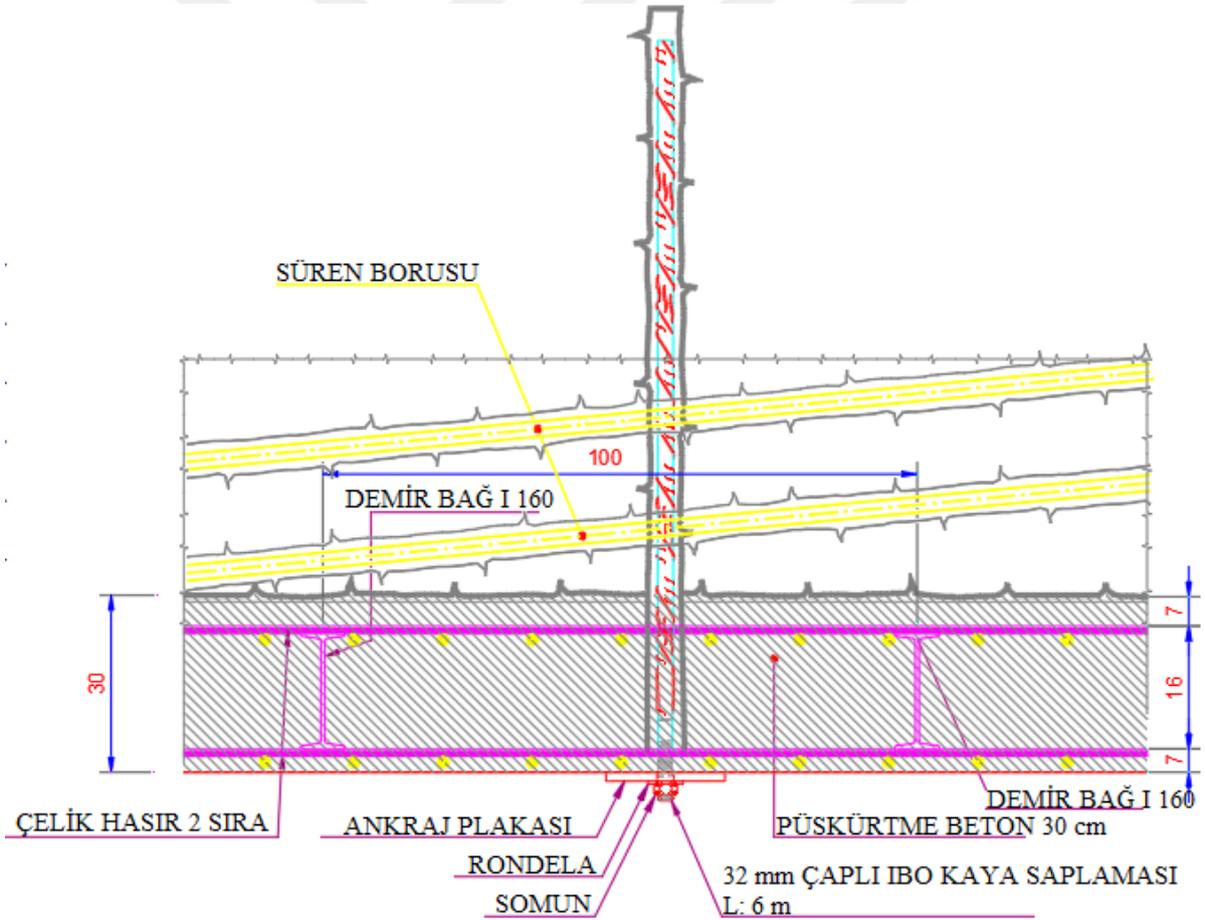


a) Enine kesit.

Şekil 5.7 C2 Kazı destek sınıfının pafta örneği.



b) Boyuna kesit.



c) Detay "A"nın gösterimi (b şikkı).

Şekil 5.7 (devam ediyor).

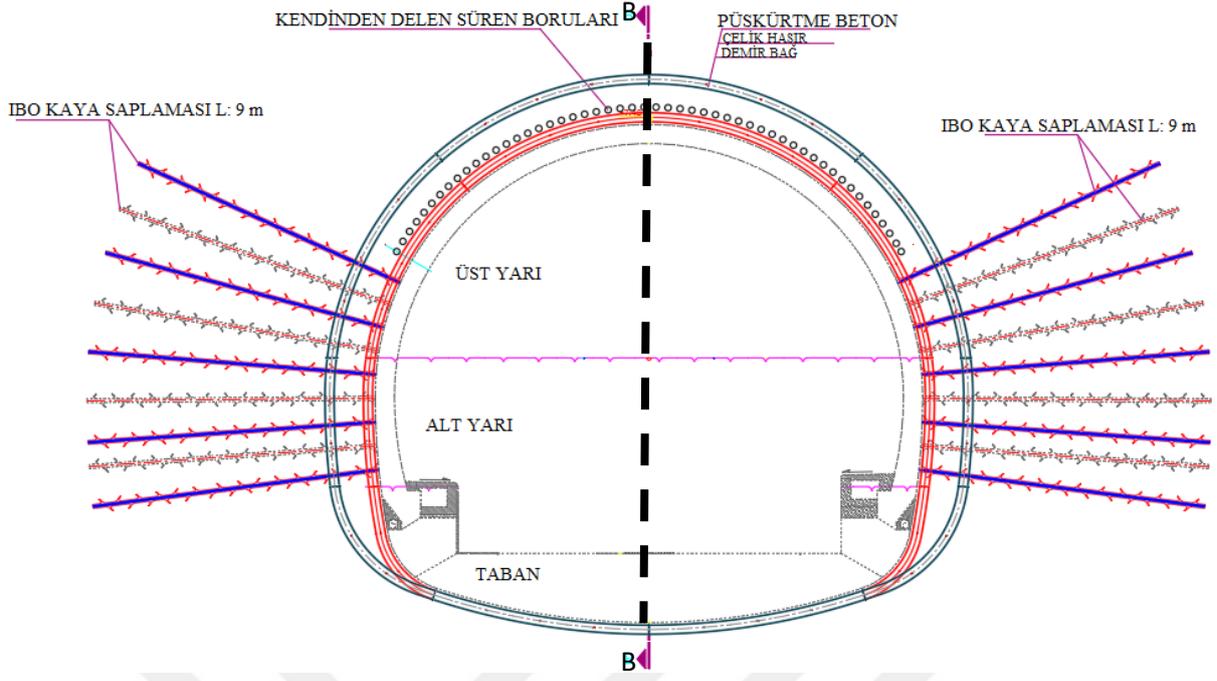
5.1.5 C3 Kazı Tahkimat Yöntemi

C3 sınıfı “çok baskılı” kaya kütlesi olarak adlandırılmaktadır. Deformasyonlar uzun sürer ve yavaş son bulur. Kazının yapıldığı arının çevre kaya malzemesinde derinlere uzanan kırılmalar ve plastik bölgeler gözlenir (KGM 2013).

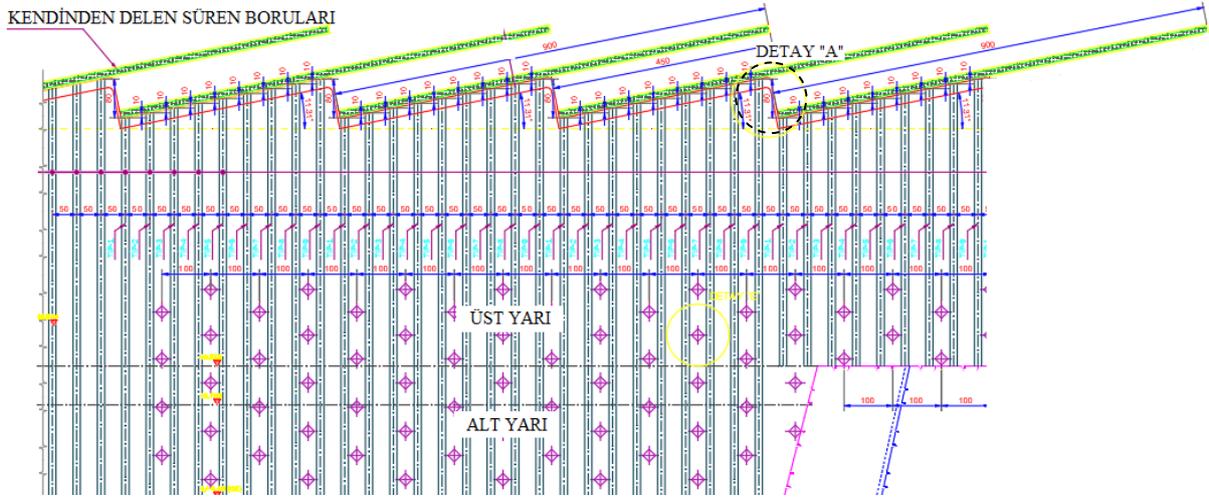
Tünel kazısının üst yarı kazısı, alt yarı ve taban kazısı olarak aşamalandırılması zorunludur. Genellikle üst yarı kazısı arınında bir destekleme gövdesi gerekmektedir. Aynada sistematik tahkimat gerekmektedir. İlerleme adımı uzunluğu, üst yarı kazısında 1.2 m'den, alt yarıda ise 2 m'den fazla olmamalıdır (Şekil 5.8). Kazı genellikle bölgesel patlatma veya hidrolik kırıcı yöntemleriyle yapılır. Kazıdan hemen sonra püskürtme beton kaplaması gerekmektedir. Yoğun bir tahkimat sistemi tüm kazı arınında gerekmektedir (KGM 2013).

İlerleme adımı uzunluğunun kısaltılması, süren boyunun uzatılması ve üst yarı kazısı arınında büyük bir merkez destekleme gövdesinin bırakılmasının yeterli olmaması halinde arın kazısının ayrıca alt kısımlara bölünmesi gerekebilir. Böyle bir durumda uygulanabilecek çözümler, üst yarı kazısının yarı taraf kazılar veya yan galeriler halinde yapılması olabilir. Arının ve çevre kaya malzemesinin aşırı düşey hareketleri olması halinde, kaplama temelini genişletilmesi, püskürtme beton kabuğunun temel bölgesinin kaya saptaması ve enjeksiyonlanması veya geçici taban kemerleri gerekli olabilir (KGM 2013).

Tüm tünel tahkimatı sistematik olarak, üst yarı ve alt yarı arının kazılmasından önce yapılmalıdır. Tüm tavan kesimi üzerinde süren boru kullanımı gerekmektedir. Süren için delme veya benzeri işlemlerin arın veya tavadaki kaya malzemesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenmelidir. Üst yarı kazısında alt bölümlere ayrılmış aşamalı kazılar gerekebilir. (KGM 2013).

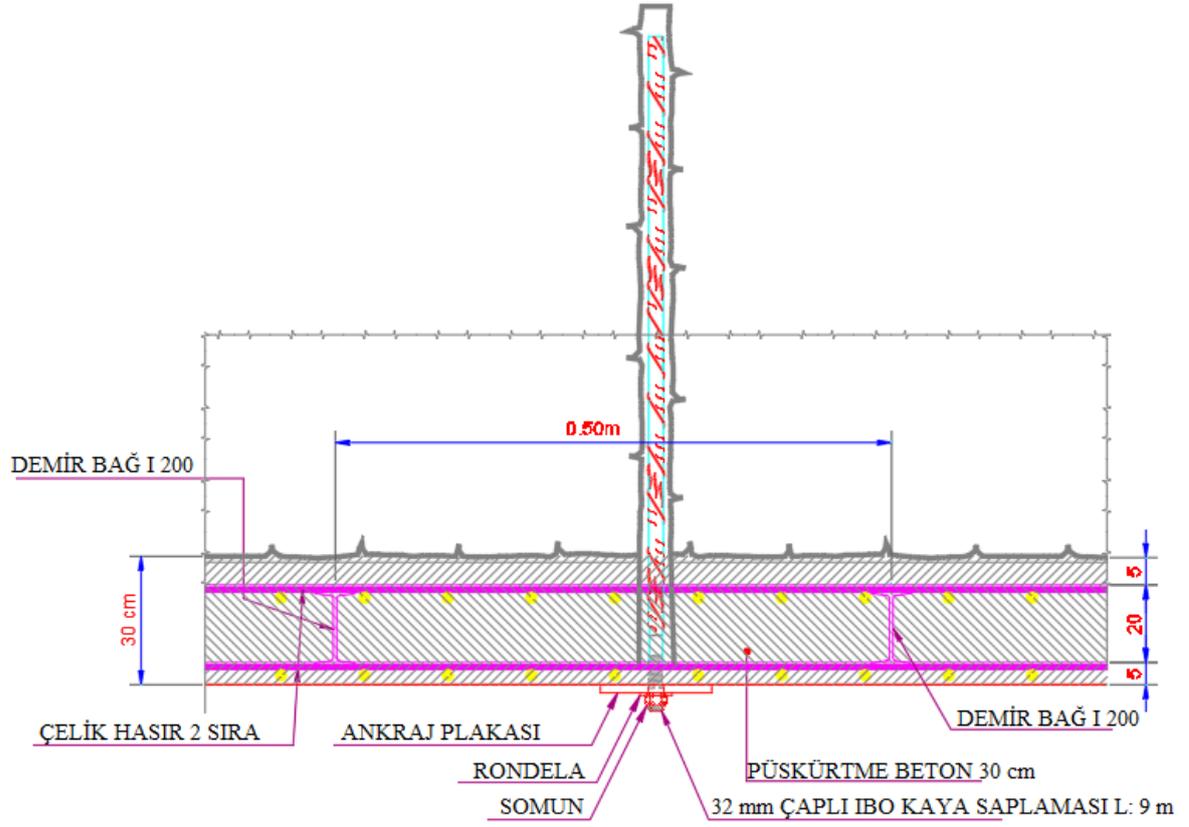


a) Enine kesit.



b) Boyuna kesit.

Şekil 5.8 C3 Kazı destek sınıfının pafta örneği.



c) Detat "A"nın gösterimi (b şikkı).

Şekil 5.8 (devam ediyor).

Üzülmez tünellerinde C3 kazı tahkimat yönteminin uygulandığı bölgelerde kazı işlemleri Boru Şemsiyeleme yöntemiyle yapılmıştır.

Üzülmez tünellerinin ilerleme işlemleri sırasında Ankara Zonguldak yönünde Sol tünelde 30+747.5-30+763.2 km'leri ve 30+769.1-30+971.3 km'leri, Sağ tünelde 30+710.0-30+749.2 km'leri, 30+765.6-30+780.5 km'leri ve 30+809.6-30+995.0 km'leri arasında kaya kütlelerinde gözlemlenen çok kırıklı kaya malzemesinin deformasyonlara müsait olmasından dolayı kazı tahkimat yöntemi olarak Çelik Boru Şemsiye Kemer uygulanmıştır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 Çelik boru şemsiye kemer yönteminden bir görünüm.

İşlemin başlangıcında topoğrafı tarafından arına işaretlenen hat boyunca çelik borular ile delme işlemine başlanır (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Çelik boru şemsiye kemer yönteminden başka bir görünüm.

Çelik borular arına "kılavuz matkap" denilen delici yardımıyla çakılır. Aynı zamanda kılavuz matkabin delme işlemine yardımcı olması amacıyla çelik boruların üzerinde sabit olan delici kısım bulunmaktadır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 Kılavuz matkap ve çelik borunun üzerinde sabit kalan kendi matkabı.

Borulama işleminde öncelikle 6 m'lik çelik borular arına delme işlemi ile çakılır (Şekil 5.12).



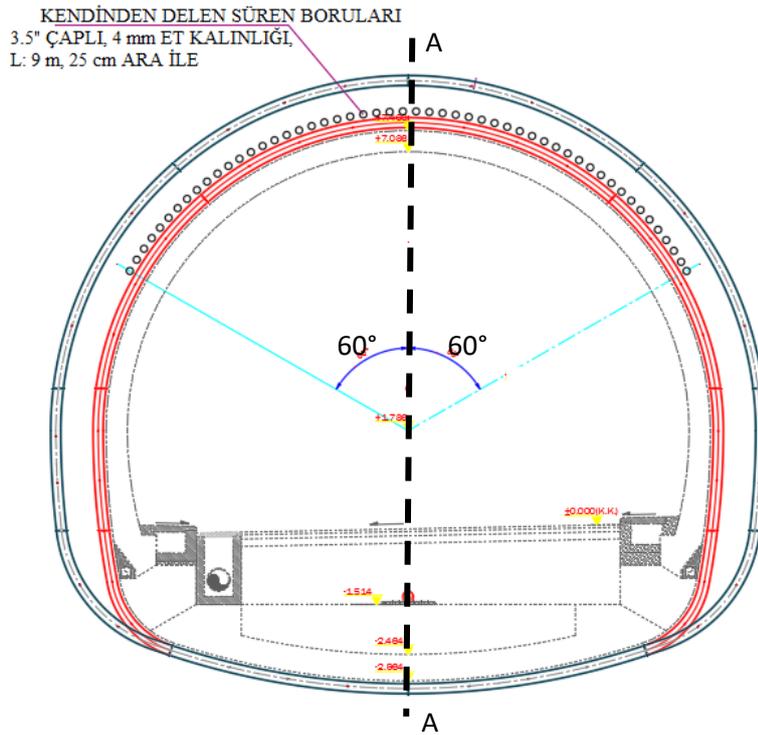
Şekil 5.12 6 m'lik çelik borulardan bir görünüm.

Daha sonra 3 m'lik çelik boru 6 m'lik çelik boruya eklenerek delme işlemine devam edilir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 3 m'lik çelik borulardan bir görünüm.

Borulama işleminde çelik borular tünel eksenine paralel ve kazı arını çevreleyen kaya kütlesi yönünde 6° - 8° 'lik açılarla olacak şekilde arına çakılır. Üzülmez tünellerinde arına toplam 52 adet çelik boru çakılmıştır (Şekil 5.14).

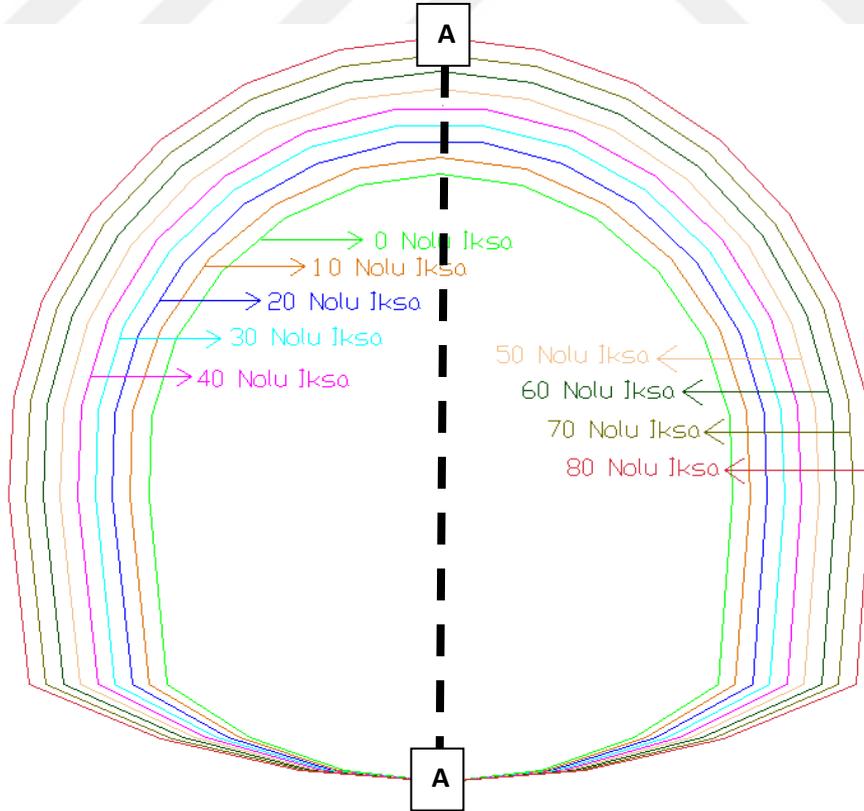


Şekil 5.14 Çelik boru şemsiye kemer yönteminin önden görünümü.

Delme işlemi bittikten sonra çelik boruların içine enjeksiyon basılarak arın ilerlemeye hazır hale gelir.

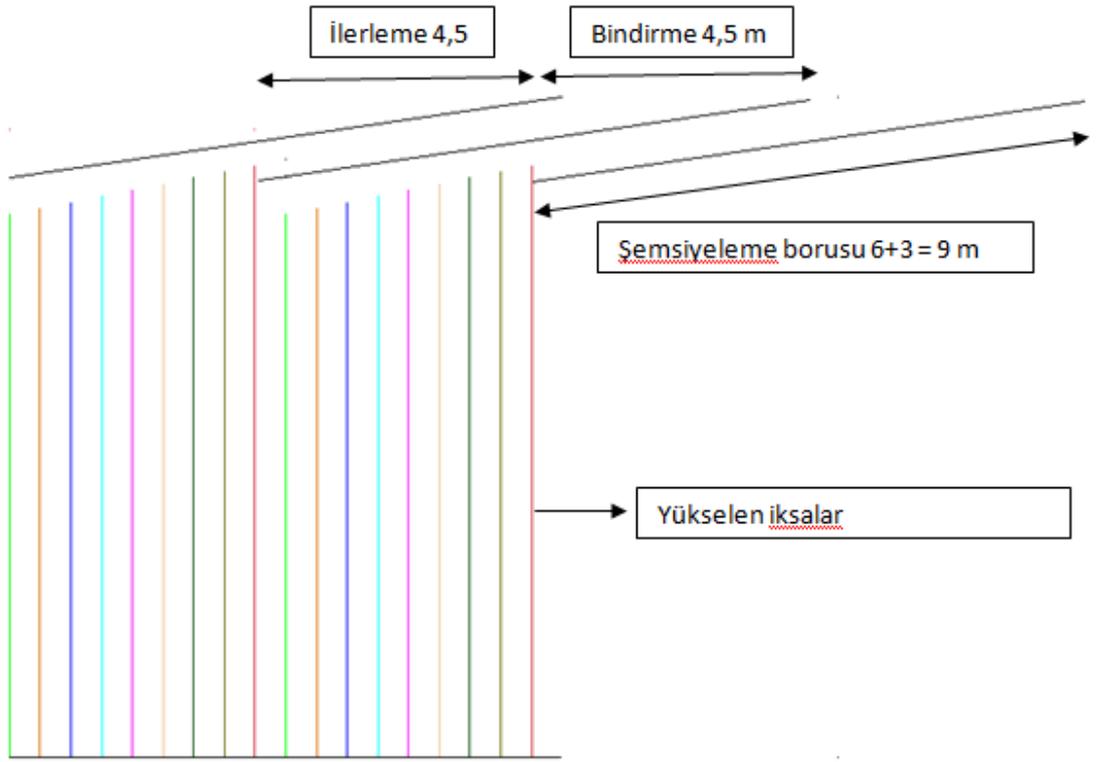


Şekil 5.15 Yükselen demir bağların arına yerleştirilmesinden bir görünüm.



Şekil 5.16 Çelik boru şemsiye kemer yönteminin profilden görünümü.

Arında ilerleme esnasında yükselen demirbağ olarak adlandırılan demir bağlar kullanılmıştır. Bu demirbağlar I 200 türü demirbağlar olup her 50 cm'lik kazıdan sonra arına yerleştirilmektedir. Her demirbağ bir önceki demirbağdan 10 cm daha yüksek ve 10 cm daha geniş olmak üzere toplam 9 tane demirbağ yerleştirildikten (4,5 m ilerlemeden) sonra yeniden çelik boruların çakılma işlemine başlanır (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 Çelik boru şemsiye kemer yönteminin A-A kesitinden görünümü.

5.2 TÜNELLERDE KULLANILAN TAHKİMAT MALZEMELERİ

5.2.1 Demir Bağ (İksa)

Sapça ve Üzülmaz tünellerinde birçok türde demir bağ kullanılmıştır (Şekil 5.18). Bunlar, kanopilerde (giriş çıkışlarda) I 120, B2 kazı tahkimat yönteminde I 140; B3, C2 kazı tahkimat yönteminde I 160, C3 kazı tahkimat yönteminin uygulandığı yerlerde I 200 türünde demir bağ kullanılmıştır (Şekil 5.19).



Şekil 5.18 Demir bağlardan bir görünüm.



Şekil 5.19 Demir bağlardan başka bir görünüm.

5.2.2 Kaya Saplamaları

5.2.2.1 SN Tipi Kaya Saplaması

Kaya saplaması yapmak için açılan deliğin, saplama yerleştirilmeden önce enjeksiyonla doldurulması ve saplamanın daha sonra yerleştirilmesi şeklinde yapılır (Şekil 5.20).

SN kaya saplamaları belirtilen özelliklerdeki nervürlü çelik çubuklardan yapılacak (Şekil 5.21), çevre kaya ile çimento harcı vasıtasıyla tamamen bağlanacaktır. Delik, kaya saplamasının yerleştirilmesinden önce enjeksiyon ile doldurulacaktır. SN kısaltmasının adı, ilk defa kullanıldığı “Stone Norfors” çukurundan gelmektedir (KGM 2013).



Şekil 5.20 SN tipi kaya saplaması uygulamasından bir görünüm.



Şekil 5.21 SN tipi kaya saptamasından bir görünüm.

5.2.2.2 IBO Tipi Kaya Saptaması

İçerisi boru şeklinde olan kaya saptaması ve delici uçtan oluşan IBO kaya saptaması uygulanacağı yüzeye delindikten sonra içerisindeki boşluktan enjeksiyon yapılması şeklinde uygulanır. Kaya saptamasının delici ucu delik içerisinde kalmaktadır (KGM 2013).

Kaya kütesinin dayanımının az olduğu durumlarda saptama deliğinde çökmeler meydana gelmesinden dolayı IBO tipi kaya saptaması tercih edilmektedir. IBO tipi bulonda delme ve çakma işlemleri ayrı ayrı yapılmadığı için yapılan işte zamandan da tasarruf edilmiş olur (Şekil 5.22).

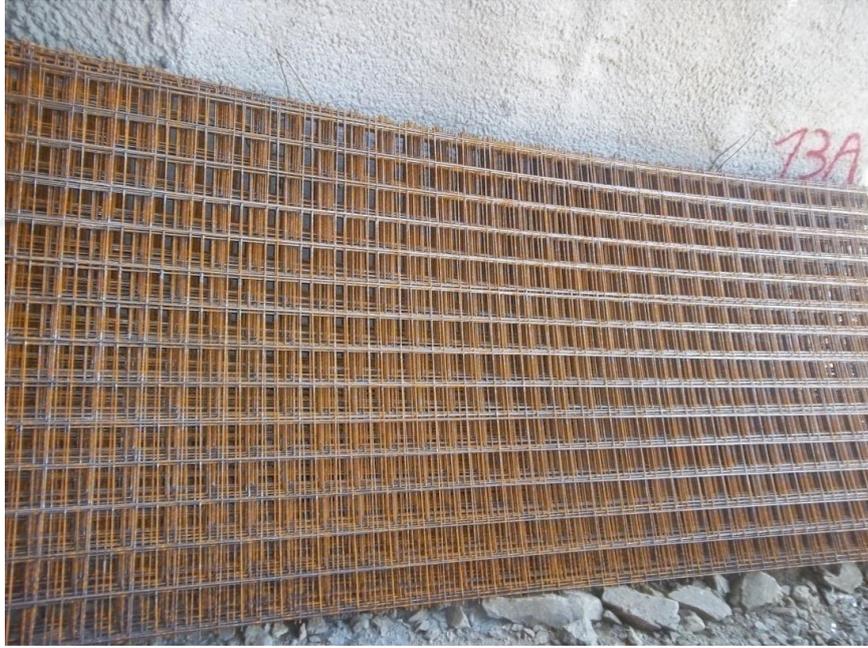
5.2.3 Çelik Hasır

Püskürtme beton tabakalarının düzgün bir yüzey elde edilecek şekilde yapılmasını sağlayan ve donatı olarak ta kullanılan malzemedir (KGM 2013).

Sapça ve Üzülmez tünellerinde Q221/221 türünde çelik hasır kullanılmıştır (Şekil 5.23). Burada Q, hasır üretilirken konulacak demirlerin her dikey ve yatayda eşit olarak konularak kare şeklinde boşlukların elde edilmesini belirtmektedir. 221 ise 1 m uzunlukta kullanılacak demirlerin çapını belirtmektedir.



Şekil 5.22 IBO tipi kaya saplamalarından bir görünüm.



Şekil 5.23 Q221/221 türü çelik hasır.

5.2.4 Püskürtme Beton

Yoğun ve homojen bir kütle oluşturmak üzere uygulanılacağı yere kapalı bir hortum veya tüple iletilip, bir püskürtme ucu (nozül) aracılığıyla yüzey üzerine yüksek hızda püskürtülen çimento-su-agrega veya çimento-su-agrega-kimyasal ve mineral katkı karışımıdır (KGM 2013) (Şekil 5.24). Şekil 5.25'te ise püskürtme beton uygulama anından bir görünüm sunulmuştur.

Püskürtme beton tünellerde, dayanımı zayıf kaya kütlelerinin tahkimat işlemine geçilmeden önce ön tahkimat olarak veya tahkimat işlemi yapıldıktan sonra tahkimat malzemelerini birbirine bağlayarak rijit bir yapı oluşturmak için kullanılır. Sapça ve Üzülmez tünellerinde C20/25 dayanımlı püskürtme beton uygulanmaktadır. Buradaki 20 betonun silindir basınç dayanımını, 25 ise betonun küp basınç dayanımını temsil etmektedir. Tünellerde uygulanan betonun kalınlığı uygulanan kazı tahkimat yöntemine göre 10-30 cm arasında değişiklik göstermektedir.



Şekil 5.24 Püskürtme beton uygulamasından bir görünüm.



Şekil 5.25 Püskürtme beton uygulama anından bir görünüm.

BÖLÜM 6

TÜNELLERİN DURAYLILIK DEĞERLENDİRMELERİ

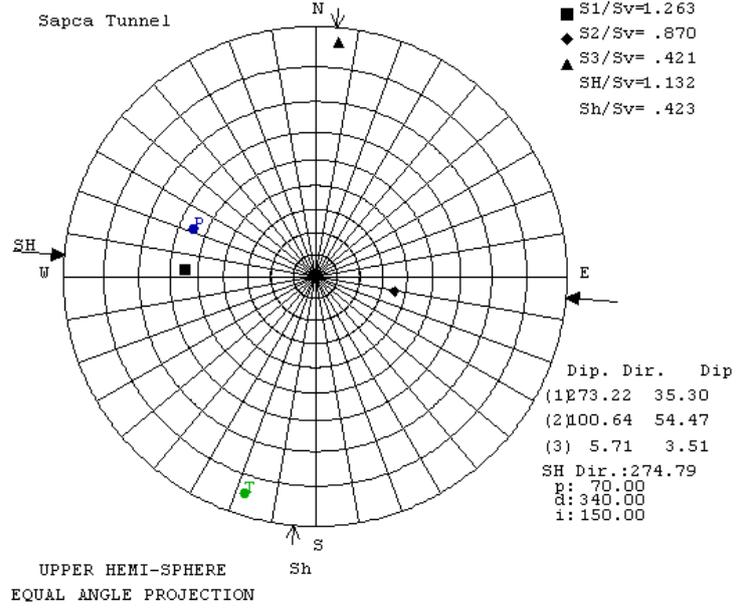
Bu bölümde Sapça ve Üzülmaz tünellerine ait sonlu elemanlar yöntemi esas alınarak sayısal modelleme ile yapılan duraylılık değerlendirmeleri sunulmaktadır.

6.1 BİRİNCİL GERİLME ALANININ TAHMİNİ

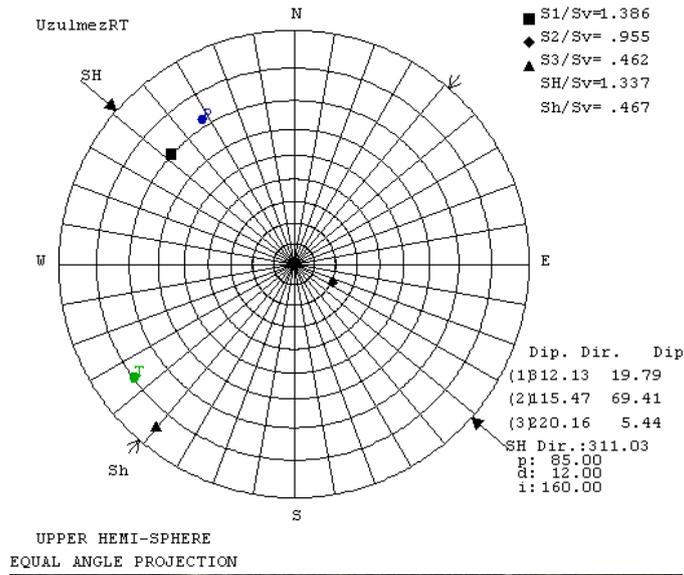
Sayısal çözümlerlerde kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri yanında kazı yapılan ortamdaki birincil gerilme alanı bileşenlerinin bilinmesi de çok önemlidir. Birincil gerilme alanının doğru tanımlanmadığı durumlarda sayısal çözümlerden elde edilecek bulgular tartışmalı hale gelmektedir. Birincil gerilmelerin en sağlıklı elde edilebilmesi doğrudan arazi ölçümleri ile sağlanabilmektedir. Arazi ölçüm yöntemlerinin pahalı olması ve zaman alması nedeniyle çok büyük projeler dışında uygulama bulmamaktadır. Çalışma yapılan sahalarda herhangi bir ölçüm bulunmaması nedeniyle bazı birincil gerilme tahmin yöntemlerinin kullanılması hiçbir veri bulunmaması durumunda kullanılabilir. Bu çalışmada Aydan (2000) tarafından önerilen fay çiziği ölçümlerinin matematiksel çözümleri ile bulunan yöntem kullanılmıştır (Geniş ve Derin 2016).

Yapılan hesaplamalar sonucu ortamdaki birincil gerilme oranları: Sapça tüneli yaklaşık olarak D-B doğrultusunda açılmış olup en büyük yatay birincil gerilme doğrultusu yaklaşık olarak tünel güzergahı doğrultusunda etkimektedir ($k_z=P_H/P_v=1.13$). En küçük yatay birincil gerilmeler oranı ise $k=P_H/P_v=0.42$ olarak bulunmuştur (Şekil 6.1) (Geniş ve Derin 2016).

Üzülmaz tüneli doğrultusu KB-GD doğrultusunda olup yataydaki en büyük birincil gerilme doğrultusu yaklaşık olarak tünel güzergahı doğrultusunda etkidiği tahmin edilmiştir. En büyük yatay birincil gerilme oranı $k_z=P_H/P_v=1.34$ ve en küçük yatay birincil gerilme oranı ise $k=P_H/P_v=0.47$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.2) (Geniş ve Derin 2016).



Şekil 6.1 Sapca tüneli için birincil gerilme tahmini.



Şekil 6.2 Uzulmez tüneli için birincil gerilme tahmini ve ölçüm yapılan fay aynası.

6.2 SAYISAL MODELLEME ÇÖZÜMLEMELERİ

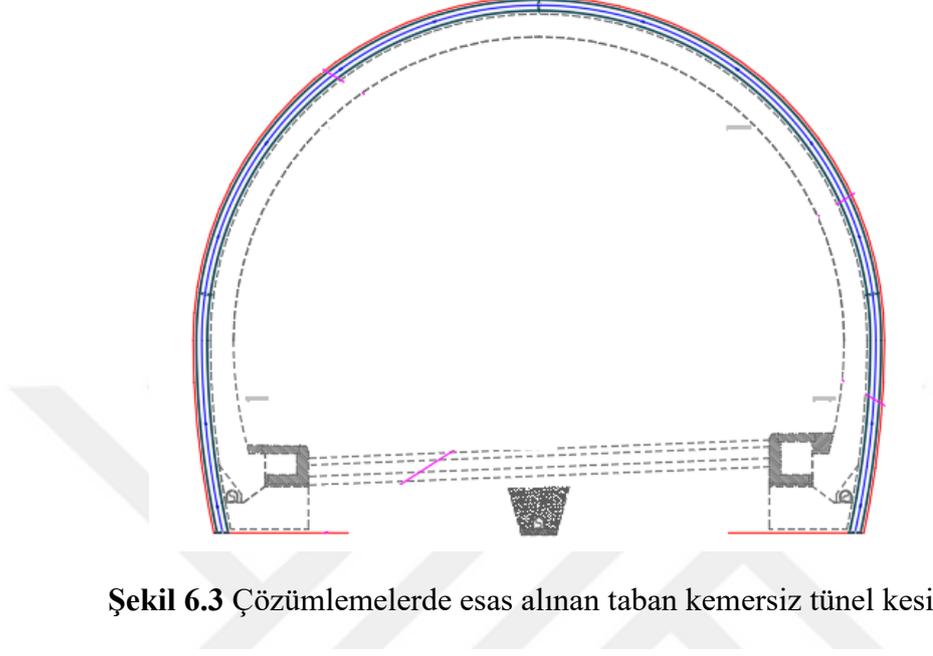
Sapça ve Üzülmez tünellerinin çözümlenmesinde iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sayısal gerilme çözümleri için PHASE2 (v8.0) (Rocscience 2007) bilgisayar programı kullanılmıştır. Söz konusu programın kullanımı kolay olduğu için mühendislik projelerinde oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Program, sonlu elemanlar yöntemine dayalı zemin veya kaya ortamında yapılan yeraltı ve yerüstü yapıları için gerilme çözümleri yapabilmektedir. Ayrıca program şev duraylılığı ve yeraltı suyu geçirimsizlik analizlerinde de kullanılmaktadır. Düzlem birim şekil değiştirme durumunun geçerli olduğu durumlarda iki boyutlu (tünel gibi) ve eksenel simetri durumuna sahip açıklıklar (büyük ölçekli yeraltı odaları gibi) için kısmen üç boyutlu gerilme çözümleri hem statik hem de dinamik koşullar için yapılabilmektedir. Karmaşık ve çok aşamalı kazı ve tahkimat modellemeleri istenilen sayıda aşama ile oluşturulabilmekte ve kullanıcı dostu olması nedeniyle de oldukça hızlı modelleme ve sonuç alınabilmektedir. Püskürtme beton, beton, çeşitli tür kaya saplama, çelik tahkimat ve bunların kombinasyonları gibi tahkimat seçeneği sağlayarak tasarımcıya projeye uygun tahkimat elemanları seçiminde ve tahkimatın duraylılık için yeterliği konusunda hızlı bir öneri sağlayabilmektedir. PHASE2 programında kaya kütesinin hem elastik hem de çeşitli yenilme ölçütleri kullanılarak elasto-plastik malzeme davranışları modellenmektedir. Elasto-plastik malzeme davranışları için Mohr-Coulomb, Hoek-Brown ve Drucker-Prager yenilme ölçütleri kullanılabilir (Geniş ve Derin 2016).

