

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NATM METODU KULLANILARAK TÜNEL TASARIMI VE
MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Deniz POLAT**

Anabilim Dalı : Maden Mühendisliği

Programı : Maden Mühendisliği

Ekim 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NATM METODU KULLANILARAK TÜNEL TASARIMI VE
MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Deniz POLAT
(505071002)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Eylül 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Ekim 2010**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Cemal BALCI (İTÜ)
Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN (İÜ)**

Ekim 2010

Aileme,

ÖNSÖZ

NATM Kullanılarak Tünel Tasarımı ve Modellenmesi konulu bu çalışmada; tünel zemin ilişkileri, tünel cidarına gelen gerilme dağılımları, tünel deformasyonları ve tünel kazısının sebebiyet verdiği yüzey oturmaları incelenmiştir. Gerek tez çalışmam gerekse tüm yüksek lisans öğrenimim boyunca bana her türlü desteği veren, engin bilgileri ile tez çalışmam boyunca bana ışık tutan çok değerli hocam sayın Doç. Dr. Hakan Tunçdemir'e teşekkürü bir borç bilirim. Başta Bülent Koçak olmak üzere, tez çalışmama konu olan örnek tünel projesini temin eden Emay mühendislik çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana destek olan bilgilerini benimle paylaşan sayın Prof.Dr. Nuh Bilgin'e ve Doç.Dr. Hanifi Çopur'a, tez çalışmam boyunca arkadaşlığı ve yardımlarıyla bana destek olan değerli dostum Serhan Sevindim'e teşekkürü borç bilirim.

Tüm yaşamımda beni destekleyen, bu günlere gelmem için bin bir cefa çeken sevgili annem Yenide Polat'a, tez çalışmam boyunca benden yardımlarını esirgemeyen hayatımın anlamı, sevgilim Pınar Taş'a ve ismini burada sayamadığım çok değerli dostlarım ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mayıs 2010

Deniz Polat

(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
2. TÜNELCİLİĞİN TARİHSEL GELİŞİMİ.....	5
2.1 Tarihçe.....	5
2.2 Tünel Açma Yöntemleri.....	9
2.2.1 Parçalı kazı yöntemlerin.....	10
2.2.1.1 Alman yöntemi.....	11
2.2.1.2 Belçika Yöntemi.....	12
2.2.1.3 Eski Avusturya Yöntemi.....	13
2.2.2 İngiliz Yöntemi	13
2.2.3 Diğer yöntemler	13
2.3 Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu	14
2.3.1 NATM'nin tarihsel gelişimi.....	14
2.3.2 NATM'in özellikleri	15
2.3.2.1 Kaya kütlelerinin doğal dayanımı.....	15
2.3.2.2 Ölçümler	16
2.3.2.3 Esnek tahkimat.....	16
2.3.2.4 Tahkimatın taban betonu ile tamamlanması.....	16
2.3.2.5 Sözleşme şartları	16
2.3.2.6 Tahkimat gereksinimleri	17
2.4 NATM'in Kazı Yöntemi	17
2.4.1 NATM kazısı sırasında dikkat edilecek hususlar.....	18
3. TÜNELLERDE KAPLAMA HESABI	21
3.1 Kaya sınıflama yöntemleri	22
3.1.1 Terzaghi'nin kaya yükleme sınıflandırması.....	22
3.1.2 Stini, Rabcewicz ve Lauffer'in sınıflandırmaları.....	25
3.1.3 RQD sınıflandırması	29
3.1.4 Kaya yapısı oranı (RSR)	31
3.1.5 Jeomekanik RMR sistemi	33
3.1.6 Q sınıflandırma sistemi	38
3.2 NATM'e göre kaya sınıflaması.....	50
3.3 NATM'de ÖNORM B 2203/1994'e göre kaya sınıflandırmaları ve kazı.....	51
3.3.1 A kaya sınıfı	52

3.3.1.1 A1 destek sınıfı	53
3.3.1.2 A2 destek sınıfı	53
3.3.1.3 B kaya sınıfı	54
3.3.1.4 B1 destek sınıfı	54
3.3.1.5 B2 destek sınıfı	55
3.3.1.6 B3 destek sınıfı	55
3.3.2 C kaya sınıfı	56
3.3.2.1 C1 destek sınıfı	57
3.3.2.2 C2 destek sınıfı	57
3.3.2.3 C3 destek sınıfı	58
3.3.2.4 C4 destek sınıfı	59
3.3.2.5 C5 destek sınıfı	60
3.4 NATM’de destek elemanları ve dizayn metodu.....	63
3.4.1 NATM’de tahkimat elemanları	64
3.4.1.1 Püskürtme beton.....	65
3.4.1.2 Hasır çelik	66
3.4.1.3 Kaya bulonları	66
3.4.1.4 Çelik iksa	67
3.4.1.5 Ön süren	67
3.4.2 NATM’de tahkimat boyutlandırma esasları.....	68
3.5 Analitik yöntemler.....	72
3.5.1 İntegral ve diferansiyel modelleme	73
3.5.2 Fiziksel Modelleme	74
3.5.3 Yenilme kriterleri	75
3.5.3.1 En büyük normal gerilme	75
3.5.3.2 En büyük kesme gerilmesi	75
3.5.3.3 Coulomb ve Mohr yenilme kriteri	75
3.5.3.4 Griffith-Murrel Kriteri	76
3.5.3.5 Hoek kriteri	76
3.6 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Tünel Tasarımı.....	78
3.6.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Kullanım Esasları.....	79
3.6.2 SEM’de malzemenin tanımlanması	79
3.6.3 SEM’de yüklerin tanımlanması.....	80
4. UYGULAMA PROJESİ	83
4.1 Yapılan sondajların değerlendirilmesi.....	84
4.1.1 ASK-1 sondajı	84
4.1.2 ASK-2 sondajı	85
4.1.3 ASK-3	86
4.2 Homojen bölgelendirme	87
4.3 Mühendislik jeolojisi	89
4.3.1 Jeomekanik özellikler.....	90
4.3.2 Geoteknik özellikler	91
4.4 Sonlu elemanlar yöntemi ile stabilite analizi.....	92
4.4.1 Program girdileri	93
4.5 Tünel analizleri ve modelleme	94
4.5.1 Model 1 analizleri.....	94
4.5.1.1 Geoteknik modelin oluşturulması.....	96
4.5.1.2 Tünel çevresinde oluşan gerilmeler	98
4.5.1.3 Tünel kazısı sonrası oluşan deplasmanlar	100
4.5.1.4 Tünel destekleme elemanlarının tahkiki	104

4.5.2 Model 2 analizleri	109
4.5.2.1 Geoteknik modelin oluşturulması.....	110
4.5.2.2 Tünel çevresinde oluşan gerilmeler	111
4.5.2.3 Tünel kazısı sonrası oluşan deplasmanlar	114
4.5.2.4 Tünel destekleme elemanlarının tahkiki	117
4.5.3 Model 3 analizleri	120
4.5.3.1 Geoteknik modelin oluşturulması	122
4.5.3.2 Tünel çevresinde oluşan gerilmeler	123
4.5.3.3 Tünel kazısı sonrası oluşan deplasmanlar.....	126
4.5.3.4 Tünel destekleme elemanlarının tahkiki	128
5. SONUÇLAR	133
KAYNAKLAR	137
EKLER.....	141

KISALTMALAR

NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu
P_i	: Derinlik basıncı
τ	: Kayma gerilmesi
σ_z	: Basınç gerilmesi
B	: Galeri genişliği
B_i	: Kemerleşme alanının genişliği
H	: Örtü kalınlığı
H_t	: Tünel yüksekliği
H_p	: Kemerleşme yüksekli
RQD	: Kaya kalite değeri
L	: Karot uzunluğudur.
RSR	: Kaya yapısı oranı
RMR	: Kaya kütle oranı
γ	: Birim hacim ağırlık
S	: Gerilme faktörünü (yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranı)
J_n	: Eklem takım sayısı
J_r	: Eklem pürüzlülük sayısı
J_a	: Eklem alterasyon sayısı
J_w	: Eklem suyu indirgeme sayısı
SRF	: Gerilme indirgeme faktörüdür
De	: Eşdeğer boyut parametresi
U_{tg}	: Gerdirmesiz ankrajlama
t_g	: Gerdirmeli ankrajlama
r	: Yarı çap
R	: Plastikleşen bölgenin yarıçapı
Δr	: Tünel cidarında oluşan radial deformasyon
P_i^s	: Püskürtme beton direnci
P_ist	: Çelik malzemelerin mukavemeti
P_i^R	: Kayacın taşıyıcı kemerinin kayma kapasitesi
P_i^A	: Kaya bulonlarının mukavemeti
P_i^W	: Toplam taşıma kapasitesi
d	: Kaplamanın kalınlığı
e, t	: Kaya bulonlarının aralıkları
s	: Kayma düzleminin uzunluğu
w	: Taşıyıcı ringin uzunluğu
σ_{gs}	: Kayanın eksenel olmayan basınç dayanımı
ψ	: İçsel sürtünme açısı
c	: Kohezyon
τ^s	: Kaplamanın kayma dayanımı
τ^{st}	: Donatının kayma dayanımı
Est, E^s	: Çeliğin ve püskürtme betonunun elastisite modülleri
α^s	: Kaplamanın kayma açısı

F^{st}	: Kaya bulonunun alanı
σ_p^{st}	: Proportional limit of anchor steel
τ^R	: Kayanın kayma dayanımı
σ_n^R	: Kayanın basınç dayanımı
α	: Kayanın kayma açısı
β	: Kaya bulonlarının açısı
$\emptyset$	: Donatı çapı
G	: Kayma modülü
ν	: Poisson Oranı
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
I	: Atalet momenti
N_{11}	: Eksenel kuvvetler
Q_{11}	: Kesme kuvveti
M_{11}	: Eğilme momenti
f_{ctd}	: Betonun çekme dayanımı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Son yüzyılda tünelticiliğin gelişimi [8].	9
Çizelge 2.2 : Önemli tüneller ve yapılış yılları [9].	9
Çizelge 3.1 : Günümüzde kullanılan başlıca sınıflandırma sistemleri [19].	22
Çizelge 3.2 : Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırması [18].	24
Çizelge 3.3 : Deere ve arkadaşları tarafından değiştirilmiş Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırması [22].	24
Çizelge 3.4 : Değiştirilmiş Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırması [23].	25
Çizelge 3.5 : Stini'e göre beklenen arazi basınçları [16].	26
Çizelge 3.6 : Rabcewicz'e göre kaya sınıflaması [24].	27
Çizelge 3.7 : Lauffer'in kaya sınıflaması [16].	28
Çizelge 3.8 : RQD kaya kalitesi tablosu [28].	30
Çizelge 3.9 : RSR-A parametresi, genel jeoloji alanı [3].	32
Çizelge 3.10 : RSR-B parametresi, eklem paterni ve açma yönü [16].	32
Çizelge 3.11 : RSR-C parametresi, yer altı suyu, eklem durumu [14].	32
Çizelge 3.12 : Sınıflandırma parametreleri ve dereceleri [31].	34
Çizelge 3.13 : Eklem yönelimlerine göre düzeltme [31].	35
Çizelge 3.14 : Kaya sınıflamaları ve dereceleri [31].	35
Çizelge 3.15 : Kaya sınıflamaları ve dereceleri [31].	35
Çizelge 3.16 : 1989'da değiştirilmiş RMR sınıflamasında derecelendirme [32].	36
Çizelge 3.17 : RMR' ye bağlı olarak tünellerde tahkimat ve kazı [19].	38
Çizelge 3.18 : Eklem takım sayısı (Jn) [29].	40
Çizelge 3.19 : Eklem pürüzlülük sayısı (Jr) [29].	40
Çizelge 3.20 : Eklem alterasyon sayısı (Ja) [29].	41
Çizelge 3.21 : Eklem suyu indirgeme faktörü (Jw) [29].	41
Çizelge 3.22 : Gerilme azaltma faktörü (SRF) [29].	42
Çizelge 3.23 : ESR değerleri [19].	43
Çizelge 3.24 : Q sistemi için destek önlemleri [29].	46
Çizelge 3.25 : Q sistemi için destek önlemleri (devam).	47
Çizelge 3.26 : Q sistemi için destek önlemleri (devam).	48
Çizelge 3.27 : ÖNORM B 2203'e göre kaya sınıflamaları	61
Çizelge 3.28 : Püskürtme beton dayanım değerleri [9].	66
Çizelge 4.1 : 1. Bölüme ait mühendislik jeolojisi.	89
Çizelge 4.2 : 2. Bölüme ait mühendislik jeolojisi.	89
Çizelge 4.3 : 3. Bölüme ait mühendislik jeolojisi.	90
Çizelge 4.4 : 4. Bölüme ait mühendislik jeolojisi.	90
Çizelge 4.5 : Tüm bölümlere ait geomekanik parametreler	91
Çizelge 4.6 : Tüm bölümlere ait geoteknik parametreler ve değerleri	91
Çizelge 4.7 : Tüm bölümlere ait önerilen tahkimat sistemi	92
Çizelge 4.8 : Tüm bölümlere ait kaya destekleme sınıfı ve yüzdeleri	92
Çizelge 4.9 : Analizi yapılan modeller	93
Çizelge 4.10 : Kazı ve tahkimat aşamaları.	97

Çizelge 5.1 : Analiz sonuçlarının özetlenmesi.....	134
---	------------

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İlk TBM makinesi [5].....	7
Şekil 2.2 : Tünel açma yöntemleri sınıflandırması.....	10
Şekil 2.3 : Tünel açma yöntemlerinde kullanılan terimler [1].....	10
Şekil 2.4 : Alman metodunun uygulanışı [4].....	12
Şekil 2.5 : Belçika metodunun uygulanışı [4]	12
Şekil 2.6 : Eski Avusturya Metodu'nun uygulanışı [4].	13
Şekil 2.7 : NATM tahkimat elemanları [17].....	18
Şekil 2.8 : NATM 3 aşamalı kazı [12].....	19
Şekil 2.9 : Ancona-Bari trenyolu Vasto tüneli [12].	19
Şekil 3.1 : Terzaghi'nin kaya yükü kavramı [21].	23
Şekil 3.2 : Lauffer'e göre aktif iksasız ayakta kalma süresi [14].	28
Şekil 3.3 : Örnekli RQD prosedürü [27].....	29
Şekil 3.4 : RQD destekleme ilişkisi [14]	30
Şekil 3.5 : RSR kavramı 6.5 m çaplı tünel için destek tablosu [27].	33
Şekil 3.6 : RMR tahkimatsız durma süresi [19].	37
Şekil 3.7 : Eş boyut ve Q değerlerine bağlı destek kategorileri [34].....	44
Şekil 3.8 : Q sisteminde en iyi sonuç veren bölge [35].	45
Şekil 3.9 : ÖNORM B 2203/1994'e göre kaya sınıflandırması	51
Şekil 3.10 : A sınıfı, Roma-L'aquila karayolu tüneli [9].....	52
Şekil 3.11 : B sınıfı, Genoa-Ventimiglia tren yolu tüneli [9].	54
Şekil 3.12 : C sınıfı, 2004 Milan-Rome-Naples hızlı tren yolu tüneli [9].	57
Şekil 3.13 : Kaya sınıflarının karşılaştırılması [37].....	63
Şekil 3.14 : Fenner – Pacher eğrisi	64
Şekil 3.15 : Kuru karışım [9]	65
Şekil 3.16 : İtalya Solignano tüneli ön süren uygulaması [12].	68
Şekil 3.17 : Kaya zemin etkileşim eğrisi [39].	69
Şekil 3.18 : Boşluk etrafında oluşan gerilmeler [26].	70
Şekil 3.19 : Mohr ve Coulomb yenilme kriteri.....	76
Şekil 3.20 : İki boyutlu tipik sonlu elemanlar [43].....	81
Şekil 3.21 : Üç boyutlu tipik sonlu elemanlar[43].....	82
Şekil 4.1 : Arhavi tüneli genel formasyon	84
Şekil 4.2 : ASK-1 sondaj verileri	85
Şekil 4.3 : ASK-2 sondaj verileri	86
Şekil 4.4 : ASK-3 sondaj verileri	87
Şekil 4.5 : Tünel projelerinde homojen bölgelendirme [37].	88
Şekil 4.6 : Tünel güzergahında homojenleştirilmiş birimler.....	89
Şekil 4.7 : Kaya destekleme sınıfı ve yüzdeleri.	93
Şekil 4.8 : Model-1 tünel geometresinin modellenmesi.	96
Şekil 4.9 : Model 1 sonlu elemanlar ağının oluşturulması.....	97
Şekil 4.10 : Model 1 kazı sonrasında oluşan efektif asal gerilmelerin yönelimi.	98
Şekil 4.11 : Model 1 kazı sonrası maksimum asal gerilmeler.	98

Şekil 4.12 : Model 1 maksimum gerilme noktası.....	99
Şekil 4.13 : Model 1 maksimum basınç gerilmeleri.....	99
Şekil 4.14 : Asal gerilmeler.....	100
Şekil 4.15 : Model 1 için mohr zarfı diagramı	100
Şekil 4.16 : Model 1 kazı sonrası düşey deplasmanların bölgesel dağılımı.....	101
Şekil 4.17 : Model 1 kazı sonrası yatay deformasyonların bölgesel dağılımı.....	101
Şekil 4.18 : Model 1 kazı sonrası toplam deplasmanların bölgesel dağılımı.....	102
Şekil 4.19 : Model 1 deplasman okuma noktaları.....	102
Şekil 4.20 : Model 1 deplasman okuma noktalarına göre düşey deplasmanlar	103
Şekil 4.21 : Model 1 deplasman okuma noktalarına göre yanal deplasmanlar	103
Şekil 4.22 : Tahkimata etkileyen kuvvetlerin yönleri	104
Şekil 4.23 : Model 1 tahkimata etkileyen normal kuvvetin dağılımı	105
Şekil 4.24 : Model 1 tahkimata etkileyen kesme kuvvetinin dağılımı	105
Şekil 4.25 : Model 1 tahkimata etkileyen eğilme momentinin dağılımı	106
Şekil 4.26 : Model 1 bulonlara etkileyen normal kuvvet N_{11}	108
Şekil 4.27 : Model 2 tünel geometrisinin modellenmesi.....	110
Şekil 4.28 : Model 2 sonlu elemanlar ağının oluşturulması.....	110
Şekil 4.29 : Model 2 kazı sonrası oluşan efektif asal gerilmelerin yönelimi.	111
Şekil 4.30 : Model 2 kazı sonrası maksimum asal gerilmeler.....	112
Şekil 4.31 : Model 2 maksimum gerilme noktası.....	112
Şekil 4.32 : Model 2 maksimum basınç gerilmeleri.....	113
Şekil 4.33 : Model 2 için Mohr zarfı diagramı.....	113
Şekil 4.34 : Model 2 kazı sonrası düşey deplasmanların bölgesel dağılımı.....	114
Şekil 4.35 : Model 2 kazı sonrası yatay deformasyonların bölgesel dağılımı.....	115
Şekil 4.36 : Model 2 kazı sonrası toplam deplasmanların bölgesel dağılımı.....	115
Şekil 4.37 : Model 2 deplasman okuma noktaları.....	116
Şekil 4.38 : Model 2 deplasman okuma noktalarına göre düşey deplasmanlar	116
Şekil 4.39 : Model 2 deplasman okuma noktalarına göre yanal deplasmanlar	116
Şekil 4.40 : Model 2 tahkimata etkileyen normal kuvvetin dağılımı	117
Şekil 4.41 : Model 2 tahkimata etkileyen kesme kuvvetinin dağılımı	118
Şekil 4.42 : Model 2 tahkimata etkileyen eğilme momentinin dağılımı	118
Şekil 4.43 : Model 2 bulonlara etkileyen normal kuvvet N_{11}	120
Şekil 4.44 : Model 3 tünel geometresinin modellenmesi.	122
Şekil 4.45 : Model 3 sonlu elemanlar ağının oluşturulması.....	123
Şekil 4.46 : Model 3 kazı sonrası oluşan efektif asal gerilmelerin yönelimi.	124
Şekil 4.47 : Model 3 kazı sonrası maksimum asal gerilmeler.....	124
Şekil 4.48 : Model 3 maksimum gerilme noktası.....	125
Şekil 4.49 : Model 3 maksimum basınç gerilmeleri.....	125
Şekil 4.50 : Model 3 mohr zarfı diagramı	126
Şekil 4.51 : Model 3 kazı sonrası düşey deplasmanların bölgesel dağılımı.....	127
Şekil 4.52 : Model 3 kazı sonrası yatay deformasyonların bölgesel dağılımı.....	127
Şekil 4.53 : Model 3 kazı sonrası toplam deplasmanların bölgesel dağılımı.....	128
Şekil 4.54 : Model 3 tahkimata etkileyen normal kuvvetin dağılımı	128
Şekil 4.55 : Model 3 tahkimata etkileyen kesme kuvvetinin dağılımı	129
Şekil 4.56 : Model 3 tahkimata etkileyen eğilme momentinin dağılımı	129
Şekil 4.57 : Model 3 bulonlara etkileyen normal kuvvet N_{11}	130
Şekil A.1 : Arhavi Tüneli istasyonları [47].....	141
Şekil A.2 : Arhavi istasyon noktaları deformasyon grafikleri [47]	142

NATM METODU KULLANILARAK TÜNEL TASARIMI VE MODELLENMESİ

ÖZET

Son yıllarda ülkemizde hızla artmakta olan altyapı yatırımları, ne yazık ki mevcut ihtiyacı karşılayacak ölçütlere henüz ulaşamamıştır. 50’li yılların ortalarından itibaren başlayan kırdan kente g, büyük kentlerimizin nüfusunu hızla arttırmış, bu durumla birlikte mevcut alt yapılar kent nüfusunu kaldıramayacak ölülere gelmiştir. Bu durum yerel yönetimleri ve merkezi yönetimi yeni yatırımlara itmektedir. Büyük kentlerdeki gerek kamulaştırma maliyetlerinin çok yüksek olması gerekse, hızlı toplu taşıma araçlarının ihtiyaç duyduğu yolların yapılması yerel yönetimleri tünel uygulamaları ile alt yapı sorunlarını çözmeye yönlendirmiştir.

Mühendisliğin temel amacı, doğaya insan yararı uyarınca yön vermek onu şekillendirmektir. Mühendis doğayı şekillendirirken doğadan feyz alır. İnsanlık tarihi boyunca insan, doğanın kendi içindeki muhteşem uyumunu taklit ederek bilimi ve mühendisliği geliştirmiştir. Doğal mağaraların taklidi ile başlayan tünelcilikte kazı için birçok yöntem geliştirilmiştir. Son 50 yılda gelişen teknoloji ile birlikte tünel kazılarında modern teknikler üreilmeye başlanmıştır. Bunlar arasında günümüzde mekanize kazıda en çok kullanılanı Rabcewicz tarafından geliştirilen Yeni Avusturya Tünel Açma Metodudur.

Bu alışmada Yeni Avusturya Tünel Açma Metodunun yanı sıra, tünelcilikte kullanılan diğer metotlarda ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada NATM metodu ile yapılan, Karadeniz sahil yolunda yer alan Arhavi tüneli verileri, sonlu elemanlar yöntemi ile alışan Plaxis 8.2 programı ile modellenmiştir. Yapılan analizler sonuçları değerlendirilerek tünellerin güvenli bir şekilde aılmasında önemli yer tutan parametrelerin olası etkileri ortaya konmuştur.

MODELLING AND DESIGN OF TUNNELS BY USING NATM

SUMMARY

Although substructure investments have been increasing fast in recent years, it hasn't been able to meet the basic needs, yet. The migration from urban to rural, which has started in the mid fifties, has been increasing the population in big cities and therefore existing substructures cannot endure the huge population. This situation encourages both municipalities and the government to make new investments and solutions of the problems related to requirements of people. High expropriation costs in big cities and the highway constructions for fast public transportation vessels force municipalities to solve substructure issues by tunnel applications.

The main purpose of engineering is to lead and shape the nature for human benefits. The engineers are enlightened by nature while shaping it. During history of humankind, people have developed engineering and science by imitating the great balance of nature. Many tunneling methods have been developed by the imitation of natural caves and modern tunnel excavation techniques have been created by the technology improved during last fifty years. The New Austrian Tunneling Method (NATM) is one of the significant methods which has a common usage in semi-mechanical excavation was developed by Rabcewicz.

In this study, not only The New Austrian Tunneling method but also other tunneling methods have been described in detail. Sample data of a tunnel project which was carried out in an excavation burrowed by NATM, has been modeled by Plaxis 8.2, which is a finite element based computer software. Consequently, results of the analyses have been discussed in order to show the probable effects of safe tunneling parameters.

1. GİRİŞ

Demiryolu, metro, karayolu, yaya yolu, kanal v.b. gibi çeşitli alt yapı yapılarının bir kısmının veya tamamının, yer altından geçmesinin teknik ihtiyaçlar doğrultusunda gerekli olduğu veya ekonomik bakımdan (kamulaştırma masrafları, hafriyat giderleri gibi) uygun bulunmadığı durumlarda başvurulacak yer altı yapılarına tüneller denir.

Tünel inşasını gerektiren nedenleri kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Metro ve lastik tekerlekli şehir içi yol ihtiyaçları halinde,
- 2- Yol eğimini sabit tutarak, seyahat konforunun sağlanması amaçlandığında (tren ve otoyol v.b.) veya yüksek hızlı trenlerin ihtiyaç duyduğu yol güzergâhlarında, dağlık arazide yeryüzünden aşılabilen yükseltilerin geçilmesi halinde,
- 3- Yol güzergâhının heyelân, kaya yuvarlanması veya çığ gibi tehlike sürüş emniyetini veya insan güvenliğini tehdit eden doğa koşulları söz konusu olduğunda,
- 4- Yol güzergâhının bir kısmında yapılacak olan bir tünel ile önemli bir kısalma sağlanarak zaman ve maliyet azaltıcı bir durum oluşması durumunda,
- 5- Yer altı maden tesislerinde ulaşım galerilerinde,
- 6- Şehir içinde lastik tekerlekli veya metro yollarında yüksek kamulaştırma maliyetlerinden kaçınma ve görüntü kirliliğinin önlenmesi amaçlandığında,

tünel inşası yapılmaktadır.

Tünel kazılırken karşılaşılabilecek problemler ve alınacak önlemler konusunda araştırmacılar birçok konuda inceleme ve araştırma çalışmaları yapmışlardır. Tünel inşaatı ihtiyacı artmaya başladıkça, bilim insanları ve mühendisler çeşitli tünel açma yöntemleri üzerine çalışmışlardır. Uzun bir tecrübe evresi sonucunda zeminin tünel itkilerine karşı koyacak kazı yöntemleri, iksa ve kaplama sistemi seçimleri konularında farklılıklar gösteren çeşitli metotlar geliştirilmiştir.

Bu yöntemlerden bazıları halen kullanılmakta olan tahkimat yöntemleri olmasına rağmen, bir çoğu günümüzde kullanılmamaktadır. Her yöntemin kendi içinde avantajları ve dezavantajları vardır. İlerleyen bölümlerde bu yöntemler ayrıntıları ile irdelenecektir.

Gelişen teknik imkanlar ve makinalar ile birlikte araştırmacıların dikkatle üzerinde durduğu diğer bir konu ise; tünel kazısı esnasında kullanılan kazıcı makinaların performansı ve bu makinaların tünel kazısı ilerleme hızındaki ve maliyetlerdeki rolleri üzerinedir.

Tünelciliğin gelişmesi ile birlikte, tünellerde tasarım ve proje yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar kabaca üç başlıkta toplanmaktadır. Ampirik yöntemler (sınıflandırma yöntemleri), analitik yöntemler, sayısal yöntemler (sonlu elemanlar yöntemi). İlerleyen bölümlerde bu konularla ilgili ayrıntılı bilgiler bulunmaktadır.

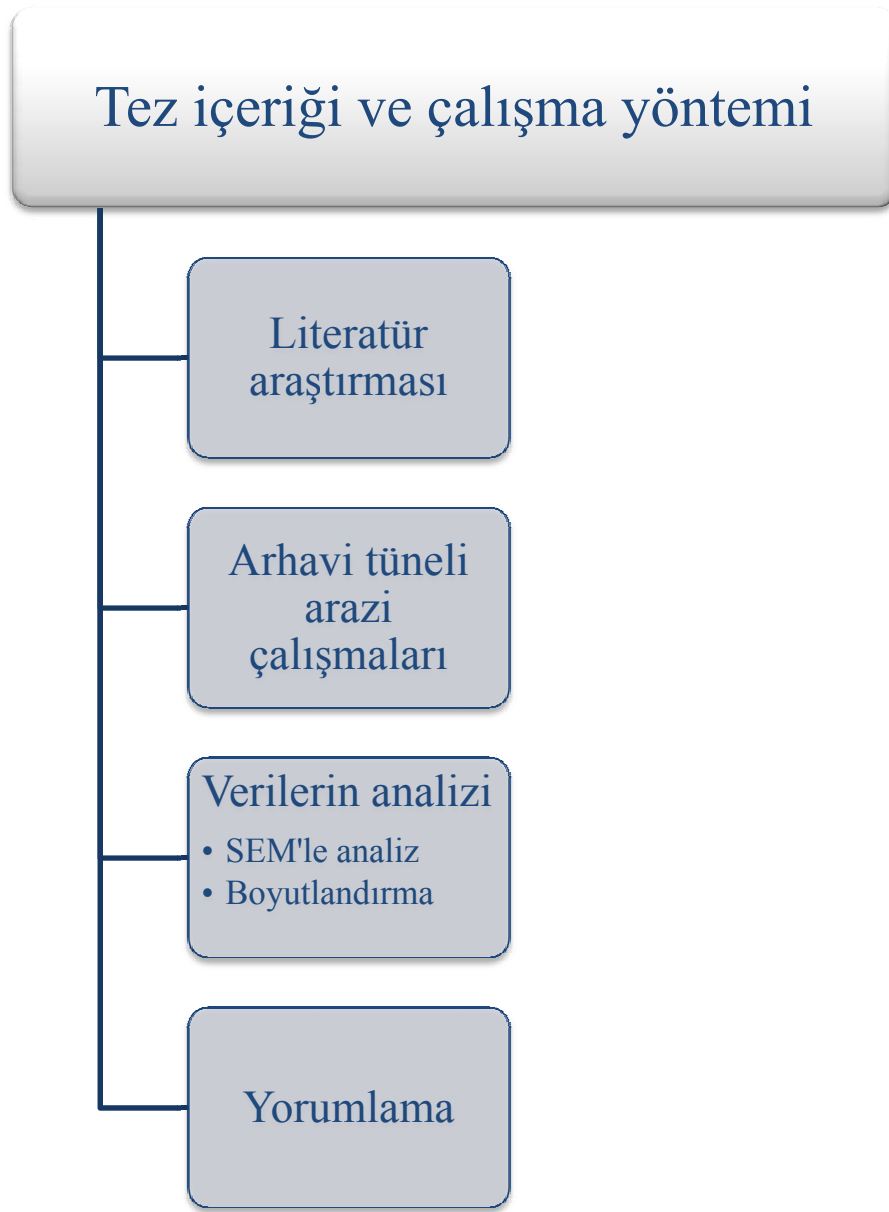
Yapı mühendisliğinin temel amacı, dış etkiler altındaki bir yapının gerçeğe en yakın davranışını bulmaktır. Dış etkilerin ve büyüklüklerinin neler olabileceği hesaplanırken, bu yüklerin kaynağı, hesaplarda nasıl temsil edilebileceği çok önemlidir. Bu etkilerin yanlış alınması, bunları karşılayacak kesitlerde oluşan en elverişsiz kesit zorlarını ve atanacak kesitlerin ateletini belirleyecektir. Her hangi bir beklenmeyen elverişsiz duruma önlem olarak hesaplanan bu yükler çeşitli katsayılarla arttırılarak, oluşturulacak muhtemel yük kombinezonları ile yapı yüklenir. Yapının matematik modeli kurulurken de hesabı basitleştirici, fakat yapının gerçek davranışını fazla değiştirmeyecek hesap yöntemleri üzerinde durulur.

Bu tez çalışmasında NATM ile kazılan örnek bir tünelden alınan jeolojik verilerle, oluşan deformasyonlar, asal gerilmeler ve kesitlere etkiyen kesit zorları hesaplanmış bunlara mukavim kesitler ve tahkimat seçilmiştir. Tünelin sonlu elemanlar modeli Plaxis V. 8.2 programı ile modellenmiş elde edilen sonuçlar ilerleyen bölümlerde ayrıntıları ile irdelenmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Tünellerdeki deformasyonların belirlemesi ve tünel kazısı sonrası oluşan ikincil gerilme durumlarının tünelin stabilitesini bozacak seviyelere gelmeden tespit edilmesi hayati önem taşımaktadır.

Tünellerde deformasyon tünel açımı sırasında yerleştirilen ölçme âletleri ile (örneğin inklinometre, ekstansometre) izlenebilmektedir. Bunun yanında geoteknik araştırmalar sonucunda belirlenmiş kaya yapısının özelliklerini kullanarak sayısal yöntemlerle hesap yapan bilgisayar programlarının kullanılmasıyla da deformasyonlar tahmin edilmektedir. Bu tez çalışmasının amacı da bu tür bir paket program kullanılarak belli bir formasyon içinde açılan bir tünel sonrası oluşacak deformasyonların, asal gerilmelerin ve kesit zorlarının sayısal yöntemlerle daha önceden belirlenmesidir. Şekil 1.1’de bu tez çalışmasında yürütülen çalışma yöntem şeması verilmiştir.



Şekil 1.1 : Tez içeriği ve çalışma yöntemi

2. TÜNELCİLİĞİN TARİHSEL GELİŞİMİ

2.1 Tarihçe

Doğada, insan yapısı olmayan pek çok dehliz ve mağara bulunur. Mağara ve dehlizlerin oluşma sebepleri sıralanacak olursa; deniz sularının aşındırma etkisi ile arazinin yüksekte kalan kısımlarını delerek bunların altından geçen akarsuların etkileri olarak sayılabilir. Birincisine örnek olarak İskoçya'daki Hebrides takımadalarında bulunan Fingal mağarası gösterilebilir. Bu mağaranın yüksekliği 20 m. uzunluğu ise 70 m.'dir. Ülkemizde derinliği 20 m'yi bulan Ürnlü-Düdensuyu mağarası, akarsuların açtığı dehliz ve mağaralara güzel bir örnektir. Ayrıca Alanya'daki Damlataş Mağarası, Burdur'daki İnsuyu Mağarası, Silifke'deki Cennet Cehennem Mağaraları ülkemizin önemli mağaralardır. Dünyadan örnek vermek gerekirse Fransa'da yer alan Padirac Yeraltı Uçurumu, Dargilan Mağarası, Belçika'da Han Mağaraları, New Meksiko'da Carlsbat Mağaraları örnek gösterilebilir [1].

İlk insanlar dehliz ve mağaralarından faydalanmışlar, onları daha kullanışlı ve güvenli bir duruma getirmek için genişletip ilerlettikleri mağaraları, sağlamlaştırmışlardır. Doğal dehliz bulunmayan yerlerde doğal yapılara benzetmek sureti ile küçük çapta bir takım dehlizler açarak kendilerine yaşam alanları yaratmışlardır. İnsanların yer altı yapıları yaparak bir takım amaçlar için kullanmaya başlamaları bazı arkeolojik veriler ışığında taş devri dönemine aittir [2]. İnsanların yer altı yapılarını bazı amaçlar doğrultusunda kullanmaları madenlere ulaşmalarını sağlamıştır. Cevher taşıyan madenlerin işletilmesi Karadeniz ile Kafkasya arasında, yaklaşık M.Ö. 3500 yılları civarında başlamıştır [2]. Mısır firavunları, Teb ve Nübi Krallıkları, Amerika Aztekler'i gibi birçok eski uygarlıktan kalma bu şekilde yapılar vardır [1].

M.Ö. ilk bin yıl içerisinde Mısır ve Roma maden ocakları çalıştırılmaya başlanılmış ve bunların derinlikleri yer yer 200m ulaşmışlardır. Bu yıllarda yapılan tünellerde ilerleme hızı 9m/yıl olarak tahmin edilmektedir [3].

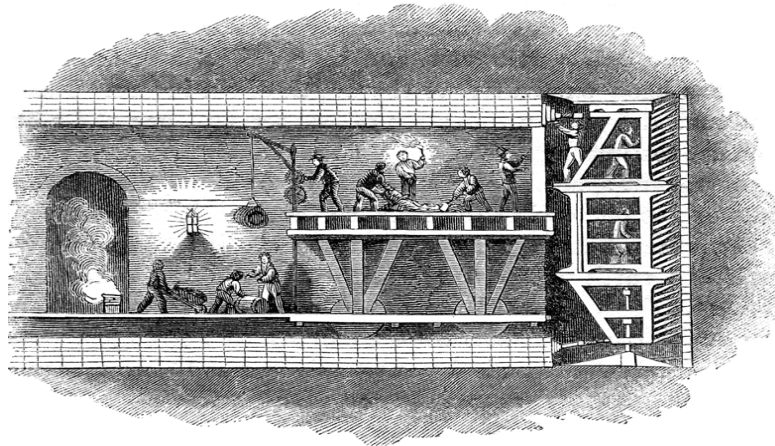
Ülkemizde en önemli kagir kaplamalı antik tünel, M.S. 50 Yıllarında Hatay'ın Samandağı ilçesinde yer alan "Titus Vespasianus" tünelidir. Tünelin bulunduğu alan, tarihte "Seleukeia" olarak tanınan antik bir kentin yakınındadır. Kent aslında İskender'in önemli generallerinden Antigonos Monophtalmos'un Asi ırmağı kıyısında kurduğu "Antigoneia" şehrinin halkını, Seleukos'un bu yeni şehre nakletmesiyle kurulmuştur. Kent en parlak dönemini Romalılar döneminde özellikle imparator Traianus ve Valens zamanında önemli bir deniz üssü olarak yaşamıştır. Bu önemli liman tesislerine ait kalıntıların çoğu bugün de görülmektedir. Kentin kuzeybatısında yer alan kaya tüneli ve ona bağlı kayaya oyulmuş üstü açık su kanalı, dağlardan inen zararlı sel suları birikimlerinin bu ilginç liman tesisini doldurmasını engellemek için yapılmıştır. Tünelin yapılmasına neden olan nehrin ise dağlardan çıkıp antik kentin içinden geçerek iç limana döküldüğü anlaşılmaktadır. Tahminen, taşkın zamanlarında sular ve getirdiği birikimler, aşağı kent ve liman açısından tehlikeli olmaktadır. Bu nedenle Romalı mühendisler, nehrin ağzından yaklaşık 1 km kadar yukarıda, yatağını boydan boya güçlü bir setle kapatmışlardır. Burada birikecek suyu aktarmak için de, deniz yönündeki kayalık dağ kesimi oyularak, iki bölümlü bir kaya tüneli ve buna bağlı olarak uzun bir su kanalı açılmıştır. Setten itibaren güneybatı yönüne doğru önce 89 metrelik bir üst tünel bölümü, daha sonra 64 metrelik üzeri açık ve kayaya oyulmuş merdivenle üste çıkılabilen bir ara bölüm ve onun devamında 31 metrelik bir alt tünel bölümü yer almaktadır. Daha sonraki kısımlar, önce yükseltilip sonra yavaş yavaş alçalması nedeniyle, üstü açık kanal şeklinde devam etmektedir. Tünelin yüksekliği 7 m, eni ise ortalama 6 m'dir.

Mısırlılar ve Romalılar daha çok su taşımak ve maden amacı ile tünel ve galeriler açmışlardır. Romalıların Avrupa'da açtığı tüneller Afrika'dakilere göre çok daha iyi niteliklerdedir [1]. Ünlü yunan tarihçi Heredot'un anlatımına göre M.Ö. 700'lü yıllarda Yunanistan'da bulunan Shiloah tüneli inşa edilmiştir. Bu tünelin uzunluğunun 530 metre, çapının ise 2.5 metre olduğu, arkeolojik ve tarihi çalışmalar sonucunda anlaşılmaktadır. Heredot'a göre tünel Samos'a su getirmek amacıyla açılmıştır [4]. Daha sonraları Romalılar Avrupa ve Afrika'da daha çok kentlere sutaşıma amacı ile tünel inşaatlarına başlamışlardır. M.Ö. 50 yıllarında yapılmış olan Sabino tepesi altındaki Fucine gölünden verimli tarlalara su çekmeyi amaçlayan tünel 5635 metre uzunluğundadır. Bu tünelin inşası sırasında 40 kuyunun açıldığı ve 30 000 esirin on bir sene çalıştırıldığı bilinmektedir. Bizanslılar zamanında açılan ilk

tünelin M.S. 687 de Sakız Adası'nda açıldığı bilinmektedir. Bu, bir galeri olup en kesiti 0.6 m² uzunluğu ise 1600 m'dir [1]. Mühendisliğin temel amacı olan doğayı şekillendirmek dönüştürmek, doğayı gözlemeye ve onu taklit etmeye dayalıdır. Doğayı taklit prensibi ile ilkel metotlarla açılan ilk tünellerin, modern tünel mühendisliğine temel oluşturduğu açıktır.

XVII yüzyıl Avrupa'sında gelişmeye başlayan nehir ve kanal taşımacılığı ile birlikte, tünelcilikte önemli bir aşama meydana gelmiş ve modern tünelcilik teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. 1679-1681'de Fransa'da yapılan, boyutları ise; 160 m uzunluk, 7 m genişlik ve 8 m yükseklikteki Mal-Passe Tüneli, kanal taşımacılığı için yapılan tünellerin ilkidir [4]. Bundan sonra Avrupa'nın birçok yerinde daha çok su getirme veya kanal taşımacılığı için pek çok tünel yapılmıştır. Bu arada 1803–1810 tarihleri arasında Fransa'da Saint-Quentin kanalı için açılan ilk taş kemerli Tronquoty-en Bony Tüneli ile 1824 yılında Bourgne Kanalı için açılan Poulli Tüneli örnek olarak verilebilir [1].

Tünel açma yöntemlerindeki en önemli gelişmelerden biri, İngiltere'ye yerleşmiş olan Fransız mühendis Marc Brunel (1769–1849) tarafından, 1825 ve 1841 yılları arasında yapılan, günümüzde de hala Londra Metrosu tarafından kullanılan ve Rotherhithe'de Thames nehrinin altından geçen ilk sualtı tüneli. Brunel, bu tünelin yapımında özel bir tünel kazıcı araç geliştirdi. Bu araç, yatay olarak yerleştirilmiş kerestelerden oluşuyordu. Kirişler aracılığı ile toprağın kazılabilmesi sağlanmaktaydı [5]. Her bir kiriş daha ileri yerleştirilerek kazıya devam edilmekteydi. Brunel'in tünel kazma aracı, bugünün TBM makinelerinin atası sayılmaktadır. Şekil 2.1'de ilk TBM makinesi görülmektedir [5].



Şekil 2.1 : İlk TBM makinesi [5]

Thames tüneline kullanılan makinenin ardından Lord Cohrane'da sulu zeminlerde kuyu ve galeri açmak için basınçlı havadan faydalanma yöntemini geliştirmiştir. Bu metot 1830'da geliştirilmiş olmasına rağmen ancak 1839'da Hersent tarafından Chalennes Sur Loire'da kullanılmıştır.

1880 yılında Manş Denizi altında, İngiliz girişimci Sir William Watkin ve Fransız girişimci Suez Canal ortaklığında bir tünel planlanmıştır. Planlanan tünel kapsamında Fransa ve İngiltere topraklarında 2 adet pilot galeri açılmıştır. İngiltere tarafında yapılan pilot tünel için, 2,13 metre çapında F. Beaumont tarafından icat edilen basınçlı hava makinesi kullanılarak günde 21 metre ilerleme sağlanmış ve 1893 metre kazı yapılmıştır. Fransız tarafında gene aynı tarz basınçlı hava makinesi kullanılarak 1669 metre kazı yapılmıştır. Ancak proje İngiliz hükümeti üzerinde oluşan baskılar sebebi ile ulusal güvenliği tehdit edeceği savı doğrultusunda iptal edilmiştir [6].

Demiryolu ağlarının gelişmesi ile büyük çaplı tüneller inşa edilmeye başlanmıştır. Demiryolu hatlarında eğimlerin küçük, kurbaların da çok büyük olmasından dolayı birçok dağlık arazide tüneller inşa edilmiştir. Teknolojik gelişmelerdeki hızlanma ve bilimdeki ilerleme ile birçok tünel açma metodu ve makinesi geliştirilmiştir. İlk demiryolu tüneline 1826 yılında Fransa'da St. Etienne-Terre Noire hattı üzerinde açıldığı iddia edilmektedir [1].

Demiryolu tünellerinin en önemlisi 1871 yılında yapımına başlanan, Fransa- İtalya demiryolu hattı üzerinde bulunan Cennissio Tüneli'dir [4]. 12 220 km uzunluğundaki bu tünel ilk önce elle açılmaya başlanmış ama daha sonra basınçlı hava kullanılmıştır [1].

1898'de, İtalya-İsviçre demiryolu hattında bulunan 19700 metre uzunluğundaki Simplon Tüneli, inşasına başlanmıştır. İkinci tüneline inşasına 1912 yılında başlanmış açılışı ise 1921 yılında gerçekleşmiştir [7]. Bu tünel kazısı aşamasında 237 kere su kaynağına rastlanmış, bunun sonucu olarak büyük su kütleleri tünel hacmini birçok kez doldurarak ölümcül kazalara yol açmıştır [1]. Tünel kazısı aşamasında çoğu İtalyan olan 3000'e yakın işçi çalışmış bunların, 67'si yaşanan kazalar sonucu yaşamını yitirmiştir [7] . Çizelge 2.1'de tünelciliğin son yüzyıl içerisinde gelişimi verilmiştir. Çizelge 2.2'de ise önemli tüneller ve yapılış yılları bulunmaktadır.

Çizelge 2.1 : Son yüzyılda tünelticiliğin gelişimi [8].

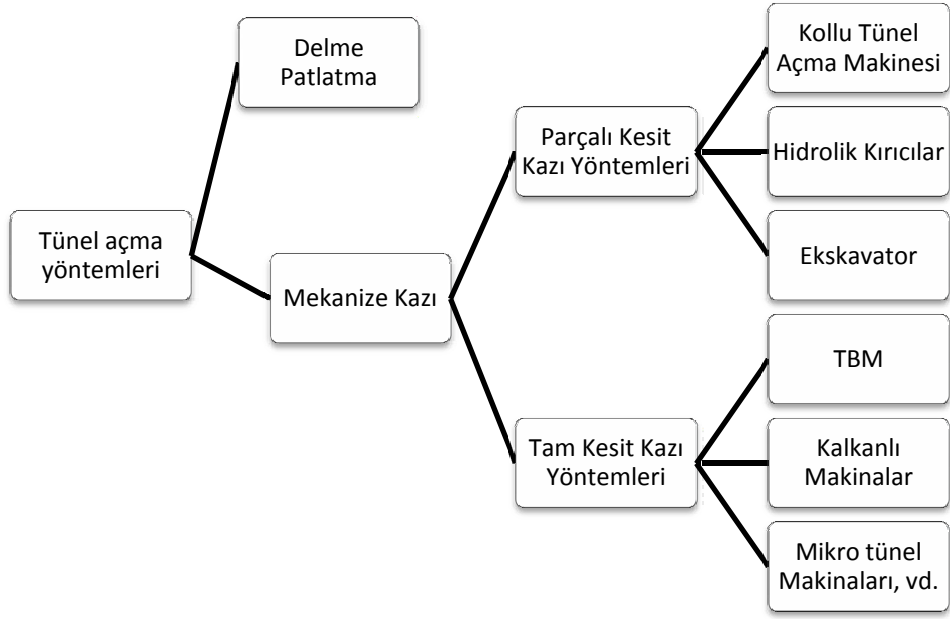
Aşama	Gelişmeyi sağlayan unsurlar.
Kazı, ilerleme	Kazıdaki gelişmeler: Ekipman, patlatma, kazı makineleri.
	Tünel açıklıklarının gelişmesi, kazı, pasa malzemenin hızlı ve etkin uzaklaştırılması.
	Kazı metotlarının ve teknolojilerinin geliştirilmesi.
	Enerji kullanımındaki gelişmeler.
Tahkimat	Beton ve donatı teknolojilerindeki gelişmeler (püskürtme beton).
	Zemin ve ayna sağlamlaştırma (çimento enjeksiyonları gibi) tekniklerinin gelişmesi.
	Tünel kalkanlarının kullanılmaya başlanması.
Çalışma şartları	Havalandırma sistemlerinin gelişmesi.
	Pompalarla tünel içindeki suyun dışarı atılması.
	Sıkıştırılmış hava ile su gelirin azaltılması.
	Işıklandırma sistemlerinin gelişmesi.

Çizelge 2.2 : Önemli tüneller ve yapılış yıllar [9].

En eski tüneller	
Tünel Adı	Uzunluk
Eupalios tüneli (Samos, 500MS)	1 km
Urner Loch (1707, ilk alp tüneli İsviçre)	64 km
Mont-Cenis (Fransa-İtalya, 1857–1870)	12 km
St. Gotthard demiryolu tüneli (1872–1878, İsviçre)	15 km
En uzun tüneller	
Seikan (Japonya, 1981–1984)	54 km
Euro Tüneli (Fransa – İngiltere, 1986–1993)	50 km
Simplon I (İsviçre- İtalya, 1898–1906)	20 km
Grand Apennin (İtalya, 1921–1930)	19 km
New Gotthard (İsviçre, 1969–1980)	16 km
En uzun metro tünelleri	
New York	221 km
Londra	414 km
Paris	165 km
Moskova	254 km

2.2 Tünel Açma Yöntemleri

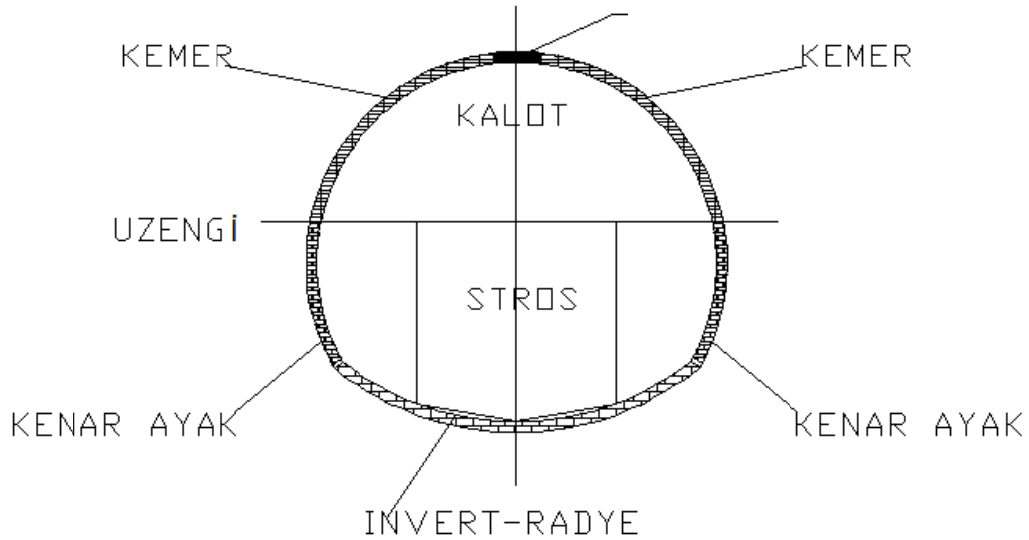
Tünel açma yöntemleri, kazının yapılış şekline ve arının ilerleyişine göre iki başlık altında toplanabilir [10]. Tünel inşaatı ihtiyacının artmaya başlamasıyla çeşitli tünel açma yöntemleri geliştirilmiştir. Uzun bir tecrübe evresi sonucunda geliştirilen bu yöntemler kazı aşaması, iksa sistemleri ve kaplama tiplerinin seçimleri konularında farklılık göstermektedir. Teknolojik gelişmeler ve zemin mühendisliğinin gelişimi ile birlikte geliştirilmiş olan tünel açma yöntemleri Şekil 2.2’de şematize edilmiştir.



