

KAYA ZEMİNDE TÜNEL TASARIMI

127018

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Halil KARAOĞLAN
501981152

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 2 Ocak 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Ocak 2002

TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ergün TOĞROL (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU (İ.Ü.)

[Handwritten signatures of Prof. Dr. Ergün TOĞROL, Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY, and Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU]

OCAK 2002

127018

TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ÖNSÖZ

Bugünlere gelmemde üzerimde çok büyük emekleri geçen sevgili anne ve babama, tez çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ergün TOĞROL'a, ayrıca tüneller hakkındaki bilgilerini benimle paylaşan Sayın Prof. Dr. Mahir VARDAR' a teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak 2002

Halil KARAOĞLAN



İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. TÜNELCİLİKTE TASARIM VE PROJELENDİRME YAKLAŞIMLARI	3
2.1. Tünelcilikte Tasarım Yöntemleri	3
2.1.1. Terzaghi'nin kaya yükü sınıflaması	4
2.1.2. Stini, Rabcewicz ve Lauffer'in sınıflamaları	6
2.1.3. Deer'in kaya kalitesi (RQD) sınıflaması	10
2.1.4. Kaya yapısı oranı (RSR)	10
2.1.5. Geomekanik RMR sistemi	14
2.1.6. Kaya kütlesi kalitesi "Q" sınıflandırma sistemi	18
2.1.6.1. Kaya kütlesi niteliğini (Q) tahmin etme yöntemi	19
2.1.6.2. Destek basıncı hesabı	26
3. YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ (NATM)	35
3.1. Giriş	35
3.2. Natm'e Göre Kaya Sınıflamalarının Belirlenmesi	37
3.3. Yeni Avusturya Yönteminde ÖNORM B 2203/1994'e göre Yinelenmeli (sıralı) ve Sürekli (makinalı) Kazılar için kaya davranışı	39
3.3.1. A "sağlam" - "zamanla kırılğan" davranışlı kayaçlar	40
3.3.1.1. A1 sağlam kayaçlar	40
3.3.1.2. A2 zamanla kırılğan davranış gösteren kayaçlar	40
3.3.2. B "kırılğan" davranışlı kayaçlar	41
3.3.2.1. B1 kırılğan kayaçlar	41
3.3.2.2. B2 çok kırılğan kayaçlar	41
3.3.2.3. B3 döküntülü kayaçlar	42
3.3.3. C "plastik" davranış gösteren kayaçlar	43
3.3.3.1. C1 kaya patlamalı kayaçlar	43

3.3.3.2. C2 plastik davranış gösteren kayaçlar	44
3.3.3.3. C3 aşırı plastik davranış gösteren kayaçlar	44
3.3.3.4. C4 yumuşak kayaçlar	45
3.3.3.5. C5 şişen-kabaran kayaçlar	45
3.4. Yapım Sırasında Kaya Sınıflandırmasında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar	48
4. ANALİTİK TASARIM METODU	50
4.1. Giriş	50
4.2. Sayısal Modelleme	50
4.2.1. Sayısal modellemenin uygulanması	51
4.3. Fiziksel Modelleme	52
4.4. Kaya Malzeme için Kırılma Kriteri	52
4.5. Kaya Kütlesi için Kırılma Kriteri	53
5. TÜNELLERİN DESTEKLENMESİ VE SAĞLAMLAŞTIRMA	55
5.1. Giriş	55
5.2. Şişme Basıncı	56
5.3. Gevşeme Basıncı	57
5.4. Dağ Basıncı	57
5.5. Tünel Desteklemesine Etki Eden Yük	57
5.6. Püskürtme Beton	58
5.7. Tel Kafes	58
5.8. Kafes Donatı	59
5.9. Kaya Bulonu	59
5.9.1. Enjeksiyonlu bulon	60
5.9.2. Reçineli bulonlar	60
5.9.3. Swellex bulon	60
6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	62
6.1. Giriş	62
6.2. Plastik Tünel Analizi	63
6.3. Analizler	64
6.4. Çatlaklı Kayaçların Malzeme Özellikleri	64
6.5. Tünellerde Yük-Deformasyon Eğrileri	64
6.6. Destek Rijitliği ve Maksimum Destek Basıncı	66
6.6.1. Beton kaplama ve püskürtme beton için destek rijitliği ve maksimum destek basıncı	66
6.6.2. Çelik iksa için destek rijitliği ve maksimum destek basıncı	67

6.6.3. Mekanik veya kimyasal ankrajlı enjeksiyonsuz kaya bulonları için destek rijitliği ve maksimum destek basıncı	68
6.6.4. Birkaç destek tipi birarada kullanıldığında destek rijitliği ve maksimum destek basıncı	68
7. SONUÇLAR	70
KAYNAKLAR	71
EKLER	73
ÖZGEÇMİŞ	155



KISALTMALAR

RQD	: Rock Quality Designation
RSR	: Rock Structure Rating
RMR	: Rock Mass Rating
NATM	: New Austrian Tunneling Method
SRF	: Stress Reduction Factor
ESR	: Excavation Support Ratio
Sb	: Spot bolting
B	: Bolting
Utg	: Untensioned grouted
Tg	: Tensioned grouted
S	: Shotcrete
Mr	: Mesh reinforced
CIm	: Chain link mesh
CCA	: Cast Concrete Arch
Sr	: Steel reinforced
FEM	: Finite Element Method

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Beklenilen dağ basınçları (Terzaghi' ye göre).....	5
Tablo 2.2. Beklenilen dağ basınçları (Stini'ye göre).....	6
Tablo 2.3. Rabcewicz' e göre kaya sınıflaması	7
Tablo 2.4. Lauffer' e göre kaya sınıflaması	8
Tablo 2.5. Grob'a göre kaya sınıflamaları.....	9
Tablo 2.6. RSR-A parametresi, genel jeoloji alanı (Wickham et al., 1974)..	11
Tablo 2.7. RSR-B parametresi, eklem paterni ve açma yönü (Wickham et al., 1974).....	12
Tablo 2.8. RSR-C parametresi, yer altı suyu, eklem durumu (Wickham et al., 1974).....	12
Tablo 2.9. Sınıflama parametreleri ve dereceleri.....	15
Tablo 2.10. Eklem yönlemine göre düzeltme.....	16
Tablo 2.11. Kaya sınıflamaları ve dereceleri.....	16
Tablo 2.12. Kaya sınıflama yorumları.....	16
Tablo 2.13. Eklem yönelimi.....	17
Tablo 2.14. At nalı şekilli tünellerde ilk iksanın seçimi.....	17
Tablo 2.15. 5-10 m çapındaki tünelleri için Terzaghi'nin (1946) tavan desteği basıncı hesabı.....	27
Tablo 2.16. Terzaghi'nin 9 kaya kütlesi sınıfı için Q tahmini.....	27
Tablo 2.17. Q sistemi : Olağanüstü iyi, son derece iyi, çok iyi ve iyi kaliteli kaya kütleleri için uygun destek önlemleri (Q'nun 1000-10 değerleri arası).....	30
Tablo 2.18. Q sistemi : Orta ve zayıf kaya kütleleri için uygun destek önlemleri (Q'nun 10-1 değerleri arası)	31
Tablo 2.19. Q sistemi : Çok zayıf kaya kütleleri için uygun destek önlemleri (Q'nun 1-0.1 değerleri arası).....	32
Tablo 2.20. Q sistemi : Çok zayıf kaya kütleleri için uygun destek önlemleri (Q'nun 0.1-0.001 değerleri arası).....	33
Tablo 3.1. Uyumluluk faktörü ile kaya davranışı arasındaki ilişki.....	47
Tablo 3.2. Kritik derinlik ile kaya davranışı arasındaki ilişki.....	47
Tablo 3.3. Kaya sınıflarının karşılaştırılması.....	49

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : RSR kavramı-makine ile tünel açma için düzeltme (Wickham et al., 1972).....	13
Şekil 2.2 : RSR kavramı-6.5 m çaplı tünel için destek tablosu (Wickham et al., 1972).....	13
Şekil 2.3 : Q Sisteminde destekleme nerileri (Barton, Grimstad,1994).....	25

SEMBOL LİSTESİ

J_n	: Çatlak (eklem) takımı sayısı
J_r	: Çatlak pürüzlülük sayısı
J_a	: Çatlak ayrışma sayısı
J_w	: Çatlak suyu indirgeme faktörü
J_v	: Toplam eklem sayısı
P_{tavan}	: Kalıcı tavan desteği basıncı
P	: Destek basınç kapasitesi
a	: Bulon açıklığı
L	: Uzunluk
B	: Kazı eni
H	: Kazı boyu
σ_1	: Ana asal gerilme
σ_3	: Minör asal gerilme
σ_c	: Eksenel olmayan sıkıştırma kuvveti
A, F, K	: Sabitler
τ_m	: Maksimum kesme gerilmesi
σ_m	: Normal gerilme
m, s	: Ampirik sabitler
P_o	: Kayaç gerilmesi
P_i	: Destek basıncı
γ_r	: Kırılmış kaya kütlelerinin birim ağırlığıdır
u_{lo}	: Tünel kazısından destekleme yapıncaya kadar geçen zamanda tünelin radyal deformasyonu
P_i	: Radyal destek basıncı,
k	: Destek rijitliği,
r_1	: Tünel yarıçapıdır.
E_c	: Shotcrete veya betonun elastisite modülü,
ν_c	: Shotcrete veya betonun poisson oranı,
t_c	: Kaplama kalınlığı.
$\sigma_{c \text{ cone}}$	: Shotcrete veya betonun tek eksenli basınç dayanımıdır
E_s	: Çelik iksanın elastisite modülü,
A_s	: Çelik iksanın kesit alanı,
S	: Çelik iksanın tünel eksenine yönünde ara mesafesi.
σ_{ys}	: Çeliğin akma mukavemetidir
S_c	: Tünel çevresi yönünde kaya bulonu ara mesafesi
S_e	: Tünel eksenine yönünde kaya bulonu ara mesafesi
L	: Kaya bulonu bağlanma ucu ile kafa arasındaki serbest uzunluk,
D_b	: Bulon çapı
E_b	: Bulon malzemesinin elastisite modülü
Q	: Ankraj ve kafa için yük deformasyon sabitidir.
T_{br}	: Kaya bulonu taşıma yükü

ÖZET

Sonlu elemanlar yöntemi, tünel mühendislik hesaplarında sayısal metodların önem kazanmasıyla birlikte hızla gelişmiştir. Geoteknik mühendisliğinde, bu metod kullanılarak geometrik açıdan çok karmaşık olan tünel yapısı, heterojen malzeme özellikleri ile birlikte statik olarak modellenebilmektedir.

Bu çalışmada Yeni Avusturya Tünel Açma Methodu ile kaya zeminde tünel tasarımı incelenmiştir. Bu kapsamda NATM prensiplerine göre çalışan Smap-3d ve Tuna-plus sonlu elemanlar programları kullanılarak tünel tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Birinci bölümde konuya genel bir giriş yapılmakta, çalışmanın kapsam ve amacından bahsedilmektedir. İkinci bölümde tünelcilikte tasarım ve proje yaklaşımları incelenmiştir. Ampirik tasarım, gözleme dayalı tasarım, analitik tasarım, bütünleyen tasarım ve rehber tasarım yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Özellikle ampirik tasarım yöntemleri ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

Üçüncü bölümde Yeni Avusturya Tünel Açma Methodu incelenmiştir. Burada NATM'i diğer yöntemlerden farklı kılan ana ilkeler maddeler halinde açıklanmış ve ÖNORM B 2203/1994'e göre kaya davranışı irdelenmiştir. Bu bölümde özellikle ÖNORM B 2203'e göre yapılan kaya sınıfları ile bu ortamlarda beklenen kazı ve destekleme türleri gruplara ayrılarak incelenmiştir. Bölümün sonunda ise kaya sınıflarının karşılaştırılmasını içeren tabloda konu özetlenmeye çalışılmıştır.

Dördüncü bölümde sayısal ve fiziksel modellemeyi içeren analitik tasarım metodu incelenmiştir. Burada kaya davranışının modellenmesi amacıyla oluşturulan Murrel ve Hoek kırılma kriterleri açıklanmıştır. Beşinci bölümde tünellerin desteklenmesine etki eden şişme, gevşeme ve dağ basınçlarından bahsedilmiştir. Bu bölümde özellikle tünel destekleme ve sağlamlaştırma sistemleri olan püskürtme beton, çelik hasır, çelik iksa ve kaya bulonu irdelenmiştir.

Altıncı bölümde sonlu elemanlar yöntemi ve çalışma prensipleri açıklanmıştır. Yedinci bölümde Smap-3d ve Tuna-plus sonlu elemanlar programları kullanılarak çözülen Çayeli Tüneli ile ilgili ulaşılan sonuçlar verilmiştir.

SUMMARY

In recent years, numerical methods have received increasing attention in tunnel engineering solutions. Therefore, finite element solutions for tunnel design have rapidly developed. Thanks to this method, the design of tunnels having complex geometric dimensions and heterogen soil properties was realized.

In this thesis, tunnel design in rock is investigated in respect of The New Austrian Tunnelling Method. Smap-3d and Tuna-plus finite element programs based on NATM principles are used.

The first part of the thesis is a general introduction of the subject where the purpose and the scope of the thesis are given. In the second part of the thesis, the design and project approaches in tunnel design are investigated. Empirical, observational, analytical, integrated and guided design methods are explained. Especially, details of empirical design method is scrutinized.

In the third part of the thesis, The New Austrian Tunnelling Method is studied. The properties of NATM which is different from other design methods are clarified and according to ÖNORM B 2203/1994, rock behaviour is studied. Specially, rock classifications of ÖNORM B 2203 together with excavation and support systems in this classifications are analysed. End of that part, comperative rock classification tables are given.

In the fourth part of thesis, empirical design method which includes numerical and physical models is scrutinized. Murrel and Hoek failure criteria are detailed for understanding rock behaviour. In the fifth part of the thesis, swelling, loosening and gravity pressure which effect tunnel support system are studied. Particularly, tunnel support and strengthening system that is shotcrete, wire mesh, steel rib and rock bolt are presented.

In the sixth part of thesis, finite element method is explained. In the seventh part of the thesis, the design calculations of Çayeli Tunnel are made using Smap-3d and Tuna-plus finite element programs.

1.GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Yerkabuğunun inşaat mühendisliğinin amaçlarına uygun olarak yapılan genel tanımı ve ayrımında, ortamların türü ve niteliklerinden önce, onun davranışını farklılaştıran durum ve bulunuş şekilleri belirleyici olmaktadır. Bu nedenle, ortamlar farklı isimlerde sınıflandırmakta ve daha sonra da bu ortamların hidrolojik, fiziksel, kimyasal, mekanik ve dinamik–sismik davranışlarını belirleyen ve yönlendiren özellik, nitelik ve koşulları sayısal olarak belirtmeye çalışılmaktadır. Tünel kazıları bu farklı nitelik ve davranıştaki ortamlardan biri veya birkaçı içinde gerçekleştirilmekte ve dolayısıyla, tünel mühendisliği zemin mekaniği ve kaya mekaniği konularıyla içiçe bulunmaktadır.

Dünyanın çeşitli bölgelerinde farklı tünelcilik felsefeleri ve farklı kaya sınıflama metotları geliştirilmiştir. Göreceli olarak üniform jeoloji yapıya sahip bölgelerde kaya kalitesinin sayılarla ifade edildiği ve kaya kütle davranışının formülle tahmin edildiği kaya sınıflama sistemleri geliştirilirken, jeolojik yapının büyük değişkenlikler gösterdiği bölgelerde NATM gibi esnek yapım metotları ve kazı sırasında kaya davranışını esas alan kaya sınıflama yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu çalışma içerisinde Terzaghi'den (1946) başlayarak, günümüze kadar yapılmış olan başlıca planlama metotlarına ait bilgiler verilmektedir.

Son yıllarda NATM'e göre inşa edilen tünellerde kullanılan kaya sınıflama yöntemi kazı sırasında karşılaşılan kayanın geoteknik özellikleri ve tünel yapımı sırasında davranışını kaya parametreleri, örtü yükü, kazı kesiti, ilerleme adımı boyu, kazı sırası yeraltı suyu ve geoteknik ölçüm sonuçlarını dikkate alarak tanımlar.

Tüneller, geometrilerinin ve üstlerine gelen yüklerin karmaşıklığı, kaya ve kaplama malzemelerinin özel durumları ve karşılıklı etkileşimleri sebebiyle analizi oldukça güç yapılardır.