Bu proje kapsamında Sapça tüneli için 1, 2, 3, 4 ve 5 no.lu, Üzülmez tünelleri için 1, 2, 3 ve 4 no.lu kesitler incelenmiştir.

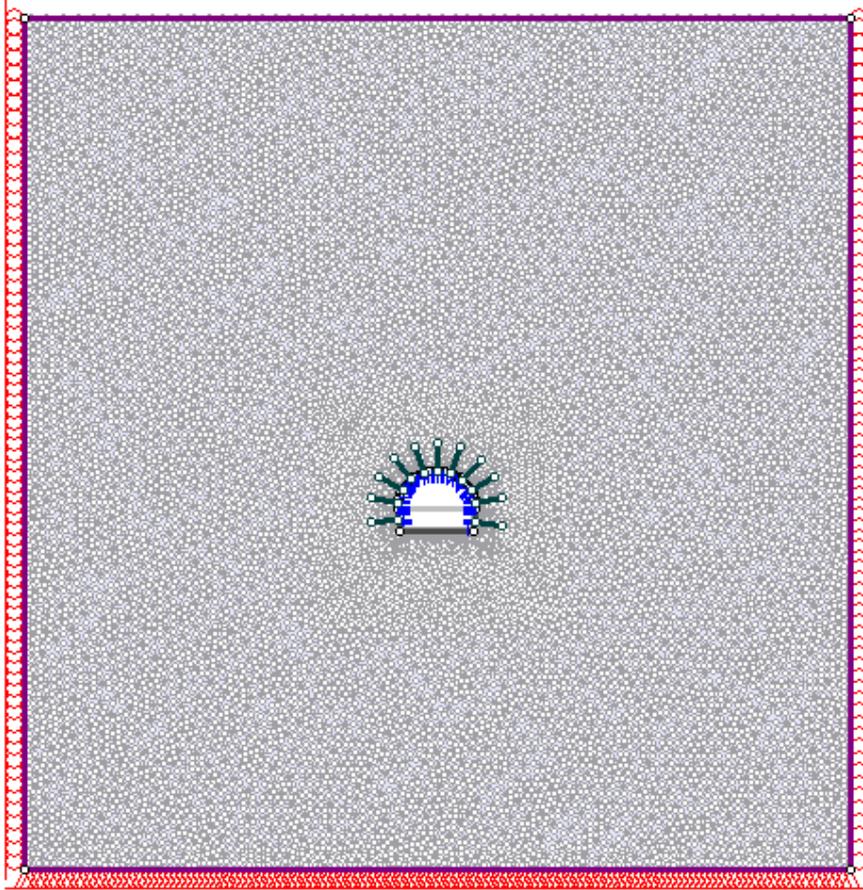
6.2.1 Açıklık Geometrisi ve Sınır Koşulları

Sapça ve Üzülmez tünelleri genişliği 11 m, yüksekliği 8 m olan taban kemersiz, at nalı kesite sahiptir (Şekil 6.3). Tüneller için oluşturulan sonlu elemanlar ağı dörtgen elemandan oluşmaktadır. Model sınırı, kazı ile oluşan ikincil gerilme alanının sınır koşullarından etkilemeyecek kadar uzaklıkta seçilmiştir. Ayrıca, modelin dış sınırındaki tüm noktalar yatay ve düşey doğrultularda yer değiştirmeye izin vermeyecek şekilde sabitlenmiştir (Geniş ve Derin 2016).

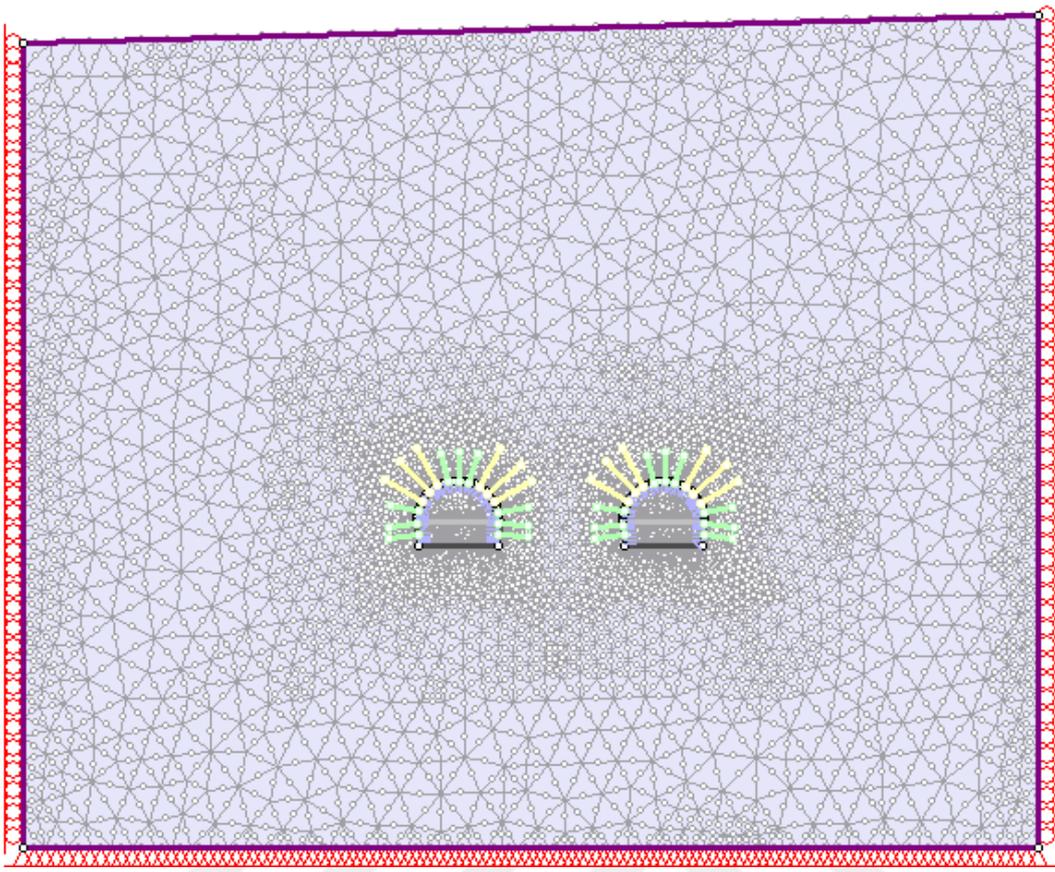
Sapça tüneli tek tüp kazısı yapıldığından tek tünel kazısı olarak, Üzülmez tüneli ise çift tüp olarak modellenmiştir. Sapça tüneli için sonlu elemanlar ağı Şekil 6.4’de ve Üzülmez tünelleri için sonlu elemanlar ağı Şekil 6.5’te verilmiştir (Geniş ve Derin 2016).



Şekil 6.3 Çözümlemelerde esas alınan taban kemersiz tünel kesiti.



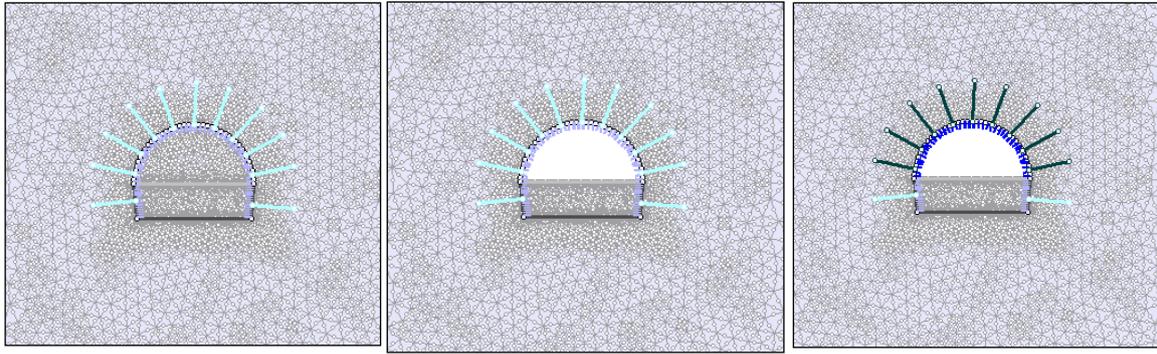
Şekil 6.4 Sapça tüneli için sonlu elemanlar ağı.



Şekil 6.5 Üzülmez tüneli için sonlu elemanlar ağı.

6.2.2 Modelleme Aşamaları

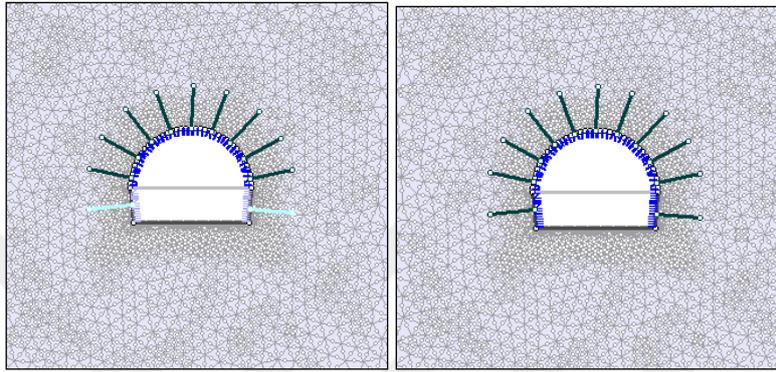
Sapça ve Üzülmez tünellerinde kazı ve tahkimat uygulamalarının modellenmesi aşamalı olarak uygulanmıştır. Sapça tüneli için 5 ve Üzülmez tüneli için 9 aşamada modelleme yapılmıştır. Sapça tüneli için modellemenin 1. aşamasında yerçekimi etkisi altında birincil gerilmelerin oluşması sağlanmıştır. 2. aşamada tünelin üst yarı kazısı yapılmıştır. 3. aşamada tünelin üst yarısının tahkimatı (kaya saplamaları ve püskürtme beton) yapılmıştır. 4. aşamada tünelin alt yarı kazısı ve takiben 5. aşamada ise alt yarı tahkimatı yapılmıştır (Şekil 6.6). Üzülmez tüneli için çift tüp kazı modellendiği için Sapça tüneli modellemesinden farklı olarak kazı ve tahkimat aşaması sayısı artış göstermiştir. Modellemenin ilk 5 aşaması Sapça tüneli için uygulanmıştır. 5. ve 9. aşamalar arası Üzülmez tünelinin paralel kazısı için 2. ve 5. aşamalara benzer şekilde uygulanmıştır (Geniş ve Derin 2016).



a) 1. aşama

b) 2. aşama

c) 3. aşama

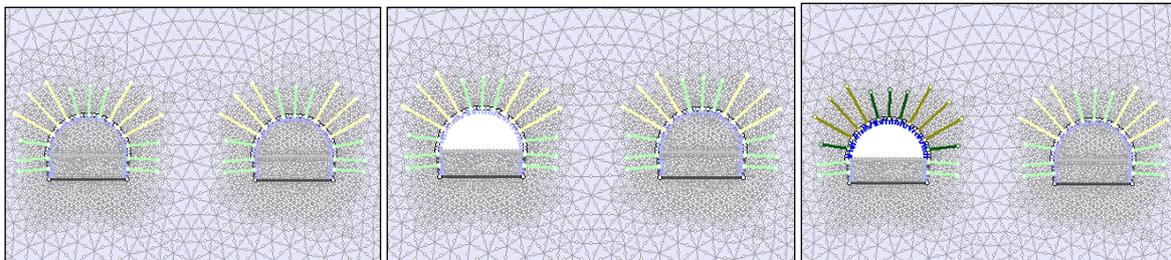


d) 4. aşama

e) 5. aşama

Şekil 6.6 Sapça tüneli sayısal çözümleme aşamaları.

Üzülmez tüneli için modellemenin 1. aşamasında yerçekimi etkisi altında birincil gerilmelerin oluşması sağlanmıştır. 2. aşamada sol tüp tünelin üst yarı kazısı yapılmıştır. 3. aşamada ise sol tüp tünelin üst yarısının tahkimatı (kaya saplamaları ve püskürtme beton) yapılmıştır. 4. aşamada sağ tüp tünelin üst yarı kazısını takiben 5. aşamada da sağ tüp tünelin üst yarı tahkimatı yapılmıştır. 6. aşamada tünelin sol tüp alt yarı kazısı ve takiben 7. aşamada ise sol tüp alt yarı tahkimatı yapılmıştır. Bunları takiben 8. ve 9. aşamalarda sağ tüp alt yarının kazısı ve tahkimatı uygulanmıştır (Şekil 6.7) (Geniş ve Derin 2016).

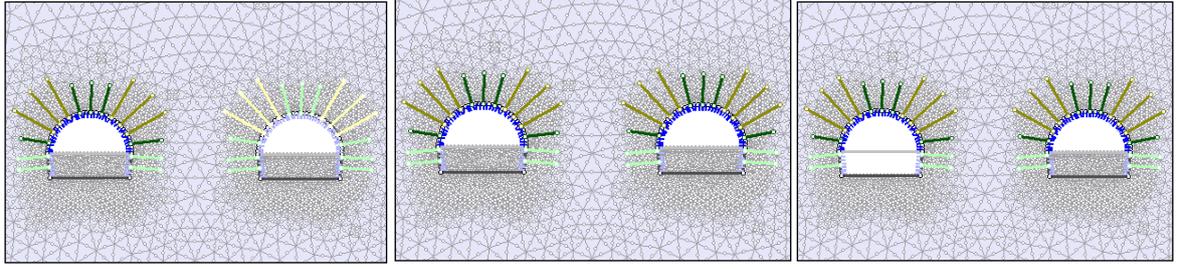


a) 1. aşama

b) 2. aşama

c) 3. aşama

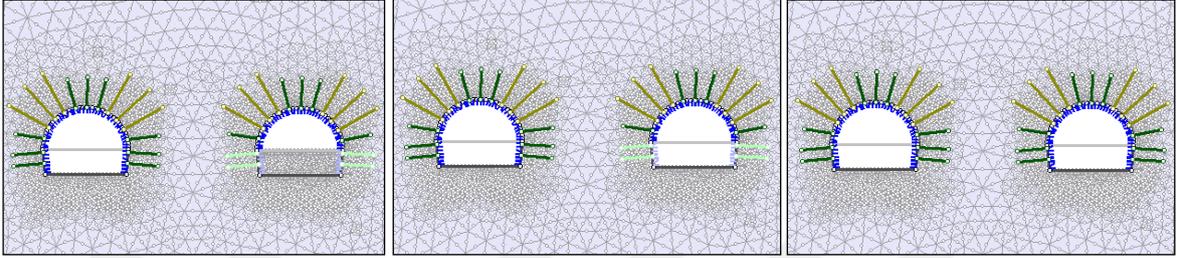
Şekil 6.7 Üzülmez tüneli sayısal çözümleme aşamaları.



d) 4. aşama

e) 5. aşama

f) 6. aşama



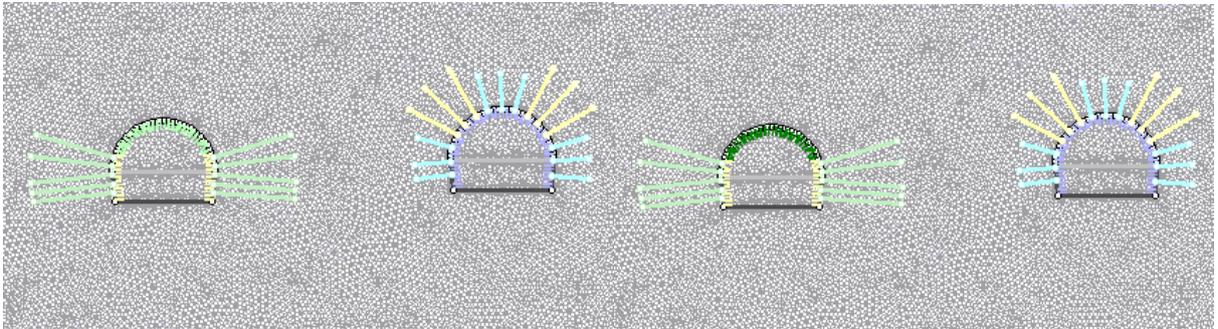
g) 7. aşama

h) 8. aşama

i) 9. aşama

Şekil 6.7 (devam ediyor).

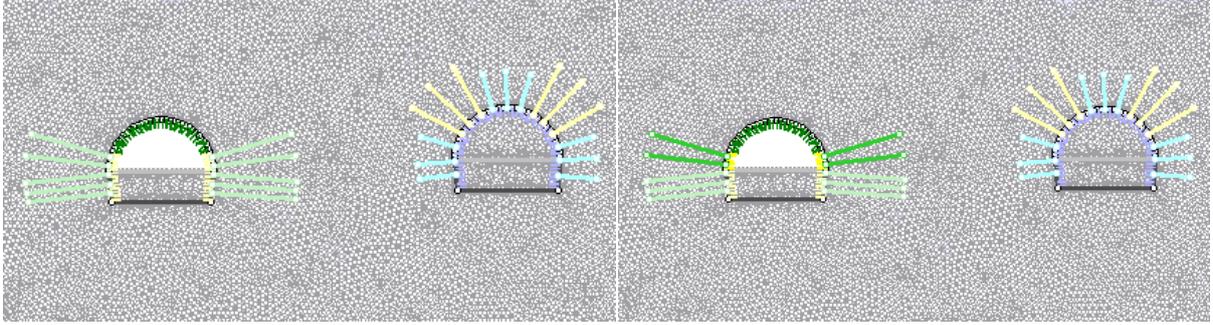
Üzülmez tünelleri sayısal gerilme analizleri için incelenen 4. kesitte ise Üzülmez Sol Tüneli'nde karayolları teknik şartnamesinin önermiş olduğu C3 kazı tahkimat sistemi uygulanmıştır. Bu kazı tahkimat sisteminde çelik boru şemsiye kemer uygulaması olduğu için 4. kesit için yapılan çözümler 10 aşamadan oluşmuştur. Üzülmez tüneli 4. Kesiti için yapılan modellemenin 1. aşamasında yerçekimi etkisi altında birincil gerilmelerin oluşması sağlanmıştır. 2. aşamada sol tünel tavanına çelik boru şemsiye kemer uygulaması yapılmıştır. 3. aşamadan itibaren 10. aşamaya kadar yapılan modelleme aşamaları ise daha önceden anlatılan Üzülmez tüneli modellemesinin aynısıdır.



a) 1. aşama

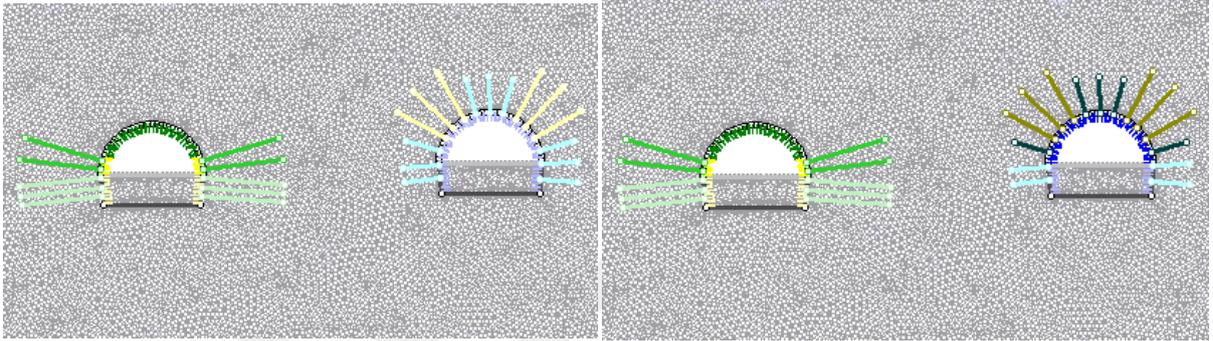
b) 2. aşama

Şekil 6.8 Üzülmez tüneli 4. kesit için sayısal çözümleme aşamaları.



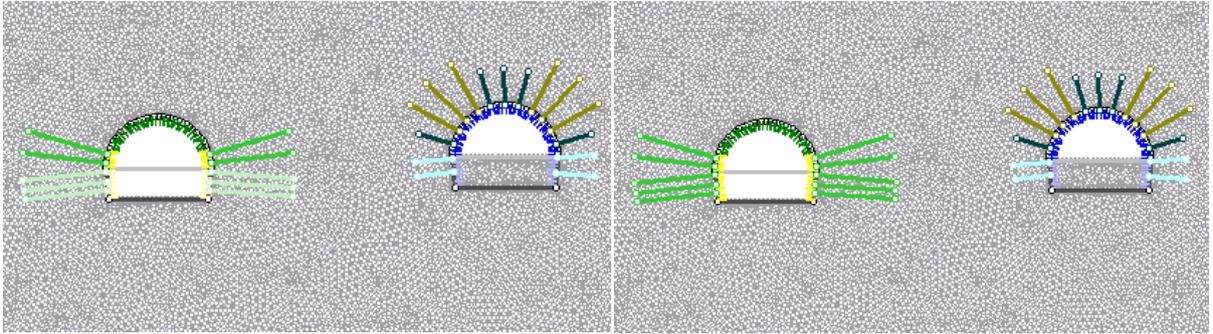
c) 3. aşama

d) 4. aşama



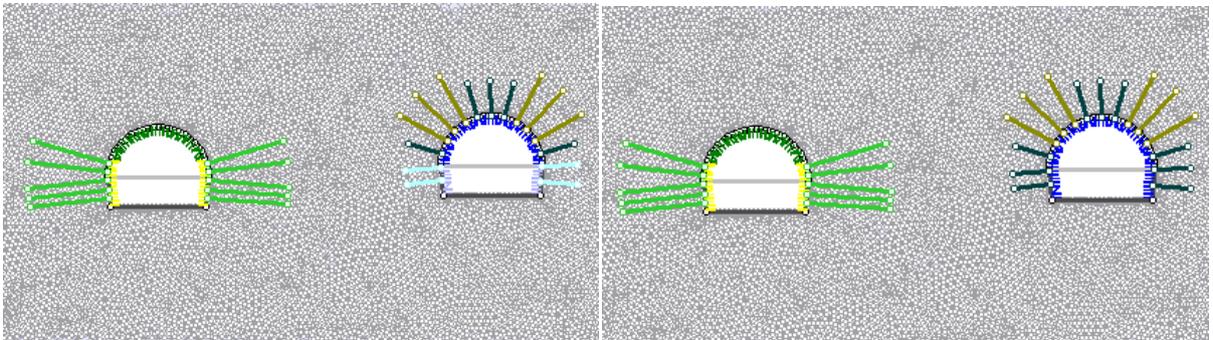
e) 5. aşama

f) 6. aşama



g) 7. aşama

h) 8. aşama



i) 9. aşama

j) 10. aşama

Şekil 6.8 (devam ediyor).

6.2.3 Yük Dağılımı ve Tahkimatın Modellenmesi

NATM yönteminin temel esaslarından olan birden fazla kazı aşaması ile yapılan tünellere uygulanacak tahkimatın sayısal modellenmesinde yük dağılımının uygulanması gerekmektedir. Aşamalı kazılarda arazi tahkimat etkileşimi göz önünde bulundurulduğunda kazı ile tahkimatın yük almaya başlaması arasında arazi bir miktar deformasyona uğramaktadır. Sayısal çözümlemede kullanılan aşamalı tahkimat modellemesi yapılan çözümlerde “yük dağılımı” işlevi kullanılarak yukarıda açıklanan durum modellenmiştir. Bu işlev ile tahkimat kurulana kadar geçen sürede birincil gerilmelerin kaya kütlelerinde oluşturacağı şekil değiştirmesinin ne kadarlık bölümünün etkin olduğu oransal olarak girilmektedir. Geniş ve Acun (2015) çalışmalarında sayısal çözümlerinde kullanılan yük dağılımını tahkimat kurulana kadar olan birinci aşama için %70-75 ve tahkimat kurulduktan sonraki aşama için de %25-30 arasında kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada tahkimat kurulana kadar olan birinci aşama için %70 ve tahkimat kurulduktan sonraki aşama için de %30 arasında yük dağılımı uygulanmıştır. Her bir kazı tahkimat uygulamasından sonraki kazı aşaması başlamadan önce ortamdaki birincil gerilmeler sayısal olarak yeniden oluşturulmuştur. Kazı arını aşamalı kazıldığı için her bir kazı ve tahkimat uygulamasında aynı kazı oranları uygulanmıştır (Geniş ve Derin 2016).

6.3 DURAYLILIK DEĞERLENDİRMELERİ

Sapça tüneli için 5 kesitte ve Üzülmaz tünelleri için 4 kesitte duraylılık değerlendirmeleri yapılmıştır. Tüm girdi parametrelerinin detayları önceki bölümlerde verilmiştir. Bir önceki bölümde detayları anlatılan çözümleme aşamalarının tüm sonuçları burada verilmemiştir. Sonuçlarda genellikle kazı öncesi, üst yarı kazısının tahkimatı yapıldıktan sonra ve son kazı aşamaları ele alınmıştır.

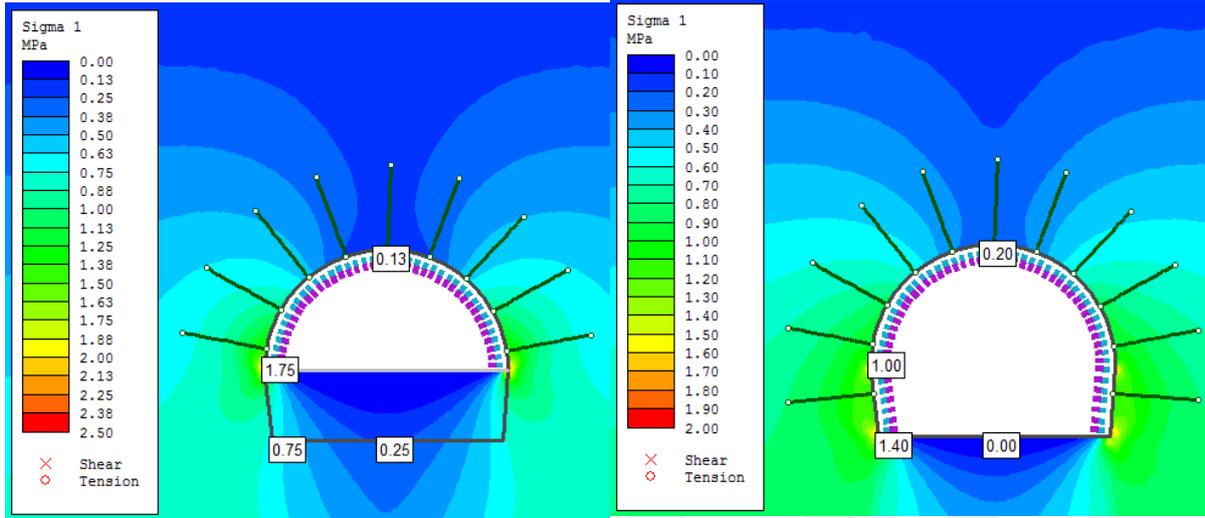
6.3.1 Sapça Tüneli Duraylılık Değerlendirmeleri

6.3.1.1 Sapça Tüneli 1 no.lu kesit

Sapça tünelinin 19+994-20+010 kilometreleri arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümlemesi yapılmıştır. Şekil 6.9'da en büyük asal gerilme dağılımları gösterilmiştir. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 16 m olduğu bu bölgede üst yarı tahkimatı sonucunda en büyük asal gerilmeler açıklık tavanında 0.13 MPa ve açıklık köşe tabanında en yüksek değerini alarak 1.75 MPa olduğu bulunmuştur (Şekil 6.9 a).

Alt yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en büyük birincil gerilme değeri 1.40 MPa, açıklık tabanında 0 MPa ve açıklık tavanında ise 0.20 MPa olmuştur.

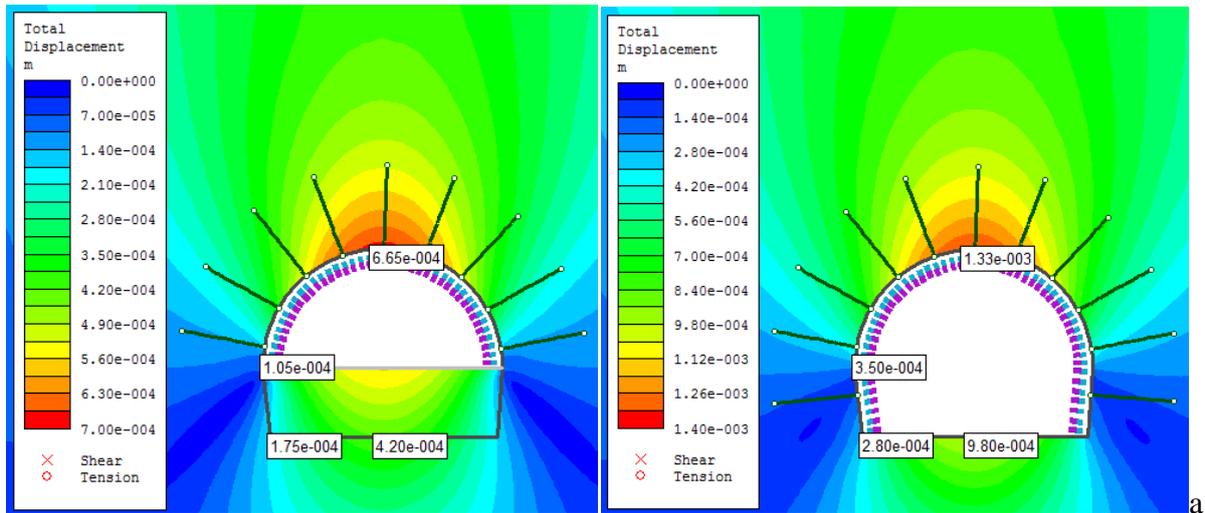
Toplam yerdeğiştirme miktarları üst yarı kazısı sonucu tavanda 0.67 mm ve alt yarı kazısı sonucunda da 1.3 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.10). Açıklık açıldıktan sonra kaya kütlelerinde yenilme bölgeleri oluşmadığı gözlemlenmiştir.



a) Üst yarı tahkimatı sonrası.

b) Alt yarı tahkimatı sonrası.

Şekil 6.9 Sapça 1. kesit en büyük asal gerilme dağılımı.



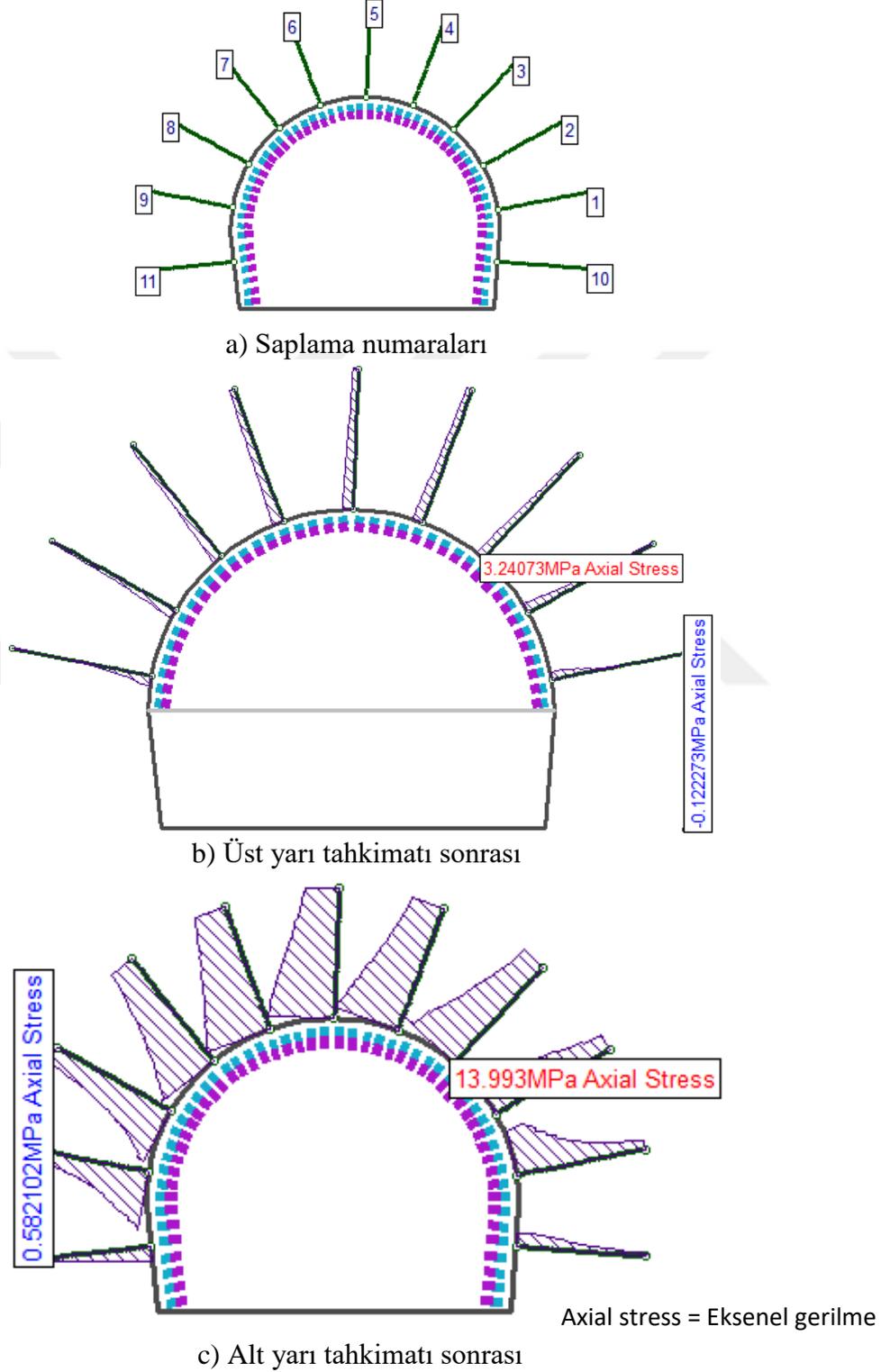
a) Üst yarı tahkimatı sonrası

b) Alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.10 Sapça tüneli 1. kesiti toplam yerdeğiştirme miktarı.

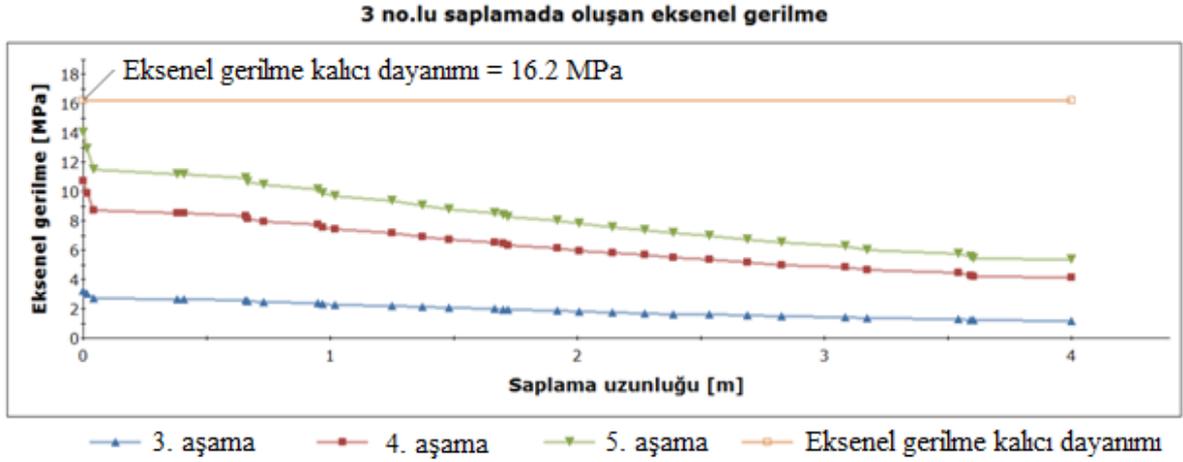
Sapça tüneli 1 no.lu kesitinde uygulanan kaya saptaması ve püskürtme betonda herhangi bir yenilme gözlenmemiştir. Saplamanın aksenal gerilme dayanımı 243.6 MPa ve aksenal

gerilme kalıcı dayanımı 16.2 MPa'dır. Üst yarı kazısı sonucu tünel tavanında bulunan 3 no.lu saplamada en büyük eksenel gerilme 3.2 MPa ve alt yarı kazısı sonucu 13.9 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.11).



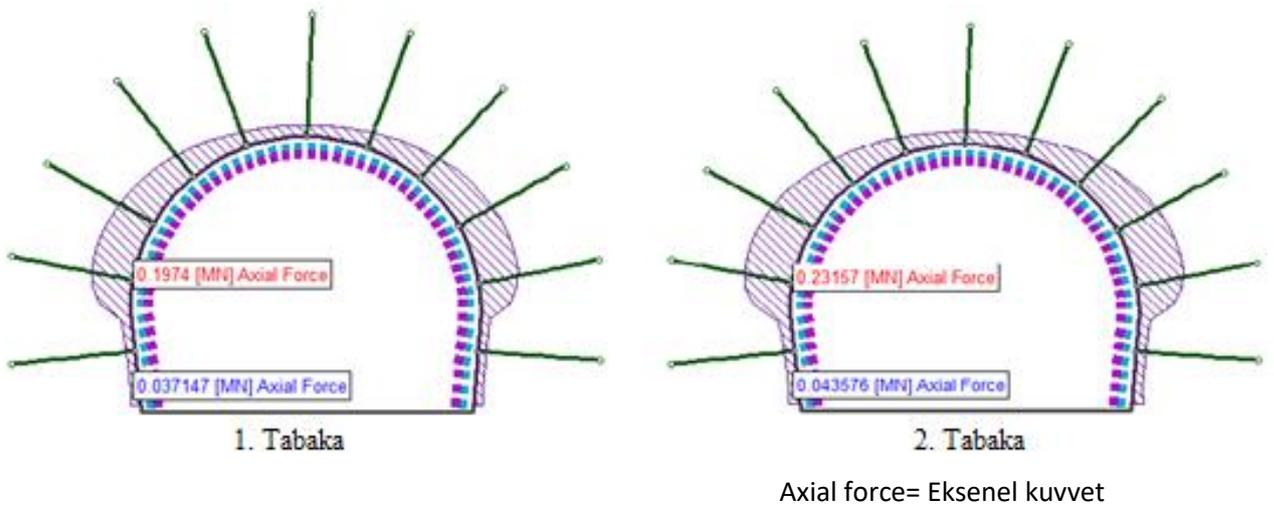
Şekil 6.11 Sapça tüneli 1. kesiti saplamalarda oluşan eksenel gerilme dağılımları.