Şekil 2.2 : Tünel açma yöntemleri sınıflandırması

2.2.1 Parçalı kazı yöntemlerin

Parçalı kazı yöntemlerinde kullanılan tabirler şematik olarak Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



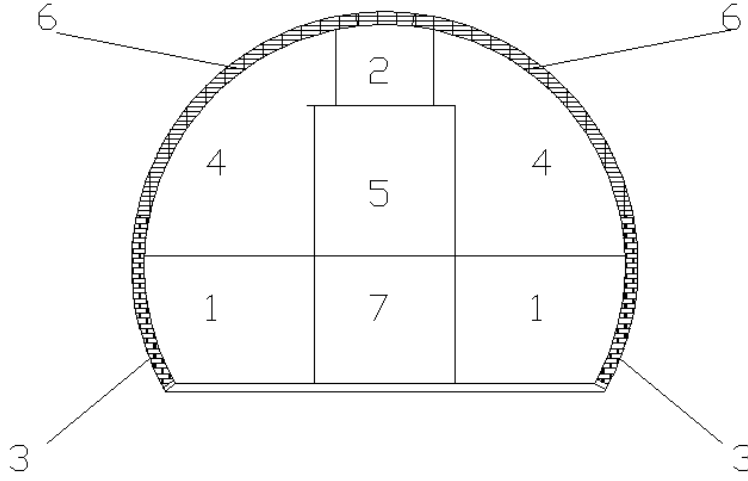
Şekil 2.3 : Tünel açma yöntemlerinde kullanılan terimler [1]

Parçalı kazı yöntemlerinde kullanılan terimler şematik olarak Şekil 2.3 üzerinde gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere İnvert-Radye bölgesi tünel kenar ayaklarına gelen itkileri geniş bir alana yaymak amacı ile iki kenar ayak arasına dökülen kütle betonudur. Genellikle ters kemer şeklinde yapılmaktadır. Kenar ayaklar radyeden üzengi seviyesine kadarki yan duvar bölgesine verilen addır. Kemer, kenar ayakları birbirine bağlayan tavan kısmıdır. Anahtar taşı, kemerin en yüksek bölgesinde yer alan kısmı olup kagir tünel kaplamalarında yer alır. Üzengi, kemerin kenar ayaklarla birleştiği bölümdür ve omuz diye de tabir edilebilir. Kalot, üzengi seviyesi üzerinde kalan kazı bölgesidir. Stros, kazı alanının üzengi altında kalan bölgesidir. Çekirdek diye de adlandırılır [1].

2.2.1.1 Alman yöntemi

Çekirdek yöntemi olarak da bilinen bu yöntem günümüzde önemini kaybetmiştir. Bu yöntemde göre, önce invert kotunda, kesitte bir adet sağ bir adet solda olmak üzere iki adet yan ayak galerisi sürülür. Yan ayak galerileri bir ano sürüldükten sonra tavan galerisi kazısına başlanır, bu çalışmayı izleyen zaman içinde kagir yan duvarlar örülür. Bu işlemlerden sonra, çekirdek bölümüne oturtulan kısa boylu ahşap destekler yardımıyla büyük deformasyonların önüne geçilir. Daha sonra tavanın örülmesi gerçekleştirilir ve tavan kaplaması tamamlanır. Son olarak ortadaki çekirdek bölümü alınarak taban kaplaması işlemine geçilerek tünel bitirilmiş olur [1].

Alman Yöntemi'nin en önemli sakıncaları çalışma alanlarının çok dar, zaman kaybının fazla olması ve galeri gerilmelerinin değişik yön ve şiddette ortaya çıkması olarak sıralanabilir. Yöntemin yararları ise açılan galeriden sonra özellikleri bilinen bir formasyonda çalışılması, tavan kemerinin sağlam destekler üzerinde bulunması ve çekirdeğin oluşturulmasının fazla masraf getirmesidir. Bu yöntemde oluşabilecek deformasyonlar iyi bir şekilde kontrol edilmelidir [4]. Şekil 2.4'de tünel açımında Alman Metodu'nun uygulanışı şematize edilmiştir. Şekil 2.4'deki numaralar kazı aşamalarını ve tahkimat sırasını göstermektedir.

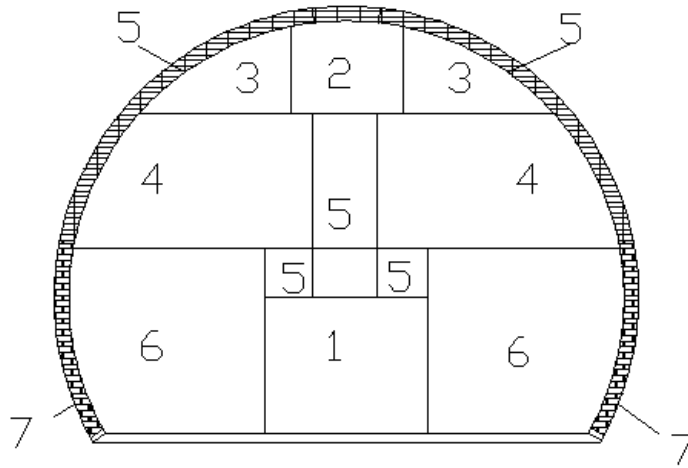


Şekil 2.4 : Alman metodunun uygulanişı [4]

2.2.1.2 Belçika Yöntemi

Belçika yönteminin çalışma prensibi, tavan basıncının dengesini korumaktır. Bu yöntemde önce tavan galerisi sürülür. Kazı bittikten sonra, tavan kaplanması yapılır. Daha sonra diğer parçalar anolar halinde kazılarak kaplamaları yapılmaktadır [4].

Yöntemin en önemli avantajı, tavanın kısa sürede kaplanarak tavan basıncını dengelemesidir. Bu durum tünel kazısı yapılacak kaya duraylılığının artırılmasını ve kayanın sürekli kazıya uygun olmasını sağlar. Yöntemin dezavantajları ise; tavan-taban kaplamalarının çabuk yapılmasının gerekmesi ve bu çalışma yapılırken alan darlığı sebebi ile çalışmanın zaman almasıdır [1]. Şekil 2.5’de tünel açımında Belçika Metodu’nun uygulanişı gösterilmektedir. Şekil 2.5’deki numaralar kazı aşamalarını ve tahkimat sırasını göstermektedir.

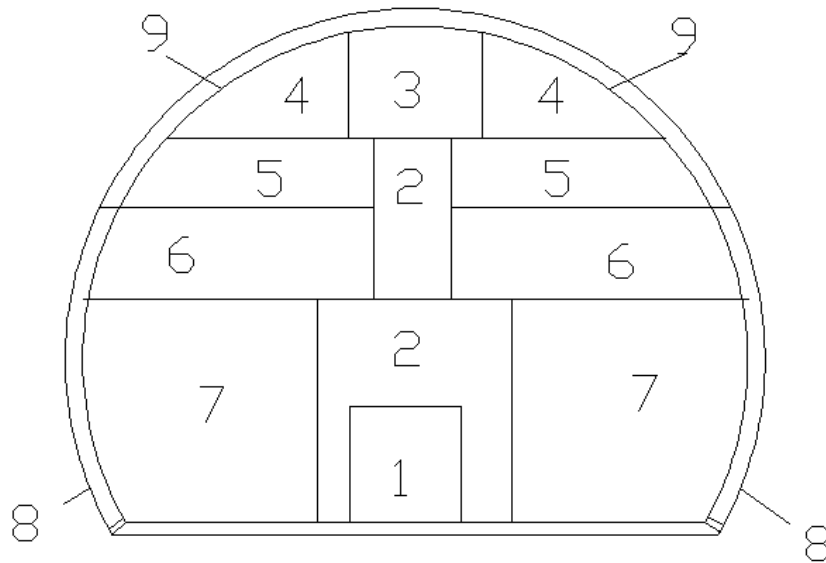


Şekil 2.5 : Belçika metodunun uygulanişı [4]

2.2.1.3 Eski Avusturya Yöntemi

Uzunluğu az ve kesiti geniş olan tünellerde tercih edilen bir yöntemdir. Önce nakliye amaçlı tavan ve tabandaki galeriler açılır. Kazı yönü yukarıdan aşağıya doğrudur. Kaplama duvarlar ise aşağıdan yukarı doğru yapılır. Kaplama tüm kesit kazısı bittikten sonra yapılır.

Fazla ağaç kullanılması, taş duvar kaplaması yöntem maliyetini arttırır. Şekil 2.6’da tünel açımında Eski Avusturya Metodu’nun uygulanışı gösterilmektedir. Şekil 2.6’daki numaralar kazı aşamalarını ve tahkimat sırasını göstermektedir [4].



Şekil 2.6 : Eski Avusturya Metodu’nun uygulanışı [4].

2.2.2 İngiliz Yöntemi

Bu yöntemin özellikleri, Eski Avusturya Yöntemi’ne çok benzemektedir. Ancak daha az parçalı kazı yapılmasından kaynaklı, Eski Avusturya Yöntemi’ne göre daha sağlam ve az baskılı kayaçlarda uygulanır. Tünel en kesiti küçüldükçe yöntemin başarısı artmaktadır [4].

2.2.3 Diğer yöntemler

Yukarıda adı geçen yöntemler parçalı kazı tekniğinde, en fazla başvurulanan kazı yöntemleridir. Bunların yanında bazı kazı yöntemleri daha vardır. Bu yöntemlerden, İtalyan Yöntemi çok ender kullanılmış bir yöntemdir. Plastik ve akışkan zeminlerde uygulanmıştır.

İsviçre Yöntemi'nde ise önce taban galerisi açılır. Bu galeriler araştırma galerisi gibi önde ilerler ve nakliyat amacıyla kullanılır. Daha sonra bu taban galerisi tavana, kadar genişletilir. Tavana ulaşıldıktan sonra, yan parçalar aşağıya doğru alınır. Kaplama aşağıdan yukarıya doğru yapılır [4].

2.3 Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu

Tünelcilikte, tünelin, açıldığı kaya ortamına kendisini taşıtması prensibi ile ortaya çıkan "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)" günümüzde çok yaygın kullanılan bir yöntemdir. En uygun kazı ve tahkimat yöntemleri kullanılarak kazıdan sonra oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların, yapılan tahkimatlar ile birlikte kayaya taşıtılması, yönlendirilmesidir. Tünel kesitini çevreleyen kayaç zonunun ilk sağlamlığının olabildiğince korunarak, tüneli çevreleyen bölgenin kendi kendini tutarak doğal bir tahkimat oluşturması amaçlanmaktadır. Böylelikle boşluğu çevreleyen kayaç zonunun yük oluşturan değil yük taşıyan bir konuma geçmesi sağlanır [4].

Bu yöntem tünelciliğe yeni bir bakış açısı getirmektedir. Bu sebeple eski yöntemlerle karşılaştırıldığında genel ilkeleri bakımından pek benzerlik göstermez. NATM'nin Leopold Müller tarafından geliştirilen 22 prensibi olup, esas ana kayanın ilk sağlamlığını koruyarak yapılacak tahkimatla beraber kayaç bölgesinin de taşıyıcı olmasını sağlamaktır. Bu sebeple tahkimat işlemleri en kısa zamanda tamamlanır. Kazı kesitleri ne kadar yuvarlak seçilirse yöntem o kadar iyi çalışmaktadır. Günümüzde ülkemizde yapılan birçok tünelde NATM metodu kullanılmaktadır. NATM tahkimat elemanları iksa, püskürtme beton ve kaya bulonlarıdır. Genelde püskürtme beton kalınlığı 10–20 cm aralığında değişir. Birincil tahkimattan sonra iç betonarme iç kaplama yapılarak olası bir elverişsiz durum için önlem alınmaktadır.

2.3.1 NATM'nin tarihsel gelişimi

Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi'nin (NATM) patenti 1958'de A. Brunner tarafından alınmıştır (Avusturya Patent Numarası:197851) [11]. Ancak 1959'da Avusturyalı tünel uzmanları Rabcewicz, Müller ve Pacher tarafından dünyaya tanıtılmıştır. Eski Avusturya tünel metodu ve diğer metotları incelenerek pratik deneyimlerin sonucu olarak geliştirilmiştir [12].

Doğada bu konuyla ilgili birçok olayın incelenmesi (mağaralar) ve yapılan ölçümler, en zorlu kayalarda bile yapılacak tünellerin tasarım yollarını belirlemede en iyi yol olan ampirik yaklaşımın oluşmasına öncülük etmiştir [11].

Patent başvurusunda yapılan NATM tanımlaması aynen şöyledir: “İnce geçici bir destekleme yerleştirmek ve deformasyonlara izin vermek yoluyla kaya basıncının düşürülmesi ve bu basıncın çevreleyen kayaya dağıtılmasıdır. Böylece son destekleme daha az yüklenecek ve daha sonra daha da ince bir yapı halinde son destekleme yerleştirilebilecektir. Deformasyonlar ölçümler ile gözlenmeli ve sonuçlar yapısal analiz ve tasarım ile birlikte değerlendirilmelidir” [13]. NATM, ilk olarak Avusturya, Fransa, Almanya, İsviçre ve İtalya’da uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntem dünyaya hızla yayılmış ve birçok tünelde başarı ile uygulanmıştır. Yöntem birçok araştırmacı tarafından farklı yönleriyle incelenmiştir. NATM metodu kullanılarak yapılan ilk büyük ölçekli tünel Rabcewicz tarafından Venezüella’da yapılmıştır [14].

İlk uygulamalardan bir diğeri 1969’da inşa edilen Frankfurt Metrosu’dur. Bu yöntem Japonya’daki Seikan Tüneli’nde de başarı ile uygulanmıştır. Günümüzde ülkemizde ve dünyada birçok tünelde bu yöntem başarı ile uygulanmaktadır [11].

Yöntemin başarılı olabilmesi için; kayanın mekanik özelliklerinin ve su etkisinin, birincil gerilmelerin belirlenmiş olması gerekir. Tünel açımı sırasında ve sonrasında ikincil deformasyonların ve gerilmelerin gözlenmesi çok önemlidir. Bu açıdan tünel kazısı sırasında düzenli deformasyon ölçümleri yapılarak tünel açma çalışmalarının denetlenmesi ve sonuçlara göre yönlendirilmesi gerekmektedir.

2.3.2 NATM’in özellikleri

Bu yöntem kayayı kayaya taşıtma prensibine dayanmaktadır. Esnek ve dinamik bir yöntem olan NATM’nin en önemli parametresi kazı aşamalarına ve kurallara kayıtsız uymaktır. Leopold Müller tarafından yöneme dair 22 prensip mevcuttur. Aşağıda bunlardan en önemlileri verilmiştir.

2.3.2.1 Kaya kütlelerinin doğal dayanımı

Yöntem tünel kesitini çevreleyen ve tünel tahkimatının temel bileşeni olan kaya kütlelerinin doğal dayanımının korunarak taşıyıcı hale getirilmesine dayanır.

Kurulan ilk destek kayacın kendisini taşıyıcı unsur haline getirir. Kazıdan hemen sonra uygulanan ince bir püskürtme beton tabakası ile kazıdan kaynaklı çatlaklar ve kayaç kütlesinin dayanımı artırılır. Kayaçta oluşacak gevşemeler ve aşırı deformasyonlar önlenmelidir [11, 15, 16].

2.3.2.2 Ölçümler

Tünel kazısı devam ederken, tünelin içinde açıldığı kayaçlara ait testler sürekli yapılmalı ve kazı sırasında oluşan bütün deformasyonlar ve gerilmeler günlük olarak ölçülmelidir. Yapılan bu ölçümler sayesinde beklenmeyen durumlara karşı anında yeni çözümler üretilebilmekte, yerine göre kazı ve tahkimat sistemi güçlendirilip gevşetilebilmektedir [11].

2.3.2.3 Esnek tahkimat

İlk kaplama ince bir şekilde püskürtme betonla sağlanmalıdır. Ana tahkimat, çelik iksa, çelik hasır sonrasında bir kat daha püskürtme beton ve kaya bulonları ile sağlanmalıdır. İlk tahkimat, kazıdan sonra gereken birincil destekleme için yapılmaktadır. Eğer tünelde yapılan ölçümler sonucu ikinci bir tahkimata ihtiyaç duyulursa ana tahkimata geçilmelidir.

2.3.2.4 Tahkimatın taban betonu ile tamamlanması

Tünel tabanı mümkün olduğu kadar çabuk kapatılmalıdır. Bu işlem taşıyıcı bir tam halkanın oluşmasını sağlar. İnvert kaplama kaya kütlesinin yük taşıma halkasının temelini oluşturur. Özellikle zayıf zeminlerde açılan tünellerde bu işlem çabuk bir şekilde yapılmalıdır. Kayaç koşullarına bağlı olarak halkanın taban betonu ile kapatılma zamanına karar verilir [13].

2.3.2.5 Sözleşme şartları

NATM tünellerinde kazı ve destek işlemleri günlük değişebilen nitelikte olmalıdır. Bu sebeple yapılan sözleşmeler esnek ve zemin şartlarına göre tahkimatın değişmesine olanak sağlamalıdır.

2.3.2.6 Tahkimat gereksinimleri

Avusturya yer altı yapıları ile ilgili yönetmelik olan ÖNORM B2203-1'e göre kaya kütle sınıflamasına bağlı olarak belirlenir. Tünelde tahkimatsız açıklık mümkün olduğu kadar kısa olmalı ve bu açıklık mümkün olan en kısa sürede kaplanmalıdır.

2.4 NATM'in Kazı Yöntemi

NATM'de kazı yöntemi olarak delme patlatma ve yarı mekanize kazı kullanılır. NATM tünellerinde kullanılan tahkimat elemanları, aşamaları ve kullanım amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

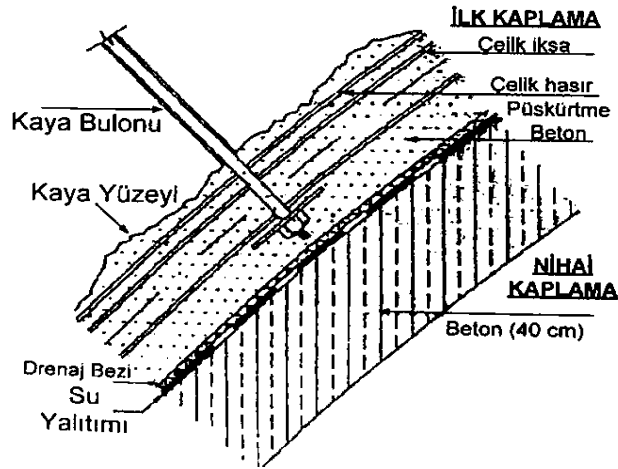
İlk tahkimat olarak birinci kat püskürtme beton kullanılır. Püskürtme beton eklem çatlaklarını kaplayarak dökülmeleri önlemek, kayanın kendini taşıma durumunun devamını sağlamak amacını taşır. Aynı zamanda bu işlem hava ile teması keserek, duraylılığı arttırır. Genelde 5 cm kalınlık yeterli olmaktadır.

İkinci aşamada çelik veya kafes iksa kullanılmaktadır. Bazı kayaç formasyonlarında gerek duyulmayabilir. Uygulanma amacı kemerlenmeyi sağlamak ve tavan kayasının bir bütün halinde deformasyonunu sağlamaktır. Haddelenmiş I profiller ve inşaat donatısının kaynaklanmasıyla oluşturulan kafes iksalar olmak üzere iki tip iksa kullanılır. Kafes iksa hem hafif hem de ekonomik olması dolayısı ile daha çok avantajlar sunar.

Üçüncü aşama donatılı püskürtme beton aşamasıdır. Genelde kalınlığı 8-25 cm aralığındadır. Öncelikle hasır donatı iki iksa arasında zeminle aralarında bir boşluk oluşmayacak şekilde yerleştirilir. Ardından iki iksa arası bağlantı elemanları olan işban demirleri monte edilir ve püskürtme beton bu işlemlerin ardından uygulanır. Tünel tahkimatının bir diyafram halinde çalışmasını ve çelik donatıların korozyonun önlenmesini sağlar. Ayrıca iç kaplama betonu ve su yalıtım elemanları için düzgün bir tünel yüzeyi sağlar.

Sonuncu olarak kaya bulonu yapılır. Amacı kazı sonrası ikincil durumlar sebebi ile oluşan plastik deformasyon bölgesini, elastik deformasyon bölgesine tutturarak, doğal dengesi bozulan kayaçları sağlamlaştırmaktır. Çeşitli tipte kaya bulonları vardır, bunların seçimi ihtiyaca göre belirlenir. Bu dört elemanla, geçici destek oluşturulur [17].

NATM'in tahkimat elemanları Şekil 2.7'de ayrıntıları ile görülmektedir.



Şekil 2.7 : NATM tahkimat elemanları [17].

2.4.1 NATM kazısı sırasında dikkat edilecek hususlar

Patlayıcı ile açılan bir tünelin etrafında, özellikle gevşek eklemli zeminlerde çentikli bir yüzey hattı oluşur. Püskürtme beton ilkin zayıf düzlemler boyunca olan kopmalarla meydana gelen köşe ve çukur bölgelere uygulanır, Bu bölgelerde oluşabilecek gerilme yoğunlaşmasını önlem çok önemlidir. Püskürtme betonun kazıdan hemen sonra tatbik edilmesi gerekir. Püskürtme beton içine yerleştirilen donatı, kesme kuvvetine ve bu kuvvetten kaynaklanacak momentlere dayanım göstermektedir.

NATM'de kaya bulonları birincil gerilme durumları değişmiş kayaçları arkadaki sağlam zemine tutturarak, kayaca taşıyıcılık vermek ve oluşan deformasyonları sınırlamak için kullanılır. Bu nedenle, kaya bulonlarının plakalarının tüm yüzeyi ile zemine oturması gerekmektedir. Aksi halde istenmeyen sonuçlar doğabilir. NATM'de değişik ikincil gerilmelerin ortaya çıkmasından kaçınmak için kazı, küçük parçalar halinde yapılır. Kazı genellikle üç aşamada gerçekleştirilir. Birinci aşama kazıya Kalot denir. Tünel kesitinin üst yarısının, yarım daire şeklinde alınması ile gerçekleştirilir. İkinci aşama Stros kazısıdır, Kalot kazısının 25–30 m ilerlemesi ardından kazılmaya başlanır. Bu aşamadan sonra üçüncü kademe kazı veya taban (radye) kazısı, ilk iki kademeyi takiben son olarak yapılır. Kazı aşamalarının sayısı, tünel boyutları, kayaç formasyonunun cinsi, deformasyon limitleri, sarsıntı (patlatma) limitleri, makine tipine vb. bağlı olarak değişebilmektedir [17].

Üç kademeli kazı genel olarak seçilen kazı yöntemidir. Ancak tünel boyutlarına ve kayaç özelliklerine göre kazı aşamalarının sayısı değiştirilebilir. Kazı metodu ve dikkat edilecek hususlar ÖNORM B 2203/1994'e göre kazı kesit alanına ve kayaç özelliklerine göre delme patlatma, hidrolik kırıcılar veya kollu galeri açma makineleri ile yapılabilir [14, 16]. Ankraj delikleri, süren delikleri gibi işlemler için özel makineler gereklidir. Şekil 2.8'de baskılı zeminde 3 aşamalı tünel kazısı görülmektedir. Şekil 2.9'da özel ankraj ve süren delgi makineleri görülmektedir.



Şekil 2.8 : NATM 3 aşamalı kazı [12]



Şekil 2.9 : Ancona-Bari trenyolu Vasto tüneli [12].

3. TÜNELLERDE KAPLAMA HESABI

Yapı mühendisliğinin amaçlarından biri, dış etkiler altındaki bir yapının gerçeğe en yakın davranışını bulmaktır. Mühendis çeşitli kabuller yaparak bu amaca ulaşmalıdır. Dış etkilerin neler oldukları, bunların şiddetlerinin neler olabileceği düşünülürken, dikkat edilmesi gereken en önemli unsur, bunların neden kaynaklandığıdır. Yapı modellenirken bunların gerçeğe en yakın matematik modelinin nasıl oluşturulacağı ve bu etkiler altında çalışan yapının, en elverişsiz kesit zorlarını oluşturacak muhtemel yük kombinasyonlarının neler olabileceği tartışılır. Matematik modelde hesabı basitleştirici formüller üzerinde durulur.

NATM yönteminde içinden tünelin açıldığı zeminin iki misyonu olması açısından matematik modelini oluşturmak zordur. Bunun sebebi zeminin, hem taşıyıcı tahkimata gelen itkilere yük olarak katkısı vardır, hem de tünel tahkimatı ile beraber taşıyıcı sistemi oluşturarak deformasyonlara karşı direnç gösterir. Bu sebeplerden dolayı, tünelin açılması sırasında ve açılmasından sonra meydana gelen etkileri tamamen kapsayan bir hesap modelinin hazırlanması zordur. Kazının ve iksanın karşılıklı etkileşmesinden doğan ikincil gerilme durumunu tespit edebilmek için, birincil gerilme durumunun belirlenmesi büyük önem taşır. Heterojen ve süreksiz yapıları sebebi ile çoğu kayaçta gerilme durumlarını belirlemek oldukça zordur. Fakat büyük yatırım maliyetleri olan projelerde, kesitlerin önceden belirlenmesi ve statik tahkiklerinin yapılması ekonomi ve güvenlik sebeplerinden dolayı çok önemlidir. Bunun yanında, ihale aşamasında tünel kesitlerinin ve maliyetlerinin önceden belirlenmesi gerekmektedir. Bu da hesaba dayalı bir ön boyutlandırmayı gerekli kılar. Tünelin kazılmasından sonra oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonlar ile tünel kaplamalarına gelecek yüklerin belirlenmesi için 3 yaklaşım kullanılır.

3.1 Kaya sınıflama yöntemleri

Örnek zemin veya kaya üzerinde yapılan ölçümlere ve arazi verilerine dayanarak geliştirilmiştir. Önceki tünel kazılarından, bunların tünel cidarında oluşturdıkları deformasyonların ölçümleri ile kaplama tipi seçimleri incelenerek hesapta kullanılır. Kazı sırasında yapılan ölçümlere göre değişen değerler de göz önünde tutularak tünel dizaynı gerçekleştirilebilir.

Kaya sınıflandırma sistemlerinin yapılmasında kayanın iki mekanik özelliği temel alınır. Bunlardan birincisi örneğin basınç dayanımı σ_c 'dir. İkincisi ise elastisite modülü E_t 'dir. Kaya sınıflandırmalarının amacı kayaların birbirine göre ne kadar sağlam, deformasyon özelliklerinin karşılaştırılmasının sağlanabilmesidir [18]. Çizelge 3.1'de günümüzde kullanılmakta olan başlıca sınıflandırma sistemleri ve geliştiricileri ile birlikte uygulama alanları verilmektedir.

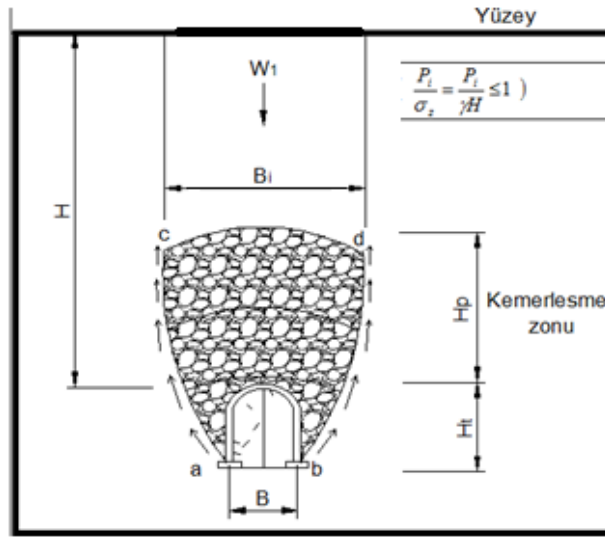
Çizelge 3.1 : Günümüzde kullanılan başlıca sınıflandırma sistemleri [19].

Sınıflama sisteminin adı	Geliştiren(ler)	Geliştirildiği ülke	Uygulama Alanları
Kaya yükü	Terzaghi 1946	A.B.D.	Çelik destekli Tüneller
Desteksiz durma süresi	Lauffer, 1958	Avustralya	Tünelcilik
NATM (Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi)	Rabcewicz, 1963	Avustralya	Tünelcilik
RQD	Deere v.d., 1967	Karot loglama	Karot loglama, tünelcilik
RSR Wickham v.d., 1972 A.B.D Tünelcilik	Wickham v.d., 1972	A.B.D.	Tünelcilik
RMR sistemi	Bieniawski, 1973	G. Afrika	Tüneller, madenler, şevler, temeller
Q sistemi	Barton, v.d. 1974	Norveç	Tüneller, madenler

3.1.1 Terzaghi'nin kaya yükleme sınıflandırması

Maden ve İnşaat Mühendisliği konusu kapsamındaki galeri ve tünellerden gözlemlenen fiziksel özellikler ile laboratuvar ortamında kum ile oluşturulan fiziksel modellere göre, tünel iksasına etki eden basıncın " P_i " büyüklüğü derinlik basıncı olarak tanımlanan $\sigma_z = \gamma \cdot H$ ' den daima küçüktür. Daha açık deyişle $\left(\frac{P_i}{\sigma_z} = \frac{P_i}{\gamma H} \leq 1 \right)$ dır [20].

Kemerlenme diye adlandırılan göçme mekanizması kayma gerilmelerinin (τ) olduğu hacmin cidarlarında oluşur. Kaya mekaniğindeki kemerlenme olgusundan ilk bahseden bilimci, Rus Maden Mühendisi Prof. M.M. Protodiakonov'dur. 1925 yılındaki çalışmasında kemerlenmeyi sağlam fiziksel esaslara oturtarak bir statik model oluşturmuştur. Batı literatüründe ise Prof. K. Terzaghi 1943'dir [20]. Kemerlenme sonucunda tünel tavanında “basınç ferahlaması” oluşurken, yan cidarlarda ise “gerilme yoğunlukları” gözlenir. Gerilme yoğunluğunun büyüklüğü daima derinlik basıncından, σ_z daha büyüktür. Şekil 3.1'de Terzaghi'nin kaya yükü kavramı ve kemerleşme tanımı basit bir şekilde şematize edilmiştir. Şekilde galeri genişliği (B), kemerleşme alanının genişliği (B_i), örtü kalınlığı (H), tünel yüksekliği (H_t), kemerleşme yüksekli (H_p) ile ifade edilmiştir.



Şekil 3.1 : Terzaghi'nin kaya yükü kavramı [21].

Terzaghi sistemi her ne kadar iksa tahkimatlarına uygun olsa da, modern tünelticilik tekniklerinin gelişmesi ile birlikte tercih edilen bir sistem değildir. Terzaghi sisteminde kaya sınıflarına yer verilmiştir. Ancak kaya kalitesi değerlendirmesi için fazla geneldir ve kaya kütlelerinin ölçümü ve sayısal değerlendirmesine bağlı olarak yapılan bir sınıflandırma yöntemi değildir. Terzaghi sistemi sonuç olarak gereğinden fazla tahkimat önerir [18]. Bu sebepten dolayı Terzaghi'den sonra birçok araştırmacı Terzaghi'nin kaya yükü kavramı ile ilgili çalışmalar yapmış ve onun tanımlamasını geliştirmişlerdir. Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırması Çizelge 3.2 de verilmektedir.

Çizelge 3.2 : Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırması [18].

No	Kaya Durumu	Kaya yükü yüksekliği H_t (m)	Notlar
1	Sert ve sağlam	Sıfır	Küçük kavlaşmalar varsa hafif kaplama gerekir
2	Sert tabakalı veya şistoz	0–0.5 B	Hafif tahkimat, Esas olarak kaya düşmelerini engellemek için
3	Masif, orta eklemlili	0–0.25 B	Yük bir noktadan diğerine düzensiz değişebilir
4	Orta derecede bloklu ve damarlı	0.25B–0.35 (B+ H_t)	Yan basınç yok
5	Çok bloklu ve damarlı	0.35–1.1 (B+ H_t)	Az veya hiç yan basınç yok
6	Tamamen kırılmış fakat kimyasal olarak sağlam	1.1 (B+ H_t)	Önemli yanal basınç. Tünelin tabanına doğru olan sızıntıların yarattığı yumuşama yüzünden, ya bağların tabana gelen kısımları takviye edilmesi ya da dairesel bağlar kullanılması gereklidir.
7	Sıkışan, ezilmiş kaya orta derinlik	1.1-2.1 (B+ H_t)	Yüksek yanal basınç, dairesel çelik destekler tavsiye edilir
8	Sıkışan kaya büyük derinlik	2.1-4.5 (B+ H_t)	Yüksek yanal basınç, dairesel çelik destekler tavsiye edilir
9	Şişen kaya	75 m'ye kadar (B+ H_t) değerinden bağımsız	Dairesel çelik destekler gereklidir. Aşırı durumlarda yenilen destekler kullanılır

Deere ve arkadaşları Terzaghi kaya yükü sınıflandırma sistemine RQD değerlerini yerleştirmiş ve 4, 5 ve 6 numaralı kaya durumları için ön görülen Terzaghi kaya yükü değerlerinin, yer altı su seviyesi üstünde %50 azaltılmasını tavsiye etmişlerdir. Deere ve arkadaşları tarafından değiştirilmiş kaya yükü sınıflandırma tablosu Çizelge 3.3'de verilmiştir [22].

Çizelge 3.3 : Deere ve arkadaşları tarafından değiştirilmiş Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırması [22].

No	Kaya Durumu	RQD	Kaya yükü yüksekliği H_t (m)	Notlar
1	Sert ve sağlam	95-100	Sıfır	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır.
2	Sert tabakalı veya şistoz	90-99	0–0.5 B	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır.
3	Masif, orta eklemlili	85-95	0–0.25 B	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır.
4	Orta derecede bloklu ve damarlı	75-85	0.25B–0.35 (B+ H_t)	Kaya durumu 4, 5, 6 için, yer altı su seviyesinin üstünde Terzaghi yüklerini % 50 azaltınız.
5	Çok bloklu ve damarlı	30-75	0.2–0.6 (B+ H_t)	
6	Tamamen kırılmış	3-30	0.6-1.1 (B+ H_t)	
6a	Çakıl ve Kum	0-3	1.1-1.4(B+ H_t)	
7	Sıkışan, ezilmiş kaya orta derinlik	-	1.1-2.1 (B+ H_t)	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır
8	Sıkışan kaya büyük derinlik	-	2.1-4.5 (B+ H_t)	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır
9	Şişen kaya	-	80 m'ye kadar (B+ H_t) değerinden bağımsız	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır

Rose (1982) tarafından geliştirilen Terzaghi kaya yükü sınıflandırması Çizelge 3.4’de verilmiştir. Buna göre 4, 5 ve 6 numaralı kaya durumları için, yük değerleri yeniden verilmiş ve yer altı su seviyesinin üstünde kalan durumlarda yüklerin %50 azaltılması tavsiye edilmiştir.

Çizelge 3.4 : Değiştirilmiş Terzaghi’nin kaya yükü sınıflandırması [23].

No	Kaya Durumu	RQD	Kaya yükü yüksekliği H_t (m)	Notlar
1	Sert ve sağlam	95-100	Sıfır	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır.
2	Sert tabakalı veya şistoz	90-99	0–0.5 B	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır.
3	Masif, orta eklemlili	85-95	0–0.25 B	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır.
4	Orta derecede bloklu ve damarlı	75-85	0.25B–0.20 (B+ H_t)	Kaya durumu 4, 5, 6 için, yer altı su seviyesinin üstünde Terzaghi yüklerini % 50 azaltınız.
5	Çok bloklu ve damarlı	30-75	0.2–0.6 (B+ H_t)	
6	Tamamen kırılmış	3-30	0.6-1.1 (B+ H_t)	
6a	Çakıl ve Kum	0-3	1.1-1.4(B+ H_t)	
7	Sıkışan, ezilmiş kaya orta derinlik	-	1.1-2.1 (B+ H_t)	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır
8	Sıkışan kaya büyük derinlik	-	2.1-4.5 (B+ H_t)	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır
9	Şişen kaya	-	80 m’ye kadar (B+ H_t) değerinden bağımsız	Çizelge 3.1 ile aynı notlar uygulamalıdır

3.1.2 Stini, Rabcewicz ve Lauffer’in sınıflandırmaları

Stini, kaya kütlelerindeki yapısal kusurların önemini vurgulayan bir sınıflandırma geliştirmiştir. Kayaçları, sağlam kayadan, çok gerilmeli kayaçlara kadar 9 sınıfa ayırmıştır [16, 14]. Çizelge 3.5’de Stini’ye göre beklenen arazi basınçları verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Stini'e göre beklenen arazi basınçları [16].

Basınca göre sınıflama	Kayaç cinsi	Çatlak boyu	Açıklamalar
9 Çok baskılı kayaçlar	Şistler, kırılğan marnlar, ezilmiş kayaçlar, aşırı parçalanmış zonlar.	40–60	Ağaç tahkimat, ne kadar sık ve sağlam olursa olsun kırılır.
8 Orta baskılı kayaçlar	Kırılğan, ince tabakalı şistler fillitler yumuşak marnlar, grafitik şistler, ıslak kil taşı	24–40	Çok sık ve sağlam ağaç tahkimat, önemli hasar görür.
7 Hafif baskılı kayaçlar	Kil taşı, az deformasyonlu şistler, mikali kuvars şistler, kısa aralıkla bol killi sert kayaçlar, orta dereceli milionit zonları, killi marn, doğal nemli mil, ıslak taban morenleri	15–25	Çok sık ve sağlam ağaç tahkimat, yüksek basınç gerilmeleri altında bulunur.
6 Çok kırılğan kayaçlar	fillitler, bazı sert marnlar, kalkerli killler, şistler sahil morenleri	10–15	Kazı sırasında büyük gevşemeler, kavlaklaşmalar görülür. Yer yer tavanda göçmeler olur.
5 Kırılğan kayaçlar	Killi marnlar, bazı ince tabakalı, kırılğan kum taşları, tektonik oluşumlu dolomitler	4–10	Kazı sırasında oldukça sağlam fakat daha sonra büyük çatlama, kırılma ve kavlaklaşma olur.
4 Orta kırılğan kayaçlar	Çok parçalı dolomitler (fay zonlarındaki)	2–4	Hafif başlayan aylar geçtikçe artan kırılma ve hasarlar görülür.
3 Az kırılğan kayaçlar	Aşırı deforme, iyice parçalanmış kuvars fillitler, koloritli şistler, mikali ince kalker tabakalı kalkerli mikali şistler	1–2	Tahkimata etkisi a kazı sırasında kopmalar az ve hareketler aylar sonra beklenebilir.
2 Yeterince sağlam kayaçlar	Mikali şistler, ince klivajlı gnayslar	0.5–1	İhmal edilebilecek kavlaklaşma, ancak pek uzun süre sonra tahkimatsız yerlerde önemli hasarlar görülür.
1 Sağlam kaya		0–0.5	Yalnızca kazı dolayısı ile kavlaklaşma.

Kayaları kimyasal olarak ayrışma durumları uyarınca inceleyen Rabcewicz, kayanın tahkimatsız kendini tutma süresini sınıflandırarak, geçici ve kalıcı, gerekli sağlamlaştırma türünü belirlemiştir [24]. Çizelge 3.6'da Rabcewicz'e göre kaya sınıflaması verilmiştir.

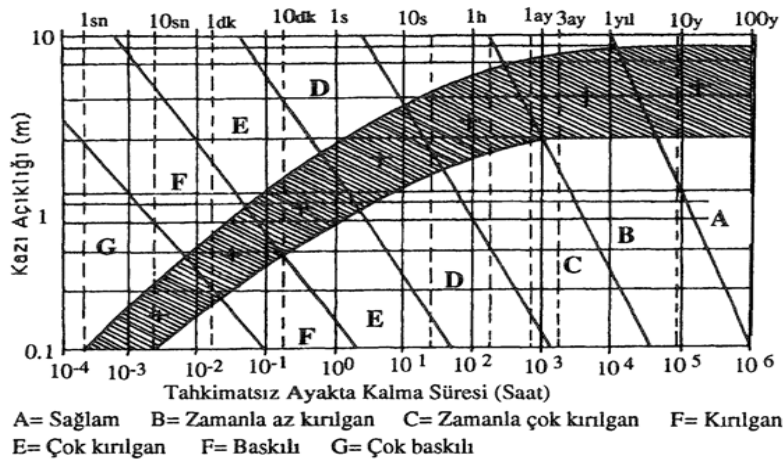
Çizelge 3.6 : Rabcewicz’e göre kaya sınıflaması [24].

Kaya türü		Kendini tutma süresi (gün)	Sağlamlaştırma türü		
			Geçici tahkimat		Kalıcı tahkimat
Sağlam masif kaya	Kimyasal bakımdan bozulmamış	Tutar	Hiçbir sağlamlaştırma önlemine gerek yok		
Tabakalı klivajlı sağlam kaya		0–24	Çelik ankraj		Püskürtme beton veya ankraj, beton kaplama
Çok çatlaklı, kırıklı kaya		24–1			
Tümüyle parçalanmış kaya		0	Püskürtme beton, ankraj, çelik, hasır, madenci tahkimatına yardımcı ek püskürtme beton ve ankrajlar	Çelik iksa veya ağaç	Betonarme kaplama
Psödo(yalancı) sağlam kaya	Kimyasal bakımdan bozulmuş	Jeolojik koşullara ve su gelişine bağlı olarak birkaç günden birkaç saate kadar değişir			
Yüzeye yakın az baskılı kaya					
Derindeki çok baskılı kaya					
Kabarma-şişme basınçlı kaya					
Silt kil			Henüz yeterince tecrübe edilmemiş		Çelik, beton kaplama
Kum, çakıl, kohezyonsuz ayrık kayaç	Kimyasal olarak sağlam				

Lauffer, iksasız geçilebilecek kaya genişliği ve tünelin iksasız olarak ayakta kalma zamanının, kaya sınıfları ile ilişkili olduğunu düşünmüş ve buna göre bir sınıflandırma sistemi ortaya koymuştur [24]. Kayaçları çok iyi ile zayıf arasında 7 sınıfa ayırmış ve her sınıfın iksasız kendini tutma süresini vermiştir. Lauffer iksasız açıklık ve kendini tutma süresi gibi iki önemli kavram üzerinde durmuştur [25]. Çizelge 3.7’de Lauffer’e göre kaya sınıflaması verilmiştir. Şekil 3.2’de Lauffer’e göre aktif iksasız ayakta kalma süresi grafiği görülmektedir.

Çizelge 3.7 : Lauffer'in kaya sınıflaması [16]

Kaya kalitesi	Kaya sınıflandırması	Kendini tutma süresi	Püskürtme betonu	Kaya ankraşı	Açıklamalar
	Eski iksa türü Lauffer'e göre	Atım mesafesi			
A	Sağlam	İstenildiği kadar uzun	Gerekli değil	Gerekli değil	-
B	Zamanla kırılğan	6 ay	Kalot kısmında 2 ila 3 cm kalınlığında	Gerektiği takdirde	
	Kavlaqlanmaları tutan önlemler	4.0 m			
C	Hafif kırılğan zamanla çok kırılğan	1 hafta	Kalotta 3-5 cm kalınlığında PB çelik hasır gerekli	1 1,5 m aralıklarla	Ankraj etkisi çok az
	Ön süren veya sürme kama	3.0 m			
D	Kırılğan	5 saat	Kalotta 5-7 cm kalınlıkta PB. Çelik hasır zorunlu	Kalotta 0.7-1 m aralıklarla	Ankraj etkisi çok az
	Hafif tahkimat	1.5 m			
E	Çok kırılğan	20 dk.	7-15 cm PM tavanda ve gerektiğinde yanlarda hasır çelik	Ankraj başlarının tutması halinde kalıcı sağlamlaştırma önlemi olarak ankrajlar tavanı alttan desteklemeli	Tavanda taşıyıcı bir kubbe oluşturan çelik direkler kaplamanın içinde bırakılır.
	Ağır tahkimat	0.8 m			
F	Baskılı	2 dakika	15-20 cm veya daha kalın püskürtme beton, çelik bağ ve hasırlar. Arada gerektiğinde püskürtme beton	Mümkün değil	Kalıplar dâhil olmak üzere tüm bağlar ve iksa beton içinde bırakılır
	Ayna tahkimatı yapılmaksızın ön-süren veya sürme kama	0.4m			
G	Çok baskılı	10 saniye	Mümkün değil	Mümkün değil	Bir önceki gibi madenci tahkimatı yerine kalkan kullanılması uygun olur
	Domuz damlı ayna tahkimatı	0.15 m			



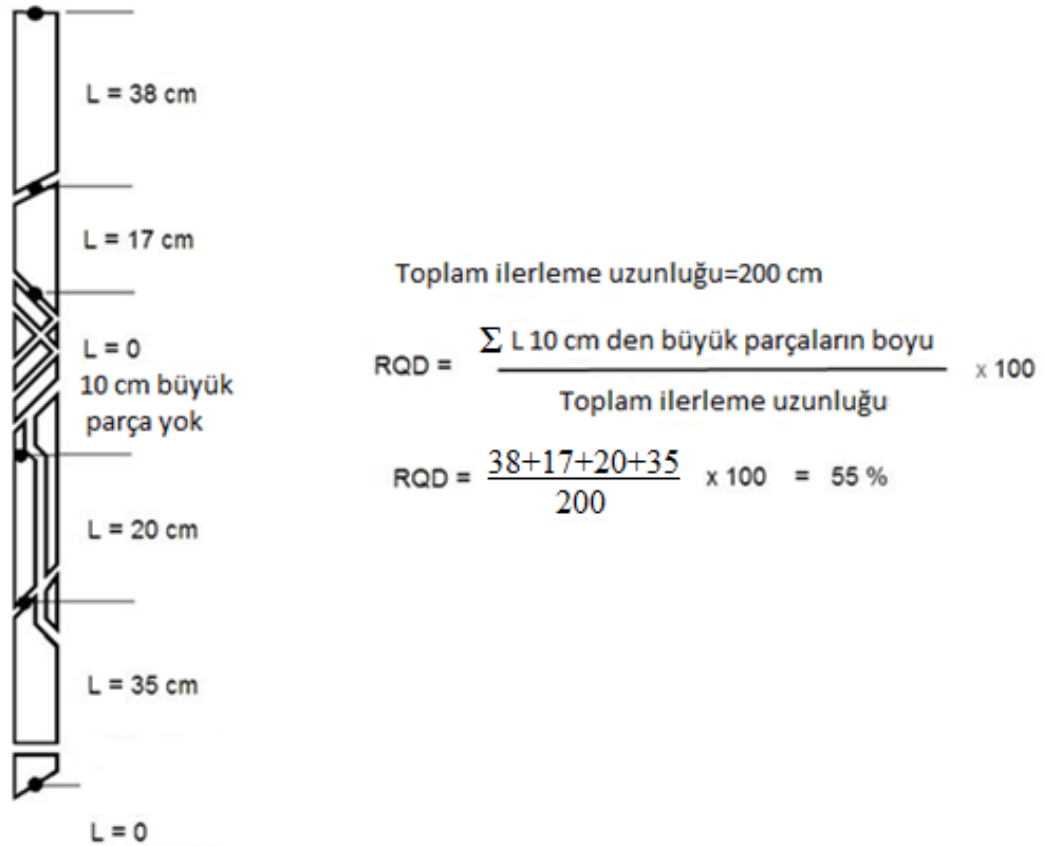
Şekil 3.2 : Lauffer'e göre aktif iksasız ayakta kalma süresi [14].

3.1.3 RQD sınıflandırması

RQD , bir ilerleme aralığında doğal süreksizliklerle ayrılmış, boyu 10 cm. ve daha büyük olan ve silindirik şeklini koruyan karot parçalarının toplam karot uzunluğuna oranının yüzde olarak ifade edildiği indekstir [26]. Deere (1964) tarafından önerilen RQD, aşağıdaki 3.1 eşitliğinde verilen ifade ile belirlenmektedir [27].

$$RQD = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{L} \quad (3.1)$$

Burada n, ilerleme aralığındaki karot parçalarının sayısı; l RQD 'ye dâhil edilen ve boyu 10 cm. ve daha büyük olan karot parçalarının boyları, L ise karot uzunluğudur. Şekil 3.3'de örnek bir uygulama ile RQD prosedürü bir örnek üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Örnekli RQD prosedürü [27].

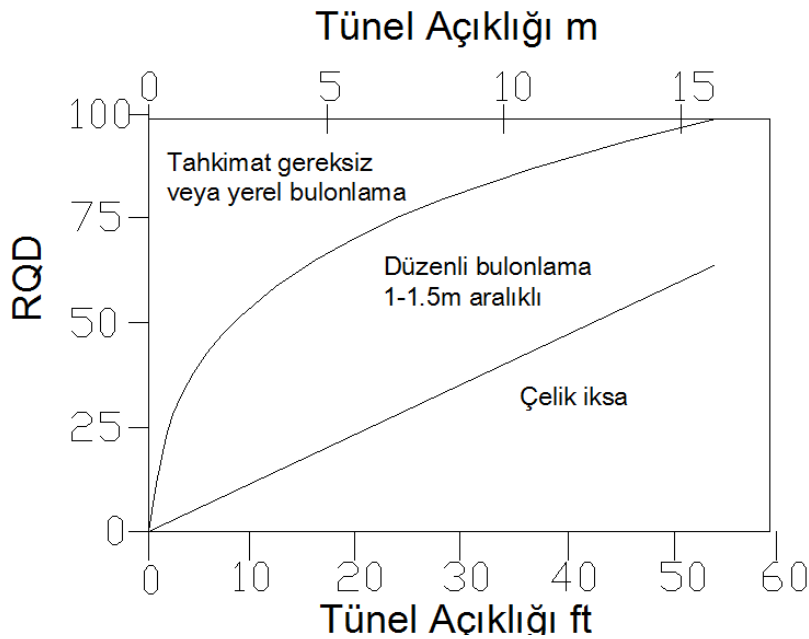
Uygulanması ve belirlenmesi kolay olan RQD, eklem yönelimi, sıkılık, eklem pürüzlüğü ve dolgusu gibi özelliklerin tanımlanması için yeterli değildir. RQD kaya kalite göstergesi Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8 : RQD kaya kalitesi tablosu [28]

RQD		Kaya Kalite Göstergesi
0-25	A.	Çok Zayıf
25-50	B	Zayıf
50-75	C	Orta
75-90	D	İyi
90-100	E	E.Çok İyi

Bugün kullanılan pek çok farklı sınıflandırmanın ana kaynağı, RQD (Rock Quality Designation) kavramıdır. Kaya kütlesinin çatlak durumunu yansıtan bu değer, günümüz tüneller için kullanılan sınıflandırmaların (Q, RMR, RMI, GSI sistemleri vb.) temel parametresidir [27; 26]. Kaya sınıflandırmasından beklenen sonuçlar genellikle farklı jeolojik koşullar etkisi altındaki kaya kütlesinin sayısal olarak tanımlanabilmesi ve böylelikle “çok sağlam” nitelikli ortamdan “çok zayıf” nitelikli kaya kütlesine kadar bir yorumun niceliğe dayalı ifade edilebilmesi ve tünel kazısı ve destek yöntemlerinin sınıflandırma sonuçları kullanılarak ampirik olarak yapılabilmesidir.

Merrit (1972) yaptığı çalışmalarda RQD indeksinin sağlam kayaçlar içinde açılan tünellerdeki tahkimat ihtiyaçlarının belirlenmesinde oldukça kullanışlı olduğu, ancak, ince kil dolgusu içeren eklemlere sahip kayaçlarda ve sulu ortamlarda bu indeksin kullanılmasının bazı sakıncalarının olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 3.4’de Merrit tarafından önerilen RQD-Sağlamlaştırma ilişkisi verilmektedir.



Şekil 3.4 : RQD destekleme ilişkisi [14]

3.1.4 Kaya yapısı oranı (RSR)

Wickham ve arkadaşları 1972 yılında kaya kalitesini tanımlayan bir sayısal yöntem tarif ettiler. Kaya yapısının derecelendirilmesi ile uygun destek seçimini yapan bu yöntem (Rock Structure Rating) RSR sınıflandırma sistemidir. RSR, Terzaghi'nin kaya kütlesi sınıflama sisteminden sonraki ilk ayrıntılı kaya kütlesi sınıflama sistemidir [3]. RSR kavramı kaya yapısını derecelendirirken, jeolojik parametreler ve yapı parametrelerini göz önüne alır [29]. Jeolojik parametreler ve yapı parametreleri üç ana başlık içinde toplanmış ve buna göre sınıflandırma yapılmıştır.