Bu projede **smap-3d** ve **tuna plus** isimli bilgisayar programları kullanılmıştır. **Smep-3d** ve **tuna plus**, davranışı çok farklı olabilen iki veya üç boyutlu geoteknik sistemlerinin hesaplanması için hazırlanmış bir sonlu eleman programıdır.

Bu program tünel geometrisi ve ortamı sınırlayan geometri ve mesnet ve yüklenme koşulları verildiğinde en uygun sonlu eleman ağıını kendisi oluşturmakta ve kayacın mekanik parametreleri (elastisite modülü, poison oranı ve özgül ağırlığı) ile yenilme koşullarının verilmesi halinde düğüm noktalarını ve elemanları numaralandırmakta ve koordinatların hesabını yaptıktan sonra stabilitesi irdellemektedir.

Çalışmanın sonunda **smap-3d** ve **tuna plus** ile hesapları yapılan tünel projesi yer almaktadır. Kazı ve destekleme aşamaları dikkate alınarak hesaplar yapılmış ve her bir aşama için tünelin stabilitesi incelenmiştir.



2. TÜNELCİLİKTE TASARIM VE PROJELENDİRME YAKLAŞIMLARI

2.1. Tünelcilikte Tasarım Yöntemleri

Bir tünel yeraltında kazılmaya başlanmadan önce, tünel güzergahında yapılması gerekmekte olan birçok iş vardır. Özellikle tünel güzergahının geçtiği alanın jeolojik özelliklerinin iyi tespit edilmiş olması gerekmektedir. Bundan 40-50 yıl veya daha önceki jeolojik çalışmalar sırasında yapılmış olan kaya tanımlamaları, mühendislik amaçları için kullanıldıkları zaman yetersiz kalmışlardır. Kayaların bir takım özelliklerinin sayısal ölçülere dayanmayan anlatımı, inşaat mühendislerine yeterince yararlı olmamıştır. Bunun yanında yeraltı gerilmeleri, kaya kütlesinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin doğru tespiti, gibi... parametrelerin özenle saptanmış olması gerekmektedir.

Bu işler doğru olarak yapıldıktan sonra, tünelin istenilen özelliklere sahip olabilmesi için belirli bir takım dizayn (planlama) yöntemleri, birlikte veya birbirleri ile karşılaştırmalı olarak kullanılmaktadır. Böylece en uygun ve güvenli tünel tasarımı ve projesi hazırlanabilecektir. Bu bölümde Terzaghi'den (1946) başlayarak, günümüze kadar yapılmış olan başlıca planlama metotlarına ait bilgiler verilmektedir.

A- Ampirik tasarım yöntemleri

- 1- Terzaghi'nin kaya yükleme sınıflaması
- 2- Stini, Rabcewicz ve Lauffer sınıflamaları
- 3- Deere'nin kaya kalitesi sınıflaması
- 4- RSR (Kaya Yapısı Oranı) içeriği
- 5- Geomekanik sınıflama (RMR sistemi)
- 6- Q Sistemi

B- Gözleme dayalı tasarım yöntemleri

- 1- Kaya gözlem teknikleri
- 2- Yeni Avusturya Tünel Metodu (NATM)
- 3- Birleşme-Hapsetme (Convergence-Confinement) yöntemi

C- Analitik tasarım yöntemleri

- 1- Sayısal modelleme
- 2- Fiziksel modelleme
- 3- Kırılma kriteri.

Bunların dışında daha özel olarak ele alınan tasarım türleri;

A- Bütünleyen tasarımlar (Integrated Design)

- 1- Alman kömür madenciliği için tabaka kontrol sistemleri
- 2- Destek sistemlerinin dizaynı

B- Rehber Tasarımlar (Guided Design)

- 1- Destek tasarımı için genel düşünülenler
- 2- Sivil mühendislik tünellerinde tavan destek dizaynı
- 3- Sağlam kayada veya metal madenciliğinde tavan destek dizaynı
- 4- Kömür madenciliğinde tavan destek tasarımı

şeklinde özetlenebilir.

2.1.1 Terzaghi'nin Kaya Yükü Sınıflaması

Terzaghi'nin kaya yükü sınıflaması, bu konuda yapılmış ilk ayrıntılı sınıflama olarak, tarihsel bir önem taşır (Tablo 2.1). Terzaghi, kayaları ve bunlardan beklenen yükleri sınıflandırmış ve kayalarda açılan tünellerde gerekli destek önlemleri, bu sınıflandırmaya dayanılarak yapılmıştır. Bu sınıflama, çelik iksa önlemleri yönünde uygun olmakla beraber, püskürtme betonu ve kaya bulonlarını kullanıldığı modern tünelcilik yöntemi için uygun değildir. Cecil (1970), Terzaghi sınıflamasının kaya niteliğinin objektif bir değerlendirmesi için çok genel olduğu ve kaya kütleleri hakkında kantitatif bilgi sağlamadığı sonucuna vardı.

Tablo 2.1'de Terzaghi'nin verdiği bu değerlerde b açılan boşluğun eninin yarısı ve h yüksekliğidir. Bu tablo tünelin $1.5(b+h)$ dan daha derinde açılması halinde kullanılabilir. Ayrıca, yer altı su seviyesini üstünde açılan tünellerde 4-6 gruplarına ait tüneller %50 daha küçük tutulabilir.

Tablo 2.1 Beklenen Dağ Basınçları (Terzaghi' ye göre)

Grup	Kayacın özellikleri	m cinsinden dağ basıncı	Açıklamalar
1	Sağlam	-	Ufak tefek kavlaklamalar görülüyorsa tünel içinde kaplama gerekli
2	Katı, tabakalı	0-0.5b	Hafif kaplama, basınç yer yer beklenmedik şekilde değişiklik gösterebilir
3	Masif, az çatlaklı	0-0.25b	Hafif kaplama
4	Az bloklu ve geniş	0.25b-0.35(b+h)	Yanal basınç yok
5	Çokça parçalanmış fakat ayrışmamış	(0.35-1.1)(b+h)	Hiç veya pek az yanal basınç
6	Bütünyle parçalanmış fakat ayrışmamış	1.1(b+h)	Önemli yan basınçlar, sızan suların yumuşatıcı etkisi tabanda önemli yapı gerektirir.
7	Baskılı (yüzeye yakın tünel)	(1.1-2.1)(b+h)	Büyük yan basınç, taban bağı zorunlu, dairesel kesit önerilir.
8	Baskılı (Derindeki tünel)	(2.1-4.5)(b+h)	Büyük yan basınç
9	Kabarma basınçlı ortam	(b+h) değeri göz önüne alınmaksızın 80m'ye kadar gerekli	Dairesel kesit gerekli, uygun olmayan şartlar altında kayıcı bağlar kullanılmalı
10	Sıkışmış kum	(0.62-1.38)(b+h)	-
11	Gevşek kum	(1.08-1.38)(b+h)	-

2.1.2 Stini, Rabcewicz ve Lauffer'in Sınıflamaları

Stini (1950), tüneller ve kaya mekaniğinde 'Avusturya Okulu'nun babası olarak kabul edilir. Stini, kaya kütlelerindeki yapısal kusurların önemini vurgulamıştır (Tablo 2.2).

Tablo 2.2 Beklenen Dağ Basınçları (Stini'ye göre)

Basınca göre sınıflama	Kayaç Cinsi	Çatlak boyu(m)	Açıklamalar
9 Çok baskılı kayaçlar	Şistler, kırılmalı, ezilmiş kayaçlar, aşırı parçalanmış zonlar	40-60	Ağaç tahkimatı, ne kadar sık ve sağlam olursa olsun kırılır
8 Orta baskılı kayaçlar	Kırılmalı, ince tabakalı şistler, fillitler, yumuşak marnlar, grafitik şistler, ıslak kilit taşı	24-40	Çok sık ve sağlam ağaç tahkimatta oldukça önemli hasar görülür
7 Hafif baskılı kayaçlar	Kilit taşı, az deformasyonlu şistler, mikali kuvars şistler, kısa aralıkla bol killi, sert kayaçlar, orta dereceli milonit zonları, killi marn, doğal nemli mil, ıslak taban morenleri	15-25	Sık ve sağlam ağaç tahkimatı yüksek basınç gerilmeleri altında bulunur
6 Çok kırılmalı kayaçlar	İnce tabakalı, çok marnlı kum taşları, mikali fillitler, bazı sert marnlar, kalkerli killi, şistler sahil morenleri	10-15	Kazı sırasında büyük gevşemeler, kavlaklanmalar görülür. Yer yer tavanda göçmeler olur.
5 Kırılmalı kayaçlar	Killi marnlar, bazı ince tabakalı, kırılmalı kum taşları, tektonik oluşumlu dolomitler	4-10	Kazı sırasında oldukça sağlam fakat daha sonra büyük çatlama, kırılma ve kavlaklanmalar
4 Orta kırılmalı kayaçlar	Çok parçalanmış dolomitler (faylanma zonlarındaki)	2-4	Hafif hafif başlayan ve aylar geçtikçe artan kırılma ve kopmalar
3 Az kırılmalı kayaçlar	Aşırı deforme, iyice parçalanmış kuvars fillitler, kloritli şistler, mikali ince kalker tabakalı kalkerli mikali şistler	1-2	Tahkimata etkisi az kazı sırasındaki kopmalar az ve hareketler aylar sonra beklenebilir
2 Yeterince sağlam kayaçlar	Mikali şistler, ince klivajlı gnayslar	0.5-1	İhmal edilebilecek kavlaklanma, ancak pek uzun süre sonra tahkimatsız yerlerde önemli hasarlar
1 Sağlam kayaçlar		0-0.5	Yalnızca kazı dolayısıyla kavlaklanma

Rabcewicz (1958), kimyasal bakımdan ayrışma durumuna bağlı olarak, kayanın kendini tutma süresi ve gerekli sağlamlaştırma türünü (geçici ve kalıcı) ortaya koymuştur (Tablo 2.3).

Tablo 2.3 Rabcewicz' e göre kaya sınıflaması

Dağ Türü		Kendini tutma süresi T (gün)		Sağlamlaştırma Türü		
				Geçici		kalıcı
				Çelik beton içinde ankraj	Çelik bağ, Ağaç ikse	
1	Sağlam somkaya	Kimyasal bakımdan bozulmamış	00	Hiçbir sağlamlaştırma önlemine gerek yok		
2	Tabakalı klivajlı sağlam kaya		00-24	Çelik ankraj		Püskürtme beton veya ankraj, beton kaplama
3	Çok çatlaklı, kırıklı kaya		24-1			
4	Tümüyle parçalanmış kaya		0	-	Madenci tahkimatı, çelik bağ veya ağaç	Beton
5	Psödo(yalancı) sağlam kaya	Kimyasal bakımdan bozulmuş	Jeolojik koşullara ve su gelişine bağlı olarak birkaç günden birkaç saate kadar	Püskürtme beton, ankraj, çelik hasır, madenci tahkimatına yardımcı olmak üzere ek püskürtme beton ve ankrajlar	Madenci tahkimatının gerektiği hallerde çelik veya ağaç bağlar	
6	Yüzeye yakın az baskılı kaya					
7	Derindeki çok baskılı kaya					
8	Kabarma-şişme basıncılı kaya					
9	Silt, kil			Henüz yeterince tecrübe yok	Madenci tahkimatı, çelik veya ağaç bağ	Çelik beton kaplama
10	Kum,çakıl, kohezyonsuz ayrık kayaç	Kimyasal olarak sağlam				

Lauffer (1958), herhangi bir aktif iksasız kaya genişliği için tünelin ayakta kalma zamanını değişik kaya kütlesi sınıfları ile ilişkili olduğunu düşünmüştür (Tablo 2.4). Bir aktif iksasız genişlik, tünelin genişliği veya iksadan aynaya olan uzaklıktır (eğer bu uzaklık tünel genişliğinden küçük ise). Tünelin ayakta kalma zamanı, kazıdan sonra tünelin iksasız olarak ayakta kalabileceği zaman aralığıdır [1,2].

Tablo 2.4 Lauffer' e göre kaya sınıflaması

Kaya Kalitesi	Kaya Sınıflaması	Kendini tutma süresi	Püskürtme betonu (PB)	Kaya Ankrajı	Açıklamalar
	Eski iksa türü (Lauffer'e göre)	Atım Mesafesi			
A	Sağlam	İstenildiği kadar uzun süre	Gerekli değil	Gerekli değil	
B	Zamanla kırılan Kavlaklanmaları tutan önlemler	6 ay 4.0 m	Kalot kısmında 2 ile 3cm kalınlığında.	Gerektiği taktirde	
C	Hafif kırılan zamanla çok kırılan	1 hafta	Kalotta 3-5 cm kalınlığında pb. Çelik hasır gerekli	1-1.5m aralıklarla	Ankraj etkisi çok az
	Ön süren veya sürme kama	3.0 m			
D	Kırılan	5 saat	Genellikle 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 kırılan	20 dakika	7-15 cm. pb. tavanda ve gerektiğinde yanlarda çelik hasır	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 dahil olmak üzere tüm bağlar ve iksa beton içinde bırakılır
	Ayna tahkimatı yapılmaksızın önsüren veya sürme kama	0.4 m			
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			

Tünel kazısı süresince kaya kütlesi stabilitesini tünel eksenin doğrultusu, kesitin şekli, kazı yöntemi ve iksa yöntemi etkiler [3]. Değişik kayaç türlerinin yeriçi boşluklarının hazırlanması sırasında belli başlı davranışları Grob (1967) tarafından bir tablo halinde bir araya getirilmiştir (Tablo 2.5).

Tablo 2.5 Grob'a göre kaya sınıflamaları

	Sağlam	Hafif Kırılgan	Kırılgan	Baskılı
Tahkimat	Gereksiz. En çok metreye 5 bulon	Tel örgü veya püskürtme beton gerekli. 5 bulondan fazla. Aynanın 20m. gerisinde çelik bağlı tahkimat gerekli olabilir.	Her atımdan sonra çelik tahkimat. Bağların arasında hazır beton levhalar veya gunit. Püskürtme beton	Ağır, çepeçevre kapalı tahkimat (atımdan hemen sonra)
Kazı sırasında dikkati çeken hususlar	Pek az sayıda uyumsuz çatlaklar ayrışmaya temayül yok	Uyumsuz çatlaklar, ayrışmaya eğilimi yok	Kopmalar, ayrılmalar, nemlenme ve kayganlaşma, kohezyon azalır, tavanda çekme çatlakları	Çatlaklar boyunca kayma ve kopmalar
Çatlak sayısı (m. başına)	1-5	1-10	50-100	-
Yapı çevresindeki gerilmeler	Çevredeki teğetsel gerilmeler kayacın ve taşın çekme ve basınç dayanımından daha küçük	Teğetsel gerilmeler kayacın basınç ve taşın çekme ve basınç dayanımından daha küçük, yaklaşık olarak kayacın çekme mukavemetine eşit	Teğetsel gerilmeler kayacın çekme ve basınç dayanımından ve taşın çekme dayanımından büyük fakat taşın basınç dayanımından küçük	Teğetsel gerilmeler hem taşın hem de kayacın çekme ve basınç dayanımından büyük
Kazı profilindeki gerilmeler	Atımdan hemen sonra sukünet bulan birkaç mm'lik elasto-plastik deformasyon	Atımdan sonra birkaç mm ile cm arasında elasto-plastik veya plastik deformasyon	Birkaç cm'yi aşmayan plastik deformasyon. Atımdan kısa bir süre sonra hareketlerde durma görülür	Tahkimatin hızına ve sağlamlığına bağlı uzun süre devam eden plastik deformasyonlar
Tünel duvarına binen yük	Yok	Tahkimatin mükemmel yapıldığı hallerde yok	Başarılı tahkimat yok	Örgü tabakasının kalınlığına, tahkimatin cins ve sağlamlığına ve kayaçların özelliğine bağlı olarak değişir.

2.1.3 Deer'in kaya kalitesi (RQD) sınıflaması

Deer (1964), 10 cm ve daha büyük uzun parçaları olan karot parçalarını ölçerek elde edilen karot yüzdesine göre sınıflama yapmıştır. Bu, geniş bir şekilde kullanılmış ve tünel iksası seçiminde çok faydalı olmuştur. Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği, I tipi elmas uçla yapılan sondajda elde edilen karotun en az NX çaplı (5.5 cm) olmasını önermiştir. Kayanın özelliğiyle RQD arasındaki ilişki aşağıdadır:

<u>RQD %</u>	<u>Kaya kalitesi</u>
25	Çok zayıf
25-50	Zayıf
50-75	Orta
75-90	İyi
90-100	Çok iyi

RQD değerinin 95, 90, 85 gibi 5'erli aralıklarla ifade edilmesi uygundur.