En yüksek aksel gerilmenin oluştuğu 3 no.lu saplama oluşmuş aksel gerilme dağılımlarının saplama uzunluğu boyunca gösterimi üst yarı tahkimatı sonrası (aşama 3), alt yarı kazısı sonrası (aşama 4) ve alt yarı kazısı tahkimatı sonrası (aşama 5) durumlar için Şekil 6.12'de gösterilmiştir. Oluşmuş aksel gerilme dayanımlarının saplama taşıyabileceği aksel gerilme değerlerinin altında kaldığından, saplama her hangi bir yenilme oluşmamıştır.



Şekil 6.12 3 no.lu saplama oluşmuş aksel gerilme dağılımları.

Çelik hasır+püskürtme beton (1. tabaka) ve demirbağ+püskürtme beton tabakalarında (2. tabaka) oluşmuş aksel kuvvet dağılımları Şekil 6.13'te gösterilmiştir. En büyük aksel kuvvet, demirbağ+püskürtme beton tabakasında açıklığın sağ ve sol üst bölümlerinde oluşmuştur .

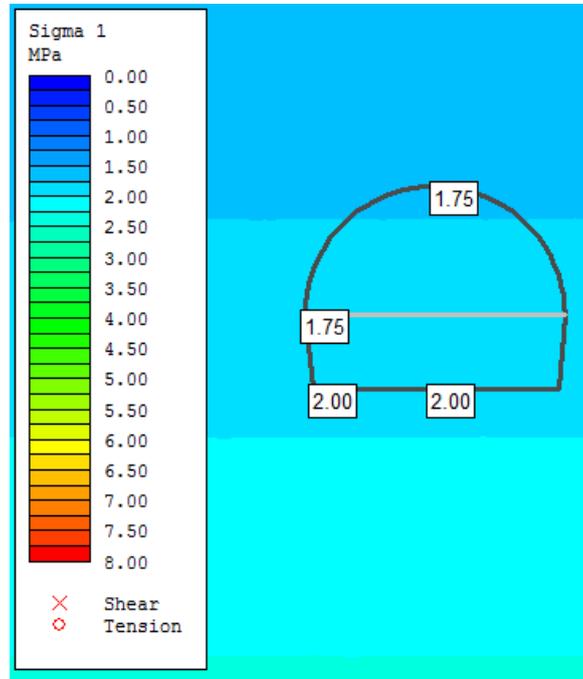


Şekil 6.13 Tünel kaplamasında oluşmuş aksel kuvvet dağılımları (MN) (aşama 5 için).

6.3.1.2 Sapça Tüneli 2 no.lu kesit

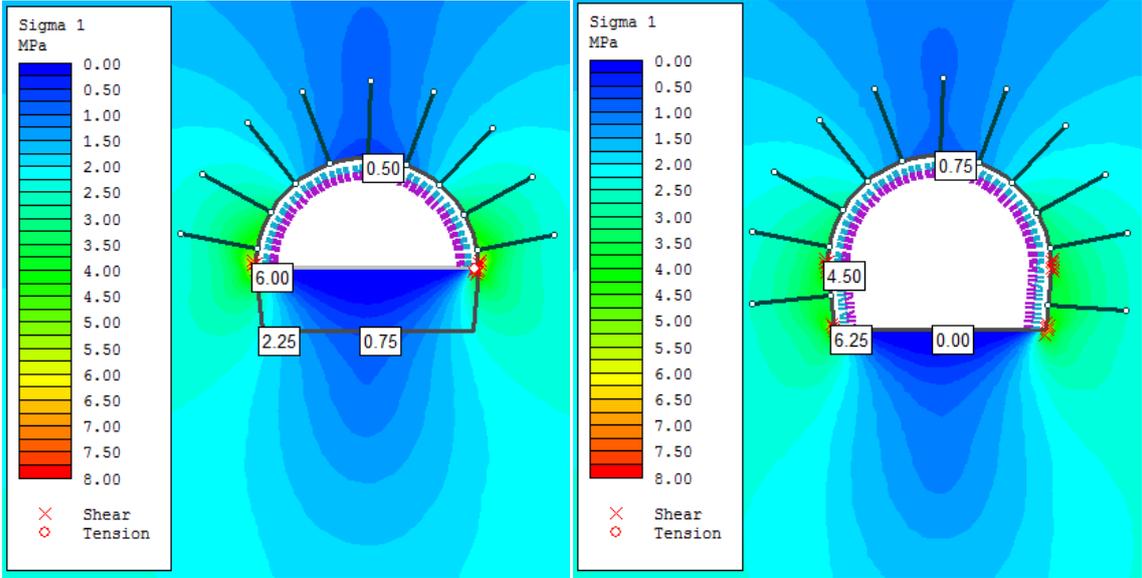
Sapça tünelinin 20+138.2-20+148.5 kilometreleri arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümlenmesi yapılmıştır. Şekil 6.14'te en büyük asal gerilme dağılımları gösterilmiştir. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 80 m olduğu bu bölgede açıklığın bulunduğu seviyede en büyük asal gerilme 2 MPa civarında ve en küçük asal gerilme ise 0.75 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.14 a ve 6.15 a). Üst yarı kazısı sonucunda en büyük asal gerilmeler açıklık tavanında 0.50 MPa ve açıklık köşe tabanında en yüksek değerini alarak 6 MPa olduğu bulunmuştur (Şekil 6.14 b). Benzer bir sonuç aynı bölge için en küçük asal gerilmelerin dağılımında da elde edilmiştir (Şekil 6.15 b). En büyük ve en küçük asal gerilmenin tünelin yan duvarlarında yüksek olmasının nedeni düşey birincil gerilmenin yatay birincil gerilmeden yüksek olmasıdır. Gerilme akıları tünelin yan duvarlarında diğer bölgelere göre daha yüksek gerilmelere neden olmaktadır. En küçük asal gerilme açıklık tabanında çekme gerilmelerine dönüşmüştür (-0.75 MPa) (Şekil 6.15 b) (Geniş ve Derin 2016).

Alt yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en büyük birincil gerilme değeri 6.25 MPa, açıklık tabanında 0 ve açıklık tavanında ise 0.75 MPa olmuştur (Şekil 6.14 c). En küçük asal gerilme açıklık tabanında -0.5 MPa çekme gerilmesi oluşmuştur (Şekil 6.15 c) (Geniş ve Derin 2016).



a) Kazı öncesi

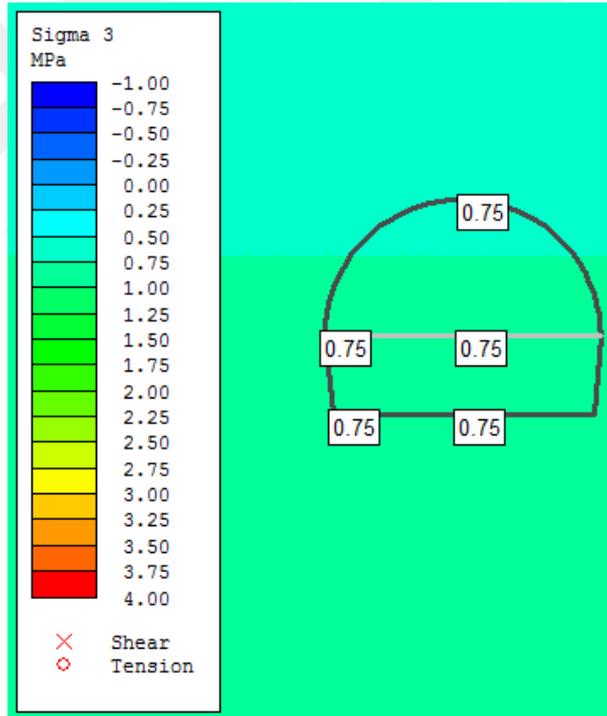
Şekil 6.14 Sapça 2. kesit en büyük asal gerilme dağılımı.



b) Üst yarı tahkimatı sonrası

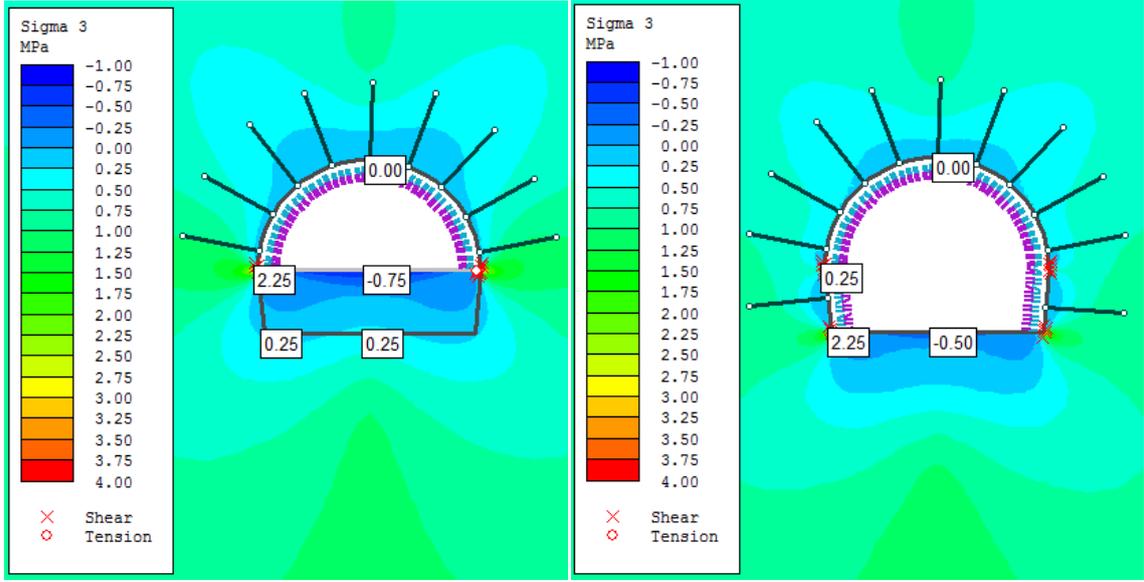
c) Alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.14 (devam ediyor)



a) Kazı öncesi

Şekil 6.15 Sapça 2. kesit en küçük asal gerilme dağılımı.

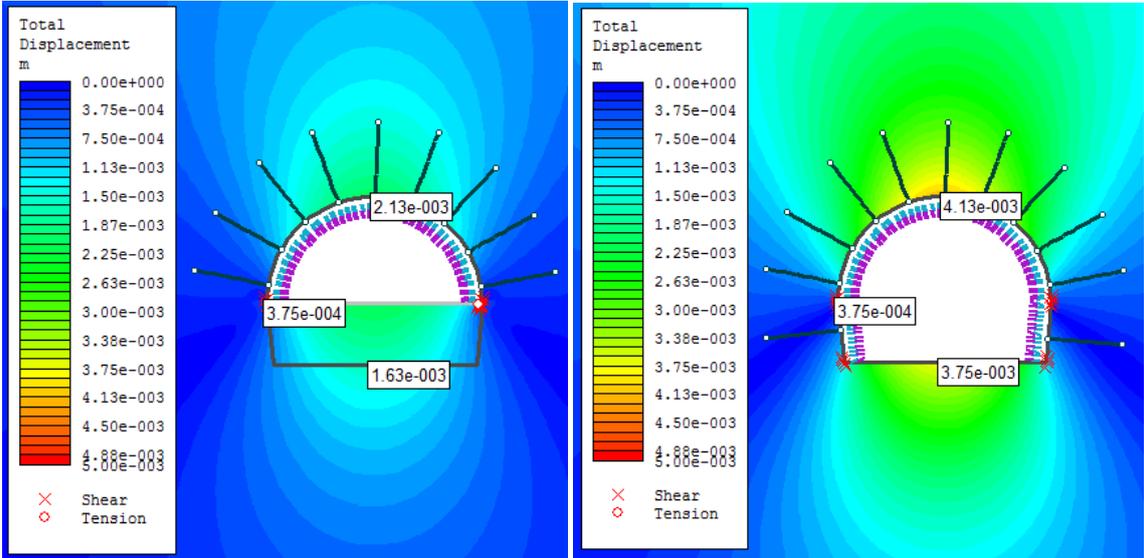


b) Üst yarı tahkimatı sonrası

c) Alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.15 (devam ediyor)

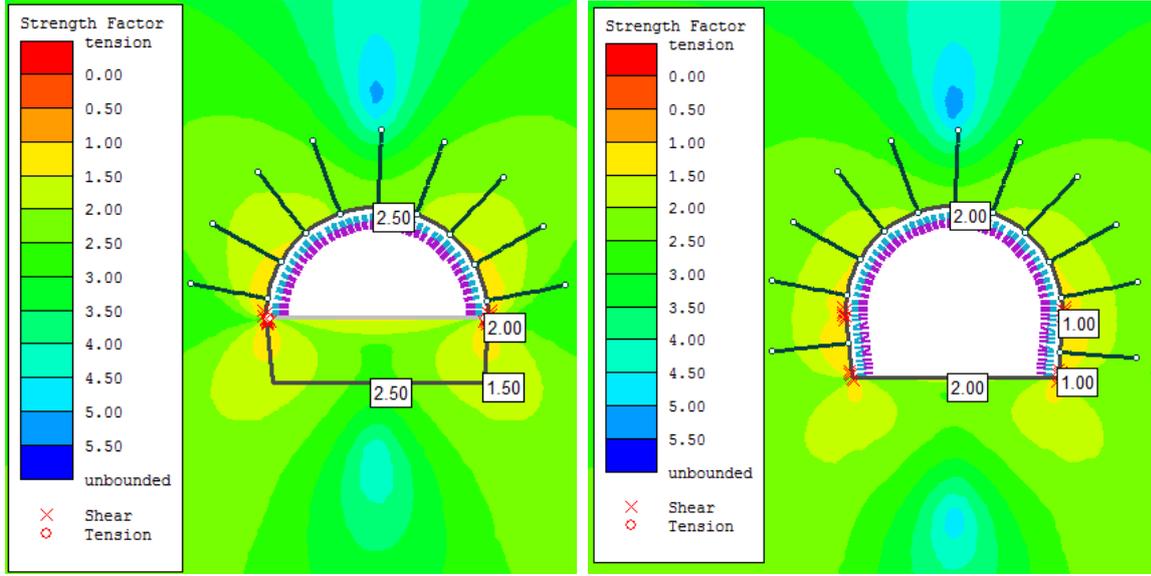
Toplam yerdeğiştirme miktarları alt yarı kazısı sonucu tavanda 2.1 mm ve alt yarı kazısı sonucunda da 4.1 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.16). Açıklık açıldıktan sonra kaya kütlelerinde oluşan yenilme bölgeleri açıklığın taban köşelerinde oldukça sınırlı bölgede oluşmuştur. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri ve dayanım faktörleri Şekil 6.17'de gösterilmiştir (Geniş ve Derin 2016).



a) Üst yarı tahkimatı sonrası

b) Alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.16 Sapça tüneli 2. kesiti toplam yerdeğiştirme miktarı.

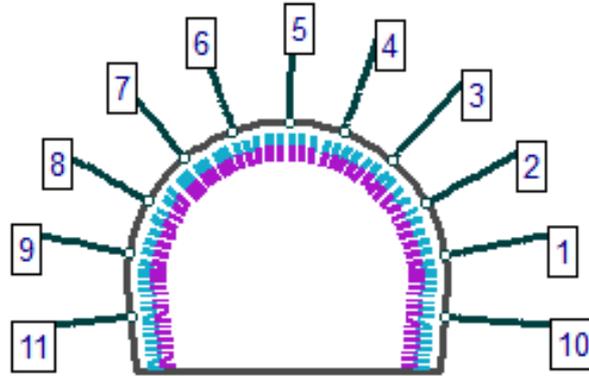


a) Üst yarı tahkimatı sonrası

b) Alt yarı tahkimatı sonrası

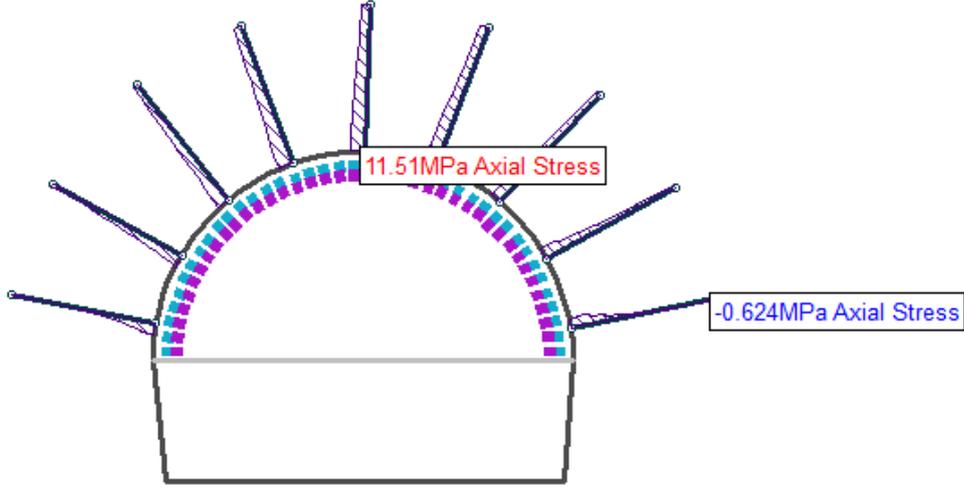
Şekil 6.17 Sapça tüneli 2. kesiti güvenlik katsayısı.

Sapça tüneli 2. kesitinde uygulanan kaya saptaması ve püskürtme betonda herhangi bir yenilme gözlenmemiştir. Saptamanın aksenal gerilme dayanımı 243.6 MPa ve aksenal gerilme kalıcı dayanımı 16.2 MPa'dır. Üst yarı kazısı sonucu 5 no.lu saptamada en büyük aksenal gerilme 11.5 MPa ve alt yarı kazısı sonucu 50.9 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.18) (Geniş ve Derin 2016).

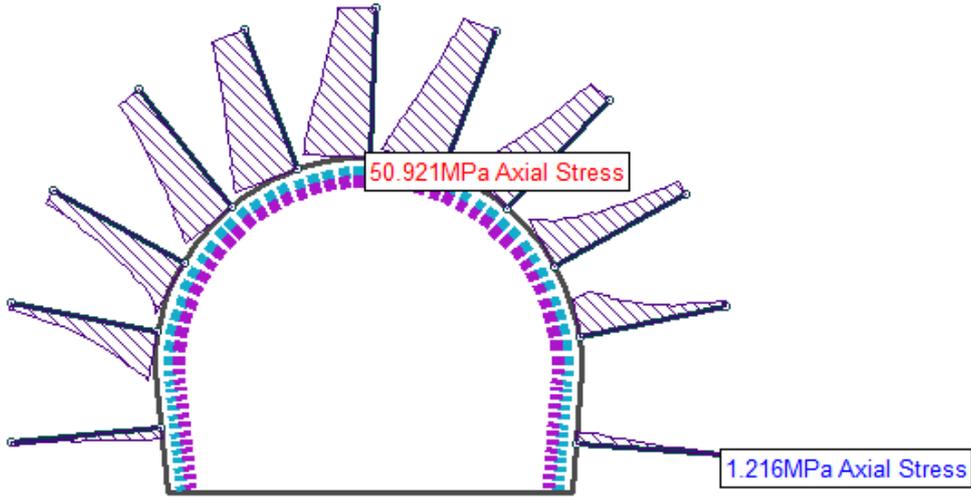


a) Saptama numaraları

Şekil 6.18 Sapça tüneli 2. kesiti saptamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.



b) Üst yarı tahkimatı sonrası

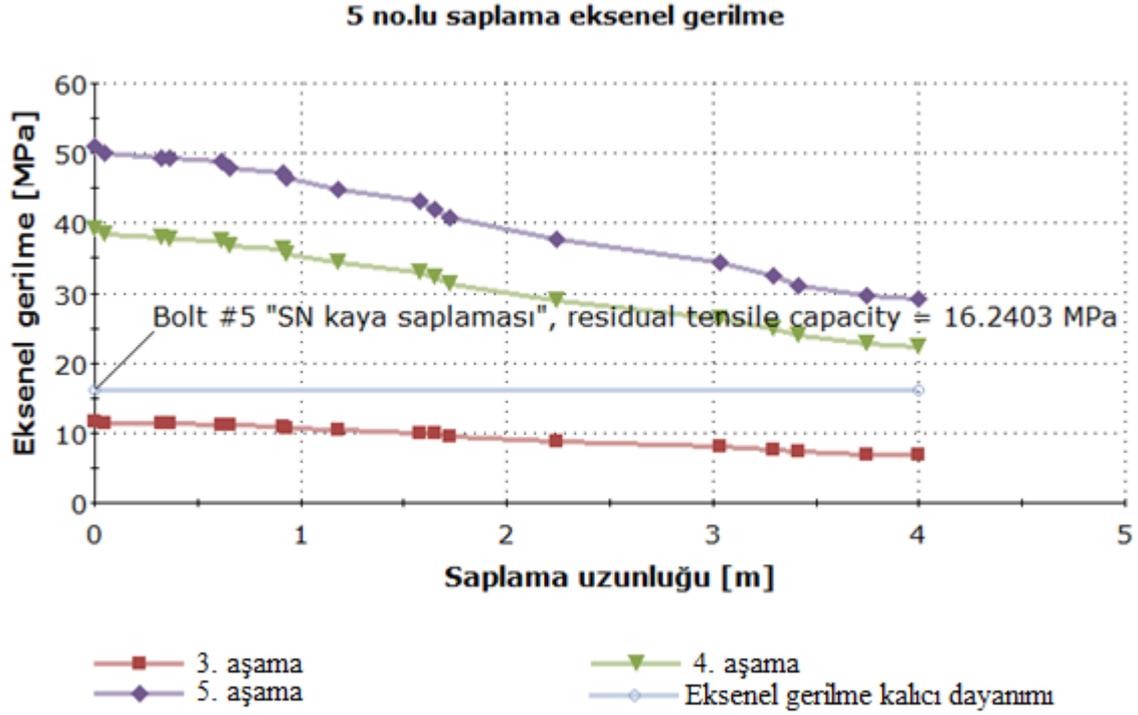


Axial stress = Eksenel gerilme

c) Alt yarı tahkimatı sonrası

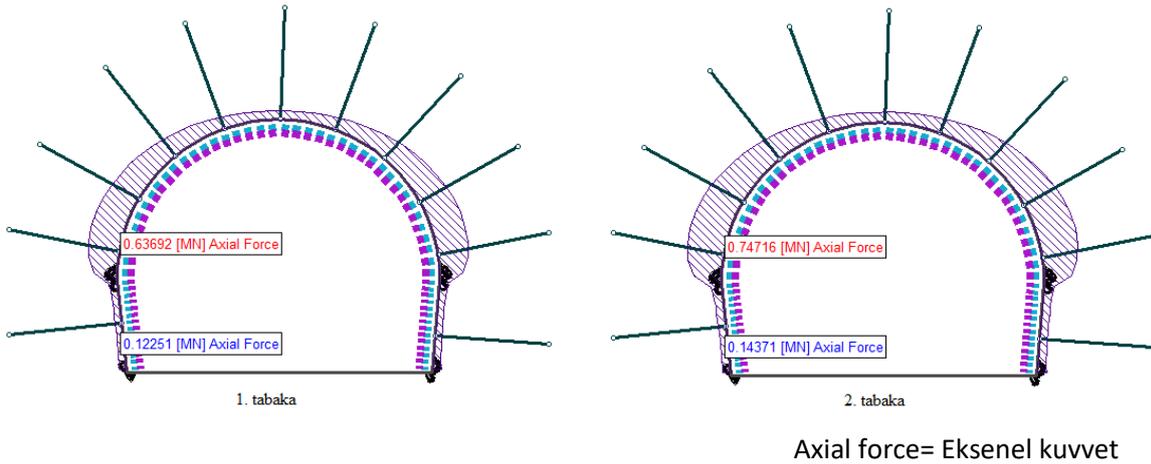
Şekil 6.18 (devam ediyor)

En yüksek eksenel gerilmenin oluştuğu 5 no.lu saplama da oluşan eksenel gerilme dağılımlarının saplama uzunluğu boyunca gösterimi üst yarı tahkimatı sonrası (aşama 3), alt yarı kazısı sonrası (aşama 4) ve alt yarı kazısı tahkimatı sonrası (aşama 5) durumlar için Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Saplamalarda oluşan eksenel gerilme değerlerinin saplamaların taşıyabileceği eksenel gerilme değerinin altında kaldığından, saplamalarda herhangi bir yenilme oluşmamıştır (Geniş ve Derin 2016).



Şekil 6.19 5 no.lu saplama da oluşan aksenal gerilme dağılımları.

Çelik hasır+Püskürtme beton (1.tabaka) ve demirbağ+püskürtme beton tabakalarında (2. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları Şekil 6.20'de gösterilmiştir. En büyük aksenal kuvvet, demirbağ+püskürtme beton tabakasında açıklığın sağ ve sol üst bölümlerinde oluşmuştur (Geniş ve Derin 2016).

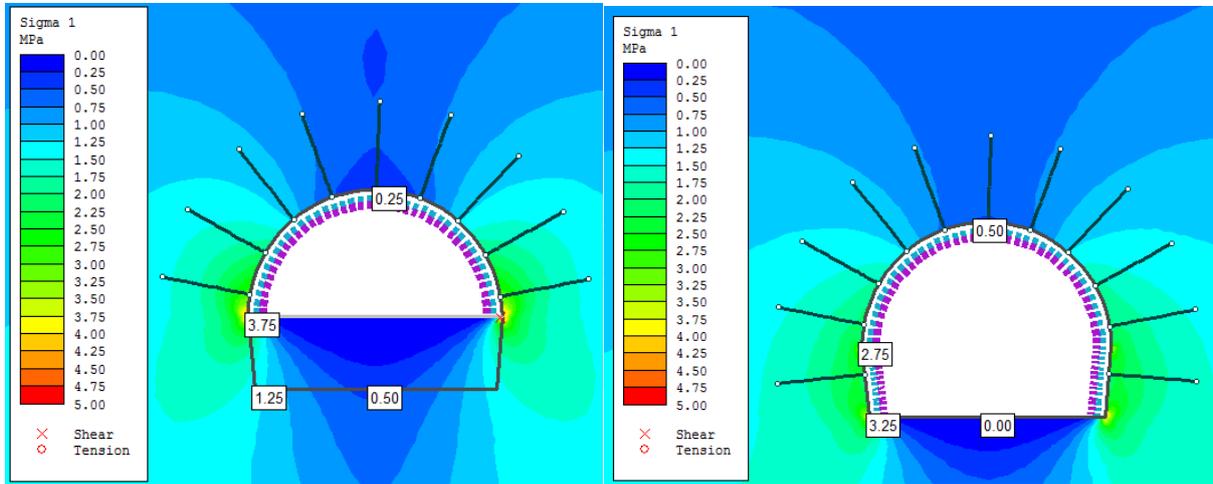


Şekil 6.20 Tünel kaplamasında oluşan aksenal kuvvet dağılımları (MN) (aşama 5 için).

6.3.1.3 Sapça Tüneli 3 no.lu kesit

Sapça tünelinin 20+332.5-20+347.5 kilometreleri arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümü yapılmıştır. Şekil 6.21'de en büyük asal gerilme dağılımları gösterilmiştir. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 45 m olduğu bu bölgede üst yarı tahkimatı sonucunda en büyük asal gerilmeler açıklık tavanında 0.25 MPa ve açıklık köşe tabanında en yüksek değerini alarak 3.75 MPa olduğu bulunmuştur (Şekil 6.21 a).

Alt yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en büyük birincil gerilme değeri 3.25 MPa, açıklık tabanında 0 MPa ve açıklık tavanında ise 0.50 MPa olmuştur (Şekil 6.21 b).

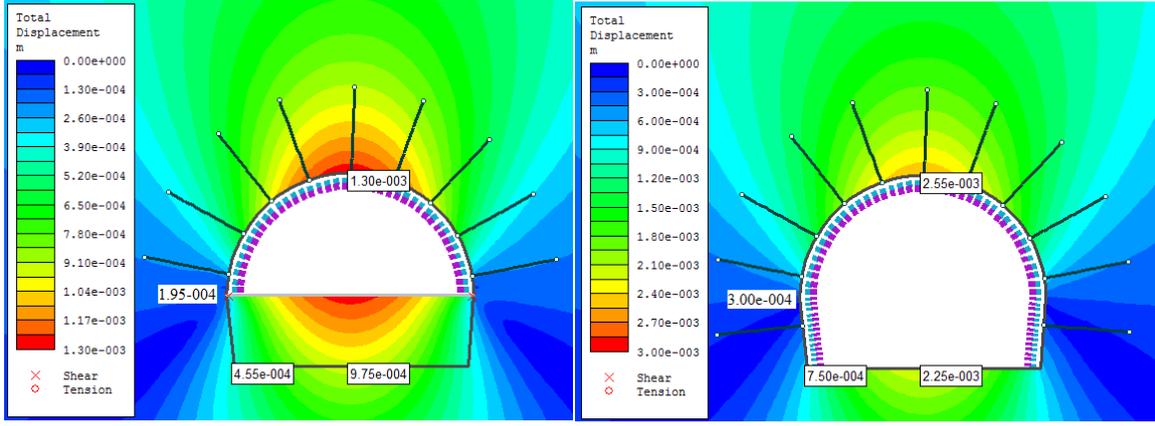


a) Üst yarı tahkimatı sonrası.

b) Alt yarı tahkimatı sonrası.

Şekil 6.21 Sapça 3. kesit en büyük asal birincil gerilme dağılımı.

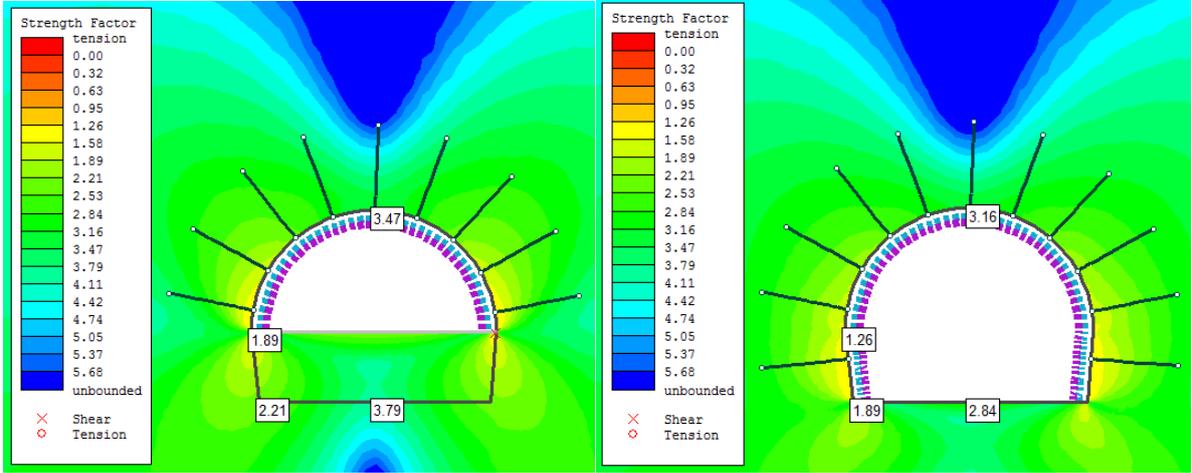
Toplam yerdeğiştirme miktarları üst yarı kazısı sonucu tavanda 1.3 mm ve alt yarı kazısı sonucunda da 2.5 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.22). Açıklığın üst yarı tahkimatı ve alt yarı tahkimatı yapıldıktan sonra kaya kütlelerinde yenilme bölgelerinin oluşmadığı gözlemlenmiştir. Dayanım katsayıları (güvenlik katsayısı) açıklık yüzeyinde ve çevresinde 1'den büyük olmuş yani kaya kütlesi elastik davranış göstermiştir (Şekil 6.23).



a) Üst yarı tahkimatı sonrası

b) Alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.22 Sapça tüneli 3. kesiti toplam yerdeğiştirme miktarı.

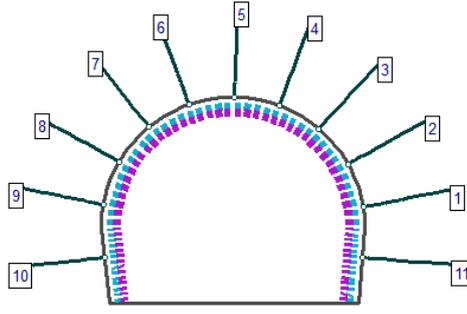


a) Üst yarı tahkimatı sonrası

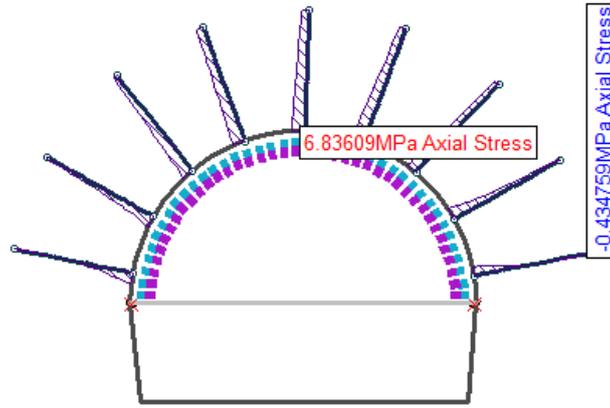
b) Alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.23 Sapça tüneli 3. kesiti güvenlik katsayısı.

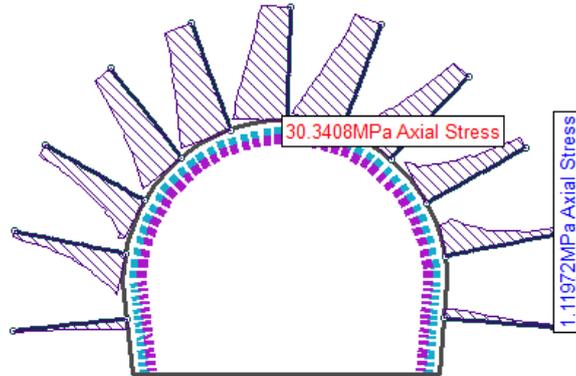
Sapça tüneli 3 no.lu kesitinde uygulanan kaya saplaması ve püskürtme betonda herhangi bir yenilme gözlenmemiştir. Saplamanın aksenal dayanımı 243.6 MPa ve aksenal kalıcı dayanımı 16.2 MPa'dır. Üst yarı kazısı sonucu tünel tavanında bulunan 5 no.lu saplama en büyük aksenal gerilme 6.8 MPa ve alt yarı kazısı sonucu 30.3 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.24).



a) Saplama numaraları



b) Üst yarı tahkimatı sonrası

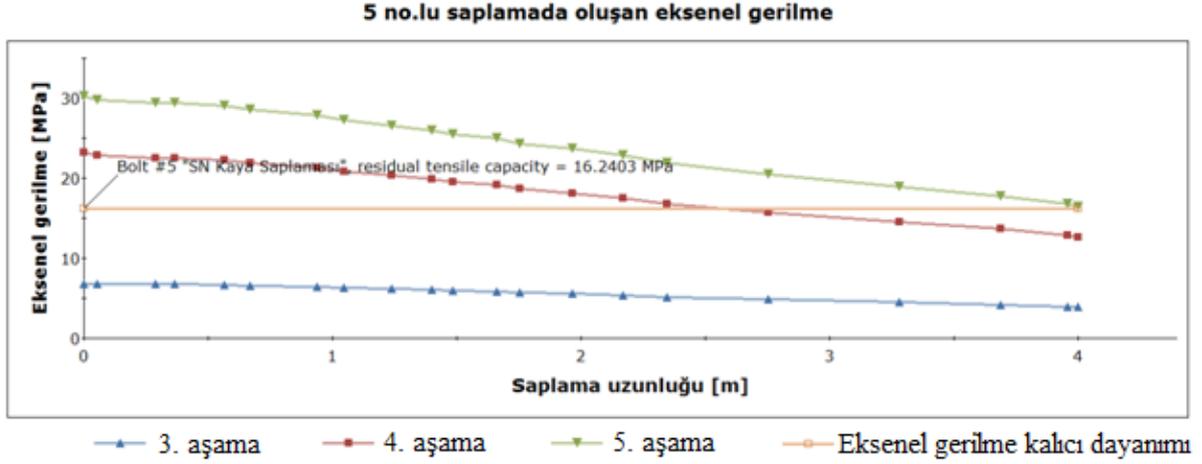


Axial stress = Eksenel gerilme

c) Alt yarı tahkimatı sonrası

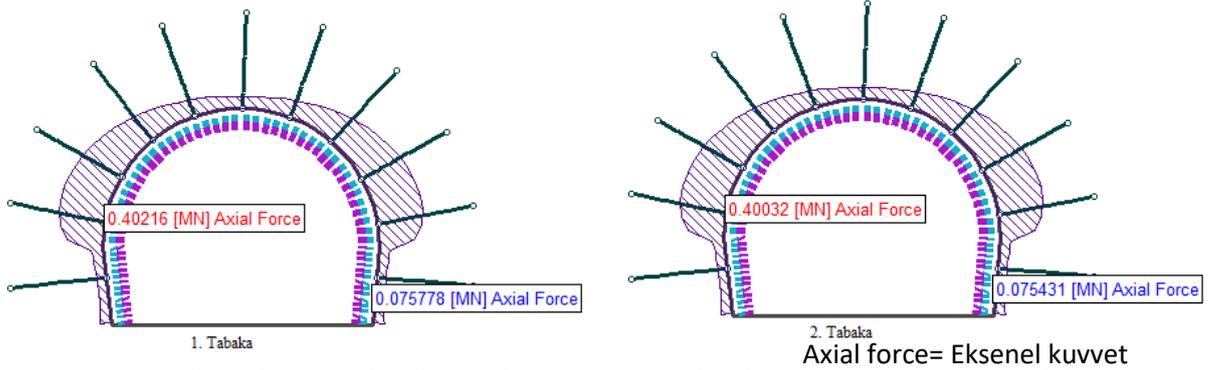
Şekil 6.24 Sapça tüneli 3. kesiti saplamalarda oluşan eksenel gerilme dağılımları.