Parametre A; Kaya yapısının genel tanımı

1. Kayanın kökeni (magmatik, metamorfik, tortul)
2. Kayanın sertliği (sert, orta, yumuşak, ayrılmış)
3. Jeolojik yapı (masif, az faylı ya da kıvrımlı, orta derecede faylı ya da kıvrımlı, çok faylı ya da kıvrımlı)

Parametre B; Tünel kazısı yönünde süreksizliğin etkisi.

1. Eklem aralığı
2. Eklem yönü
3. Tünel açma yönü

Parametre C; Yeraltı suyu akımı etkisi

1. Birleştirilmiş A ve B'ye göre tüm kaya kütlesi niteliği
2. Eklem durumu (iyi, orta, zayıf)
3. Su debisi (bir ayak boyu (yaklaşık 30cm) tünelde, dakikada galon (3,78lt) olarak)

$$RSR=A+B+C \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'de verilen değişkenler aşağıdaki çizelgelerle sınıflandırılmıştır. Çizelge 3.9'dan genel jeoloji alanı aracılığı ile belirlenen RSR-A parametresine ulaşılmaktadır. Çizelge 3.10'dan eklem paterni ve açma yönü kullanılarak, RSR-B parametresine ulaşılmaktadır. Çizelge 3.11'den ise yeraltı suyu, eklem durumu gözetilerek, RSR-C parametresine ulaşılır.

Çizelge 3.9 : RSR-A parametresi, genel jeoloji alanı [3].

	Ana kaya tipi				Jeolojik yapı			
	Sert	Orta	Yumuşak	Ayrışmış	Masif	Az faylı veya kırıklı	Orta derecede faylı veya kırıklı	Çok faylı veya kırıklı
Magmatik	1	2	3	4				
Metamorfik	1	2	3	4				
Tortul	2	3	4	4				
Tip 1					30	22	15	9
Tip 2					27	20	13	8
Tip 3					24	18	12	7
Tip 4					19	15	10	6

Çizelge 3.10 : RSR-B parametresi, eklem paterni ve açma yönü [3]

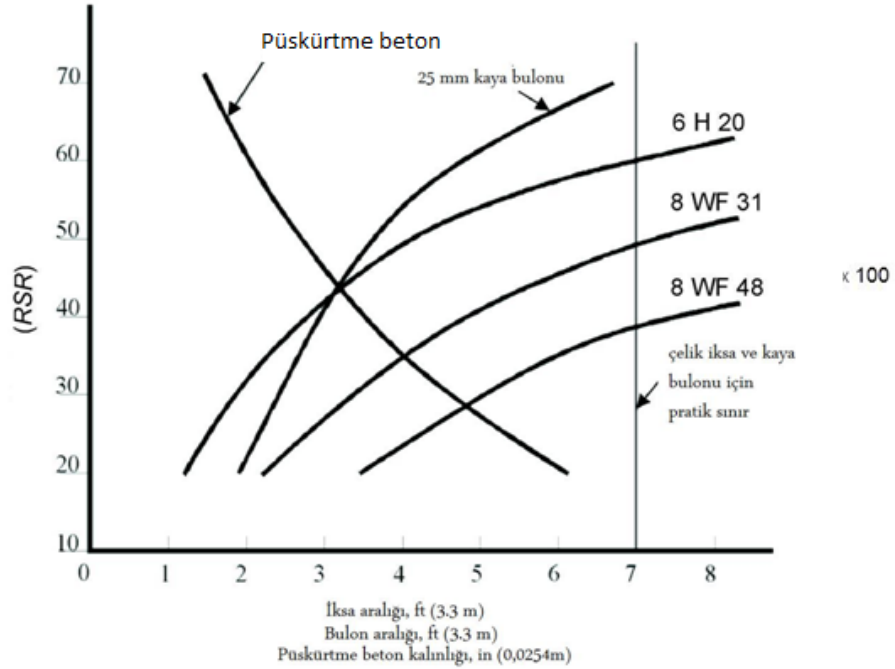
Ortalama eklem aralığı	Eksene dik					Eksene paralel		
	Açma yönü					Açma yönü		
	Her ikisi eğim yönünde			Eğimin tersi yönünde		Her ikisi eğim yönünde		
	Önemli eklemlerin eğimi					Önemli eklemlerin eğimi		
	0-20	20-50	Düşey 50-90	20-50	Düşey 50-90	0-20	20-50	Düşey 50-90
Çok sık eklemli ≤5.08 cm	9	11	13	10	12	9	9	7
Sık eklemli 5.08-15.24cm	13	16	19	15	17	14	14	11
Orta eklemli 15.24-30.48 cm	23	24	28	19	22	23	23	19
Orta bloklu 304-608 cm	30	32	36	25	28	30	28	24
Bloklu masif 608-1216 cm	36	38	40	33	35	36	34	28
Masif≥1216cm	40	43	45	37	37	40	38	34

Çizelge 3.11 : RSR-C parametresi, yer altı suyu, eklem durumu [3]

Dakikada beklenen Su akımı	A ve B parametreleri toplamı (A+B)					
	13-44			45-75		
	Eklem durumu**					
	İyi	Orta	Zayıf	İyi	Orta	Zayıf
Hiç yok	22	18	12	25	22	18
Az (≤0.74 m³)	19	15	9	23	19	14
Orta (0.74 -3.7 m³)	15	11	7	21	16	12
Çok (≥ 3.7 m³)	10	8	6	18	14	10

RSR değeri 100 üzerinden hesaplanan bir değerdir. RSR değeri 19'dan küçük olan kayalarda kuvvetli iksa RSR değeri 80 den büyük kayalarda ise iksa gerekmediği

sonucuna varılmıştır. RSR tahmin modeli ilk olarak çelik iksaya göre geliştirildi. Kaya bulonu ve püskürtme betonu kullanılarak yapılan destekleme için veriler yetersizdi. Şekil 3.5'te 6.5 m çaplı tünel için RSR kavramı aracılığı ile tahkimat belirleme abağı şematize edilmiştir.



Şekil 3.5 : RSR kavramı 6.5 m çaplı tünel için destek tablosu [27].

RSR yöntemi kaya tünellerinde çelik iksa seçimi için çok yararlı bir yöntemdir; fakat kaya bulonu ve püskürtme betonu seçimi için tavsiye edilmez [30].

3.1.5 Jeomekanik RMR sistemi

Bieniawski tarafından 1973-1989 yılları arasında geliştirilen bu yöntem tüneller, temeller, şev yamaçları ve diğer yeraltı inşaatlarında uygun tahkimat önlemlerinin seçiminde yaygınca kullanılmaktadır. Sistem 1989'a kadar yapılan çeşitli araştırmalar ve gözlemler neticesinde bazı değişikliklere uğramıştır [19]. Kayayı mühendislik yönünden sınıflamada birçok yöntem vardır. Ancak Jeomekanik RMR sınıflaması bunların en yararlılarından biridir. 1972'deki ilk halinde kaya davranışında aşağıda belirtilen bazı parametreler gözetilir ve sınıflandırma bu parametrelere verilen puanlara göre yapılır. Bunlar; kayanın tek eksenli basınç mukavemeti, RQD değerleri, yeraltı suyunun miktarı ve konumu, eklem sıklığı, eklem durumları, eklem yönlenimidir.

Jeomekanik sınıflamaya ilişkin 1976 yılında kullanılan sınıflandırma sistemi ile ilgili ayrıntılar Çizelge 3.12’de görülmektedir. Sınıflama parametreleri ve dereceleri Çizelge 3.13’e göre belirlendikten sonra, tünel, yamaçlar ve temellere göre eklemlerin doğrultu ve eğim yönlerine göre Çizelge 3.13 yardımı ile düzeltilir. Geomekanik sınıflamayı uygulamak için, mühendis önce kaya kütlelerini yapısal sınıflara ayırır, her sınıfın yalnız tek tip iksa gerektirecek özellik ve benzer niteliklere sahip olması gerekmektedir. Sahada ölçümlerden herbir yapısal bölge için önemli derecelendirmeler seçilir. Kaya sınıflamaları ve derecelerine Çizelge 3.13 yardımı ile ulaşılır. Uygulama alanında kullanılan jeomekanik sınıflamada dikkat edilecek husus, düşünülen mühendislik projesine bakılmaksızın önce kaya kütlelerinin niteliği hakkında genel bir değerlendirmeye ulaşılmasıdır. Bu da sınıflama parametrelerinin ilk beşini kullanmak suretiyle elde edilir. Daha sonra değerlendirmeler tünel, yamaç veya bir temel durumuyla ilgili olup olmamasına bağlı olarak eklemlerin doğrultu ve eğim yönlerine göre düzeltilir [31].

Çizelge 3.12 : Sınıflandırma parametreleri ve dereceleri [31].

A. Sınıflama parametreleri ve dereceleri									
Parametre			Değer aralıkları						
1	Sağlam kayanın mukavemeti	Nokta Yük indeksi	>10 MPa	4 – 10 MPa	2– 4 MPa	1 - 2 MPa	Tek eksenli basınç deneyini kullan		
		Tek eksenli basınç mukavemeti	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Derecelendirme		15	12	7	4	2	1	0
2	Sondaj karot kalitesi RQD		%90 - 100	%75 - 90	%50-75	%25 - 50	<25%		
	Derecelendirme		20	17	13	8	3		
3	Eklemlerin sıklığı		> 2 m	0.6 - 2 m	200 -600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Derecelendirme		20	15	10	8	5		
4	Eklemlerin durumu		Çok kaba yüzler sürekli değil ayrılma yok eklemeli sert duvar kayası	Az kaba yüzler ayrım < 1 mm eklemli sert duvar kayası	Az kaba yüzler ayrım < 1 mm eklemli yumuşak duvar kayası	Sürtünme izli yüzler veya fay kili < 5 mm veya 1-5 mm açık eklemler sürekli eklemler	Yumuşak fay kili >5 mm kalınlık veya açık eklemler > 5 mm sürekli eklemler		
	Derecelendirme		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu	Tünelin ilk 10 m kısmından gelen su		yok	< 10 litre/dk.	10 – 25 litre/dk	25 – 125 litre/dk	> 125 litre/dk	
		Oran	Eklemdaki Su basıncı	0	< 0.1	0.1 - .2	0.2 - 0.5	>0.5	
			Ana asal gerilme						
	Genel koşullar		Kuru			Nemli	Orta basınç altında su	Önemli su problemleri	
Derecelendirme			15	10	7	4	0		

Çizelge 3.13 : Eklem yönelimlerine göre düzeltme [31].

B. Eklem yönelimlerine göre düzeltme						
Eklemlerin doğrultu ve eğim yönleri		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Derecelendirme	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Yamaçlar	0	-5	-25	-50	-60

Çizelge 3.14 : Kaya sınıflamaları ve dereceleri [31]

C. Kaya sınıflamaları ve dereceleri					
Derecelendirme	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21
Sınıflama no	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya

Sınıflama parametrelerinin önemli derecelendirmeleri oluşturulunca Çizelge 3.12'deki beş parametre toplanır, önce kaya kütlesi için yerindeki değerler saptanır (yani düşünülen yapısal bölge), yüksek değerler en iyi kaya koşullarına işaret etmektedir. Bu basit değerlendirmeden sonra son olarak Çizelge 3.13'e göre eklem yönelimine göre düzeltme yapılır. Çizelge 3.14 son değerlendirmeleri beş kaya sınıfı halinde toplamaktadır. Bu sınıflandırma ardından Çizelge 3.15'e göre kaya yorumlanır [31].

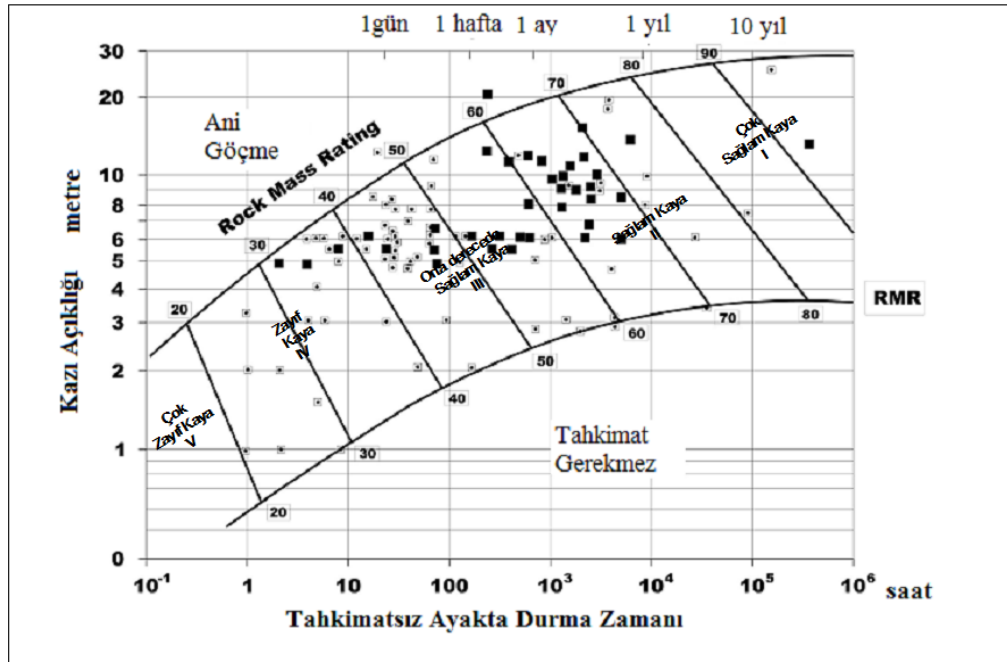
Çizelge 3.15 : Kaya sınıflamaları ve dereceleri [31].

Sınıflama No	I	II	III	IV	V
Ortalama dayanım süresi	15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	2.5 m açıklık için 10saat	1 m açıklıkta 30 dakika
Kaya kütlesinin kohezyonu (kPa)	> 400	300 -400	200-300	100-200	< 100
Kaya kitlesinin sürtünme açısı	> 45	35 - 45	25 - 35	15 – 25	< 15
Cevherin kazılabilirliği	Çok zor	Kolaylıkla büyük parçalar çıkmaz	Orta	Kolaylıkla kazılır iyi parçalanma	Çok iyi

RMR sistemi 1989 yılına kadar Bienawski tarafından geliştirilmiştir. 1989 yılındaki değişikliklerle beraber sistem enson halini almıştır. Günümüzde RMR sisteminin 1989 yılındaki hali kullanılmaktadır. Sistemin 1989 yılında değişen haline ilişkin veriler Çizelge 3.16’da verilmiştir. Şekil 3.6’da RMR sınıflandırma sisteminde tahkimatsız durma süresi grafiği yeralamaktadır.

Çizelge 3.16 : 1989’da değiştirilmiş RMR sınıflamasında derecelendirme [32]

1		Sağlam kayanın mukavemeti	Uç-yük mukavemet indeksi	> 8 Mpa	4-8 Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Tek eksenli basınç dayanımı deneyine göre		
			Tek eksenli basınç dayanımı	> 200 Mpa	100-200 Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	10-25 Mpa	3-10 Mpa	1-3 Mpa
		Derecelendirme			15	12	7	4	2	1
2		RQD		%90-100	%75-90	%50-75	%25-50	<%25		
		Derecelendirme		20	17	13	8	3		
3		Eklem sıklığı		>3m	1-3m	0.3-1m	50-300m	50-300m		
		Derecelendirme		30	25	20	10	5		
4		Eklem durumu		Çok kaba yüzey, sürekli değil ayrılma yok eklemler sert kaya	Az kaba yüzeyler <1mm açıklıklı Eklemler sert kaya	Az kaba yüzeyler <1 mm açıklıklı Eklemler yumuşak kaya	Sürtünme izli yüzey veya fay kili<5mm veya 1-5mm açık eklemler sürekli eklemler	Yumuşak fay kili>5mm kalın veya açık eklemler >5mm sürekli eklemler		
		Derecelendirme		25	20	12	6	0		
5	Yeraltı suyu	Tünelin 10m.'lik kısmından gelen su		Yok	<25 litre/dak.	25-125 litre/dak		>125 litre/dak		
		Oran	Eklemdeki su basıncı	0	0.0-0.2	0.2-0.5	>0.5			
			Ana asal gerilme							
		Genel koşullar		Tamamen kuru		Yalnızca nemli (kırıklardaki su)	Orta basınç altında su	Önemli su problemleri		
		Derecelendirme		10		7	4	0		



Şekil 3.6 : RMR tahkimatsız durma süresi [19].

RMR sisteminden yararlanılarak kaya yükü yüksekliği denklem 3.3 den faydalanılarak hesaplanır [3, 18, 19]. Bu ifadede yer alan, γ (kN/m^3) kayanın birim hacim ağırlığını, B (m) tünel genişliğini, S gerilme faktörünü (yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranı), P ise destek basıncını (kN/m^3) ifade etmektedir.

$$P = \frac{100 - \text{RMR}}{100} \text{BS} \quad (3.3)$$

RMR sınıflandırma sistemine bağlı olarak, 10 m açıklıklı at nalı tipi yeraltı kaya tünellerinde, kazı şekli ve sağlamlaştırma esaslarının belirlenmesine ilişkin tablo Çizelge 3.17’de verilmektedir.

Çizelge 3.17 : RMR' ye bağlı olarak tünellerde tahkimat ve kazı [19]

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

3.1.6 Q sınıflandırma sistemi

Q veya NGI (Norveç Geoteknik Enstitüsü) sistemi olarak adlandırılan sistem, 1970'lerde Barton ve arkadaşları tarafından tünel tahkimatı için geliştirilmiştir. Kaya tünellilik kalitesi olarakta adlandırılan yaygın adıyla Q sistemi, Kayanın 6 farklı

parametresi aracılığı ile hesaplanmaktadır. Hesaplama eşitlik (3.4) bağıntısı ile tanımlanmışlardır [33].

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (3.4)$$

Bu denklemde;

RQD : Kaya kalitesi,

J_n: Eklem takım sayısı

J_r: Eklem pürüzlülük sayısı

J_a: Eklem alterasyon sayısı

J_w: Eklem suyu indirgeme sayısı

SRF: Gerilme indirgeme faktörüdür

Bu parametreler çiftli olarak literatürde şöyle ifade edilirler:

$\frac{RQD}{J_n}$: Kaya kütlelerinin yapısı ve nispi blok boyutu,

$\frac{J_r}{J_a}$: Süreksizlik yüzeyleri arası makaslama direnci,

$\frac{J_w}{SRF}$: Aktif gerilme koşulları olarak ifade edilir.

Hesaplanan Q değeri yardımı ile, kaya sınıflandırmasına ek olarak yer altı mühendislik yapılarında kullanılacak destekleme tipleri konusunda öneriler yapılabilmektedir. Bu sistem önceden yapılmış olan 1000 den fazla tünele ait veriler ışığında değerlendirilerek geliştirilmiştir. Olası Q değerlerinin aralığı (0.001-1000) çok sıkışabilir ortamdan, eklemsiz sağlam kayaya kadar olan kaya niteliği tanımlarını kapsar.

Karot alınamadığı zaman, RQD birim hacimdeki eklem sayısı aracılığıyla belirlenebilir. Bunun için her eklem takımının 1m³'teki sayısı belirlenir. Kil içermeyen kayalarda bu sayı RQD' ye denklem 3.5 yardımı ile şöyle çevrilir:

$$RQD = 115 - 3,3J_v \frac{J_w}{SRF} \quad (3.5)$$

J_v : m³ 'teki toplam eklem sayısı

Eklem takımlarının sayısını belirleyen J_n parametresi genellikle yapraklanma, şiştözite ve tabakalanma tarafından etkilenir. Bunların belirgin şekilde ve birbirine paralel olarak gelişenleri bir eklem takımı olarak kabul edilmelidir. Fakat, karotlarda bu özelliklerden dolayı yer yer çatlaklar veya az sayıda eklem varsa, bunlar gelişigüzel eklem olarak değerlendirilmelidir. Q sınıflandırma sisteminde eklem takım sayısı (J_n) değeri sınıflandırması Çizelge 3.18’de verilmiştir. Q sınıflandırma sisteminde Eklem Pürüzlülük Sayısı (J_r) değeri sınıflandırması Çizelge 3.19’da verilmiştir.

Çizelge 3.18 : Eklem takım sayısı (J_n) [29].

	Tanım	Değerlendirme	Not
A	Masif, eklem çok az veya hiç yok	0.5-1	i-Kesişme olan tüneller için $3 \times J_n$ değeri kullanılır. ii-Giriş ve çıkış portallarında ($2 \times J_n$) kullanılmalıdır.
B	Bir eklem takımı	2	
C	Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklem	3	
D	İki eklem takımı	4	
E	İki eklem takımı ve gelişigüzel eklem	6	
F	Üç eklem takımı	9	
G	Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklem	12	
H	Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişigüzel çok sayıda eklem, küp şeker görünümünde	15	
J	Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20	

Çizelge 3.19 : Eklem pürüzlülük sayısı (J_r) [29].

	Tanım	Değerlendirme	Not
a) Kaya duvar dokunağı b) 10 cm.'lik kesmeden önce kaya duvar dokunağı			*İlgili eklem takımlarının ortalama ara mesafesi 3 metreden büyükse 1.0 ilave edilir. *Lineasyon içeren düzlemsel fay aynalı eklem için, lineasyonların uygun olması koşulu ile $J_r=0.5$ alınabilir. *B den G ye kadar olanlar küçük, diğerleri büyük yapılardır
A	Süresiz eklem	4	
B	Pürüzlü ya da düzensiz dalgalı	3	
C	Düz, dalgalı	2	
D	Kaygan dalgalı	1.5	
E	Pürüzlü veya düzensiz düzlemsel	1.5	
F	Düz, düzlemsel	1	
G	Kaygan düzlemsel	0.5	
c) Kesmeden sonra kaya duvar dokunağı yok			
H	Kaya duvar kontağını önleyebilecek kalınlıktaki kil mineralleri içeren zon	1	
J	Kaya duvar kontağını önleyebilecek kalınlıktaki kumlu, çakıllı, ezilmiş zon	1	

Q sınıflandırma sisteminde Eklem alterasyon sayısı (J_a) değeri sınıflandırması Çizelge 3.20’de verilmiştir.

Çizelge 3.20 : Eklem alterasyon sayısı (Ja) [29]

	Tanım	Değerlendirme		Not
		Değer	□φr	
	Kaya duvar kontağı			
A	Sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamaz, geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars veya epidot)	0.75	-	*φr değerleri, eğer varsa Aliterasyon ürünlerinin mineralojik özelliklerini yaklaşık olarak göstermek için verilmiştir.
B	Altere olmamış eklem yüzeyleri, sadece yüzeysel paslanma	1	25°-35°	
C	Hafif altere olmuş eklem yüzeyleri, yumuşamayan mineral kaplamaları	2	25°-35°	
D	Siltli veya kumlu kil kaplamaları, düşük kil oranı (yumuşamayan)	3	20°-25°	
E	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil mineral kaplamalı (kaolinit, mika gibi). Ayrıca klorit, talk, jips, grafit ve az miktarda şişen killeri (1-2 mm veya daha az kalınlıkta kesikli kaplamalar)	4	8°-16°	
F	Kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları	4	25°-30°	
G	Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil mineral dolguları (kesiksiz, kalınlık 5 mm.'den az)	6	16°-24°	
H	Orta ve yüksek derecede konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineral dolgu (kesiksiz, kalınlık 5 mm.'den az)	8	12°-16°	
J	Şişen kil dolgulu (örn. montmorillonit) (kesiksiz, kalınlık 5 mm'den az). Ja'nın değeri şişen kil boyutundaki tanelerin yüzdesine ve su etkisinde kalıp kalmayacağına göre değişir	8-12	6°-12°	
	Kaya duvar kontağı yok			
K	Dağılmış veya ezilmiş kaya ve kil zonları veya bantları	6, 8 veya 8-12	6°-24°	
L	Siltli veya kumlu kil zonları veya bantları, küçük kil parçaları (yumuşamayan)	5	-	
M	Sürekli, kalın kil zonları veya bantları (kilin tanımı için G,H, J şıklarına bakınız)	10, 13veya 13-20	6°-24°	

Q sınıflandırma sisteminde eklem suyu indirgeme faktörü (Jw) değeri sınıflandırması Çizelge 3.21'de verilmiştir.

Çizelge 3.21 : Eklem suyu indirgeme faktörü (Jw) [29]

	Tanım	Değerlendirme		Not
		Değer	Su basıncı (kg/cm ²)	
A	Kuru kazılar veya su gelişi 5 lt/dk dan az	1	<1.0	*C den F ye kadar olan parametreler kaba tahminlerdir. Drenaj yapıldığında Jw arttırılmalıdır. *Buz içeren tabakalar olduğunda farklı problemlerle karşılaşılabilir ve burada göz
B	Orta derece su gelişi veya basıncı, genellikle eklem dolgularının yıkanması (5 lt/dk yerel)	0.66	1-2.5	
C	Dolgunsuz, dayanımlı ve eklemlili kayada çok su gelişi veya yüksek su basıncı	0.5	2.5-10.0	
D	Çok miktarda su gelişi veya yüksek su basıncı ile eklem dolgularının fazlaca yıkanması	0.33	2.5-10.0	
E	Patlatma ile çok fazla su gelişi, zamanla azalma	0.2-0.1	>10.0	
F	Zamanla azalmayan çok fazla su gelişi veya basıncı	0.1-0.05	>10.0	

Q sınıflandırma sisteminde eklem indirgeme faktörü (SRF) değeri sınıflandırması Çizelge 3.22'de verilmiştir.

Çizelge 3.22 : Gerilme azaltma faktörü (SRF) [29].

	Tanım			Değerlendirim	Not		
a) Kazıyı kesen ve tünel kazılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek zayıflık zonları							
A	Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya kapsayan birden fazla zayıflık zonu, çevre kaya çok gevşek (herhangi bir derinlikte)			10.0	*Kazıyı etkileyen fakat kesmeyen zayıflık zonu varsa SRF değerlerini % 25-50 azaltınız. *Kazı derinliğinin kazı genişliğinden az olduğu durumlarda SRF'yi 2.5 ten 5 e çıkartınız.		
B	Kil ve kimyasal olarak ayrılmış kaya kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazı derinliği ≤50 m)			5.0			
C	Kil ve kimyasal olarak ayrılmış kaya kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazı derinliği >50 m)			2.5			
D	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre kaya çok gevşek (herhangi bir derinlikte)			7.5			
E	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre (kazı derinliği ≤50m)			5.0			
F	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre (kazı derinliği >50m)			2.5			
G	Gevşek, açık eklemler, çok fazla eklemlili veya küp şeker görünümlü (herhangi bir derinlikte)			5.0			
b) Sağlam kaya, kaya gerilme problemleri			σc/σ1	σt/σ1			
H	Yüzeye yakın düşük gerilme			>200		>13	2.5
J	Orta gerilme			200-10		13-0.66	1.0
K	Yüksek gerilme (çok sıkı yapı)			10-5	0.66-0.33	0.5-2.0	
L	Orta şid. (masif) kaya patlaması			5-2.5	0.33-0.16	5-10	
M	Yüksek şid. (masif) kaya patlaması			<2.5	<0.16	10-20	
c) Sıkışan kaya,yüksek basınç altında sağlam olmaya kayanın plastik akışı							
N	Orta miktarda sıkışan kaya basıncı			5-10			
O	Yüksek miktarda sıkışan kaya basıncı			10-20			
d) Şişen kaya; Suyun varlığına bağlı kimyasal şişme							
P	Orta miktarda şişen kaya basıncı			5-10			
R	Yüksek miktarda şişen kaya basıncı			10-15			

Yer altı açıklıklarının duyarlılığı ve destek gereksinimleri için, Q sınıflandırma sisteminde De adı verilen eşdeğer boyut parametresi kullanılmaktadır. Bu parametre denklem (3.6) yardımı ile hesaplanır. Denklemdaki ESR değeri yer altı açıklığının duraylı kalabilmesi için gerekli olan bir güvenlik katsayısıdır [19]. Barton ve

arkadaşları tarafından 1974 yılında geliştirilen değer ile 1994 de güncellenmiş ESR değerleri Çizelge 3.23’de verilmiştir.

$$De = \frac{\text{Tünel Çapı (m)}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}} \quad (3.6)$$

Çizelge 3.23 : ESR değerleri [19]

	Kazı Türü	ESR 1974	ESR 1994
A	Geçici maden kazıları	3.0-5.0	3.0-5.0
B	Uzun süreli kazılar, su tünelleri, pilot tüneller, geniş yer altı kazıları	1.6	2.5-2.0
C	Geniş yer altı depolama alanları, su arıtma tesisleri, küçük karayolu-demiryolu tünelleri yaklaşım tünelleri vb.	1.3	1.2-1.3
D	Santral binaları, ana kara ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, giriş çıkış ağızları, kesişme bölgeleri	1.0	0.9-1.1
E	Yeraltı nükleer santralleri, metro istasyonları, fabrikalar ve sosyal tesisler	0.8	0.5-0.8

Destek kategorilerinde bulon uzunlukları verilmemiştir. Bulon uzunlukları aşağıda belirtilen yöntemler ile belirlenebilir. 20 mm çaplı bir civata için 10 tonluk aktif bir yük kabul edilirse, destek basıncı aşağıdaki gibidir:

$$P = 1/a^2 \quad (3.7)$$

P = Destek basınç kapasitesi (kg/cm²),

a = Bulon açıklığı (m)

Bulon ve ankraj uzunlukları kazı boyutlarına bağlıdır. Tavanda kullanılan bulonların uzunluğu genellikle kazı enine, duvarlarda kullanılanları ise kazı boyuna bağlıdır. Bulon uzunluğu/kazı eni oranı, kazı eni arttıkça azalma eğilimi gösterir. Buna göre aşağıdaki eşitlikler, inşaat sırasında duruma göre değiştirilebilme kaydıyla önerilir [14].

Tavan :

$$\text{Bulon } L = 2 + 0.15B/ESR \quad (3.8)$$

$$\text{Ankraj } L = 0.40B/ESR \quad (3.9)$$

Duvarlar :

$$\text{Bulon } L = 2 + 0.15H/\text{ESR} \quad (3.10)$$

$$\text{Ankraj } L = 0.35H/\text{ESR} \quad (3.11)$$

Bu ifadede L uzunluk (m), B kazı eni (m), H kazı boyu (m), ESR kazı destek oranıdır.

En büyük desteksiz kazı genişliğini (B_{max}-desteksiz) bulmak için denklem (3.12)'den faydalanılır.

$$B_{\max} = 2(\text{ESR})Q^{0.4} \quad (3.12)$$

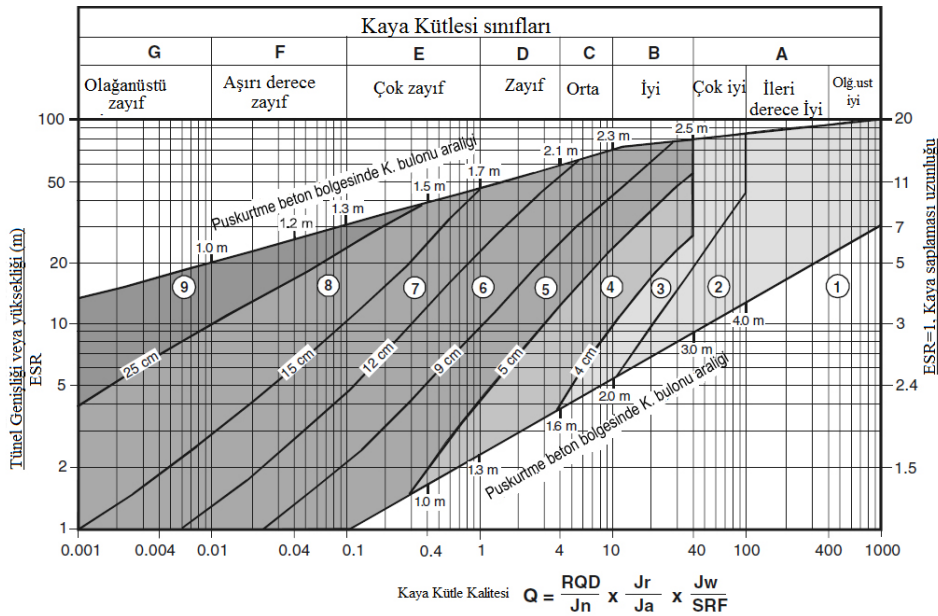
Q değeri ile kalıcı destek basıncı, P_{tavan} denklem (3.13) kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_{\text{tavan}} = (2/J_r)Q^{-1/3} \quad (3.13)$$

Eklem eklem takım sayısı 3 ten fazla ise denklem (3.14) kullanılarak hesaplanır.

$$P_{\text{tavan}} = (2/3)J_n^{1/2} \cdot J_r^{-1} \cdot Q^{-1/3} \quad (3.14)$$

Şekil 3.7'de eş boyut ve Q değerlerine bağlı destek kategorileri abağı görülmektedir.



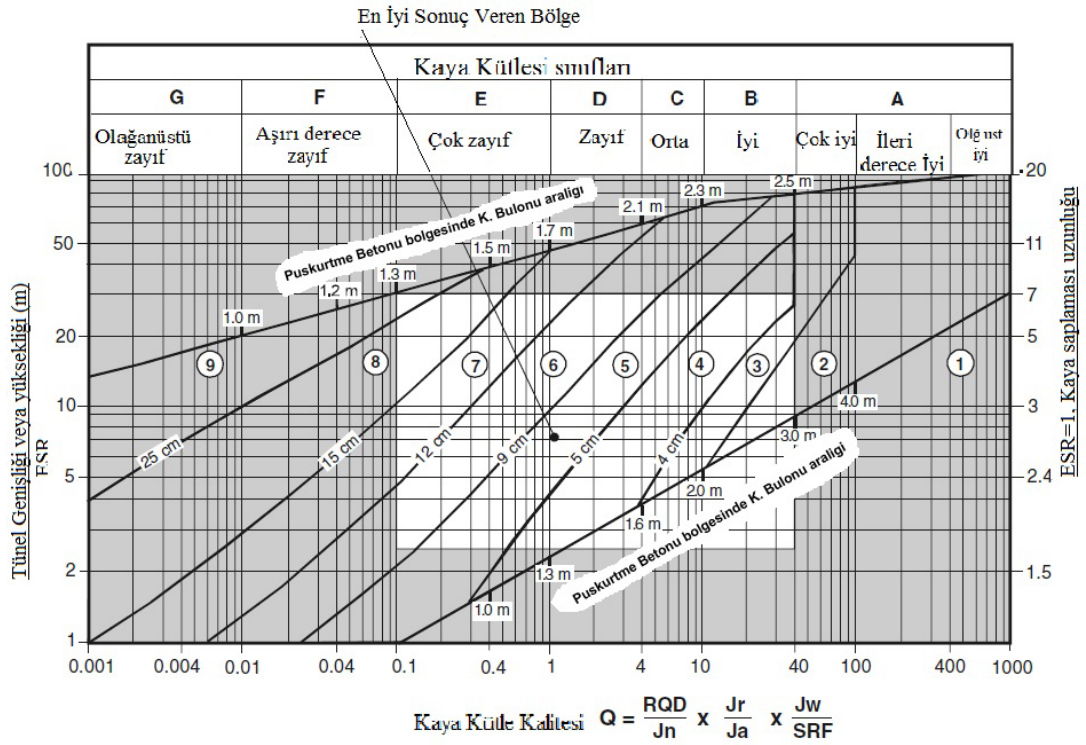
Şekil 3.7 : Eş boyut ve Q değerlerine bağlı destek kategorileri [34]

Şekil 3.7'de tahkimat bölgeleri 1 den 9'a kadar numaralandırılmışlardır. Bu numaralara karşılık gelen tahkimat şunlardır [34].

- 1- Tahkimat gerekmez
- 2- Dökülmeleri ve kopmaları önlemek için noktasal kaya civatası sb .

- 3- Sistematik kaya civatası.
- 4- Sistematik kaya civatası ve 4-10cm kalınlığında donatısız püskürtme beton.
- 5- Fiber donatılı püskürtme beton 5-9 cm ve kaya civatası Sfr+B
- 6- Fiber donatılı püskürtme beton 12-15 cm ve kaya civatası Sfr+B
- 7- Fiber donatılı püskürtme beton 9-12 cm ve kaya civatası Sfr+B
- 8- Donatılı püskürtme beton >12 cm ve kaya civatası Sfr+B
- 9- Yerinde dökme beton Kaplama

Şekil 3.8’de Palmstrom ve Broch’un (2006) Q sınıflandırma sisteminde en iyi sonuç veren bölgeyi belirledikleri çalışmaları yer almaktadır.



Şekil 3.8 : Q sisteminde en iyi sonuç veren bölge [35].

Q sistemi için destek önlemleri çizlegeleri üç bölüm halinde Çizelge 3.24, Çizelge 3.25 ve Çizelge 3.26’da ayrıntıları ile verilmiştir sınıflandırılmıştır.

Çizelge 3.24 : Q sistemi için destek önlemleri [29].

Dest. No	Q	Şarh Faktörler		Açıklık/ESR (m)	pb	Açıklık/ESR (m)	Destek Tipi	Not
		RQD/Jn	Jr/Jn		(kg/cm ²)			
1	1000-400				<0.01	20-40	sb (utg)	
2	1000-400				<0.01	30-60	sb (utg)	
3	1000-400				<0.01	46-80	sb (utg)	
4	1000-400				<0.01	65-100	sb (utg)	
5	400-100				0.05	12-30	sb (utg)	
6	400-100				0.05	19-45	sb (utg)	
7	400-100				0.05	30-65	sb (utg)	
8	400-100				0.05	48-88	sb (utg)	
9	100-40	≥20			0.25	8.5-19	sb (utg)	
		<20						
10	100-40	≥30			0.25	14-30		
		<30					B (utg) 2-3 m + clm	
11	100-40	≥30			0.25	23-48	B (tg) 2-3 m	
		<30					B (tg) 1.5-2 m + clm	
12	100-40	≥30			0.25	40-72	B (tg) 2-3 m	
		<30					B (tg) 1.5-2 m + clm	
13	40-10	≥10	≥1.5		0.5	5 - 14	sb (utg)	I I I I
		≥10	<1.5				B (utg) 1.5-2m	
		<10	≥1.5				B (utg) 1.5-2m	
		<10	<1.5				B (utg) 1.5-2m + S 2-3 cm	
14	40-10	≥10		≥15	0.5	9 -23	B (tg) 1.5-2 m + clm	I,II I,II I,II
		<10		≥15			B (tg) 1.5-2 m + S (mr) 5-10 cm	
				<15			B (utg) 1.5-2m + clm	
15	40-10	>10			0.5	15-40	B (tg) 1.5-2m + clm	I,II,IV I,II,IV
		≤10					B (tg) 1.5-2 m + S (mr) 5-10 cm	
16	40-10	>15			0.5	30-65	B (tg) 1.5-2m + clm	I,V,VI I,V,VI
		≤15					B (tg) 1.5-2 m + S (mr) 10-15 cm	
17	10 -4	>30		≥6	1.0	3.5 - 9	sb (utg)	I I I I
		≥10, ≤30		<6			B (utg) 1.5-2m	
		<10					B (utg) 1-1.5 m + S 2-3 cm	
		10					S 2-3 cm	

Çizelge 3.25 : Q sistemi için destek önlemleri (devam)

Dest. No	Q	Şartlı Faktörler		Açıklık/ESR (m)	pb	Açıklık/ESR (m)	Destek Tipi	Not
		RQD/Jn	Jr/Jn		(kg/cm2)			
18	10 -4	>5	≥10		1.0	7 -15	B (tg) 1-1.5 m + clm	I, III I
		>5	<10				B (utg) 1-1.5 m + clm	I,III I
		≤5	≥10				B (tg) 1-1.5 m + S 2-3 cm	
		≤5	<10				B (utg) 1-1.5 m + S 2-3 cm	
19	10 -4		≥20		1.0	12- 29	B (tg) 1-2 m + S (mr) 10-15 cm	I,II,IV I,II
			<20				B (tg) 1-1.5 m + S (mr) 5-10 cm	
20	10 -4		≥35		1.0	24-52	B (tg) 1-2 m + S (mr) 20-25 cm	I,V,VI I,II,IV
			<35				B (tg) 1-2 m + S (mr) 10-20 cm	
21	4-1	≥12.5	≤0.75		1.5	2.1-6.5	B (utg) 1 m + S 2-3 cm	I I I
		<12.5	<0.75				S 2.5-5 cm	
			>0.75				B (utg) 1 m	
22	4-1	>10, <30	>1.0		1.5	4.5-11.5	B (utg) 1 m + clm	
		≤10	>1.0				S 2.5-7.5 cm	
		<30	≤1.0				B (tg) 1 m + S (mr) 2.5-5 cm	
		≥30					B (utg) 1 m	
23	4-1			≥15	1.5	8 -24	B (tg) 1-1.5 m + S (mr) 10-15 cm	I,II,IV,VII
				<15			B (utg) 1-1.5 m + S (mr) 5-10 cm	I
24	4-1			≥30	1.5	18-46	B (tg) 1-1.5 m + S (mr) 15-30 cm	
				<30			B (tg) 1-1.5 m + S (mr) 10-15 cm	
25	1-0.4	>10	>0.5		2.25	1.5-4.2	B (utg) 1m + mr veya clm	I I I
		≤10	>0.5				B (utg) 1m + S(mr) 5cm	
			≤0.5				B (tg) 1m + S(Mr) 5cm	
26	1-0.4				2.25	3.2-7.5	B (tg) 1m + S(mr) 5 - 7.5cm	VII,X,XI I, IX
							B (utg) 1m + S 5 - 7.5cm	
27	1-0.4			≥12	2.25	6 -18	B (tg) 1m + S(mr) 7.5-10cm B (utg) 1m + S(mr) 5 -7.5cm CCA 20-40cm + B(tg) 1m S(mr) 10-20cm + B(tg) 1m	I, IX I, IX
				<12				VIII, X, XI VIII, X, XI
				>12				
				<12				

Çizelge 3.26 : Q sistemi için destek önlemleri (devam)

Dest. No	Q	Şarth Faktörler		Açıklık/ESR (m)	pb	Açıklık/ESR (m)	Destek Tipi	Not
		RQD/Jn	Jr/Jn		(kg/cm2)			
28d	1-0.4			≥30	2.25	15-38	B (tg) 1m + S(mr) 30-40cm B (tg) 1m + S(mr) 20-30cm B (tg) 1m + S(mr) 15-20cm	I,IV,V,IX I,II,IV,IX I,II,IX
				≥20,<30			CCA (sr) 30-100cm + B(tg) 1m	IV, VIII, X, XI
				<20				
29	0.4-0.1	>5	>0.25		3.0	1 -3.1	B (utg) 1m + S 2 -3cm	
		≤5	>0.25				B (utg) 1m + S(mr) 5cm	
			≤0.25				B (utg) 1m + S(Mr) 5cm	
30	0.4-0.1	≥5			3.0	2.2 -6	B (tg) 1m + S 2.5-5cm	IX IX
		<5					S(mr) 5-7.5cm	
31	0.4-0.1	>4			3.0	4-14.5	B (tg) 1m + S(mr) 5-12.5cm	IX IX
		≤4, ≥ 1.5					S(mr) 7.5-25cm	IX, XI VIII, X, XI
		<1.5					CCA 20-40cm + B(tg) 1m	
							CCA (sr) 30-50cm + B(tg) 1m	
32d	0.4-0.1			≥20	3.0	11 -34	B (tg) 1m + S(mr) 40-60cm	II, IV, IX, XI III, IV, IX, XI
				<20			B (tg) 1m + S(mr) 20-40cm	
33	0.1-0.01	≥2			6	1 - 3.9	B (tg) 1m + S(mr) 2.5-5.0cm S(mr) 5-10cm	IX IX VIII,X
		<2					S(mr) 7.5-15cm	
34	0.1-0.01	≥2	≥0.25		6	2 -11	B (tg) 1m + S(mr) 5.0-7.5cm	IX IX IX
		<2	≥0.25				S(mr) 7.5-15cm	VIII, X, XI
			<0.25				S(mr) 15-25cm	
							CCA (sr) 20-60cm + B(tg) 1m	
35d	0.1-0.01			≥15	6	6.5-28	B (tg) 1m + S(mr) 30-100cm CCA (sr) 60-200cm + B(tg) 1m B (tg) 1m + S(mr) 20-75cm CCA (sr) 40-150cm + B(tg) 1m	II, IX, XI VIII, X,XI,II IX, XI, III
				≥15				VIII, X, XI, III
				<15				
				<15				
36	0.01-0.001				12	1.0-2.0	S(mr) 10-20cm	IX
							S(mr) 10-20cm + B(tg) 0.5-1m	VIII, X, XI
37	0.01-0.001				12	1 - 6.5	S(mr) 20-60cm	IX
							S(mr) 20-60cm + B(tg) 0.5 -1m	VIII, X, XI
38e	0.01-0.001			≥10	12	4.0-20	CCA (sr) 100-300cm	IX
				≥10			CCA(sr) 100-300cm + B(tg)1m	VIII, X, II, XI IX
				<10			S(mr) 70-200cm	VIII, X, III, XI
				<10			S(mr) 70-200cm	

Çizelgelerde kullanılan kısaltmalar ve notlar aşağıda verilmektedir [29].

sb: nokta bulonlama

B: sistematik bulonlama

utg: gerdirmesiz ankrajlanmış

tg: gerdirmeli ankrajlanmış

S: püskürtme beton

mr: çelik hasır takviyeli

clm: zincir takviyeli

CCA: beton hasır destek

sr: çelik destekli (bulon aralıkları metre cinsinden verilmiştir)

m: püskürtme beton veya beton hasır (kalınlık cm'dir)

Destek elemanları için dikkat edilmesi gereken noktalar aşağıda açıklanmıştır [29].

I-Kaya patlamaları veya kavlaklanma halinde genellikle genişletilmiş taşıma plakalı gerilmeli bulonlar yaklaşık 1 m. aralıkla (bazen 0.8 m.) kullanılmaktadır. Nihai destekleme, kavlaklanma bittiğinde yapılmalıdır.

II-Aynı kazıda çeşitli uzunlukta bulonlar kullanılmalıdır. (3.5 ve 7 m.).

III-Aynı kazıda çeşitli uzunlukta bulonlar kullanılmalıdır. (2.3 ve 4 m.).

IV-Bulon destek basıncını takviye için genellikle gerilmeli tel ankrajlar kullanılır. Tipik aralık 2-4 m.

V-Bazı kazılarda çeşitli uzunlukta bulonlar kullanılmalıdır. (6.8 ve 10 m.).

VI-Bulon destek basıncını takviye için genellikle gerilmeli tel ankrajlar kullanılmalıdır. Tipik aralık 4-6 m.

VII-Bu kategorideki eski tip santrallerin kazılarında tel kafesli ve serbest açıklıklı beton kemer tavanlı (25-40 cm.) sistematik veya noktasal bulonlama kalıcı destek olarak kullanılmalıdır.

VIII-Şişen killerin, örneğin montmorillonittik killerin bulunması halinde (fazla su bulunan ortamda) fazla şişme durumunda destek arkasına genişleme için yer bırakılır. Mümkün olursa drenaj önlemleri alınmalıdır.

IX-Şişen veya sıkışan kayaçların olmaması halinde

X-Sıkışan kayaçların varlığı halinde kalıcı destek olarak çok sağlam ve rijit destek kullanılır.

XI- Şişen veya sıkışan kayaçların varlığı halinde, beton (veya püskürtme beton) kemerlenmeden önce gerekli olan geçici destekleme eğer RQD / J_n yeterli derecede yüksekse (1.5) genişlen tip bulon ve püskürtme beton kullanarak sağlanabilir. Eğer kayaç fazla eklemli ise ($RQD / J_n < 1.5$) örneğin kuvarsit içinde küp biçiminde bir makaslama zonunda geçici destek birkaç kat püskürtme betonla sağlanabilir. Beton veya püskürtme betonun tatbikinden sonra beton üzerinde düzensiz dağılabilecek yükü azaltmak için gerilmeli sistematik bulon buna da kullanılabilir. Ancak fazla miktarda kil mevcutsa veya $RQD / J_n < 1.5$ ise, gerilmeden önce bulonlar enjekte edilmedikçe bu yöntem etkili olmayabilir. Bu tip çok zayıf zeminlerde, bulonun yeterli bir kısmının ankrajı, çabuk katılan reçineli ankrajlar kullanarak da sağlanabilir. Fazla miktarda şişen veya sıkışan kayaçların varlığı halinde beton kemerlerin aynaya kadar uzatılması gerekebilir. Bu gibi hallerde, ayrıca çalışılan aynanın da geçici desteklenmesi gerekir.

XII-Güvenlik nedeniyle, kazı ve tavan kemeri desteklemesi sırasında çoğunlukla ışınsal bulonlama yöntemi kullanılır. 16, 20, 24, 28, 32, 35. kategoriler (sadece kazı eni /ESR>15 m.) Fazla sıkışan kayaçlarda, kazı ve tavan duvar ve taban desteklemesi sırasında ışınsal bulonlama yöntemi gereklidir. Kategori 38 (sadece kazı eni/ESR>10 m.).

3.2 NATM'e göre kaya sınıflaması

Natm'e göre kaya sınıflamalarının belirlenmesinde izlenmesi gereken yöntem şöyle olmalıdır. İlk olarak tünel kazısı yapılan kaya kütesinin karakteristik özellikleri belirlenmelidir. Tünel yapımı öncesi açılacak sondajlarla oluşturulacak yer altı suyu, jeolojik haritalar ve geoteknik bilgiler, tünel kazı işlemi başladıktan sonra günlük yapılacak olan jeolojik haritalar ile karşılaştırılmalıdır. Projede öngörülen jeolojik karakteristikler ile uyuşup uyuşmadığı kontrol edilmelidir [14].

Kazı sırasında kaya kütle tipinin belirlenmesi diğer önemli husustur. Jeolojik haritalama sırasında elde edilen süreksizlik, süreksizlikler arasındaki dolgunun niteliği, su sızıntıları, bozuşma dereceleri, kayanın mukavemeti, aşırı sökülme,

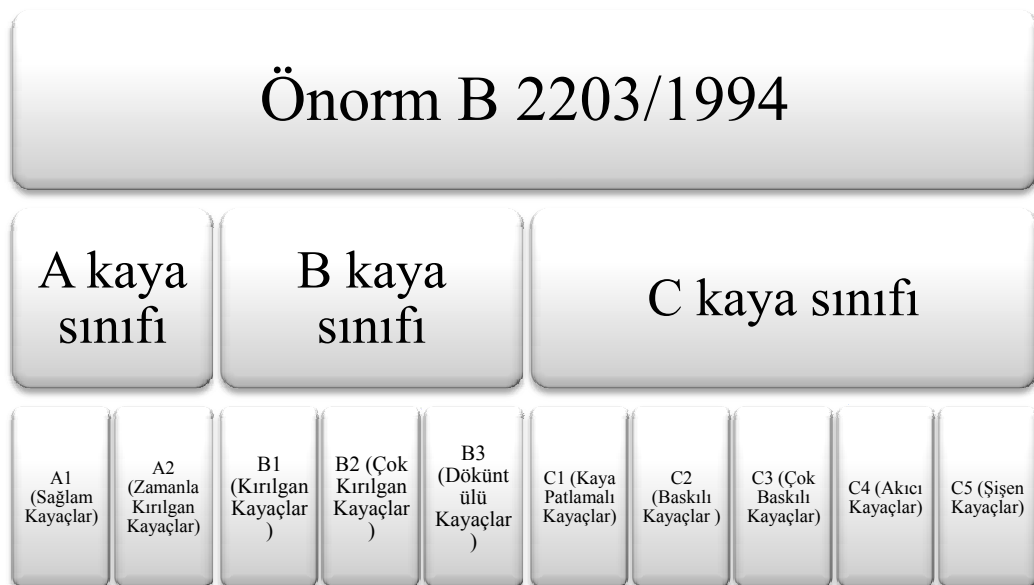
faýların tünel kesitine göre konumları ve etkilenme alanı v.b. bilgiler kullanılarak kazısı yapılan kaya kütlesinin davranışının yorumlanmalı ve buna göre kaya tipinin üç ana gruptan (Stabil A, Gevrek B, Baskılı C) hangisine girdiği belirlenmelidir [16].