Merrit (1972), kaya tünellerinde iksa gereksiminin tahmininde RQD'nin çok değerli olduğunu kabul etmiş ve özellikle eklemleri ince kil dolgulu veya ayrılmış bir birimde RQD tayininin gerekliliğini vurgulamıştır. Tünel stabilitesinde fay kili ve kil tabakasının etkisi Brekke ve Howard (1972) tarafından tartışılmıştır. RQD çabuk ve kolay öğrenilebilen bir özellik olmasına karşılık, eklem yönelimi, sıklık, eklem pürüzlülüğü ve dolgusu gibi özelliklerin tanımlanması için yeterli değildir.

2.1.4 Kaya yapısı oranı (RSR)

RSR (Rock Structure Rating) kavramı, Wickham, Tiedemann ve Skinner (1972) tarafından geliştirilen bir kaya destek tahmin modelidir. RSR, Terzaghi'nin kaya kütlesi sınıflama sisteminden sonraki ilk ayrıntılı kaya kütlesi sınıflama sistemidir. RSR kavramı tünelcilikte kaya kütlesini etkileyen faktörlerin iki genel kategorisini göz önüne almıştır [4]. Bunlar jeolojik parametreler ve yapı parametreleridir.

Jeolojik parametreler:

- Kaya tipi,
- Eklem örneği (eklemlerin ortalama ağırlığı),
- Eklemlerin yönelimi (doğrultu ve eğim),
- Süreksizliklerin tipi,
- Büyük faylar makaslamalar ve kıvrımlar,
- Kaya gereç özellikleri,
- Ayrışma ve bozuşma

Yapı parametreleri:

- a) Tünel boyutu,
- b) Tünelin kazı yönü,
- c) Kazı metodu,

Yukarıdaki değerler A, B ve C olmak üzere üç grupta toplanmıştır.

$RSR = A+B+C$ dir.

A. Kaya yapısının genel tanımı şu esaslara göredir:

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

B. Tünel kazısı yönüne göre süreksizlik örneğinin etkisi:

- 1- Eklem aralığı
- 2- Eklem yönelimi (doğrultu, eğim)
- 3- Tünel açma yönü

C. Yer altı suyu akımı etkisi

- 1- Birleştirilmiş A ve B'ye göre tüm kaya kütlesi niteliği,
- 2- Eklem durumu (iyi, orta,zayıf)
- 3- Su akım miktarı (bir ayak boyundaki tünelde,dakikada galon olarak)

A, B ve C parametrelerine ilişkin bilgiler sırasıyla tablo 2.6, tablo 2.7 ve tablo 2.8 de verilmiştir [5].

Tablo 2.6 RSR-A parametresi, Genel jeoloji alanı (Wickham et al., 1974)

	Ana kaya tipi				Jeolojik yapı			
	sert	orta	yumuşak	ayrılmış	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

Tablo 2.7 RSR-B parametresi, Eklem paterni ve açma yönü (Wickham et al., 1974)

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 ⁰ -20 ⁰	20 ⁰ -50 ⁰	Düşey 50 ⁰ -90 ⁰	20 ⁰ -50 ⁰	Düşey 50 ⁰ -90 ⁰	0 ⁰ -20 ⁰	20 ⁰ -50 ⁰	Düşey 50 ⁰ -90 ⁰
çok sık eklemli <5.08cm.	9	11	13	10	12	9	9	7
sık eklemli 5.08-15.24cm	13	16	19	15	17	14	14	11
orta derece eklemli 15.24-30.48cm	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	40	40	38	34

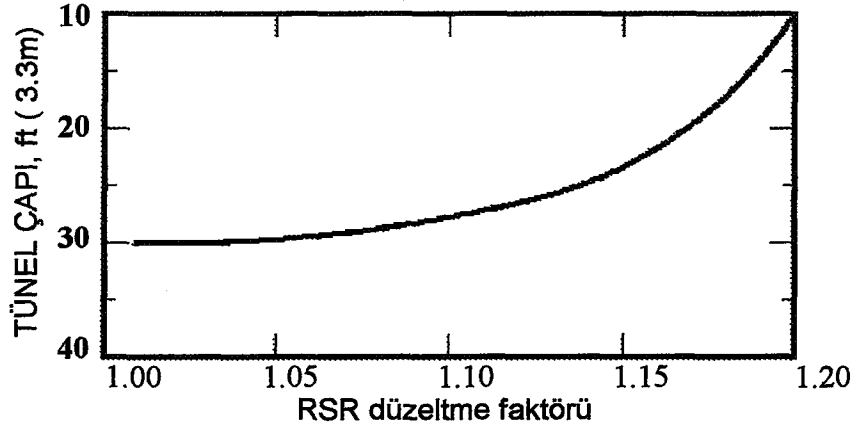
Tablo 2.8 RSR-C parametresi, Yer altı suyu, eklem durumu (Wickham et al., 1974)

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 (< 0.74m³)	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

**eklem durumu: iyi= sıkı yada çimentolu; orta= az ayrılmış; zayıf= çok ayrılmış yada açık

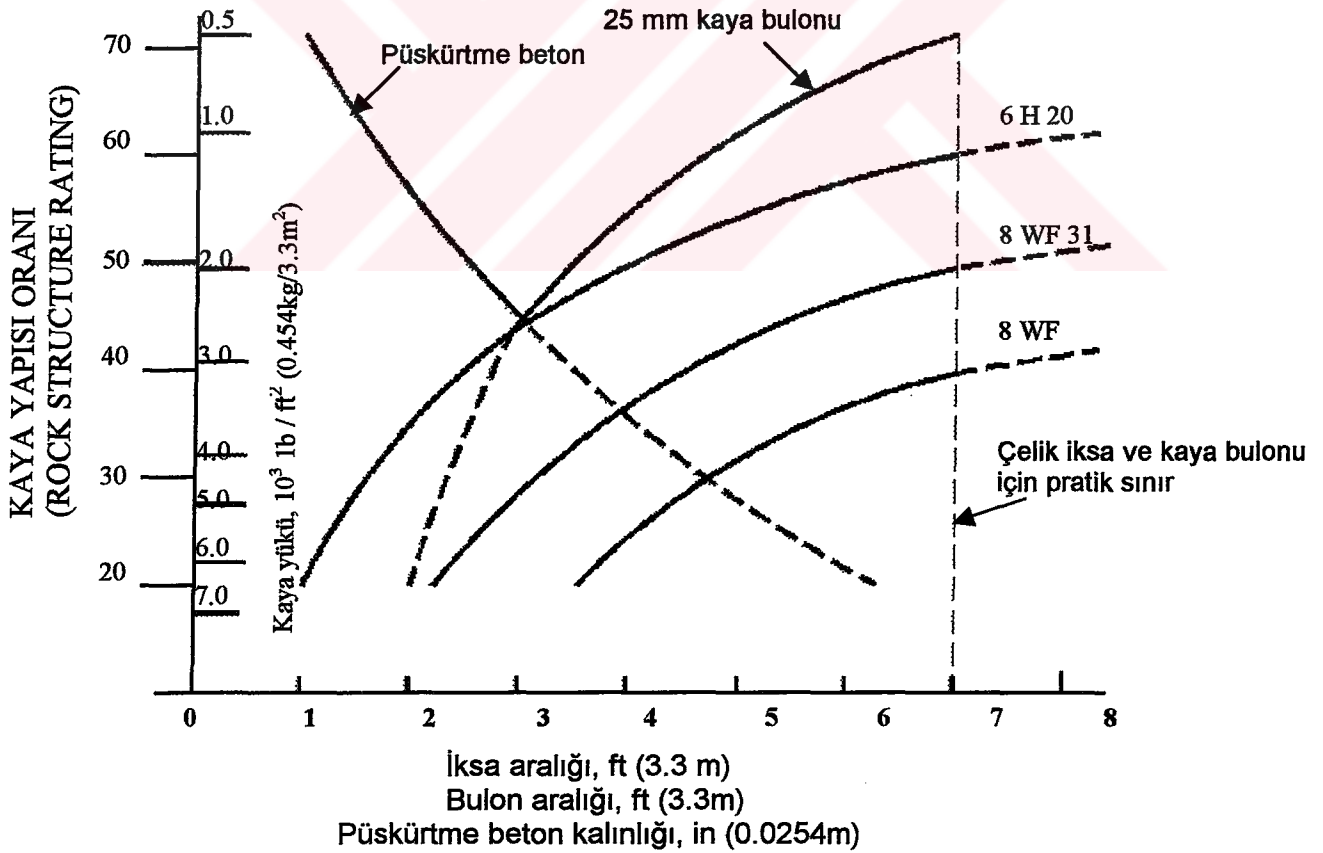
RSR değeri 19'dan küçük olan kayalarda kuvvetli iksa gerekir. RSR değeri 80 veya daha fazla olan kayalarda iksa gerekmediği sonucuna varılmıştır. RSR tahmin modeli ilk olarak çelik iksaya göre geliştirildi. Kaya bulonu ve püskürtme betonu kullanılarak yapılan destekleme için veriler yetersizdi.

Bulunan RSR değeri, iksaya esas olmak üzere kaya kütesinin niteliğini yansıtır. Delme ve patlatma metoduyla tünel açma sırasında kullanılan iksa miktarına göre, makine ile tünel açarken kullanılan iksa miktarı daha azdır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 RSR kavramı-makine ile tünel açma için düzeltme (Wickham et al., 1972)

20 ft (=6.5 m) çaplı tüneller için iksa gereksinim tabloları hazırlanmış bulunmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 RSR kavramı-6.5 m çaplı tünel için destek tablosu (Wickham et al., 1972)

Kaya bulonları ve püskürtme betonunu temsil eden eğriler kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Aslında RSR kavramı, kaya tünellerinde çelik iksa seçimi için çok yararlı bir yöntemdir, fakat kaya bulonu ve püskürtme betonu seçimi için tavsiye edilmez [6].

2.1.5 Geomekanik RMR Sistemi

Bieniawski (1973,1974 ve 1976) tarafından geliştirilen Geomekanik RMR sistemi, kaya kütlesinin mühendislik verilerini saptamaya yarayan bir yöntemdir. Bu yöntem tüneller, büyük yapı temelleri, şev yamaçları ve yeraltı inşaatında uygun kaya destek önlemlerinin seçiminde kullanılmaktadır. Geomekanik sınıflama yöntemi, altı parametreye dayandırılmaktadır:

- 1- Kayanın tek eksenli basınç direnci
- 2- Sondaj karotlarından elde edilen RQD değerleri
- 3- Eklemlerin sıklığı
- 4- Eklemlerin durumu
- 5- Yeraltı suyu gözlemleri
- 6- Eklemlerin yönelimi

Bu sınıflama, tablo 2.9 da görülmektedir. Uygulama alanında kullanılan geomekanik sınıflamada, dikkat edilecek husus, tasarlanan mühendislik projesine bakılmaksızın önce kaya kütlesinin niteliği hakkında genel bir değerlendirmeye gidilmesidir. Bu da sınıflama parametrelerinin ilk beşini kullanmak suretiyle elde edilir.

Tablo 2.9 Sınıflama Parametreleri ve Dereceleri

1	Sağlam kayanın mukavemeti	Uç-yük mukavemet endeksi	> 8 Mpa	4-8Mpa	2-4 Mpa	1-2Mpa	Tek eksenli basınç deneyini kullan		
		Tek eksenli basınç mukavemeti	> 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	0
2	Sondaj Karot Kalitesi RQD		%90-100	%75-90	%50-75	%25-50	<%25		
	Derecelendirme		20	17	13	8	3		
3	Eklemlerin sıklığı		>3m	1-3m	0.3-1m	50-300m	<50mm		
	Derecelendirme		30	25	20	10	5		
4	Eklemlerin durumu		Çok kaba yüzler sürekli değil ayrılma yok eklemeli sert duvar kayası	Az kaba yüzler Ayırım<1 mm Eklemli sert duvar kayası	Az kaba yüzler Ayırım<1 mm Eklemli yumuşak duvar kayası	Sürtünme izli yüzler veya fay kili<5mm veya 1-5mm açık eklemli sürekli eklemli	Yumuşak fay kili>5mm kalınlık veya açık eklemli>5mm sürekli eklemli		
	Derecelendirme		25	20	12	6	0		
5	Yer altı 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(kırıklar daki su)	Orta basınç altında su	Önemli su problemleri		
	Derecelendirme		10		7	4	0		

Sınıflama parametreleri ve dereceleri belirlendikten sonra değerlendirmeler tünel, yamaç ile ilgili olup olmamasına bağlı olarak, eklemelerin doğrultu ve eğim yönlerine göre düzeltilir (Tablo 2.10).

Tablo 2.10 Eklem Yönelimine Göre Düzeltme

Eklemelerin doğrultu ve eğim yönelimi		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Derecelenme	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Yamaçlar	0	-5	-25	-50	-60

Geomekanik sınıflamayı uygulamak için, önce kaya kütlesi, her bölge yalnızca tek tip iksa gerektirecek belirli özellik ve benzer niteliklere sahip olacak şekilde bölgelere ayrılır [7]. Sahada yapılan ölçümlerle, her bir bölge için sınıflama parametrelerine ilişkin önemli derecelendirmeler seçilir (Tablo 2.11).

Tablo 2.11 Kaya Sınıflamaları ve Dereceleri

Sınıflama No	1	2	3	4	5
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Derecelendirme	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Sınıflama parametrelerinin önemli derecelendirmeleri oluşturulunca, beş parametre toplanır. Önce kaya kütlesi için, yerindeki değerler saptanır. Yüksek değerler en iyi kaya koşullarını vermektedir. Bundan sonra eklem yönelimine göre düzeltmeler yapılır. Düzeltmelerden sonra elde edilen derecelere göre kayalar sınıflandırılır ve her sınıfın yorumu yapılır (Tablo 2.12, Tablo2.13).

Tablo 2.12 Kaya Sınıflama Yorumları

Sınıflama No	1	2	3	4	5
Ortalama dayanım süresi	5m.açıklıkta 10 yıl	4m.açıklıkta 6 ay	2m.açıklıkta 1 hafta	1.5m.açıklıkta 5 saat	0.5m.açıklıkta 10 dakika
Kaya kütlesinin kohezyonu	>300kpa	200-300kpa	150kpa	100-150kpa	<100kpa
Kaya kütlesinin sürtünme açısı	>45°	40°-45°	35°-40°	30°-35°	<30°
Cevherin kazılabilirliği	Çok zayıf	Kolalıklı büyük parçalar çıkamaz	Orta	Kolalıklı kazılır iyi parçalanma	Çok iyi

Tablo 2.13 Eklem Yönelimi

Tünel eksenine dik doğrultu				Tünel eksenine paralel doğrultu		Doğrultuya bakılmaksızın eğim 0°-20°
Eğim yönünde kazı		Eğime ters yönde kazı				
Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil	Orta	Uygun değil

5-12 m genişliğindeki at nalı şekilli tünellerde ilk iksanın seçiminde gösterilen kılavuz tablo 2.14 de gösterilmiştir.