En yüksek eksenel gerilmenin olduğu 5 no.lu saplamada oluşan eksenel gerilme dağılımlarının saplama uzunluğu boyunca gösterimi üst yarı tahkimatı sonrası (aşama 3), alt yarı kazısı sonrası (aşama 4) ve alt yarı kazısı tahkimatı sonrası (aşama 5) durumlar için Şekil 6.25'te gösterilmiştir. Saplamalarda oluşan eksenel gerilme değerlerinin saplamaların taşıyabileceği eksenel gerilme değerinin altında kaldığından, saplamalarda herhangi bir yenilme oluşmamıştır.



Şekil 6.25 5 no.lu saplamada oluşan aksenal gerilme dağılımları.

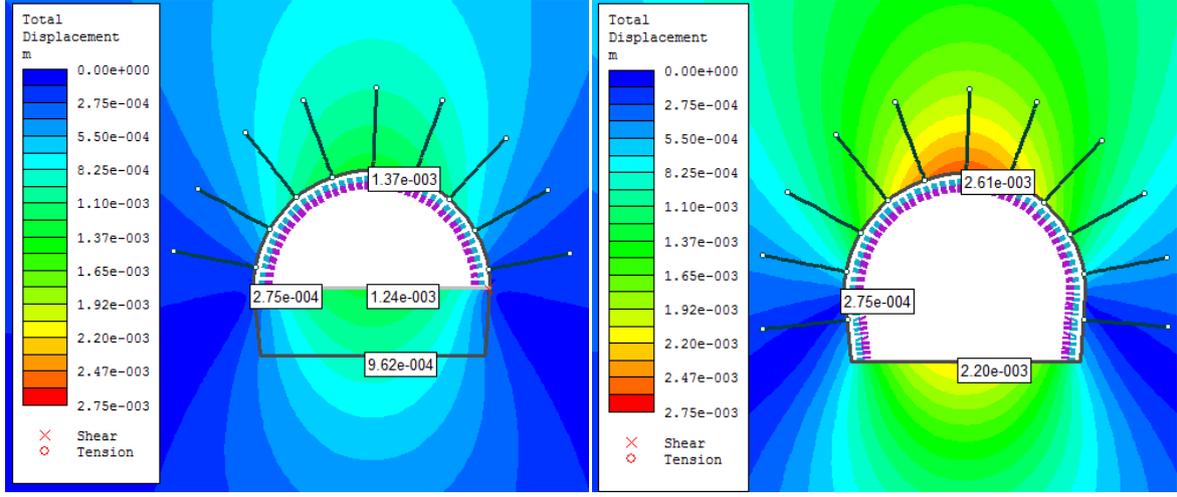
Çelik hasır+Püskürtme beton (1.tabaka) ve demirbağ (iksa)+püskürtme betonda (2. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları Şekil 6.26'da gösterilmiştir. En büyük aksenal kuvvet, demirbağ (iksa)+püskürtme beton tabakasında açıklığın sağ ve sol üst bölümlerinde oluşmuştur .



Şekil 6.26 Tünel kaplamasında oluşan aksenal kuvvet dağılımları (MN) (aşama 5 için).

6.3.1.4 Sapça Tüneli 4 no.lu kesit

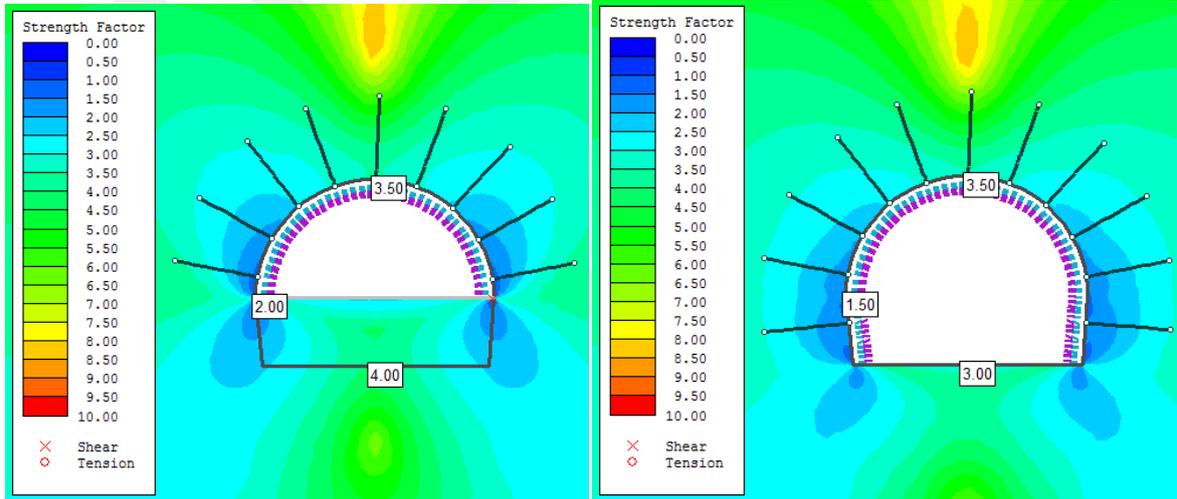
Sapça tünelinin 20+406-20+417.5 kilometreleri arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümlemesi yapılmıştır. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 44 m olduğu bu bölgede açıklığın bulunduğu seviyede toplam yerdeğiştirme miktarları tünel tavanında üst yarı tahkimatı yapıldıktan sonra 1.37 mm alt yarı kazısı ve tahkimatı yapıldıktan sonra 2.61 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.27). Ayrıca üst yarı ve nihai kazı sonrasında kaya kütlelerinde herhangi bir yenilme bölgesi oluşmamıştır. Dayanım katsayıları (güvenlik katsayısı) açıklık yüzeyinde ve çevresinde 1'den büyük olmuş yani kaya kütleleri elastik davranış göstermiştir (Şekil 6.28) (Geniş ve Derin 2016).



a) Üst yarı tahkimatı sonrası

b) Alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.27 Sapça tüneli 4. kesiti toplam yerdeğiştirme miktarı.

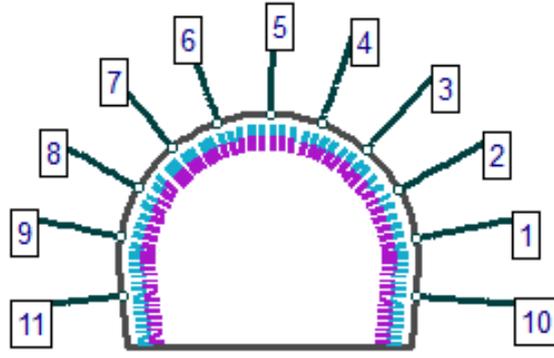


a) Üst yarı tahkimatı sonrası

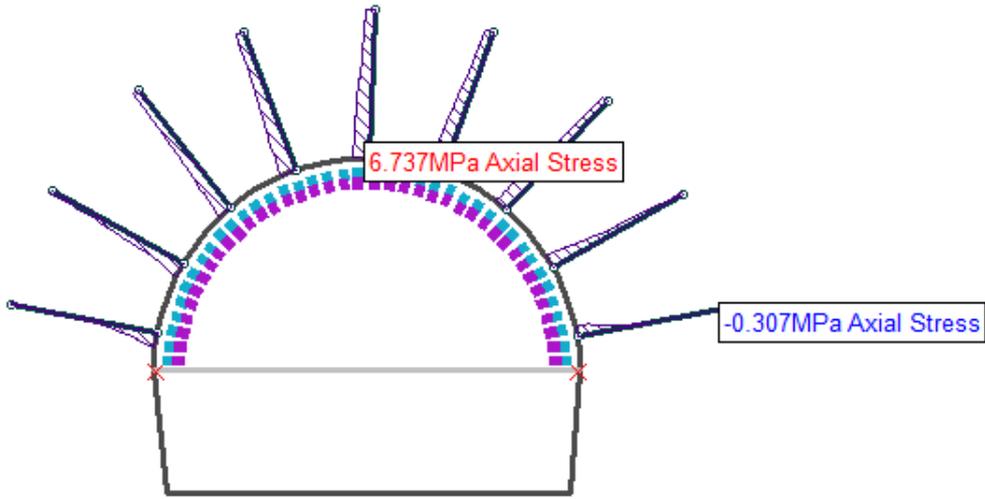
b) Alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.28 Sapça tüneli 4. kesiti güvenlik katsayısı.

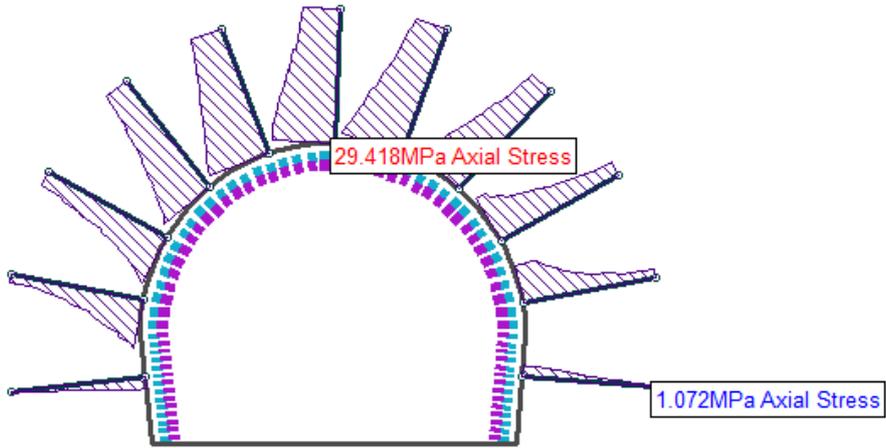
Sapça tüneli 4 no.lu kesitinde uygulanan kaya saplaması ve püskürtme betonda herhangi bir yenilme gözlenmemiştir. Saplamanın aksenal gerilme dayanımı 243.6 MPa ve aksenal gerilme kalıcı dayanımı 16.2 MPa'dır. Üst yarı kazısı sonucu tünel tavanında bulunan 5 no.lu saplama en büyük aksenal gerilme 6.7 MPa ve alt yarı kazısı sonucu 29.4 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.29) (Geniş ve Derin 2016).



a) Saplama numaraları



b) Üst yarı tahkimatı sonrası

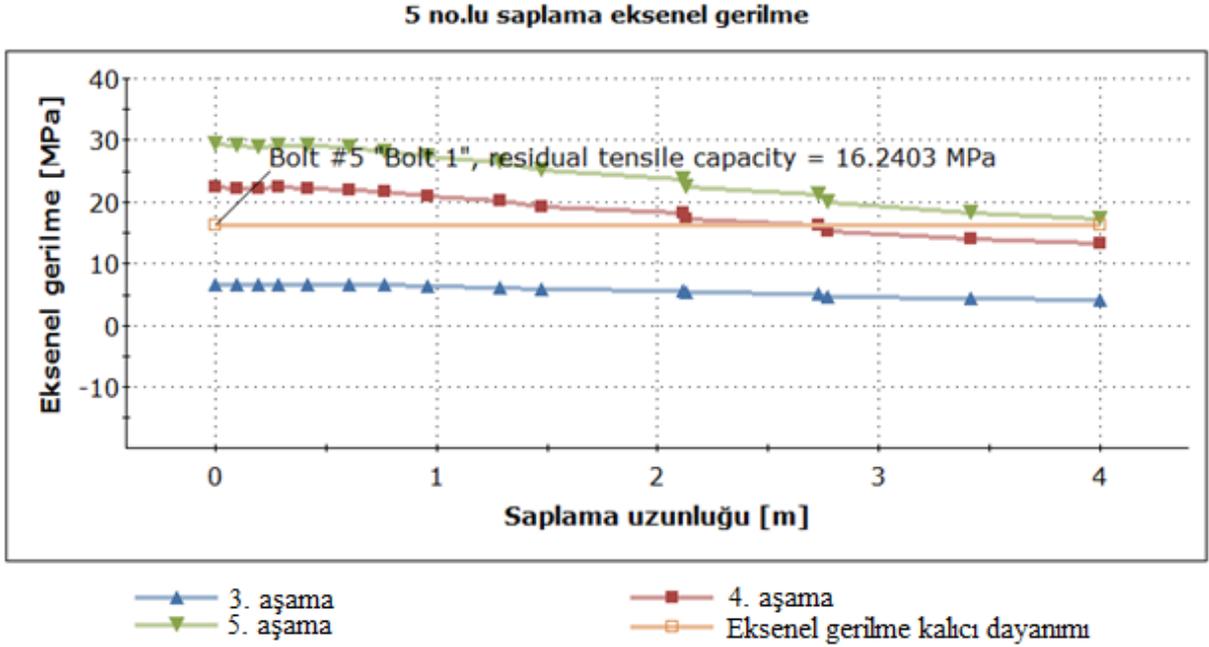


Axial stress = Eksenel gerilme

c) Alt yarı tahkimatı sonrası

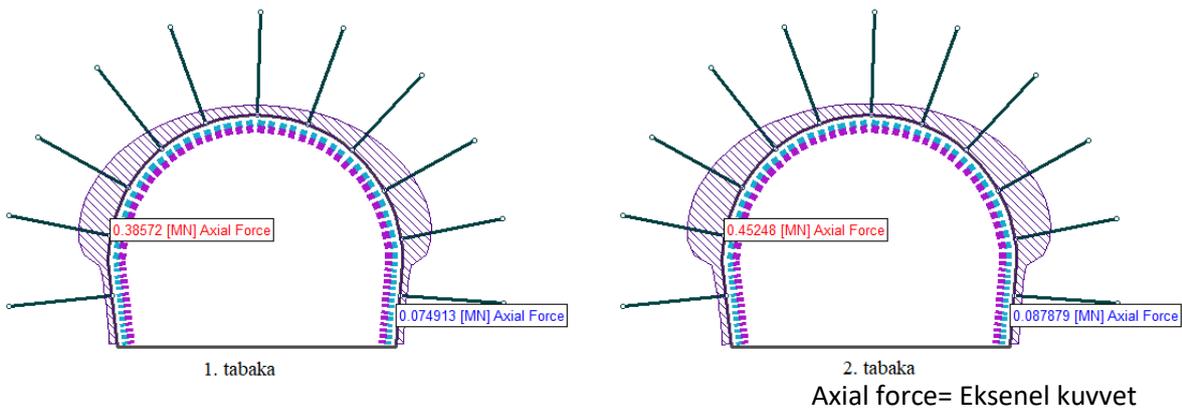
Şekil 6.29 Sapça tüneli 4. kesiti saplamalarda oluşan eksenel gerilme dağılımları.

En yüksek aksel gerilmenin olduğu 5 no.lu saplama oluştuğu 5 no.lu saplama oluştuğu aksel gerilme dağılımlarının saplama uzunluğu boyunca gösterimi üst yarı tahkimatı sonrası (aşama 3), alt yarı kazısı sonrası (aşama 4) ve alt yarı kazısı tahkimatı sonrası (aşama 5) durumlar için Şekil 6.30'da gösterilmiştir. Saplamalarda oluşan aksel gerilme dayanım değerlerinin saplamaların taşıyabileceği aksel gerilme değerinin altında kaldığından, saplamalarda herhangi bir yenilme oluşmamıştır (Geniş ve Derin 2016).



Şekil 6.30 5 no.lu saplama oluştuğu aksel gerilme dağılımları.

Çelik hasır+püskürtme beton (1. tabaka) ve demirbağ (iksa)+püskürtme beton tabakalarında (2. tabaka) oluşan aksel kuvvet dağılımları Şekil 6.31'de gösterilmiştir. En büyük aksel kuvvet, demirbağ (iksa)+püskürtme beton tabakasında açıklığın sağ ve sol üst bölümlerinde oluşmuştur (Geniş ve Derin 2016).

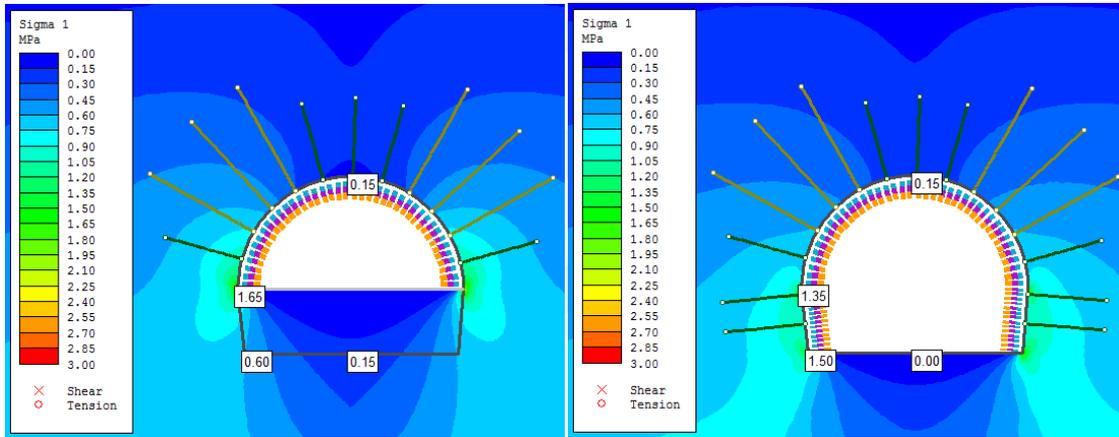


Şekil 6.31 Tünel kaplamasında oluşan aksel kuvvet dağılımları (MN) (aşama 5 için).

6.3.1.5 Sapça Tüneli 5 no.lu kesit

Sapça tünelinin 20+544.5-20+561.0 kilometreleri arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümlenmesi yapılmıştır. Şekil 6.32'de en büyük asal gerilme dağılımları gösterilmiştir. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 15 m olduğu bu bölgede üst yarı tahkimatı sonucunda en büyük asal gerilmeler açıklık tavanında 0.15 MPa ve açıklık köşe tabanında en yüksek değerini alarak 1.65 MPa olduğu bulunmuştur (Şekil 6.32 a).

Alt yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en büyük asal gerilme değeri 1.50 MPa, açıklık tabanında 0 MPa ve açıklık tavanında ise 0.15 MPa olmuştur (Şekil 6.32 b).

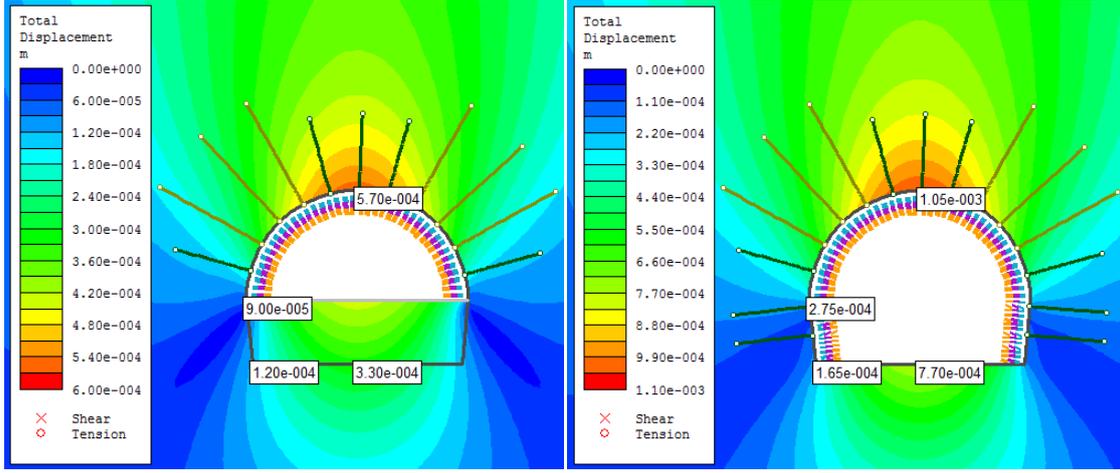


a) Üst yarı tahkimatı sonrası

b) Alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.32 Sapça 5. kesit en büyük asal gerilme dağılımı.

Toplam yerdeğiştirme miktarları üst yarı kazısı sonucu tavanda 0.57 mm ve alt yarı kazısı sonucunda da 1.05 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.33). Açıklığın üst yarı tahkimatı ve alt yarı tahkimatı yapıldıktan sonra kaya kütlelerinde yenilme bölgelerinin oluşmadığı gözlemlenmiştir.

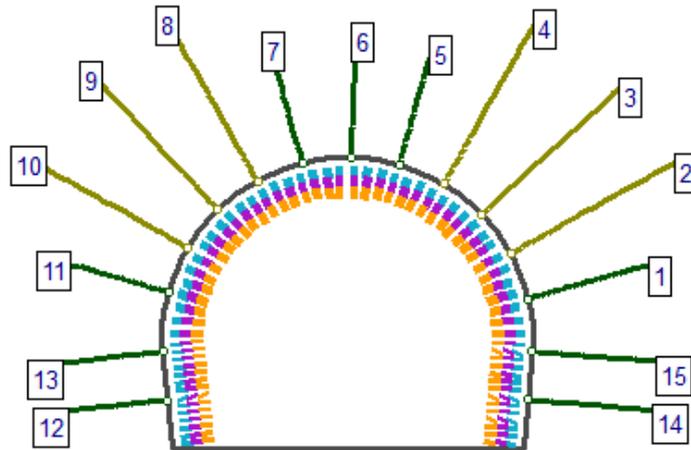


a) Üst yarı tahkimatı sonrası

b) Alt yarı tahkimatı sonrası

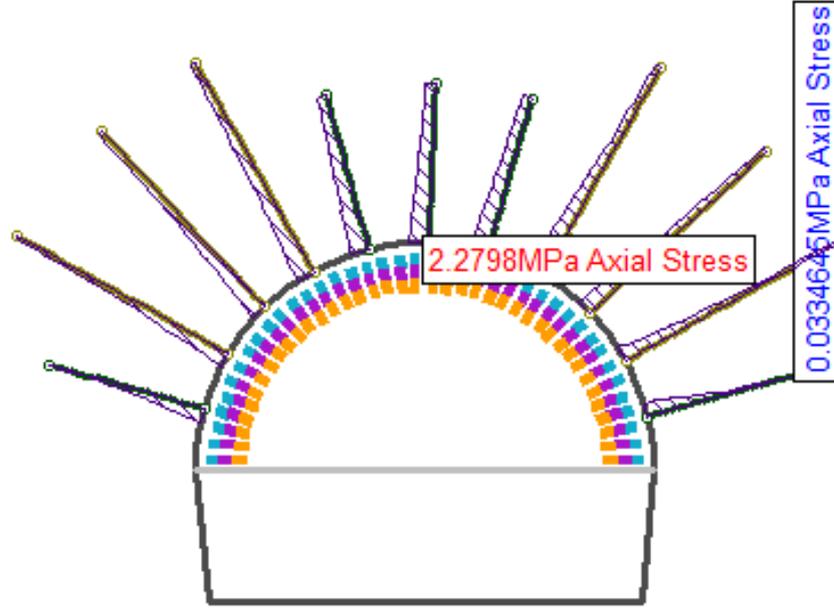
Şekil 6.33 Sapça tüneli 5. kesiti toplam yerdeğiştirme miktarı.

Sapça tüneli 5 no.lu kesitinde uygulanan kaya saplaması ve püskürtme betonda herhangi bir yenilme gözlenmemiştir. Tünelin sağ ve sol omuz bölgelerinde 6 m uzunluğunda IBO tipi (32 mm çaplı) kendinden matkaplı saplamlar ile 4 m uzunluğunda tavanda 3 adet ve yan duvarlarda 6 adet olmak üzere toplam 9 adet SN (28 mm çaplı) tipi kaya saplaması kullanılmıştır. SN tipi saplamanın aksenal gerilme dayanımı 243.6 MPa ve aksenal kalıcı gerilme dayanımı 16.2 MPa'dır. IBO tipi saplamanın aksenal gerilme dayanımı 186.5 MPa ve aksenal kalıcı çekme dayanımı 12.4 MPa'dır. Üst yarı kazısı sonucu tünel tavanında bulunan 6 no.lu saptamada en büyük aksenal gerilme 2.8 MPa ve alt yarı kazısı sonucu 9.7 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.34).

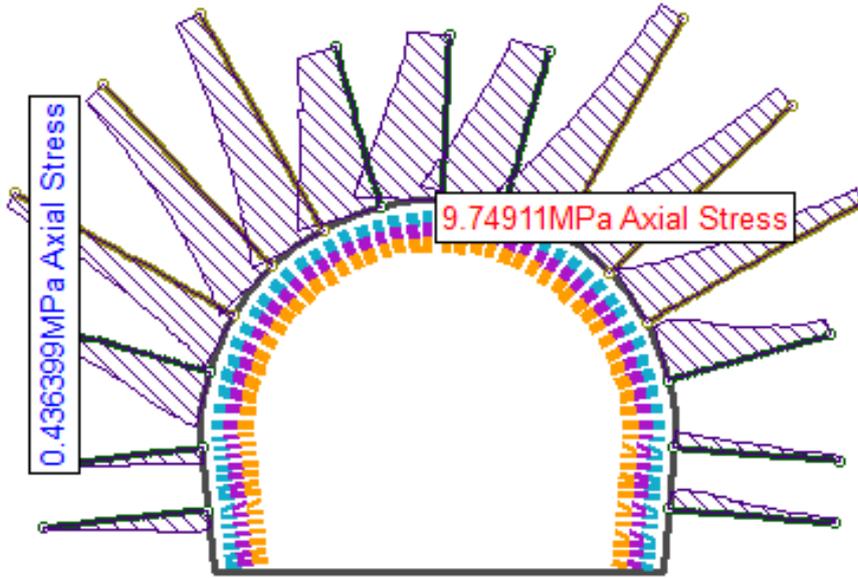


a) Saplama numaraları

Şekil 6.34 Sapça tüneli 5. kesiti saptamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.



b) Üst yarı tahkimatı sonrası



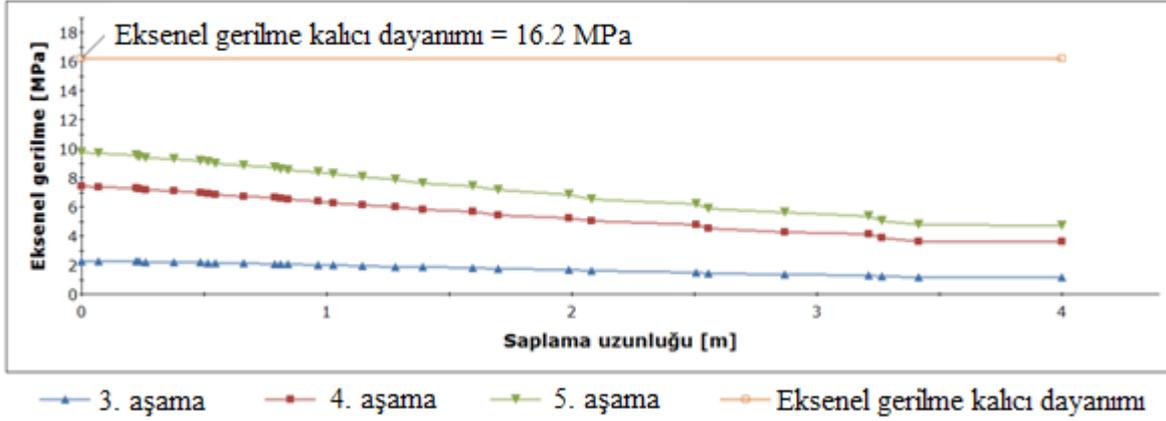
Axial stress = Eksenel gerilme

c) Alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.34 (devam ediyor).

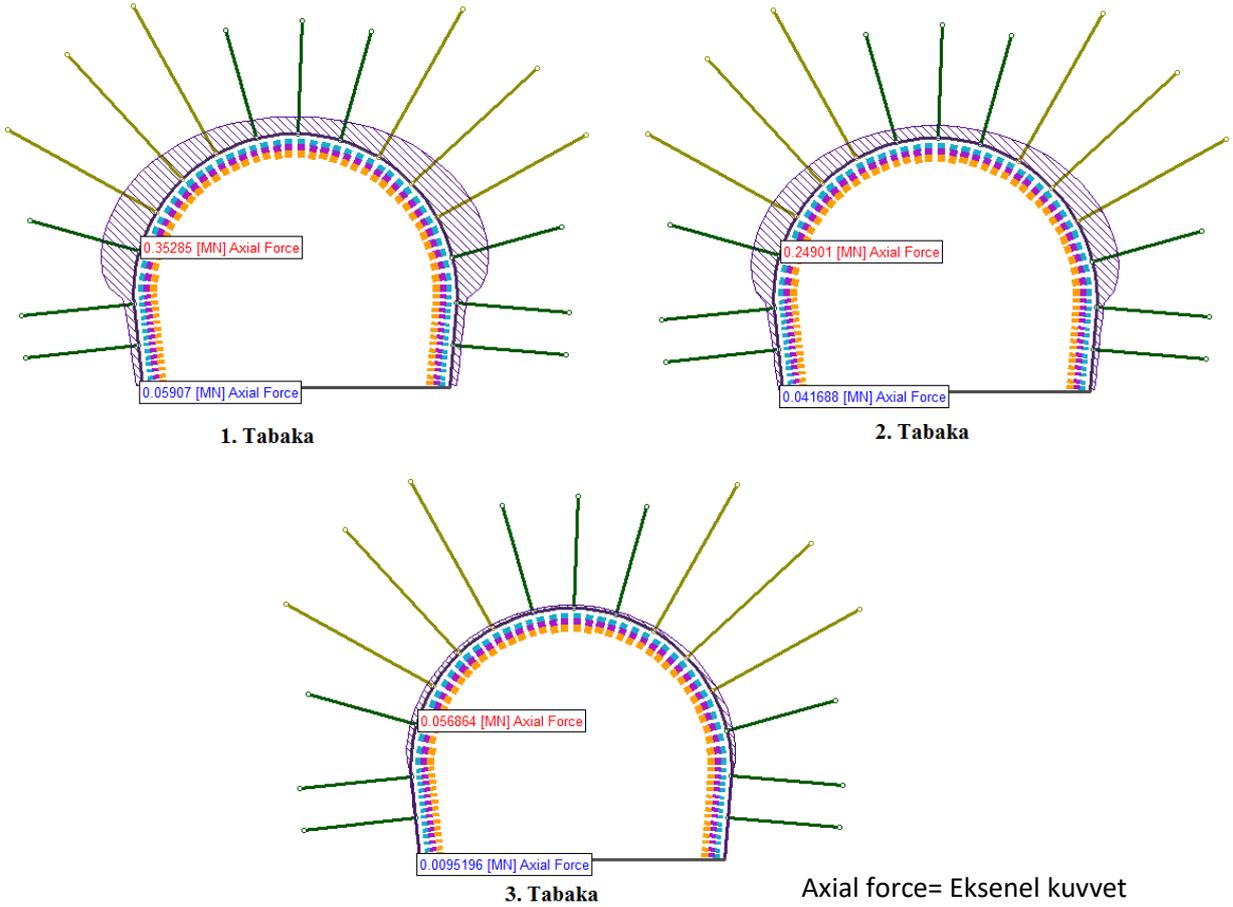
En yüksek eksenel gerilmenin olduğu 6 no.lu saplamada oluşan eksenel gerilme dağılımlarının saplama uzunluğu boyunca gösterimi üst yarı tahkimatı sonrası (Aşama 3), alt yarı kazısı sonrası (Aşama 4) ve alt yarı kazısı tahkimatı sonrası (Aşama 5) durumlar için Şekil 6.35'te gösterilmiştir. Saplamalarda oluşan eksenel gerilme değerlerinin, saplamaların taşıyabileceği eksenel gerilme değerinin altında kaldığından, saplamalarda herhangi bir yenilme oluşmamıştır.

6 no.lu saplamada oluşan aksel gerilme



Şekil 6.35 6 no.lu saplamada oluşan aksel gerilme dağılımları.

Tünel kaplaması olarak kullanılan çelik hasır+püskürtme beton (1. tabaka), demirbağ (iksa)+püskürtme beton tabakalarında (2. tabaka) ve püskürtme beton (3. tabaka) oluşan aksel kuvvet dağılımları Şekil 6.36'da gösterilmiştir. En büyük aksel kuvvet, tüm tabakalar için açıklığın sağ ve sol üst bölümlerinde oluşmuştur.



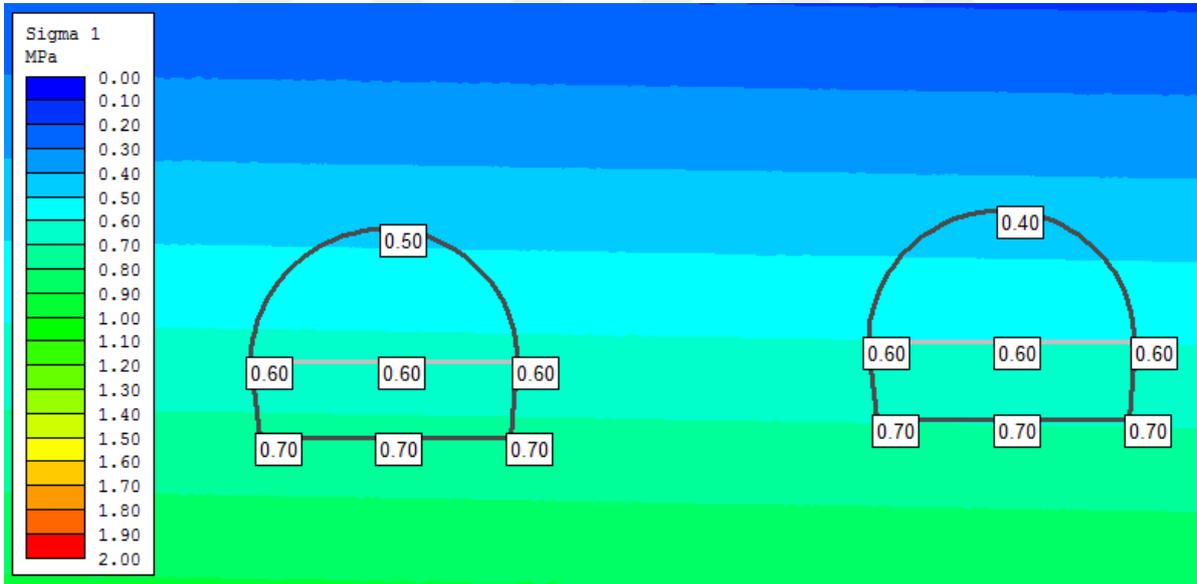
Şekil 6.36 Tünel kaplamasında oluşan aksel kuvvet dağılımları (MN) (aşama 5 için).

6.3.2 Üzülmez Tünelleri Duraylılık Değerlendirmeleri

6.3.2.1 Üzülmez Tüneli 1 no.lu kesit

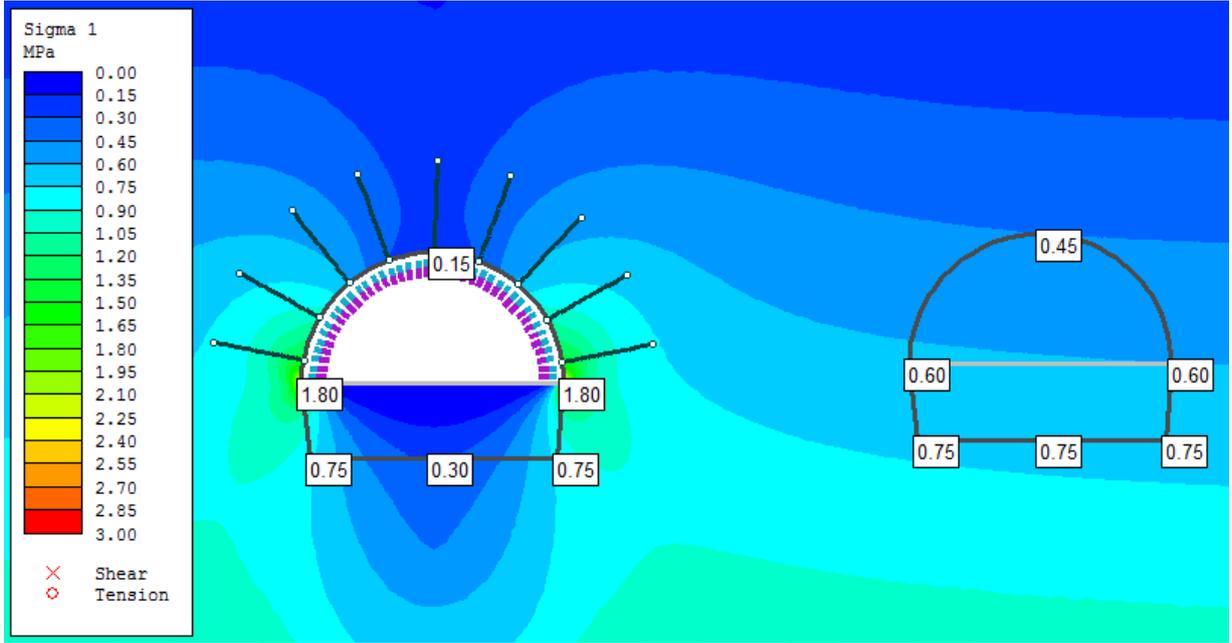
Üzülmez tünelinin 30+412.7-30+417.7 kilometreleri arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümlemesi yapılmıştır. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 17 m olduğu bu bölgede açıklığın bulunduğu seviyede en büyük asal gerilmenin yaklaşık 0.7 MPa civarında (Şekil 6.37 a) hesaplanmıştır. Sol tüp üst yarı kazısı sonucunda en büyük asal gerilmeler açıklık tavanında 0.15 MPa ve açıklık köşe tabanında en yüksek değerini alarak 1.8 MPa olduğu bulunmuştur (Şekil 6.37 b). Sağ tüp üst yarı kazısı sonucu sol tüpte oluşan gerilme koşullarının benzeri sağ tüp için de elde edilmiştir (Şekil 6.37 c).

Sol tüp alt yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en büyük asal gerilme değeri 1.65 MPa, açıklık tabanında 0 MPa ve açıklık tavanında ise 0.3 MPa olmuştur (Şekil 6.37 d). Sağ tüp alt yarı kazısı sonucu ise açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme değeri 1.50 MPa, açıklık tabanında 0 MPa ve açıklık tavanında 0.3 MPa olmuştur. (Şekil 6.37 e).