NATM’de kaya sınıfları kayanın davranışına bağlı olarak üç ana grupta toplanmıştır. Her bir kaya grubu kendi içinde alt gruplara ayrılmaktadır. NATM yöntemi ile ilgili olarak hazırlanmış olan Avusturya Standardı ÖNORM B 2203/1994’de belirtilen kaya sınıfları ve bu sınıflandırmaya göre destekleme elemanları ayrıntılı olarak ileriki bölümlerde incelenecektir. ÖNORM’a göre kazı ilerleme şekli belirli aralıklarla ilerleyen (sıralı) ve kesintisiz (sürekli) iki tiptir. Sıralı için delme patlatma yöntemi, sürekli için mekanize kazı örnek verilebilir.

NATM bir standardizasyon ile bağlanmış olsa da kazı öncesi, sırası ve sonrasında projelendirme ve tahkimatla ilgili tekrar çalışma ve gerekli değişikliği yapma esnekliğine sahiptir. Bu yüzden yer içinin nitelik ve koşullarında oluşan değişimlere göre sahada gerekli önlemler alınabilir.

3.3 NATM’de ÖNORM B 2203/1994’e göre kaya sınıflandırmaları ve kazı

NATM’de kaya sınıfları kayanın davranışına bağlı olarak üç ana grupta toplanmıştır. Her bir kaya grubunun kendi içindeki alt gruplara ayrılmıştır kazı ve tahkimat bu kaya sınıflarına göre önerilmektedirler. Şekil 3.9’da ÖNORM B2203/1994 de yer alan kaya sınıflandırmaları şematize edilmiştir.



Şekil 3.9 : ÖNORM B 2203/1994’e göre kaya sınıflandırması

Yeni Avusturya yönteminde ÖNORM B 2203/1994'e göre yinelenmeli (sıralı) ve sürekli (makinel) kazılar için kaya davranışı ve sınıflandırmaları aşağıda verilmiştir [36, 14, 16, 32].

3.3.1 A kaya sınıfı

A kaya sınıfı, zamanla kırılğan davranış gösteren sağlam kaya kütleleri olarak tanımlanmaktadır. Bu tür kaya kütleleri genelde stabil olup elastik davranış gösterirler. Kavlaklanmaların temizlenmesinden sonra sökülme olamaz. Elastik deformasyonlar hızla azalır. Yer altı suyu etkisi yoktur. A kaya sınıfı kendi içinde A1 sağlam kayalar ve A2 zamanla kırılğan davranış gösteren kayalar olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 3.10'da 1967 yılında yapılan Roma-L'aquila karayolu tüneli kazı aşamasındaki aynası görülmektedir. Tünelin kaya sınıfı NATM'e göre A sınıfıdır.



Şekil 3.10 : A sınıfı, Roma-L'aquila karayolu tüneli [9]

3.3.1.1 A1 destek sınıfı

Kayaçlar sağlamdır. Kaya kütlesi elastik davranış gösterir. Deformasyonlar çok küçük olmakla beraber, hızla azalış gösterirler. Kavlaklanmalar temizlendikten sonra sökülme eğilimi yoktur. Suyun kaya stabilitesine olumsuz bir etkisi yoktur. Aşırı sökümleri önlemek için yumuşak patlatma yöntemiyle kazı yapılmalıdır. Tünel kazısı teorik olarak “tam ayna” olarak yapılabilir. Ancak kazı profilinin büyük olması halinde, kazı genellikle üst yarı ve alt yarı kazısı şeklinde sürdürülür. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 3 haftadan fazladır. Sıralı kazıda destekleme gerekli değildir. İlerleme adımlarının uzunluğu patlatma yöntemine göre belirlenir.

3.3.1.2 A2 destek sınıfı

Zamanla kırılğan davranış gösteren kayaçlardır. Deformasyonlar küçüktür. A1 sınıfına benzer şekilde hızla azalırlar. Kaya kütlesi elastik davranış gösterir. Tünel tavanında ve yan duvarların üst kısmında süreksizlikler ve kaya kütlesi kendi ağırlığından dolayı sığ sökümlerin olma eğilimi vardır. Yer altı suyunun etkisi ihmal edilebilecek seviyelerdedir. Tünel kazısı tam ayna olarak yapılabilir. Kazı profilinin büyük olması durumunda, kazı genelde üst yarı ve alt yarı kazısı şeklinde sürdürülür. Delme-patlatma kazı için gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu yumuşak patlatma şartları ve yapım tekniğine bağlı olarak seçilir. Üst yarı kazısında 2.5-3.5 m, alt yarıda 4 m ile sınırlanmaktadır.

Bu tip destek sınıfında yalnızca bölgesel olarak tünel tavanında/yan duvarlarda yersel blokların stabilize edilmesi amacıyla kaya bulonları kullanılabilir. Bu durumda kullanılacak kaya bulonları, aynadan itibaren en çok bir ilerleme adımı geriden uygulanmalıdır. Kaya bulonlama yönü süreksizliklerin yönelimlerine göre seçilmelidir. Ancak kazı sırasında patlatmadan kaynaklı aşırı sökümlerin yerleri tespit edilmeli, kazı sırasında yapılacak jeolojik haritalamalarda sökülme eğilimlerinin bölgeleri belirlenmeli ve bu bölgelere lokal bulon önlemleri uygulanmalıdır.

Tünelin desteksiz olarak ayakta kalabileceği süre 3-4 gündür. Adım uzunluğuna, sökümlerin kısıtlanması amacı ile karar verilir.

3.3.1.3 B kaya sınıfı

B kaya sınıfı kırılğan davranışlı kayaçlardır. “B” olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı, yapısal kenetlenme ve/veya çekme mukavemeti azlığından ötürü hızlı gevşeme ve ayrışmaya yatkındır. Hemen hemen tüm çevrede, boşluk civarındaki ikincil gerilmeler, kaya kütlelerinin mukavemetini biraz aşmakta, bununla birlikte bu zafiyet mekanizması içerilere ulaşmamaktadır. Destek yapımının gecikmesi halinde artan çökmeler meydana gelir. Şekil 3.11’de 1984 yılında yapılan Genoa-Ventimiglia tren yolu tünelinin kazı aşamasındaki aynası görülmektedir. Tünelin kaya sınıfı NATM’e göre B sınıfıdır.



Şekil 3.11 : B sınıfı, Genoa-Ventimiglia tren yolu tüneli [9].

3.3.1.4 B1 destek sınıfı

Kırılğan kayaçlardır. Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalırlar. Patlatmadan kaynaklanan kayadaki gevşemeler ve kaya kütlelerinin düşük dayanımı tünel tavanında ve yan duvarların üst kısmında sökülmelere neden olur. Su etkisi genelde önemsizdir. Tünel kazısı üst yarı ve alt yarı olmak üzere iki kademededir. İlerleme adımı uzunluğu üst yarı kazısında 2.0-3.0 m arasında, alt yarıda ise 4.0 m ile sınırlandırılmalıdır. İlerleme adımı uzunluğu zeminin desteksiz durma süresine,

desteksiz açıklığa, destekleme elemanı yerleştirme süresine bağlı olarak ayarlanmalıdır. Kazı için delme patlatma gereklidir. Sınırlı bölgelerde sistematik destekleme gereklidir. Lokal olarak ön destekleme gerekebilir. Destekleme aynadan en fazla bir ilerleme adımı geriden monte edilmelidir. Tehlikeli alanlar kazı esnasında belirlenerek gerekli tahkimatın yapılması gerekmektedir. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 4 gün ile 10 saat arasındadır.

3.3.1.5 B2 destek sınıfı

Çok kırılğan kayalardır. Tünel desteklemesinin zamanında yapılması halinde deformasyonlar hızla azalır. Deformasyonlar uygun tahkimat ile 3-5 cm civarında kalır. Zamanında destekleme yapılmaması veya destekleme elemanlarının yetersiz olması durumunda derinlere ulaşan gevşemeler ve buna bağlı kopmalar oluşur. Bozmuş veya ayrılmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışının kaya kütlesinin mukavemeti üzerinde etkisi bulunmaktadır. Kazı tünel kesitine bağlı olarak bölünür. İlerleme adımı uzunluğu, desteksiz durma süresi ve desteksiz açıklığına bağlı olarak belirlenir. İlerleme adımı üst yarı kazısında 1.5-2.0 m alt yarıda ise 3.0- 3.5 m'den fazla olmamalıdır. Kazı genellikle yumuşak patlatmayla yapılır. Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik destekleme gereklidir. Gerekğinde tavanda süren kullanılır. Tünelin desteksiz olarak kalabileceği süre 5-10 saat arasındadır.

3.3.1.6 B3 destek sınıfı

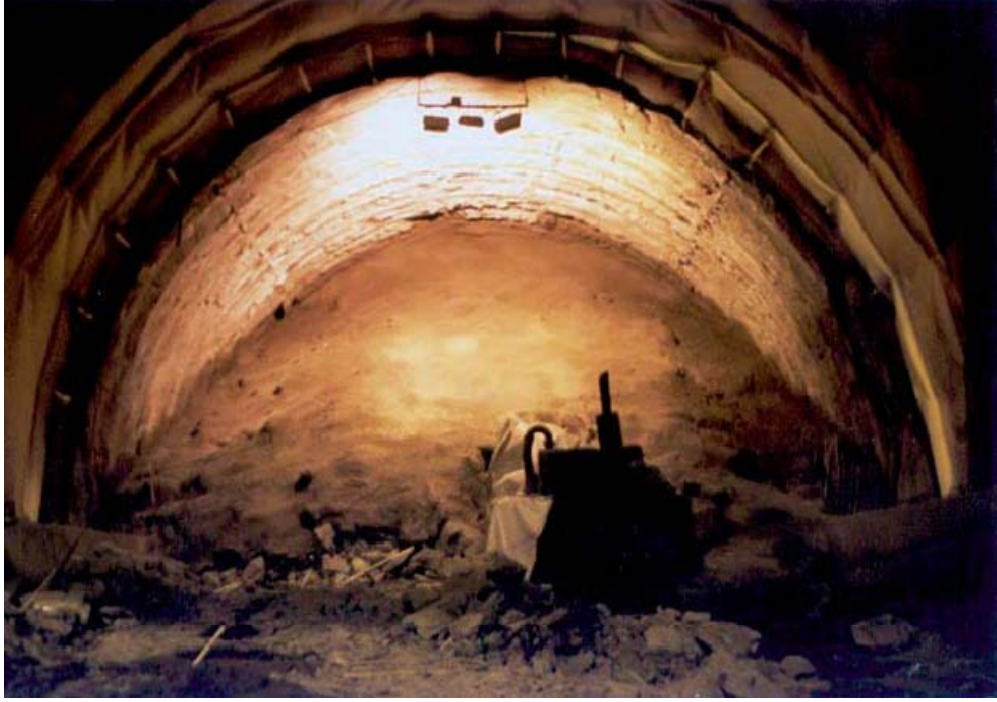
Döküntülü kayalardır. Bölünmüş kazıda bile kaya kütlesinde dökülmeler oluşur. Kohezyonun az olması ve kayaç kenetlenmesi stabilite yetersizliklerine sebep olur. Su etkisi bozmuş veya ayrılmış olan bu tip kayalarda, dayanımı olumsuz etkiler. Parçalı kazı yöntemi ile ilerleyebilmek için kaya kütlesinin dayanımını artırıcı ekstra önlemlere ihtiyaç vardır. Bu önlemler, desteksiz durma süresini artırıcı önlemler olmalıdır. İlerleme adımı uzunluğu üst yarı kazısında en fazla 1.25-1.50 m, alt yarıda ise 3 m ile sınırlanmalıdır. Kazı genellikle yumuşak patlatma ile yapılır, titreşime hassas kaya kütlelerinde mekanik kazı metotları kullanılmalıdır. Deformasyonların büyük olması halinde, taban kazısı ve taban invert betonu yapılarak deformasyon sınırlandırılması sağlanabilir. Tünel tavanı ve yan duvarlarda, aynada ve aynanın ilerletilmesinden önce monte edilecek sistematik destekleme gerekmektedir. Süren kullanımı yerel olarak gerekebilir.

Bu kaya sınıfında, düşük örtü kalınlığı, asimetrik yükleme, geoteknik ölçümlerle belirlenen deformasyonlar sonlanmayarak 10 cm aşması durumunda invert uygulaması yapılır. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 2 saatten azdır.

B grubu gevrek kayalar A ve C grubu kayalara göre, çok daha fazla kırılmalıdır. Kayanın yapısal olarak kırılabilirliği ve kazı geometrisine bağlı olarak patlatmadan sonra gevşemesi ve taneli yapıya dönüşerek kazı çevresinde istenmeyen ani deplasmanlara ve yüklemelere yol açmasıdır.

3.3.2 C kaya sınıfı

C kaya sınıfı plastik davranış gösteren kayaçlar olarak tanımlanmaktadır. Kaya kütlelerinin aşırı gerilmelere maruz kalması ile kabuk atma, burkulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zafiyet mekanizmaları oluşur. Kaya kütlelerinin plastisite ve viskozitesi, zamana bağlı belirgin deformasyon davranış göstermesine ve sonuçta büyük deformasyonlara yol açar. Kaya zati ağırlık yüklerinin aktif hale geçmesi ve önemli miktarda gevşeme basıncı, sadece büyük deformasyonlara izin verildiğinde meydana gelir. Bu durum kaya kütlelerine zarar verecek derecedeki gevşeme ve ayrışma, kaya dayanımında büyük miktarda azalmaya yol açar. Açılan boşluktaki büyük deformasyonlar ve uzun dönemde zamana bağlı deplasman davranışı, zeminin elastik olmayan, plastik ve viskoz davranışına bağlıdır. Çatlamaya veya dökülmeye eğilimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenleri olan kaya kütleleri bu gruba girer. Bu grup, aynı zamanda ayrılmış veya bozulmuş kayalar, gevşek zemin ve organik zeminler gibi kaya kütlelerini kapsamaktadır. Kaya kütlelerinin düşük özellikleri nedeniyle kohezyon miktarına ve/veya gevşeme basıncını takiben aşırı gerilmelere bağlı olarak, elastik veya plastik aşırı gerilme oluşur. C kaya sınıfı kendi içinde C1 kaya patlamalı kayaçlar, C2 kaya baskılı kayaçlar, C3 çok baskılı kayaçlar, C4 akıcı ve C5 şişen kaya olmak üzere beş tipe ayrılır. Şekil 3.12’de 2004 yılında yapılan Milan-Rome-Naples hızlı tren yolu tünelinin kazı aşamasındaki aynası görülmektedir. Tünelin kaya sınıfı NATM’e göre C sınıfıdır.



Şekil 3.12 : C sınıfı, 2004 Milan-Rome-Naples hızlı tren yolu tüneli [9].

3.3.2.1 C1 destek sınıfı

Kaya patlamalı kayaçlar olarak isimlendirilir. Yüksek örtü kalınlığı altında masif kayada yüksek ön gerilmeler dolayı kırılğan kaya kütlelerinde elastik enerji depolanır. Bu enerji aniden yer değiştirerek kayada kesme ve kaya yapısının ezilmesi ile birlikte kırılmalara yol açar. Desteksiz bırakılan bölgelerde fırlayan kayalar parçalanmaya uygundur ve kaya kütleindeki kırılmalar derinlere ulaşır. Bozuşmuş veya ayrıışmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışı, kaya kütlelerinin dayanımı üzerinde önemli etkilerde bulunur. Bölünmüş kazı ile ilerlenmeli, taban kazısı tercih edilmelidir. İlerleme adımı uzunluğu üst yarıda 1.5-2.0 m alt yarıda 3 m'yi geçmemelidir. Kazı düzgün patlatma veya mekanize kazı metotları ile yapılabilir. Destekleme elemanları olarak kısa ve sık yerleştirilmiş kaya bulonları, çelik hasır gereklidir. Kaya kütleindeki basıncı azaltıcı delikler açılarak ek önlem alınabilir. Jeolojik şartlara göre üst yarı aynasından 50-75 m' den daha geride olmamak üzere yerinde dökme bir taban invert betonu yapmak gerekebilir.

3.3.2.2 C2 destek sınıfı

Kaya baskılı kayaçlar olarak isimlendirilirler. Çevreleyen kaya kütlesi içerisinde derine uzanan plastik zonlar ve basınç veren davranışı ile karakterizedir. Bu kaya kütlelerinde orta derecede fakat belirgin bir biçimde uzun süren ve yavaş sonlanan

deformasyonlar görülür. Kazı çevresindeki deformasyonların mertebe ve hızları orta derecededir. Plastik davranışlı yüksek kohezyonlu kaya kütlelerinde gerilme gözlenir. Su sızıntıları ve konsantre su akışının kaya kütlesi üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Tünel kazısının, üst yarı, alt yarı ve taban kazısı olarak bölünmesi gereklidir. Portal bölgelerindeki özel durumlar hariç, üst yarı kazısı kendi içerisinde bölümlere ayrılacaktır. Üst yarı kazısı aynasında bir destekleme gövdesi gereklidir ve ilerleme adımı uzunluğu üst yarıda 0.75-1.25 m arasında, alt yarıda 2 m'den fazla olmayacaktır. Kazı düzgün patlatma ya da mekanik kazı metotlarıyla yapılabilir. Tıraşlamadan hemen sonra püskürtme beton kaplaması gerekir. Tüm kesit çevresinde sistematik destekleme gerekmektedir ve her ilerleme adımında destekleme sistemi tamamlandıktan sonra bir sonraki ilerleme adımına geçilmelidir. Tünel tavanında süren uygulaması yapılmalıdır. Destekleme elemanlarının görevi derin plastik kırılmaları sınırlamaktır. Jeolojik şartlara uygun olarak üst yarı aynasından 50 m'den daha geride olmamak üzere taban invert betonu gereklidir.

3.3.2.3 C3 destek sınıfı

Çok baskılı kayaçlardır. Başlangıçta yüksek hızlı uzun süren ama çok yavaş sonlanan büyük deformasyonlar gözlenir. Derine inen kırılma ve plastik bölgeler gözlenir. Su etkisi büyük önem taşır. Tünel kazısının üst yarı kazısı, alt yarı ve taban kazısı olarak üçe bölünmesi zorunludur. Genellikle üst yarı kazısı aynasında bir destekleme gövdesi gerekecektir. Aynada sistematik destekleme gerektiği durumlar da olabilir. İlerleme adımı uzunluğu, üst yarı kazısında 1.2 metreden, alt yarıda ise 2.0 metreden fazla olmamalıdır. Kazı, ağırlıklı olarak yumuşak patlatma veya mekanik kazı metotlarıyla yapılmalıdır. Tıraşlamadan hemen sonra püskürtme beton kaplaması gerekmektedir. Deformasyon mertebeleri, deformasyon boşlukları ve büyük deformasyonlara cevap verebilecek destek elemanlarının kullanımı gibi özel bir tertibat gerektirecektir. Destekleme elemanları, kaya kütlelerinin üç eksenli gerilme durumunu sürdürecektir. İlerleme adımı uzunluğunun kısaltılması, süren boyunun uzatılması ve üst yarı aynasında göbek bırakılarak, büyük bir merkez destekleme gövdesinin oluşturulması, bazı durumlarda yeterli olmayabilir bu durumlarda ayna kazısının ayrıca alt kısımlara bölünmesi gerekir. Bu durumlarda, üst yarı kazısının yarı tarafı kazılır ya da yan galeriler halinde ilerleme yapıp tam kesit kazı daha sonra yapılır. Aşırı düşey hareketlerin olması durumunda, kaplama temelini genişletilmesi, püskürtme beton kabuğunun temel bölgesinin ekstra bulonlanması ve

enjeksiyonlanması veya geçici olarak iksa sisteminin taban hareketini önleyecek, taban invertleri gerekli olabilir. Tüm tünel desteklemesi sistematik olarak, üst yarı ve alt yarı kazı aynasının daha fazla ilerletilmesinden önce uygulanır ve tüm tavan kesimi üzerinde süren boru kullanımı gerekmektedir. Süren için delme veya benzeri işlemlerin aynada oluşturacağı muhtemel olumsuzlukların giderilmesi gerekmektedir. Üst yarı kazısında alt bölümlere ayrılmış en kesit ve geçici ring yapıları gerekli olabilir. Üst yarı kazısı aynasından 25-50 metre geride taban invert'i gerekir.

3.3.2.4 C4 destek sınıfı

Akıcı kaya kütlesi olarak adlandırılır. Az miktarda kohezyon ve sürtünme, kaya kütlelerinin az plastik davranışı kısa süre desteksiz bırakılan bölünmüş kazıda bile tünel içine malzeme akışına neden olur. Düşük kohezyon kazıda birçok alt bölünmeyi gerektirmektedir. Önceden süren montajı yapılmadan veya süren ve kazı ile birlikte püskürtme betonu kaplaması yapılmadan zeminin kendini uzun süre tutamaz. Su sızıntıları ve konsantre su akışlarının açığa çıkan zeminin davranış ve özelliklerinde önemli etkisi olabilir. Bu yüzden kayanın ortamının dayanımını iyileştirici önlemlerin alınması gerekir. Aynada stabilite problemlerini önlemek için yan galeriler şeklinde bir alt bölünme gerekecektir buna ek olarak üst yarı kazısı aynaları destekleme gövdeleri gereklidir. Özel destekleme önlemleri veya önden yapılan desteklemeler ile tünel aynasının destek etkisi sayesinde sınırlı kazı yapılması sağlanabilir. İlerleme adımı uzunluğu üst yarı kazısında 1.5 m alt yarıda ise 2.0 m'den fazla olmamalıdır. Kazı tünel Ekskavatörü ile yapılmalı ve kazıyı müteakiben püskürtme beton kaplaması gerekmektedir. Tünel desteklemesi, üst yarıda ve alt yarıda her bir ilerleme adımında tamamlanmalıdır. Çelik levha süren tatbiki veya süren boru, tavan kesiminin büyük bir bölümünde gerekecektir. Kazı aynasında, püskürtme beton, hasır çelik, kaya bulonu, drenaj elemanlarından oluşan destekleme sisteminin, kazı sırasında veya kazıyı müteakiben kullanılması gerekebilir. Alt bölümlere ayrılmış kesitin kazısı ile birlikte püskürtme beton kaplaması yapılması gerekli olacaktır ve süren uygulanması zorunludur. Üst yarı kazısının alt bölümlere ayrılmış kesimlerinde geçici ring kapama gerekebilir. Taban kemerinde ring kapaması, üst yarı kazı aynası gerisinde 25 ile 50 metre arasındaki kısa mesafelerde gerekli olabilir.

3.3.2.5 C5 destek sınıfı

Kısa süreli stabil olan çok kohezyonlu, şişen ve kabaran kayaçlardır.. Şişme potansiyelli kil minerali, tuz, anhidrit içeren kaya kütlelerinde su alımıyla birlikte hacim artışı ve bunun sonucunda gevşemeler meydana gelir. Kemer ve aynada serbest açıklıkların sınırlandırılmasıyla kaya kütlesi sınırlı bir sürede stabil kalabilir. Sızıntı ve konsantre su akışının, kazılan zeminin davranışını ve özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Şişme başlatılmış olabilir. Üst yarı, alt yarı ve taban kazısı olmak üzere üçe bölünmesi gereklidir. Birçok durumda üst yarı kazısı aynası için bir destekleme gövdesi gerekmektedir. İlerleme adımı uzunlukları üst yarı kazısında 1.5 metreyi, alt yarı kazısında 3.0 metreyi geçmemelidir. Kazı tünel ekskavatörü ile yapılabilir ve büyük kayaların veya mevzii olarak sert kaya kısımlarının kazısında patlatma gerekebilir. Tünel desteklemesi, üst yarıda ve alt yarıda her ilerleme adımında tamamlanmalıdır. Çelik levha süren uygulaması veya süren boru tavan kesiminin büyük bölümünde gerekir. Alt bölümlere ayrılmış kesitin kazısı ile birlikte püskürtme beton kaplaması yapılması gereklidir. Geoteknik ihtiyaçlara uygun olarak üst yarı aynasından 25 metreden daha geride olmamak üzere taban invert betonu gerekir.

C2, C3, C4 ve C4 kaya ortamlarında jeolojik haritalamaya ek olarak yapılması gereken araştırma çalışmaları, yatay sondaj çalışmaları ve geoteknik çalışmalar olarak sıralayabiliriz.

Tünel kazısı yapılırken tünel aynasında jeolojik haritalama sırasında yapılan gözlemlere göre yukarıda belirtilen kazı çevresine baskı yapabilecek plastikleşme özelliği görülebilir. Bu nedenle zamana bağlı deformasyon yapabilecek bir kaya ortamı ile karşılaşıldığında aynadan alınacak blok numuneler üzerinde petrografik analiz, sınıflandırma deneyi, kil yüzdesinin belirlenmesi, su muhtevasının tayini, direk kesme deneyi yapılması, yatay sondaj ile boyuna yönde uzun dönemde deformasyon oluşturabilecek baskılı bir ortam olup olmadığının belirlenmesi gereklidir.

Çizelge 3.27’de ÖNORM B 2203’e göre kaya sınıflamaları ve bunlara karşılık gelen tahkimat elemanlarına ilişkin çizelge verilmektedir.

Çizelge 3.27 : ÖNORM B 2203'e göre kaya sınıflamaları

Kaya Sınıfı		Kayaç Türü	Kazı	Kazı Şekli	İlerleme Adımı		Tahkimat
					Üst Yarı	Alt Yarı	
A Sınıfı	A1	Sağlam Kayaçlar	Tam Ayna	Delme-Patlatma	4 -5 m	4-5 m	Gerekmez
	A2	Zamanla Kırılğan Kayaçlar	Tam Ayna	Delme-Patlatma	2.5-3.5 m	4 m	Kopmaları önleyici lokal bulonlama
B Sınıfı	B1	Kırılğan Kayaçlar	Parçalı Kazı	Delme-Patlatma	2.0-3.0 m	4 m	Tavan, Omuz ve üst yanlarda sistematik destekleme
	B2	Çok Kırılğan Kayaçlar	Parçalı Kazı	Yumuşak patlatma	2-2.5m	3.5m	Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik destekleme, ön süren
	B3	Döküntülü Kayaçlar	Parçalı Kazı	Yumuşak patlatma-Mekanik kazı	1.25-1.50 m	2.5-3 m	Çelik iksa-P. Beton-Ön süren-Sistematik bulonlama
C sınıfı	C1	Kaya Patlamalı Kayaçlar	Parçalı Kazı	Düzgün Patlatma-Mekanik kazı	1.5-2.0 m	3 m	Çelik iksa-P. Beton-H.Çelik-Ön süren- Sık sistematik bulonlama-Gevşeme delikleri
	C2	Plastik davranış gösteren	üst yarı-Göbek-Alt yarı-Taban	Mekanik Kazı	0.75-1.25	2 m	Çelik iksa-P. Beton-H.Çelik-Ön süren- Sık sistematik bulonlama-50 m geriden kalıcı kemer
	C3	Aşırı Plastik Davranış	üst yarı-Ayna destekleme-Alt yarı-Taban	Mekanik Kazı	0.75-1.20 m	2 m	Çelik iksa-P. Beton-H.Çelik-Ön süren- Sık sistematik bulonlama-25-50 m geriden kalıcı kemer
	C4	Yumuşak kayaçlar	üst yarı-Ayna destekleme-Alt yarı-Taban	Mekanik Kazı	1-1.5 m	2 m	Çelik iksa-P. Beton-H.Çelik-Ön süren- Sık sistematik bulonlama-25-50 m geriden kalıcı kemer
	C5	Şişen Kabaran Kayaçlar	üst yarı-Ayna destekleme-Alt yarı-Taban	Mekanik Kazı	1-1.5m	2 m	Çelik iksa-P. Beton-H.Çelik-Ön süren boru veya çelik levha- Sık sistematik bulonlama-25-50 m geriden kalıcı kemer

Yatay sondajlar baskılı kaya ortamında aynada alınacak destekleme tedbirlerinin tipinin ve boyutlarının (hasır çelik, püskürtme beton kalınlığı, bulonlama, geçici invert, üst yarı temellerinde genişletme) belirlenmesinde önemlidir.

Kil yüzdesinin artması, su muhtevası ile kayma dayanımındaki azalma artık kayma dayanımı değerleri, tünel çevresindeki plastikleşme zonu ve zamana bağlı konsolidasyon özellikleri konusunda doğrudan bilgi sağlamaktadır.

Geoteknik ölçümler; C2, C3, C4 ve C5 kaya sınıfları için yapılması gerekli geoteknik ölçümlerde kazı en kesitine daha fazla noktada ve sık aralıkta (5-8 nokta, 10-20 m.), plastikleşme zonunun belirlenmesini öngörür. Bu zonda oluşan deplasman ve gerilmelerin ölçülmesi için kuyu extensometre, yük hücresi gibi ölçümlerle püskürtme betonda oluşan deformasyonları belirlemek için birim deformasyon ölçerler yerleştirilmelidir. Bu kaya sınıflarında üç boyutlu ölçüm yapılmalı ve ölçüm sonuçları en kesit üzerinde radyal kapanmaları ve oturmaları gösterecek şekilde işlenmeli ayrıca boyuna yönde destekleme sırası ve zamanı gerekirse yeniden belirlenmelidir.

NATM kaya sınıflandırması yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda listelenmiştir.

1-Kaya sınıflaması tünel kazı aynasında yapılan jeolojik haritalama esas alınarak yazılı olarak yapılır. Belirlenen kaya sınıfı için tünel projelerinde öngörülen standart destek sistemi uygulanırken bu destek sisteminde gerektiğinde kontrol mühendisinin onayı ile değişiklikler yapılabilir (kaya bulon tipi değiştirilerek adedi arttırılabilir, süreksizliklere göre pozisyon ve yönelimleri değiştirilebilir, püskürtme beton kalınlığı ve hasır çelik tabakaları arttırılabilir, çelik iksa aralıkları azaltılabilir vb).

2-Belirlenen kaya sınıfı için uygulanan destek sistemi oluşan deformasyonlar bu kaya sınıfında beklenen deformasyonlarla uyumlu olmalıdır.

3-Kaya sınıflaması her ilerleme adımında üst yarı kazısında göre yapılır. Tünel kazısının yan galeriler halinde yapılması halinde her bir kazı ayrı ayrı dikkate alınarak sınıflandırılır. Alt yarı kazısında daha zayıf kaya koşulları ile karşılaşılması halinde kontrol mühendisinin onayı ile ilave destek yapılır.

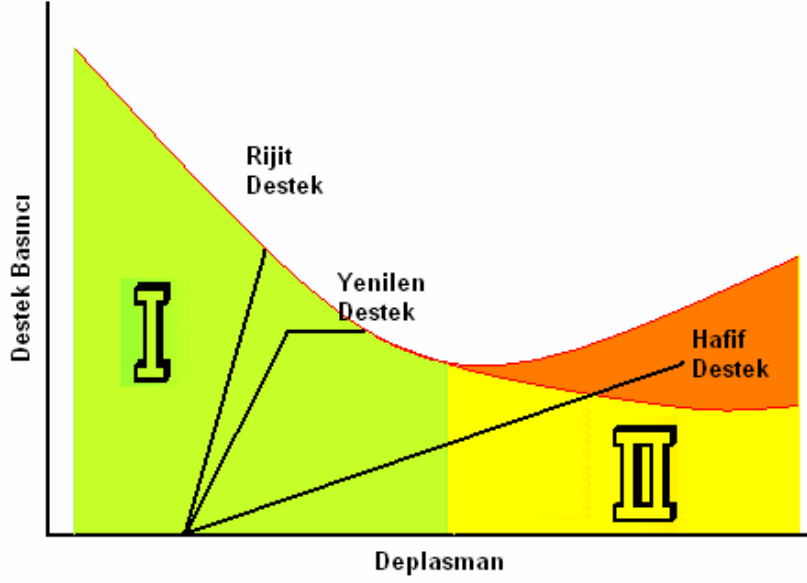
4-Tünel kazı kütlesi çevresindeki kaya kütlesinin davranışı zaman bağlı olup desteklemenin gereken süre içinde yapılmamasından dolayı kaya kütlesinde azalmaya sebep olunmamalıdır. Kaya sınıflandırma sistemlerinin karşılaştırması Şekil 3.13’da görülmektedir.

NATM Ö-NORM 2203		1 Sağlam	2 Zamanla Kırılgan	3 Az kırılgan	4 Kırılgan veya az baskılı	5 çok kırılgan veya baskılı	6 çok baskılı	7 akıcı										
NATM OLD		I Sağlam zamanla kavaklamam		II Kırılgan	III Çok Kırılgan	IV baskılı	V çok baskılı	VI akıcı	VII özel durum									
TERZAGHI	HEW (ROSE)	n=0 0.25 0.4 1.2 5 8																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						
	OLD Hp	0	0-0.15 B	0.25-0.35 (B+H)		0.75-1.1 (B+H)		2.1-4.5 (B+H)		4.5(B+H) 75m		>75m						
			0.15-0.25 B	0.35-0.75 (B+H)		1.1-2.1 (B+H)												
RSR		100 Mükemmel	1	75	İyi	2	59	58	Orta	3	44	43	Zayıf	4	29	28	Çok Zayıf	5
RMR CSIRO BANDAIWSK		100 Mükemmel	1	80	İyi	2	60	Orta	3	40	Zayıf	4	<20	Çok Zayıf	5			
Q BARTON		Mükemmel	>100	100	40	İyi	10	4	Orta	1	0.1	0.0001	Zayıf					

Şekil 3.13 : Kaya sınıflarının karşılaştırılması [37].

3.4 NATM’de destek elemanları ve dizayn metodu

Pacher 1964 yılında, ilkel gerilme durumlarından ikincil gerilme durumlarına geçilirken, gerilme ile deformasyonlar arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Çalışmanın sonucunda deformasyonun rijit bir destek sistemi ile durdurulabileceğini ve oluşan gerilmelerin destek sistemi ile karşılanması gerektiği görülmüştür. Kayaç elastik kaldığı sürece, deformasyonlar ile destek basıncı ters orantılı olmaktadır. Kayacın kendi dayanımı aşıldığında, açıklıktan çevre kayacın derinliklerine doğru koruyucu zon adı verilen bölge oluşmaya başlamaktadır. Zamanla açıklık etrafındaki koruyucu kaya zonu, arazi basıncının etkisi ile boşluğa doğru patlamaktadır [37]. Şekil 3.14’de Fenner-Pacher eğrisi olarak bilinen bu davranış gösterilmiştir. Kritik deformasyon sınırı denetlenerek arazi basıncı kontrol edilebilmekte ve gerekli destek basıncı bu sayede belirlenebilmektedir. Diyagramdaki yeşil bölge güvenli, ama yüksek destek basıncı sebebi ile rijit tahkimat gerektirmektedir. Şehir içi tünellerinde bu bölgede rijit destekleme tercih edilmelidir. Sarı ve kahverengi bölgeler ise riskli bölgelerdir ancak hafif destek gerektirir.



Şekil 3.14 : Fenner – Pacher eğrisi

3.4.1 NATM’de tahkimat elemanları

Bir yeraltı kazı boşluğunun çevresindeki kayanın yük taşıma özelliğini koruması ve duraylılığın artırılması için kaya bulonları, kablo bulonlar veya herhangi bir kaya sağlamlaştırma elemanının yerleştirilmesi ve kayanın zaten var olan direncinin de harekete geçirilmesine kaya sağlamlaştırma denmektedir. Bu işlem sayesinde NATM’nin temel ilkelerinden olan kaya kütlelerinin kendi kendini taşıması sağlanır. Kaya sağlamlaştırma elemanları ve kaya kütlesi beraber çalışarak bir bütün halinde çalışır.

Kaya desteklemesi ise; beton kaplama, çelik iksa veya diğer tür mühendislik elemanları kullanılarak kaya kütlelerinin hareketlerini kontrol etmektir. Kaya destek elemanları, kaya sağlamlaştırma elemanların aksine kaya kütlelerinin dışında yer alır.

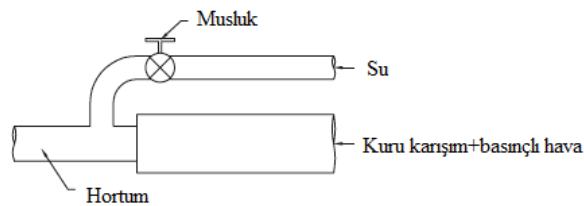
Sağlamlaştırma ve destekleme elemanları olarak ön gerilmeli veya gerilmesiz kaya bulonu, çelik hasır, püskürtme beton, çelik iksadan veya inşaat demirinden yapılmış kafes kirişlerden oluşan dış kabuk ile iç betonarme kabuktan oluşur. NATM’de birincil destekler kaya kütlesi ile beraber çalışarak kompozit bir yapı oluşturmaktadır. Kaya ve destek elemanlarından oluşan bu kompozit sistem tünel çevresinde oluşan basınçların yeniden dağılımını sağlayarak kayanın gevşeme sonucu azalmakta olan dayanımının artmasını sağlamaktadır.

Tünellerde sağlamlaştırma iki aşamada gerçekleşir. Geçici sağlamlaştırma adı da verilen birincil destekleme, kafes veya çelik iksa, kaya bulonları, püskürtme beton ve hasır çelik donatıdan oluşur. Kalıcı sağlamlaştırma ise nihai betonarme kaplama sistemidir. Kaya kendini tutamayacak kadar parçalı ise gerekli görülen desteklerin aralıkları azaltılarak ve ön süren tekniği kullanılarak kazı yapılacak alanın ve çevresel taşıyıcı zonun güçlendirilmesi sağlanır. Ayrıca iç kaplama ile kaya kütlesi arasında boşluk kalması olasılıklarının önüne geçmek maksadıyla kontak enjeksiyonu, yüzey oturmalarının önlenmesi amacı ile konsolidasyon enjeksiyonları yapılabilir. Aynanın stabilitesinin sağlanması amacı ile aynaya püskürtme beton, hasır çelik ve kaya bulonları ile destekleme yapılabilir.

3.4.1.1 Püskürtme beton

İnce kum, agrega, çimento, priz hızlandırıcı karışımından oluşan kuru ya da ıslak olarak pompalar yardımıyla kazı yüzeyine püskürtülen çok yönlü kullanım amacı olan bir çeşit harçtır. Püskürtme betonun en önemli özelliği karışımındaki priz hızlandırıcı kimyasallar yardımı ile erken priz alması ve mukavim olmasıdır. Püskürtme beton kayanın kesme dayanımını artırır, tünel kesiti çevresindeki kayanın gevşemesini, kayadaki süreksizlikleri doldurarak dökülmeleri ve sökülmeleri önler. Kazıdan hemen sonra oluşan gerilme ve deplasmanların bir kısmını karşılar. İksa ve çelik hasır ile kaya kütlesi arasında oluşabilecek bölgesel boşlukların minimumda kalmasını sağlar. Taşıyıcı eleman olarak donatılı ve donatısız kullanılır.

Kuru karışımda su ve kuru agrega ve çimento karışımları püskürtme hortumunun ağzında birleşerek püskürtme işlemi gerçekleşir. Çimentonun agrega ile aderansının sağlanması için agreganın, ağırlığınca %3-8 oranında nem içermesi gerekmektedir. priz hızlandırıcı katkı maddesi sıvı ise su ile birlikte kuru toz halinde ise çimento-agrega karışımı ile birlikte karışıma girmelidir [38]. Su çimento oranı kuru karışımlar için 0,3-0,5 arasında değişir [14]. Şekil 3.15’de kuru karışım hazırlama aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 3.15 : Kuru karışım [9]

Yaş püskürtme beton karışımları normal beton karışımları gibi hazırlanarak beton pompasına verilmektedir. Karışımın yüzeye püskürtülmesi için gerekli olan 7-15 m³/dk arasındaki debi ve 7 bar hava basıncı hava püskürtme ucunda priz hızlandırıcı ile birleşerek yüzeye püskürtülmektedir [38]. Tipik bir püskürtme beton karışımının zamanla mukavemet değeri Çizelge 3.28’de belirtildiği gibidir.

Çizelge 3.28 : Püskürtme beton dayanım değerleri [9].

Zaman	Mukavemet(N/mm ²)
6 dk.	0.2 - 0.5
1 saat	0.5 - 1.0
24 saat	8 - 20
7 gün	30 - 35

3.4.1.2 Hasır çelik

İki tür çelik hasır kullanılmaktadır. Bunlar birbirlerine zincir şeklinde geçmeli tellerden oluşturulan hasırlar ve birbirlerine kaynatılarak tutturulan çelik hasırlardır. Hasır çelik püskürtme betonun statik özelliklerini arttırmak ve beton priz alana kadar gerekli stabiliteyi sağlamak amacı ile kullanılır. Hasır çelik püskürtme betonun kesme kuvvetine karşı mukavemetini arttırmaktadır. Çelik hasırlar püskürtme betonla birlikte kullanıldıklarında kayaca sağlamlık verir, hava ve nem etkilerine karşı korur ve bulonların sağlamlaştırma etkilerine ek olarak rijit bir diyafram oluşturarak sağlamlık etkisini geniş bir alana yayar.

Hasır çelik yoğun ve hızlı işçilik gerektiren tünel gibi yapılarda işçilik kolaylığı ve küçük kaya kopmalarını tutarak oluşabilecek iş kazalarını minimuma indirir. Montaj kolaylığı ve püskürtme betonun geri sıçramasını önlemek amacı ile hasır aralıkları ≥ 100 mm.’den fazla olmalıdır. Donatı çapı $\phi < 10$ mm ve pas payı ≥ 2 cm olmalıdır [9].

3.4.1.3 Kaya bulonları

Kaya bulonları kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak, çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek, süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmak veya kayada üç eksenli gerilme durumu oluşturmak için yerkabuğu içine bağlanan demir çubuklardır. Bulonlar tünel kazısı sırasında duvar ve tavanda çözülmüş, kopmak üzere olan kayaların yerlerinde kalmalarını sağlayan, güvenliği arttırıcı elemanlardır. Kaya bulonları tünel kesiti çevresindeki kayanın

desteklenmesinde kullanılan ana destek elemanlarından biridir. Kaya bulonu kaya bloklarının sabitletmesinde tekil olarak kullanıldığı gibi çevredeki kayanın dayanımını arttırılması amacıyla sistematik olarak da kullanılabilir [17].

Bulonlar 1,3–4,0 cm çaplı ve uzunlukları tünel açıklığına göre değişebilen çelik çubuklardır. Tünel tavan ve duvarlarına delinen yuvalar içine yerleştirilen bulonlar, çimento enjeksiyonu yapılarak veya alt ucundan kayaya bağlanırlar. Plaka ve somun Yardımı ile kayaya doğru itilip sıkıştırılırlar. Bulonlar gerilmesiz, mekanik gerilmeli, uçtan yapışan olarak üç ana tipe ayrılır. Gerilmesiz bulonlar, enjeksiyonlu ve sürtünmeli tip olarak ikiye ayrılırlar.

3.4.1.4 Çelik iksa

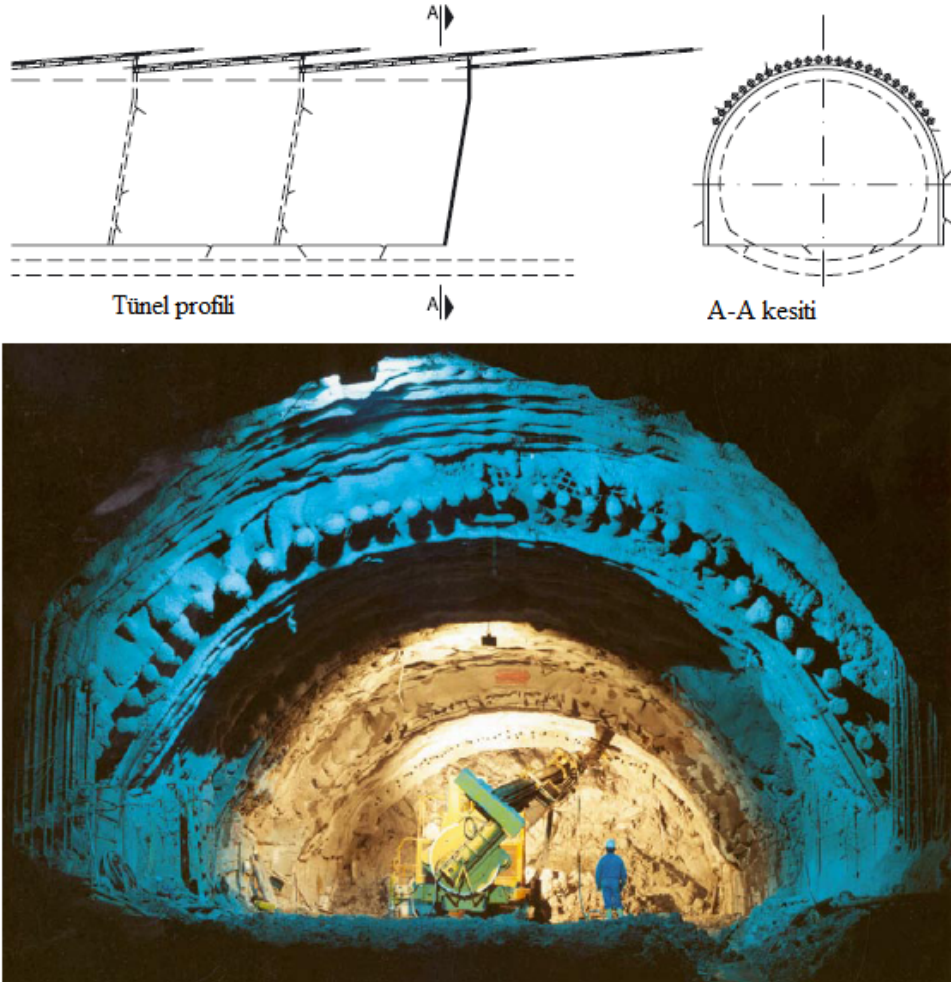
Çelik iksa, kazı yapılan tünel kesitinde püskürtme beton dayanımını kazanıncaya kadar geçen sürede yapım güvenliğini sağlamak ve püskürtme betonda yük dağılımına yardımcı olmak amacıyla kullanılırlar. Uygulanan çelik iksa tipleri kaya ortamına göre I, H, TH veya U hadde profiller ve kafes kiriş olarak seçilebilir. Bu tür destekleme elemanları az eklemlili kaya ortamlarında kullanılabilir gibi kazıyı müteakip aşırı çatlakların oluştuğu kaya ortamlarında da kullanılabilir. Çok çatlaklı kaya ortamlarında çelik iksa ve kazı duvarı arasına çelik hasır, çelik çubuk, ağaç takoz veya çelik plakalar yerleştirilerek küçük kaya bloklarının düşmesi önlenabilir. Çelik takımlar kazıyı çevreleyen kaya kütlelerini güçlendirmezler. Ancak, deformasyon sonucu zayıflayan çevre kayasına destek olurlar.

3.4.1.5 Ön süren

Ön süren uygulaması kazı yapılacak bölgenin önceden desteklenmesini amacı ile yapılmaktadır. Tünel ilerleme yönünde kullanılan enjeksiyonlu ön sürenler ortamı iyileştirici, kayacın dayanımını arttırıcı özelliğe sahip olduğu gibi, ayna önünde oluşan kesme gerilmelerini de kontrol etme amacı ile kullanılmaktadır.

Tamamen ayrılmış ve büyük bloklar içeren zeminlerde kazı yapıldığı zaman, tahkimattan önce tünel tavanı ve aynada göçmeler meydana gelir. Bu durumun önüne geçebilmek maksadı ile kazıya başlamadan önce tünel ilerleme yönünde, kaya sınıfına göre sıklığı belirlenen delikler açılarak 6-9-m uzunluğunda 32mm veya 51mm çapında içi boş borular yerleştirilerek destekleme işleme yapılır. Ucu delikli bu borular yardımıyla Parker adı verilen aletler yardımıyla 2bar basınçla zemine

çimento enjeksiyonu da yapılır. Bu işlem süren boyu ile ilişkili olarak belirli bir bindirme boyu sağlanacak ölçüde tekrarlanır. Şekil 3.16’de ön süren uygulaması ve şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.16 : İtalya Solignano tüneli ön süren uygulaması [12].

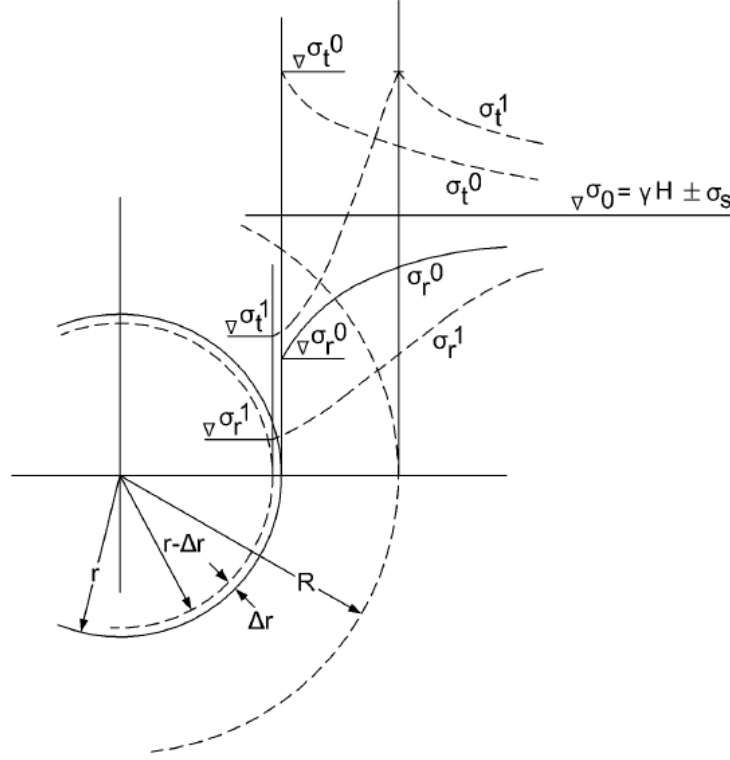
3.4.2 NATM’de tahkimat boyutlandırma esasları

Şekil 3.17’de görüldüğü gibi dış halkanın taşıma kapasitesi $\sigma_r - \Delta r$ eğrisi ile belirlenir. Bu eğri arazi basınçları ve kayaç cinsi için karakteristik özellik taşır. Yer altında açılacak olan boşluk etrafındaki sınır zonunun artmasına izin verildiği takdirde (destekleme yapılmadığı durumda) dış baskıya karşı dengeyi sağlayacak P_t^0 radyal basınç kuvveti düşecek ve sürekli olarak bir plastik zon oluşacaktır. Çok hızlı meydana gelen bu gelişme, karşı basınç kuvvetinin düşme oranı ön basınç şartları (σ_0) ve kayacın içsel sürtünme açısı (ψ) ile ilişkili bir fonksiyondur. σ_r ve P_t eğrilerinin kesim noktasında gerekli tahkimat direncine ulaşılarak denge kurulmuş olur.

r : açıklığın yarıçapı

$P_0 : \gamma H$

Şekil 3.18’da yer altı boşluğunun etrafında oluşan gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 3.18 : Boşluk etrafında oluşan gerilmeler [26].

Grafikteki ifadeler aşağıda verilmiştir.

r : yarıçap

R : plastikleşen bölgenin yarıçapı

Δr : tünel cidarında oluşan radyal deformasyon

σ_0 : ilkel gerilme

σ_s :yapısal gerilme

σ_r^0 ve σ_t^0 : $\Delta r=0$ olduğu durumda dairesel ve teğet gerilme değerleri

σ_r^1 ve σ_t^1 : $r-\Delta r$ olduğu durumda dairesel ve teğet gerilme değerlerini ifade eder.