Tablo 2.14 At nalı şekilli tünellerde ilk iksanın seçimi

KAYA KÜTLESİ SINIFLAMASI	KAZI	BİRİNCİL İKSA		
		Kaya bulonları *	Shotcrete	Çelik takımlar
1	Tam kesit 3m.ilerleme	Bazı bulonların haricinde genellikle iksa gerektirmez		
2	Tam kesit 1.0-1.5m ilerleme	Kemerin 2-3 m sinde yer yer bulonlar, tel kafeslerle 2-2.5m. aralıklı, aynaya 20m.ye kadar	Su geçirmezlik için tavan kemerinden 50 mm.	Yok
3	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme Tavandan 1.5-3m.	3-4m.uzunlukta sistematik bulonlar, kemerde tel kafesli, duvarlar ve kemerde 1.5-2m. aralıklı, aynaya 10 m.ye kadar	Tavan kemerinde 50-100mm yan duvarlarda 30mm	Yok
4	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme tavandan 1-1.5m.	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1-1.5m aralıklı,4-5m.uzunluklu sistematik bulonlar. Aynaya 10m.ye kadar gerekli	Tavan kemerinde 100-150mm yan duvarlarda 100mm.Kazı ilerledikçe iksa yerleştirilmelidir	Gereken yerde 1.5m aralıklı yer yer hafif traversler (ribs)
5	Tavan ve taban müşterek ilerleme tavandan 0.5-1m. ilerleme	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1-1.5m aralıklı, 5m.uzunluklu sistematik bulonlar. Aynaya 5m.ye kadar gerekli	Tavan kemerinde 150-200mm.yan duvarlarda 150mm. Aynada 50mm. Patlamadan hemen sonra shotcrete uygulanmalı	Çelik iksalı 0.75 m. aralıklı ağır traversler

2.1.6 Kaya Kütlesi Kalitesi “Q” Sınıflandırma Sistemi (Barton, N., Grimstad, E., 1994)

1969 yılında Oslo’da yapılan Yer altı Kazıları Sempozyumu, dikkatleri yeraltı kazılarında uygun destekleme projelerinde ortaya çıkan iki önemli eksiklik üzerinde topladı. Denkhaus (1970) kaya mekaniği verilerinin elde edilmesiyle, varılan kesin kararlar arasında varolan bir eksikliğe işaret etti. Bjerrum (1970) kaya bulunu için projelendirme yapılırken kayaların genişleme özelliğinin göz önüne alınmadığına dikkat çekti. Bjerrum aynı zamanda RQD indisinin bir kayayı tam olarak tanımladığından da kuşku duymaktaydı. Çünkü aynı RQD indisine sahip iki kaya içinde kazı yapıldığında tamamıyla değişik davranışlarda bulunabilirler. Bu kuşku, serbest basınç direnci, kesme direnci, gerilme, eklem sıklığı v.s içinde geçerlidir. Tünel desteği projelerini kesin kararında bu parametrelerini hepsinin göz önüne alınması gereklidir. RQD indisi, eklem sıklığı ve eğer varsa ayrışma derecesi ve boşluk dolgularının beraberce ölçümü olduğundan, diğer parametrelere kıyasla daha önemlidir. Fakat, ayrışmış eklem dolgularının sürtünme açısı ve eklem yüzlerinin pürüzlülüğü gibi, kayaların bazı önemli özellikleri yönünden fazla duyarlı değildir.

Cecil (1970) tarafından tarif edilen daha önceki tünel kazı kayıtları, yöntemin başlangıcındaki gelişimi için geniş bir kaynak oluşturmıştır. Yüksek RQD değerleri için daha geniş tünellere eğilim görülmektedir, fakat bu durum fazla yaygın değildir. İlgili RQD değeri her lokasyonda ölçülen eklem takımlarının sayısı ile bölündüğünde, yöntem geliştirilecektir. Eklem takımlarının sayısı, bir kaya kütlesinin serbestleme derecesinin önemli bir unsurudur.

Önemli bir anomali yok edildiğinde, düzeltilmiş RQD değeri, tünel desteği gereksinimleri için oldukça duyarlılık sağlamıştır. Örneğin üç eklem takımı içeren ve RQD değeri 90 olan bir masif granit kütlesi, sadece bir eklem takımı olan ve eklemleri sıkıca bağlı bir filitle eşit değerde tünel duyarlılığına sahiptir. Fakat fillatin RQD değeri bu durumda sadece 30’dur. Genişleme ve makaslama direncinin önemi RQD ‘de daha da düzeltmeler yapılmasını gerektirir. Eklem pürüzlülüğü, kaya kütlesi niteliği için olumlu bir katkı olduğu halde, eklem alterasyonu ve dolgu maddeleri olumsuz katkıda bulunur. Bu nedenle, eklem pürüzlülüğü ve alterasyonunu gösteren iki cetvel geliştirilmiştir. Orijinal RQD değerini daha da düzeltmek için, kaya yükü ve su basıncı katsayısı da göz önüne alınır.

Yer altı kazısının boyutları (eni, yüksekliği ve çapı) ile amacı (santral binası, su tüneli, deneme tünel aynası v.s) desteğin tipi ve niceliğini belirlemek için kullanılan ek parametreler olmuştur. Fakat bu parametreler kaya kütlesi niteliğini belirlemek

için kullanılmıştır. Eğer geniş anlamda bir sınıflama kabul edilirse, kaya kütlesi niteliğinin belirlenmesinde yer altı kazısının tip ve boyutları gözönüne alınmamalıdır.

2.1.6.1 Kaya kütlesi niteliğini (Q) tahmin etme yöntemi

Barton ve arkadaşlarının tünellerde yaptıkları araştırma sonuçlarına dayanarak ortaya koydukları sınıflandırma sistemlerinde, "Kaya Kütle Kalitesi" büyüklüğü

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (2.1)$$

bağıntısı ile tanımlanmaktadır. (Barton ve Arkadaşları, 1974)

RQD	= Kaya kalitesi özelliği
J_n	= Çatlak (eklem) takımı sayısı
J_r	= Çatlak pürüzlülük sayısı
J_a	= Çatlak ayrışma sayısı
J_w	= Çatlak suyu indirgeme faktörü
SRF	= Gerilme indirgeme faktörü

Bu parametreler çift olup , aşağıdaki şekillerde ifade edilirler:

RQD / J_n	= Nisbi blok boyutu
$J_r / J_a = \tan \phi$	= Blok arası kayma direnci
J_w / SRF	= Aktif gerilme

Söz konusu büyüklük yardımıyla, kaya sınıflandırmasının yanı sıra yeraltı mühendislik yapılarında kullanılacak destekleme tipleri konusunda öneriler yapılabilmektedir. "Q" büyüklüğünde kullanılan parametrelerin aldığı değerler; öncelikle 200 kadar tünel üzerinde belirlenmiş, daha sonra da yaklaşık 2000 tünelde yaptıkları çalışma ile güncelleştirilmiştir.

Olası Q değerlerinin aralığı (0.001-1000) çok sıkışabilir ortamdan, eklemsiz sağlam kayaya kadar olan kaya niteliği tanımlarını kapsar (Aslında kuramsal olarak 300000 den fazla jeolojik tertip yapılabilir).

Karot alınamadığı zaman, RQD birim hacmindeki eklem sayısı vasıtasıyla belirlenebilir. Bunun için her eklem takımının m^3 teki sayısı toplanır. Kil içermeyen kayalarda bu sayı RQD' ye şöyle çevrilir:

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (2.2)$$

J_v : Toplam eklem sayısı (m^3 teki)

Eklemler takımının sayısını belirleyen J_n parametresi genellikle yapraklanma, şiştozite 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 eklemler varsa, bunlar gelişigüzel eklemler olarak değerlendirilmelidir.

<u>Kaya Kalite Tanımlaması</u>	<u>RQD,%</u>
A. Çok Zayıf	0-25
B. Zayıf	25-50
C. Orta	50-75
D. İyi	75-90
E. Çok iyi	90-100

- RQD değerinin 10'dan daha küçük değerler alması durumunda (0 değeri dahil) Q'nun hesabında 10 değeri esas alınmalıdır.
- RQD değerinin 95, 90, 85 gibi 5'erli aralıklarla ifade edilmesi uygundur.

<u>Çatlak (Eklem) Takım Sayısı</u>	<u>J_n</u>
A. Masif birkaç çatlak takımı veya hiç çatlak yok	0,5-1,0
B. Bir çatlak takımı	2
C. Bir çatlak takımı+düzensiz çatlaklar	3
D. İki çatlak takımı	4
E. İki çatlak takımı+düzensiz çatlaklar	6
F. Üç çatlak takımı	9
G. Üç çatlak takımı+düzensiz çatlaklar	12
H. Dört veya daha fazla çatlak takımı, düzensiz veya çok çatlaklı küp şeker görünümlü	15
J. Tamamen ufalanmış kaya, toprak görünümlü	20

- Tünel kesişme kesitlerinde ($3 \times J_n$)
- Tünel girişlerinde ($2 \times J_n$) değerleri alınmalıdır.

Çatlak Pürüzlülük Durumu**J_r**

a. Çatlak yüzeyleri temasta veya b=10 cm'den az kayma hareketiyle temasta

A.	Süreksiz çatlaklar	4,0
B.	Dalgalı-pürüzlü	3,0
C.	Dalgalı-düz	2,0
D.	Dalgalı cilalı	1,5
E.	Düzlemsel-pürüzlü	1,5
F.	Düzlemsel-düz	1,0
G.	Düzlemsel-cilalı	0,5

i. Dalgalı düzlemsel gibi tanımlamalar çatlakların en az 2m'lik uzunluğu boyunca olan genel karakterini, pürüzlü, düz, cilalı tanımları ise çatlak yüzeyinin küçük ölçekteki özelliklerini tanımlar

b. Makaslama ile çatlak yüzeylerinin teması sağlanmadığında

H.	Çatlak yüzeylerinin temasını önleyecek kadar kalın kil dolgusu	1,0
I.	Çatlak yüzeylerinin temasını önleyecek kalınlıkta kum, çakıl ve breş (ezilme zonu) dolgusu	1,0

i. Ortalama çatlak aralığı 3m'den fazla ise değerlere 1 eklenmelidir.

ii. Makaslama hareketi izleri taşıyan ve bu izlerin olumlu yönde bulunduğu düzlemsel-cilalı çatlaklar için J_r =0,5 değeri alınabilir.

Çatlak Ayrışma Durumu**φ_r (yaklaşık)****J_r**

a. Çatlak yüzeyleri temasta (Mineral dolgu-kil kaplaması yok)

A.	Sıkıca kaynaşmış set yumuşamayan geçirimsiz dolgu		0,75
B.	Ayrışmamış çatlak yüzeyleri, sadece boyanması	25°-35°	1,0
B.	Az ayrışmış çatlak yüzeyleri, yumuşamayan yüzey mineralleri	25°-30°	2,0
C.	Siltli veya kumlu yüzey killeri, kil içeriği az (yumuşamayan)	25°-30°	3,0
E.	Yumuşamayan veya düşük sürtünme açılı yüzey killeri, kaolin, mika, talk, jips, ve grafit, ve az miktarda şişen kil (1-2 mm veya daha az kalınlıkta, süreksiz yüzey dolgusu)	8°-16°	4,0

- b. 10cm'den az bir kayma hareketiyle çatlak yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde (ince mineral dolgu)
- F. Kum taneleri, kil içermeyen ufalanmış kaya vs. 25°-30° 4,0
- G. Çok aşırı konsolide, yumuşamayan kil dolgulu (sürekli, kalınlığı 5mm' den az) 16°-24° 6,0
- H. Orta veya az aşırı konsolide, yumuşamayan kil dolgulu (Sürekli, kalınlığı 5mm'den az) 12°-16° 8,0
- J. Şişen kil dolgusu, montmorillonit vb (sürekli, kalınlığı 5mm' den az J_a değerleri şişme özelliği olan kil boyutundaki parçaların %sine bağlıdır. 6°-12° 8,0-12,0
- i. Kalıntı içsel sürtünme açısı ϕ_r değerleri, eğer varsa ayrışma ürünlerinin mineralojik öngörmek için verilmiştir.

c. Çatlak yüzeylerinde kayma durumunda temas yok (ince mineral dolgu)

- K. } Ufalanmış veya parçalanmış kaya ve kil bantları 6°-24° 6,8
- L. } veya zonları (kil özelliklerinin tanımı için G,H,J veya 8,12
- M. } koşullarına bakınız.)
- N. Silt veya kum boyutunda killerden oluşan bantlar veya zonlar, kil içeriği az (yumuşamayan) 5,0
- O. } Kalın sürekli kil bantları veya zonları (kil 6°-24° 10,13
- P. } özelliklerinin tanımı için G,H,J koşullarına veya
- R. } bakınız) 13,0-20,0

Çatlak Suyu İndirgeme Faktörü

	<u>su basıncı</u> (kgf / cm^2)	<u>J_w</u>
A. Kuru kazılar veya yer yer az su geliri, lokal olarak 5lt/dak'dan	<1	1,0
B. Orta miktar su geliri, veya su basıncı,dolgu		
C. yeryer su ile yıkanıp akarak boşalabilir.	1-2,5	0,66
D. Kendi kendini tutabilen kayalarda dolgunsuz çatlaklardan çok miktarda su geliri veya basıncı	2,5-10	0,5
E. Çok miktarda su geliri ve basıncı dolgu hemen tümüyle yıkanarak akmış	2,5-10	0,33

- F. Patlatma ile ortaya çıkıp zamanla azalan çok aşırı su geliri veya basıncı >10 0,2-0,1
- G. Zamanla azalmayan çok aşırı su geliri veya su basıncı >10 0,1-0,05
- i. C ve F' deki faktörler gözlemle kabaca tahmin edilir. Drenaj sağlanırsa J_w arttırılmalıdır.
- ii. Suyun donması, buz oluşumu gibi özel problemler dikkate alınmamıştır.

Gerilme İndirgeme Faktörü

SRF

- a. *Kazıyı kesen, tünel kazısı yapıldığında kaya kütlelerinde gevşemelere neden olabilecek zayıf zonlar*
- A. Kil içeren veya kimyasal ayrışmaya uğramış birden fazla zayıflık zonu, çok gevşemiş kaya kütleleri (herhangi bir derinlikte) 10,0
- B. Kimyasal ayrışmaya uğramış kaya veya kil içeren tek zayıflık zonu (kazı derinliği>50m) 5,0
- C. Kimyasal ayrışmaya uğramış kaya veya kil içeren tek zayıflık zonu (kazı derinliği>50m) 2,5
- D. Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada birden fazla Makaslama zonu, kaya kütlelerinde gevşeme (herhangi bir derinlikte) 7,5
- E. Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada birden fazla Makaslama zonu (kazı derinliği ≤50m) 5,0
- F. Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada tek makaslama zonu (kazı derinliği>50m) 2,5
- G. Gevşek, açık (dolgusuz) çatlaklar, çok çatlaklı veya küp şeker (herhangi bir derinlikte) 5,0
- i. Makaslama zonlarının kazıyı kesmediği fakat etkilediği durumlarda SRF değerleri %25-50 oranında azaltılır.

b.	<u>Sağlam kayada kaya gerilmesi problemleri</u>	σ_c / σ_1	σ_θ / σ_c	<u>SRF</u>
H.	Az derinlikte kazı, düşük gerilme koşulları, açık çatlaklar	>200	<0,01	2,5
J.	Orta derecede kaya gerilmesi koşulları	200-10	0,01-0,3	1
K.	Yüksek gerilme, çok sıkı yapısal unsurlar, gerilme koşulları genellikle elverişli, fakat duvarlarda stabilite problemleri oluşabilir.	10-5	0,3-0,4	0,5-2

L.	Masif kayada orta derecede, kabuk şeklinde kaya parçası ayrılması (kazıdan sonraki 1 saat içerisinde)	5-3	0,5-0,65	5-50
M.	Masif kayada kazıdan hemen sonraki dakikalarda aşırı derecede, kabuk şeklinde parça ayrılması veya kaya patlaması oluşumu	3-2	0,65-1,0	50-200
N.	Masif kayada şiddetli kaya patlaması ve ani dinamik deformasyonlar	<2	>1	200-400

i. Aşırı anizotropik doğal gerilme ortamlarında (eğer ölçülmüşse); $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ ise kayacın basınç dayanımı " σ_c ", $0,75 \times \sigma_c$ oranında azaltılmalı, eğer $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ olması durumunda da " σ_c " $0,50 \times \sigma_c$ kadar azaltılmalıdır.

Burada σ_1, σ_3 = sırasıyla birincil ve ikincil asal gerilme,

σ_θ = elastik teoriye göre belirlenen maksimum teğetsel gerilme.

ii. Kazı genişliğinin örtü kalınlığından fazla olması durumunda (bkz. H koşulu) SRF değeri 2,5 dan 5'e çıkarılmalıdır.

c.	<i>Sıkışan kaya; kendi kendini tutamayan kayanın yüksek gerilme altında plastik akma deformasyonu</i>	σ_θ / σ_c	SRF
O.	Sıkışan kayada orta derecede gerilme koşulları	1,5	5-10
P.	Sıkışan kayada aşırı gerilme koşulları	>5	10-20

i. Kazı derinliğinin $H > 350 \times Q^{1/3}$ olması durumunda kayada sıkışma şartları oluşmaktadır. (Singh ve arkadaşları, 1992) Kayacın basınç dayanımı ise $q = 0,7 \cdot \gamma \cdot Q^{1/3}$, (Mpa) bağıntısı ile kestirilebilir.