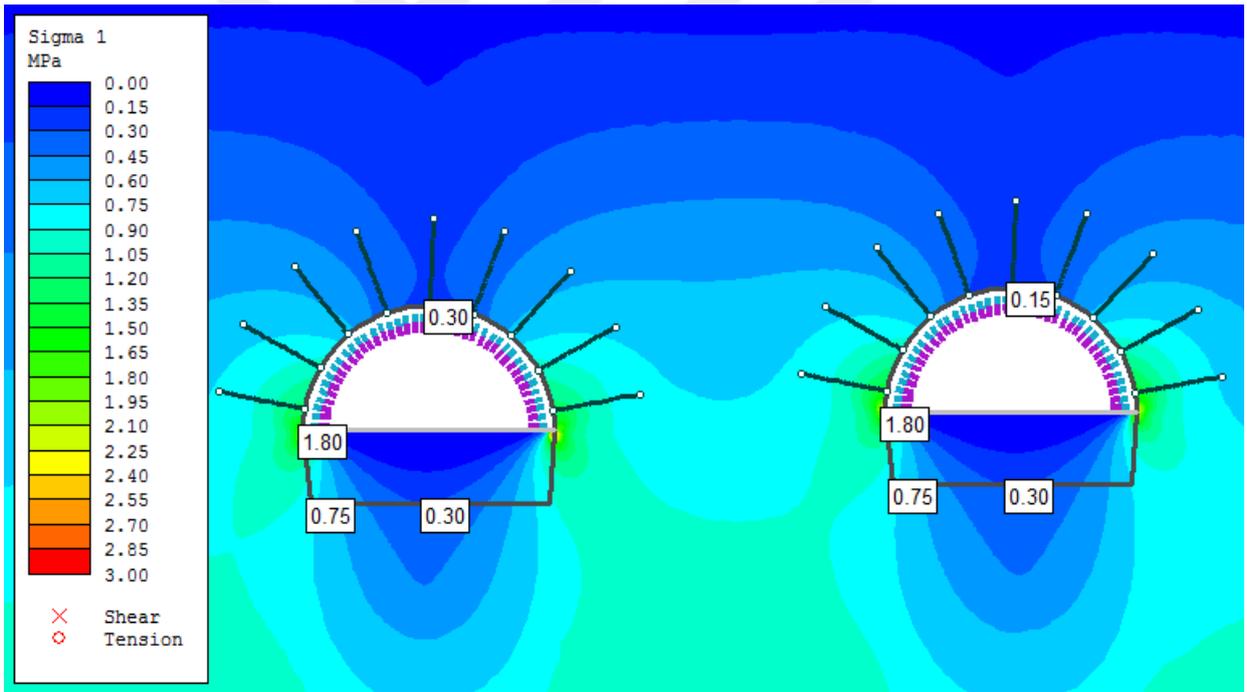


a) Kazı öncesi en büyük asal gerilme dağılımı

Şekil 6.37 Üzülmez tüneli 1 no.lu kesitinde farklı kazı ve tahkimat aşamaları için açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme dağılımları.



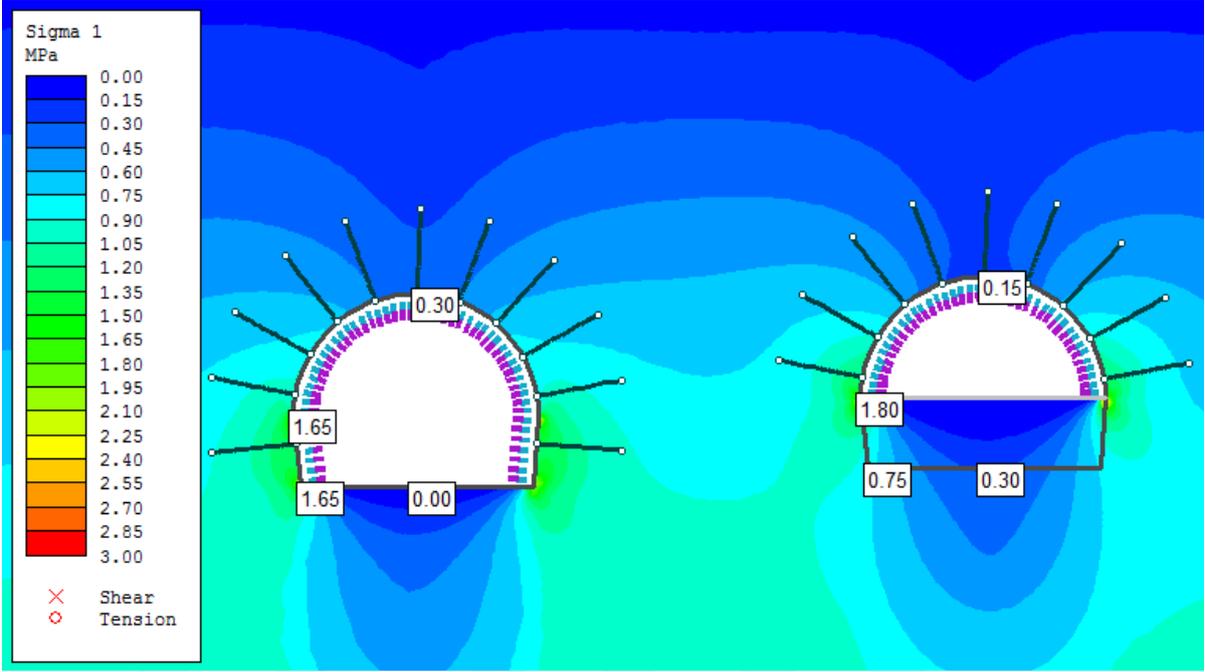
b) Sol tüp üst yarı tahkimatı sonrası



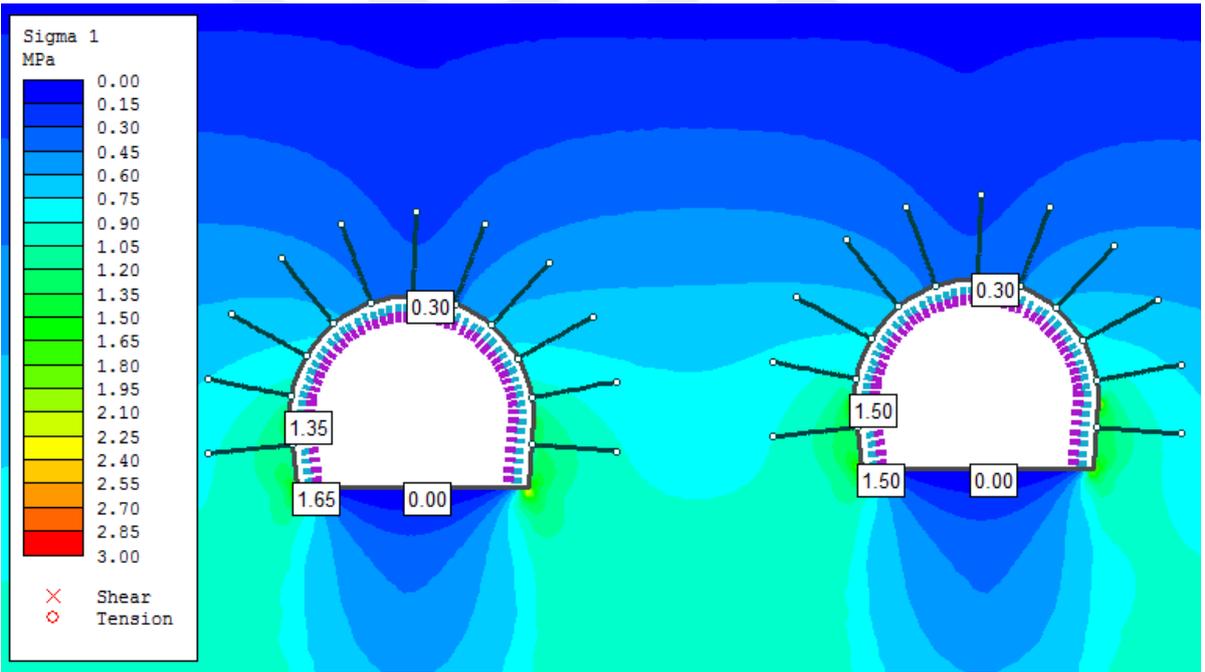
c) Sağ tüp üst yarı tahkimatı sonrası.

Şekil 6.37 (devam ediyor).

Sol tüp alt yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en küçük asal gerilme değeri 0.72 MPa, açıklık tabanında 0 MPa ve açıklık tavanında ise 0.13 MPa olmuştur (Şekil 6.38). Sağ tüp alt yarı kazısı sonucu ise açıklık köşe taban bölgelerinde oluşan en küçük asal gerilme değeri 0.52 MPa, açıklık tabanında 0 MPa ve açıklık tavanında 0.07 MPa olmuştur (Şekil 6.38).

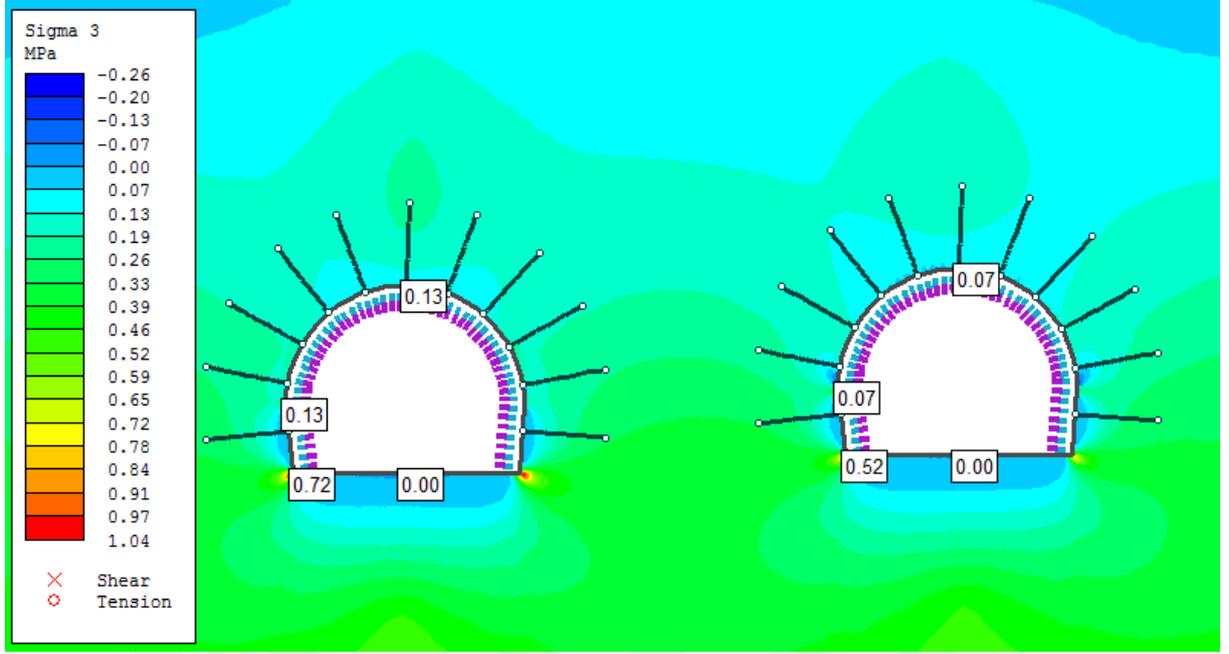


d) Sol tüp alt yarı tahkimatı sonrası



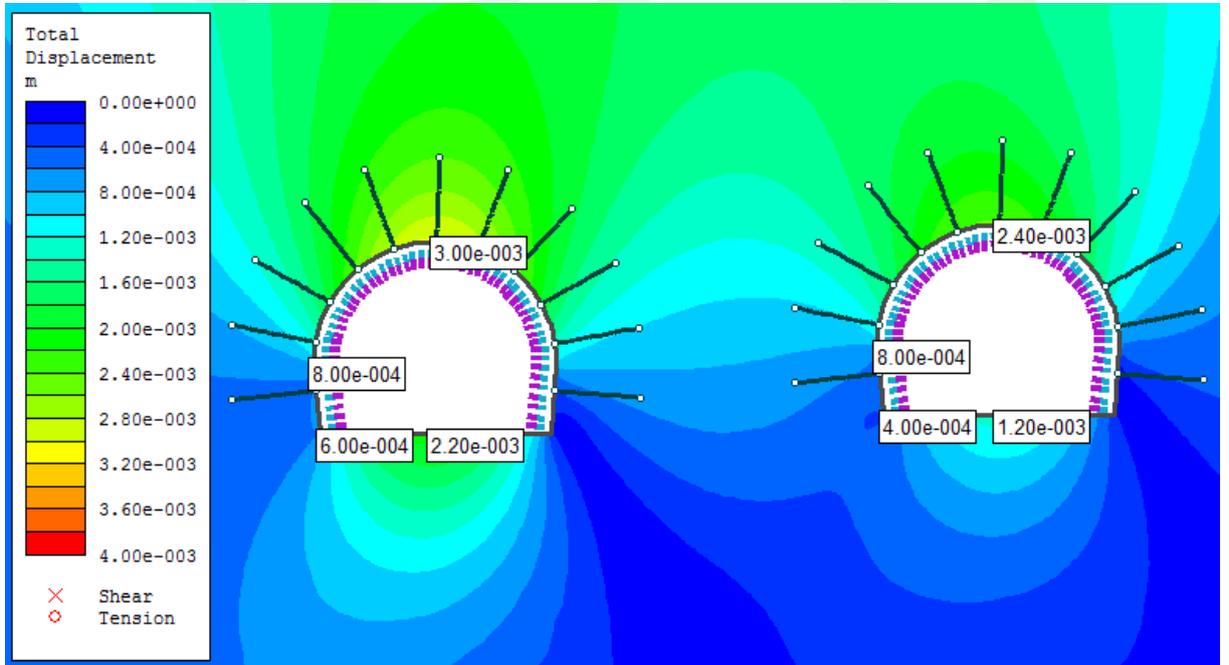
e) Sağ tüp alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.37 (devam ediyor).



Şekil 6.38 Üzülmöz tüneli 1 no.lu kesiti için en küçük asal gerilme dağılımları.

Toplam yerdeğiştirme miktarları tüm kazı ve tahkimat aşamaları tamamlandıktan sonra sol tüp tünel tavanında 3.0 mm, tünel tabanında 2.2 mm ve sağ tüp tünel tavanında 2.4 mm, tünel tabanında 1.2 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.39).

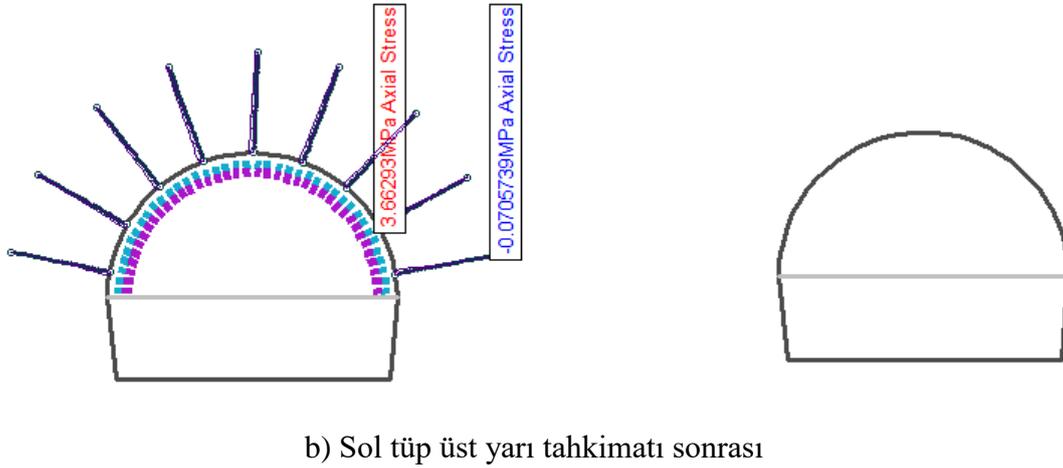
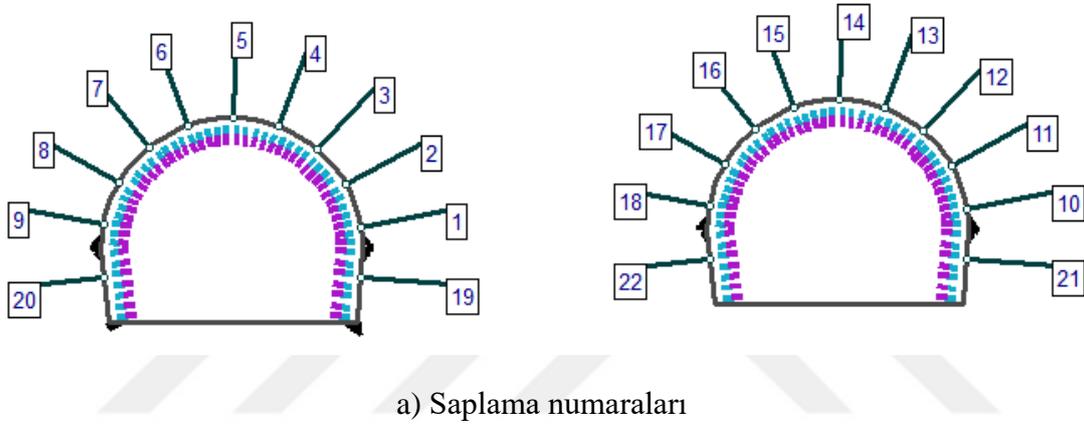


Şekil 6.39 Üzülmöz tüneli 1 no.lu kesiti için toplam yerdeğiştirme dağılımları.

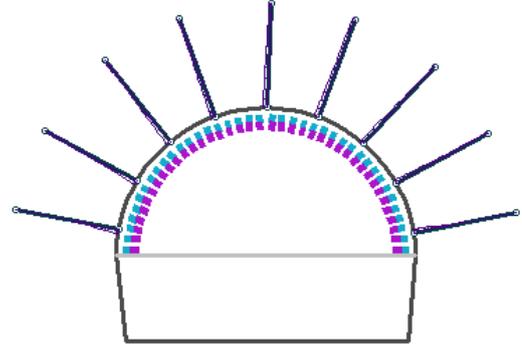
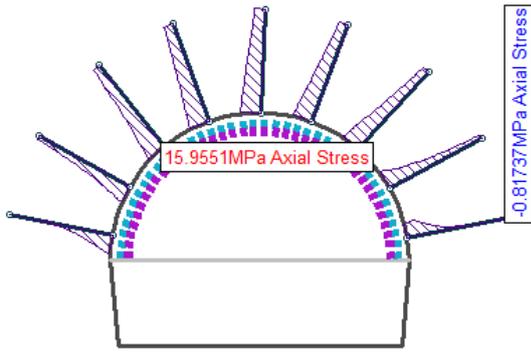
Üzülmöz tüneli 1. kesiti için yapılan çözümlerinde açıklık çevresinde yenilme bölgelerinin incelenen tüm kazı ve tahkimat aşamalarında oluşmadığı belirlenmiştir.

Üzülmez tüneli 1 no.lu kesitinde uygulanan kaya saplaması ve püskürtme betonda herhangi bir yenilme gözlenmemiştir. Saplamaların aksel gerilme dayanımı 243.6 MPa ve aksel kalıcı gerilme dayanımı 16.2 MPa'dır.

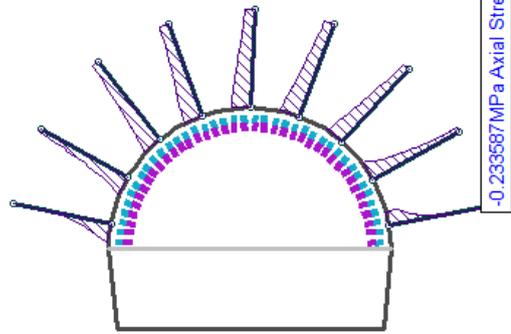
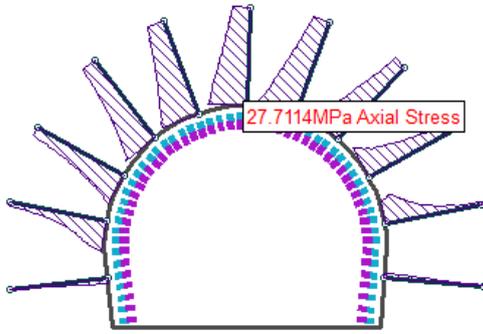
Sol tüp üst yarı kazısı sonucu tünel yan duvarında bulunan 1 no.lu saplamada en büyük aksel gerilme 3.7 MPa ve sağ tüp üst yarı tahkimatı sonucunda 7 no.lu saplamada en büyük gerilme 16.0 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 6.40 b c). Sol tüp alt yarı kazısı yapıldıktan sonra sol tüp 5 no.lu SN saplamada 27.7 MPa'lık bir gerilme oluşmuştur. Sağ tünel alt yarı kazısı tamamlandıktan sonra en büyük aksel gerilme sol tüp tünelde 5 no.lu saplamada 39.0 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.40 d e).



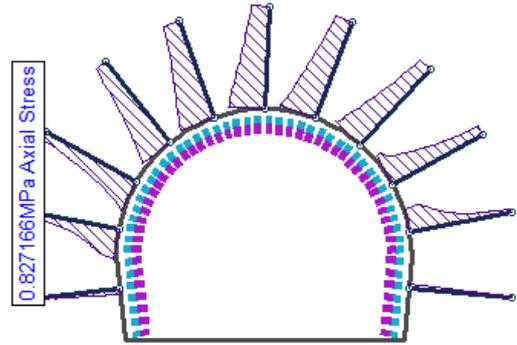
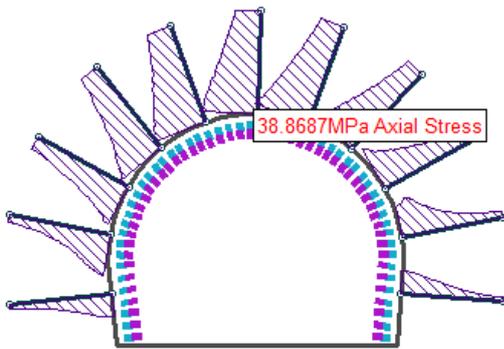
Şekil 6.40 Üzülmez tüneli 1 no.lu kesitinde saplamalarda oluşan aksel çekme gerilmesi dağılımları.



c) Sağ tüp üst yarı tahkimatı sonrası



d) Sol tüp alt yarı tahkimatı sonrası

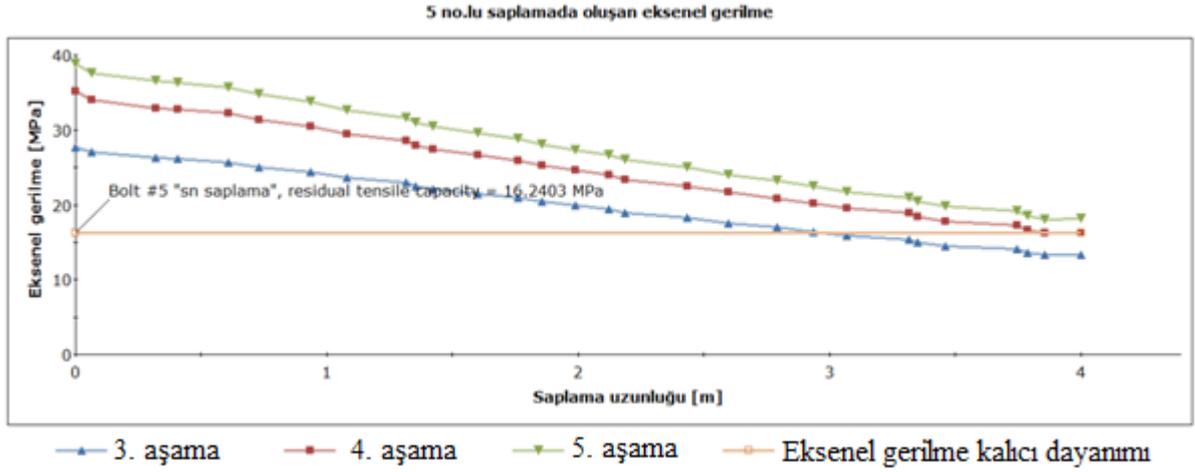


Axial stress = Eksenel gerilme

e) Sağ tüp alt yarı tahkimatı sonrası

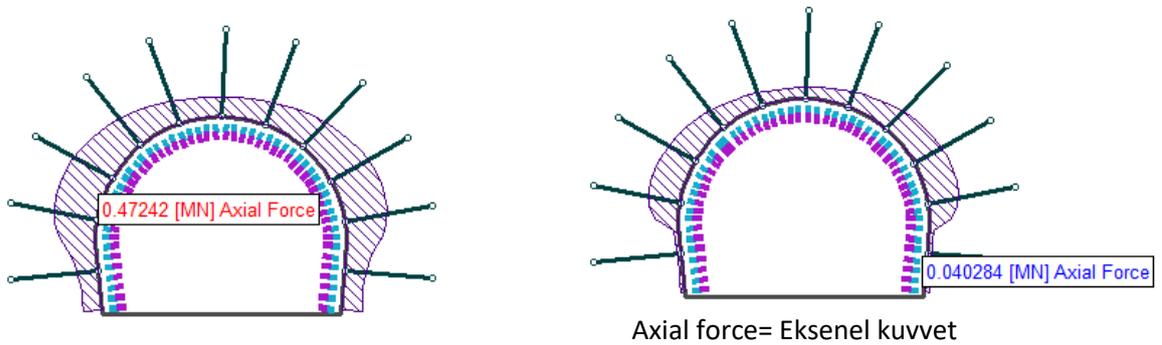
Şekil 6.40 (devam ediyor).

En büyük aksel gerilmenin olduğu 5 no.lu SN saplama boyunca oluşan aksel gerilmelerin saplama boyunca değişimi de Şekil 6.41'de verilmiştir. Şekil 6.41 incelendiğinde en büyük aksel gerilmelerin beklendiği gibi saplamanın açıklığa yakın kısımlarında olduğu görülmektedir. Her iki tüpte kullanılan saplamalarda oluşan aksel gerilme değerlerinin saplamaların akma dayanımlarının altında kaldığı yani üzerine etkileyen yükleri güvenle taşıdıkları belirlenmiştir.

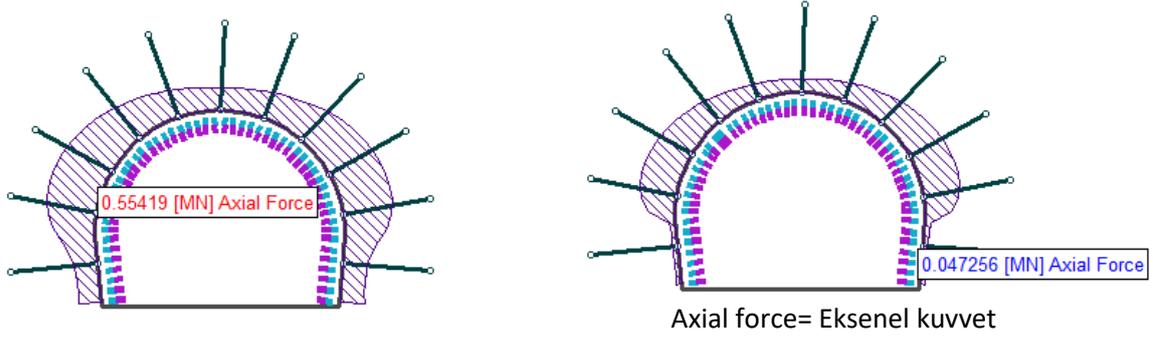


Şekil 6.41 Sol tüpte bulunan 5 no.lu SN saplamada oluşan aksel gerilmenin saplama uzunluğunca değişimi.

Çelik hasır+püskürtme beton (1. tabaka) ve demirbağ (iksa)+püskürtme beton tabakalarında (2. tabaka) oluşan aksel kuvvet dağılımları Şekil 6.42 ve Şekil 6.43'te gösterilmiştir. En büyük aksel kuvvet, demirbağ (iksa)+püskürtme beton tabakasında açıklığın sağ ve sol üst bölümlerinde oluşmuştur .



Şekil 6.42 Tünel kaplamasında (1. tabaka) oluşan aksel kuvvet dağılımları (MN) (aşama 9 için).

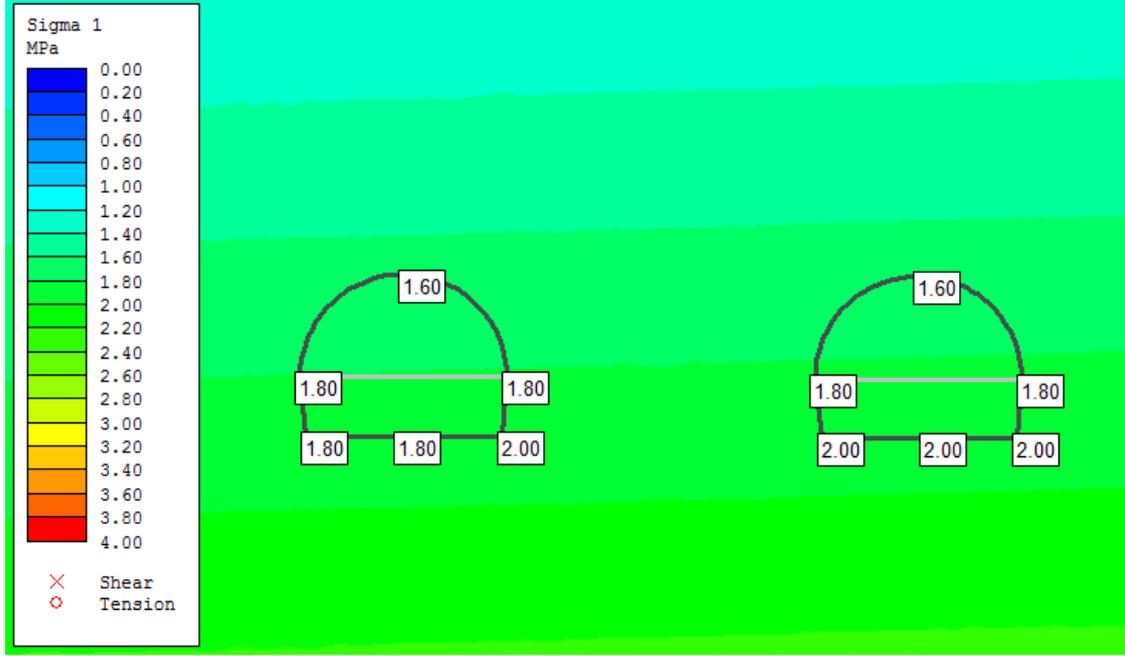


Şekil 6.43 Tünel kaplamasında (2. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları (MN) (aşama 9 için).

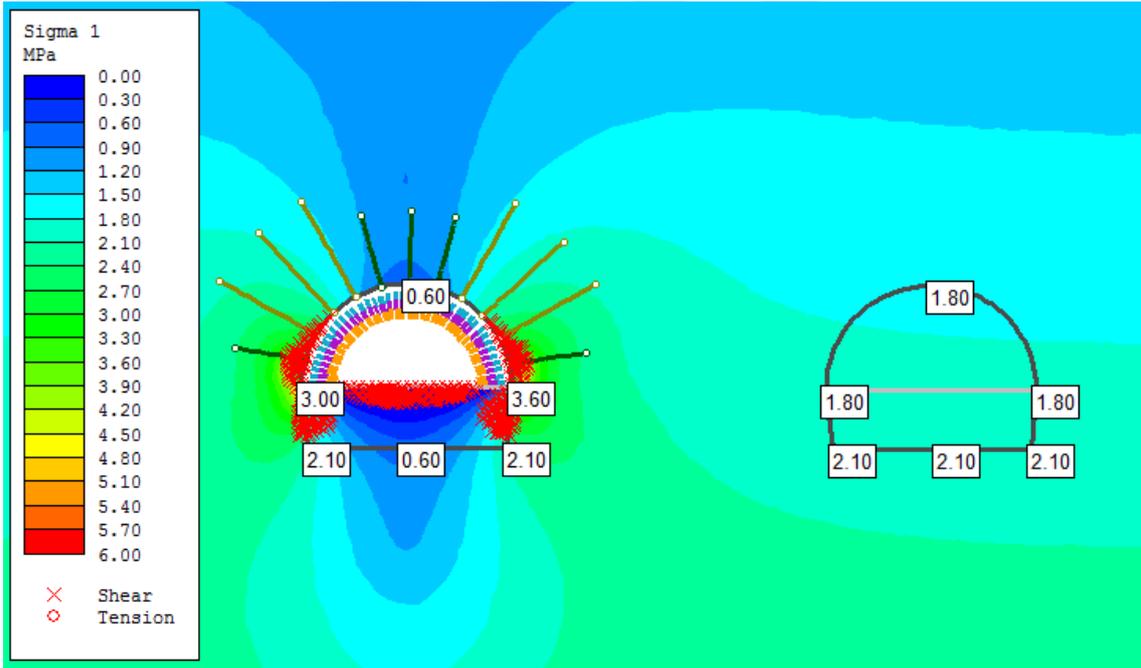
6.3.2.2 Üzülmez Tüneli 2 no.lu kesit

Üzülmez tünelinin 30+495.9-20+503.3 kilometreleri arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümlenmesi yapılmıştır. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 72 m olduğu bu bölgede açıklığın bulunduğu seviyede en büyük asal gerilmenin yaklaşık 2 MPa civarında (Şekil 6.44 a) ve en küçük asal gerilme ise 0.90 MPa olarak hesaplanmıştır. Sol tüp üst yarı kazısı sonucunda en büyük asal gerilmeler açıklık tavanında 0.60 MPa ve açıklık köşe tabanında en yüksek değerini alarak 3.6 MPa olduğu bulunmuştur (Şekil 6.44 b). En büyük ve en küçük asal gerilmenin tünelin yan duvarlarında yüksek olmasının nedeni düşey birincil gerilmenin yatay birincil gerilmeden yüksek olmasıdır. Gerilme akıları tünelin yan duvarlarında diğer bölgelere göre daha yüksek gerilmelere neden olmaktadır. En küçük asal gerilme açıklık tabanlarında tüm kazı aşamaları için çekme gerilmelerine dönüşmektedir. Sağ tüp üst yarı kazısı sonucu sol tüpte oluşan gerilme koşullarının benzeri sağ tüp için de elde edilmiştir (Şekil 6.45) (Geniş ve Derin 2016).

Sol tüp alt yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en büyük birincil gerilme değeri 3.5 MPa, açıklık tabanında 0 MPa ve açıklık tavanında ise 1.05 MPa olmuştur (Şekil 6.44 d). En küçük asal gerilme açıklık tabanında -0.25 MPa çekme gerilmesi oluşmuştur (Şekil 6.45). Sağ tüp alt yarı kazısı sonucu açıklık çevresinde oluşan gerilme dağılımları sol tüpte oluşan gerilme koşullarının benzeri olmuştur (Şekil 6.44 e) (Geniş ve Derin 2016).

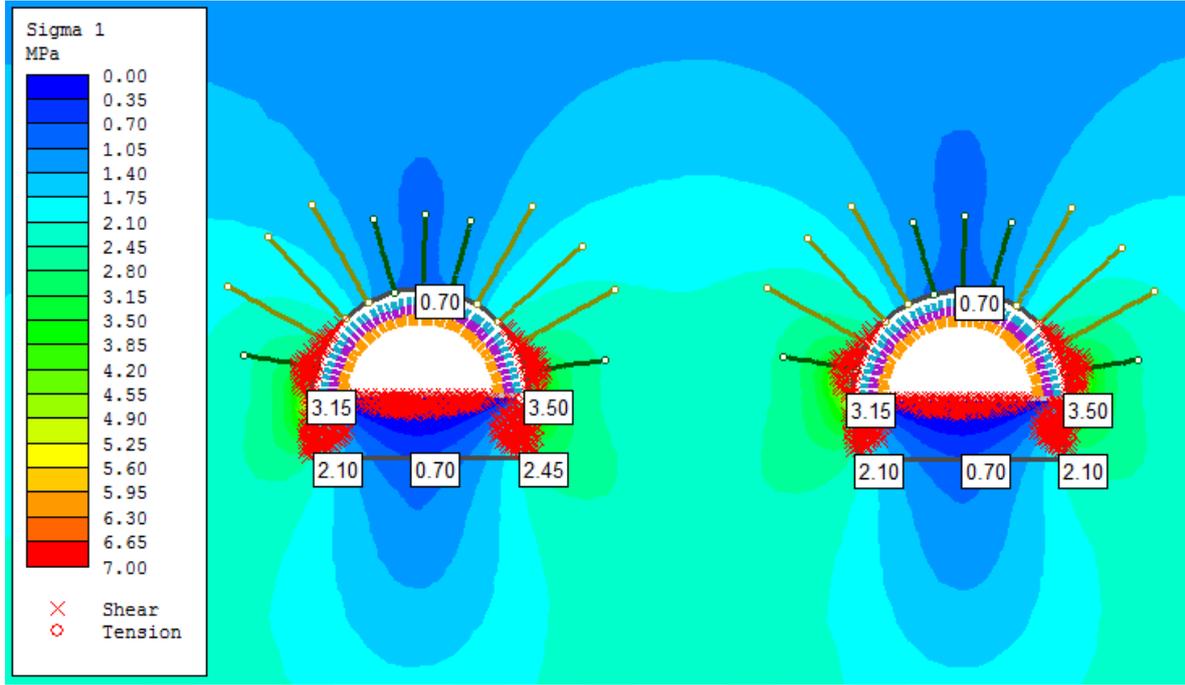


a) Kazı öncesi birincil gerilme dağılımı

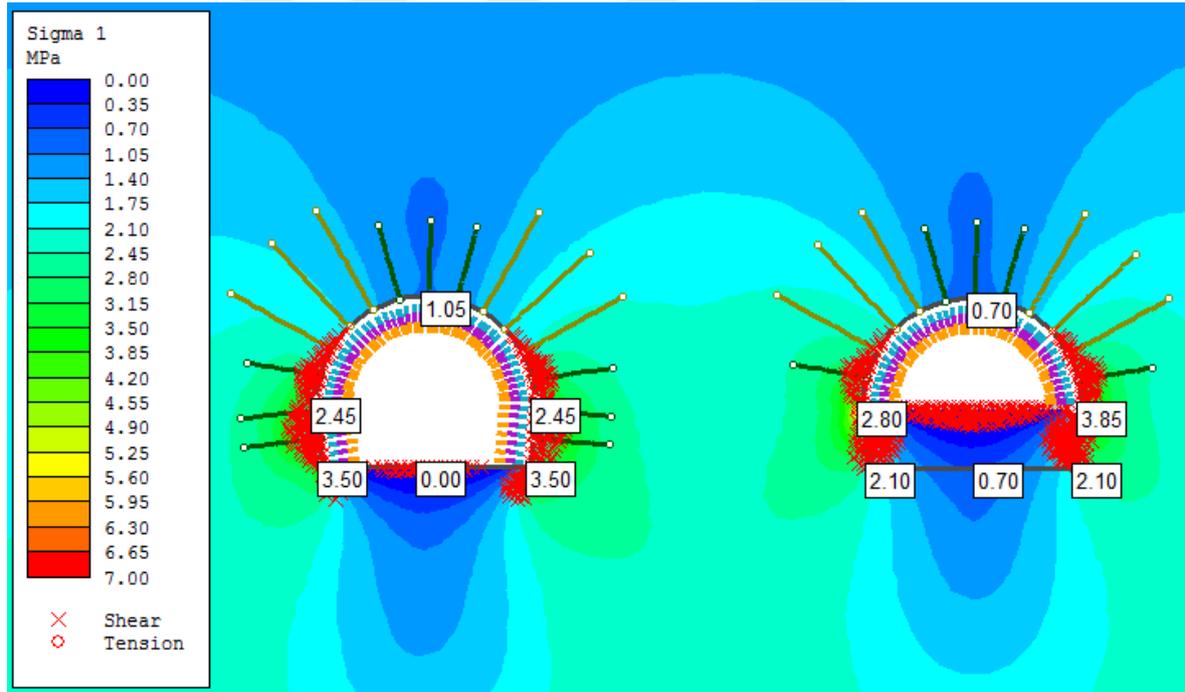


b) Sol tüp üst yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.44 Üzülmez tüneli 2 no.lu kesitinde farklı kazı ve tahkimat aşamaları için açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme dağılımları.