$\Delta r=0$ olduğu durumda σ_r^0 değeri Kastner tarafından aşağıdaki eşitliklerle tariflenmiştir [39].

$$\sigma_r^0 = \frac{2\sigma_0 - \sigma_{gd}}{\xi + 1} \quad (3.16)$$

Bu ifadedeki ξ değeri aşağıdaki formül yardımı ile bulunur.

$$\xi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3.17)$$

Denklem 3.16'daki σ_{gd} değeri aşağıdaki formül yardımı ile bulunur.

$$\sigma_{gd} = \frac{2c}{\tan(45 - \varphi / 2)} \quad (3.18)$$

Kayacın taşıyıcı kemerinin kayma kapasitesi P_i^R (t/m²);

$$P_i^R = \frac{S\tau_R \cos \varphi}{b/2} - \frac{S\sigma_n^R \sin \varphi}{b/2} \quad (3.19)$$

Yardımları ile bulunur. Bu ifadede;

S = Kayma düzleminin boyu

ψ = içsel sürtünme açısı

b = kayma zonunun yüksekliği (m)

σ_n^R = kayma düzleminin eksenel gerilmesi (t/m²)

Kaplama malzemesinin mukavemeti:

$$P_i^s = \frac{d \tau^s}{\sin \alpha^s (b / 2)} t \quad (3.20)$$

Ek hasır çelik mukavemeti için:

$$P_i^{st} = \frac{F^{st} \tau^{st}}{\sin \alpha^s (b / 2)} \quad (3.21)$$

Burada beton için:

$$\tau^{st} = \frac{\tau^s E^{st}}{E^s} = 15 \tau^s \quad (3.22)$$

Kaplama dayanım direnci ise aşağıdaki denklem ile bulunur

$$P_i^L = P_i^s + P_i^{st} \quad (3.23)$$

Bulon mukavemeti değeri aşağıdaki ifade ile bulunabilir:

$$P_i^A = \frac{f^{st} \sigma_p^{st}}{et} \quad (3.24)$$

σ_3 yanal baskı değeri ise

$$\sigma_3 = p_i^s + p_i^{st} + p_i^L \quad (3.25)$$

Açılan boşluğa doğru kaya kütlelerinin kaymasına karşı bulonların gösterdiği direnç;

$$P_i^A = \frac{a \cdot f^{st} \cdot \sigma_p^{st} \cos \beta}{et(b/2)} \quad (3.26)$$

Bulonlarında direnci eklendiğinde taşıyıcı dış kemerin toplam taşıma kapasitesi:

$$P_i^w = P_i^L + P_i^R + P_i^A \geq P_{i\min} \text{ olur.}$$

NATM'in ana tahkimat elemanları ile hareketin tersine oluşturulan bu tür tahkimat deneyimi bize aşağıdaki bilgileri kazandırmıştır [39].

- 1- Aynı tür arazi tabakaları için bağlanacak kütlelerin boyutları ile kazı kesiti arasındaki oran taşınan serbest malzemenin boyutları ile kararlaştırılır.
- 2- 10-16 m² kesit alanına sahip tünellerde, bağlanacak kayaçların boyutlarının ufak döküntüler halinde birkaç dm³ olduğu durumlarda basit bir püskürtme beton kaplama (yaklaşık olarak d=3 cm veya 0.017R kalınlık) tüneli dengeler.
- 3- 400-600 m² yer altı açıklığına sahip olan hidro elektrik santrallerinde, kütleler aynen kohezyonsuz zemin gibi davranacak ve 0.017 R kuralı geçerli olamayacaktır. Bu durumda sistematik bulonlama ile kaya kemeri gereklidir. Ana taşıyıcı eleman olarak görev yapan püskürtme beton kaplama aynı zamanda bulonların çakıldığı bulonlama noktaları arasındaki yüzeyin dengelenmesi özelliğine sahiptir.

3.5 Analitik yöntemler

Mühendislik mekaniğinin en temel ilkesi mühendisin uğraştığı problemi, basit elemanlara ayırarak sayısal eşitliklerle ifade etmektir. Basitleştirilmiş bu eşitlikler sayesinde çözüme ulaşılır. Sayısal yöntemler (analitik yöntemler), tünelcilikte bu tür çözümler üreten bir analiz yöntemidir. Tünelcilik tasarım yöntemleri arasında, tünel

geometrisini, kayanın mekanik davranışını ve sınır koşullarını belirlemede sayısal yöntemler başarılı olmuştur.

Tünel kazısının etrafındaki bölgedeki gerilme dağılımı ve deplasmanlar tünel tahkimatı hesaplanırken belirlenmesi gereken en önemli unsurlardır. Bu yöntem ile deplasmanlar ve asal gerilmeler aracılığı ile tünel kaplamasına gelen iç kuvvetlerin ve momentler bulunabilir. Ayrıca simetrik, dairesel bir kazının etrafında göçen veya plastik deformasyon oluşan bölgelerdeki gerilme ve deformasyon dağılımı ve değişikliklerinin belirlenmesinde bu yöntem uygulanır. Tünel kazıları aşamasında denge analizinde de, sayısal yöntemler kullanılabilir. Ancak bu yöntem hesap kolaylığı açısından basit geometriye sahip, çok fazla kırık zonları olmayan tünellerde uygulanabilmektedir. Tüneli çevreleyen bölgedeki zemin ve kaya durumu karmaşık ve heterojen bir yapı gösterdiği durumlarda bilinmeyen parametre sayısı arttığı için yöntem uygulanamamaktadır. Bu tip durumlarda gelişen bilgisayar teknolojisi ile bilgisayar destekli analiz yöntemleri başarı ile uygulanabilir.

Analitik yöntemler, kaya mekaniğinde tünel ve diğer yeraltı yapılarının tasarımında, problemlerin matematiksel olarak çözümünü içerirler. Burada amaç kazı sonrası oluşacak ikincil gerilme durumlarının tepki ve davranışlarını belirleyerek, yapı dengesini yeniden oluşturarak, bu dengeyi sağlayacak tahkimatı belirlemektir.

Matematiksel yöntem, kavramsal modelleme ve fiziksel dereceleme modelleri, sayısal tasarım için uygun üç farklı yaklaşımdır [11].

Sayısal yöntemler teknik ifadeler içerirken matematiksel yöntemler sonuçların kapalı biçimlerini kapsar. Kaya mühendisliğinde analitik yöntem, genel olarak karşılaştırmalı tasarım ve parametrik çalışmalarda kullanılır ve mühendislik sorunlarının çözümü için diğer yöntemlerle birlikte kullanılması gerekir.

3.5.1 İntegral ve diferansiyel modelleme

Kaya kütlelerin sayısal modellenmesinde, devamlı ve devamsız olmak üzere iki yaklaşım vardır. Bu yaklaşımlar, yatay düzlemler, eklemler ve faylarda devamsızlığa neden olan jeolojik yapıların tanınması amacıyla belirlenmişlerdir.

Devamlı yaklaşım diferansiyel modeller ve integral modeller olarak ikiye ayrılır. Diferansiyel modeller, sonlu fark ve sonlu eleman yöntemlerini içerirler ve kazının yapıldığı ve çalışılan zeminin tümünün karakterize edilmesinde kullanılırlar. Sonlu

eleman yöntemi, yeterli karmaşık modellerin elde edilmesinde kullanılır. Karmaşık sistemler sıvı akışını ve ısı transferini de içine alarak modellenir.

İntegral veya sonlu eleman yönteminde ise iç ve dış sınırlar boyunca devamsızlık söz konusudur. Çizgisel olmayan kesin biçimler ise yeniden oluşturulabilir. Devamsız modeller, devamlı modellerden farklı olarak blokların ve parçaların hareketlerinin denklemlerini ifade ederler. Devamsız modelleme kullanabilmek için bağımsız kaya bloklarının hareketleri özel olarak tanımlanmalıdır [16].

Analitik tasarımda sonlu eleman yöntemi, genellikle kullanılan ve gerçeğe yakın sonuçlar verebilen bir yöntemdir. Günümüzde özellikle tahkimat tasarımında bolca başvurulmuş bir yöntemdir.

Bu yöntemde tüm projeyi kapsayan gerekli parametrelerin etkileri çalışılmalı ve proje değişiklikleri diğerleri ile karşılaştırılmalıdır. Analitik yöntem uygulamadaki verimliliğine rağmen, gerekli bazı verileri (giriş verileri) yeterli düzeyde sağlayamadığı için mutlak proje araçları olarak yeterli değildir.

Derin tünel kazılarında oluşabilecek kırık bölgesinin sınıflandırılmasında ve jeolojinin sıklıkla değiştiği bölgelerde sayısal yöntemler uygulanır.

Kaya yenilme kriterleri kullanılarak tünel kesiti etrafındaki zayıflık zonları tanımlanabilir. Yapılan hesaplar sonrasında doğru tahkimat seçimi yapılır. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yardımı ile kesişim bölgelerinin yenilmeye etkileri belirlenebilir. Kesişme bölgelerinin etrafında, köşelerinde yüksek gerilmeler meydana gelir. Bu kesişme bölgelerindeki stabilite problemlerini artırır ve birtakım özel önlemler alınmasını zorunlu kılar.

3.5.2 Fiziksel Modelleme

Kaya mekaniğinde fiziksel modellerin çok yararlı bir araç olmasından kaynaklı birçok araştırmacı bu alanda çalışmaktadır. Bu çalışmalar arasında önemli sonuçlar alınmış olan birinde, tünelin tavanında, yatayla 30° açı yönelimli, birçok kırıklar modellenmiştir. Yine bu çalışma da, tavan tabakalarının kalınlıkları tavanın üst kısımlarında bulunan zayıf kısımların davranışları ve tünel açıklığının stabilitesini etkileyen eklemlerin davranış şekilleri belirlenmiştir [41]. Tüm bu değerlere, yeniden meydana gelebilir deneysel sonuçların değerlendirilmesi ile oluşan bir teknik yöntem kullanılarak, ulaşılmıştır. Bu teknik yöntemin adı “Temel Sürtünme Tekniği”dir. Bu yöntemde, model tasarımının doğru ve deneysel işlerin titizlikle yapılması şarttır. Temel sürtünme modelleri içindeki gerilme yayılımı 6.8 kPa (1 Psi) kapasitesine

sahip olan küçük gerilme sensörleri tarafından ölçülebilir. Fiziksel modelin inşa edilmesine ve test edilmesine paralel olarak, kaya yapılarının davranışı hakkında çok fazla bilgi elde edilebilir ve prototiplerle mekanik davranışın birçok tipi tanımlanabilir.

3.5.3 Yenilme kriterleri

3 boyutlu uzayda gerilme durumları $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmeleridir. Her hangi bir yenilme durumunun oluşması için

$$\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3) \quad (3.27)$$

Gibi malzemeye bağlı bir matematiksel ilişkinin gerçekleşmesi gerekmektedir.

3.5.3.1 En büyük normal gerilme

Yenilme, kayaya etkiyen gerilmelerden herhangi birisinin, kayanın basınç veya çekme dayanımını aşması ile meydana gelir.

3.5.3.2 En büyük kesme gerilmesi

İki boyutlu yükleme durumunda en büyük ve en küçük çekme veya basınç asal gerilmelerin farkının yarısının, malzemenin kayma gerilmesi dayanımından fazla olması durumunda gerçekleşir.

$$\tau_m = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} > S_o \quad (3.28)$$

Bu eşitlikte τ_m maksimum kesme gerilmesi, S_o ise kayanın kesme dayanımıdır.

3.5.3.3 Coulomb ve Mohr yenilme kriteri

Mohr hipotezine göre, yüzey üzerine etkiyen gerilmeler arasında, kesme gerilmesinin (τ), normal gerilmelerin (σ) bir fonksiyonu olduğunu gösteren bir bağıntı vardır.

$$\tau = f(\sigma_n) \quad (3.29)$$

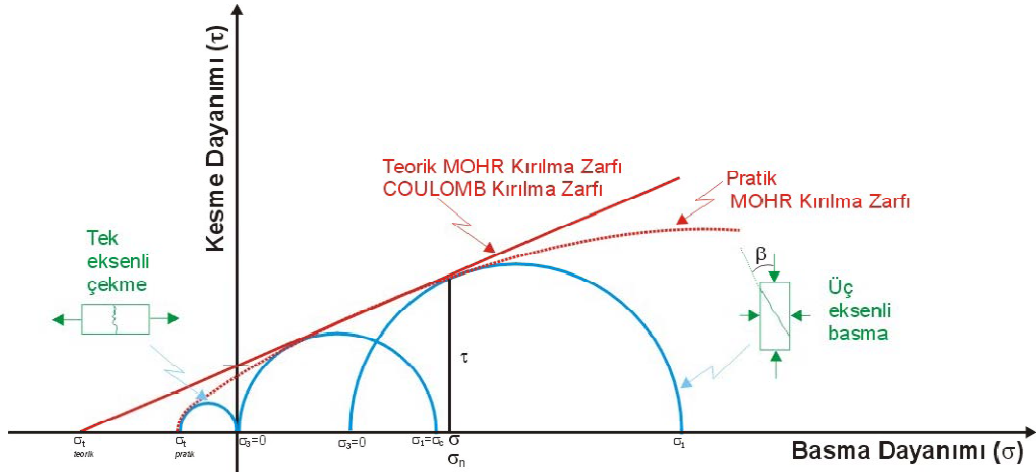
Bu fonksiyonda eğer en büyük normal gerilme veya en küçük gerilme değerleri kayma (kesme) emniyet gerilmesini aşarsa yenilme meydana gelir.

$$\tau_o > S_o + \sigma_n \cdot \tan \phi + c \quad (3.30)$$

veya bu ifade

$$\sigma_3 \geq -\sigma_t \quad (3.31)$$

şeklinde ifade edilebilir. Mohr kriterinde yükleme durumlarının Mohr daireleri ve zarfı ile gösterimi Şekil 3.19'da şematize edilmiştir.



Şekil 3.19 : Mohr ve Coulomb yenilme kriteri

Şekil 3.19’da görüldüğü gibi, her bir Mohr dairesine teğet olan doğruya Mohr yenilme zarfı doğrusu denir. Bu doğrunun üstünde kalan bölgeye kırılma bölgesi denir. Eğrinin alt bölgesi duraylı bölgedir.

3.5.3.4 Griffith-Murrell Kriteri

$$\sigma_1 = F. (\sigma_3)^A + \sigma_c'' \quad (3.32)$$

Bu eşitlikte;

σ_1 :büyük asal gerilme

σ_3 :küçük asal gerilme

σ_c :eksenel olmayan sıkıştırma kuvveti

A ve F değerleri sabit değerlerdir Normalleştirilmiş şekilde bu eşitlik aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir;

$$\sigma_1/\sigma_3 = k. \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right)^A + 1 \quad (3.33)$$

k sabit değer.

3.5.3.5 Hoek kriteri

$$\tau_m - \frac{\tau_0}{\sigma} = B \left[\frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right]^C \quad (3.34)$$

τ_m :maksimum kesme gerilmesi

$$\tau_m = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (3.35)$$

σ_m :normal gerilme

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \quad (3.36)$$

B, C ve τ_0 sabitler olmak üzere pratik uygulamada $\tau_0 = \sigma_t$ alınır. Kırılmaya neden olan örnek için uygulanan maksimum kesme gerilmesi ve bu gerilmeye etki eden düzlem üzerinde normal gerilmeler gibi fiziksel ifadeler τ_m ve σ_m değerlerini verir. Bunlar Mohr gerilme dairesinin kırılma esnasındaki yarıçapıdır ve başlangıçtan kendi merkezine kadar olan uzaklıktır. Kırılma kriteri bu şekilde ifade edilirken Mohr kırılma dairesinin en tepesindeki noktanın pozisyonu tanımlanarak maksimum kesme gerilme noktası olarak ifade edilir. Ampirik olarak tanımlanan yöntemde τ_0 'ın σ_t 'ye eşit olduğundan bahsedilmiştir. Diğer yandan Bieniawski; eksenel olmayan çekme gerilmesi σ_t 'nin eksenel olmayan basınç gerilmesi σ_c 'nin 1/10'u kadar olduğunu belirtmektedir. Bu yüzden de eşitliği;

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_c} = B\left[\frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right]^C + 0.1 \quad (3.37)$$

olarak ifade edilmiştir.

Kaya Kütlesi İçin Kırılma Kriteri

Kaya ve kaya kütlelerinde, kaya kazılarının planlanmasında bazı ampirik kuvvet kriterleri kullanılır.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \left(m \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{1/2} \quad (3.38)$$

σ_1 : kırıldaki büyük asal gerilme

σ_3 : örneğe uygulanan küçük asal gerilme

σ_c : bozulmamış kayanın eksenel olmayan sıkışma kuvveti

m ve s ampirik sabitler, kayanın yapısal özelliklerine ve normal çevre basınçları altında kayanın kırılma derecelerine bağlıdır.

Madencilik uygulamalarında yer altı kazılarında planlama için gerekli kriterler kaya yapısının stabilite durumu için genel bir saptama yapılmasına izin vermez. İnşaat mühendislik uygulamalarındaki madencilik kazılarında var olan farklılıklardan dolayı stabilite konusunun farklı kalıpların içinde değerlendirilmesi gerekir. Bu fark yerel kaya kırılmalarında veya deformasyonlarındaki oran kısmen düşük olursa tünelcilikte kabul edilebilir olur.

Yer altı madenciliğindeki kabul edilebilir planlama kriterleri şunlardır;

- a- Tasarlama kriterlerinin temelini karşılaştırılmalı çalışmalar oluştur (potansiyel kırık zonlarının karşılaştırılması).
- b- Planlama kriterleri kaya kuvvetlerinin karşılaştırılması esasına dayanır (maden direklerinin kuvvetine).

- c- Planlama kriterleri limitli deformasyonların tasarlanma kriterlerine (kaya tuzu içinde madencilik) dayanır.
- d- Planlama kriterleri temel enerji değişimlerini kullanan tasarlama kriterlerine dayanır (kaya patlatılması için açığa çıkacak kritik enerji olanı)

3.6 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Tünel Tasarımı

Sonlu elemanlar yöntemi bilgisayarların gittikçe artan kullanım sonucunda sayısal metotların mühendislik hesaplarında önem kazanmasıyla birlikte hızla gelişmiştir. Metot, önceleri sadece yapısal analizler için geliştirilmiş olmasına rağmen, dayandığı teori ve prensiplerin genelliği ve bilgisayar programlamasında uygunluğu yüzünden bugün diğer birçok mühendislik alanlarında da kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde herhangi bir sürekli ortam veya yapı sonlu eleman denilen parçacıklarına bölünmektedir. Elemanlar birbirlerine düğüm noktaları denilen köşe noktalarında bağlanmaktadır. Basit bazı fonksiyonlar (genellikle polinomlar) seçilerek, eleman içindeki gerçek deplasman değişimi düğüm noktalarındaki değerler cinsinden yaklaşık olarak ifade edilirler. Düğüm noktalarındaki ve sonradan bulunması gereken deplasman bileşenlerine, serbestlik derecesi adı verilmektedir.

Metotta, önce bir eleman için davranış denklemleri kullanılarak, düğüm noktalarının deplasmanları hesaplanır. Tüm yapının davranış denklemleri ise, yapıyı oluşturan elemanların denge denklemlerinin elemanlar arasındaki deplasman sürekliliğini sağlayacak şekilde toplanmasıyla saptanır. Elde edilen bu denklemler bilinen deplasman sınır şartlarını sağlayacak şekilde değiştirildikten sonra, ortaya genellikle bilinmeyen değişkenleri deplasmanlar olana bir lineer cebirsel denklem takımı çıkar. Denklem takımının çözümü ile de düğüm noktalarındaki deplasmanlar hesaplanmış olur. Yapıda oluşan şekil değiştirme ve gerilme bileşenleri ise, hesaplanan deplasman değerlerinden, sonradan türev alınmak suretiyle elde edilir.

Sonlu eleman metodunun gelişmesi sonucunda bugün çok çeşitli mühendislik yapılarının analizini yapabilecek birçok sonlu eleman bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu tür programlarla, çeşitli rijit veya elastik sınır şartları ve çeşitli yükleme durumları altında, uzay ve düzlem kafes kirişler, uza ve düzlem çerçeveler,

düz veya katlanmış plaklar, plak kiriş sistemleri ve kabuk tipi yapıların statik ve dinamik gerilme analizleri kolaylıkla yapılabilmektedir.

3.6.1 Sonlu Elemanlar Metodunun Kullanım Esasları

Sonlu elemanlar metodunun (SEM) gerilme analizleri ve deplasmanların bulunmasında başlıca iki temel prensip uygulanmaktadır. Bunlardan ilki deplasman yöntemidir. Yöntemin temel işleyiş prensibi minimum potansiyel enerji ilkesini esas alan ve yer değiştirmeleri ilk bilinmeyen olarak tanımlayan yer değiştirme (deplasman) yöntemidir. Diğer yöntem ise minimum tamamlayan enerji prensibine dayanan ve gerilmeleri ilk bilinmeyen olarak benimseyen denge yöntemidir. Tünelcilikte minimum enerji prensibine dayanan yer değiştirme yöntemi kullanılmaktadır [42].

Modellenen yapının statik denge durumunun sağlanması için, uygun sınır şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Sonlu eleman analizinde özel bir durum tanımlanmadığı sürece, genel olarak modelin üst sınırı yatay ve düşey yer değiştirmelere açıktır. Modelin alt bölümü ise yatay hareketleri alabilme kabiliyetine sahip kayıcı mesnetler ile sınırlandırılır. Sol kenar sınır şartları için düşey yer değiştirmelere açık kayıcı mesnetler kullanılır. Model, tünel içinden destek elemanları ile sınırlandırılır. Klasik kafes elemanlar kaya bulonlarını, kiriş elemanlar ise iksa ve benzeri destek yapılarını modellemek için kullanılır. 2 ve 3-Boyutlu kabuk elemanlar, beton kaplama ve çelik plaka gibi sürekli destek yapılarının modellenmesi için uygundur.

3.6.2 SEM’de malzemenin tanımlanması

İzotropik (yön bağımlı olmayan) özellik gösteren bir kaya formasyonunda modellenecek bir iki boyutlu bir tünel modeli için tanımlanması gerekli olan tasarım parametreleri, elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), eleman kalınlığı (t) ve malzeme yoğunluğudur (γ). İzotropik ortama ait malzeme matrisleri düzlem-gerilme ve düzlem-birim deformasyon şartları için sırası ile aşağıda verilmiştir:

$$D = E/(1 - \nu) \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$D = \frac{E/(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

İzotropik şartlardaki 3-boyutlu sürekli elemanlar için malzeme matrisinin belirlenmesinde, kayma modülüne de (G) ihtiyaç duyulmaktadır. İzotropik şartlarda kullanılan parametreler, 3-boyutlu ortotropik şartlar için ise her farklı durum için ayrı ayrı kullanılmalıdır.

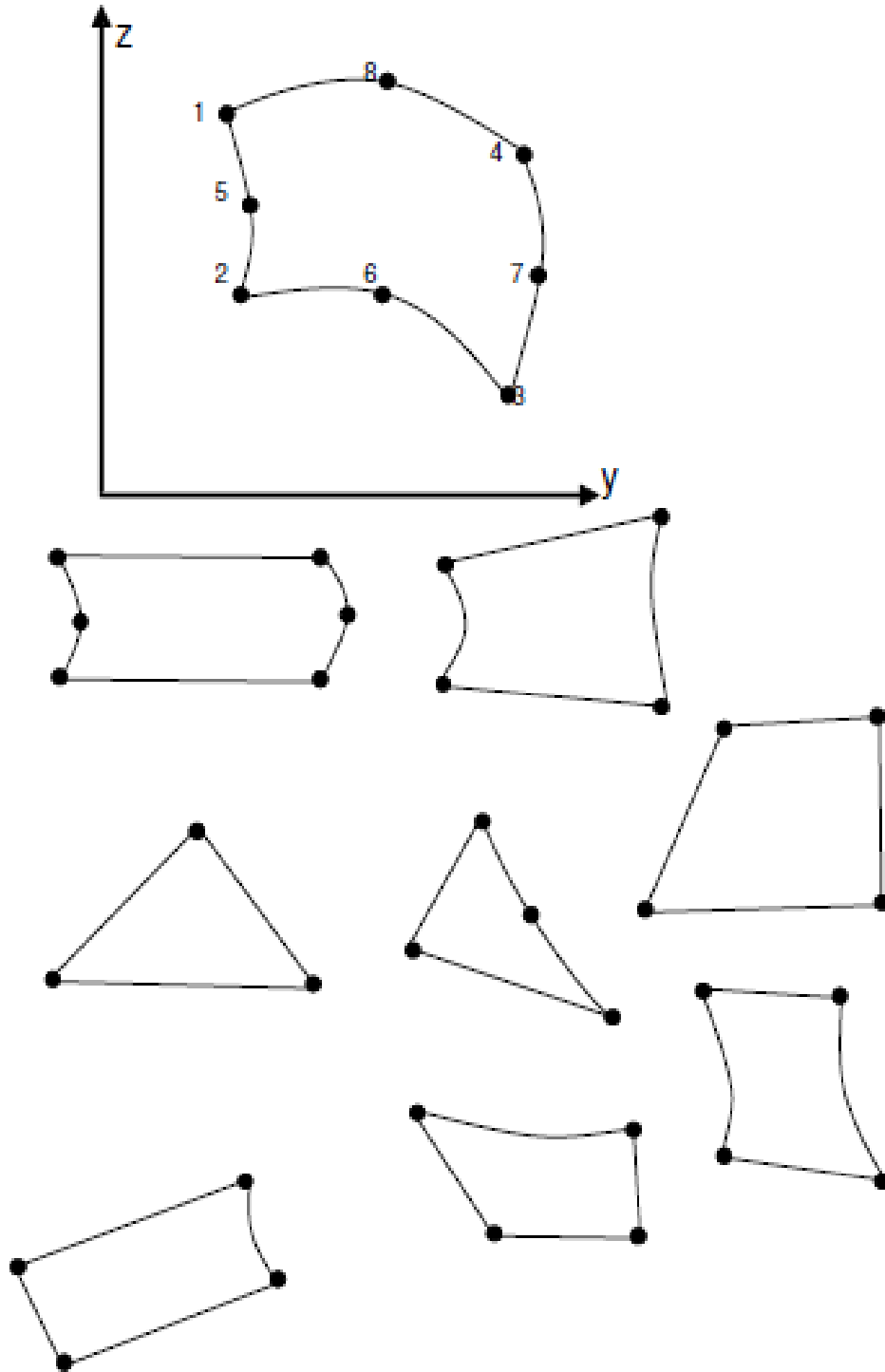
$$D = \begin{bmatrix} aE & bE & bE & 0 & 0 & 0 \\ & aE & bE & 0 & 0 & 0 \\ & & aE & 0 & 0 & 0 \\ & & & G & 0 & 0 \\ & & & & G & 0 \\ & & & & & G \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Yukarıdaki matriste a ve b değişkenleri kayma modülü ve elastisite modülüne bağlı değişkenlerdir.

3.6.3 SEM’de yüklerin tanımlanması

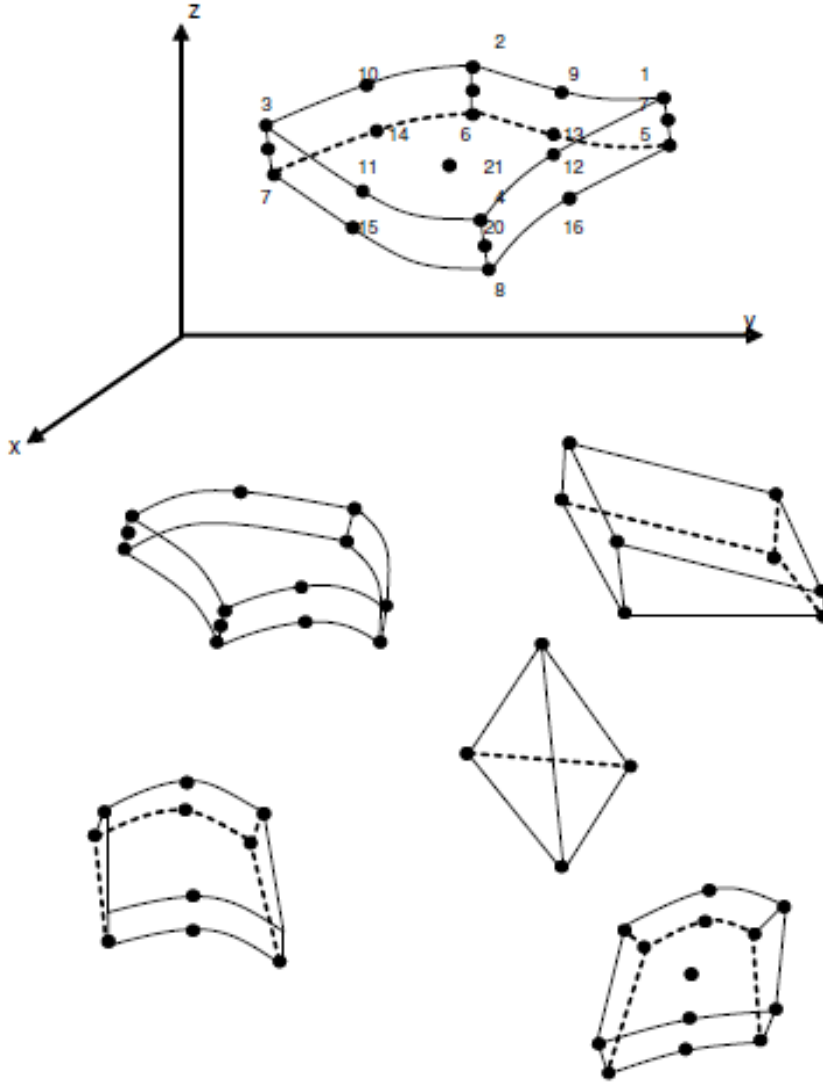
Sondaj sonuçları ile elde edilen jeolojik kayaç formasyonları, tüneli çevreleyen zemin içinde modellemeyi kolaylaştıracak homojen alt bölmelere ayrılır. SEM de elemanların atanması tünelin açıldığı kayaç yapısının geoteknik özelliklerine bağlıdır.

İki boyutlu elemanlar ile modellemede genellikle üç veya dört kenarlı sonlu elemanlar kullanılmakta ve bu iki boyutlu sonlu elemanlar, düzlem-gerilme, düzlem-birim deformasyon ve eksen simetrik analizler için kullanılmaktadır [43]. Şekil 3.20’de iki boyutlu tipik sonlu elemanlar ağı gösterilmektedir.



Şekil 3.20 : İki boyutlu tipik sonlu elemanlar [43]

Üç boyutlu elemanlar, tünellerde kesişimleri ve doğrusal olmayan tünelleri modellemek için kullanılmaktadırlar. Şekil 3.21’de iki boyutlu tipik sonlu elemanlar ağı gösterilmektedir [43].



Şekil 3.21 : Üç boyutlu tipik sonlu elemanlar[43].

SEM ile gerilme analizlerinde yüklemeler büyük önem taşımaktadır. Sonuçların gerçeğe yakın çıkması için yüklemelerin doğada oluşan yüklere en yakın değerlerde olması gerekir. Modele tesir eden yüklemeler, kaya kütesinden kaynaklanan tünelin taşıyıcı kabuğundan kaynaklanan yüklemelerdir. Ancak derin seviyelerde açılan tünellerde örtü yükünden kaynaklı jeolojik süreksizlik ve yapılanmalar ile bu yapı ve süreksizliklerin dinamik yönü önem kazanmaktadır [44]. Yükler sonlu elemanlara bölünmüş olan kaya kütesinin düğüm noktaları aracılığı ile etkitilir. Gerilme analizi ve deplasmanların tayinine iki farklı yöntem kullanılarak ulaşılır. Yüklerin bilindiği yer değiştirmelerin bilinmediği durumlardır. İkinci durumda ise bunun tam tersi olan yüklerin bilinmediği yer değiştirmelerin bilindiği durumlardır.

4. UYGULAMA PROJESİ

Bu çalışmada, “Karadeniz Sahil Yolu Projesi Arhavi Tüneli km: 207+815 – 208+815” geoteknik incelemesi ve sonlu elemanlar modeli ile analizleri yapılmıştır. Tünel güzergâhındaki kayaç formasyonlarına ait veriler, yapılan arazi ve sondaj çalışmaları ayrıntılı olarak incelenmiştir [45].

Türkiye'nin en büyük yol projelerinden olan Karadeniz Sahil Yolu Projesi kapsamında bölgede 12 tünelin yapımı tamamlanmıştır. Arhavi tüneli de bu tünellerden birisidir. Artvin ili sınırları içinde yer almaktadır. Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü tarafından Çayeli-Ardeşen-Hopa devlet yolu üzerinde inşa edilen çift tüplü Arhavi Tünelinin sağ tüpü (Km 207+815-Km 208+815) 1033 m ve sol tüpü (Km 207+840-Km 208+795) 955 m uzunluğundadır.

Gürcistan ile Doğu Karadeniz Bölgesinin önemli ileri; Rize, Trabzon, Artvin gibi illerimizi birbirine bağlayan, doğu-batı arasındaki geçişi sağlayan Arhavi Tünelleri sahil yolu projesinin en önemli adımlarındandır. Çalışmalar Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmekte, proje Emay Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Ticaret Ltd. Şti. tarafından hazırlanmıştır. Projenin yüklenicisi Cengiz Mapa-Makyol Ortak Girişimi olup, güzergâhta yapılan mekanik sondajlar ve jeofizik çalışmalar JFZ İnşaat Taahhüt Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. tarafından gerçekleştirilmiştir. Tünel, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ile açılmıştır.

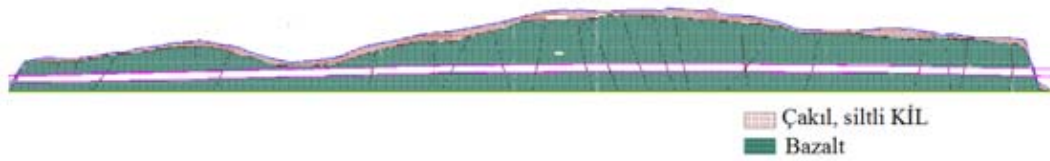
Arhavi tünelleri km 207+815 – 208+815 ait mühendislik jeolojisi plân ve boy kesiti Ek-A1’de sunulmuştur. 207+815 ve 208+815 km arasındaki sondaj verilerinden yola çıkarak yapılan değerlendirmede, güzergâh 4 benzer kayaç özellikleri gösteren birime ayrılmış, kayaç malzeme parametreleri homojenleştirilmiş bu dört birim aracılığı ile ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışma sonlu elemanlar metodu ile çalışan Plaxis 8.2 bilgisayar programı aracılığı ile modellenmiştir. Sonlu elemanlar metodu (SEM) ile çalışan bu programda modelleme yapılırken tünel kazı aşamaları üzerinde titizlikle durulmuştur ve model bu kazı aşamalarına uygun bir şekilde modellenmiştir. Tünelin aşamalı kazısı sırasında tünel tahkimatına gelen zorlamalar

incelenmiş bu zorlamalar sonucu oluşan tünel deformasyonları ile yüzey oturmaları incelenmiştir. Bilgisayar destekli modelleme işleminde öncelikle kazı aşamalarının belirlenmesi ile başlanacak daha sonra analizler ve sonuçları incelendikten sonra tahkimat kesitleri boyutlandırılacaktır. SEM metodu ile bulunan değerler, sınıflandırma sistemleri parametreleri ile karşılaştırılacaktır.

Analiz çalışmasına sondaj verilerinin incelenmesi ile başlanacaktır.

4.1 Yapılan sondajların değerlendirilmesi

Mühendislik jeolojisi incelemeleri kapsamında güzergâh üzerinde 32 adet düşey Karotsuz Sondaj (elektrik sondajı), 4 adet mekanik sondaj yaptırılmıştır. Mekanik sondajlardan 3 tanesi tünel güzergâhını kesecek şekilde yapılmıştır. Bu sondajlara ait verilerin ayrıntıları ekler bölümünde yer almaktadır. Mekanik sondaj verileri bu kısımda incelenecektir. Yapılan sondajlar üzerine belirlenen tünel boy kesiti Şekil 4.1 verilmiştir.

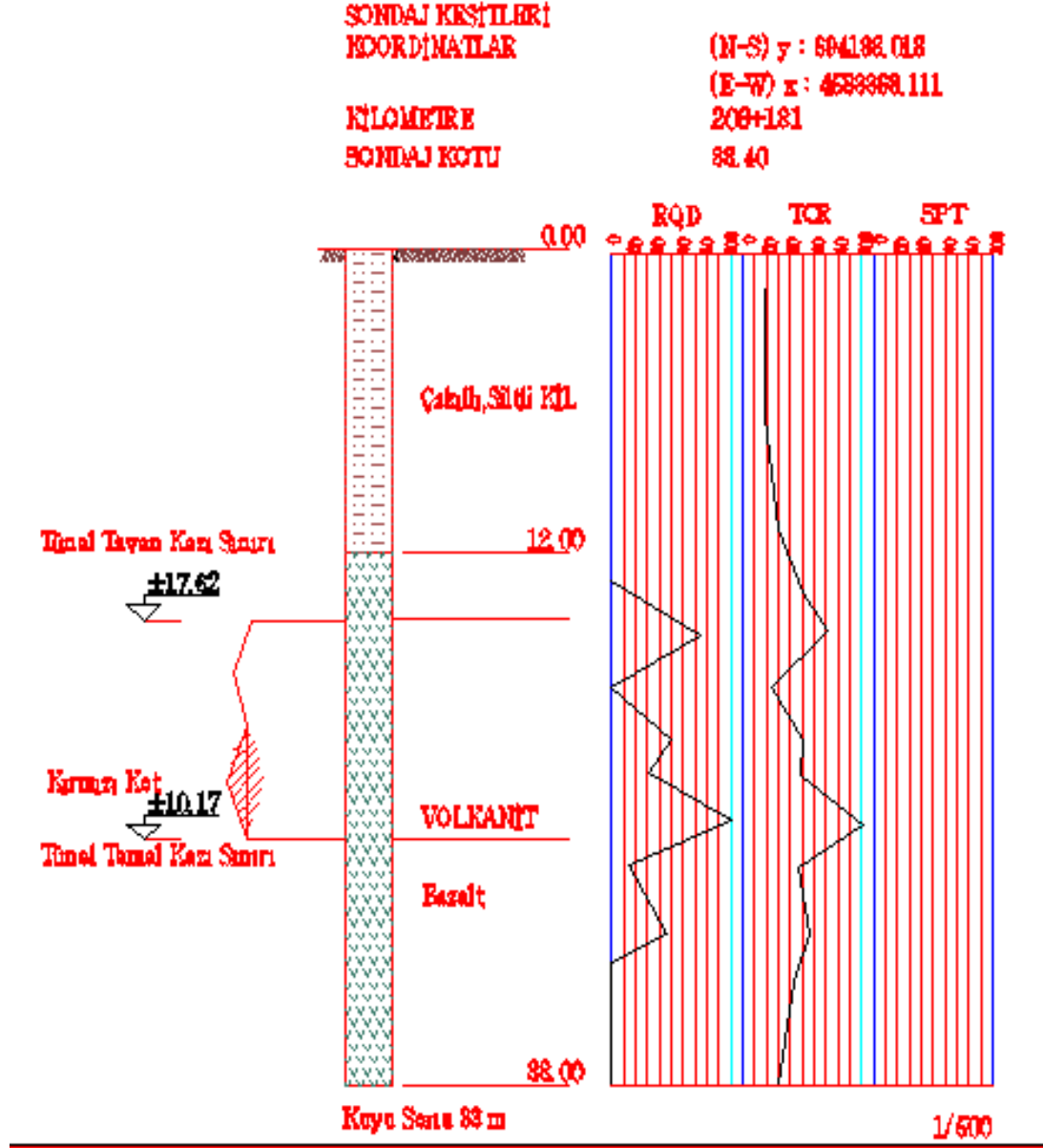


Şekil 4.1 : Arhavi tüneli genel formasyon

4.1.1 ASK-1 sondajı

Km 208+130'da, sağ tüp üzerinde yapılmıştır. Sondajda yeraltı su seviyesi bulgusuna rastlanmamıştır. İlk 12 m çakıllı siltli kumu takiben, 12.00-33.00 m'leri arası bazalt birimi kesilmiştir. Tünel eksenine bu birim içerisinde yer almaktadır. Kuyu sonu 33 metrede bırakılmıştır. Şekil 4,2'de sondajın kestiği birimler verilmiştir.

ASK 1

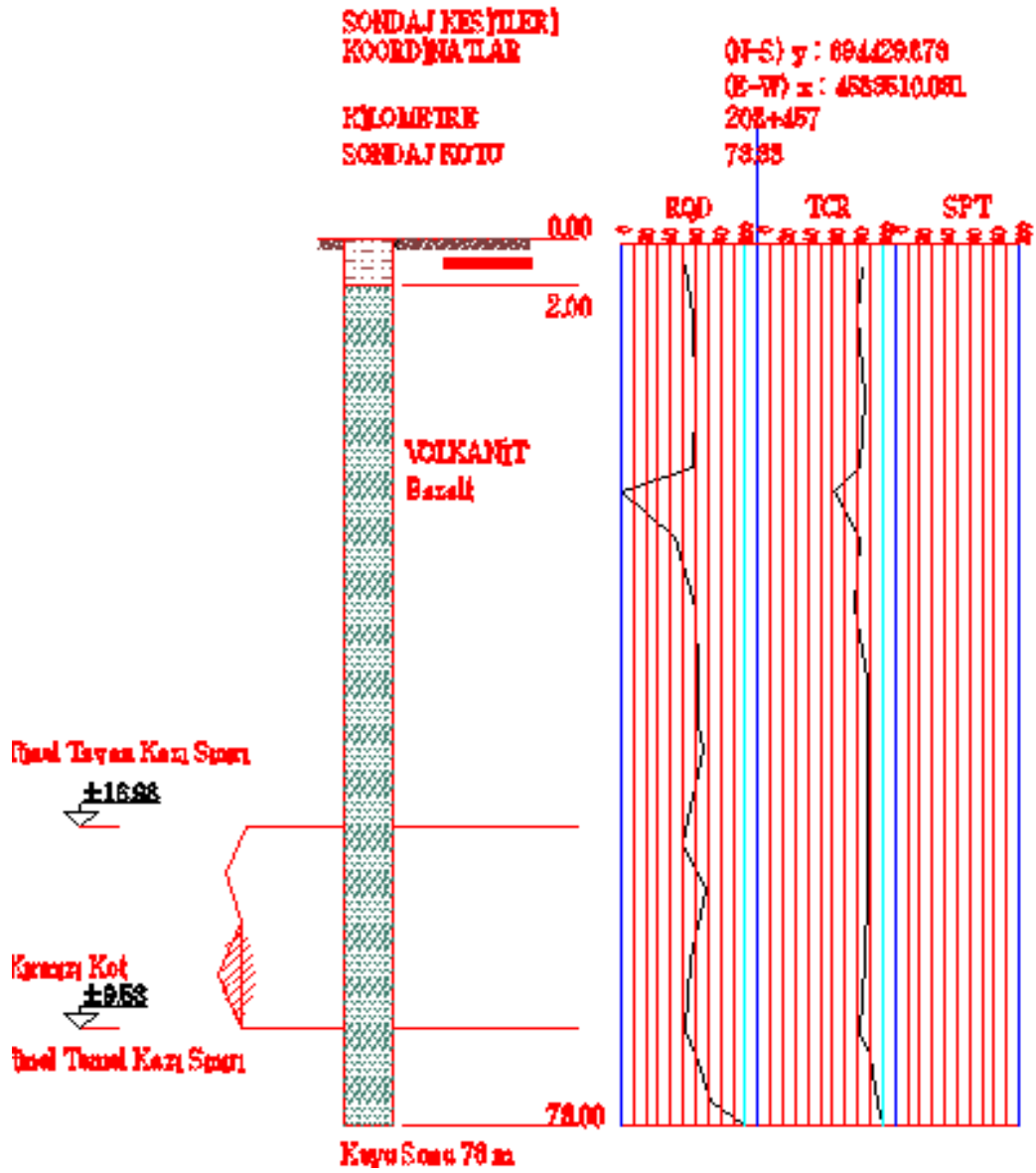


Şekil 4.2 : ASK-1 sondaj verileri

4.1.2 ASK-2 sondajı

Km 208+460'da, sağ tüpün, sağ yanında yapılmıştır. Sondajda yeraltı su seviyesi bulgusuna rastlanmamıştır. İlk 2 m çakıllı siltli kumu takiben, 2.00-73.00 m'leri arası volkanik bazalt birimi kesilmiştir. Kuyu sonu 73 metrede bırakılmıştır. Şekil 4.3'de ASK-2 sondajının kestiği birimler verilmiştir.

ASK 2

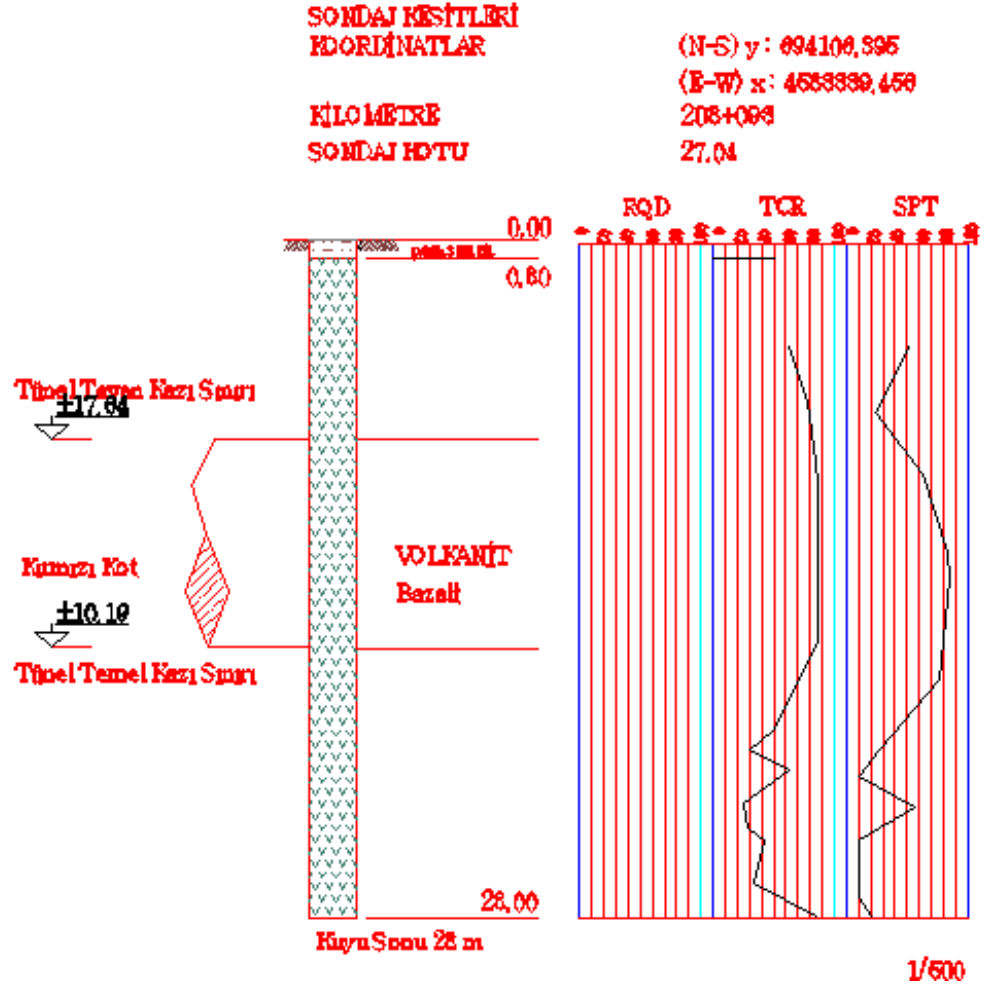


Şekil 4.3 : ASK-2 sondaj verileri

4.1.3 ASK-3

Km 208+090'da, sol tüp ekseninde yapılmıştır. Sondajda yeraltı su seviyesi bulgusuna rastlanmamıştır. İlk 0.80 m çakıllı siltli kumu takiben, 0.80-28.00 m'leri arası volkanik bazalt birimi kesilmiştir. Tünel eksenine volkanik bazalt içerisinde yer almaktadır. Kuyu sonu 28 metrede bırakılmıştır. Şekil 4.4'de ASK-3 sondajının kestiği birimler verilmiştir.

ASK 3



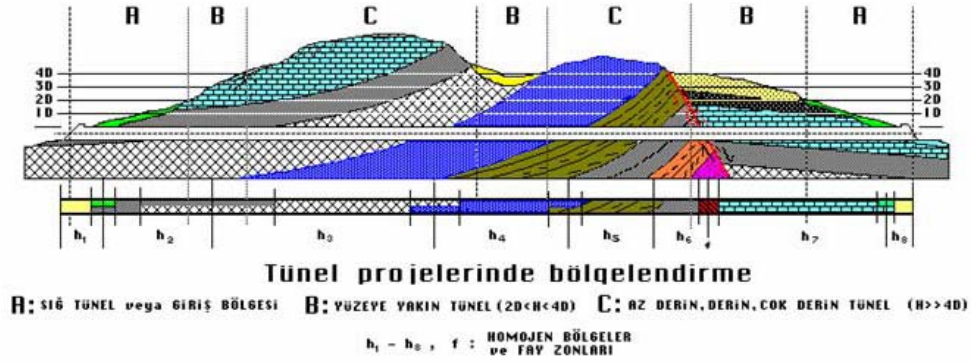
Şekil 4.4 : ASK-3 sondaj verileri

Yapılan sondaj çalışmalarının ayrıntıları Ekler bölümünde verilmiştir.

4.2 Homojen bölgelendirme

Yeraltı kaya yapısı güzergahı jeomorfoloji, jeoloji veya mühendislik jeolojisi açısından kendi içerisinde benzer özellik ve davranış gösteren kesimlere ayrılabilir. Homojen bölgelendirme (dar anlamda kayaç sınıfı) olarak tanımlanan bu çalışma ile yapım sırasında alınması gereken önlemler tariflenebilmektedir. Bu bölgeler önlem, işlem, yöntem değişimi gerektirmeyen ve risk açısından benzerlik gösteren kesimlerdir. Homojen bölgelendirme yapılırken kesimler; zemin-kaya kökeni, türü, dokanak sınırları, yeraltı su seviyesi, zemin kayaç özellikleri, niteliği, niceliği,

süreksizlikler, ayrışma durumu, kaya kalitesi, porozite-geçirimsizlik durumu, kayacın erime-kabarma-şışme özellikleri, geomekanik özellikler, kazılabilirlik, delinebilirlik, patlatılabilirlik özellikleri, güzergah morfolojisi ile yeraltı kaya yapısı ilişkisi (sığ-derin-çok derin tünel, portal bölgesi, yamaç tüneli, vadi-akarsu altında yer alan tünel, heyelan sahası vb) gibi özellikler dikkate alınarak ayrılırlar [32]. Şekil 4.5’de tünel güzergahı için bir bölgelendirme örneği verilmiştir.

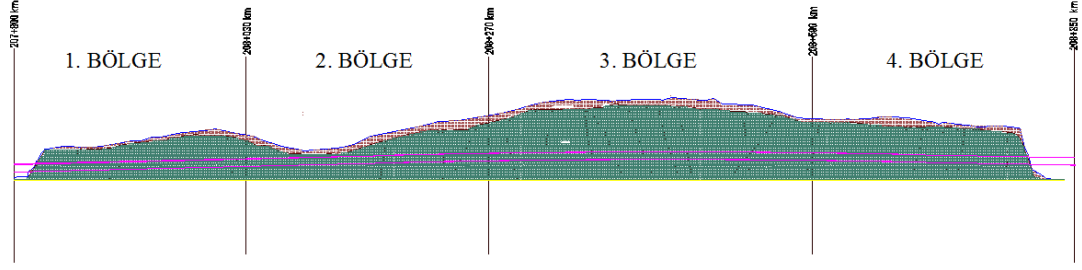


Şekil 4.5 : Tünel projelerinde homojen bölgelendirme [37].

Arhavi Tünelinin sağ tüpü (Km 207+815-Km 208+815) 1033 m ve sol tüpü (Km 207+840-Km 208+795) 955 m uzunluğundadır. Yapılan sondaj çalışmaları incelendiğinde, jeomorfoloji, jeoloji ve mühendislik jeolojisi parametreleri neticesinde tünel güzergahı benzer özellik gösteren, 4 homojen birime ayrılmıştır. Bu birimler;

1. Bölüm, tünel güzergahının +207.815 km ile 208+030 km arası, toplam 0.215 km’dir.
2. Bölüm, tünel güzergahının 208+030 km ile 208+270 km arası, toplam 0.240 km’dir.
3. Bölüm tünel güzergahının 208+270 km ile 208+590 km arası, toplam 0.320 km’dir.
4. Bölüm tünel güzergahının 208+590 km ile 208+815 km arası, toplam 0.260 km’dir.