γ = kayacın yoğunluğu, kN/m³

(Singh, 1993)

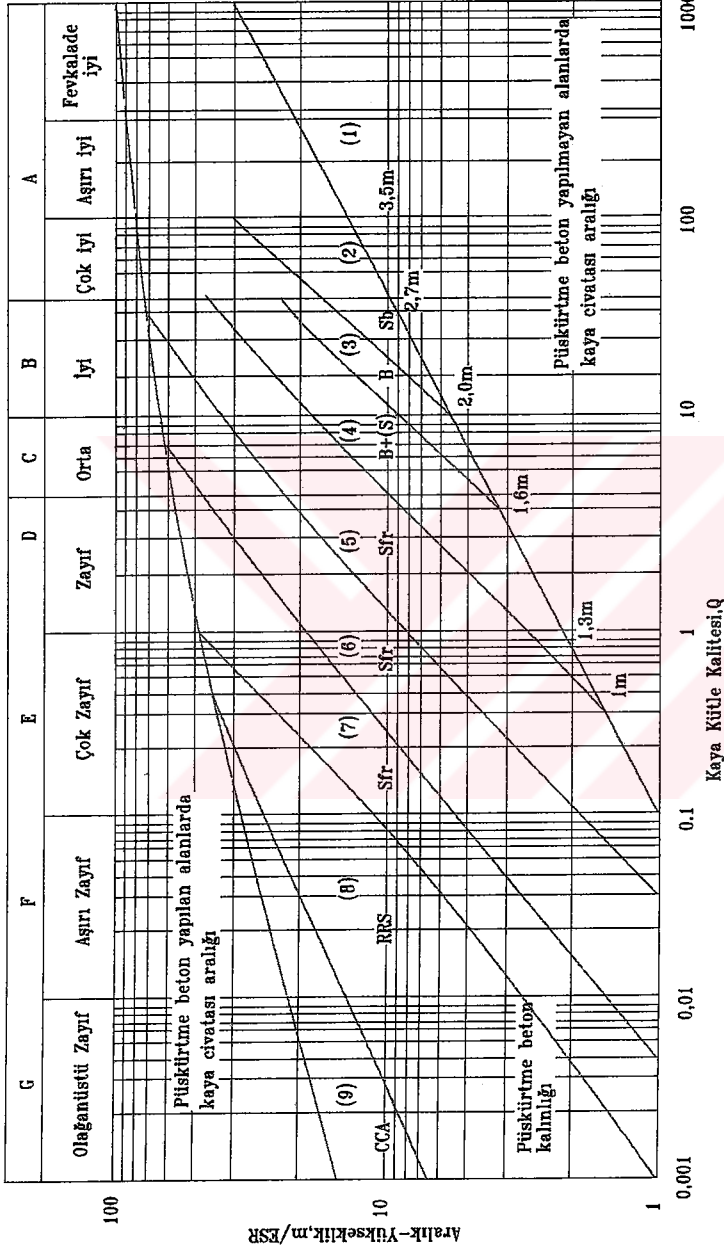
d. *Şişen kaya; Su basıncına bağlı olarak şişmede kimyasal etkenlik durumu*

R.	Şişen kayada orta derecede gerilme koşulları	5-10
S.	Şişen kayada aşırı gerilme koşulları	10-20

i. Ja ve Jr sınıflandırması olumsuz yönlenme ve kayma dayanımı bakımından olumsuz stabilite şartları oluşturan çatlak takımı veya süreksizliğe uygulanır.

Q sistemi yardımıyla, kaya sınıflandırmasının yanı sıra yeraltı mühendislik yapılarında kullanılacak destekleme tipleri konusunda öneriler yapılabilmektedir. Bu konuyla ilgili açıklamalar şekil 2.3 de gösterilmiştir.

KAYA SINIFLARI



DESTEKLEME KATEGORİLERİ

- | | |
|--|---|
| (1) :Tahkimatsız | (5) :Lifli Püskürtme Beton (5-9cm) ve Kaya civatası, Sfr+B |
| (2) :Noktasal kaya civatası, sb | (6) :Lifli Püskürtme Beton (12-15cm) ve Kaya civatası, Sfr+B |
| (3) :Sistematik kaya civatası, B | (7) :Lifli Püskürtme Beton (9-12cm) ve Kaya civatası, Sfr+B |
| (4) :Sistematik kaya civatası, (ve donatısız püskürtme beton), 4-10cm, B(+S) | (8) :Lifli Püskürtme Beton (>12cm) ve Kaya civatası, ve çelik iksa, Sfr+RRS+B |
| | (9) :Yerinde Dökme Beton Kaplama, Cca |

Şekil 2.3: Q Sisteminde Destekleme Önerileri (Barton, Grimstad, 1994)

J_r ve J_a parametreleri belirli bir zonda önemli eklem takımlarının en zayıfını veya kil dolgulu süreksizliği temsil etmelidir. Fakat J_r/J_a değeri minimum olan eklem takımı veya süreksizlik zonu duyarlılık yönünden uygun konumdaysa, bu durumda daha az uygun doğrultulu eklem takımı veya süreksizlik zonu daha önemli olabilir [8].

Kaya kütlesinin değeri bir yerden diğerine belirgin olarak değişiyorsa, bu yerlerin haritasının yapılarak ayrı ayrı sınıflandırılması çok yerinde olur. Değişen yerlerde Q değeri ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Eklem sıklığının, pürüzlülüğünün ve alterasyon derecesinin değişmesi nedeniyle Q değerinin 4 misli azalması veya artması, destek şartlarını da değiştirir. Fakat değişken zonlar yer altı kazılarının sadece birkaç metresini kapsıyorsa, formasyonu genel olarak ve genel bir Q değeri bularak, genel bir destek projesi hazırlamak daha ekonomik olur. Kısa mesafede destek şartlarını sık sık değiştirmek genellikle ekonomik değildir. Fakat, çok dar bile olsa, şişen ve yumuşayan kil zonları ayrı bir destek yöntemi gerektirir. Bazı hallerde uygun olmayan eğimli makaslama zonları, özel destekleme yöntemi gerektiren çok özel kamalar meydana getirir. Özel yöntem olarak, yeterli boyutlarda gerilmeli ankrajlar çeşitli doğrultudaki kuvvetleri karşılayacak şekilde yerleştirilebilir.

2.1.6.2 Destek Basıncı Hesabı

Tünel kazıları desteklemede kullanılan bütün yöntemlerde çevre kayacında bazı deformasyonlar olacağı kesindir. Özellikle düşük nitelikli kayalarda (sıkışan şişen kayalar hariç) eğer başlangıç desteği çok fazla yumuşak ise veya destek yapılması gecikirse, son yükler daha fazla olma eğilimindedir. Kontrol edilmeyen deformasyonlar, kazı yerinin dolayında gevşemeler oluşturarak, son yüklerin artmasına neden olabilir. Bu konudaki görüşlere göre, püskürtme betonu ve/veya bulonlama ile geçici destek yaparak son yükleri azaltmak gereklidir. Bu şekilde kemerlenmeye yetecek, fakat gevşemeye neden olmayacak kadar deformasyon sağlanacağı için, çelik kiriş ve ahşap destekleme yöntemine göre son yükler en az düzeye indirilir [9].

Terzaghi Yöntemi

Terzaghi tarafından 1946 yılında ortaya konan destek basıncı kriterleri, çoğunlukla çelik kiriş ve ahşap destekler kullanılan demiryolu tünellerindeki gözlemlere dayanır. Bu nedenle kendisinin kriterleri, iyi nitelikli kayalarda çelik kiriş ve ahşap destek yerine püskürtme betonu ve/veya bulonlamayla ilk destekleme yapılmasını uygun görür. Fakat, kötü nitelikli kayalarda önemli olabilecek deformasyonları, önleyebilecek herhangi bir desteklemeyi yeterince çabuk yapabilmek güç olabilir [10].

Terzaghi'nin destekleme yöntemi gözlemleri çok farklı tünel boyutlarını kapsamaz; çalışılan tünellerin büyük bir kısmının çapı 5-10 m arasında değişir. Bu nedenle kendisinin destek basıncı hesabını ilk anda bu boyutlar içinde düşünmek uygun olur (Tablo 2.15). Ayrıca Terzaghi 9 kaya kütlesi sınıfı için Q tahmininde bulunmuştur (Tablo 2.16).

Tablo 2.15 5-10 m çapındaki tünelleri için Terzaghi'nin (1946) tavan desteği basıncı hesabı

Tanımlama	Kaya yükü tahmini (m)	Destek basıncı kg/cm ²	
		B=H=5m	B=H=10m
1.Sert ve sağlam	0	0	0
2.Sert, tabakalı veya şistoziteli	0-0.5 B	0-0.6	0-1.3
3.Masif, orta derecede eklemeli	0-0.25 B	0-0.3	0-0.6
4.Orta derecede bloklu ve damarlı	0.25B-0.35(B+H)	0.3-0.9	0.6-1.8
5.Çok bloklu ve damarlı	(0.35-1.1)(B+H)	0.9-2.9	1.8-2.9
6.Tamamen parçalanmış, fakat kimyasal olarak bozuşmamış	1.1(B+H)	2.9	5.7
7.Orta derinlikte, sıkışan kaya	(1.1-2.1)(B+H)	2.9-5.5	5.7-10
8.Çok derinde, sıkışan kaya	(2.1-4.5)(B+H)	5.5-11.7	10.9-23.4
9.Şişen kaya	80 m ye kadar herhangi bir (B+H)	20.8 kadar	20.8e kadar

Tablo 2.16 Terzaghi'nin 9 kaya kütlesi sınıfı için Q tahmini

No	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q
1	100	<2	4	1	1	1	>200
2	>30	3	1	1	1	1	20-10
3	100	6	<1.5	1	1	1	50-25
4	80	9	1	<3	0.66	1	6-2
5	50	12	1	>3	0.66	1	1-0.4
6	20	15	1	2	<0.66	5	0.8-0.04
7	20	20	1	>6	0.66	5-10	0.03-0.01
8	0	20	1	>6	0.33	10-20	0.004-0.001
9	0	20	1	12	<0.66	10	0.003-0.001

Destek basıncı ile Q arasındaki ilişki

Aşağıdaki ampirik eşitlik, kalıcı tavan desteği basıncı ile Q arasındaki ilişkiyi belirler ve pratikte uygulamalarda uyumluluk gösterir.

$$P_{\text{tavan}} = (2 / J_r) * Q^{-1/3} \quad (2.3)$$

P_{tavan} = Kalıcı tavan desteği basıncı (kg/cm²)

J_r = Eklem pürüzlülük sayısı

Q = Kaya kütlesi niteliği

$$P_{\text{tavan}} = 2 * J_n^{1/2} * Q^{-1/3} / (3 * J_r) \quad (2.4)$$

formülü, yukarıdakinin daha geliştirilmiş bir şeklidir.

Çeşitli büyük kazılar tavan kemeri ve duvarlarda hemen hemen eşit basınç altında desteklenmiştir. Bazı durumlarda duvar basıncı, tavan kemerinde kullanılan üçte birinden az olabilir. Kazı duvarlarının tavana göre daha uygun pozisyonda olması nedeniyle, bir kazı için kaya kütlesinin niteliğinin bir fonksiyonu olarak kabul edilebilecek kuramsal bir duvar niteliği artışı düşünülebilir. 5 Q değerindeki kuramsal bir duvar niteliğinin $Q > 10$ olan iyi nitelikli kayalarda maksimum olarak kabul edilmesi önerilir. Bu küçük kazıların duvarları için desteğe gerek olmadığı anlamına gelir. $0.1 < Q < 10$ aralığındaki orta nitelikli kayalarda duvar basıncı daha önemlidir ve $2.5Q$ değeri kullanılabilir. $Q < 0.1$ olan düşük nitelikli kayalarda, tavan ve taban için aynı Q değerleri kullanılabilir.

Sürekli iksasız maksimum proje açıklığı:

Sürekli iksasız açıklıkların gerçek açıklık sınırları şöyle ifade edilebilir:

$$\text{Açıklık} = 2 * \text{ESR} * Q^{0.4} / (2 * \text{ESR}) \quad (2.5)$$

Burada ESR, destek oranıdır. Kazı tipine göre kazı destek oranı şöyledir:

<u>Kazı tipi</u>	<u>ESR</u>
A.Geçici maden kazıları	3-5
B.Sürekli maden kazıları, hidrolik enerji amaçlı su tünelleri (yüksek basınçlı cebri boyutlar hariç), büyük kazılar için pilot tüneller, yarmalar ve aynalar v.s.	1,6
C.Depolar,su tasfiye tesisleri, küçük yol ve demiryolu tünelleri, denge bacaları, yaklaşım tünelleri v.s.	1,3

D.Santral binaları, büyük yol ve demiryolu tünelleri,
sivil savunma sığınakları

1

E. Yer altı nükleer santralleri, fabrikalar,
spor ve kamu tesisleri

0,8

Bulonlama

Eğer 20 mm çaplı bir bulon için 10 tonluk aktif bir yük kabul edilirse, destek basıncı aşağıdaki gibidir:

$$P = 1/a^2 \quad (2.6)$$

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.

$$\text{Tavan} : \text{Bulon } L = 2 + 0.15B/ESR \quad (2.7)$$

$$: \text{Ankraj } L = 0.40B/ESR \quad (2.8)$$

$$\text{Duvarlar} : \text{Bulon } L = 2 + 0.15H/ESR \quad (2.9)$$

$$: \text{Ankraj } L = 0.35H/ESR \quad (2.10)$$

L = uzunluk (m)

B = kazı eni (m)

H = kazı boyu(m)

ESR = kazı destek oranı

Farklı kalitedeki kaya kütleleri için uygun destek sistemleri tablo 2.17, tablo 2.18, tablo 2.19 ve tablo 2.20 de verilmiştir. Destek önlemleri çizelgelerindeki destek kısaltmalarının açıklaması:

Sb=spot bolting=lokal bulonlama, B=systematic bolting=sistemik bulonlama

Utg=untensioned,grouted=öngermesiz,çimento şerbetli,

Tg=tensioned=öngermesiz

S=shotcrete=püskürtme betonu,

Mr=mesh reinforced=hasır çelik

CIm=chain link mesh=zincir takviyeli

CCA=cast concrete arch=beton kemer, Sr=steel reinforced=çelik iksa

Tablo 2.17 Q sistemi : Olağanüstü iyi, son derece iyi, çok iyi ve iyi kaliteli kaya kütleleri için uygun destek önlemleri (Q'nun 1000-10 değerleri arası)

Destek kategorisi	Q	Şartlı faktörler		EN/ESR (m)	P kg/cm ² yaklaşık	EN/ESR (m)	Destek Tipi
		RQD/Ja	Jr/Ja				
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	-	-			B(utg)2.5-3m
10	100-40	>30	-	-	0.25	14-30	B(utg)2-3m
		<30	-	-			B(utg)1.5-2m+clm
11	100-40	>30	-	-	0.25	23-48	B(tg)2-3m
		<30	-	-			B(tg)1.5-2m+clm
12	100-40	>30	-	-	0.25	40-72	B(tg)2-3m
		<30	-	-			B(tg)1.5-2m+clm
13	40-10	>10	>1.5	-	0.5	5-14	sb(utg)
		>10	<1.5	-			B(utg)2.5-3m
		<10	>1.5	-			B(utg)2.5-3m
		<10	<1.5	-			B(utg)2.5-3m+s 2-3 cm
14	40-10	>10	-	>15	0.5	9-23	B(tg)1.5-2m+clm
		<10	-	>15			B(tg)1.5-2m +s(mr)5-10cm
		-	-	<15			B(utg)1.5-2m+clm
15	40-10	>10	-	-	0.5	15-40	B(tg)1.5-2m+clm
		<10	-	-			B(tg)1.5-2m +s(mr)15-20cm
16	40-10	>15	-	-	0.5	30-65	B(tg)1.5-2m+clm
		<15	-	-			B(tg)1.5-2m +s(mr)10-15cm

Tablo 2.18 Q sistemi : Orta ve zayıf kaya kütleleri için uygun destek önlemleri
(Q'nun 10-1 değerleri arası)