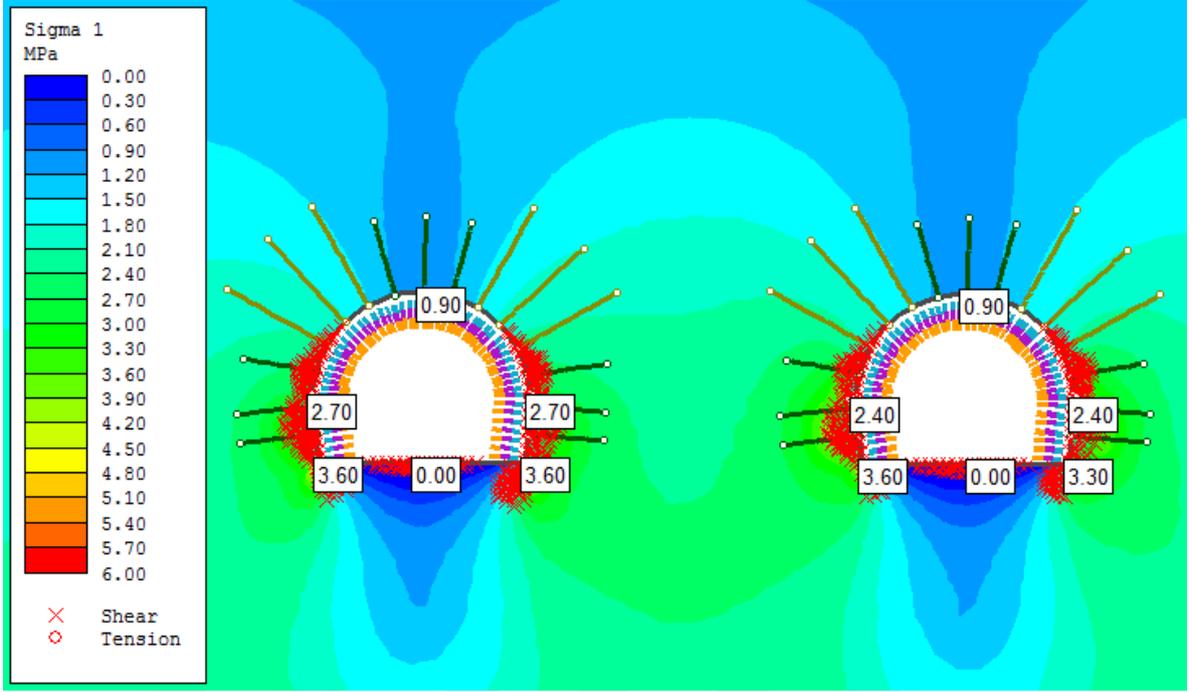


c) Sağ tüp üst yarı tahkimatı sonrası



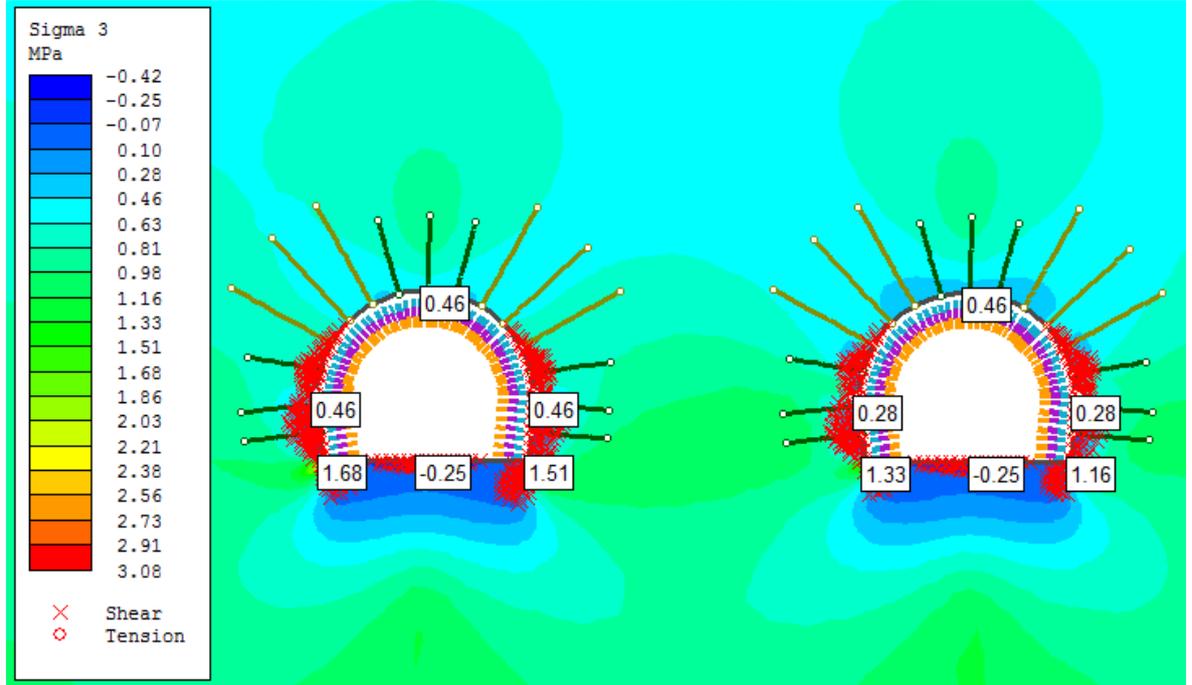
d) Sol tüp alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.44 (devam ediyor).



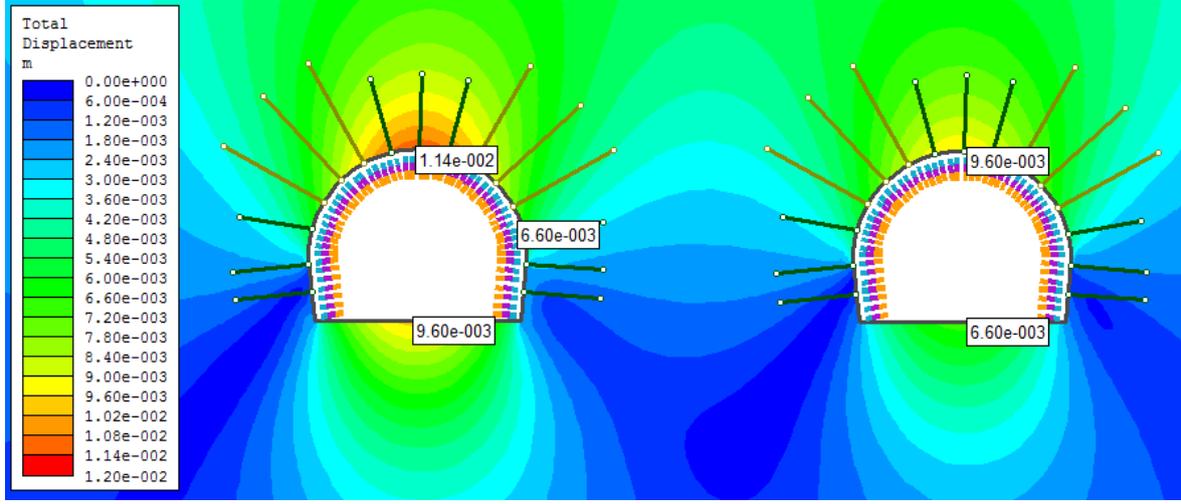
e) Sağ tüp alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.44 (devam ediyor).



Şekil 6.45 Üzülmez tüneli 2 no.lu kesiti için en küçük asal gerilme dağılımları.

Toplam yerdeğiştirme miktarları tüm kazı ve tahkimat aşamaları tamamlandıktan sonra sol tüp tünel tavanında 1.14 cm, tünel tabanında 0.96 cm ve sağ tüp tünel tavanında 0.96 cm, tünel tabanında 0.66 cm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.46) (Geniş ve Derin 2016).



Şekil 6.46 Üzülmaz tüneli 2 no.lu kesiti için toplam yerdeğiştirme dağılımları.

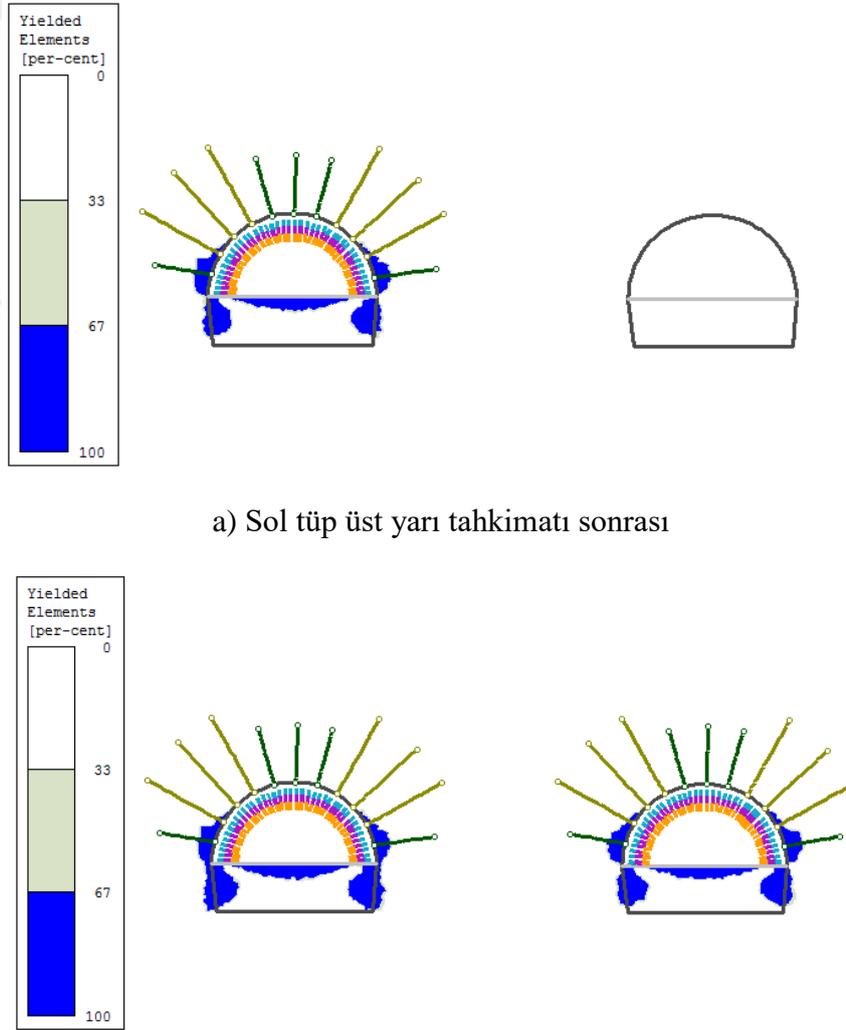
Üzülmaz tüneli 2. kesiti için yapılan çözümlenmelerde açıklık çevresi kaya kütlelerinde oluşan yenilme bölgelerinin incelenen tüm kazı ve tahkimat aşamalarında genellikle açıklığın yan duvarlarında ve tabanında olduğu belirlenmiştir. Kaya kütlelerinde oluşan yenilme bölgelerinin büyüklüğü özellikle kaya saplamalarının uzunluğundan daha kısa bölgelerde sınırlı kalmıştır (Şekil 6.47) (Geniş ve Derin 2016).

Üzülmaz tüneli 2 no.lu kesitinde uygulanan kaya saplaması ve püskürtme betonda herhangi bir yenilme gözlenmemiştir. Tünelin sağ ve sol omuz bölgelerinde 6 m uzunluğunda IBO tipi (32 mm çaplı) kendinden matkaplı saplamalar ile 4 m uzunluğunda tavanda 3 adet ve yan duvarlarda 6 adet olmak üzere toplam 9 adet SN (28 mm çaplı) tip kaya saplaması kullanılmıştır. SN tipi saplamanın aksenal gerilme dayanımı 243.6 MPa ve aksenal kalıcı gerilme dayanımı 16.2 MPa'dır. IBO tipi saplamanın aksenal gerilme dayanımı 186.5 MPa ve aksenal kalıcı gerilme dayanımı 12.4 MPa'dır (Geniş ve Derin 2016).

Sol tüp üst yarı tahkimatı sonunda tünel yan duvarında bulunan 1 no.lu saplamada en büyük aksenal gerilme değeri 40.5 MPa ve sağ tüp üst yarı kazısı sonucunda da yine aynı saplamada en büyük gerilme değeri 70.1 MPa olarak bulunmuştur.(Şekil 6.48 b c). Sol tüp alt yarı kazısı yapıldıktan sonra sol tüp 6 no.lu SN saplamada 111.5 MPa lık bir gerilme değeri oluşmuştur. Sağ tünel alt yarı kazısı tamamlandıktan sonra en büyük aksenal gerilme değeri sol tüp tünelde 23 no.lu saplamada 174.4 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.48 d e) (Geniş ve Derin 2016).

En büyük gerilme değeri olduğu 23 no.lu SN saplama boyunca oluşan aksel gerilmelerin saplama boyunca değişimi de Şekil 6.49'da verilmiştir. Ayrıca sol tüpte 8 no. ile tanımlanan IBO saplamada oluşan aksel gerilme değeri dağılımı da Şekil 6.50'de verilmiştir. Şekil 6.49 ve 6.50 incelendiğinde en büyük gerilme değerlerinin beklendiği gibi saplamanın açıklığa yakın kısımlarında olduğu görülmektedir. Her iki tüpte kullanılan saplamalarda oluşan aksel gerilme değerlerinin saplamaların akma dayanımlarının altında kaldığı yani üzerine etkileyen yükleri güvenle taşıdıkları elde edilmiştir (Geniş ve Derin 2016).

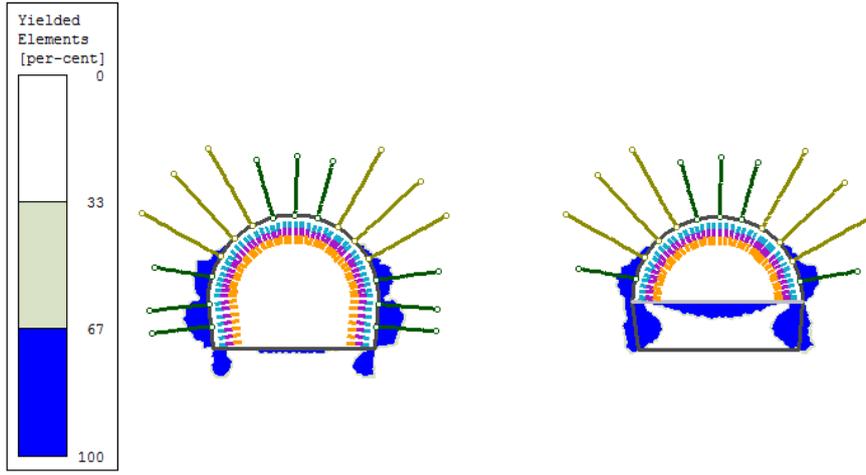
Tünel kaplaması olarak kullanılan çelik hasır+püskürtme beton (1.tabaka), demirbağ (iksa)+püskürtme beton tabakalarında (2. tabaka) ve püskürtme beton (3. tabaka) oluşan aksel kuvvet dağılımları Şekil 6.51-6.53'te gösterilmiştir. En büyük aksel kuvvet, tüm tabakalar için açıklığın sağ ve sol üst bölümlerinde oluşmuştur (Geniş ve Derin 2016).



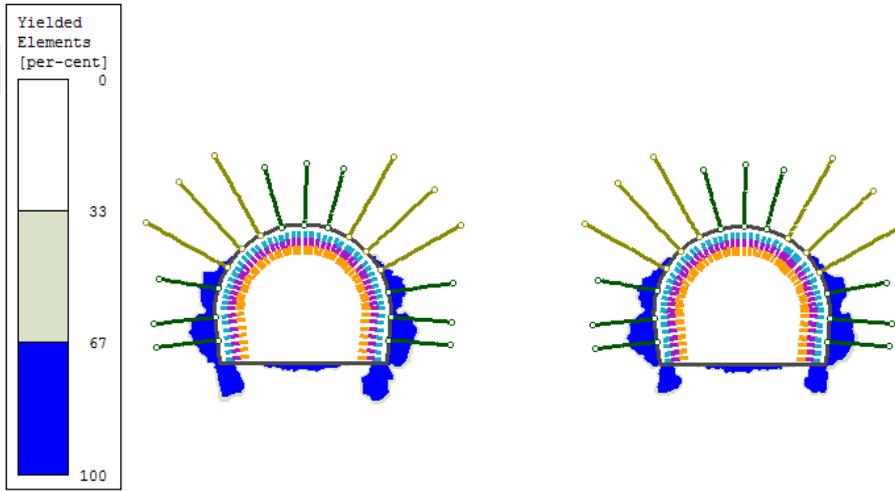
a) Sol tüp üst yarı tahkimatı sonrası

b) Sağ tüp üst yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.47 Üzülmez tüneli 2 no.lu kesiti için yenilme bölgeleri.

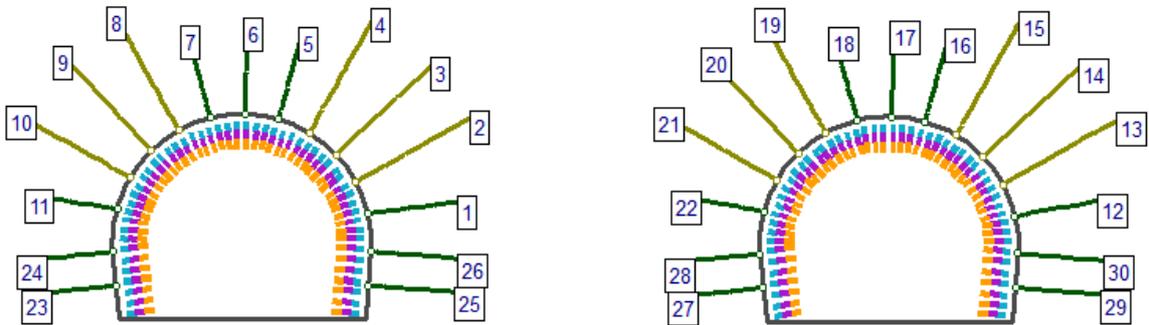


c) Sol tüp alt yarı tahkimatı sonrası



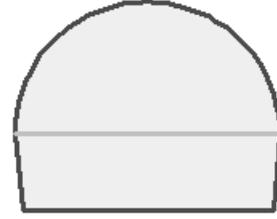
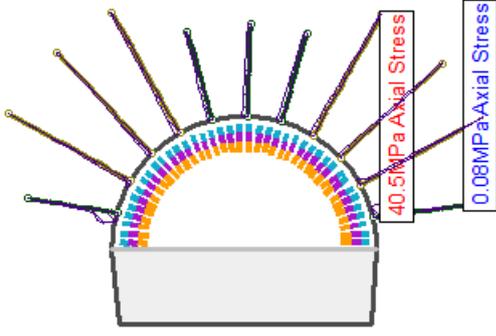
d) Sağ tüp alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.47 (devam ediyor).

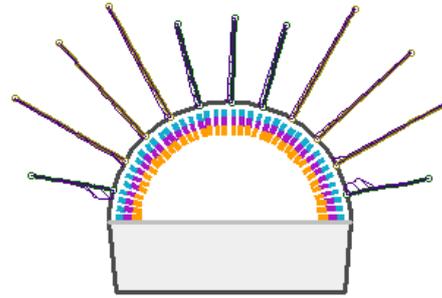
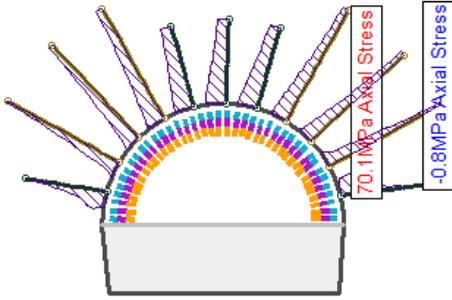


a) Saplama numaraları

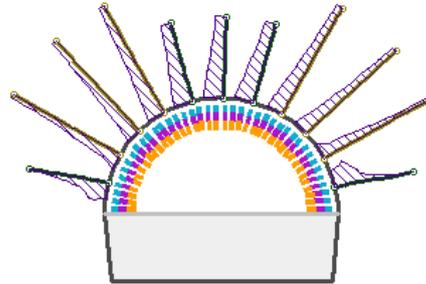
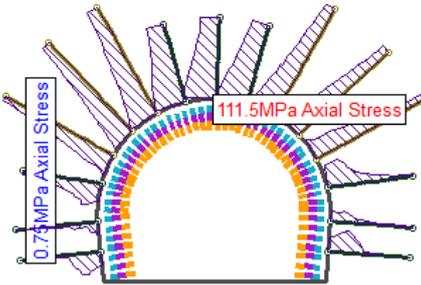
Şekil 6.48 Üzülmez tüneli 2. kesitinde saplamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.



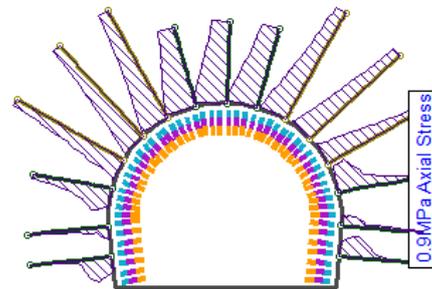
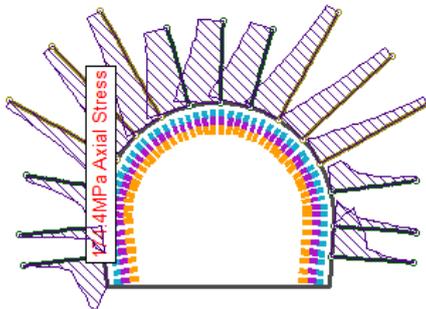
b) Sol tüp üst yarı tahkimatı sonrası



c) Sağ tüp üst yarı tahkimatı sonrası



d) Sol tüp alt yarı tahkimatı sonrası

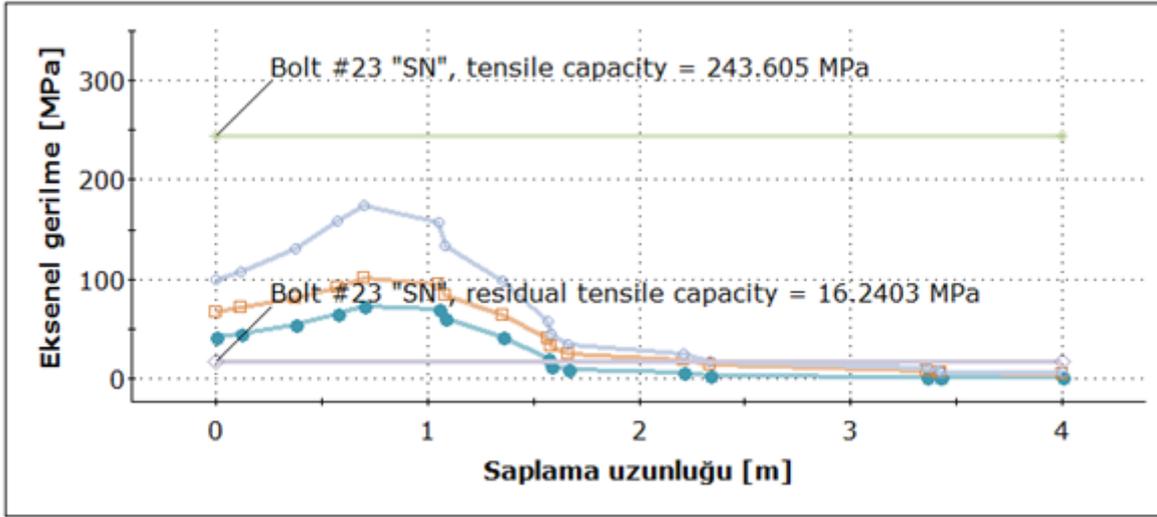


Axial stress = Eksenel gerilme

e) Sağ tüp alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.48 (devam ediyor).

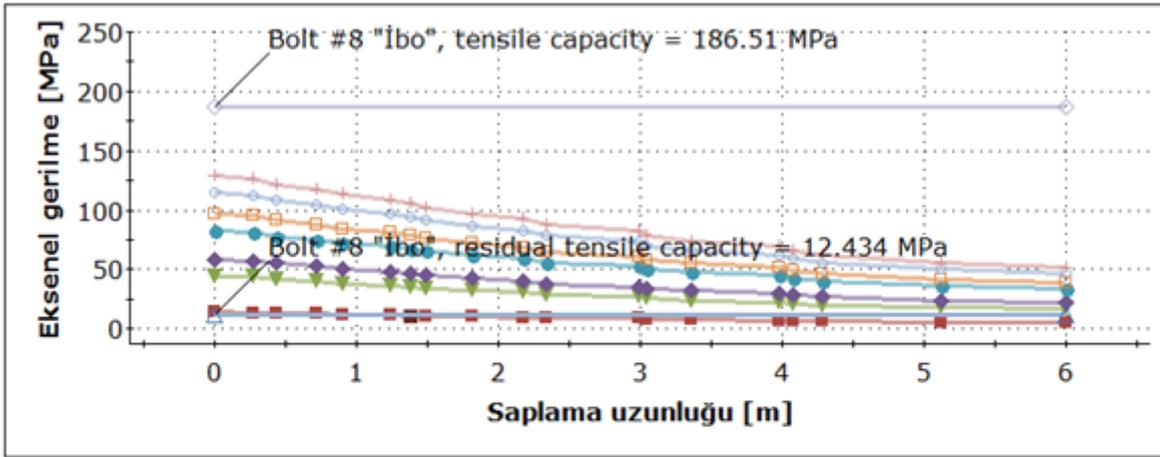
23 no.lu saplama



- 7. aşama
- 8. aşama
- 9. aşama
- ◆ Eksenel gerilme kalıcı dayanımı
- ◆ Eksenel gerilme dayanımı

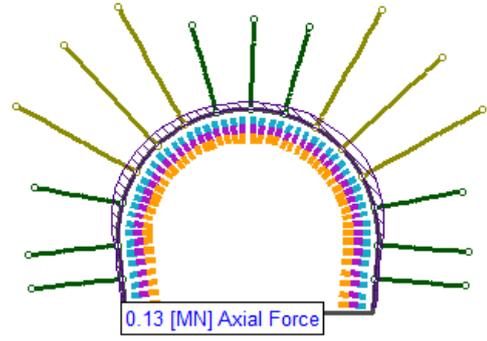
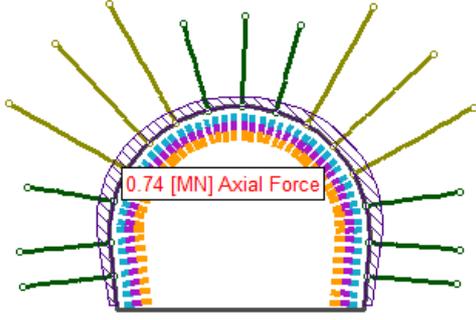
Şekil 6.49 Sol tüpte bulunan 23 no.lu SN saplamada oluşan aksenal gerilmenin saplama uzunluğunca değişimi.

8 no.lu IBO saplama



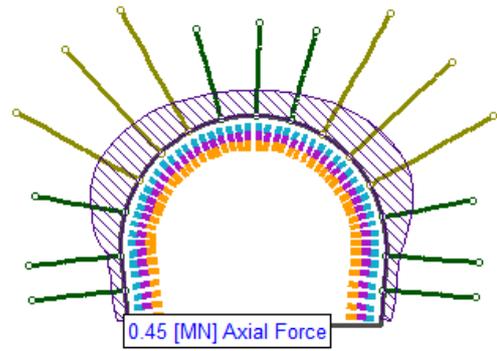
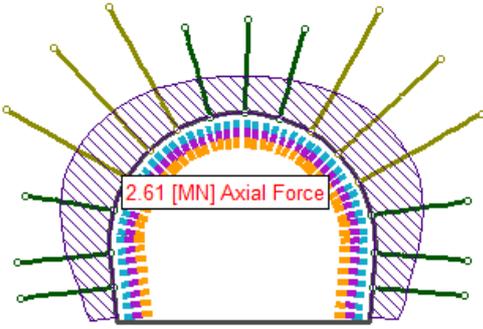
- 3. aşama
- ◆ 4. aşama
- ◆ 5. aşama
- 6. aşama
- 7. aşama
- ◆ 8. aşama
- ◆ Eksenel gerilme kalıcı dayanımı
- ◆ Eksenel gerilme dayanımı

Şekil 6.50 Sol tüpte bulunan 8 no.lu IBO saplamada oluşan aksenal gerilmenin saplama uzunluğunca değişimi.



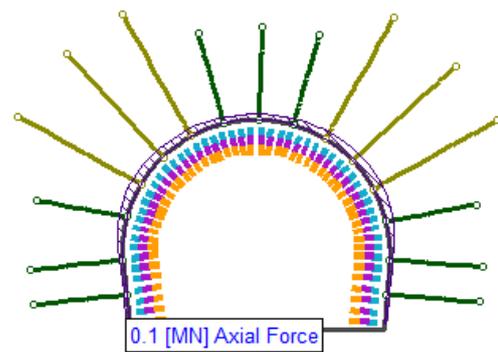
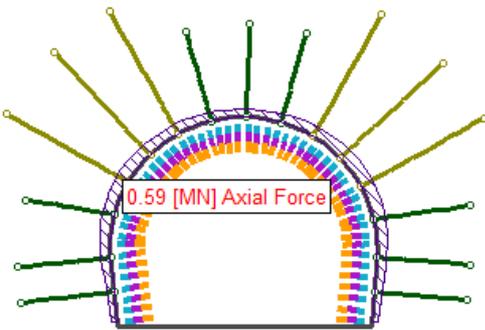
Axial force= Eksenel kuvvet

Şekil 6.51 Tünel kaplamasında (1. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları (MN) (aşama 9 için).



Axial force= Eksenel kuvvet

Şekil 6.52 Tünel kaplamasında (2. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları (MN) (aşama 9 için).



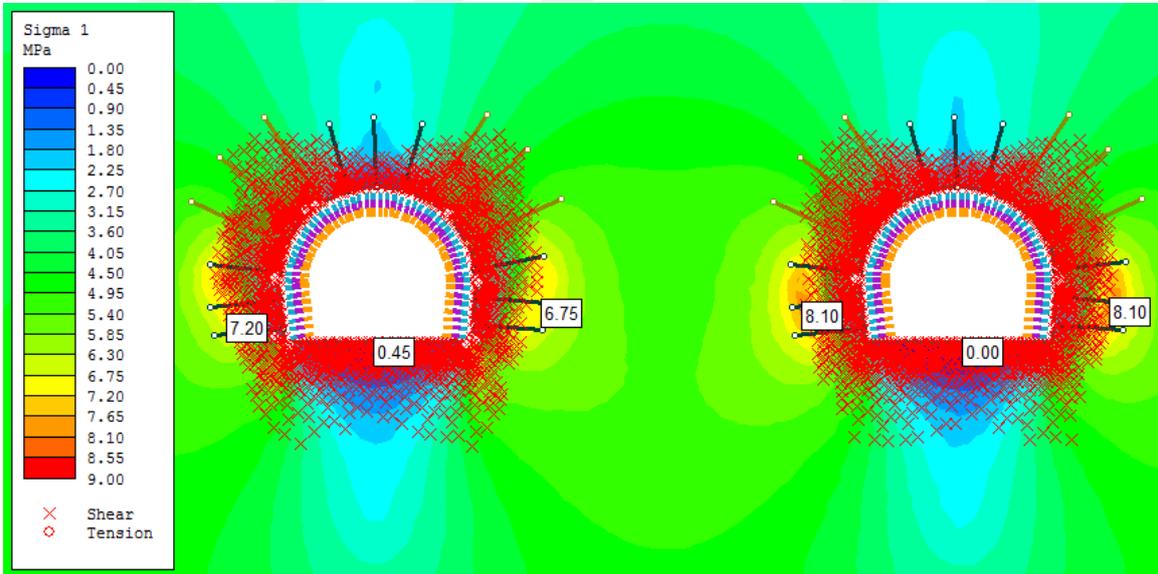
Axial force= Eksenel kuvvet

Şekil 6.53 Tünel kaplamasında (3. tabaka) oluşan aksenal kuvvet dağılımları (MN) (aşama 9 için).

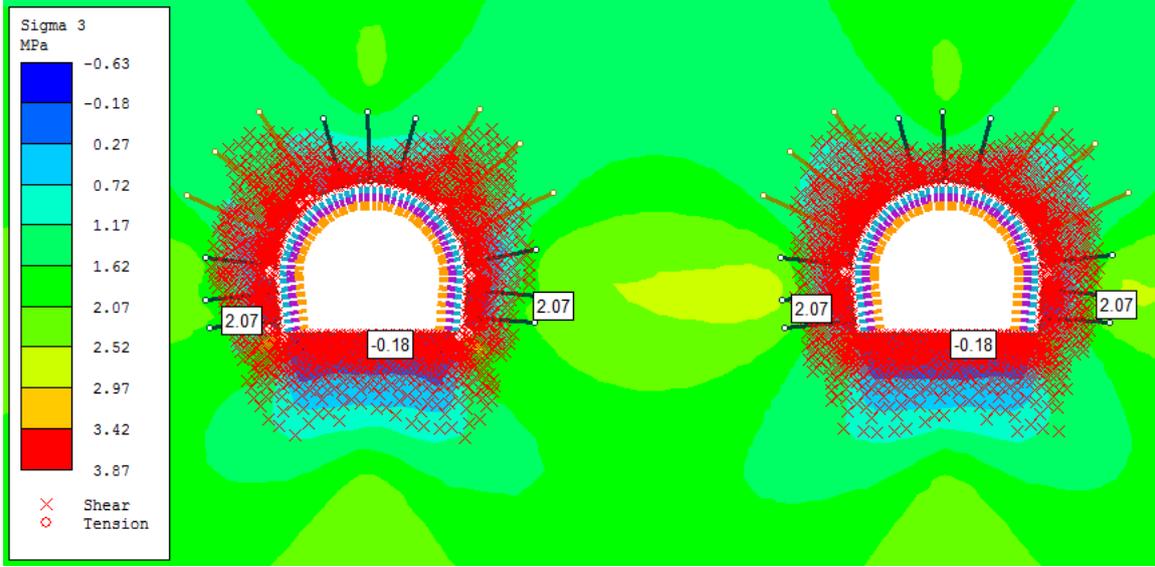
6.3.2.3 Üzülmez Tüneli 3 no.lu kesit

Üzülmez tünelinin 30+634.00-30+641.20 kilometreleri arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümlenmesi yapılmıştır. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 160 m olduğu bu bölgede açıklığın bulunduğu seviyede en büyük asal gerilmenin yaklaşık 4.2 MPa ve en küçük asal gerilme ise 1.95 MPa olarak hesaplanmıştır. Gerilme akıları tünelin yan duvarlarında diğer bölgelere göre daha yüksek gerilmelere neden olmaktadır. En küçük asal gerilme açıklık tabanlarında tüm kazı aşamaları için çekme gerilmelerine dönüşmektedir. Açıklık çevresinde plastik bölge oluştuğu için en büyük asal gerilmeler, açıklık yüzeyinden içeride elastik-plastik bölge sınırında en büyük değerini almaktadır. Alt yarı kazı ve tahkimatından sonra bu bölgede en büyük asal gerilme sol tüp taban bölgesinde 7.2 MPa ve sağ tüp taban kısmında 8.1 MPa olarak bulunmuştur. En büyük ve en küçük asal gerilmenin tünelin yan duvarlarında yüksek olmasının nedeni düşey birincil gerilmenin yatay birincil gerilmeden yüksek olmasıdır (Şekil 6.54 ve 6.55) (Geniş ve Derin 2016).

Toplam yerdeğiştirme miktarları tüm kazı ve tahkimat aşamaları tamamlandıktan sonra sol tüp tünel tavanında 3.4 cm, tünel yan duvarında 2.4 cm ve sağ tüp tünel tavanında 2.8 cm, tünel yan duvarında 2 cm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.56) (Geniş ve Derin 2016).