Şekil 4.6’da bu 4 birimin tünel güzergahı üzerinde gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.6 : Tünel güzergahında homojenleştirilmiş birimler

4.3 Mühendislik jeolojisi

Mühendislik jeolojisi incelemesi kapsamında, yapılan sondaj çalışmaları neticesinde saha ve laboratuvar çalışmalarından yola çıkarak, homojenleştirilmiş 4 birim için güzergahta yer alan kayaçların fiziksel özellikleri ve litojileri belirlenmiştir. Çizelge 4.1’de +207.800 km ile 208+030 km arasında yer alan, birinci bölüme ait mühendislik jeolojisi verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.1 : 1. Bölüme ait mühendislik jeolojisi [45]

Litojji	Örtü	Çakıllı, Siltli, Kil-Bazalt
	Tünel Üst Yarısı	Tüfit
	Tünel Alt Yarısı	Tüfit
Kayaçların Fiziksel Özellikleri	Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	24
	Su Geliri	Yok
	RQD (Tünel aynasında)	40
	Ayrışma Durumu	Ayrışmamış
	Süreksizlikler	Kırıklı, Çatlaklı, Az Açıklıklı, Az Pürüzlü, Ayrışmamış.

Çizelge 4.2’de +208+030 km ile 208+270 km arasında yer alan, ikinci bölüme ait mühendislik jeolojisi verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.2 : 2. Bölüme ait mühendislik jeolojisi [45]

Litojji	Örtü	Çakıllı, Siltli, Kil-Bazalt
	Tünel Üst Yarısı	Tüfit-Bazalt
	Tünel Alt Yarısı	Tüfit-Bazalt
Kayaçların Fiziksel Özellikleri	Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	24
	Su Geliri	Yok
	RQD	25 - 50
	Ayrışma Durumu	IV Çok Ayrışmış
	Süreksizlikler	Kırıklı, çatlaklı, yer yer parçalı, az açıklıklı, az pürüzlü, çok ayrışmış.

Çizelge 4.3’de 208+270 km ile 208+590 km arasında yer alan, üçüncü bölüme ait mühendislik jeolojisi verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.3 : 3. Bölüme ait mühendislik jeolojisi [45].

Litoloji	Örtü	Çakıllı, Siltli, Kil-Bazalt
	Tünel Üst Yarısı	Bazalt
	Tünel Alt Yarısı	Bazalt
Kayaçların Fiziksel Özellikleri	Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	25
	Su Geliri	Yok
	RQD	71
	Ayrışma Durumu	Ayrışmamış
	Süreksizlikler	Kırıklı, çatlaklı, az açıklıklı, az pürüzlü, ayrışmamış.

Çizelge 4.4’de 208+590 km ile 208+850 km arasında yer alan, dördüncü bölüme ait mühendislik jeolojisi verileri yer almaktadır.

Çizelge 4.4 : 4. Bölüme ait mühendislik jeolojisi [45].

Litoloji	Örtü	Çakıllı, Siltli, Kil-Bazalt
	Tünel Üst Yarısı	Bazalt
	Tünel Alt Yarısı	Bazalt
Kayaçların Fiziksel Özellikleri	Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	25
	Su Geliri	Az-Orta Derecede
	RQD	50
	Ayrışma Durumu	Ayrışmamış
	Süreksizlikler	Kırıklı, çatlaklı, az açıklıklı, az pürüzlü, ayrışmamış.

4.3.1 Geomekanik özellikler

Mühendislik jeolojisi incelemesi kapsamında, yapılan sondaj çalışmaları neticesinde saha ve laboratuvar çalışmalarından yola çıkarak, homojenleştirilmiş 4 birim için güzergahta yer alan kayaçların Geomekanik özellikleri belirlenmiştir. Çizelge 4.5’de tünel güzergahı boyunca yer alan homojen bölümlerine ait geomekanik parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Tüm bölümlere ait geomekanik parametreler [45].

Böl. No		Parametre	Değer	Böl. No		Parametre	Değer
Bölüm 1	Arazi deneyleri	c (MPa)	0.18	Bölüm 3	Arazi deneyleri	c (MPa)	0.62
		ψ (Derece)	36			ψ (Derece)	52
		E (kN/m ²)	1.7 E+6			E (kN/m ²)	15 E+6
		G (GPa)	0.68			G (GPa)	6
		$\sigma_{\text{basınç}}$ (MPa)	0.5			$\sigma_{\text{basınç}}$ (MPa)	6.71
	Lab. deneyleri	E (kN/m ²)	-		Lab. deneyleri	E (kN/m ²)	(13.8-15-19.3) E+6
		ν (Poisson Oranı)	0.25			ν (Poisson Oranı)	0.25
		$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	-			$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	4
		$\sigma_{\text{basınç}}$ (MPa)	-			$\sigma_{\text{basınç}}$ (MPa)	71
Bölüm 2	Arazi deneyleri	c (MPa)	0.21	Bölüm 4	Arazi deneyleri	c (MPa)	0.68
		ψ (Derece)	47			ψ (Derece)	49
		E (kN/m ²)	0.7 E+6			E (kN/m ²)	5.6 E+6
		G (GPa)	0.28			G (GPa)	2.24
		$\sigma_{\text{basınç}}$ (MPa)	1.19			$\sigma_{\text{basınç}}$ (MPa)	5.86
	Lab. deneyleri	E (kN/m ²)	6.25 E+6-11.2 E+6		Lab. deneyleri	E (kN/m ²)	(12.5-13.8) E+6
		ν (Poisson Oranı)	0.25			ν (Poisson Oranı)	0.25
		$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	0.6			$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	6.38
		$\sigma_{\text{basınç}}$ (MPa)	23-35.62			$\sigma_{\text{basınç}}$ (MPa)	97.6

4.3.2 Geoteknik özellikler

Geoteknik özellikler olan kaya sınıflandırma sistemlerinden başlıcaları yapılan geoteknik çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Çizelge 4.6'da tünel aynasındaki geoteknik parametreler ve değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Tüm bölümlere ait geoteknik parametreler ve değerleri [45].

Böl.No	Parametre	Değer	Böl.No	Parametre	Değer
Bölüm 1	RMR	47	Bölüm 3	RMR	61
	Q	0.41		Q	8.87
	ÖNORM B-2203	B3		ÖNORM B-2203	B1
Bölüm 2	RMR	55-60	Bölüm 4	RMR	62
	Q	0.52-6.25		Q	1.04
	ÖNORM B-2203	B3-B1		ÖNORM B-2203	B2

Yapılan incelemeler neticesinde belirlenen NATM sınıflamalarına göre “KGM, NATM Uygulamalı Yer Altı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi” ‘ne dayanılarak destekleme elemanları önerilmiştir [36]. Çizelge 4.7’de sırasıyla önerilen destekleme sistemleri ve kaya destekleme sınıfı dağılımı gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : Tüm bölümlere ait önerilen tahkimat sistemi [45].

Böl. No	Tahkimat Elmanı	Değer	Böl. No	Tahkimat Elmanı	Değer
Bölüm 1	Püskürtme Beton	25	Bölüm 3	Püskürtme Beton	15
	Çelik Hasır	2 Kat		Çelik Hasır	1 Kat
	Çelik İksa	I 160		Çelik İksa	Yok
	Kaya Bulonu (Ø28mm/4m)	13 Ad		Kaya Bulonu (Ø28mm/4m)	5 Ad
Bölüm 2	Püskürtme Beton	25-15	Bölüm 4	Püskürtme Beton	20
	Çelik Hasır	2 Kat-1 Kat		Çelik Hasır	1 Kat
	Çelik İksa	I 160- Yok		Çelik İksa	Yok
	Kaya Bulonu (Ø28mm/4m)	13 Ad - 5 Ad		Kaya Bulonu (Ø28mm/4m)	11 Ad

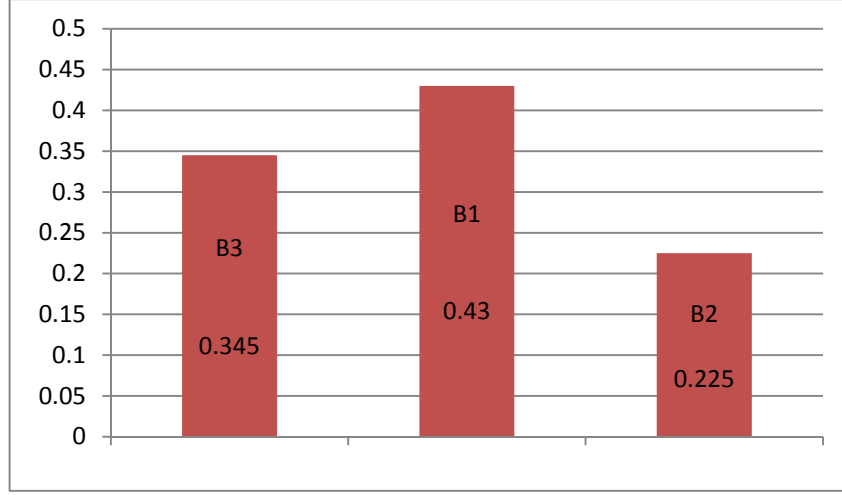
Destekleme elemanı olarak belirlenen çelik hasır Q221/221 hasır çeliktir. Bölüm 1, Bölüm 2’nin ilk yarısı ve Bölüm 4’de çelik iksa olarak I160 iksa kullanılmış geri kalan bölümlerde çelik iksaya ihtiyaç duyulmamıştır. Kaya bulonu olarak ø28/4m nervürlü çelikten bulonlar kullanılmıştır.

4.4 Sonlu elemanlar yöntemi ile stabilite analizi

Bu tez kapsamında incelenen Arhavi tüneline Önorm B 2203’e göre üç farklı kaya destekleme sınıfı belirlenmiş ve bunlara göre tahkimat sistemi seçimi yapılmıştır. Şekil 4.7’de seçilen kaya destekleme sınıfları ve bunların tünel güzergahı boyunca yüzdeleri verilmiştir. Çizelge 4.8’de belirlenen kaya destekleme sınıfları, tünel güzergahındaki uzunlukları ve toplam uzunluğa göre yüzdesi verilmektedir.

Çizelge 4.8 : Tüm bölümlere ait kaya destekleme sınıfı ve yüzdeleri

Böl No	Km	Uzunluk	Yüzde	ÖNORM B-2203
Bölüm 1	207+815- 208+030	215	0.215	B3
Bölüm 2/1	208+030-208+160	130	0.13	B3
Bölüm 2/2	208+160-208+270	110	0.11	B1
Bölüm 3	208+270-208+590	320	0.32	B1
Bölüm 4	208+590-208+815	225	0.225	B2



Şekil 4.7 : Kaya destekleme sınıfı ve yüzdeleri.

Analizlerde 3 destekleme sınıfına göre tahkimat belirlenmiş, ilgili tünel bölümlerine ait örtü kalınlıkları ayrı ayrı girilerek modelleme yapılmıştır. Modellenip analizi yapılan tünel kesitleri, temsil ettiği aralıklar, örtü kalınlıkları ve km'leri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9 : Analizi yapılan modeller

Böl No	Temsil ettiği aralık	ÖNORM B 2203	Örtü Kalınlığı
Model 1	207+815- 208+160	B3	12.57
Model 2	208+160-208+590	B1	63.71
Model 3	208+590-208+815	B2	20

Arhavi tünelinin, sonlu elemanlar metodu ile yapılan stabilite analizlerinde Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmıştır. Hesaplamalar plastikleşme teorisine göre yapılmıştır. Plaxis V.8.2 programı hesaplamalarını kademeli inşaat (stage construction) prensibine göre yapmaktadır.

4.4.1 Program girdileri

Plaxis programı ile yapılan modellemede, programa tünel geometrisinin girilmesinin ardından, zemin parametreleri tanımlanmaktadır. Bu parametreler, zeminin birim hacim ağırlığı (γ), içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyonu (c), Elastisite Modülü (E) ve Poisson oranı (ν), girilmektedir.

Tahkimat elemanları programa tanıtılırken, “plate (plaka)” adı verilen eleman türü kullanılır. Püskürtme beton ve çelik iksa gibi destekleme elemanları aynı kesitte yer alması dolayısı ile rijitlik parametreleri ayrı ayrı hesaplanmakta ve toplamaları “plate” özelliği olarak programa verilmektedir. Tahkimat elemanları için programa girilen parametreler aşağıda yer almaktadır.

E: malzeme elastisite modülü kN/m^2

h = malzeme kalınlığı

Bulonlar için A, bulonun kesit alanıdır.

I:Atalet momenti

w (weight) = $\gamma_{\text{malzeme}} \times h$

v: malzeme poisson oranı

$d = ((12EI)/(EA))^{1/2}$ olup program tarafından hesaplanmaktadır

Bu değerler her kaya destekleme sınıfı için hesaplanacak ve veriler programa girilecektir.

4.5 Tünel analizleri ve modelleme

Tünel güzergahı boyunca 3 tip destekleme sistemi belirlenmiştir. Bu destekleme sistemleri için ayrı ayrı program girdileri hesaplanmıştır.

4.5.1 Model 1 analizleri

Modellemeye model 1 kısmında kullanılan tahkimat elemanlarının statik değerleri girilerek başlanacaktır.

Püskürtme beton;

Kalınlık $h = 25 \text{ cm} = 0.25 \text{ m}$

$E = 15\,000\,000 \text{ kPa}$

$A = b \times h = 1 \times 0.25 = 0.25 \text{ m}^2$ (Birim genişlik için alan)

$I = b.h^3 / 12 = 0.25^3 / 12 = 0.00130 \text{ m}^4$

$EA = 15\,000\,000 \times 0.25 = 3\,750\,000 \text{ kN/m}$

$EI = 15\,000\,000 \times 0.00130 = 19531.25 \text{ kNm}^2/\text{m}$

$$\nu = 0.2$$

$$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$w = 24 \times 0.25 = 6 \text{ kN/m/m}$$

Çelik İksa (I160);

$$h = 16 \text{ cm} = 0.16 \text{ m}$$

$$E = 210\,000\,000 \text{ kPa}$$

$$A = 22.8 \text{ cm}^2 = 0.00228 \text{ m}^2$$

$$I = 0.0869 \text{ m}^4$$

$$EA = 210\,000\,000 \times 0.00228 = 478\,800 \text{ kN/m}$$

$$EI = 210\,000\,000 \times 0.0869 = 182\,490 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$$

$$w = 78.5 \times 0.16 = 12.56 \text{ kN/m/m}$$

Kaya Bulonu;

$$E = 210\,000\,000 \text{ kPa}$$

$$d = 28 \text{ mm } (\varnothing 28) = 0.028 \text{ m}$$

$$A = \pi (d/2)^2 = 3.14 \times (0.028/2)^2 = 0.000615$$

$$EA = 210\,000\,000 \times 0.000615 = 129\,150 \text{ kN/m}$$

Püskürtme beton ve çelik iksanın toplam dayanım parametreleri ise şunlardır;

$$EA_{\text{toplam}} = EA_{\text{pb}} + EA_{\text{iksa}} = 3\,750\,000 + 478\,800 = 4\,228\,800 \text{ kN/m}$$

$$EI_{\text{toplam}} = EI_{\text{pb}} + EI_{\text{iksa}} = 19531.25 + 182\,490 = 202\,021.25 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

$$w_{\text{toplam}} = 6 + 12.56 = 18.56 \text{ kN/m/m}$$

$$\nu_{\text{ort}} = 0.25$$

Modelleme yapılırken T1 ve T2 tünellerinin gerek aynı kayaç formasyonunda olması gerekse iki tünel arası mesafenin birbirine etki yapmayacak kadar uzak olması sebebi ile sadece T1 tüneli modellenecek ve çalışma bu tünel üzerinden yapılacaktır.

Kazı aşaması olarak, üst yarı ve alt yarı kazıları olmak üzere iki aşamalı kazı düşünülmüştür. Tünel kazı hattı yarıçapı $R=6.15$ m'dir [46]. Modelleme bu kazı çapına göre yapılmıştır. Modellemede kullanılan Jeomekanik parametreler Çizelge 4.5'den alınmıştır. Buna göre;

$$c = 0.18 \text{ MPa}$$

$$\psi = 36^\circ$$

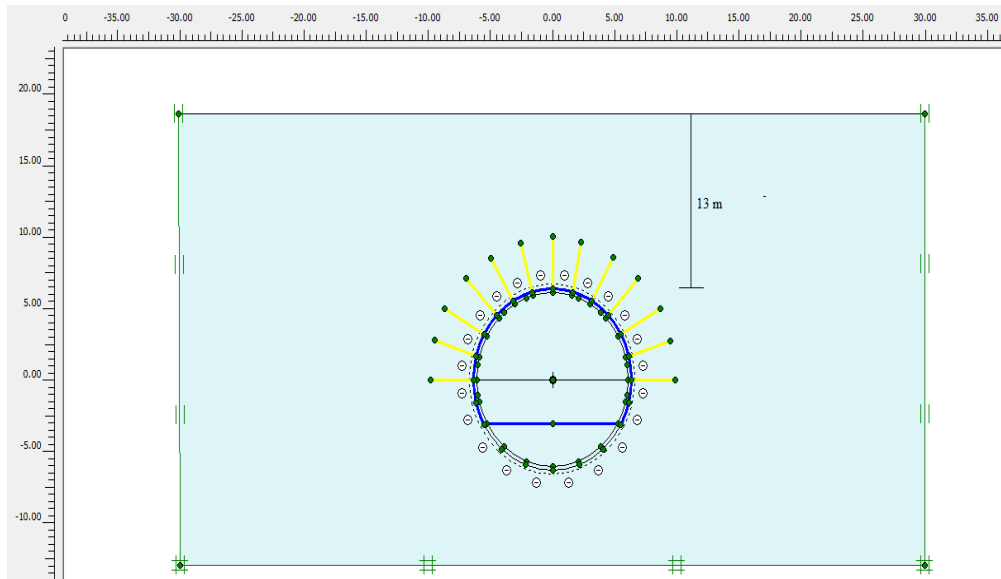
$$E=1.7 \text{ E}+6 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\text{basınç}} = 0.5 \text{ MPa}$$

$$\nu=0.25 \text{ olarak alınmıştır.}$$

4.5.1.1 Geoteknik modelin oluşturulması

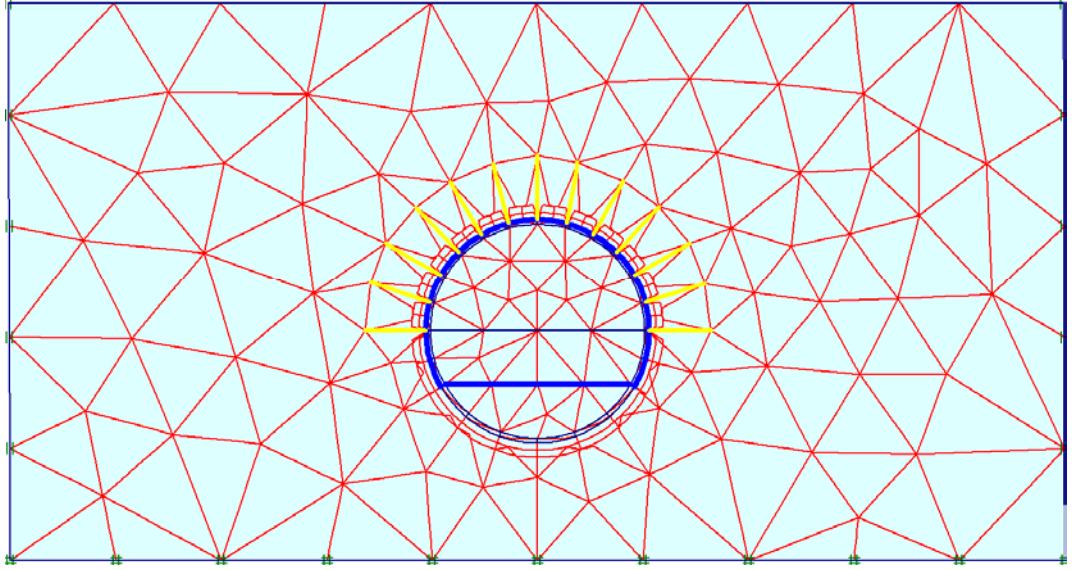
Tünel aynası formasyonu Tüfit özellik göstermekte olup tünelin güzergahının bulunduğu kotta herhangi bir yer altı suyu etkisi yoktur. Kayaçlarda süreksizlik durumları gözlenmemiştir. Modellenen tünel kesiti tünel güzergahının minimumu örtü kalınlığına ait olan bölgesidir. Örtü kalınlığı 12.57 metredir. Sistemin Plaxis programında modellenmesi Şekil 4.8'de görüldüğü gibidir. Şekil 4.8'den de anlaşılacağı gibi geometrik model tünel ekseninin oturduğu 0 kotu ile 30 m yüksekte bulunan yeryüzü seviyesi arasında kurulmuştur. Tünel dairesinin radye kısmında bulunan 120° kısım 70 cm invert betonu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.8 : Model-1 tünel geometresinin modellenmesi.

NATM’de dikkat edilmesi gereken en önemli unsurların başında tünel kaplamasının uygulanma zamanıdır. İki tip tünel kaplaması vardır. Tünel kazısı ardından hemen uygulanan geçici kaplama ve tünel kazı aşaması sonrası tünel cidarındaki deformasyonların sıfırlanmasının ardından uygulanan kalıcı kaplamadır.

Geometrik sisteme malzeme özellikleri girilmesinden sonra sonlu elemanlar ağı tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar ağı Şekil 4.9’da görülmektedir.



Şekil 4.9 : Model 1 sonlu elemanlar ağının oluşturulması

Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra kazı aşamaları tanımlanarak hesaplamalara geçilmiştir. Her kazı durumu için tünel kaplamasına gelen asal gerilmeler ve deformasyon zorlaması ve yüzey oturmaları farklıdır. Bu aşamaların her birinin sırasıyla incelenmesi SEM metodu ile yapılan analizlerin olmazsa olmazıdır. Tahkimat tüm aşamalar arasında en elverişsiz olanına göre yapılır. Kazı ve tahkimat aşamalarının sıralanışı programa Çizelge 4.10’deki sıra ile tanımlanmıştır.

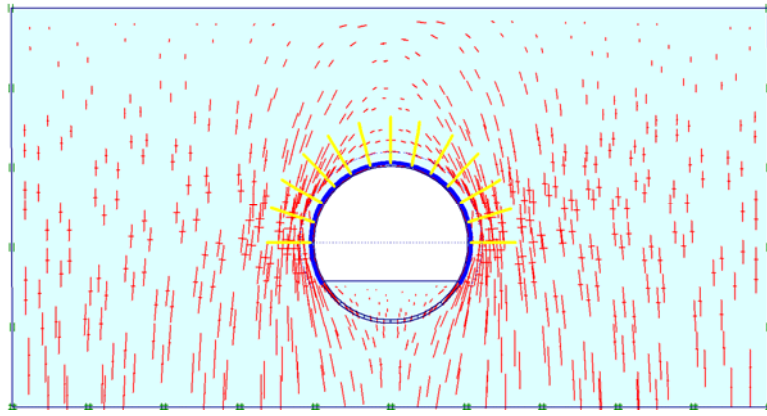
Çizelge 4.10 : Kazı ve tahkimat aşamaları.

Aşama sırası	Aşamanın Tanımı
1	Kazı öncesi durum
2	Tünel üst yarı kazısının yapılması.
3	Tünel üst yarı tahkimatının yapılması.
4	Tünel alt yarı kazısının yapılması.
5	Tünel alt yarı tahkimatının yapılması.

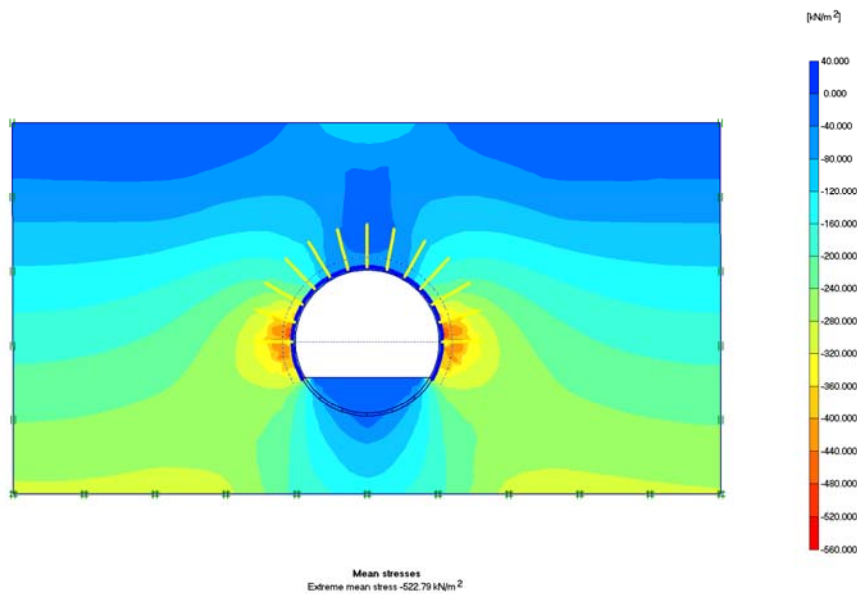
Aşamalar programa tanımlandıktan sonra hesaplamalara geçilmiştir. Hesaplarda plastik hesap kullanılmıştır.

4.5.1.2 Tünel çevresinde oluşan gerilmeler

Tünel kazısı ve tahkimatının yapılması ardından oluşan, ikincil gerilme ve deformasyon durumları resimler ve maksimum değerler incelenerek belirlenecektir. Şekil 4.10'da tünel kazısı sonrasında oluşan efektif asal gerilmelerin yönelişi verilmiştir. Şekil 4.10'dan da anlaşıldığı gibi tünel kazısının yapılmasının ardından tünelin tavanında ve omuzlarında asal gerilmelerin yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 4.11'de asal gerilmelerin değer skalası Verilmiştir. Program çıktısına göre basınç gerilmeleri (-), çekme gerilmeleri ise (+) işaretlidir. Maksimum gerilme şekilden de anlaşılabacağı üzere yan duvarlarda oluşmaktadır. Maksimum asal gerilme değeri -523 kN/m^2 olarak okunmaktadır. Maksimum asal gerilmelerin oluştuğu bölge asal gerilmelerin birikim yaptığı yan duvarlar bölgesindedir.



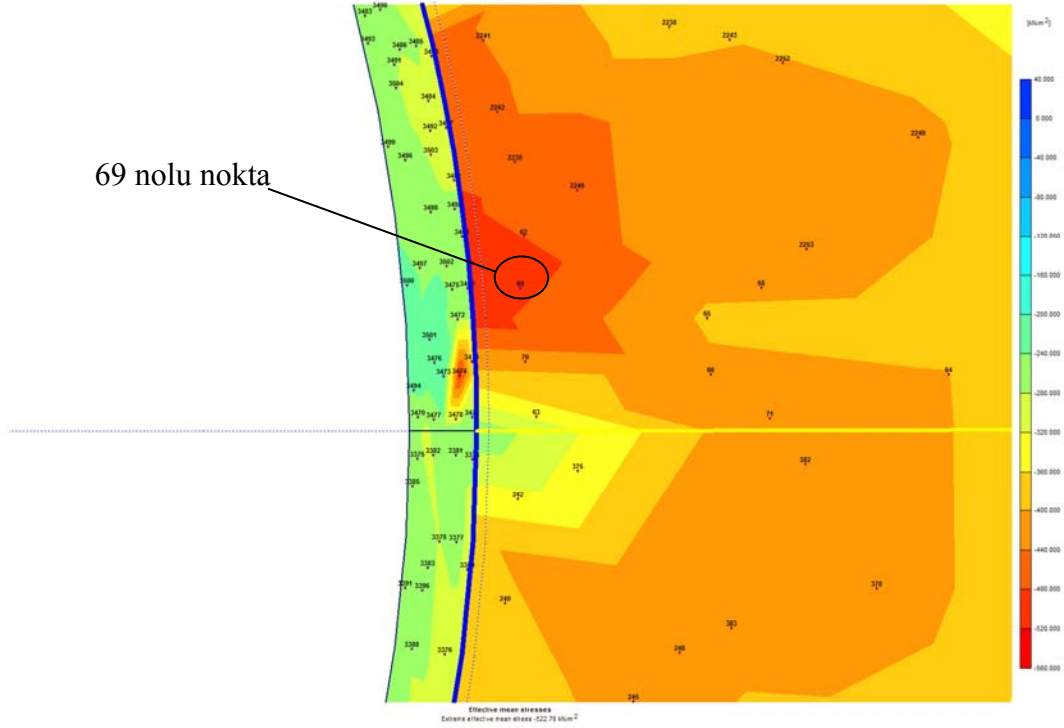
Şekil 4.10 : Model 1 kazı sonrasında oluşan efektif asal gerilmelerin yönelimi.



Şekil 4.11 : Model 1 kazı sonrası maksimum asal gerilmeler.

Maksimum basınç gerilmesinin oluştuğu yan duvarlara Şekil 4.12’de daha yakından bakılmıştır.

“



Şekil 4.12 : Model 1 maksimum gerilme noktası

Maksimum basınç gerilmesinin oluştuğu 69 nolu gerilme noktasında, oluşan basınç gerilmeleri şekil 4.13’de verilmektedir.

Stress Point	X [m]	Y [m]	σ_{xx} [kN/m ²]	σ_{yy} [kN/m ²]	σ_{xy} [kN/m ²]	σ_{zz} [kN/m ²]
69	6.512	0.529	-127.808	-1182.790	59.158	-219.055

Şekil 4.13 : Model 1 maksimum basınç gerilmeleri

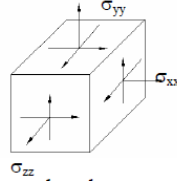
Şekil 4.13’e göre basınç gerilmeleri;

$$\sigma_{xx} = -127 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{yy} = -1182.79 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{zz} = -219.055 \text{ kN/m}^2$$

Şekil 4.14’de basınç gerilmelerinin yönleri görülmektedir.



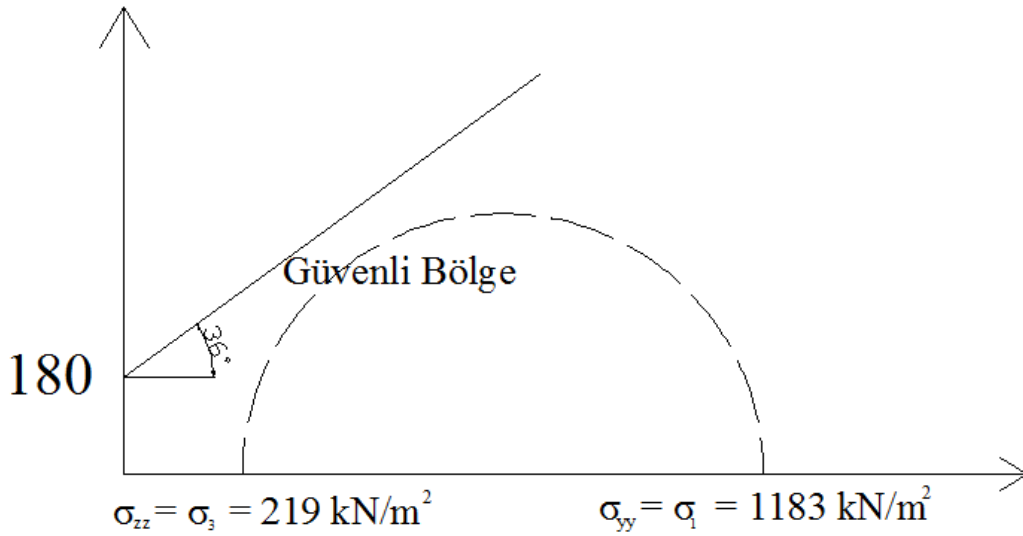
Şekil 4.14 : Asal gerilmeler

Burada yer alan kayaç Tüfit olup dayanım özellikleri;

$$c = 180 \text{ kPa}$$

$$\phi = 36^\circ \text{ dir.}$$

Maksimum gerilmeler için Mohr Zarfı çizildiğinde maksimum gerilmenin kayaç dayanımını aşmadığı ve güvenli tarafta kaldığı görülmektedir. Kayaca ilişkin Mohr zarfı Şekil 4.15’de verilmektedir.

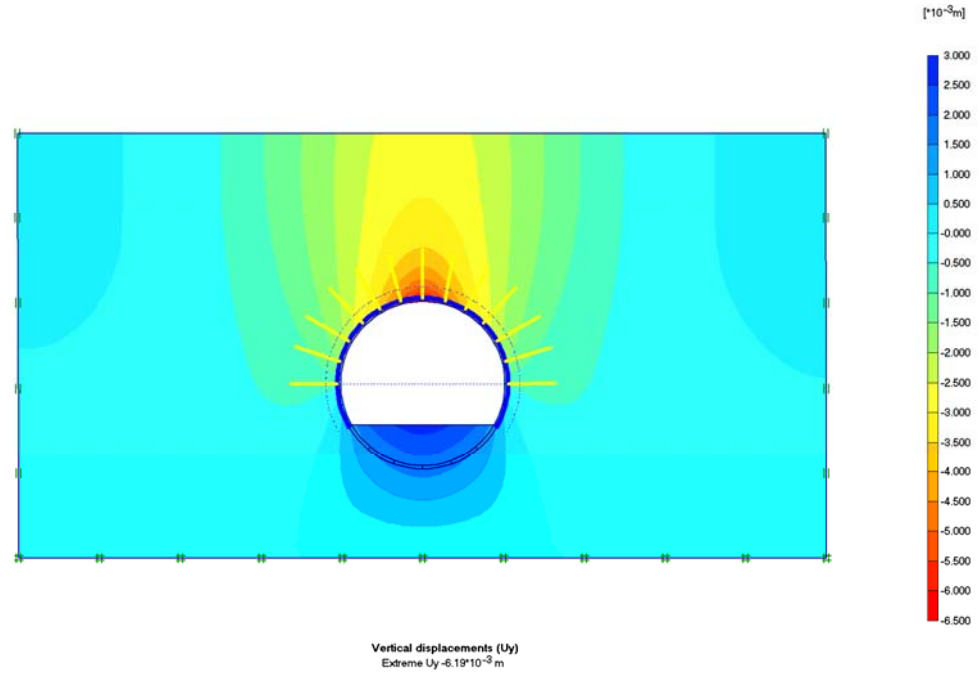


Şekil 4.15 : Model 1 için mohr zarfı diagramı

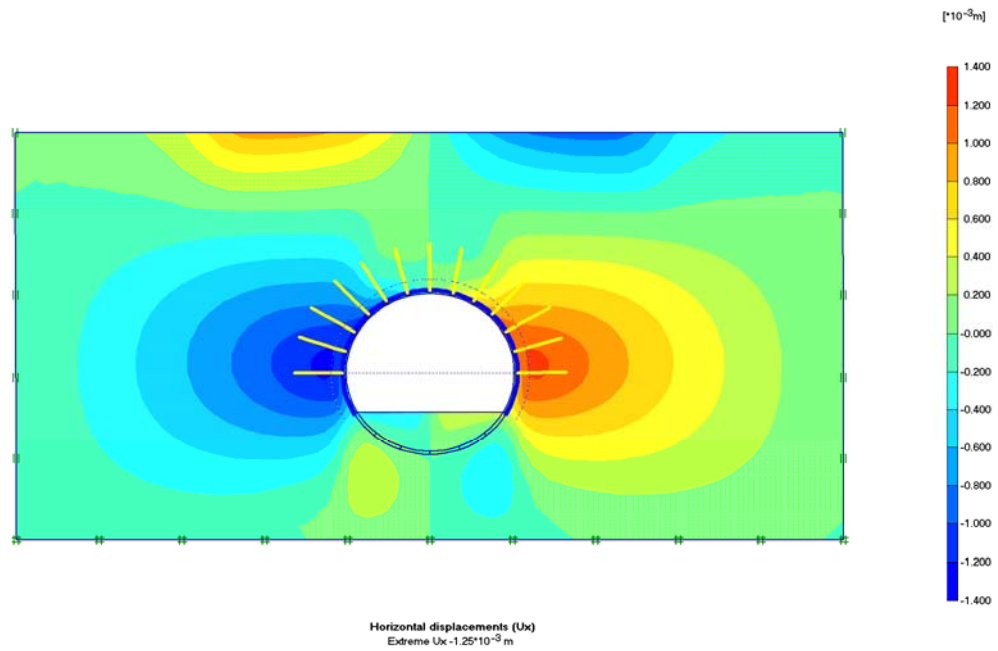
4.5.1.3 Tünel kazısı sonrası oluşan deplasmanlar

Tünel inşası sırasında dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli unsur da kazı sırasında ve sonrasında oluşan deplasmanlardır. Tünel kazısının bitirilip, destek elemanlarının konulmasının ardından tünelde ve etrafındaki kayalarda oluşması beklenen deplasmanlar belirlenmiştir. Kayalarda hesaplanan maksimum düşey deplasman 6.19 mm. ‘dir. Şekil 4.16’da maksimum düşey deplasman gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi maksimum değer tünelin tepe noktasına aittir.

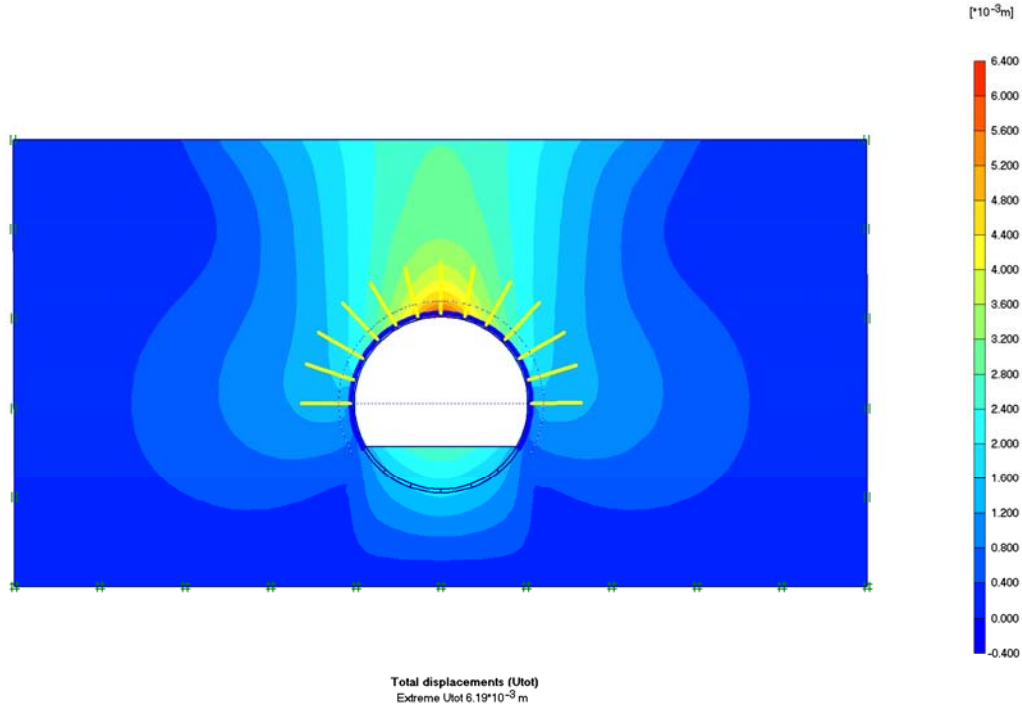
Hesaplanan maksimum yatay deplasman ise 1.25 mm ile yan duvarlarda oluşmuştur. Şekil 4.17’de maksimum yatay deplasmanlar görülmektedir. Tünellerde oluşan en büyük toplam deplasman ise 5.40 mm ile tünel tavanında meydana gelmiştir. Şekil 4.18’de toplam deplasmanlar görülmektedir.



Şekil 4.16 : Model 1 kazı sonrası düşey deplasmanların bölgesel dağılımı

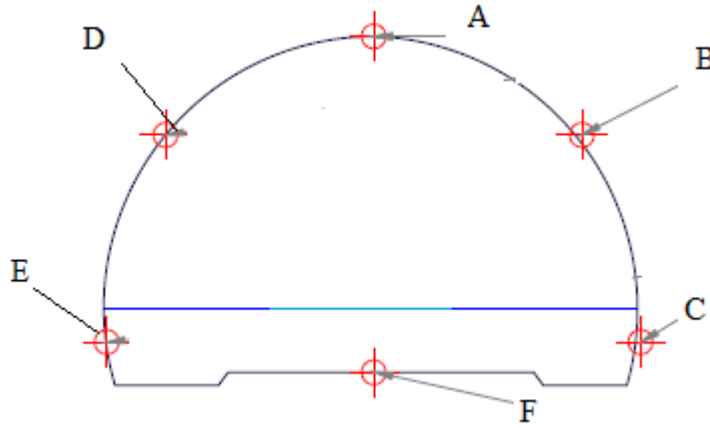


Şekil 4.17 : Model 1 kazı sonrası yatay deformasyonların bölgesel dağılımı

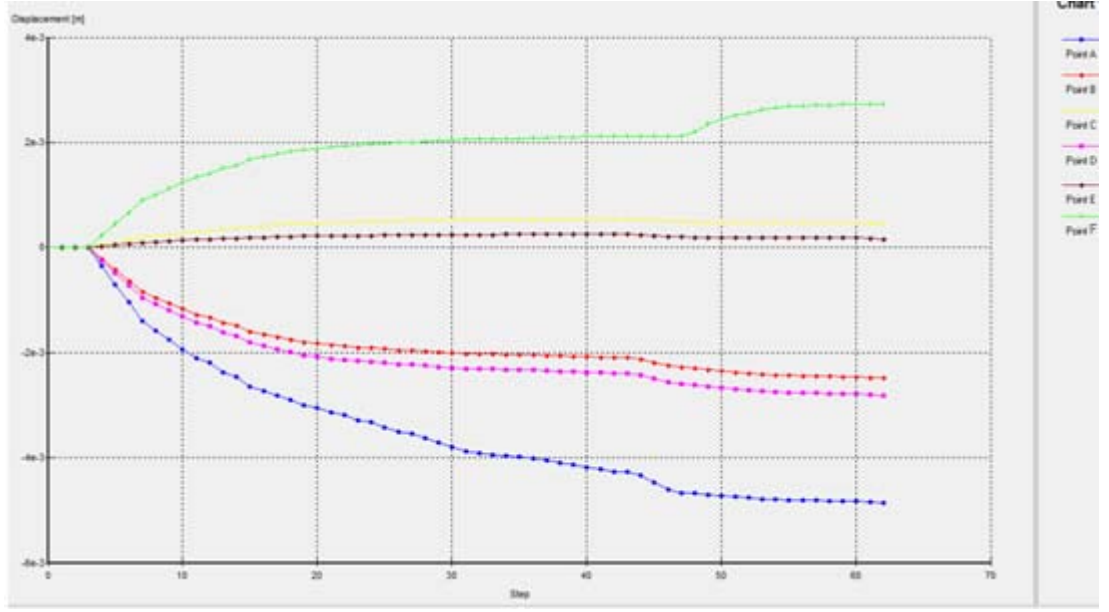


Şekil 4.18 : Model 1 kazı sonrası toplam deplasmanların bölgesel dağılımı

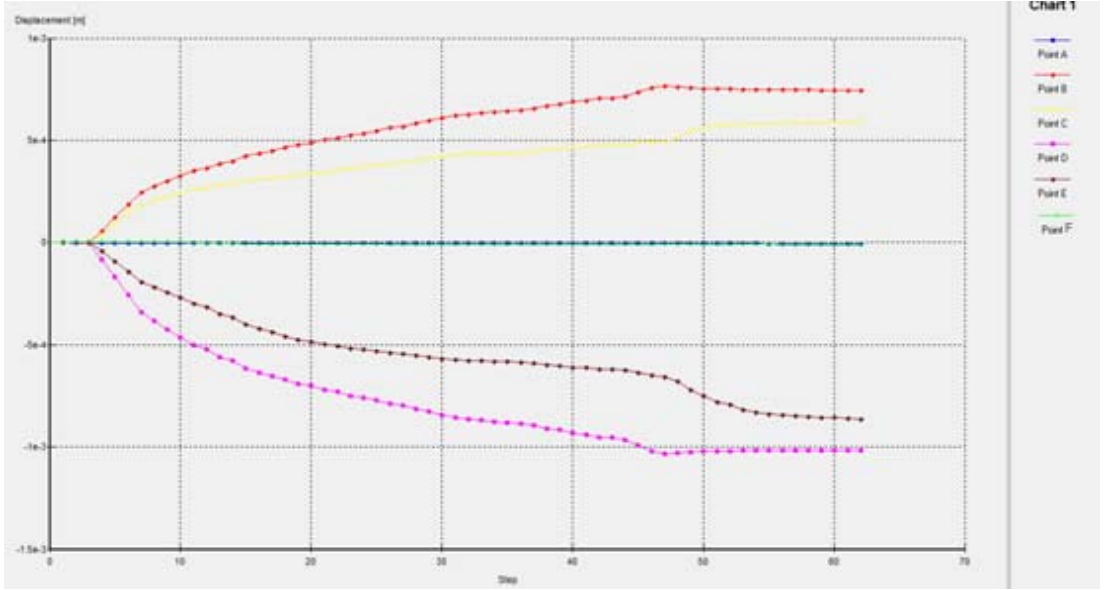
Şekil 4.19’da Model üzerinde deplasman değerlerinin hesaplandığı noktalar gösterilmiştir. Şekil 4.20 ve 4.21’de ise hesaplanan düşey ve yatay yer değiştirmelerin dağılımı gözlenmektedir.



Şekil 4.19 : Model 1 deplasman okuma noktaları



Şekil 4.20 : Model 1 deplasman okuma noktalarına göre düşey deplasmanlar



Şekil 4.21 : Model 1 deplasman okuma noktalarına göre yanal deplasmanlar

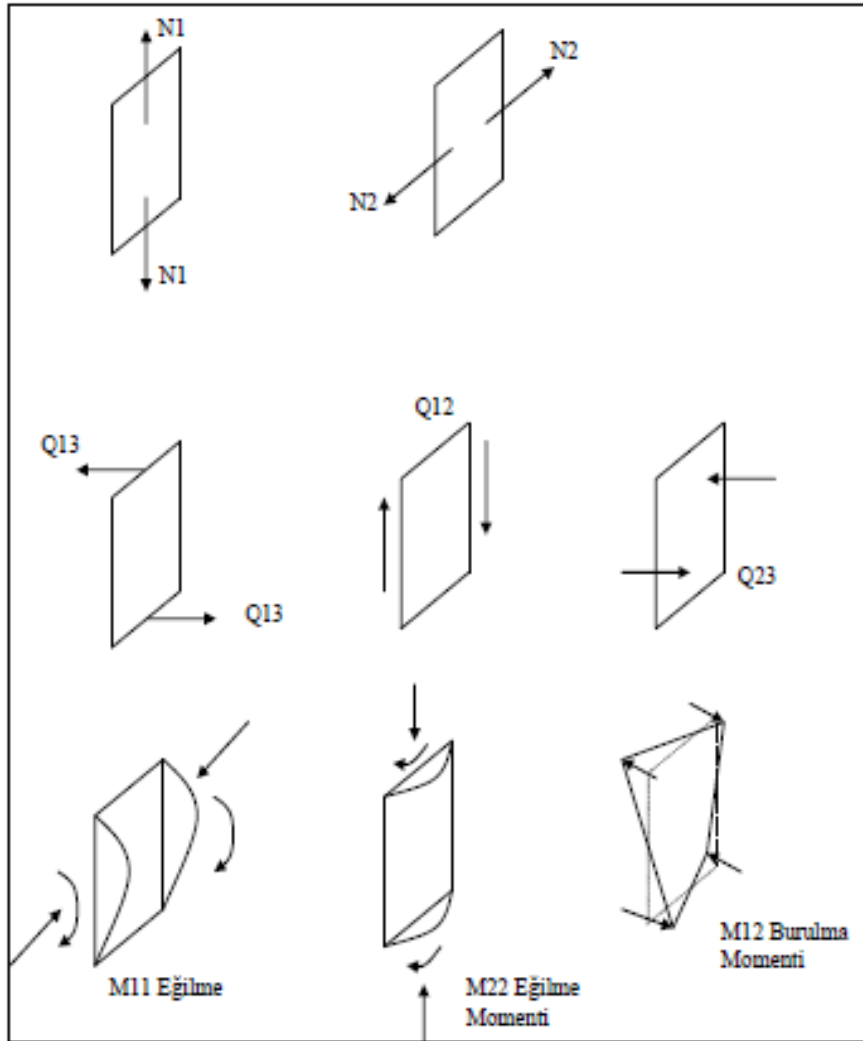
Tünel kazısı sonrasında oluşan deplasmanlar incelendiğinde, düşey ve yatay deplasmanlar yüzey oturmaları değerlerinin birbirine yakın ve hesaplanan deplasmanların güvenli sınırlar içinde kaldığı gözlenmektedir.