Destek kategorisi	Q	Şartlı faktörler		EN/ESR (m)	P kg/cm ² yaklaşık	EN/ESR (m)	Destek Tipi
		RQD/Ja	Jr/Ja				
17	10-4	>30	-	-	1	3.5-9	sb(utg)
		>10.<30	-	-			B(utg)1-1.5m
		>10	-	>6m			B(utg)1-1.5m+s 2-3cm
		<10	-	<6m			
18	10-4	>5	-	>10m	1	7-15	B(tg)1-1.5m+clm
		>5	-	<10m			B(utg)1-1.5m+clm
		>5	-	>10m			B(tg)1-1.5m+s 2-3cm
		>5	-	<10m			B(utg)1-1.5m+s 2-3
19	10-4	-	-	>20m	1	12-29	B(tg)1-2m +s(mr)10-15cm
		-	-	<20m			B(tg)1-1.5m +s(mr)5-10cm
20	10-4	-	-	>35m	1	24-52	B(tg)1-2m +s(mr)20-25cm
		-	-	<35m			B(tg)1-2m +s(mr)10-20cm
21	4-1	>12.5	<0.75	-	1.5	2.1-6.5	B(utg)1m+s2-3cm
		<12.5	<0.75	-			s 2.5-5cm
		-	>0.75	-			B(utg)1m
22	4-1	<10.>30	>1	-	1.5	4.5-11.5	B(utg)1m+clm
		<10	>1	-			s 2.5-7.5cm
		<30	<1	-			B(utg)1m+s(mr)2.5-5cm
		>30	-	-			B(utg)1m
23	4-1	-	-	>15m	1.5	8-24	B(tg)1-1.5m +s(mr)10-15cm
		-	-	<15m			B(tg)1-1.5m +s(mr)5-10cm
		-	-	>30m		18-46	B(tg)1-1.5m +s(mr)15-30cm
		-	-	<30m			B(tg)1-1.5m +s(mr)10-15cm

Tablo 2.19 Q sistemi : Çok zayıf kaya kütleleri için uygun destek önlemleri
(Q'nun 1-0.1 değerleri arası)

Destek kategorisi	Q	Şartlı faktörler		EN/ESR (m)	P kg/cm ² yaklaşık	EN/ESR (m)	Destek Tipi
		RQD/Ja	Jr/Ja				
25	1.0-0.4	>10	>0.5	-	2.25	1.5-4.2	B(utg)1m+mr or clm
		<10	>0.5	-			B(utg)1m++s(mr)5cm
		-	<0.5	-			B(tg)1m+s(mr)5cm
26	1.0-0.4	-	-	-	2.25	3.2-7.5	B(tg)1m+s(mr)5-7.5cm
		-	-	-			B(utg)1m+s 2.5-5cm
27	1.0-0.4	-	-	>12m	2.25	6-18	B(tg)1m+s(mr)7.5-10cm
		-	-	<12m			B(utg)1m+s(mr)5-7.5cm
		-	-	>12m			CCA 20-40cm+B(tg)1m
		-	-	<12m			S(mr)10-20cm+B(tg)1m
28	1.0-0.4	-	-	>30m	2.25	15-38	B(tg)1m+s(mr)30-40cm
		-	-	>20.<30			B(tg)1m+s(mr)20-30cm
		-	-	<20m			B(tg)1m+s(mr)15-20cm
		-	-	-			CCA(sr)30-100cm +B(tg)1m
29	0.4-0.1	>50	>0.25	-	3	1.0-3.1	B(utg)1m+S2-3cm
		<5	>0.25	-			B(utg)1m+s(mr)5cm
		-	<0.25	-			B(tg)1m+s(mr)5cm
30	0.4-0.1	>5	-	-	3	2.2-6	B(tg)1m+s 2.5-5cm
		>5	-	-			S(mr)5-7.5cm
		-	-	-			B(tg)1m+s(mr)5-7.5cm
31	0.4-0.1	>4	-	-	3	4-14.5	B(tg)1m+s(mr)5-12.5cm
		<4.>1.5	-	-			S(mr)7.5-25cm
		<1.5	-	-			CCA 20-40cm+B(tg)1m
		-	-	-			CCA (sr)30-50cm
32	0.4-0.1	-	-	>20m	3	11-34	B(tg)1m+s(mr)40-60cm
		-	-	<20m			B(tg)1m+s(mr)20-40cm
		-	-	-			CCA (sr)40-120cm +B(tg)1m

Tablo 2.20 Q sistemi : Çok zayıf kaya kütleleri için uygun destek önlemleri
(Q'nun 0.1-0.001 değerleri arası)

Destek kategorisi	Q	Şartlı faktörler		EN/ESR (m)	P kg/cm ² yaklaşık	EN/ESR (m)	Destek Tipi
		RQD/Ja	Jr/Ja				
33	0.1- 0.01	>2	-	-	6	1.0-3.9	B(tg)1m+s(mr)2,5-5cm
		<2	-	-			S(mr)5-10cm
		-	-	-			S(mr)7.5-15cm
34	0.1-0.01	>2	>0.25	-	6	2.0-11	B(tg)1m+s(mr)5-7.5cm
		<2	>0.25	-			S(mr)7.5-15cm
		-	<0.25	-			S(mr)15-25cm
		-	-	-			CCA (sr)20-60cm +B(tg)1m
35	0.1-0.01	-	-	>15m	6	6.5-28	B(tg)1m +s(mr)30-100cm
		-	-	>15m			CCA (sr)60-200cm +B(tg)1m
		-	-	<15m			B(tg)1m+s(mr)20-75cm
		-	-	<15m			CCA (sr)40-150cm +B(tg)1m
36	0.01-0.001	-	-	-	12	1.0-2.0	S(mr)10-20cm
		-	-	-			S(mr)10-20cm +B(tg)0.5-1m
37	0.01-0.001	-	-	-	12	1.0-6.5	S(mr)20-60cm
		-	-	-			S(mr)20-60cm
		-	-	-			+B(tg)0.5-1m
38	0.01-0.001	-	-	>10m	12	4.0-20	CCA (sr)100-300cm
		-	-	>10m			CCA (sr)100-300cm +B(tg)1m
		-	-	<10m			S(mr)70-200cm
		-	-	<10m			S(mr)70-200cm +B(tg)1m

Destekleme Tabloları İçin Ek Notlar:

1. Kaya patlamaları veya kavlaklanma halinde genellikle genişletilmiş taşıma plaklı gerilmeli bulonlar yaklaşık 1 m aralıkla kullanılmaktadır. Nihai destekleme kavlaklanma sona erdiğinde yapılmalıdır.
2. Aynı kazıda çeşitli uzunlukta bulonlar kullanılır.
3. Bulon destek basıncını takviye için genellikle ankrajlar kullanılır.
4. şişen killerin örneğın montmorillonitik killerin varlığı halinde (fazla su bulunan ortamda) fazla şişme halinde destek arkasına genişleme için yer bırakılır. Mümkün olduğu takdirde drenaj önlemleri alınır.
5. Sıkışan kayaçların varlığı halinde kalıcı destek olarak çok sağlam ve rijit destek kullanılır.
6. Fazla miktarda şişen veya sıkışan kayaçların varlığı halinde beton kemerlerin aynaya kadar uzatılması gerekebilir. Bu gibi hallerde, ayrıca çalışan aynanın da geçici desteklenmesi gerekir.
7. Güvenlik nedeniyle, kazı ve tavan kemeri desteklemesi sırasında çoğunlukla ışınsal bulonlama yöntemi kullanılır.

3. YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ (NATM)

3.1 Giriş

Bu yöntem; Prof. L. Von Rabcewicz ' in 1963 yılında "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi" adını verdiği ve ana hatlarıyla 1957 ve 1965 yıllarında geliştirilen bir tünel yapım yöntemidir (Vardar 1979). Bu tarihlerde yeraltında yapılan hidrolik santrallerin kazıları sırasında bölünmüş kazı yönteminin uygulanması Avusturya Metodu olarak adlandırılırdı. Geniş kesitli olan bu kazılarda önce invertte yakın bir galeriyle kazıya başlanır daha sonra yan ve üst galerilerle kazı aşamalı olarak üst yarıya doğru genişletilirdi. Daha sonra geliştirilerek yöntem yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi adını almıştır.

Rabcewicz bu yöntemi sade bir dille şu şekilde tanımlamıştır: "İnce ve geçici bir destekleme uygulayarak, deformasyonlara izin vererek, tünel içine doğru gelişen kaya basıncını azaltmak ve yükleri kazı çevresindeki kayaya dağıtmak. Böylelikle son destekleme (kaplama) daha az yüklenecek, daha sonra yapılabilecek ve daha ince bir yapı olabilecektir. Deformasyonlar kazı sırasında ölçülecek ve projedeki hesaplamalarla karşılaştırılacaktır".

Öncelikle NATM'nin ne olup olmadığını belirlemek gerekir. NATM ne bir kazı ne de bir sağlamlaştırma yöntemidir. NATM bütün bunların üstünde tünel inşaatının her safhasında göz önünde bulundurulması gereken bir anlayış ve felsefedir.

Bu yöntemin ilk ve en önemli ilkesi; kayanın mukavemetini korumak ve harekete geçirmek, tünel çevresindeki kayada kendisini destekleyen bir halka oluşturmaktır. Ön sağlamlaştırma, kayanın kendini desteklemesine yardımcı olması için oluşturulur. Bunun için ön sağlamlaştırmanın uygun bir yük-deformasyon özelliğinin olması ve tam zamanında yerleştirilmesi gerekir.

NATM'in ikinci ilkesi, tüneldeki deformasyonların ve kaplamada biriken gerilimlerin aletlerle ölçülmesidir.

NATM'in üçüncü ilkesi; karar verip, anlaşmazlıkları çözerken de, tünel işi ile ilgili bütün tarafların tam bir işbirliği içinde bulunmaları gereğidir.

NATM'in dördüncü ilkesi; her türlü tünel şartına uygun olması ve tünelde, mevcut şartlara göre kolaylıkla uygulanabilmesidir. Bu özelliği NATM'nin bir kazı veya sağlamlaştırma yöntemi değil de bir felsefe olmasının gereğidir.

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile bugün yalnız derin tüneller değil, aynı zamanda şehir içlerinde sığ metro tünelleri de inşaa edilmektedir. Nitekim İstanbul Metrosu Tünelleri de bunun en güzel örneğini oluşturur [11].

Bu yöntem Leopold Müller(1979)'in belirttiği gibi şu esaslara dayanmaktadır [12,13].

- 1- Tünelde, esas yükü taşıyan kısım, tüneli çevreleyen kayanın kendisidir.
- 2- Kayanın ilksel sağlamlığı tünel kazısından sonra korunmalıdır.
- 3- Gevşemelerin olabildiğince önüne geçilmelidir. Çünkü gevşemeler kayanın taşıma direncini azaltır.
- 4- Kayayı deformasyonlardan korumak için, tek ve iki eksenli gerilme ortamı oluşturmaktan kaçınmak gerekir.
- 5- Koruyucu zon, kayacın taşıma direnci azaltılmaksızın oluşturulmalıdır.
- 6- Sağlamlaştırma işlemleri tam zamanında ve gerekli esneklikte yapılmalıdır.
- 7- Kayacın desteksiz olarak kendini tutma süresi (stand up time) doğru olarak tahmin edilmelidir.
- 8- Kayacın kazı sonrasındaki deformasyon davranışının önceden belirlenebilmesi için laboratuvar ve arazide deneylerin yapılması ve deneme galerisinde konverjans ve deformasyonların ölçülmesi zorunludur.
- 9- Sağlamlaştırma önlemi boşluk yüzeyini bağlayacak biçimde olmalıdır.
- 10- Sağlamlaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde olmalıdır.
- 11- Sağlamlaştırma elemanları olarak; tel kafes ankraj ve kafes donanımı kullanılmalıdır.
- 12- Sağlamlaştırma zamanı ve araçları ölçümlerle saptanmalıdır.
- 13- Tünel, statik bakımdan taşıyıcı zon ile sağlamlaştırma kabuğunun oluşturduğu bir halkadır.
- 14- Sağlamlaştırma kabuğu kapalı bir halka şeklinde olmalıdır.
- 15- Halka (ring) en kısa zamanda oluşturulmalıdır.
- 16- Boşluğun açılması; ilkel gerilme durumunu bozarak yeni bir gerilim dağılımı oluşturulur. Bu durumu en az değiştiren kazı ilkesi ise sekonder gerilme durumunun bir defada oluşturulmasıdır.
- 17- Tünel açma yönteminin uygulanış biçim yapının güvenliği açısından önemlidir.
- 18- Tünel en kesiti daire veya elips şeklinde olmalı, çıkıntılı, çentikli ve köşeli olmamalıdır.

19- Kalıcı sağlamlaştırma kabuğu ince olmalı ve dış kabuk (ön sağlamlaştırma kabuğu) ile sürtünmesiz fakat sıkı bağlı olmalıdır.

20- Ön (geçici) sağlamlaştırma işlemleriyle yapının stabilitesi sağlanmış olmalıdır.

21- Yapım süreci içinde yönlendirme ve denetleme ölçümleri yapılmalıdır.

22- Çatlak suyu basıncı sistemin taşıma direncini düşürmemesi için suyun drene edilmesi gerekir.

Göreceli olarak üniform jeoloji yapıya sahip bölgelerde kaya kalitesinin sayılarla ifade edildiği ve kaya kütle davranışının formülle tahmin edildiği kaya sınıflama sistemleri geliştirilirken, jeolojik yapının büyük değişkenlikler gösterdiği bölgelerde NATM gibi esnek yapım metotları ve kazı sırasında kaya davranışını esas alan kaya sınıflama yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur.

Son yıllarda NATM'e göre inşa edilen tünellerde kullanılan kaya sınıflama yöntemi kazı sırasında karşılaşılan kayanın geoteknik özellikleri ve tünel yapımı sırasında davranışını kaya parametreleri, örtü yükü, kazı kesiti, ilerleme adımı boyu, kazı sırası yeraltı suyu ve geoteknik ölçüm sonuçlarını dikkate alarak tanımlar.

3.2 Natm'e Göre Kaya Sınıflamalarının Belirlenmesi

NATM'e göre kaya sınıflamalarının belirlenmesinde izlenen sıra aşağıdaki gibidir.

1 – Tünel kazısı yapılan kaya kütlelerinin karakterinin belirlenmesi:

Proje esas teşkil eden jeolojik, hidrojeolojik ve geoteknik bilgiler tünelin kazısı sırasında yapılan jeolojik haritalamadan elde edilen bilgilerle karşılaştırılmalıdır. Esas olarak projede öngörülen kaya formasyonu, litolojisi ve kaya birimleri ile karşılaşıp karşılaşılmadığı kontrol edilmelidir.

2 – Kazı sırasında kaya kütlesi tipinin belirlenmesi

Jeolojik haritalama sırasında elde edilen süreksizlik, süreksizliklerin arasındaki dolgunun niteliği, su sızıntıları, bozuşma dereceleri, kayanın mukavemeti, aşırı sökülme, fayların tünel kesitine göre konumları ve etkileme alanı v.b. bilgiler kullanılarak kazısı yapılan kaya kütlelerinin davranışının yorumlanması ve buna göre kaya tipinin üç ana gruptan (stabil A, gevrek B, baskılı C) hangisine girdiği belirlenmelidir.

Jeolojik haritalamadan elde edilen verilerle sayısal olarak kayayı sınıflayan RMR ve Q sistemi gibi kaya sınıflamaları bulunmaktadır. Bu kaya sınıflamalarında kaya kütlelerinin geoteknik parametreleri (kohezyon, içsel sürtünme açısı, elastisite modülü), uygulanan projenin karakteristik özellikleri (kazı geometrisi v.b) kaya kütlelerinin anizotropisi ve zamana bağlı davranışı gibi kompleks özellikler tek bir

sayısal değere indirgenmektedir. Bu sınıflamalarda kullanılan girdi parametrelerinde kayanın yenilme mekanizması, deplasmanları ve kaya-destek etkileşimi dikkate alınmamakta, dizayna esas parametre ve destek seçimi için yetersiz kalmaktadır.

Q ve RMR sınıflamalarına göre yapılan tünel dizaynlarında yapım sırasında karşılaşılan problemler aşağıda yer almaktadır.

a- Aşırı çatlaklı ve çatlakların kapalı olduğu dolomitte açılan bir tünelde RQD, eklem takımı sayısı (J_n), eklem pürüzlülük değeri (J_r), eklem ayrışma değeri (J_a), eklem suyu azaltma faktörü (J_w), gerilme azaltma faktörü (SRF) kullanılarak belirlenen Q sisteminde desteksiz durma açıklığı 40 m olarak beklenmektedir. Yapım sırasında tünelin stabilitesini çatlakların açılması kontrol edebilir ve yan destek basınçlarının azalması ile ani göçme oluşabilir.