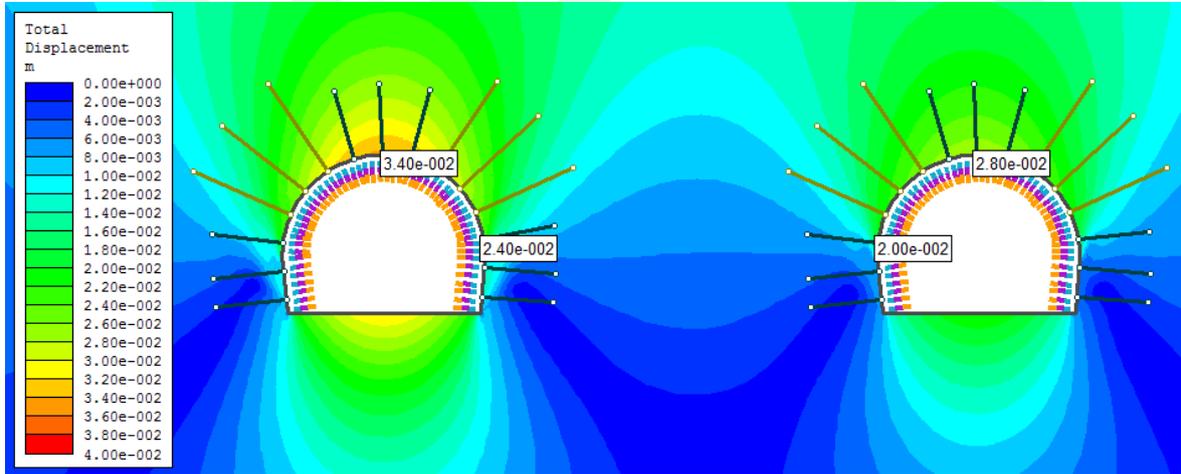


Şekil 6.54 Üzülmez tüneli 3 no.lu kesiti için en büyük asal gerilme dağılımları.

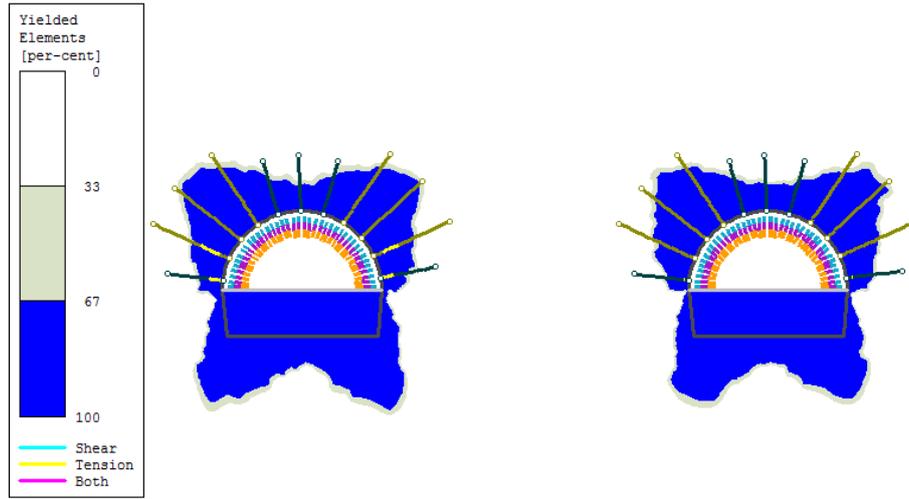


Şekil 6.55 Üzülmez tüneli 3 no.lu kesiti için en küçük asal gerilme dağılımları.

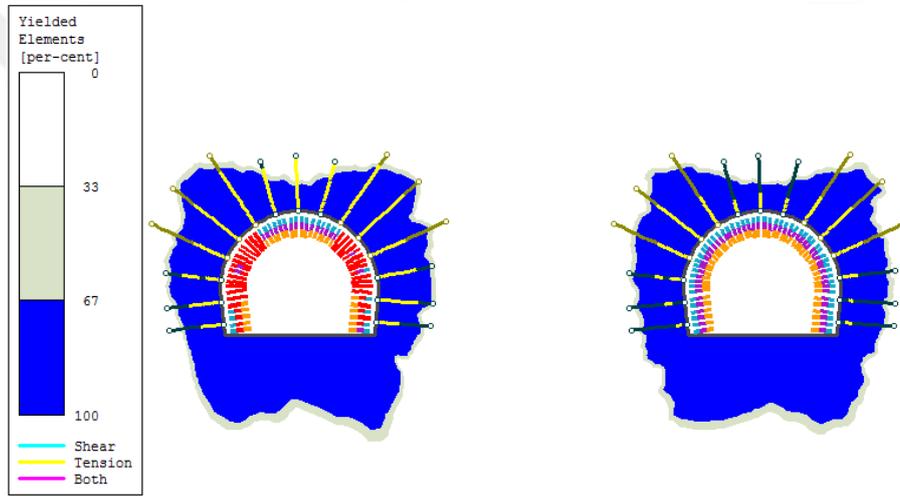
Üzülmez tüneli 3. kesiti için yapılan çözümlerinde açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin incelenen üst yarı kazısı, alt yarı kazısı ve tahkimat aşamalarında açıklığı tümüyle çevrelediği belirlenmiştir. Oluşan yenilme bölgelerinin büyüklüğünün tünelleri çevreleyen bazı bölgelerde kaya saplamalarının uzunluğu kadar olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.57) (Geniş ve Derin 2016).



Şekil 6.56 Üzülmez tüneli 3 no.lu kesiti için toplam yerdeğiştirme dağılımları.



a) Sağ tüp üst yarı tahkimatı sonrası



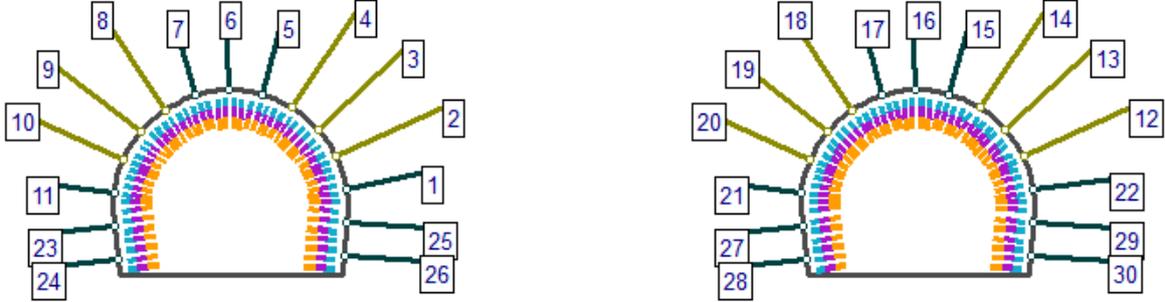
b) Sağ tüp alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.57 Üzülmez tüneli 3 no.lu kesiti için yenilme bölgeleri.

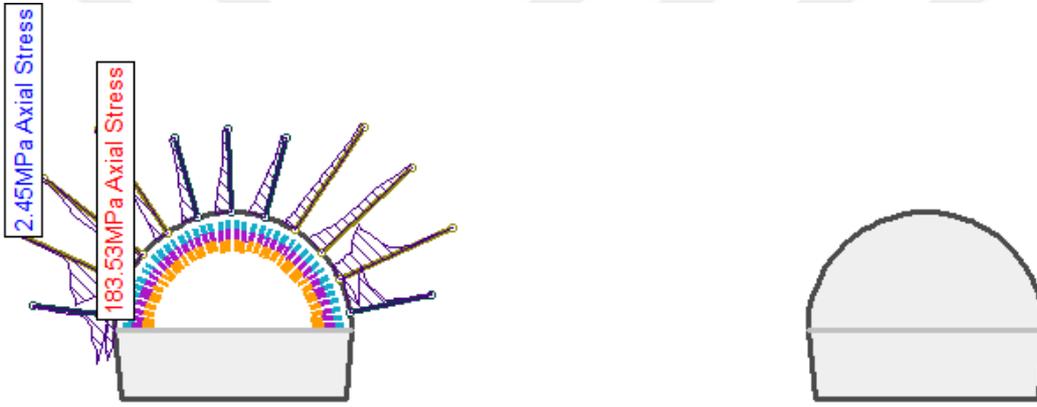
Tünelin sağ ve sol omuz bölgelerinde 6 m uzunluğunda IBO tipi (32 mm çaplı) kendinden matkaplı saplamalar ile 4 m uzunluğunda tavanda 3 adet ve yan duvarlarda 6 adet olmak üzere toplam 9 adet SN (28 mm çaplı) tip kaya saplaması kullanılmıştır. SN tipi saplamanın aksenal çekme dayanımı 243.6 MPa ve aksenal kalıcı çekme dayanımı 16.2 MPa'dır. IBO tipi saplamanın aksenal çekme dayanımı 186.5 MPa ve aksenal kalıcı çekme dayanımı 12.4 MPa'dır (Geniş ve Derin 2016).

Sol tüp üst yarı tahkimatı sonunda tünel yan duvarında bulunan 11 no.lu SN saplamada en büyük aksenal gerilme değeri 183.5 MPa ve sağ tüp üst yarı kazısı sonucunda 21 no.lu SN saplamada en büyük gerilme değeri 230.3 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 6.58 b c). Sol tüp alt yarı kazısı yapıldıktan sonra sol tüp 25 no.lu SN saplamada 232.8 MPa lık bir gerilme

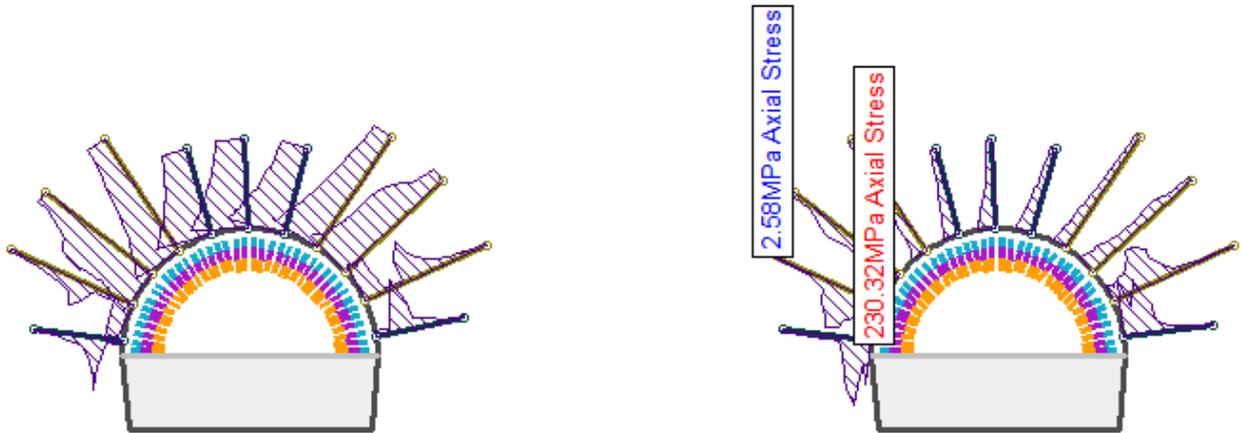
değeri oluşmuştur. Sağ tünel alt yarı kazısı tamamlandıktan sonra en büyük aksenal gerilme değeri sol tüp tünelde 6 no.lu saplamada 242.9 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.58 d e) (Geniş ve Derin 2016).



a) Saplama numaraları

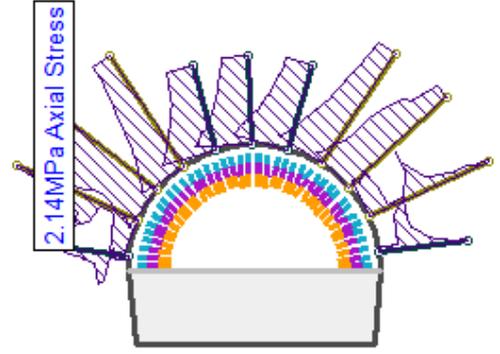
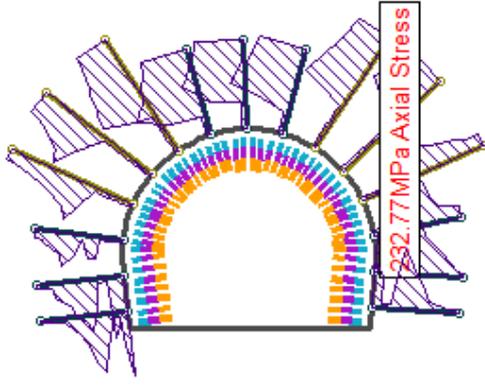


b) Sol tüp üst yarı tahkimatı sonra

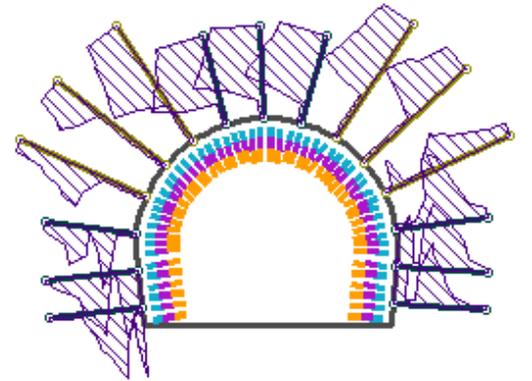
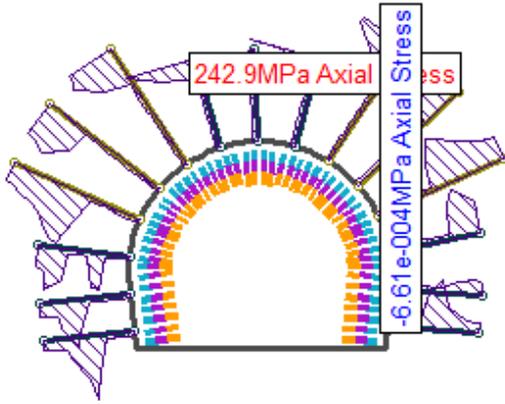


c) Sağ tüp üst yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.58 Üzülmez tüneli 3. kesitinde saplamalarda oluşan aksenal çekme gerilmesi dağılımları.



d) Sol tp alt yarı tahkimatı sonrası



Axial stress = Eksenel gerilme

e) Sağ tp alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.58 (devam ediyor).

zlmez tünelinin en derin bölgesinde uygulanan tahkimat elemanlarının bazı bölümleri plastik davranış göstermiştir. Şekil 6.59'da sağ ve sol tüpte uygulanan kaya saplamalarında oluşan yenilme bölgesi incelendiğinde kaya saplamalarında kısmi çekme modunda yenilmenin oluştuğu anlaşılmaktadır. Özellikle sol tp tünelde tavanda uygulanan SN saplamaların tüm boylarına yakın bölgede yenilme oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu yenilmeleri Şekil 6.59'da saplamalarda oluşan sarı renkli bölgelerden, püskürtme betonda ise kırmızı renkli bölgelerden anlıyoruz (Geniş ve Derin 2016).

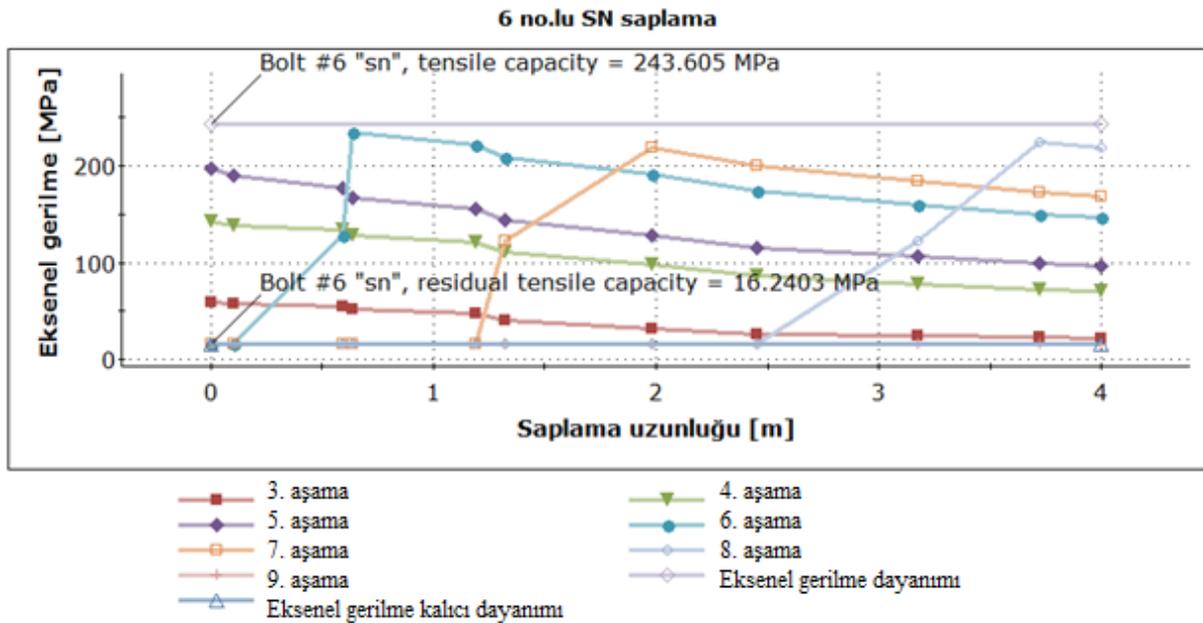
En büyük çekme gerilmesinin oluştuğu 6 no.lu SN saplama boyunca oluşan eksenel gerilmelerin saplama boyunca değişimi de Şekil 6.60'de verilmiştir. Sol tp alt yarı kazısından sonraki adımlarda 6 no.lu SN saplamada oluşan eksenel gerilme değeri saplamanın en büyük gerilme dayanımı değerini aşarak saplamanın uzunluğu boyunca yenilme oluşmuştur (Şekil 6.60). Ayrıca sol tüpte 4 no. ile tanımlanan IBO saplamada oluşan eksenel çekme gerilmesi dağılımı da Şekil 6.61'de verilmiştir. Her iki tüpte kullanılan saplamalarda

eksenel gerilme sonucu oluşan yenilmelerin saplamaların kısmi uzunluklarında olduğu belirlenmiştir (Geniş ve Derin 2016).

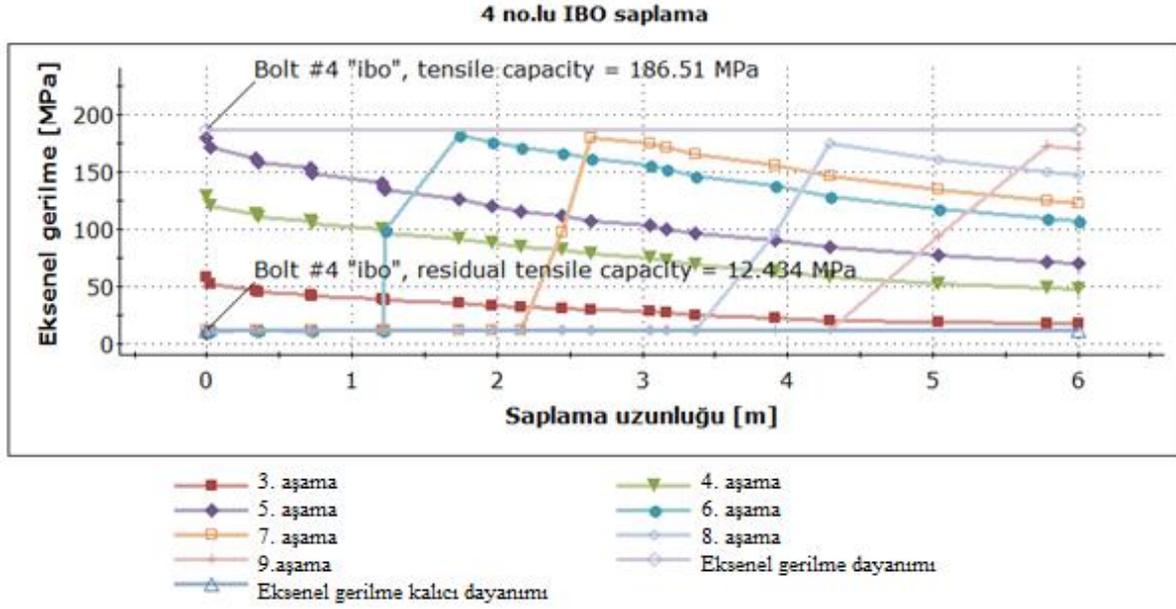


Şekil 6.59 Üzülmez tüneli 3. kesitinde saplamalarda ve kaplamada oluşan yenilme dağılımları.

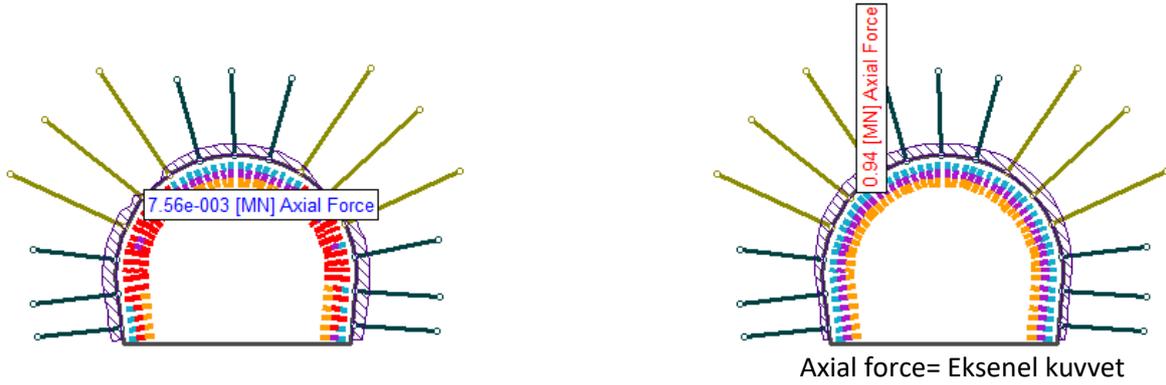
Tünel kaplaması olarak kullanılan çelik hasır + püskürtme beton (1.tabaka), demirbağ (iksa) + püskürtme beton tabakalarında (2. tabaka) ve püskürtme beton (3. tabaka) oluşan eksenel kuvvet dağılımları Şekil 6.62-6.64’de gösterilmiştir. En büyük eksenel kuvvet, tüm tabakalar için açıklığın sağ ve sol üst bölümlerinde oluşmuştur. Sol tüpte omuz bölgelerinde kaplamada oluşan gerilmeler dayanımı aşmaktadır. Kısmi olarak tünelin sağ ve sol üst (omuz) bölgelerinde bazı yenilmeler beklenebilir. Fakat nihai beton kaplaması bu çözümlemede göz önünde bulundurulmamıştır (Geniş ve Derin 2016).



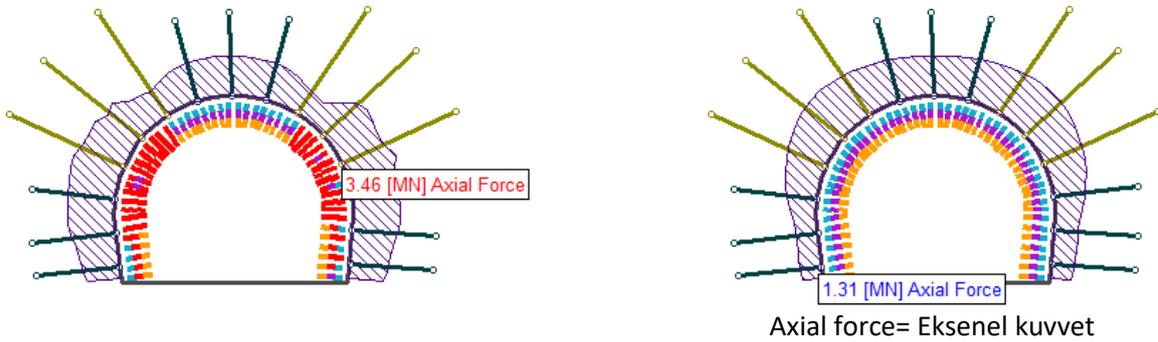
Şekil 6.60 Sol tüpte bulunan 6 no.lu SN saplamada oluşan eksenel gerilmenin saplama uzunluğunca değişimi.



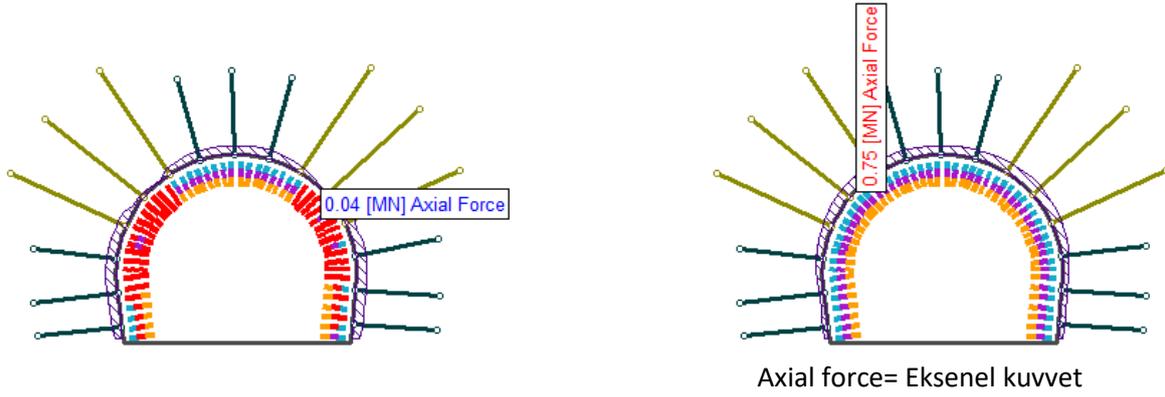
Şekil 6.61 Sol tüpte bulunan 4 no.lu IBO saplama da oluşan eksenel gerilmenin saplama uzunluğunca değişimi.



Şekil 6.62 Tünel kaplamasında (1. tabaka) oluşan eksenel kuvvet (MN) (aşama 9 için).



Şekil 6.63 Tünel kaplamasında (2. tabaka) oluşan eksenel kuvvet (MN) (aşama 9 için).



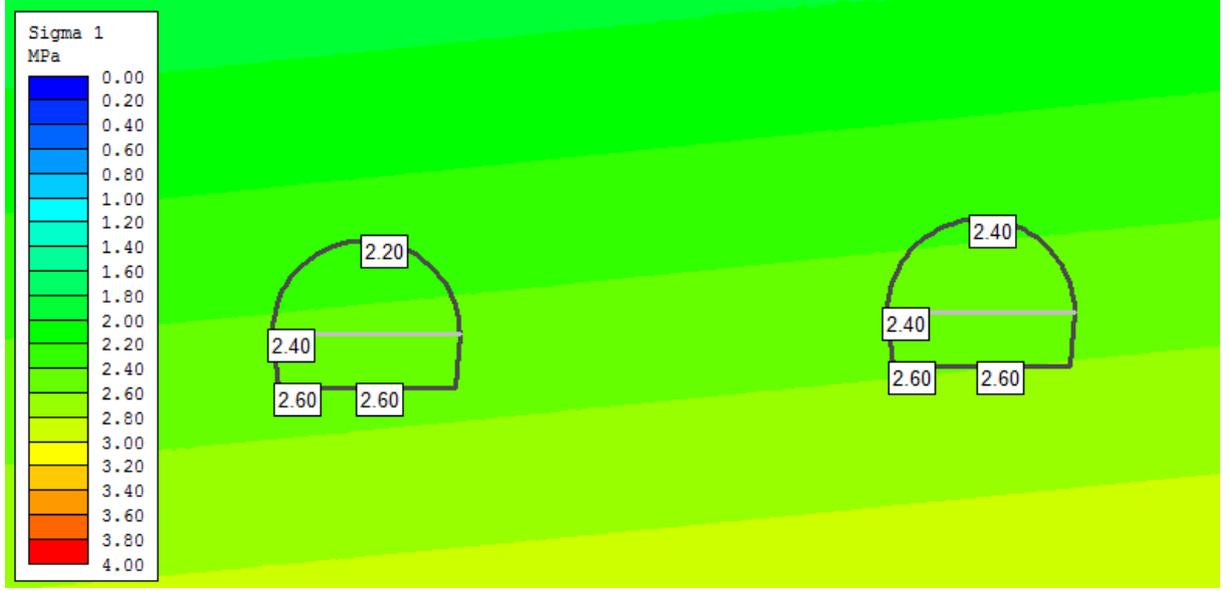
Şekil 6.64 Tünel kaplamasında (3. tabaka) oluşan eksenel kuvvet (MN) (aşama 9 için).

6.3.2.4 Üzülmez Tünelleri 4 no.lu kesit

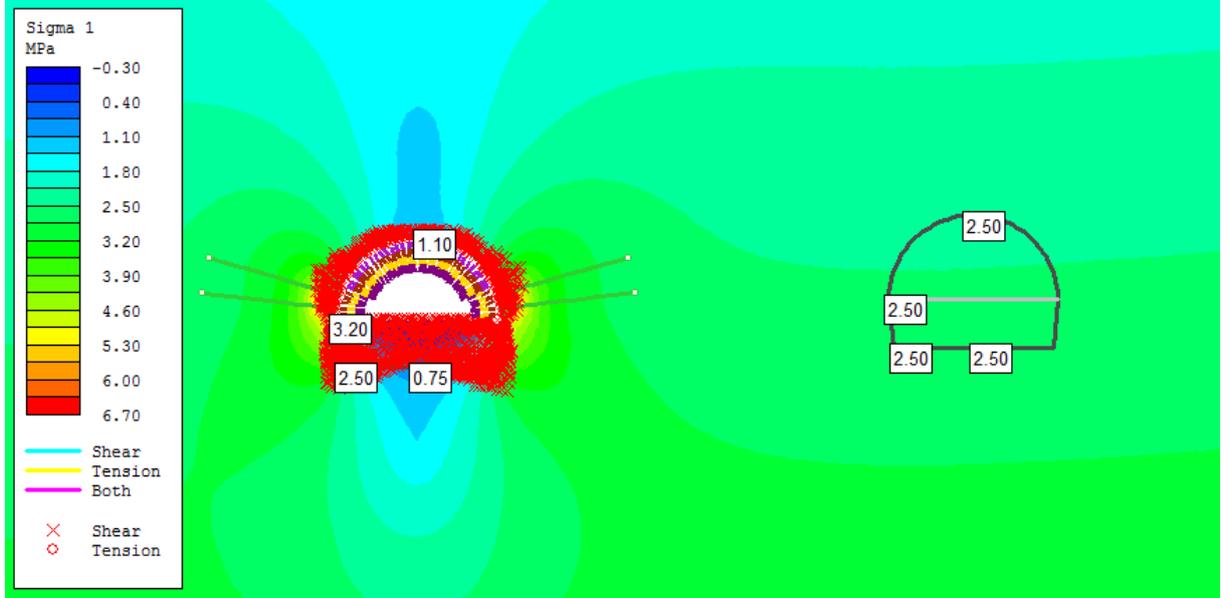
Üzülmez tünelinin 30+746.5-30+802.4 kilometreleri arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümlenmesi yapılmıştır. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 100 m olduğu bu bölgede açıklığın bulunduğu seviyede en büyük asal gerilme yaklaşık 2.6 MPa civarında hesaplanmıştır (Şekil 6.65 a). Sol tüp üst yarı kazısı sonucunda en büyük asal gerilmeler açıklık tavanında 1.1 MPa ve açıklık köşe tabanında en yüksek değerini alarak 3.2 MPa olduğu bulunmuştur (Şekil 6.65 b). En büyük ve en küçük asal gerilmenin tünelin yan duvarlarında yüksek olmasının nedeni düşey birincil gerilmenin yatay birincil gerilmeden yüksek olmasıdır. Gerilme akıları tünelin yan duvarlarında diğer bölgelere göre daha yüksek gerilmelere neden olmaktadır. Sağ tüp üst yarı kazısı sonucunda en büyük asal gerilmeler açıklık tavanında 0.85 MPa ve açıklık köşe tabanında en yüksek değerini alarak 2.85 MPa olduğu bulunmuştur (Şekil 6.65 c).

Sol tüp alt yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en büyük asal gerilme değeri 3.15 MPa, açıklık tabanında 0 ve açıklık tavanında ise 1.05 MPa olmuştur (Şekil 6.65 d). Sağ tüp alt yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en büyük birincil gerilme değeri 3.30 MPa, açıklık tabanında 0 ve açıklık tavanında ise 1.20 MPa olmuştur (Şekil 6.65 e).

Sol tüp alt yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en küçük asal gerilme değeri 1.50 MPa, açıklık tabanında 0 MPa ve açıklık tavanında ise 0.90 MPa olmuştur (Şekil 6.66). Sağ tüp alt yarı kazısı sonucu ise açıklık köşe taban bölgelerinde oluşan en küçük asal gerilme değeri 1.50 MPa, açıklık tabanında 0 MPa ve açıklık tavanında 0.60 MPa olmuştur (Şekil 6.66).

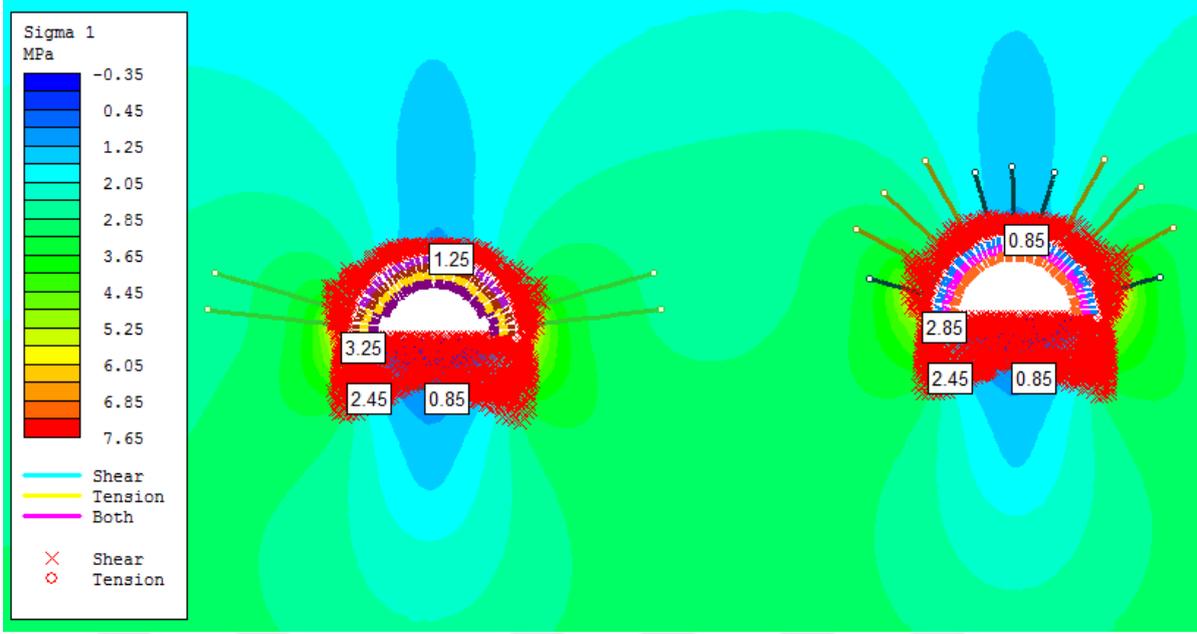


a) Kazı öncesi birincil gerilme dağılımı

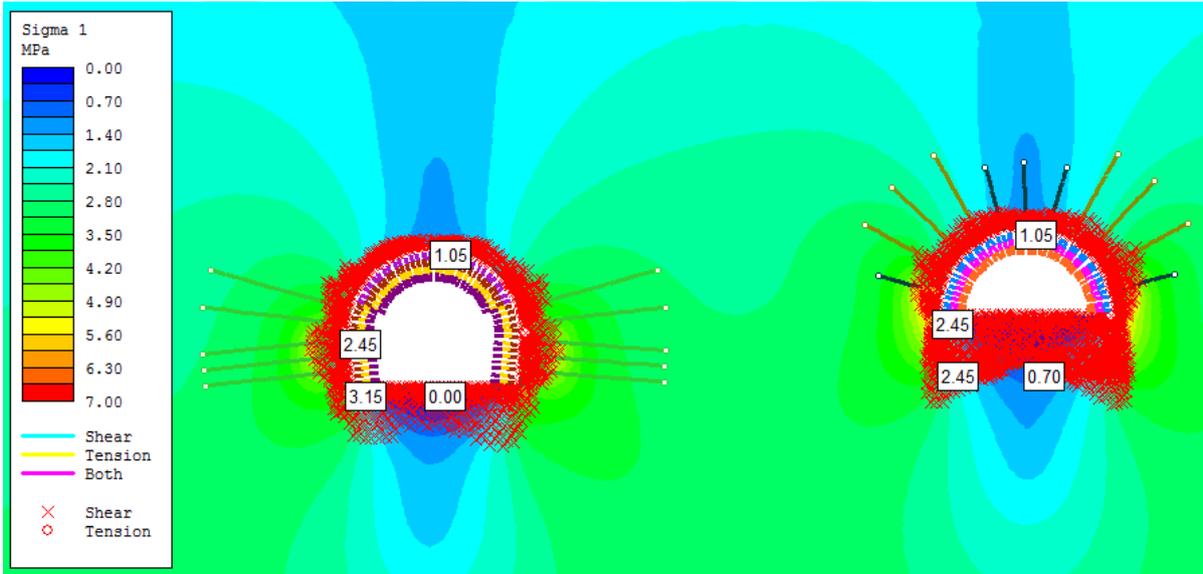


b) Sol tüp üst yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.65 Üzülmez tüneli 4 no.lu kesitinde farklı kazı ve tahkimat aşamaları için açıklık çevresinde oluşan en büyük asal gerilme dağılımları.