4.5.1.4 Tünel destekleme elemanlarının tahkiki

Püskürtme betonu ve çelik iksa tahkiki;

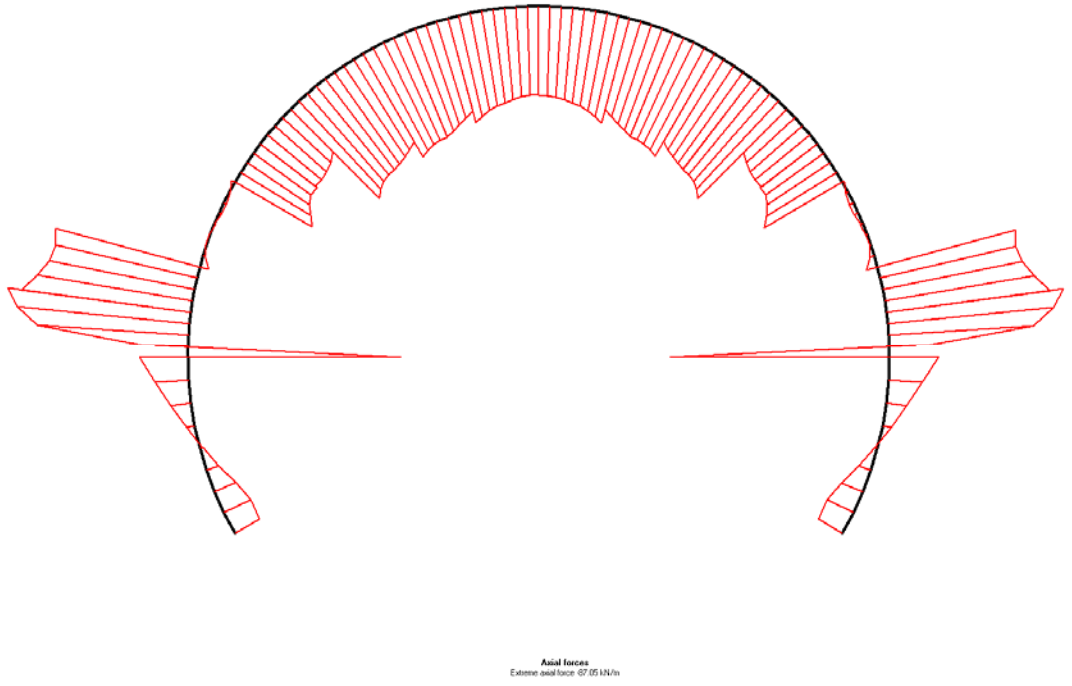
Kullanılan destek elemanları olan, püskürtme beton ve çelik iksa üzerinde oluşan, eksenel kuvvet ve moment büyüklükleri program yardımı ile hesaplanmıştır. Yapılacak olan tahkiklerde kullanılacak iç kuvvetler şunlardır:

Eksenel kuvvetler N_{11} ve N_{22} , kesme kuvvetleri Q_{13} , Q_{12} ve Q_{23} şeklinde, eğilme momentleri M_{11} ve M_{22} şeklinde, burulma momenti ise M_{12} ile gösterilmiştir. Bu kuvvetlerin yönleri Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

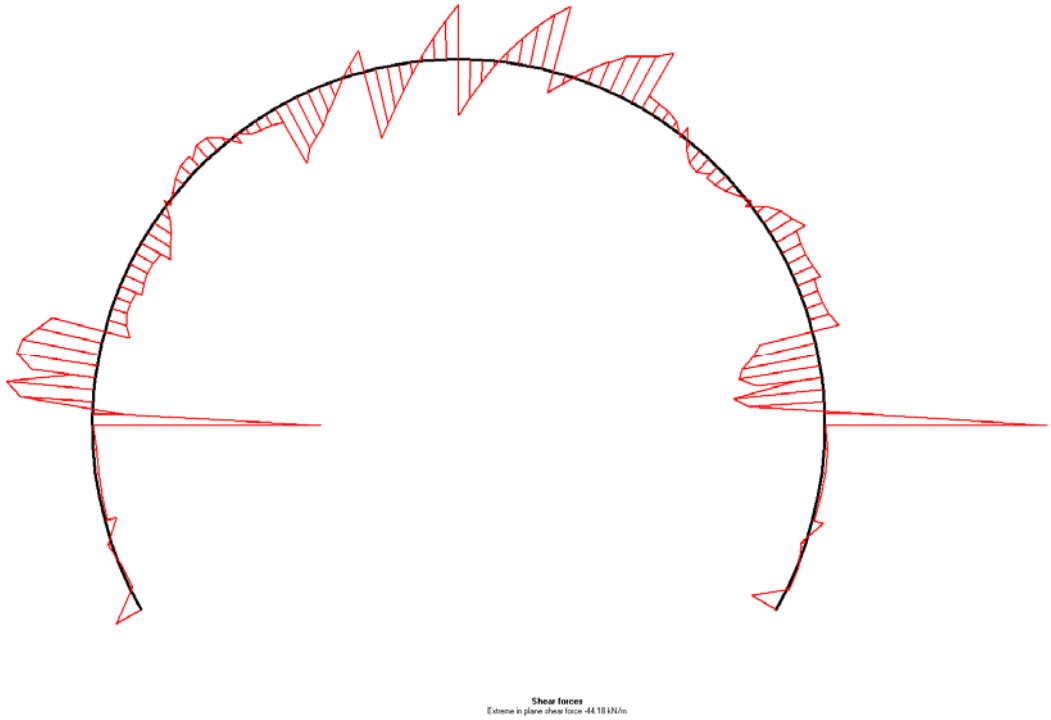


Şekil 4.22 : Tahkimata etkiyen kuvvetlerin yönleri

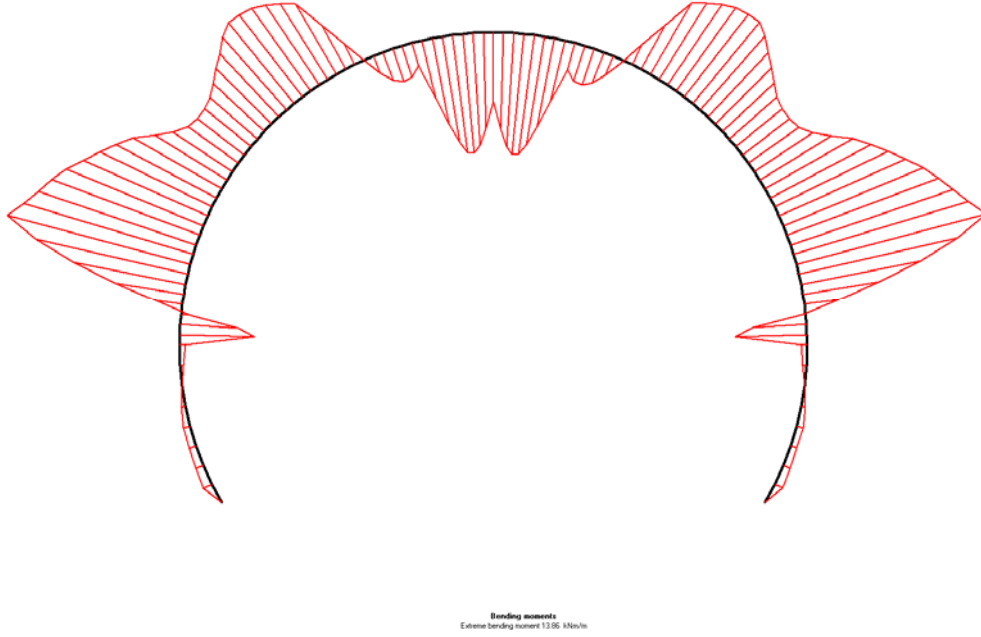
Kuvvetlerde (-) basıncı, (+) çekmeyi göstermektedir. Tahkimata etkiyen N_{11} eksenel kuvveti, Q_{13} kesme kuvveti ve M_{11} eğilme momenti dağılımları sırasıyla Şekil 4.23, 24 ve 25’de verilmiştir.



Şekil 4.23 : Model 1 tahkimata etkiyen normal kuvvetin dağılımı



Şekil 4.24 : Model 1 tahkimata etkiyen kesme kuvvetinin dağılımı



Şekil 4.25 : Model 1 tahkimata etkiyen eğilme momentinin dağılımı

Hesaplarda kullanılacak maksimum iç kuvvetler aşağıda sıralanmıştır;

$$N_{11} = -87.05 \text{ kN/m}$$

$$Q_{13} = -44.18 \text{ kN/m}$$

$$M_{11} = 13.86 \text{ kNm/m}$$

Destekleme elemanlarının tahkiki AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) yönetmeliğine uygun olarak yapılmıştır. Tahkikler aşağıdaki formüller uyarınca yapılmıştır [26];

Moment taşıma kapasitesi;

$$M_d = \phi 0.85 f_c W \quad (4.1)$$

Bu ifadede ki;

W: püskürtme betonun mukavemet momenti

f_c : betonun 28 günlük basınç dayanımı (BS20 için 13000 kN/m^2)

ϕ : güvenlik katsayısı 0.90 donatılı betonlar için

Eksenel kuvvet taşıma kapasitesi

$$N_d = \phi 0.60 f_c A \quad (4.2)$$

A (püskürtme betonun birim genişliği için alanı)

Kesme kuvveti taşıma kapasitesi:

$$V_d = \phi 1.33 \sqrt{f_c} A \quad (4.3)$$

Bu ifadeler hesaplanan iç kuvvetler ile karşılaştırılır ve kesit yeterliliği aşağıdaki formüller uyarınca tayin edilir

$$\frac{M_{11}}{M_d} + \frac{N_{11}}{N_d} < 1 \quad (4.4)$$

$$Q_{11} < V_d$$

Bu formül uyarınca hesaplanan taşıma kapasiteleri ;

$$M_d = 115 \text{ kNm/m}$$

$$N_d = 1950 \text{ kN/m olarak bulunmuştur.}$$

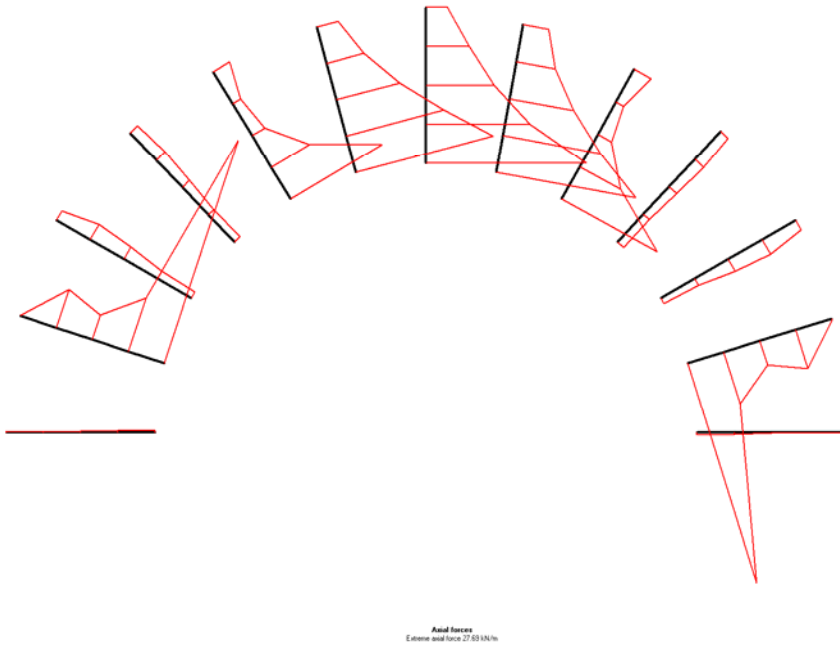
$$\frac{87}{1950} + \frac{13.86}{115} = 0.165 < 1 \text{ güvenli.}$$

$$V_d = 47.9 \text{ kN/m} > Q_{11}$$

Hesaplardan da görüleceği gibi tünel güzergahının Model 1 bölümü analiz ve hesap sonuçlarına göre, seçilen püskürtme betonu ve çelik iksa üzerine gelen iç kuvvetler, tahkimatın taşıma kapasitesinin altında kaldığı görülmüştür.

Bulon tahkikleri;

Bulon sistemine etkiyen maksimum normal kuvvet (N_{11}) değeri, program aracılığı ile hesaplanmıştır. Şekil 4.26'da maksimum normal kuvvet diyagramı görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi 1 bulona gelen maksimum normal kuvvet değeri; 27.69 kN'dur.



Şekil 4.26 : Model 1 bulonlara etkiyen normal kuvvet N_{11}

Bulonun çekme dayanımı;

$$\sigma = \frac{N_{11}}{A} \langle \sigma_{guv} \quad (4.5)$$

$$\sigma = \frac{27.69}{\frac{3.14 \times 2.8^2}{4}} = 4.49 \text{ kN / cm}^2 \langle \sigma_{guv} = 36.5 \text{ kN / cm}^2$$

Beton enjeksiyonunda dayanım;

$$\tau = \frac{N_{11}}{\Pi * \phi * l} \langle f_{ctd} \quad (4.6)$$

Bu ifadede yer alan τ kayma gerilmesi f_{ctd} betonun çekme dayanımı ϕ bulon yarıçapı ve l bulon boyudur.

$$\tau = \frac{27.69}{3.14 * 2.8 * 400} = 2.81 * 10^{-3} \text{ kN / cm}^2 \langle f_{ctd} = 0.1 \text{ kN / cm}^2$$

Bulonlar emniyetli sınırlar içinde kalmaktadır.

4.5.2 Model 2 analizleri

Model 2 kısmında kullanılan tahkimat elemanlarının ve mekanik özellikleri şunlardır.

Püskürtme beton;

$$\text{Kalınlık } h = 15 \text{ cm} = 0.15 \text{ m}$$

$$E = 15\,000\,000 \text{ kPa}$$

$$A = b \times h = 1 \times 0.15 = 0.15 \text{ m}^2 \text{ (Birim genişlik için alan)}$$

$$I = b \cdot h^3 / 12 = 0.253 / 12 = 0.000281 \text{ m}^4$$

$$EA = 15\,000\,000 \times 0.15 = 2\,250\,000 \text{ kN/m}$$

$$EI = 15\,000\,000 \times 0.000281 = 4215 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

$$\nu = 0.2$$

$$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$w = 24 \times 0.15 = 3.6 \text{ kN/m/m}$$

Kaya Bulonu;

$$E = 210\,000\,000 \text{ kPa}$$

$$d = 28 \text{ mm } (\varnothing 28) = 0.028 \text{ m}$$

$$A = \pi (d/2)^2 = 3.14 \times (0.028/2)^2 = 0.000615$$

$$EA = 210\,000\,000 \times 0.000615 = 129242.4 \text{ kN/m}$$

Kazı aşamaları model 1’de kullanılan kazı aşamaları ile aynıdır ve iki aşamalı kazı düşünülmüştür. Tünel kazı hattı yarıçapı $R=6.15 \text{ m}$ ’dir. Modelleme bu kazı çapına göre yapılmıştır. Modellemede kullanılan Geomekanik parametreler Çizelge 4.5’den alınmıştır. Buna göre;

$$c = 0.21 \text{ MPa}$$

$$\psi = 47^\circ$$

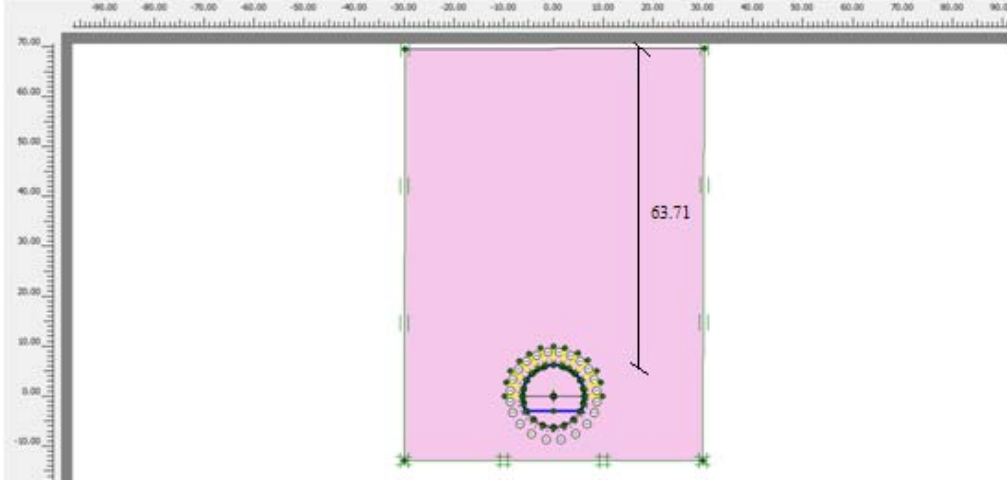
$$E=11.2 \text{ E}+6 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\text{basınç}} = 35.62 \text{ MPa}$$

$\nu=0.25$ olarak alınmıştır.

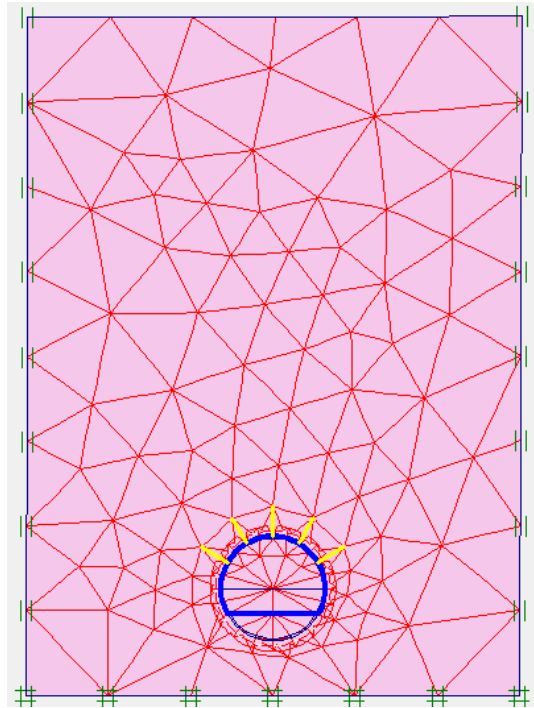
4.5.2.1 Geoteknik modelin oluşturulması

Tünel aynası formasyonu Tüfit-bazalt özellik göstermekte olup tünelin güzergahının bulunduğu kotta herhangi bir yer altı suyu etkisi yoktur. Kayaçlarda süreksizlik durumları gözlenmemiştir. Örtü kalınlığı 63.71 metredir. Sistemin Plaxis programında modellenmesi Şekil 4.27’de görüldüğü gibidir. Tünel dairesinin radye kısmında bulunan 120° kısım 70 cm invert betonu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.27 : Model 2 tünel geometrisinin modellenmesi.

Geometrik sisteme malzeme özellikleri girilmesinden sonra sonlu elemanlar ağı tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar ağı Şekil 4.28’de görülmektedir.

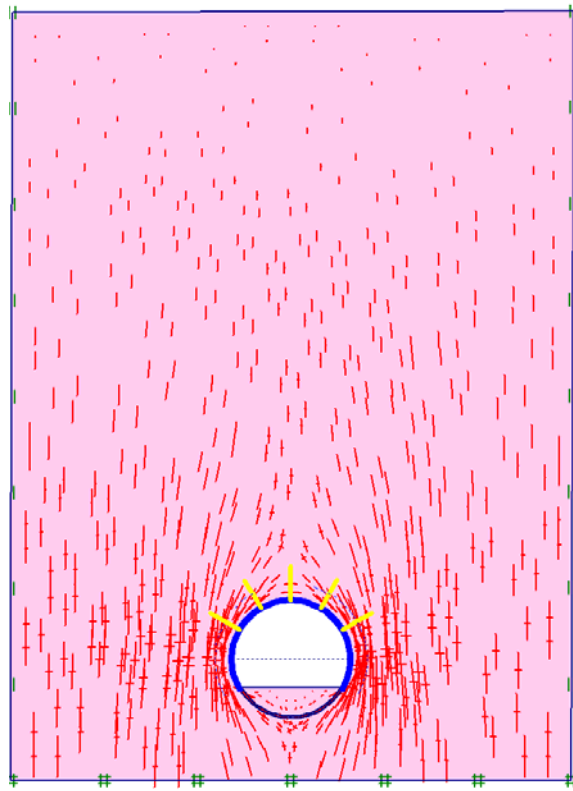


Şekil 4.28 : Model 2 sonlu elemanlar ağının oluşturulması

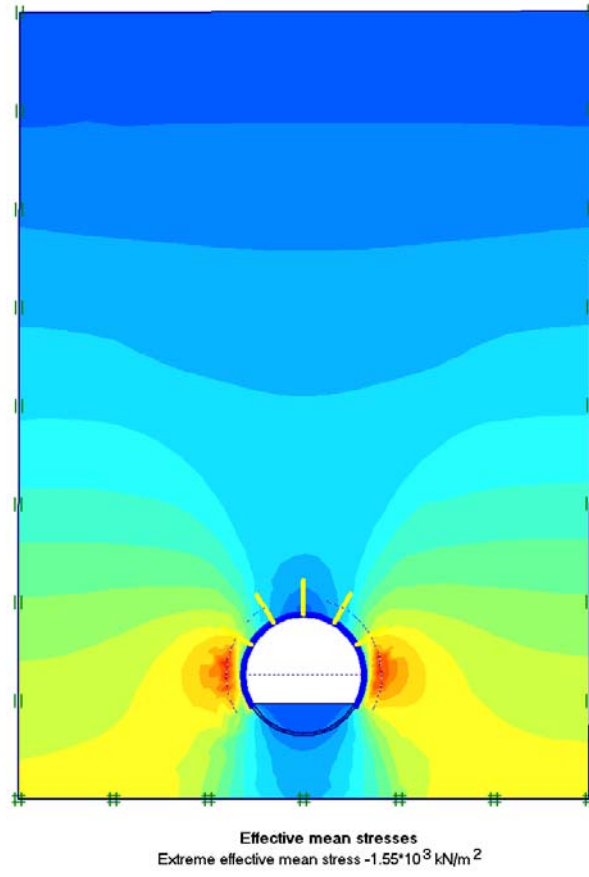
Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra kazı aşamaları tanımlanarak hesaplamalara geçilmiştir. Kazı aşamaları Model 1 aşamaları ile aynı olup Çizelge 4.11’de verilmiştir. Aşamalar programa tanımlandıktan sonra hesaplamalara geçilmiştir. Hesaplarda plastik hesap kullanılmıştır.

4.5.2.2 Tünel çevresinde oluşan gerilmeler

Tünel kazısı ve tahkimatının yapılması ardından oluşan, ikincil gerilme ve deformasyon durumları resimler ve maksimum değerler incelenerek belirlenecektir. Şekil 4.29’da tünel kazısı sonrasında oluşan efektif asal gerilmelerin yönelişi verilmiştir. Şekil 4.30’da maksimum asal gerilmeler ve değer skalası verilmiştir. Program çıktısına göre basınç gerilmeleri (-), çekme gerilmeleri ise (+) işaretlidir. Maksimum gerilme şekilden de anlaşılacağı üzere yan duvarlarda oluşmaktadır. Maksimum asal gerilme değeri -155 kN/m^2 olarak okunmaktadır. Maksimum asal gerilmelerin olduğu bölge asal gerilmelerin birikim yaptığı yan duvarlar bölgesindedir.

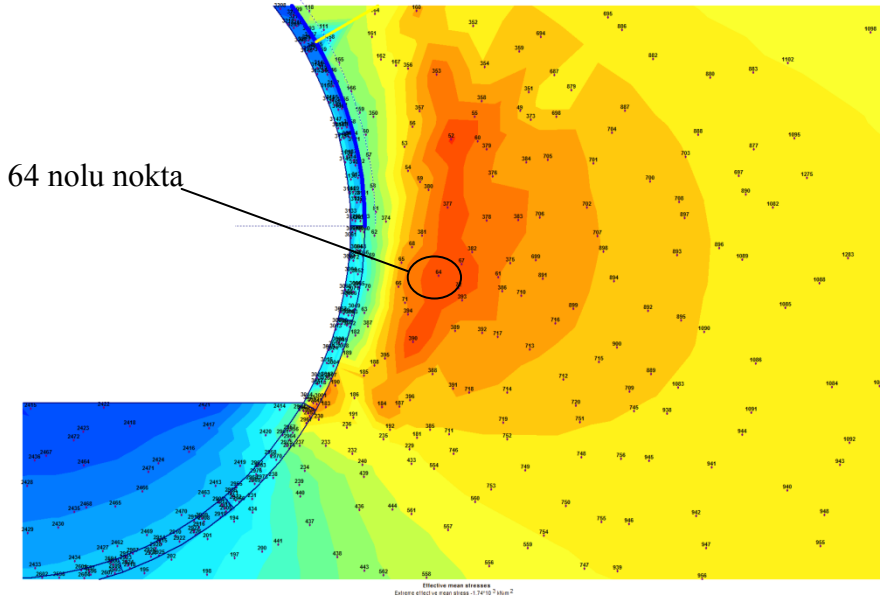


Şekil 4.29 : Model 2 kazı sonrası oluşan efektif asal gerilmelerin yönelimi.



Şekil 4.30 : Model 2 kazı sonrası maksimum asal gerilmeler.

Maksimum basınç gerilmesinin oluştuğu yan duvarlara Şekil 4.31’de daha yakından bakılmıştır.



Şekil 4.31 : Model 2 maksimum gerilme noktası

Maksimum basınç gerilmesinin olduğu 64 nolu gerilme noktasında, oluşan basınç gerilmeleri şekil 4.32’de verilmektedir.

Stress Point	X [m]	Y [m]	σ_{xx} [kN/m ²]	σ_{yy} [kN/m ²]	σ_{xy} [kN/m ²]	σ_{zz} [kN/m ²]
64	7.626	-0.856	-567.790	-3277.050	-309.142	-961.210

Şekil 4.32 : Model 2 maksimum basınç gerilmeleri

Şekil 4.32’e göre basınç gerilmeleri;

$$\sigma_{xx} = - 567 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{yy} = -3277.050 \text{ kN/m}^2$$

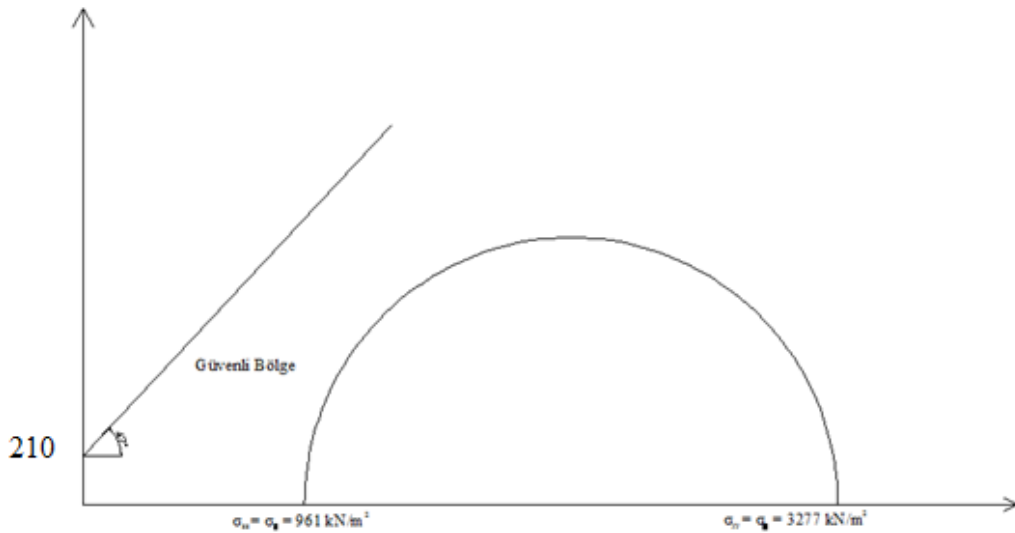
$$\sigma_{zz} = - 961.210 \text{ kN/m}^2$$

Burada yer alan kayaç Tüfit-Bazalt olup dayanım özellikleri;

$$c = 210 \text{ kPa}$$

$$\varphi = 47^\circ \text{ dir.}$$

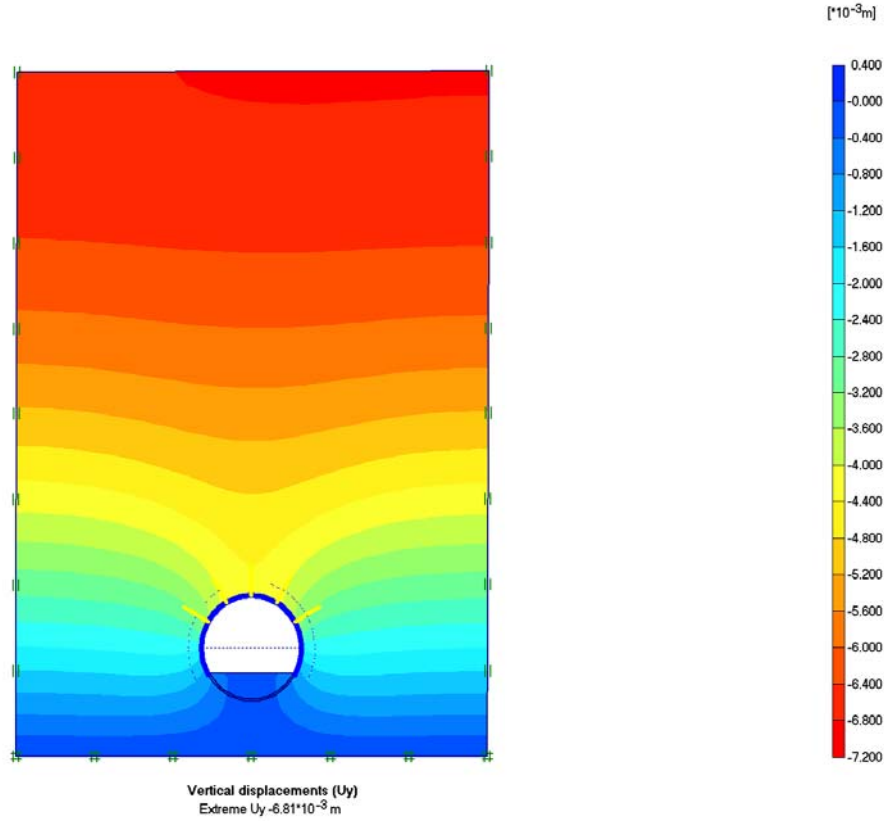
Maksimum gerilmeler için Mohr Zarfı çizildiğinde maksimum gerilmenin kayaç dayanımını aştığı ve güvenli tarafta kaldığı görülmektedir. Kayaca ilişkin Mohr zarfı Şekil 4.33’de verilmektedir.



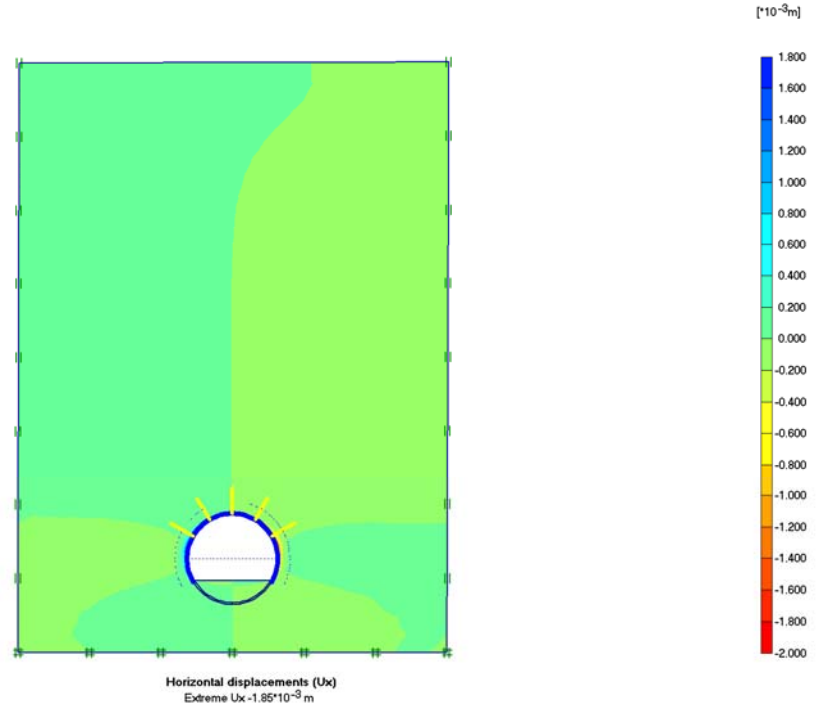
Şekil 4.33 : Model 2 için Mohr zarfı diagramı

4.5.2.3 Tünel kazısı sonrası oluşan deplasmanlar

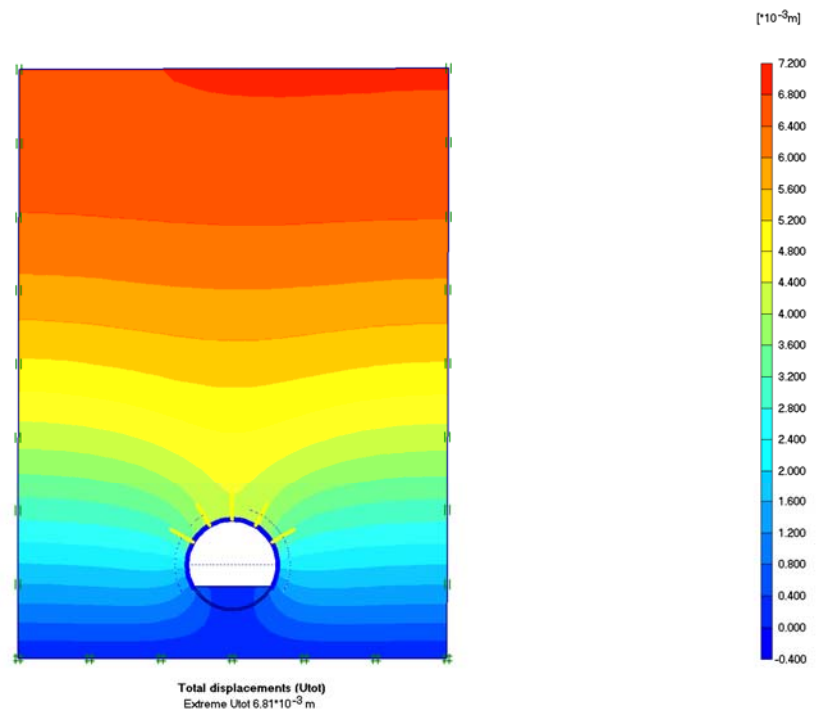
Tünel inşası sırasında, kayaçlarda hesaplanan dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli unsur da kazı sırasında ve sonrasında oluşan deplasmanlardır. Tünel kazısının bitirilip, destek elemanlarının konulmasının ardından tünelde ve etrafındaki kayaçlarda oluşması beklenen deplasmanlar belirlenmiştir. Maksimum düşey deplasman 6.81 mm'dir. Şekil 4.34'de maksimum düşey deplasman gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılabacağı gibi maksimum değer tünelin tepe noktasına aittir. Hesaplanan maksimum yatay deplasman ise 1.85 mm ile yan duvarlarda oluşmuştur. Şekil 4.35'de maksimum yatay deplasmanlar görülmektedir. Tünelde oluşan en büyük toplam deplasman ise 6.81 mm ile tünel tavanında meydana gelmiştir. Şekil 4.36'da toplam deplasmanlar görülmektedir.



Şekil 4.34 : Model 2 kazı sonrası düşey deplasmanların bölgesel dağılımı



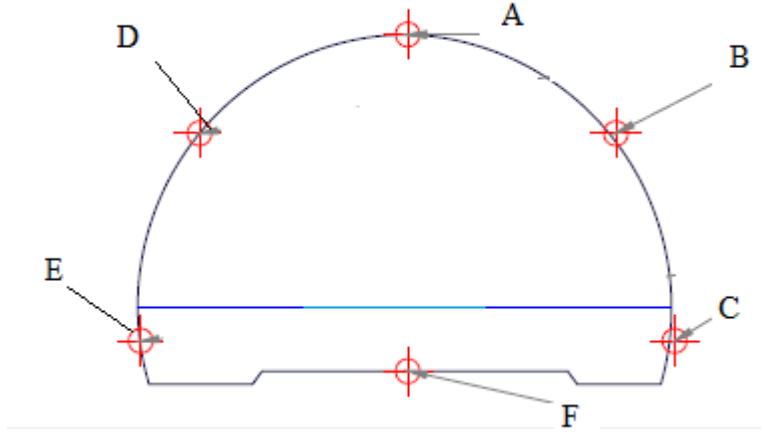
Şekil 4.35 : Model 2 kazı sonrası yatay deformasyonların bölgesel dağılımı



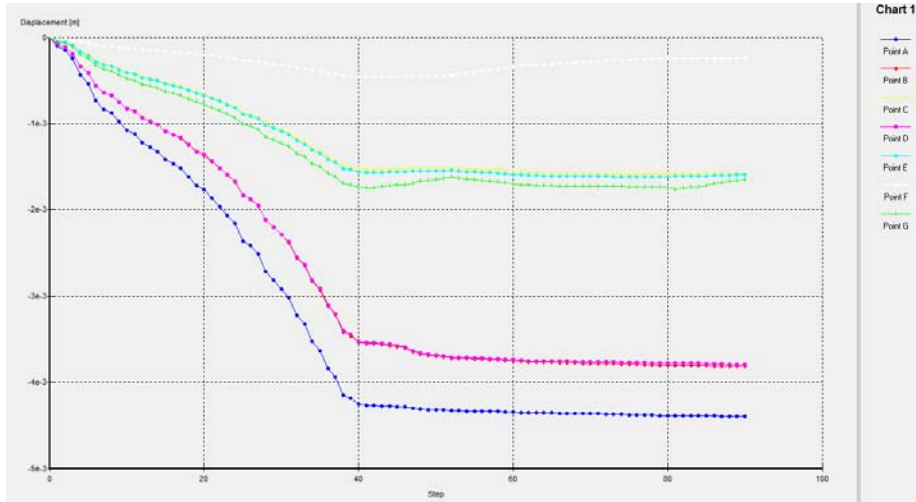
Şekil 4.36 : Model 2 kazı sonrası toplam deplasmanların bölgesel dağılımı

Şekil 4.37’de Model üzerinde deplasman değerlerinin hesaplandığı noktalar gösterilmiştir. Şekil 4.38 ve 4.39’de ise hesaplanan düşey ve yatay yer

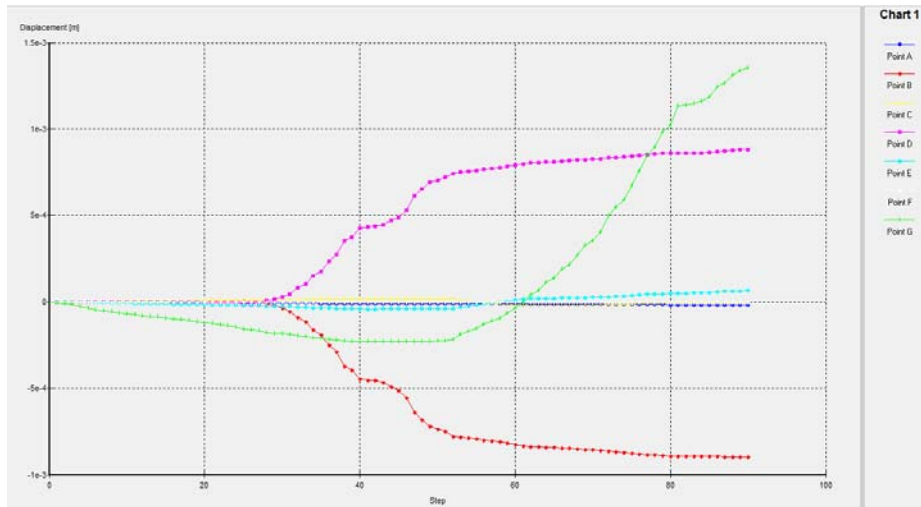
değişikliklerin dağılımı gözlenmektedir. G noktası yeryüzünde, yüzey oturumlarını ölçmek için konulmuştur.



Şekil 4.37 : Model 2 deplasman okuma noktaları



Şekil 4.38 : Model 2 deplasman okuma noktalarına göre düşey deplasmanlar



Şekil 4.39 : Model 2 deplasman okuma noktalarına göre yanıl deplasmanlar

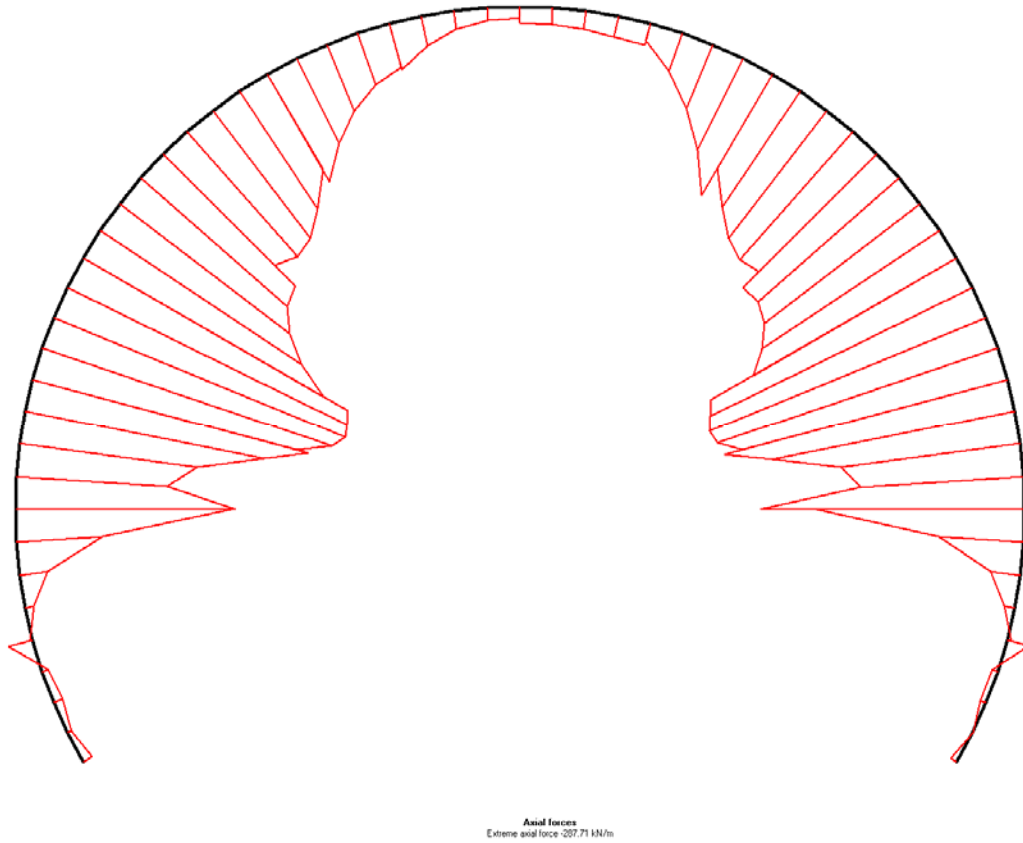
Tünel kazısı sonrasında oluşan deplasmanlar incelendiğinde, düşey ve yatay deplasmanlar yüzey oturmaları değerlerinin birbirine yakın ve hesaplanan deplasmanların güvenli sınırlar içinde kaldığı gözlenmektedir.

4.5.2.4 Tünel destekleme elemanlarının tahkiki

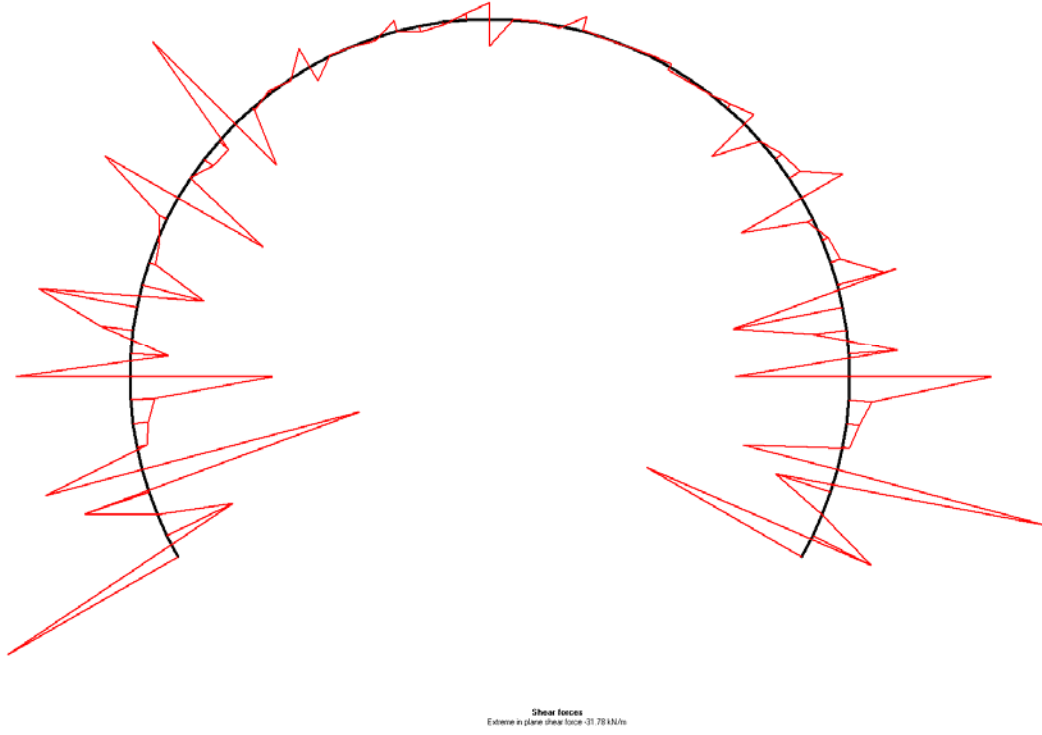
Püskürtme betonu ve çelik iksa tahkiki;

Kullanılan destek elemanları olan, püskürtme beton ve çelik iksa üzerinde oluşan, aksenal kuvvet ve moment büyüklükleri program yardımı ile hesaplanmıştır. Yapılacak olan tahkiklerde kullanılacak iç kuvvetler şunlardır:

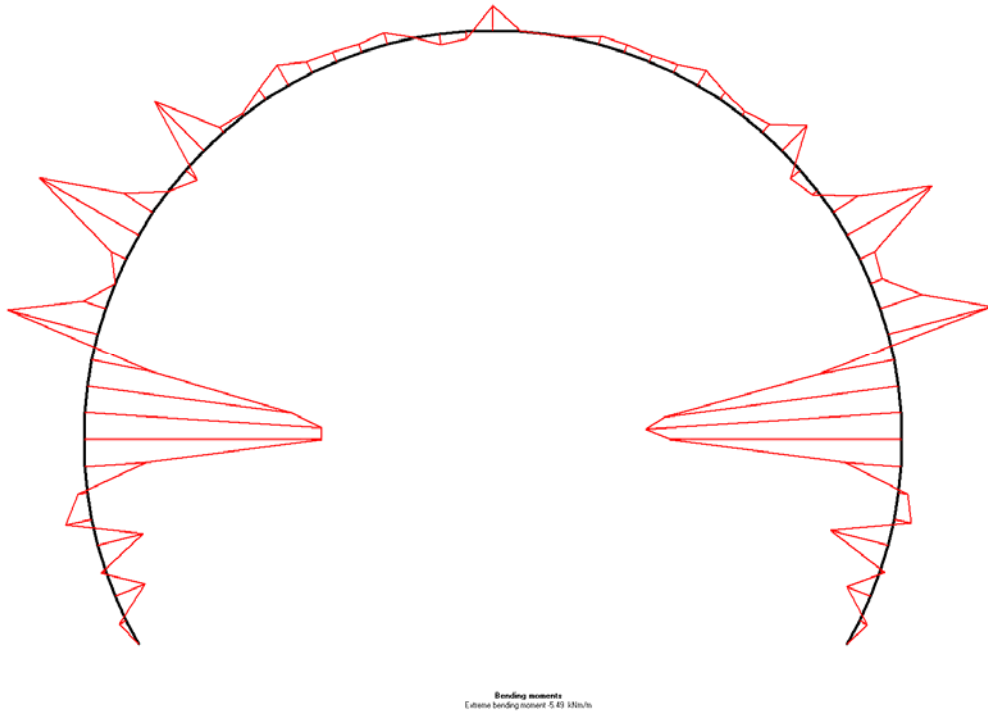
Tahkimata etkiyen N_{11} aksenal kuvveti, Q_{11} kesme kuvveti ve M_{11} eğilme momenti dağılımları sırasıyla Şekil 4.40, 41 ve 42’de verilmiştir.



Şekil 4.40 : Model 2 tahkimata etkiyen normal kuvvetin dağılımı



Şekil 4.41 : Model 2 tahkimata etkiyen kesme kuvvetinin dağılımı



Şekil 4.42 : Model 2 tahkimata etkiyen eğilme momentinin dağılımı

Hesaplarda kullanılacak maksimum iç kuvvetler aşağıda sıralanmıştır;

$$N_{11} = -287.71 \text{ kN/m}$$

$$Q_{13} = -31.78 \text{ kN/m}$$

$$M_{11} = -5.49 \text{ kNm/m}$$

Destekleme elemanlarının tahkiki AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) yönetmeliğine uygun olarak yapılmıştır. Tahkikler aşağıdaki formüller uyarınca yapılmıştır [26].

Moment taşıma kapasitesi;

$$M_d = 0.85 * 13000 * \frac{0.15^2}{6} = 41.43 \text{ kN.m / m}$$

$$N_d = 0.60 * 13000 * 0.15 * 1 = 1170 \text{ kN}$$

A (püskürtme betonun birim genişliği için alanı)

Kesme kuvveti taşıma kapasitesi:

$$V_d = 1.33 \sqrt{13000} * 1 * 0.15 = 22.74 \text{ kN}$$

Kesit yeterliliği aşağıda hesaplanmıştır.

$$\frac{5.49}{41.73} + \frac{287.71}{1170} = 0.377 < 1$$

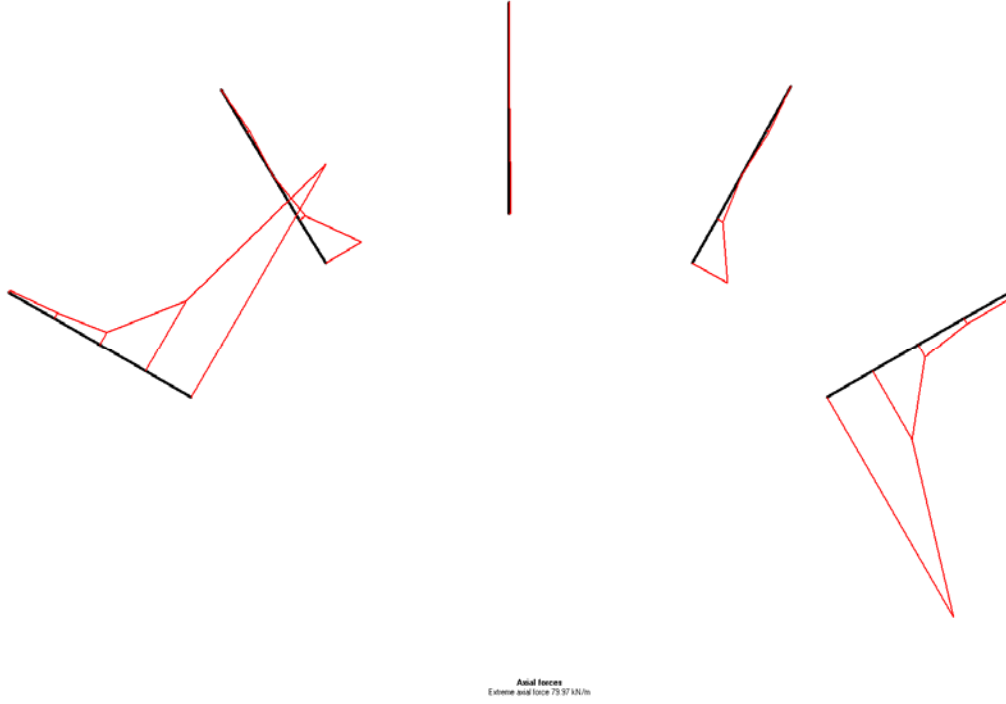
$$Q_{11} < V_d$$

Tahkimat güvenli.

Hesaplardan da görüleceği gibi tünel güzergahının Model 1 bölümü analiz ve hesap sonuçlarına göre, seçilen püskürtme betonu ve çelik iksa üzerine gelen iç kuvvetler, tahkimatın taşıma kapasitesinin altında kaldığı görülmüştür.

Bulon tahkikleri;

Bulon sistemine etkiyen maksimum normal kuvvet (N_{11}) değeri, program aracılığı ile hesaplanmıştır. Şekil 4.43'de maksimum normal kuvvet diyagramı görülmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı gibi 1 bulona gelen maksimum normal kuvvet değeri; 79.97 kN'dur.



Şekil 4.43 : Model 2 bulonlara etkiyen normal kuvvet N_{11}

Bulonun çekme dayanımı;

$$\sigma = \frac{79.97}{\frac{3.14 \times 2.8^2}{4}} = 12.29 \text{ kN} / \text{cm}^2 < \sigma_{guv} = 36.5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

Beton enjeksiyonunda dayanım;

$$\tau = \frac{N_{11}}{\Pi * d * l} < f_{ctd} \quad (4.6)$$

Bu ifadede yer alan τ kayma gerilmesi f_{ctd} betonun çekme dayanımı d bulon yarıçapı ve l bulon boyudur.

$$\tau = \frac{79.97}{3.14 * 2.8 * 400} = 2.27 * 10^{-3} \text{ kN} / \text{cm}^2 < f_{ctd} = 0.1 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

Bulonlar emniyetli sınırlar içinde kalmaktadır.aaaa

4.5.3 Model 3 analizleri

Model 3 kısmında kullanılan tahkimat elemanlarının ve mekanik özellikleri şunlardır.