Uygun patlatma yapılmadığında stabil kayada aşırı çatlaklar oluşmakta ve çok zayıf kayaya karşılık gelen düşük Q değerleri elde edilmektedir. Buna göre aşırı destekleme yapılabilmektedir.

b- Tektonizmadan aşırı etkilenmiş kırıklı fay zonu içeren bir jeolojik yapıda açılan tünellerde fayın tünel kazı kesitine eşdeğer uzaklıkta ancak konum olarak sağ veya sol tarafta yer alması durumunda RMR değeri tüm ayna için ortalama olarak belirlendiğinden aynı değer olarak elde edilebilmektedir. Ancak fayın konumu tünelde oluşan deformasyonların yönünü ve miktarını kontrol etmekte ve gerçekte tünel fayın bulunduğu taraftan asimetrik olarak yüklenmektedir. Bu durum geoteknik ölçümlerde gözlenebilmektedir. Uygulanacak desteklemenin asimetrik olması gerekmektedir.

c- Sayısal kaya sınıflamalarında kaya kütlelerinin zamana bağlı davranışı gözönüne alınmamaktadır. Kaya kütlelerinin zamana bağlı davranışı kazı stabilitesini, uygulanacak desteğin boyut ve zamanını belirleyen önemli bir etkidir. Baskılı kaya ortamlarında kohezyonlu, kil yüzdesinin fazla olduğu fay zonlarında kısa dönemde kazı aynası ve çevresi stabil olup, destekleme gereken sıra ile yapılmadığında (ring kapanma mesafesi kısa tutulmadığında, aynada bulonlama v.b.) zamanla kazı çevresinde aşırı gerilmeler sonucu yenilme zonları derinlere ulaşmaktadır. Kohezyonsuz kum, silt içeren düşük plastisiteli kaya ortamlarında ise kazıdan hemen sonra önlem alınmaması durumunda ani göçme olmaktadır. İki farklı davranış gösteren kaya ortamı kantitatif kaya sınıflarında aynı şekilde değerlendirilir.

Yukarıda belirtilen sıkıntılar gözönüne alındığında Q ve RMR sınıflamalarından ön proje aşamasında faydalanılabilmekle birlikte uygulama projesi ve yapım

aşamasında kaya kütlesinin kompleks özellikleri, zamana bağlı davranışı gözönüne alınarak tünelin açılacağı ortamın geoteknik modelinin oluşturulması, destek sisteminin bu modele göre belirlenmesi, aynada yapılacak jeolojik haritalama ve geoteknik ölçümlere göre modelin ve destek sisteminin sürekli kontrol edilmesi gereklidir [14].

3.3 Yeni Avusturya Yönteminde ÖNORM B 2203/1994'e göre Yinelenmeli (sıralı) ve Sürekli (makinalı) Kazılar için kaya davranışı [15]

NATM'de kaya sınıfları kayanın davranışına bağlı olarak üç ana grupta toplanmıştır. Her bir kaya grubunun kendi içindeki alt gruplarını (A1, A2, B1, B2, B3, C1, C2, C3, C4, C5) ayırt edici özellikler aşağıda verilmektedir.

İzleyen sayfalarda ÖNORM B 2203'e göre tanımlanan kayaç sınıfları ile bu ortamlarda beklenen kazı ve destekleme türleri ve işlemlerinin belirli aralıklarla yinelenen (sıralı) ya da kesintisiz (sürekli) kazılar için özetlemesi yapılmaktadır. Sıralı kazıya geleneksel patlatmalı ilerleme ve sürekli kazıya da makinalı kazı birer örnektir.

Bilindiği gibi; kazı ve ilerleme anlarının dört boyutta (en kesitte, ilerleme yönünde ve zamanlamada) belirlenmesi ve sağlamlaştırma ve destekleme türlerinin seçimi, nitelikleri, sayısı ve boyutları yararlanılan geoteknik veri ve bilgilerin doğruluğuna bağlıdır. Bu bakımdan, Yeni Avusturya Yöntemini öneren planlama ve projelerde kazı öncesi, sırası ve sonrasında ölçüm, gözlem ve yönlendirme çalışmaları birincil ağırlık taşımaktadır.

Yeriçinin nitelik ve koşullarının ancak yaklaşık yakınsama ve benzetime dayalı modelleme ile mühendislik çalışmalarına açılabilir oluşu, tünelticiliği alışlagelmiş, malzemesi, davranışı ve boyutları tarafımızdan belirlenebilen öteki mühendislik çalışmalarından ayırmaktadır.

Bu nedenle izleyen sayfalardaki özet bilgilerin bir "norm" altında toplanmış olsalar bile, uygulama aşamasında geliştirilebilen ve değiştirilebilen yönlendirici bilgiler olarak anlaşılması gerekir.

3.3.1 A “Sağlam” - “zamanla kırılğan” davranışlı kayaçlar.

Bu ortamlarda genelde kazı sırasındaki zorlamalar nedeniyle kınımlar olmaz. A1 ve A2 olmak üzere iki alt sınıfı vardır.

3.3.1.1 A1 Sağlam Kayaçlar

Çok kısa sürede sonlanan çok az deformasyon olur. Deformasyonlar çok küçük ve mm mertebesindedir. Kavlakların temizlenmesinden sonra hiçbir sökülme oluşmaz. Belirgin süreksizlik olmayan masif kaya görünümündedir. Su etkisi yoktur. Kazı aşırı sökümleri azaltmak için yumuşak patlatma yöntemi ile yapılmalıdır. İlerleme adımları patlatma şartlarına göre ayarlanmalıdır.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 3 haftadan fazladır.

Sıralı kazıda: Destekleme gerekmez. İlerleme adımlarının uzunluğu ilke olarak çalışma tekniğine kısıtlanır.

Sürekli kazıda: Destekleme gerekmez.

3.3.1.2 A2 Zamanla Kırılğan Davranış Gösteren Kayaçlar

Çok kısa sürede sonlanan düşük deformasyonlar görülür. Deformasyonlar çok küçük ve mm mertebesindedir. Tünel tavanında ve yan duvarların üst kısımlarında süreksizliklerin konumu nedeniyle sığ sökümler ve kamasal kopmalar olma eğilimi vardır. Yenilme zonu yoktur. Su etkisi önemsizdir. Kamasal kopma eğilimi olan bölgelerde lokal tekil bulonlama, asimetrik yükleme ve sığ örtü kalınlığı olan tünel kesitlerinde projesinde gösterildiği şekilde lokal sistematik bulonlama yapılabilir. Patlatma yumuşak patlama yöntemi ile yapılmalı, ilerleme adımı üst yarıda 2,5 – 3,5 m, alt yarıda 4 m ile sınırlı tutulmalıdır.

A sınıfı kayalarda önemli problem patlatma şartlarının kaya koşullarına uygun yapılmayarak aşırı sökümlere sebebiyet verilmesidir. Bu nedenle jeolojik haritalama patlatma sonrası basınçlı su ile kazı çevresinde gevşemiş parçaların düşürülmesinden sonra yapılmalı ve sökülme eğiliminin hangi bölgelerde olduğu, sığ olup olmadığı gözlenerek yapılacak lokal bulonlamaya karar verilmelidir.

Tünelin desteksiz olarak ayakta kalabileceği süre 4 gün ile 3 hafta arasındadır.

Sıralı kazıda: Destekleme tavanda, omuzlarda ve üst yanlarda yer yer, tekil parçaların güvenceye alınması için gerekir. İlerleme adımlarının uzunluğuna aşırı sökümlerin kısıtlanması amacıyla sınırlama getirilir.

Sürekli kazıda: Destekleme tavanda, omuzlarda ve üst yanlarda yer yer, tekil parçaların güvenceye alınması için gerekir. Destekleme ve sağlamlaştırma işlemleri ayna önündeki 2. çalışma bölgesinde gerçekleştirilir.

3.3.2 B “Kırılgan” Davranışlı Kayaçlar

Bu kayaç sınıfı süreksizliklere bağlı doku dayanımının ve/veya gerilme kemerlenmesinin yetersizliği nedeniyle gevşemeye yatkın ortamları kapsar.

B1, B2 ve B3 olmak üzere üç altsınıfa ayrılır;

3.3.2.1 B1 Kırılgan Kayaçlar

Çok kısa sürede sonlanan düşük deformasyonlar, süreksizliklere bağlı dayanım azalması vardır. Patlatma sarsıntıları gevşemelere ve tavanda veya üst omuzlarda sökülmelemlere neden olur. Deformasyonlar 2-3 cm civarındadır ve hızlı azalır ve tamamlanırlar. Su etkisi genellikle önemsizdir. Üst yarıda sistematik bulonlama, alt yarıda gerektiğinde lokal bulonlama yapılır. Patlatma yumuşak patlatma yöntemi ile yapılmalı, ilerleme adımı üst yarıda 2-3 m alt yarıda 4 m ile sınırlanmalıdır.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 4 gün ile 10 saat arasındadır.

Sıralı kazıda: Destekleme düzenli olmakla birlikte dar kapsamlıdır. İlerleme adımları, tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süreye, serbest açıklık boyuna ve sağlamlaştırma ve destekleme elemanlarının oluşturulması için gereken süreye bağlı olarak belirlenir. Yer yer aynanın desteklenmesi gerekebilir.

Sürekli kazıda B1.1 ve B1.2 olmak üzere yeniden iki alt sınıf tanımlanmıştır:

B1.1: Düzenli fakat dar kapsamlı destekleme tavanda, omuzlarda ve üst yanlarda ayna öncesindeki 2. çalışma bölgesinde makinalı kazıyı engellemeksizin gerçekleştirilir.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 4 gün ile 2 gün arasındadır.

B1.2: Tavanda, omuzlarda ve üst yanlarda düzenli ve dar kapsamlı destekleme 1. ve 2. çalışma bölgesinde gerçekleştirilir. Kazı makinasının çalışmaları destekleme ve sağlamlaştırma önlemlerinin alınması sırasında kısıtlanır.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 2 gün ile 10 saat arasındadır.

3.3.2.2 B2 Çok Kırılgan Kayaçlar

Çok kısa sürede sonlanan düşük deformasyonlar, süreksizliklere bağlı dayanım azalması, düşük kemerlenme, yüksek doku hareketliliği belirgindir. Patlatmaların etkisiyle desteklenmemiş yüzeylerden parçaların kopması gibi hızlı ve derine ulaşan gevşemeler oluşur. Bozunmuş kayada su akışı ile birlikte sınırlı yenilme bölgeleri

oluşur. Desteklemenin zamanında yapılması durumunda deformasyonlar 3-5 cm civarında kalır. Tünel kesitinde sistematik destekleme yapılır, gerektiğinde tavanda süren uygulanır. Patlatma yumuşak patlatma yöntemi ile yapılmalı, ilerleme adımı üst yarıda 2-2,5 m, alt yarıda 3,5 m ile sınırlanmalıdır.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 10 saat ile 2 saat arasında, hatta daha kısadır.

Sıralı kazıda: Destekleme tavanda, omuzlarda ve yanlarda düzenli ve çoğun aynayı da içerecek şekilde geniş kapsamlıdır. Parçalı kazı kesitleri gerekir. İlerleme adımları tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre süresine ve serbest açıklık boyuna göre belirlenir ve ayna sürekli olarak desteklenir.

Sürekli kazıda B2.1 ve B2.2 olmak üzere yeniden iki alt sınıf tanımlanmıştır:

B2.1: Kazı kafasının hemen arkasından başlamak üzere düzenli destekleme gerçekleştirilir. İlerleme hızını bu çalışmaların gerektirdiği süre belirler. Frezeli makina kullanılıyorsa parçalı kazı yapılır.

Tünelin desteksiz olarak ayakta kalabileceği süre 10 - 5 saat arasındadır.

B2.2: Kazı kafasının hemen arkasında ön çalışma bölgesini (1.bölgeyi) çepeçevre saracak şekilde düzenli destekleme gerekir. İlerleme hızını bu çalışmaların gerektirdiği süre belirler. Frezeli makina kullanılıyorsa parçalı kazı yapılır 1. ve 2. çalışma bölgesinde gerçekleştirilir.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre ayna desteklenmeksizin 5 - 2 saat arasındadır.

3.3.2.3 B3 Döküntülü Kayaçlar

Küçük parçalı kazı kesitlerinin kazılmasında bile kayaç parçaları içeriye dökülür. Stabilite yetersizliğinin nedeni, kohezyonun ve kayaç dokusundaki kenetlenmenin azlığı ve su etkisidir. Deformasyonlar 10 cm' ye kadar çıkabilir. Gevşeme zonu derinlikleri artar. Tünel kesitinde sistematik destekleme, yerel süren uygulaması yapılabilir. Patlatma genellikle yumuşak patlatma ile yapılmalı, titreşime hassas kayalarda mekanik kazı yapılmalı, ilerleme adımı üst yarıda 1,5-2 m, alt yarıda 3 m ile sınırlanmalıdır.

B3 kaya sınıfında invert uygulanması, düşük örtü kalınlığı, asimetric yükleme, geoteknik ölçümlerle belirlenen deformasyonların sonlanmayarak devam etmesi ve 10 cm'yi aşması durumunda ringin kapanmayarak yük dağılımının dengelenmesi amacı ile yapılmalıdır.

B grubu gevrek kayaların A ve C grubu kayalardan ayırt edici özelliği, kayanın yapısal olarak kırılabilirliği ve kazı geometrisine bağlı olarak patlatmadan sonra gevşemesi ve taneli yapıya dönüşerek kazı çevresinde istenmeyen ani deplasmanlara ve yüklemelere sebebiyet vermesidir. Bu nedenle B1'den B3'e geçişlerde geoteknik ölçümlerle birlikte projesinde öngörülen desteklemelere ve ilerleme adımlarına uyulmalıdır.

Sıralı kazıda: Aynanın ön sürenlerle desteklenmesi, çok parçalı kazıda çalışabilmek için bile kayaç niteliğini iyileştirici ve stabiliteyi artırıcı önlemlerin alınması gereklidir. Aynayı da kapsamak üzere tüneli çepeçevre saracak şekilde düzenli ve yoğun bir destekleme gerekir.

Sürekli kazıda şiltsiz makineler ancak ön sağlamlaştırma gibi çok özel önlemlerin alınmış olduğu durumlarda kullanılabilir.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 2 saatten daha azdır.

3.3.3 C “Plastik” Davranış Gösteren Kayaçlar

Bu kayaç sınıfı kayaç dayanımının önemli ölçüde aşıldığı ortamları kapsar. Kaya patlaması ve belirgin şişme - kabarma davranışının görüldüğü kayaçlar da bu sınıfa girer. C1, C2, C3, C4 ve C5 olmak üzere beş alt sınıfı vardır. C1 sınıfı, kaya patlaması olan kaya kütlelerini tanımlar ve 1994 yılında ÖNORM B 2203'ün revize edilmesi ile belirlenen bir kaya sınıfıdır. C2 kaya baskılı, C3 kaya çok baskılı, C4 akıcı ve C5 şişen kabarmaya kaya sınıfıdır.

3.3.3.1 C1 Kaya Patlamalı Kayaçlar

Primer (doğal) gerilmeler genelde yoğun, sert ve kırılabilir kayaçlarda elastik enerji olarak depolanır. Kazı sırasında bu enerji birdenbire boşalır ve kayaç parçalarının koparak fırlamasına neden olur. Kırılma olaylarının derinlere ulaşmadığı serbest kazı yüzeylerinden dışarıya fırlatılan bu parçalar çoğun sıçalanmış şekildedir.

Bu tip kayalarda delgi ve boşalma patlamaları ile gerilme boşalımı yapılabilir sık yerleştirilmiş kısa bulonlarla destekleme yapılır. Taban kemeri gerekebilir. Kazı yumuşak patlatma ile veya mekanik kazı ile yapılmalı, ilerleme adımı üst yarıda 1,5 – 2 m, alt yarıda 3 m ile sınırlanmalıdır.

Sıralı kazıda: Destekleme çoğun belirli bölgelerde hemen ve oldukça sık yerleştirilmiş kısa kaya saplamalarıyla yapılır. Gerektiğinde çelik hasır da kullanılır. Kayadaki gerilmelerin boşaltılması için gevşetme delikleri açılabilir veya patlatma ile ortam gevşetilebilir.

Sürekli kazıda 1. çalışma bölgesinde sık aralıklarla kısa kaya saplamaları ve gerektiğinde çelik hasır kullanılır. Makinalı kazı bundan fazlaca etkilenmez.