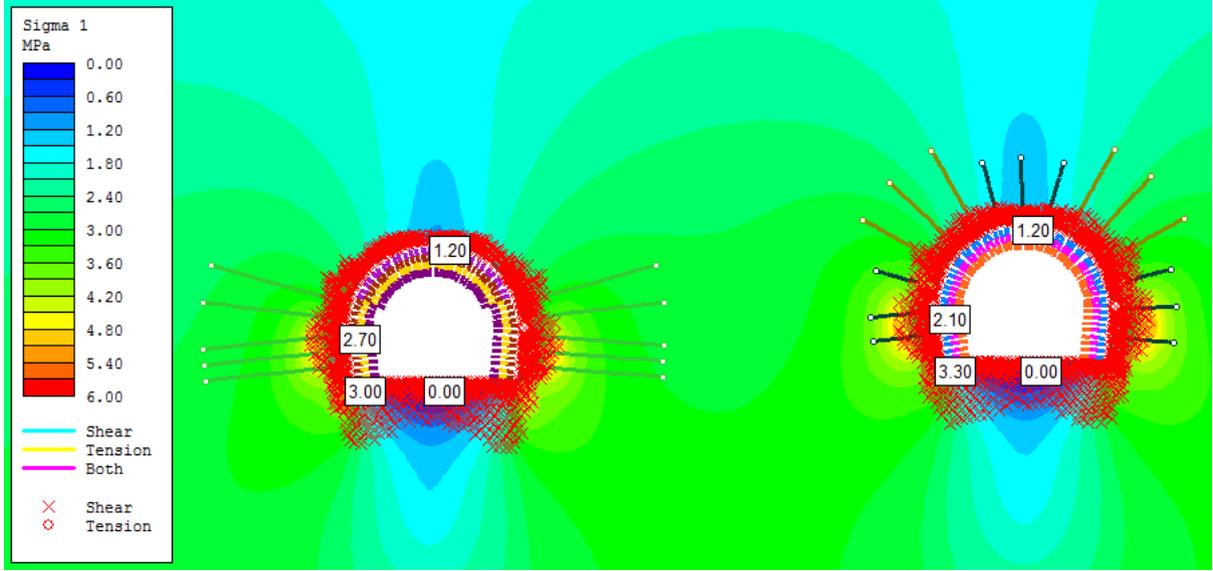


c) Sağ tüp üst yarı tahkimatı sonrası



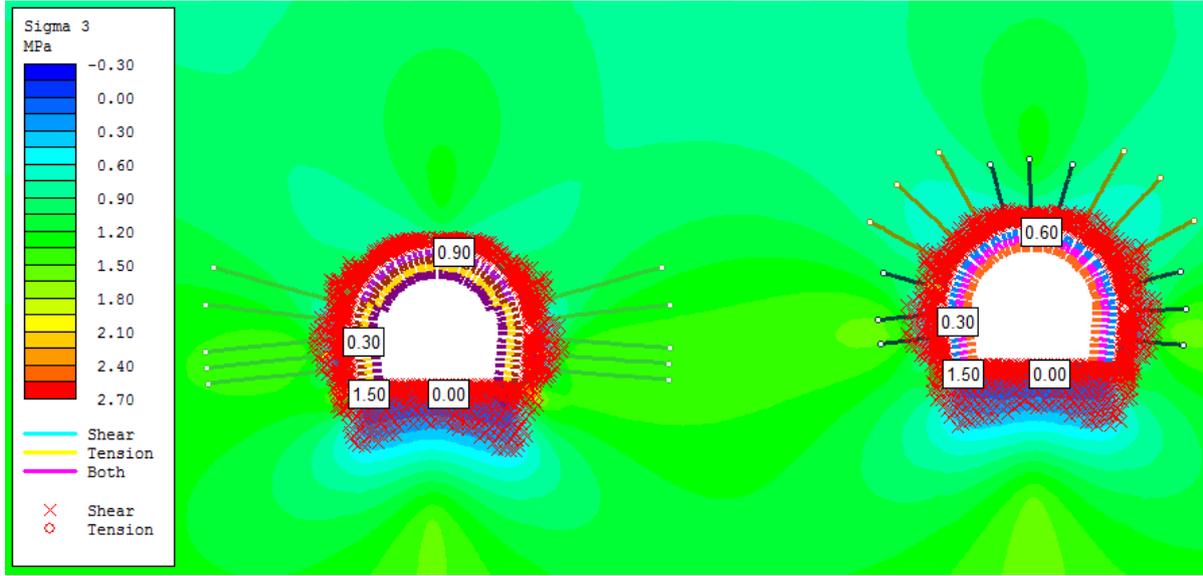
d) Sol tüp alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.65 (devam ediyor).



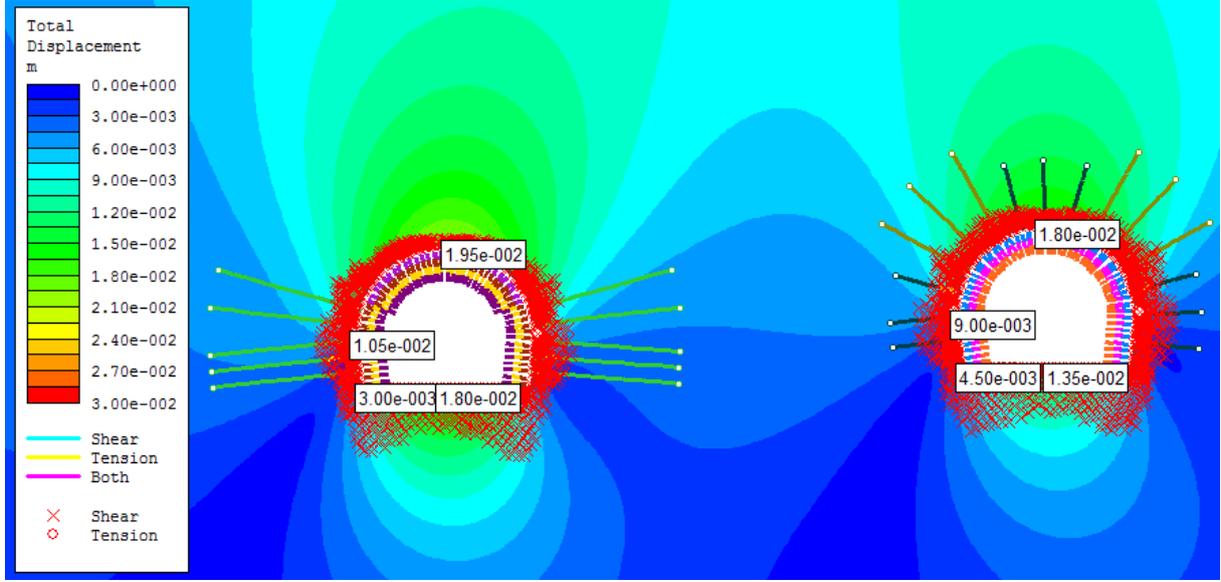
e) Sağ tüp alt yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.65 (devam ediyor).



Şekil 6.66 Üzülmez tüneli 4 no.lu kesiti için en küçük asal gerilme dağılımları.

Toplam yerdeğiştirme miktarları tüm kazı ve tahkimat aşamaları tamamlandıktan sonra sol tüp tünel tavanında 1.95 cm, tünel tabanında 1.80 cm ve sağ tüp tünel tavanında 1.80 cm, tünel tabanında 1.35 cm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.67).

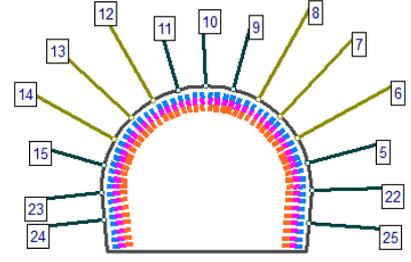
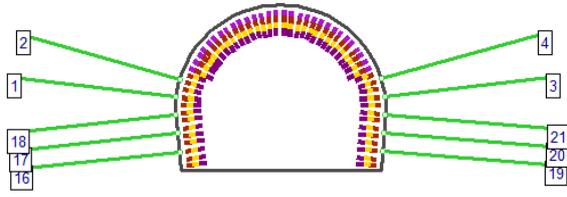


Şekil 6.67 Üzülmez tüneli 4 no.lu kesiti için toplam yerdeğiştirme dağılımları.

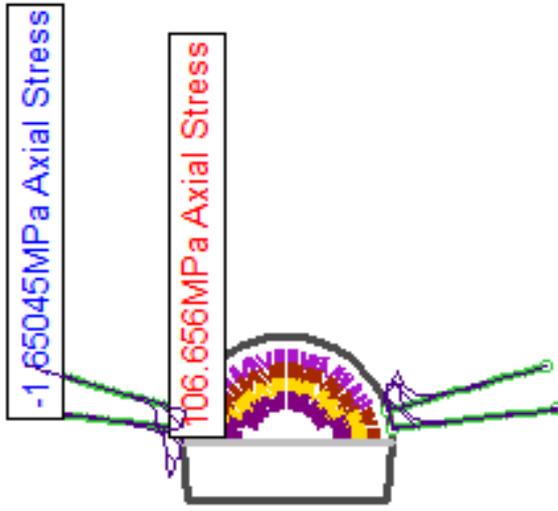
Üzülmez tüneli 4. kesiti için yapılan çözümlerinde açıklık çevresi kaya kütleğinde oluşan yenilme bölgeleri incelenen üst yarı ve alt yarı kazısı ve tahkimat aşamalarında açıklığı tümüyle çevrelediği belirlenmiştir (Şekil 6.69).

Üzülmez sol tünelinin omuzları ve yan duvarlarında 9 m uzunluğunda IBO tipi (32 mm çaplı) kendinden matkaplı saplamalar kullanılmıştır. Sağ tünelin sağ ve sol omuz bölgelerinde 6 m uzunluğunda IBO tipi (32 mm çaplı) kendinden matkaplı saplamalar ile 4 m uzunluğunda tavanda 3 adet ve yan duvarlarda 6 adet olmak üzere toplam 9 adet SN (28 mm çaplı) tip kaya saplaması kullanılmıştır. SN tipi saplamanın aksenal çekme dayanımı 243.6 MPa ve aksenal kalıcı çekme dayanımı 16.2 MPa'dır. IBO tipi saplamanın aksenal çekme dayanımı 186.5 MPa ve aksenal kalıcı çekme dayanımı 12.4 MPa'dır.

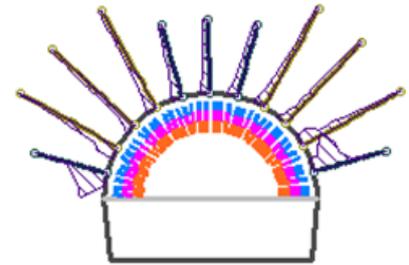
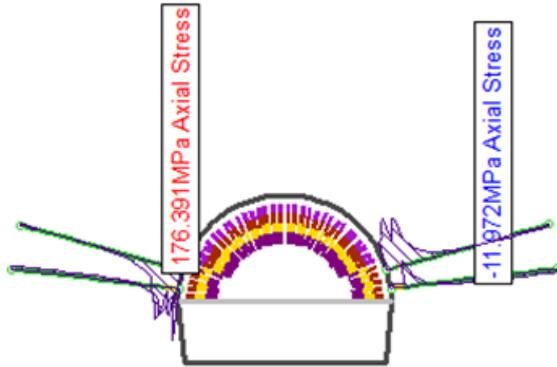
Sol tüp üst yarı tahkimatı sonucu tünel yan duvarında bulunan 1 no.lu IBO saplamada en büyük aksenal gerilme değeri 106.7 MPa ve sağ tüp üst yarı tahkimatı sonucunda 2 no.lu saplamada en büyük aksenal gerilme değeri 176.4 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 6.68 b c). Sol tüp alt yarı tahkimatı yapıldıktan sonra sağ tüp 5 no.lu SN saplamada 189.7 MPa lık bir aksenal gerilme değeri oluşmuştur. Sağ tünel alt yarı kazısı tamamlandıktan sonra en büyük aksenal gerilme değeri 5 no.lu saplamada 212.7 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.68 d e).



a) Saplama numaraları

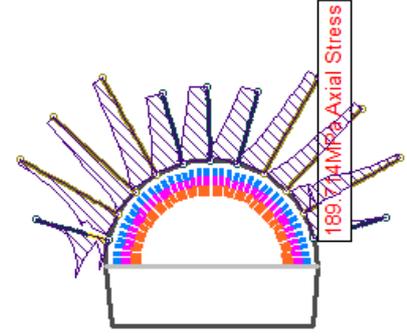
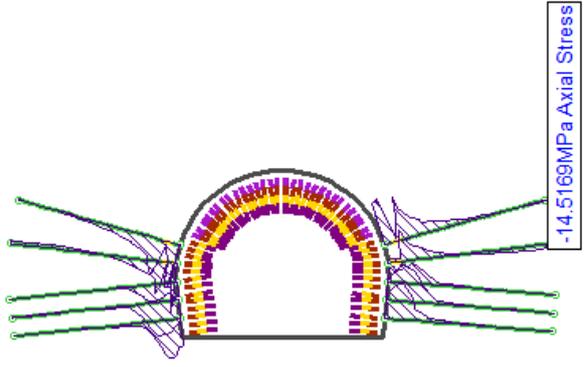


b) Sol tüp üst yarı tahkimatı sonra

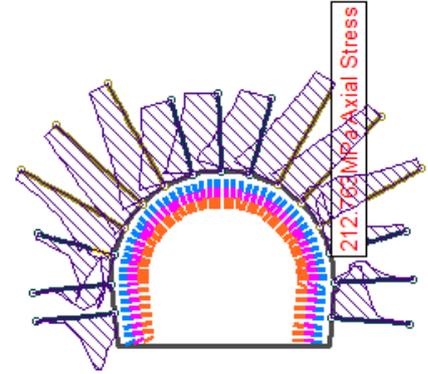
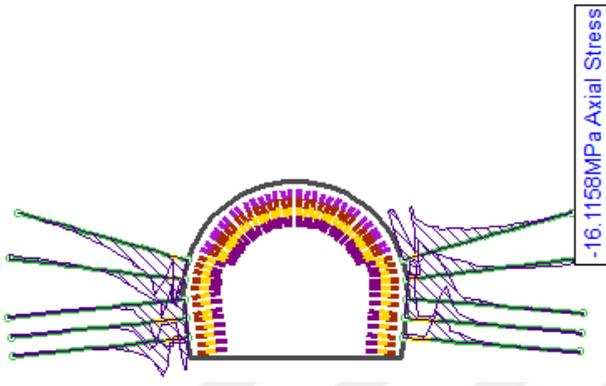


c) Sağ tüp üst yarı tahkimatı sonrası

Şekil 6.68 Üzülmez tüneli 4. kesitinde saplamalarda oluşan aksenal gerilme dağılımları.



d) Sol tp alt yarı tahkimatı sonrası



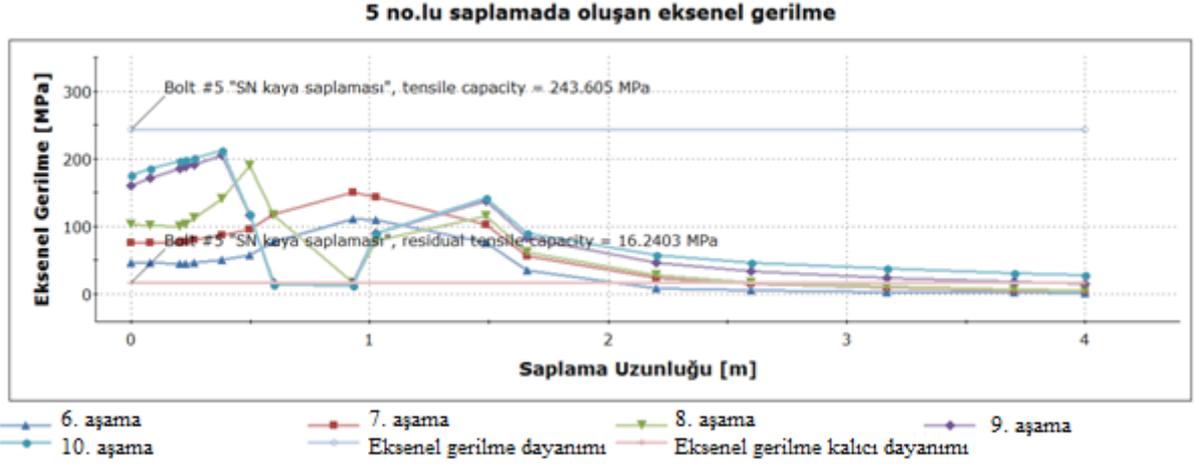
Axial stress = Eksenel gerilme

e) Sağ tp alt yarı tahkimatı sonrası

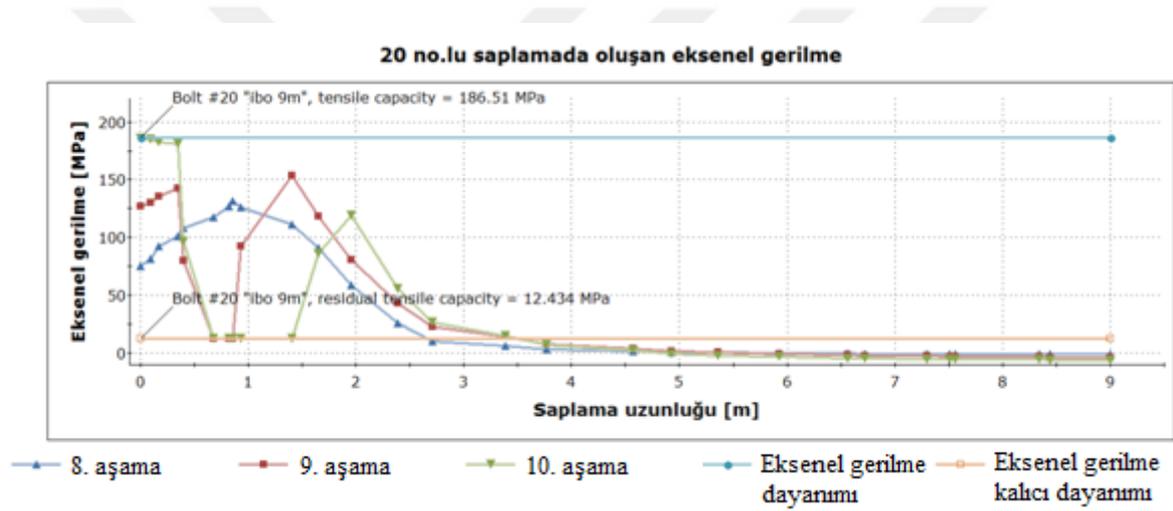
Şekil 6.68 (devam ediyor).

En büyük çekme gerilmesinin oluştuğu 5 no.lu SN saplama boyunca oluşan aksel gerilmelerin saplama boyunca değişimi de Şekil 6.69'da verilmiştir. Ayrıca sol tüpte 20 no. ile tanımlanan IBO saptamada oluşan aksel çekme gerilmesi dağılımı da Şekil 6.70'de verilmiştir. Her iki tüpte kullanılan saptamalarda oluşan aksel gerilmelerin, saptamaların akma dayanımlarını aşmadığı için saptamaların kısmi uzunluklarında yenilmelerin oluştuğu belirlenmiştir.

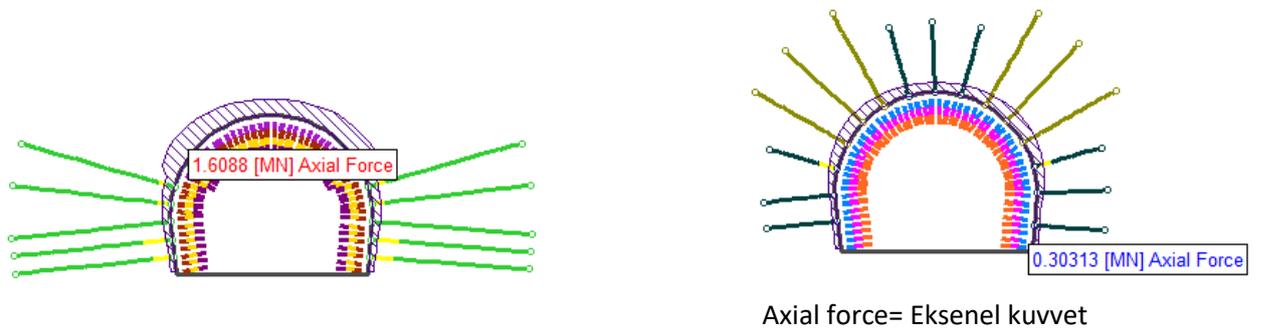
Tünel kaplaması olarak kullanılan çelik hasır + püskürtme beton (1. tabaka), demirbağ (iksa) + püskürtme beton tabakalarında (2. tabaka) ve çelik hasır + püskürtme beton (3. tabaka) oluşan aksel kuvvet dağılımları Şekil 6.71-6.73'te gösterilmiştir. En büyük aksel kuvvet, genel olarak açıklığın sağ ve sol üst bölümlerinde oluşmuştur. Nihai beton kaplaması bu çözümlemede göz önünde bulundurulmamıştır.



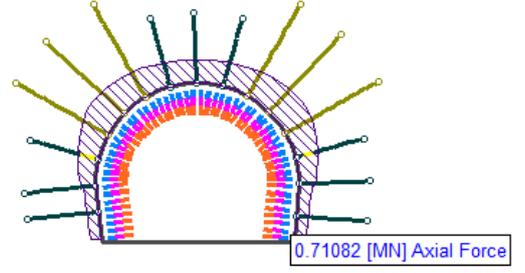
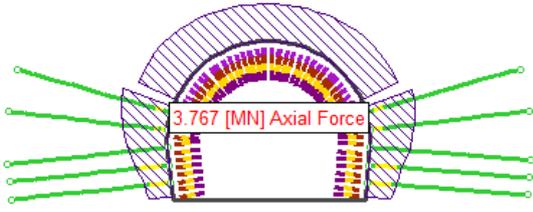
Şekil 6.69 Sağ tüpte bulunan 5 no.lu SN saplama da oluşan aksel gerilmenin saplama uzunluğuna değışimi.



Şekil 6.70 Sol tüpte bulunan 20 no.lu IBO saplama da oluşan aksel gerilmenin saplama uzunluğuna değışimi.

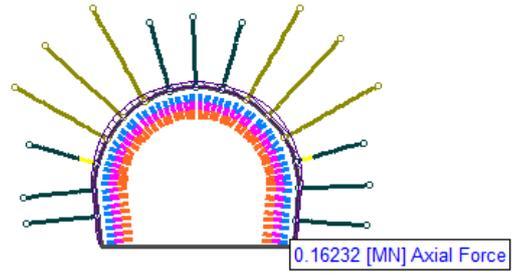
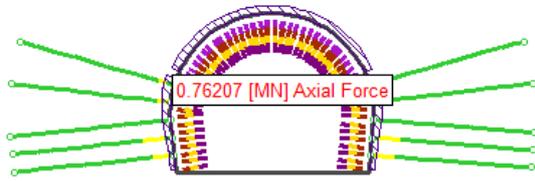


Şekil 6.71 Tünel kaplamasında (1. tabaka) oluşan aksel kuvvet (MN) (aşama 10 için).



Axial force= Eksenel kuvvet

Şekil 6.72 Tünel kaplamasında (2. tabaka) oluşan eksenel kuvvet (MN) (aşama 10 için).



Axial force= Eksenel kuvvet

Şekil 6.73 Tünel kaplamasında (3. tabaka) oluşan eksenel kuvvet (MN) (aşama 10 için).

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Zonguldak ili çevresinde, çift şeritli karayolu projeleri kapsamında açılan Sapça ve Üzülmöz tünellerinin çevre kaya özelliği belirlenerek duraylılık değerlendirmeleri ve patlatma titreşim analizleri yapılmıştır.

Analizlere başlamadan önce Sapça ve Üzülmöz tünellerinin açılacağı arazinin topografik kesiti çıkarılmıştır. Bu kesitten Sapça tüneli için beş kısım, Üzülmöz tünelleri için dört kısım seçilmiştir.

Sapça ve Üzülmöz tünellerinin geçeceği çalışma sahasının jeolojik özellikleri belirlenmiştir. Buna göre, Sapça tüneli genel olarak siltaşı biriminde açılmıştır. Üzülmöz tünelleri ise genel olarak kumtaşı ve tünellerin Zonguldak tarafı çıkışına doğru siltaşı biriminde açıldığı belirlenmiştir. Tünellerin belirli metrelerinden kaya mekaniği deneylerini yapmak üzere kaya bloğu örnekleri alınmıştır.

Tünellerden alınan kaya bloğu örnekleri, BEÜ Maden Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılan tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme (brazilian) dayanımı ve deformasyon modülü deneylerine tabi tutularak özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sapça ve Üzülmöz tünelleri tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre orta ila yüksek dayanım sınıfı arasında olduğu belirlenmiştir.

Sapça ve Üzülmöz tünellerinin analiz için belirlenen kesitlerine denk gelen metrelerin ortalama 10 m'lik kısımlarında Jeomekanik Sınıflama ve Tünelcilik Niteliği Sınıflama sistemleri üzerine analizleri yapılmıştır. Jeomekanik Sınıflama Sisteminde "Temel RMR" denklemi üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

Temel RMR değerine göre Sapça tünelinin seçilen bütün kesitlerinde orta kaya sınıfında olduğu, Üzülmez tünellerinin ise orta ila zayıf kaya sınıfı arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.

Tünelcilik Niteliği Sınıflama Sistemine göre Sapça tünelinin 1 no.lu kesitinin zayıf kaya sınıfında, diğer kesitlerin çok zayıf ila zayıf kaya sınıfı arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Aynı sınıflama sisteminde Üzülmez tünellerinin 1, 2 ve 3 no.lu kesitlerinin çok zayıf ila zayıf kaya sınıfı arasında değişiklik gösterdiği, 4 no.lu kesitinin ise aşırı derecede zayıf ila çok zayıf kaya sınıfı arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.

Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı, deformasyon modülü, kohezyonu, içsel sürtünme açısı ve tek eksenli çekme dayanımının hesaplanması için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen görgül ilişkilerde, sınıflama sistemleri analizlerinin ortalamaları ile kaya mekaniği deneyleri sonuçları girdi olarak kullanılmıştır.

Sapça ve Üzülmez tünellerinde uygulanacak kazı tahkimat sistemi, kazı arının jeolojik değerlendirmelerine karşılık gelen KGM teknik şartnamesi maddesine göre belirlenmiştir. Tünellerde uygulanan kazı tahkimat sistemleri ve bu sistemlerde kullanılan tahkimat elemanları tanıtılmıştır. Tahkimat sistemlerinden olan çelik boru şemsiye kemer yönteminin uygulanması detaylı olarak anlatılmıştır.

Sayısal gerilme analizlerinde kullanılmak üzere tünellerin birincil gerilme alanlarının tahmininde, Aydan (2000) tarafından önerilen fay çizizi ölçümlerinin matematiksel çözümlemesi ile bulunan yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemle göre, D-B istikametinde açılan Sapça tüneli ve KB-GD istikametinde açılan Üzülmez tünellerinde en büyük yatay gerilmenin tünel güzergahında etkidiği belirlenmiştir.

Sapça ve Üzülmez tünellerinin gerilme analizlerini yapmak için Phase 2 (V.8) bilgisayar programı kullanılmıştır. Phase 2 (V.8) programında, tünellerin açıldığı kaya kütleleri ortamının ve tünellerde kullanılan tahkimat elemanlarının tanımlanabilmesi analizlerin doğru yapılabilmesi açısından avantaj sağlamıştır. Analizi yapılan tünel kesitlerinin tasarımı sırasında tahkimatlara gravite yüklemesi yapılmış ve sonlu elemanlar ağı kazı işlemi ile oluşan ikincil gerilme alanının koşullarından etkilenmeyecek kadar uzaklıkta seçilmiştir. Ayrıca Phase (V.8)'in özelliği olan “yük dağılımı” işlevi ile Geniş ve Acun (2015) tarafından kazı tahkimat aşamaları için önerilen yük dağılımı oranları yapılan analizlerde kullanılmıştır.

Sapça tüneli hali hazırda kullanılan karayolu tüneline paralel açıldığı için Phase 2 (V.8) programında tasarlanan kazı tahkimat aşamaları Üzülmez tünellerine göre daha az olmuştur. Sapça tüneli 1, 4 ve 5 no.lu kesitler için yapılan analizlerde tünel kazısının yapıldığı açıklığın kaya kütlelerinde herhangi bir yenilme gözlemlenmemiştir. Sapça tüneli 2. kesiti örtü yüksekliğinin en fazla olduğu yerden seçilmiştir. Tünel açıklığının köşe noktalarında kaya kütlelerinde bölgesel yenilmeler gözlemlenmiştir. 3. kesitte ise üst yarı tahkimatından sonra açıklığın alt köşe noktasında bölgesel yenilmeler oluşmuş ve alt yarı tahkimatı yapıldıktan sonra yenilmeler bertaraf olmuştur. Sapça tüneli için seçilen bütün kesitlerin tahkimatlarında herhangi bir yenilme gözlemlenmemiştir.

Üzülmez tünelleri için Phase (V.8) programında 1, 2 ve 3 no.lu kesitlerde tasarlanan kazı tahkimat aşamalarına ilave olarak 4 no.lu kesitte çelik boru şemsiye kemer tahkimat aşaması eklenmiştir.

Üzülmez tünelleri 1 no.lu kesiti Ankara tarafına yakın seçilmiştir. Bütün kazı ve tahkimat aşamalarında kaya kütlelerinde ve tahkimat elemanlarında herhangi bir yenilme gözlemlenmemiştir. 2 no.lu kesitte kaya kütlelerinde bölgesel yenilmeler gözlemlenmiştir. Tahkimatlarda herhangi bir yenilme gözlemlenmemiştir. 3 no.lu kesitte kaya kütlelerindeki yenilmelerin açıklığı tamamıyla çevrelediği gözlemlenmiştir. Tahkimatta kullanılan kaya saplamalarının açıklık tarafında ve tünelin omuz kısmında püskürtme betonda bölgesel yenilmeler gözlemlenmiştir. 4 no.lu kesitte de kaya kütlelerindeki yenilmeler açıklığı tamamıyla çevrelemiştir. 4 no.lu kesit sol tünelde 9 m'lik IBO tipi kaya saplamaların açıklığa yakın taraflarında kısmi yenilmeler gözlemlenmiştir. Sağ tünel omuz kısmında bulunan SN tipi kaya saplamalarında da kısmi yenilmeler gözlemlenmiştir. 4 no.lu kesit için kullanılan püskürtme betonda herhangi bir yenilme gözlemlenmemiştir.

Sapça ve Üzülmez tünelleri için yapılan sayısal gerilme analizlerinde kaya kütlelerinde görülen yenilmeler, uygulamada kazı sırasında arına emniyet püskürtme betonu veya arında destekleme gövdesi bırakılarak engellenmiştir. Tünelere uygulanan nihai beton kaplaması sayısal gerilme analizlerine dâhil edilmemiştir. Bu nedenle Üzülmez tünelleri 3 ve 4 no.lu kesitinde tahkimat elemanlarında beklenen bölgesel yenilmeler uygulamada gözlemlenmemiştir.



KAYNAKLAR

- Aydan Ö** (2000) Fay çiziklerinden yerkabuğuna etkiyen gerilmelerin saptanması için yeni bir yöntem ve uygulaması. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 22: 223 - 236.
- Aydan Ö** (2012) Ground motions and deformations associated with earthquake faulting and their effects on the safety of engineering structures. *Encyclopaedia of Sustainability Science and Technology*, Springer, R. Meyers (Ed.), 3233-3253.
- Aydan Ö and Dalgıç S** (1998) Prediction of deformation behaviour of 3 lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anotolian Fault Zone (NAFZ). *Proceedings of the regional symposium on sedimentary rock engineering*, 20-22 Kasım 1998, Taipei, 228 – 33.
- Aydan Ö and Kawamoto T** (2000) Assessing mechanical properties of rock masses by RMR rock classification method. *GeoEng. 2000 Symposium*, Sydney, OA0926.
- Aydan Ö, Geniş M and Bilgin H A** (2014) The effect of blasting on the stability of benches and their responses at Demirbilek open-pit mine. *Environmental Geotechnics*, ICE,1, (4): 240-248.
- Aydan Ö, Ulusay R and Kawamoto T** (1997) Assessment of rock mass strength for underground excavations. *The 36th US Rock Mechanics Symposium*, New York, 777 - 786.
- Barton N** (1995) The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. *8th Int. Rock Mech. Congress*, 25-27 Eylül, Tokyo, 1023 - 1032.
- Barton N** (2000) *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*. ISBN: 9789058093417, CRC Press, A. A. Balkema, Rotterdam, 173.
- Barton N** (2002) Some new Q value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, ISBN: 1365-1609, İsveç, 39: 185 – 216.
- Barton N, Lien R and Lunde I** (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, ISBN: 0723-2632, New York, 6(4): 189 - 239.
- Bhasin R and Grimstad E** (1996) The use of stress–strength relationships in the assessment of tunnel stability. *Tunn. Undergr. Space Technol.* ISBN: 0886-7798, Avustralya, 11 (1): 93–98.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Bieniawski Z T** (1989) Engineering Rock Mass Classifications, Wiley, New York, 273.
- Geniş M, Aydan Ö ve Derin Z** (2013) Tünelcilik Sırasında Patlatma Kaynaklı Titreşimlerin İzlenmesi ve Bitişik Tünelere Etkisi. *3.Uluslararası Ulaşımında Yer altı Kazıları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, s 210-217
- Geniş M ve Derin Z** (2016) Zonguldak ve çevresinde açılan karayolu tünellerinin çevre kaya özelliklerinin belirlenmesi ve duraylılığının değerlendirilmesi, *Bilimsel Araştırma Projesi Raporu*, Proje No 2013-98150330-03
- Geniş M ve Acun D** (2015) Kuyu duraylılığının analitik ve sayısal yöntemler ile karşılaştırmalı bir incelemesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 30, Sayı 2, s 201-215.
- Gerçek H** (2000) *Tünelcilik Ders Notları* (yayınlanmamış), BEÜ Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Bölüm 1 s 1-2 ;Bölüm 6 s 2-5-9.
- Gerçek H** (2005) *Kaya Mekaniği Ders Notları* (yayınlanmamış), BEÜ Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, 206.
- Goel R K** (1994) Correlations for predicting support pressures and closures in tunnels. PhD Thesis, Nagpur University, Nagpur, India, 308 .
- Grimstad E and Barton N** (1993) Updating the Q-system for NMT. *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Oslo, Norwegian Concrete Association, 230.
- Hoek E and Brown E T** (1980) Underground excavation in rock. *Institution of Mining and Metallurgy*, Londra, 527.
- Hoek E and Brown E T** (1997) Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 34(8): 1165 - 1186.
- Hoek E and Diederichs M S** (2006) Empirical estimation of rock mass modulus. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43: 203 – 215.
- ISRM** (2007) *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974 – 2006*. R. Ulusay and J. A. Hudson (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Ofset, Ankara, Türkiye, 628.
- Kalamaris G S and Bieniawski Z T** (1995) A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time. *In: Proceedings of the eighth international congress of the rock mechanics*, Rotterdam: Balkema, 295 – 302.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- KGM** (2013) *Karayolları Teknik Şartnamesi. Karayolları Genel Müdürlüğü*, Bölüm 350 s 8-9-10-30, bölüm 253 s 1, bölüm 254 s 1, bölüm 351 s 1
- Köse H, Gürgen S, Onargan T, Yenice H ve Aksoy O** (2007) *Tünel ve Kuyu Açma*, Geliştirilmiş 3. Baskı, Dokuz Eylül Üni. Müh. Fak. Yayınları:145, İzmir, 1,70 .
- Mega Mühendislik** (2011 a) *Devrek –Zonguldak Yolu Tünelleri Sapça Tüneli Kesin Proje Jeolojik - Jeoteknik Etüt Raporu*, Ankara, 22-23.
- Mega Mühendislik** (2011 b) *Devrek –Zonguldak Yolu Tünelleri Üzülmez 1, 2 Tüneli Kesin Proje Jeolojik - Jeoteknik Etüt Raporu*, Ankara, 24.
- Mitri H S, Edrissi R and Henning J** (1994) Finite element modelling of cable-bolted stopes in hardrock ground mines. *SME Annual Meeting.*, New Mexico, 94 – 116.
- Nicholson G A and Bieniawski Z T** (1990) A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification. *Int. J. Min. Geol. Eng.*, 8: 181 – 202.
- Ramamurthy T** (1986) Stability of rock mass. *Indian Geotech Journal*, 1 – 74.
- Read S A L, Richards LR and Perrin N D** (1999) Applicability of the Hoek–Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. *Proc. 9th Int. Cong. on Rock Mech.* Paris, 2: 655 – 660.
- Rocscience** (2007) Phase2 (ver. 8), Toronto, Canada, <http://www.roscience.com/>
- Serafim J L and Pereira J P** (1983) Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. *Proc. Int. Sym. on Eng. Geol. Undergr. Const.*, Lisbon, Portugal, 1133 – 1144.
- Sheorey P R** (1997) *Empirical rock failure criteria*. ISBN: 9789054106715, CRC Press, Rotterdam, Balkema, 200.
- Sönmez H, Gökçeoğlu C, Nefeslioğlu H A and Kayabaşı A** (2006) Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, ISBN: 1365-1609, İSveç, 43: 224 – 235.
- Trueman R** (1998) An evaluation of strata support techniques in dual life gate roads. *PhD Thesis*, University of Wales, Cardiff.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Ulusay R (2010) *Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler*. 5. basım, TMMOB Jeoloji Müh. Odası Yayınları: 38, Nitelik Matbaacılık, Ankara, 458.

Ulusay R, Gökçeoğlu C ve Binal A (2011) *Kaya Mekanığı Laboratuvar Deneyleri*. 3. basım, TMMOB Jeoloji Müh. Odası Yayınları: 58, Ankara, 167.

Ulusay R ve Sönmez H (2007) , *Kaya Kütlesinin Mühendislik Özellikleri*, ISBN: 975-395-466-2, Kozan Ofser Matbaacılık, Ankara, s 107,143,144-147.

Yudhbir S, Lemanza W and Prinzi F (1983) An empirical failure criterion for rock masses. *Proceedings of the fifth international congress society of rock mechanics*, Melbourne,. 1, B1–8.



BIBLIYOGRAFYA

- Barton N, Lien R and Lunde I** (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, ISBN: 0723-2632, New York, 6(4): 189 - 239.
- Hudson J A** (1989), *Rock mechanics principles in rock engineering practice*, ISBN: 0-408-03081-X, Butterworths, Londra, 72 .
- Grimstad E and Barton N** (1993) Updating the Q-system for NMT. *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Oslo, Norwegian Concrete Association, 230.
- Singh R N and Gahrooe D R**, (1989) Application of rock weakening coefficient for stability assessment of slopes in heavily jointed rock masses. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 3, 2017-19.
- Singh B and Goel R K.** (1999). *Rock Mass Classification: A Pratical Approach in Civil Engineering*. ISBN: 9780080430133, Elsevier, India, 267 .



ÖZGEÇMİŞ

Zeynel DERİN 1988'de Ankara'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı; Ankara Bahçelievler Deneme Lisesi'den mezun olduktan sonra 2006 yılında ESOGÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'ne girdi; 2010 yılında mezun olduktan sonra 2011 yılında BEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansı'na başladı; halen aynı Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Siyavuşpaşa mah. Alifuat Paşa cd.

No: 4/40 34188

Bahçelievler/İSTANBUL

Tel: 0 554 608 31 06

E-posta: zeynelderin@hotmail.com