Püskürtme beton;

$$\text{Kalınlık } h = 20 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}$$

$$E = 15\,000\,000 \text{ kPa}$$

$$A = b \times h = 1 \times 0.15 = 0.20 \text{ m}^2 \text{ (Birim genişlik için alan)}$$

$$I = b.h^3 / 12 = 0.04 / 12 = 0.00333 \text{ m}^4$$

$$EA = 15\,000\,000 \times 0.20 = 3\,000\,000 \text{ kN/m}$$

$$EI = 15\,000\,000 \times 0.00333 = 49950 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

$$\nu = 0.2$$

$$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$w = 24 \times 0.15 = 3.6 \text{ kN/m/m}$$

Çelik İksa (I160);

$$h = 16 \text{ cm} = 0.16 \text{ m}$$

$$E = 210\,000\,000 \text{ kPa}$$

$$A = 22.8 \text{ cm}^2 = 0.00228 \text{ m}^2$$

$$I = 0.0869 \text{ m}^4$$

$$EA = 210\,000\,000 \times 0.00228 = 478\,800 \text{ kN/m}$$

$$EI = 210\,000\,000 \times 0.00869 = 129\,600 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$$

$$w = 78.5 \times 0.16 = 12.56 \text{ kN/m/m}$$

Püskürtme beton ve çelik iksanın toplam dayanım parametreleri ise şunlardır;

$$EA_{\text{toplam}} = EA_{\text{pb}} + EA_{\text{iksa}} = 3\,000\,000 + 478\,800 = 3\,478\,800 \text{ kN/m}$$

$$EI_{\text{toplam}} = EI_{\text{pb}} + EI_{\text{iksa}} = 49950 + 129\,600 = 149\,550 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

$$w_{\text{toplam}} = 3.6 + 12.56 = 16.16 \text{ kN/m/m}$$

Kaya Bulonu;

$$E = 210\,000\,000 \text{ kPa}$$

$$d = 28 \text{ mm } (\psi 28) = 0.028 \text{ m}$$

$$A = \pi (d/2)^2 = 3.14 \times (0.028/2)^2 = 0.000615$$

$$EA = 210\,000\,000 \times 0.000615 = 129242.4 \text{ kN/m}$$

Kazı aşamaları model 1’de kullanılan kazı aşamaları ile aynıdır ve iki aşamalı kazı düşünülmüştür. Tünel kazı hattı yarıçapı $R=6.15 \text{ m}$ ’dir. Modelleme bu kazı çapına göre yapılmıştır. Modellemede kullanılan Geomekanik parametreler Çizelge 4.5’den alınmıştır. Buna göre;

$$c = 0.68 \text{ MPa}$$

$$\psi = 49^\circ$$

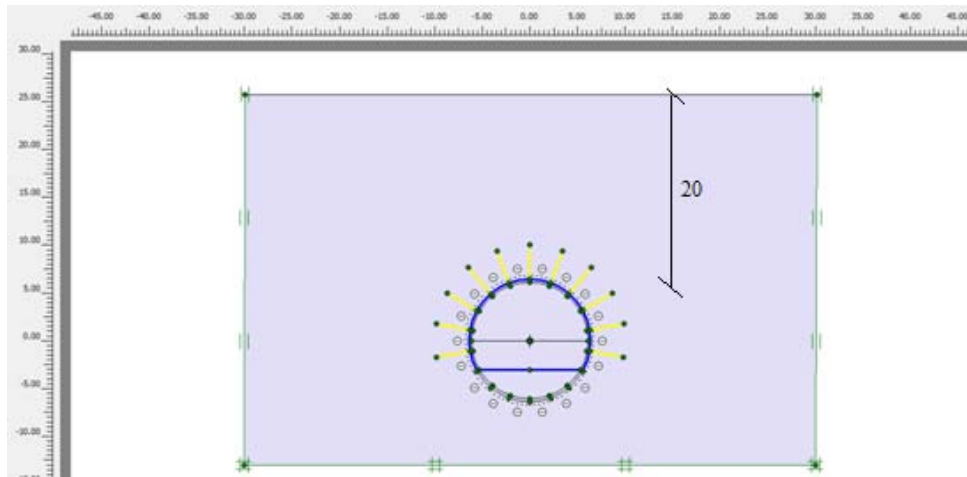
$$E=13.8 \text{ E}+6 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\text{basınç}} = 97.6 \text{ Mpa}$$

$$v = 0.25 \text{ olarak alınmıştır.}$$

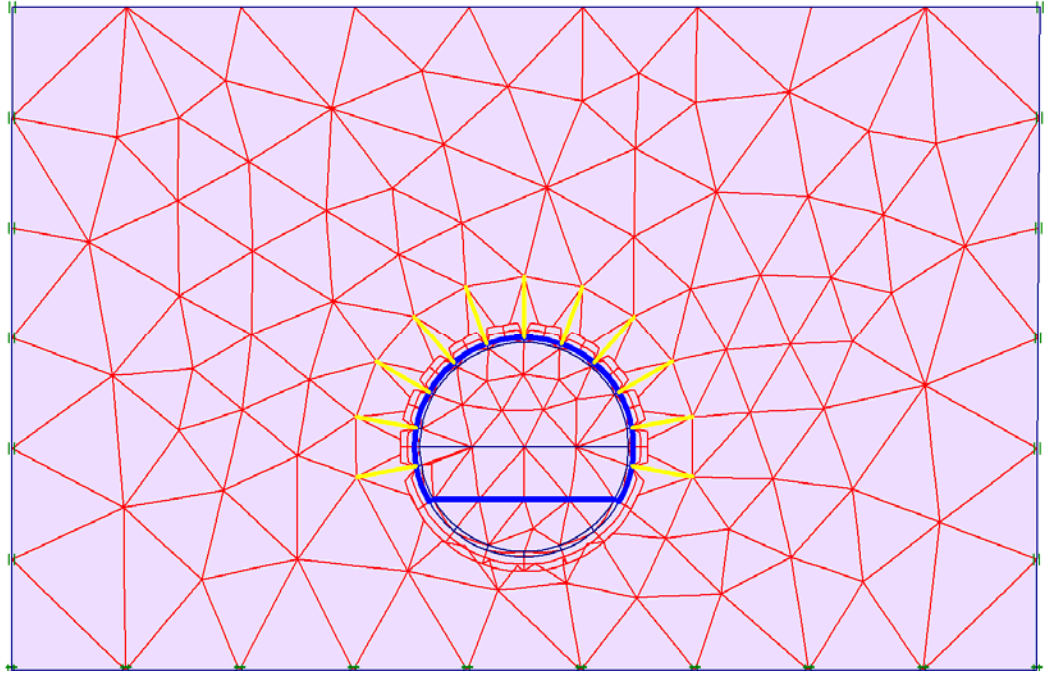
4.5.3.1 Geoteknik modelin oluşturulması

Tünel aynası formasyonu bazalt özellik göstermekte olup tünelin güzergahının bulunduğu kotta herhangi bir yer altı suyu etkisi yoktur. Kayaçlarda süreksizlik durumları gözlenmemiştir. Örtü kalınlığı 20 metredir. Sistemin Plaxis programında modellenmesi Şekil 4.44’de görüldüğü gibidir. Tünel dairesinin radye kısmında bulunan 120° kısım 70 cm invert betonu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.44 : Model 3 tünel geometresinin modellenmesi.

Geometrik sisteme malzeme özellikleri girilmesinden sonra sonlu elemanlar ağı tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar ağı Şekil 4.45’de görülmektedir.

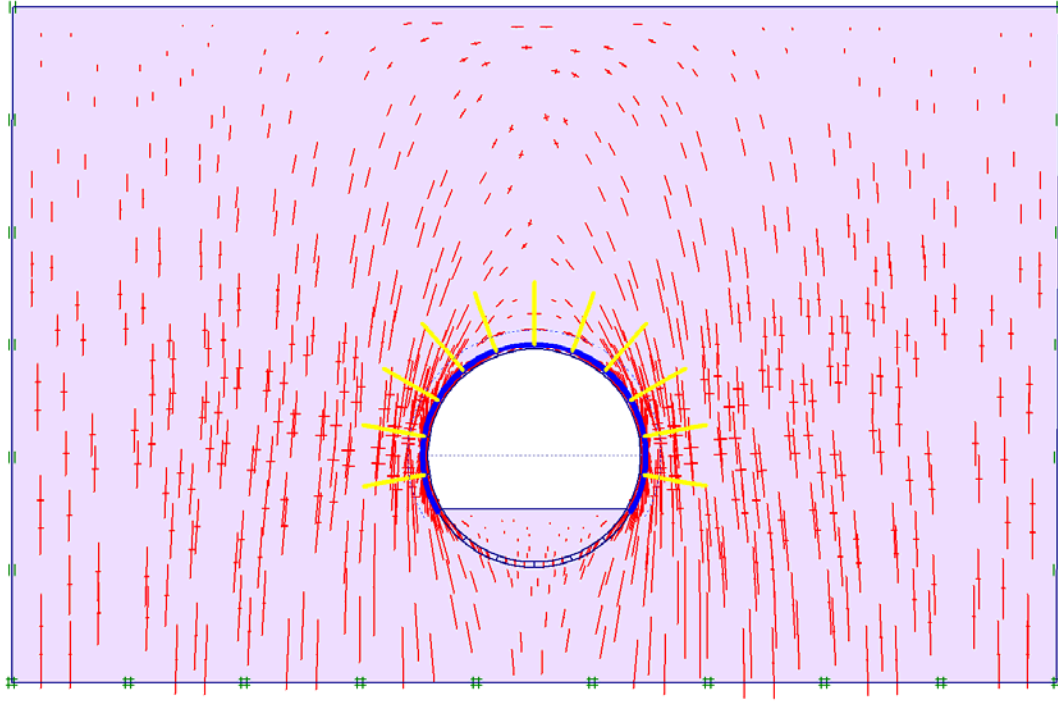


Şekil 4.45 : Model 3 sonlu elemanlar ağının oluşturulması

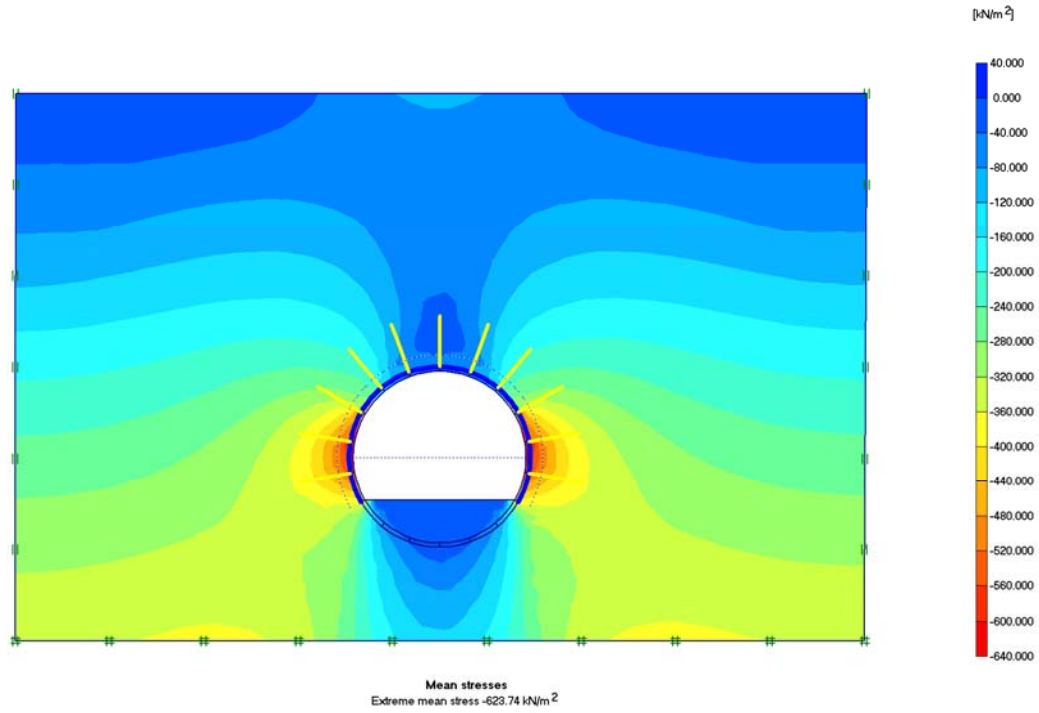
Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra kazı aşamaları tanımlanarak hesaplamalara geçilmiştir. Kazı aşamaları Model 1 aşamaları ile aynı olup Çizelge 4.11’de verilmiştir. Aşamalar programa tanımlandıktan sonra hesaplamalara geçilmiştir. Hesaplarda plastik teori kullanılmıştır.

4.5.3.2 Tünel çevresinde oluşan gerilmeler

Tünel kazısı ve tahkimatının yapılması ardından oluşan, ikincil gerilme ve deformasyon durumları resimler ve maksimum değerler incelenerek belirlenecektir. Şekil 4.46’da tünel kazısı sonrasında oluşan efektif asal gerilmelerin yönelişi verilmiştir. Şekil 4.47’de maksimum asal gerilmeler ve değer skalası verilmiştir. Program çıktısına göre basınç gerilmeleri (-), çekme gerilmeleri ise (+) işaretlidir. Maksimum gerilme şekilden de anlaşılacağı üzere yan duvarlarda oluşmaktadır. Maksimum asal gerilme değeri -623.74 kN/m^2 olarak okunmaktadır. Maksimum asal gerilmelerin olduğu bölge asal gerilmelerin birikim yaptığı yan duvarlar bölgesinde oluşmaktadır.

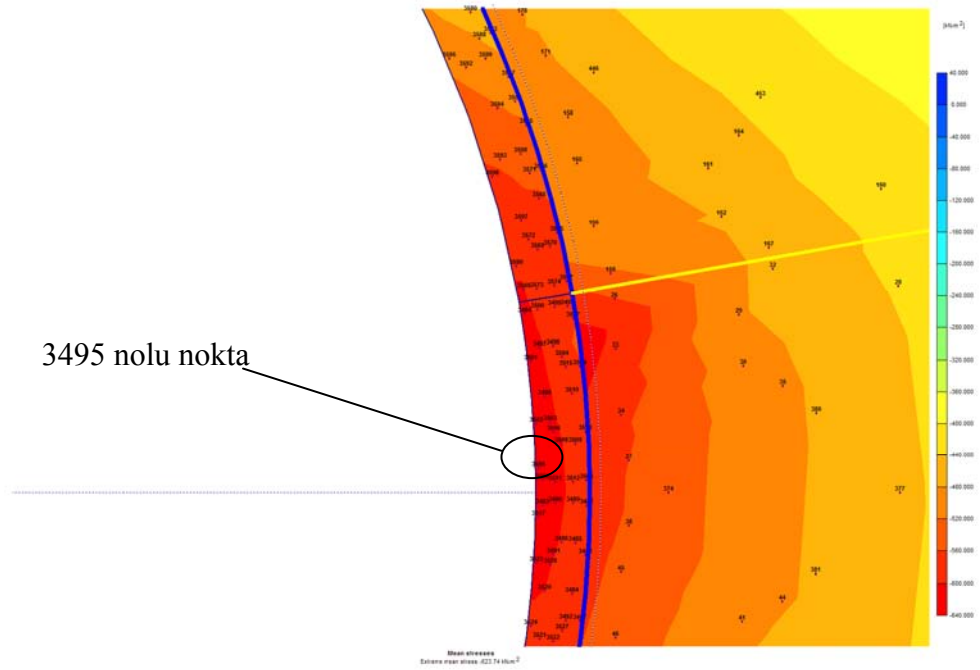


Şekil 4.46 : Model 3 kazı sonrası oluşan efektif asal gerilmelerin yönelimi.



Şekil 4.47 : Model 3 kazı sonrası maksimum asal gerilmeler.

Maksimum basınç gerilmesinin olduğu yan duvarlara Şekil 4.48’de daha yakından bakılmıştır.



Şekil 4.48 : Model 3 maksimum gerilme noktası

Maksimum basınç gerilmesinin oluştuğu 3495 nolu gerilme noktasında, oluşan basınç gerilmeleri şekil 4.49’de verilmektedir.

Soil	Stress	X	Y	σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{xy}	σ_{zz}
Element	Point	[m]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
	3495	6.117	0.136	-3.081	-1604.985	35.841	-248.338

Şekil 4.49 : Model 3 maksimum basınç gerilmeleri

Şekil 4.49’a göre basınç gerilmeleri;

$$\sigma_{xx} = - 3.081 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{yy} = -1604.985 \text{ kN/m}^2$$

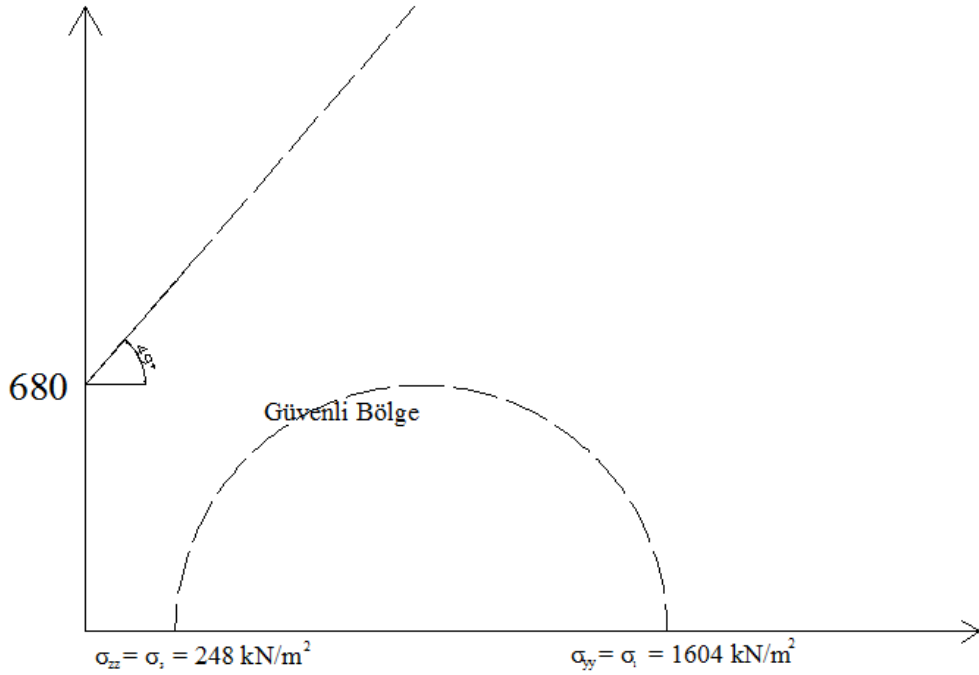
$$\sigma_{zz} = - 248.338 \text{ kN/m}^2$$

Burada yer alan kayaç Bazalt olup dayanım özellikleri;

$$c = 680 \text{ kPa}$$

$$\varphi = 49^\circ \text{ dir.}$$

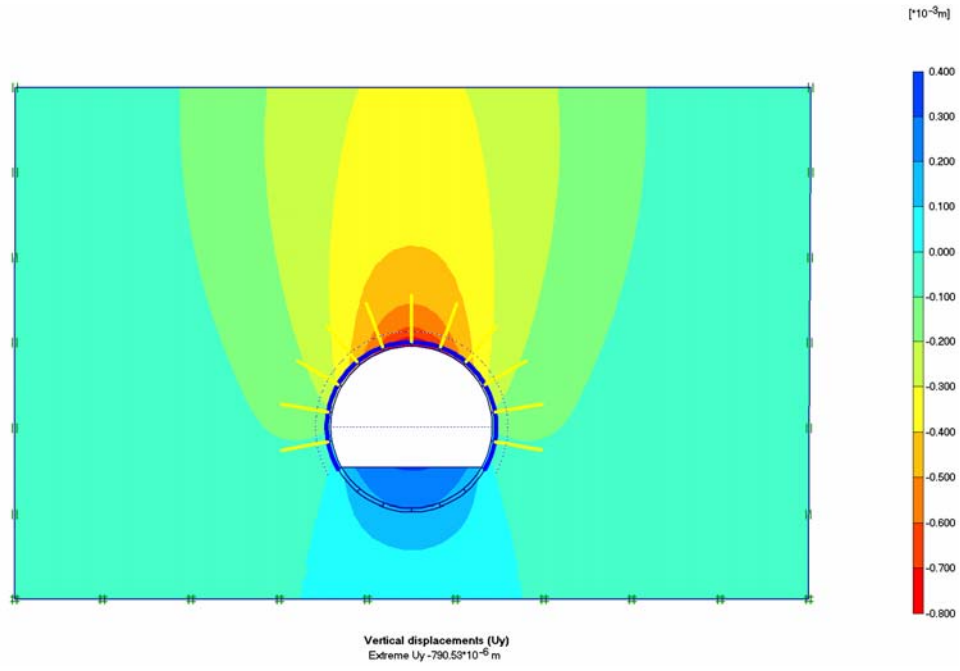
Maksimum gerilmeler için Mohr Zarfı çizildiğinde maksimum gerilmenin kayaç dayanımını aşmadığı ve güvenli tarafta kaldığı görülmektedir. Kayaca ilişkin Mohr zarfı Şekil 4.50’de verilmektedir.



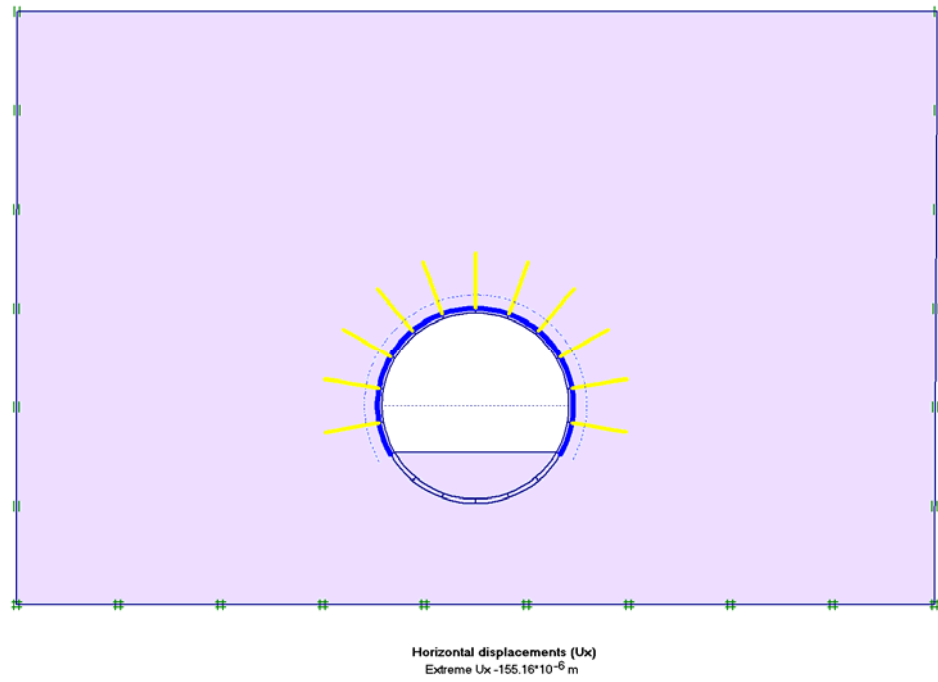
Şekil 4.50 : Model 3 mohr zarfı diagramı

4.5.3.3 Tünel kazısı sonrası oluşan deplasmanlar

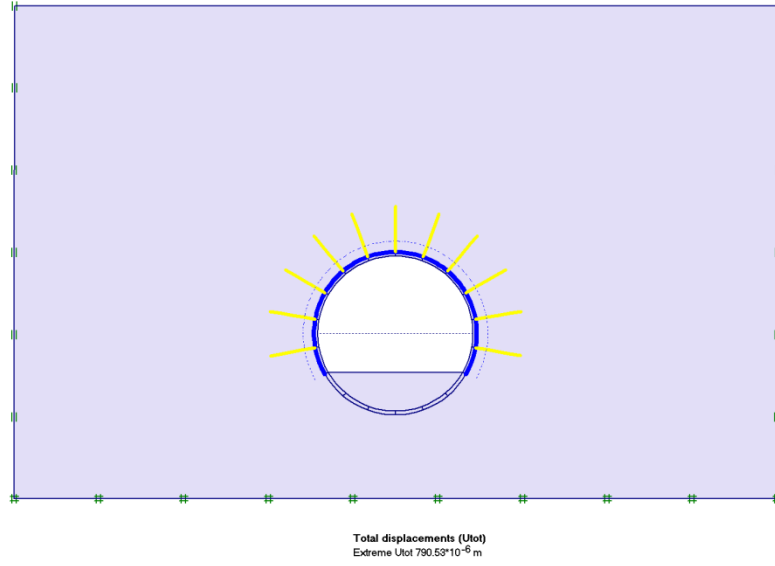
Tünel inşası sırasında kayaçlarda hesaplanan dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli unsur da kazı sırasında ve sonrasında oluşan deplasmanlardır. Tünel kazısının bitirilip, destek elemanlarının konulmasının ardından tünelde ve etrafındaki kayaçlarda oluşması beklenen deplasmanlar belirlenmiştir. Maksimum düşey deplasman 0.79 mm. 'dir. Şekil 4.51'de maksimum düşey deplasman gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi maksimum değer tünelin tepe noktasına aittir. Hesaplanan maksimum yatay deplasman ise 0.155 mm gibi çok düşük bir değer olup, yan duvarlarda oluşmuştur. Şekil 4.52'de maksimum yatay deplasmanlar görülmektedir. Tünellerde oluşan en büyük toplam deplasman ise 0.79 mm ile tünel tavanında meydana gelmiştir. Şekil 4.53'de toplam deplasmanlar görülmektedir.



Şekil 4.51 : Model 3 kazı sonrası düşey deplasmanların bölgesel dağılımı



Şekil 4.52 : Model 3 kazı sonrası yatay deformasyonların bölgesel dağılımı



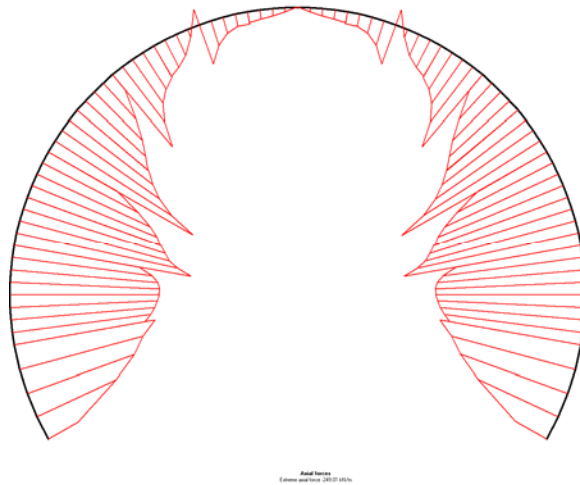
Şekil 4.53 : Model 3 kazı sonrası toplam deplasmanların bölgesel dağılımı

Model 3 için elde edilen deplasman değerleri minimetrenin 1/10'u seviyesinde hesaplanmıştır. Bu değerlerin tünel stabilitesine etkisi yok denecek kadar azdır.

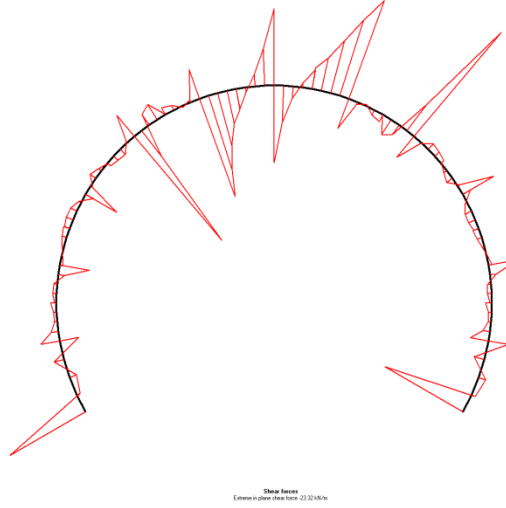
4.5.3.4 Tünel destekleme elemanlarının tahkiki

Püskürtme betonu ve çelik iksa tahkiki;

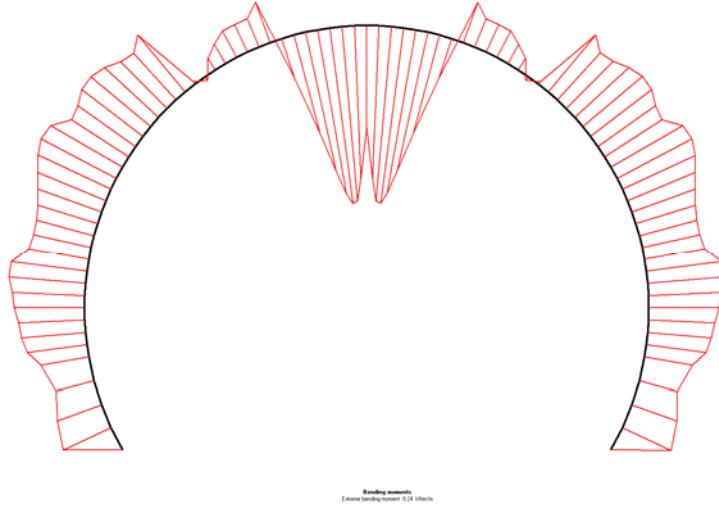
Kullanılan destek elemanları olan, püskürtme beton ve çelik iksa üzerinde oluşan, eksenel kuvvet ve moment büyüklükleri program yardımı ile hesaplanmıştır. Kuvvetlerde (-) basıncı, (+) çekmeyi göstermektedir. Tahkimata etkileyen N_{11} eksenel kuvveti Şekil 4.55'de, Q_{13} kesme kuvveti Şekil 4.56'da ve M_{11} eğilme momenti Şekil 4.57'de verilmiştir.



Şekil 4.54 : Model 3 tahkimata etkileyen normal kuvvetin dağılımı



Şekil 4.55 : Model 3 tahkimata etkiyen kesme kuvvetinin dağılımı



Şekil 4.56 : Model 3 tahkimata etkiyen eğilme momentinin dağılımı

Hesaplarda kullanılacak maksimum iç kuvvetler aşağıda sıralanmıştır;

$$N_{11} = -249.01 \text{ kN/m}$$

$$Q_{13} = -23.32 \text{ kN/m}$$

$$M_{11} = -9.24 \text{ kNm/m}$$

Destekleme elemanlarının tahkiki AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) yönetmeliğine uygun olarak yapılmıştır. Tahkikler aşağıdaki formüller uyarınca yapılmıştır [26];

Moment taşıma kapasitesi;

$$M_d = 0.85 * 13000 * \frac{0.20^2}{6} = 73.66 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$N_d = 0.60 * 13000 * 0.20 * 1 = 1560 \text{ kN} / \text{m}$$

Kesme kuvveti taşıma kapasitesi:

$$V_d = 1.33 \sqrt{13000} * 1 * 0.20 = 30.32 \text{ kN} / \text{m}$$

Kesit yeterliliği aşağıda hesaplanmıştır.

$$\frac{9.24}{73.66} + \frac{249.01}{1560} = 0.285 < 1$$

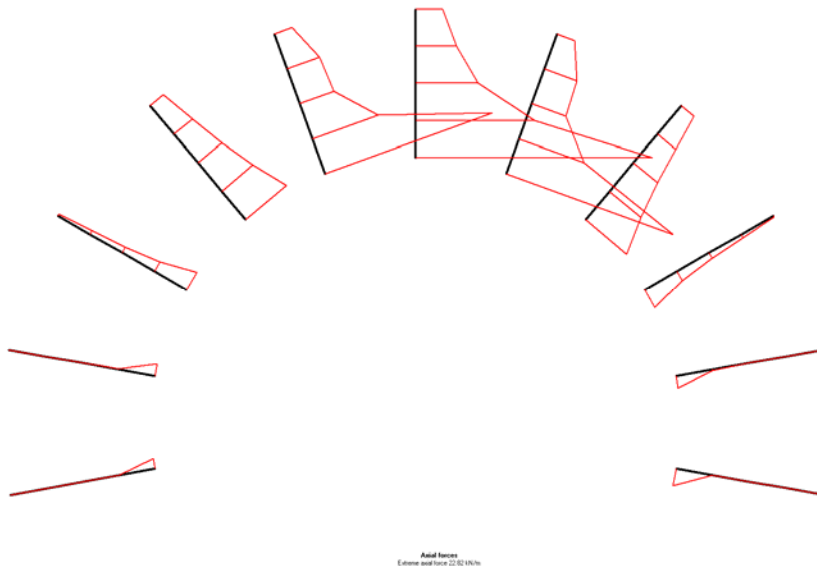
$$Q_{11} < V_d$$

Tahkimat güvenli.

Hesaplardan da görüleceği gibi tünel güzergahının Model 3 bölümü analiz ve hesap sonuçlarına göre, seçilen püskürtme betonu ve çelik iksa üzerine gelen iç kuvvetler, tahkimatın taşıma kapasitesinin altında kaldığı görülmüştür.

Bulon tahkikleri;

Bulon sistemine etkiyen maksimum normal kuvvet (N_{11}) değeri, program aracılığı ile hesaplanmıştır. Şekil 4.57'de maksimum normal kuvvet diyagramı görülmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı gibi 1 bulona gelen maksimum normal kuvvet değeri; 22.82 kN'dur.



Şekil 4.57 : Model 3 bulonlara etkiyen normal kuvvet N_{11}

Bulonun çekme dayanımı;

$$\sigma = \frac{22.82}{\frac{3.14 \times 2.8^2}{4}} = 3.70 \text{ kN} / \text{cm}^2 \langle \sigma_{guv} = 36.5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

Beton enjeksiyonunda dayanım;

Bu ifadede yer alan τ kayma gerilmesi f_{ctd} betonun çekme dayanımı d bulon yarıçapı ve l bulon boyudur.

$$\tau = \frac{22.82}{3.14 * 2.8 * 400} = 6.48 * 10^{-3} \text{ kN} / \text{cm}^2 \langle f_{ctd} = 0.1 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

Bulonlar emniyetli sınırlar içinde kalmaktadır.

5. SONUÇLAR

Günümüzde mühendisliğin birçok dalında kullanılan bilgisayar programlarının matematiksel tabanını oluşturulan sonlu elemanlar metodu, geoteknik mühendisliğinde kullanılan bilgisayar paket programlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan bilgisayar modelleri, yer altı yapılarında sayısal ifadelendirilmesinde başarılı sonuçlar verir. Tünel güzergâhı boyunca geçilen her bir ayrı formasyonun birim hacim ağırlığı, elastisite modülü, poisson oranı, kohezyonu ve içsel sürtünme açıları sisteme girilerek, kayaç özellikleri programa tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu kullanılarak, Karadeniz sahil yolunda yapılmış olan Arhavi Tüneli modellenmiştir. Tünellerin geçtiği güzergah boyunca jeolojik ve geoteknik koşullar değerlendirilmiş, güzergah 4 adet homojen bölgeye ayrılmıştır. Bu dört homojen bölgeyi en iyi temsil eden 3 adet en kesit oluşturulup analizler modellenen bu en kesitler üzerinden yapılmıştır.

Modelleme PLAXIS V.8.2 paket programı kullanılarak yapılmıştır. PLAXIS özellikle Geoteknik Mühendisliğinin ilgi alanına giren, yer altı yapıları, derin temeller ve kazıkların, deformasyon ve stabilite analizleri için geliştirilmiş bir sonlu eleman paketidir. İnceleme konusu olan NATM tünelinin jeolojik ve geoteknik verileri alınmış ve programda modellenmiştir. Tünel güzergahı benzer özellik gösteren 4 farklı homojen bölgeye ayrılmıştır. Aşamalı kazı programa tanıtılarak, kazı aşamalarında oluşabilecek elverişsiz durumlar da incelenmiştir. Kazı aşamaları olarak, ilk önce tünelin üst yarı kazısı yapılmış ardından üst yarı tahkimatı yapıldıktan sonra alt yarı kazısına geçilmiştir. Alt yarı kazısını tahkimatı izlemiştir. Analiz sonrasında efektif asal gerilmelerin dağılımı, düşey ve yatay deplasmanlar ve toplam deplasmanların bölgesel dağılımı ve tahkimata etkiyen iç kuvvetler ve deplasmanlar elde edilmiştir. Bu elde edilen veriler kullanılarak kayaçların yenilme durumu, tahkimatın taşıma gücü incelenmiştir.

Yapılan analiz sonrasında maksimum deplasmanlar ve gerilme değerleri homojenleştirilmiş üç bölüm için Çizelge 5.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 : Analiz sonuçlarının özetlenmesi

Modellenen Bölümler	Model 1	Model 2	Model 3
Asal Gerilmeler	523 kN/m ²	155 kN/m ²	623.74 kN/m ²
Toplam Deplasman	5.40 mm	6.81 mm	0.79 mm
Yatay Deplasman	1.25 mm	1.85 mm	0.155 mm
Düşey Deplasman	6.19 mm	6.81mm	0.790 mm

NATM kaya sınıfları B1, B2 ve B3 olan Arhavi tünel güzergâhında öngörülen tahkimat sisteminin, yapılan hesaplar sonucunda yeterli olduğu belirlenmiştir. Bilgisayar modeli verileri tünelde oluşan maksimum deplasmanın 7 mm mertebesinde olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan sayısal modelleme çalışması ile tünel kazısı sırasında gerilmelerin yönelimi ve yığılma noktaları belirlenmiştir. Böylelikle kazı yapılırken özel dikkat edilmesi gereken bölgeler belirlenmiştir.

Bazalt ve Tüfit özellik taşıyan kayaç formasyonunun, barındırdığı 3 boyutlu süreksizlikler sebebi ile güvenli tarafta kalmak için belirtilmiş kazı sınıfları ve bunlara karşılık gelen tahkimat sistemi kullanılmıştır. Geoteknik mühendisliğinde kullanılan diğer bilgisayar programlarında olduğu gibi, bu tez çalışmasında kullanılmış olan bilgisayar programında da yapısal süreksizlikler programa tanıtılmamıştır. Ancak Arhavi tünel güzergâhında süreksizlikler ve kayaçların eklemlikleri az olduğundan yapılan çalışma sağlıklı olmuştur.

Satır ve arkadaşlarının 2007 yılında yapmış oldukları “Üç Boyutlu Deformasyonların Jeodezik Ve Sonlu Eleman Yöntemiyle Belirlenmesi: Arhavi Tüneli Örneği” çalışması kapsamında Arhavi tüneli incelenmiştir [47]. Tünel güzergahında jeodezik olarak deformasyonları belirlemek için farklı aralıklarla sekiz istasyon oluşturulmuştur. Her istasyonda iki omuz ve tepe noktasından oluşmak üzere üç kontrol noktası belirlenmiş ve düzenli aralıklarla bu noktalardan ölçümler alınmıştır. Yapılan çalışma neticesinde bulunan deplasmanlar tez çalışmasında hesaplanan deplasmanlarla örtüştüğü görülmektedir. Tünel güzergahındaki maksimum deplasmanın 7 mm’den küçük olduğu gözlenmektedir. Bahsi geçen çalışmanın deplasman grafikleri Ekler bölümünde sunulmaktadır.

Tünel gibi yer altı yapıları projelendirilirken yapılan çalışma bir ön proje olarak kabul edilmelidir. NATM'in temel prensiplerinden biri olan, kazı aşamasında oluşacak durumlar yerinde incelenerek gerekli görülen tahkimat değişiklikleri sahada yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Bozkurt, M.**, 1987. Tüneller Ders Notları, *İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası*, İstanbul.
- [2] **Tarakçı, M, Bulutlar, E. ve Genç, D.**, 1985. Tünelcilik ve Jeoloji, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası*, Ankara.
- [3] **Mahtab, M A., Grasso, P.**, 1992. Geomechanics Principles in the Design of Tunnels and Caverns in Rock, *Elsevier Publications*, Tokyo.
- [4] **Köse, H.; Gürgen, S; Onargan, T; Yenice, H; Aksoy, C. O.**, 2007. Tünel ve Kuyu Açma, *D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 256*, İzmir.
- [5] **Url-1**, <http://en.wikipedia.org/wiki/Marc_Isambard_Brunel> alındığı tarih: 01.04.2010
- [6] **Url-2**, <http://en.wikipedia.org/wiki/Channel_Tunnel> alındığı tarih: 01.04.2010
- [7] **Url-3**, < http://en.wikipedia.org/wiki/Simplon_Tunnel> alındığı tarih: 01.04.2010
- [8] **Whittaker, B. N., Frith, R. C.**, 1990. Tunneling, Design, Stability and Construction, *The Institution of Mining and Metallurgy*, London.
- [9] **Kolymbas, D.**, 2005. Tunneling and Tunnel Mechanics, A Rational Approach to Tunnelling, *Springer Publications*, Innsbruck.
- [10] **Bickel, John O., Kuesel, T. R., King, Elwyn H.**, 1996. Tunnel Engineering Handbook, *Springer Publications*, New York.
- [11] **Ergin, K.**, 1992. Yeni Avusturya tünel inşa yönteminde sonlu elemanlar yöntemiyle tünel kaplaması hesabı, *Yüksek Lisans Tezi. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [12] **Lunardi, P.** 2008. Design And Construction Of Tunnels, *Springer Publications*, Milano.
- [13] **Kahyaoğlu, H.**, 2008. TAG otoyolu özelinde tünel işleri ve yeni Avusturya tünel açma yöntemi, *İnşaat Mühendisleri Odası*, Ankara.

- [14] **Aktaş, S. Ş.**, 2009. Yeni Avusturya tünel açma yöntemi ile inşa edilen bir tünelin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi ve değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Singh, B., Goel, R. K.**, 2006. Tunneling in Weak Rocks, *Elsevier Publications*, London.
- [16] **Karaoğlu, H.**, 2002. Kaya zeminde tünel tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Şeker, Ö.**, 2008. Yeni Avusturya prensiplerine göre tünel kaplama tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] **Karpuz, C., Hindistan, M. A.**, 2006. Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası*, Ankara.
- [19] **Ulusay, R., Sönmez, H.**, 2007. Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası*, Ankara.
- [20] **Arioğlu, E.**, 2008. Tünel Ders Notları. *Yıldız Teknik Üniversitesi*, Alındığı yer; <http://www.inm.yildiz.edu.tr/anabilimdallari/ulastirmatr/tunel.htm>.
- [21] **Hoek, E.**, 2001. Big Tunnels in Bad Rock, 2000 Terzaghi Lecture. 9, 2001, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, p. 726-740.
- [22] **Deere, D. U., Peck, R.B., Parker, H., Monsees, J.E., Schmidt, B.**, 1970. Design of Tunnel Support Systems, *Highway Res. Rec.*, Illinois.
- [23] **Rose, D.**, 1982. Revisign Terzaghi's Tunnel Rock Load Coefficients, *AIME, 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics*, Berkeley, p. 953-960, New York
- [24] **Ertunç, A.**, 1983. Tünellerde yapılan kaya sınıflamaları. Tünelcilik Semineri. s. 164-205, Ankara.
- [25] **Vardar, M.**, 1981. Tünel İnşaatı İçin Kaya (dağ) Sınıflandırmaları- Lauffer, *Müh.Jeol. Türk Milli Kom. Bülteni*, s. 17-21.
- [26] **Hung, C.J., Monsees, J., Munfah, N., Wisniewski, J.**, 2009. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements, *FHWA*, New York.
- [27] **Hoek, Evert.** 2000. Practical Rock Engineering. Course Notes by Evert Hoek, *Rocscience*.
- [28] **Karagöz, S D.** 2007. Kağıthane-Piyalepaşa tünelleri mühendislik jeolojisi çalışması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

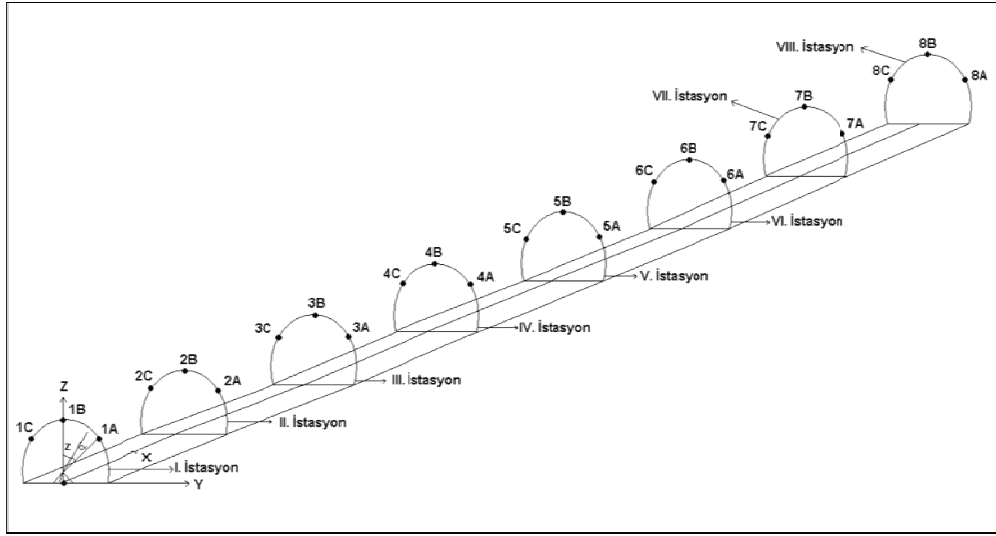
- [29] **Kaya, E.** 2002. Kaya Mekaniği Ders Notları, *Pamukkale Üniversitesi*, Alındığı yer; <http://eakyol.pamukkale.edu.tr/notlararayuz.htm>.
- [30] **Vardar, M.**, 1995. *Projelendirmede ve Uygulamada tünelcilik yaklaşımları*. s.n., *İTÜ İnşaat fak.Prof.İ.Turgan Sabis Sempozyumu*, İstanbul.
- [31] **Bieniawski, Z. T.**, 1976. Classification system is used to predict rock mass behavior, *World Construction*.
- [32] **Kocak, B.**, 2006. Yeraltı Kaya Yapılarının Denetimi Ve Yönlendirilmesinde Uzman Sistem Oluşturulması, *Doktora Tezi*, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [33] **Barton, N. ve Choubey, V.**, 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, s. Vol. **10**, p. 1-54.
- [34] **Grimstad, E., Barton, N.** 1993. Updating of the Q-system for NMT. International Symposium on Sprayed Concrete, s. 46–66.
- [35] **Palmstrom, A. ve Broch, E.**, 2006. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system, *Tunnels and Underground Space*, Vol. **2**, p. 575-593.
- [36] **KGM**, 2005. NATM uygulamalı yeraltı tünel işleri teknik şartnamesi, *T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- [37] **Vardar, M.**, 2005. Time dependent stability problems in tunnels and timedependent behavior of the rock mass, *ITA / AITES, 2005, Training course*, İstanbul.
- [38] **Arioğlu, E., Yüksel, A., Yılmaz, A. O.**, 2008. Püskürtme Beton Bilgi Föyleri Çözümlü Örnekler, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası*, İstanbul.
- [39] **Karakuş, M., Fowel, R J.** 2004. An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM), *Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Kayamek'2004-VII*, Sivas.
- [40] **Nielsen, Y.**, 2002. Railway and Metro Tunnels Lecture Notes, *M.E.T.U.*, Ankara.
- [41] **Vardar, M.**, 1986. Doğal gerilme durumlarının ve süreksizliklerin yer altı kaya yapılarının deformasyonuna etkisi, *Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşaatı Sempozyumu*, Cilt 1, s. 1-4, Adana.
- [42] **Desai, C.S.**, 1972. Theory and application of the finite element method in geotechnical engineering, *Symposium on the applications of the finite element method in geotechnical engineering*. s. 3-8. Mississippi

- [43] **Turfan, M. ve Tosun, H.**, 1994. Basınçlı su tünellerinde kaya kütlesi jeomekanik özelliklerinin destek sistemlerine etkisi ve DSİ uygulamaları, *Su ve Toprak Kaynakları Gelistirme Konferansı, Bildiriler Kitabı*, Cilt II. s. 719-729, Ankara.
- [44] **Ak, E.**, 2005. Tünel Tasarımında Sonlu Eleman Metodu ile Gerilme ve Deformasyon Analizleri-Destek Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [45] **EMAY Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Tic. Ltd. Şti.**, 2001. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Karadeniz Sahil Yolu Projesi Arhavi Tüneli Km 207+815 – 208+815 Mühendislik Jeolojisi Planı ve Boykesiti*, İstanbul
- [46] **EMAY Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Tic. Ltd. Şti.**, 2001. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Karadeniz Sahil Yolu Projesi Arhavi Tüneli Km 207+815 – 208+815 B3 Kaya Sınıfı İçin Tünel Tip Kesiti*, İstanbul.
- [47] **Satır, B., Akköse, M., Yalçinkaya, M.**, 2007. Üç boyutlu deformasyonların jeodezik ve sonlu eleman yöntemiyle belirlenmesi: Arhavi tüneli örneği, *11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Ankara

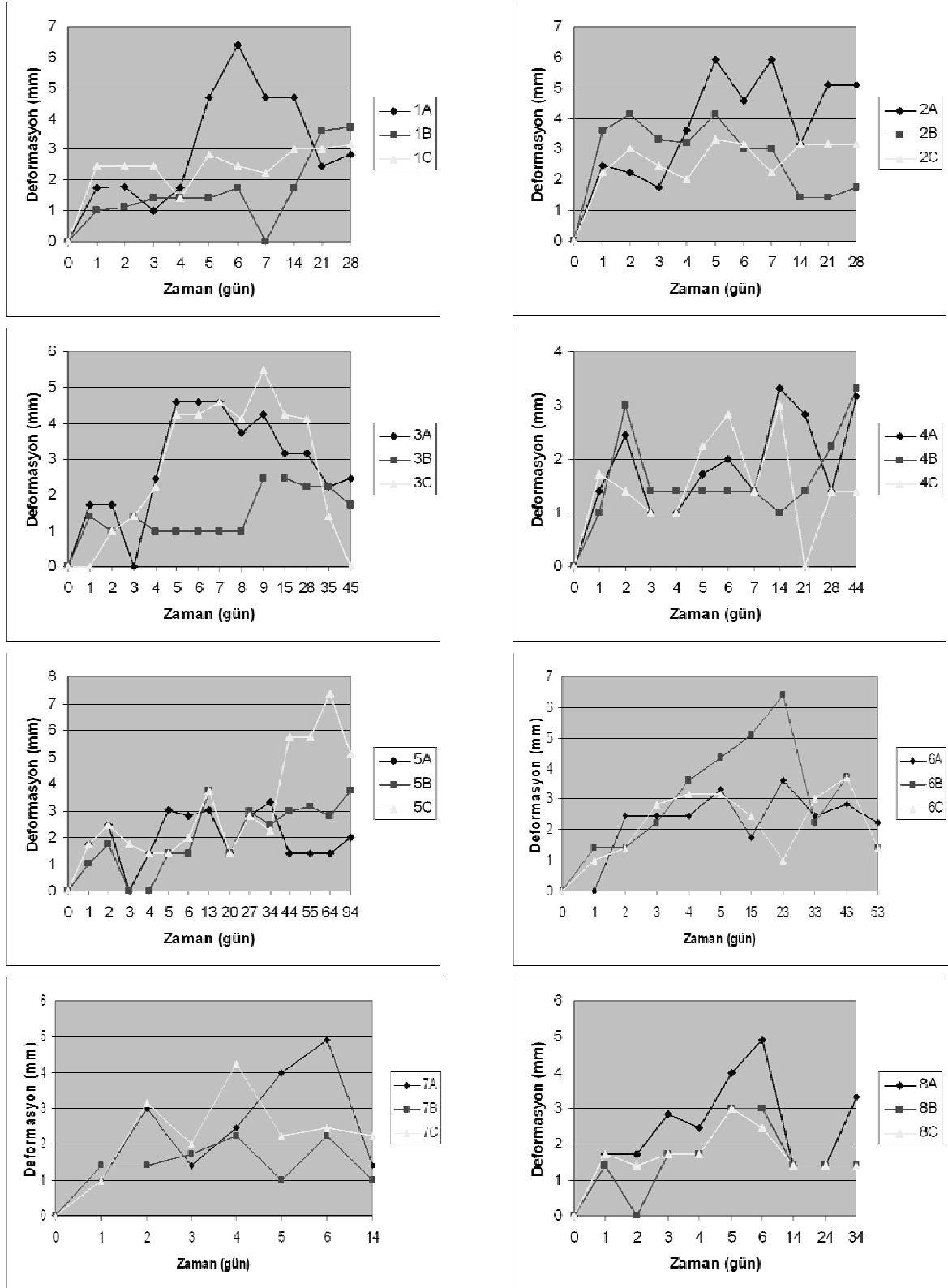
EKLER

EK A.1 : Arhavi tünel istasyon noktaları ve istasyon noktalarının grafiksel deformasyon ölçümleri

Şekil A.1 : Arhavi Tüneli istasyonları [47]



Şekil A.2 : Arhavi istasyon noktaları deformasyon grafikleri [47]



EK A.2: Karadeniz Sahil Yolu, Çayeli-Hopa-ArdeşenKesimi, Arhavi tüneli
B3 Kaya sınıfı için tünel Tip Kesiti.

EK A.3: Karadeniz Sahil Yolu, Çayeli-Hopa-Ardeşen Kesimi, Arhavi tüneli
plan ve boy kesiti.

ÖZGEÇMİŞ

Deniz Polat 1980 yılında Ankara’da doğdu. İlköğrenimini Ankara Hamdullah Suphi İlkokulunda. orta öğrenimini Mersin 19 Mayıs Lisesinde tamamladı. 2000 yılında İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne girmeye hak kazandı. 2006 yılında bu fakülteden mezun olarak Mühendis ünvanını aldı. Bir çok mühendislik projesinde. yapı mühendisliği alanında çalıştı. 2009 yılından itibaren kurucusu olduğu Ninova Yapı mühendislik çatısı altında. projelendirme hizmeti vermektedir.