3.3.3.2 C2 Plastik Davranış Gösteren Kayaçlar

Uzun süreli, çok yavaş sonlanan deformasyonlar belirgindir. Plastik ve yüksek kohezyonlu kayaçlarda yenilme mekanizmaları ve plastikleşme bölgeleri gelişir. Bu tip kayalarda, kaya kütlelerinde oluşan aşırı gerilmeler nedeniyle kayanın kayma dayanımı aşılır. Tünel kesiti çevresinde geniş plastik zonlar oluşur, C2’de orta mertebede uzun süren ve yavaş son bulan deformasyonlar oluşur. Deformasyon miktar ve hızları, yenilme bölgelerinin genişliği jeolojik koşullara, arazi gerilmelerine, yeraltı suyu durumuna, boşluk suyu basıncına ve kaya kütle özelliklerine bağlıdır.

Sıralı kazıda: Destekleme ve sağlamlaştırma bütün kesiti kaplayacak şekilde düzenli olarak yapılır. Aynada kazı kesiti ve biçiminin, stabilitenin korunması ve artırılmasına yardımcı olacak şekilde seçilmesi gerekir. Sağlamlaştırma işlemlerinin hedefi yenilme mekanizmalarını denetleyerek kırımları sınırlandırmaktır. Atım-ilerleme boyu aynadaki stabilizeye göre belirlenir. Sürekli kazıda C2.1 ve C2.2 olmak üzere iki alt sınıf tanımlanmıştır:

C2.1: Destekleme düzenli ve kapsamlı şekilde 1 ve 2. çalışma bölgesinde tavanda, omuzlarda ve yanlarda kademeli olarak gerçekleştirilir. Bu çalışmalar makinalı kazı çalışmalarını engeller. Makinanın sıkışmasının önüne geçmek için gerekli önlemler alınmalıdır.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 2 gün ile 10 saat arasındadır.

C2.2: Kazı kafasının hemen arkasından başlamak üzere düzenli destekleme gerçekleştirilir. İlerleme hızını bu çalışmaların gerektirdiği süre belirler. Parçalı kazı yapılarak ilerlenir. Tünel açma makinasının sıkışmaması için gerekli önlemler alınmalıdır.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 10 - 5 saat arasındadır.

3.3.3.3 C3 Aşırı Plastik Davranış Gösteren Kayaçlar

Başlangıçta yüksek deformasyon hızları gösteren, uzun sürede ve çok yavaş sonlanan büyük deformasyonlar görülür. Bu sırada derine ulaşan yenilme mekanizmaları ve plastikleşme bölgeleri oluşur ve gelişir.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 5 saat ile 2 saat arasındadır.

Sıralı kazıda: Bütün serbest yüzeylerin desteklenmesi ve sağlamlaştırılması gereklidir. Parçalı kazı kesitleri gerekir. Bunların boyutları aynanın desteklenebilirliği ile sınırlıdır. Deformasyonların büyüklüğü çoğunlukla deformasyon yarıkları veya

biçim değiştirebilen destek öğelerinin kullanımı gibi özel yapısal önlemlerin alınmasını zorunlu kılar. İlerleme adımları aynanın stabilitesine ve deformasyon hızlarına göre belirlenir ve ayna sürekli olarak desteklenir.

Sürekli kazıda: Düzenli ve yoğun bir destekleme kazı kafasının hemen arkasındaki ön çalışma bölgesini (1.bölgeyi) çepeçevre saracak şekilde gerçekleştirilir. Frezeli kazı ancak parçalı olarak ve önemli duraksamalarla yapılabilir. Tünel açma makinasının sıkışmaması için gerekli önlemler alınmalıdır.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre ayna desteklenmeksizin 5 - 2 saat arasındadır.

3.3.3.4 C4 Yumuşak Kayaçlar

Çok düşük içsel parametrelili (kohezyon ve sürtünme açılı) ve yumuşak-plastik kıvamlı kayaçlar desteklenmemiş çok küçük kazı kesitlerinde bile kısa sürede tünel içine akar.

Sıralı kazıda: Gerçekleştirilen iyileştirme ve aynanın ön sürenlerle desteklenmesi gibi özel önlemlerle ortam niteliğinin, çok parçalı kazıda ilerlemeyi sağlayacak şekilde önceden ve imalat sırasında geliştirilmesi zorunludur. Her parçada aynayı ve kazı yüzeylerini çepeçevre saracak şekilde düzenli ve yoğun destekleme ve sağlamlaştırma önlemlerinin alınması gerekir.

Sürekli kazıda şiltsiz makinalar ancak ön sağlamlaştırma gibi çok özel önlemlerin alınmış olduğu durumlarda kullanılabilir.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süresi 2 saatten daha azdır.

3.3.3.5 C5 Şişen-Kabaran Kayaçlar

Üzerinden yükün kalkmasıyla su alarak şişen ve/veya kabaran killi, anhidritli ve tuzlu mineraller içeren ortamlardır.

Sıralı kazıda: Zaman içinde de şişme-kabarma basınçlarını alabilen uygun destekleme önlemleri ve işlemleriyle kabarma deformasyonlarının oluşumu önlenir ya da bunların zararlı etkileri engellenebilir.

Sürekli kazıda: Zaman içinde de şişme-kabarma basınçlarını alabilen uygun destekleme önlemleri ve işlemleriyle kabarma deformasyonlarının oluşumu önlenir ya da bunların zararlı etkileri engellenebilir. Şiltsiz makinalar ancak çok özel önlemlerin alınmış olduğu durumlarda kullanılabilir.

Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre için veri yoktur.

C2, C3, C4 ve C5 kaya ortamlarında jeolojik haritalamaya ek olarak yapılması gerekli çalışmalar;

1- Araştırma Çalışmaları:

Tünel kazısı yapılırken tünel aynasında jeolojik haritalama sırasında yapılan gözlemlere göre yukarıda belirtilen kazı çevresine baskı yapabilecek plastikleşme özelliği nedeniyle 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 (CD residual) yapılması, yatay sondaj ile boyuna yönde uzun dönemde deformasyon oluşturabilecek baskılı bir ortam olup olmadığının belirlenmesi gereklidir [16].

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

Belirtilen araştırma çalışmaları ile kil yüzdesinin artması, su muhtevası ile kayma dayanımındaki azalma rezidüel kayma dayanımı değerleri, tünel çevresindeki plastikleşme zonu ve zamana bağlı konsolidasyon özellikleri konusunda doğrudan bilgi sağlamaktadır.

2- Geoteknik Ölçümler

C2, C3, C4 ve C5 kaya sınıfları için yapılması gerekli geoteknik ölçümlerde kazı enkesitine daha fazla noktada ve sık aralıkta (5-8 nokta, 10-20 mt), plastikleme zonunun belirlenmesi ve bu zonda oluşan deplasman ve gerilmelerin ölçülmesi için kuyu extensometre, yük hücresi v.b. ölçümlerle püskürtme betonda oluşan deformasyonlar için birim deformasyon ölçerler yerleştirilmelidir.

Bu kaya sınıflarında üç boyutlu ölçüm yapılmalı ve ölçüm sonuçları enkesit üzerinde radyal kapanmaları ve oturmaları gösterecek şekilde işlenmeli, boyuna yönde destekleme sırası ve zamanı verilmelidir.

3- Baskılı kaya ortamlarının tahmin edilmesinde kullanılan ampirik ve analitik yaklaşımlar:

Tünel kazısı çevresinde yer alan kaya ortamının fiziksel ve mekanik özellikleri ile ilgili veriler, jeoloji, başlangıç gerilme durumu, örtü yükü, tünel geometrisi, su sızıntısı, deformasyon miktarı ve hızı, kazı ilerleme adımı, destek sistemi, desteksiz durma süresi ve destek elemanlarının etkisi gibi faktörlerle birlikte kaya ortamının baskılı olma durumunun tespitinde bazı yaklaşımlardan yararlanılmaktadır.

Bu yaklaşımlar;

a- Uyumluluk faktörünün (kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının örtü yüklemesi oranı, $\sigma_c / \gamma \times H$) 1'den düşük olması halinde baskı oluşur (Tablo 3.1).

Tablo 3.1 Uyumluluk faktörü ile kaya davranışı arasındaki ilişki

$\sigma_c / \gamma \times H$	DAVRANIŞ
<0,2	Çok baskılı
0,2 – 0,4	Orta baskılı
0,4-1,0	Az baskılı
>1	Baskısız

b- Radyal deformasyonların tünel çapına oranının %1 den fazla olması durumunda baskılı kaya davranışı söz konusudur.

c- Geçirimsiz plastik kaya ortamda su olan ve su içeriğinin % 25 den fazla olduğu kaya ortamlarında kayma dayanımı zayıflar ve zamana bağlı konsolidasyon sonucu baskı oluşur.

d- Tabakalı sedimenter kayalarda ve şişme özelliği olan kil minerali ihtiva eden jeolojik yapılarda baskılı kaya ortamı oluşabilir

e- Tünel kazısı sırasında kayanın zamana bağlı baskılı davranışı tünel derinliğine de bağlı olup sığ derinliklerdeki tünellerden ziyade orta ve derin tünellerde ortaya çıkmaktadır. Kritik derinlik için $H > 350 \times Q^{1/3}$ olarak tanımlanmaktadır (Tablo 3.2).

Tablo 3.2 Kritik derinlik ile kaya davranışı arasındaki ilişki

Q	H (m)	Q (Mpa)	DAVRANIŞ
0,1 – 1	162 – 350	8,4 – 18	Baskılı
0,01-0,1	76 – 162	3,9 – 8,4	Baskılı
0,001-0,01	35 – 76	1,8-3,9	Baskılı

f- 80 tünel inşasında tutulan kayıtlara göre kayanın baskılı davranışının ortaya çıktığı kritik derinlik tünel yarıçapı (A) ve SRF=1 için hesaplanmış Q değerine (N) bağlı olarak tanımlanmaktadır.

$$H > \frac{260N^{0,333}}{A^{0,1}} \quad (3.1)$$

g- Baskılı kaya ortamlarında tünelde boyuna yöndeki deformasyonlar önem taşımaktadır. Aynadan ileriye doğru kazılmamış kesimde alınacak önlemler ayna gerisinde kazılmış ve desteklenmiş bölgedeki yükleri ve deformasyonları etkilemektedir. Ayna ilerisindeki kritik deplasmanların belirlenmesi, alınacak destek tedbirleri ve geoteknik modelde kullanılan parametrelerin kontrol edilmesi gereklidir.

C2 ve C3 baskılı kaya ortamlarının tanımlanmasında uluslararası uygulamalarda yukarıda verilen yaklaşımlardan faydalanılmaktadır. NATM'de belirtilen kazı sırasındaki araştırma çalışmaları ve geoteknik ölçümlerden elde edilen veriler projede göz önüne alınan tünelin bulunduğu ortamın jeolojik yapısı, uygulanan kazı yöntemi (bölünmüş kazı, ilerleme adımı), destekleme sırası ve aralıkları, deformasyon toleransları ile birlikte değerlendirilmelidir. Projede baskılı kaya ortamı ile karşılaşılması durumunda tünelin emniyetli gerekse tünelin kazı geometrisinin oluşturulması bakımından yapım sırasında elde edilen veriler de gözönüne alınarak proje çalışması yapılmalıdır.

B sınıfı kaya davranışı gösteren kaya ortamlarında kazı aşamalarına bağlı olarak destekleme sırasına uyulmaması durumunda oluşan deformasyonların B sınıfı için öngörülen deformasyonların aşması söz konusu olmaktadır. Bu tür yapım hatalarından kaynaklanan durumlarda deformasyon mertebeleri dikkate alınarak kaya kütlelerinin davranışının C sınıfına girdiği düşünülerek devam eden bölümlerde de gerektiğinden ağır destekleme sistemi uygulanabilmektedir.

3.4 Yapım Sırasında Kaya Sınıflandırmasında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

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 değişiklik yapılabilir (kaya bulon tipi değiştirilerek adeti 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 bağılı olup desteklemenin gereken süre içinde yapılmamasından dolayı kaya kütlesinde azalmaya sebep olunmamalıdır [17].

Kaya sınıfları karşılaştırmalı olarak tablo 3.3'de gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Kaya sınıflarının karşılaştırılması

MJKM VARDAR	1 A	2 B	2 C	2 D	3 E	3 F	3 G	4 H
NATM Ö-NORM 2203	1 SAĞLAM	2 ZAMANLA KIRILGAN	3 AZ KIRILGAN	4 KIRILGAN veya AZ BASKILI	5 ÇOK KIRILGAN veya BASKILI	6 ÇOK BASKILI	7 AKICI	
NATM ESKİ	I SAĞLAM	I ZAMANLA AZ KAVLAKLANAN	II KIRILGAN	III ÇOK KIRILGAN	IV BASKILI	V ÇOK BASKILI	VI AKICI	VII ÖZEL HAL
Q BARTON	ÇOK MÜKEMMEL	>100 MÜKEMMEL	100 ÇOK İYİ	40 İYİ	10 4 ORTA	1 KÖTÜ	0.1	0.0001
RMR CSIRO BIANIAWSKI	100 ÇOK İYİ 1	80 İYİ 2	60 ORTA 3	40 KÖTÜ 4	<20 ÇOK KÖTÜ 5			
TERZAGHI YENİ (ROSE)	n=0	0.25	0.4	1.2	5	8		
TERZAGHI ESKİ Hp	1	2	3	4	5	6	7	8
	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	AKICI
		0.15-0.25 B	0.35-0.75 (B+H)	1.1-2.1 (B+H)		75m		
RQD DEER	90	75	50	25	0			
	ÇOK İYİ	İYİ	ORTA	ZAYIF	ÇOK ZAYIF			

4. ANALİTİK TASARIM METODU

4.1 Giriş

Analitik metotlar, tasarım amacı için kullanılan kesin kavramsal modellerin formülizasyonunu ve uygulamalarını içerir. Burada amaç, prototip kaya yapılarının tepki ve davranış etkilerini yeniden oluşturmaktır.

Kaya mekaniği tasarımlarında, analitik modelleme aşağıdaki yaklaşımları kapsayabilir:

- a- Araştırmalar için iskelet oluşturan kavramsal modelleme,
- b- Fiziksel dereceleme modelleri,
- c- Sayısal ve matematiksel yöntemler.

Matematiksel metotlar; sonuçların kapalı biçimlerini kapsarken, sayısal metotlar; sonlu eleman gibi... teknik ifadeleri içermektedir. Kaya mühendisliğindeki analitik metot, genel olarak karşılaştırmalı tasarım ve parametrik çalışmalarda kullanılır. Pratik mühendislik sorunlarının çözümü için, diğer tasarım yaklaşımları ile desteklenmesi gerekir.

4.2 Sayısal Modelleme

Yatay düzlemler, eklemler ve faylarda devamsızlığa neden olan jeolojik yapıların tanınması amacıyla kaya kütlelerinin sayısal modellenmesinde iki yaklaşım tanımlanmaktadır. Bunlar; devamlı yaklaşım (continuum approach) ve devamsız yaklaşım (discontinuum approach).

Devamlı yaklaşım ikiye ayrılır:

- a-Diferansiyel modeller,
- b-İntegral modeller.

Diferansiyel modeller, sonlu fark ve sonlu eleman yöntemlerini içerirler ve çalışılan bölgenin tamamını karakterize ederler. Sonlu eleman yöntemi, sadece yeterli miktardaki karmaşık geometrik değerlerin elde edilmesinde kullanılır. Karmaşık sistemler sıvı akışını ve ısı transferlerini ele alır.

İntegral veya sonlu eleman yönteminde ise sadece iç ve dış sınırlar boyunca devamsızlık ana unsurdur, bununla birlikte çizgisel olmayan kesin biçimleri ise

yeniden oluşturulabilir. Sonlu eleman işleri, kaya kütlelerinin iki veya üç boyutlu analizlerinin ekonomik anlamlar ifade ettiğini belirtir.

Devamsız modeller, devamlı modellere oranla parçaların ve blokların hareketlerinin eşitliklerini içerir ve sayısal işleri olarak tanımlanırlar. Bağımsız kaya bloklarının hareketleri özel olarak tanımlanmalıdır ve ne zaman bu hareketler tanımlanırsa devamsız modelleme kullanılmalıdır.

4.2.1 Sayısal Modellemenin Uygulanması

Sonlu eleman yöntemi günümüzde analitik tasarım aracı olarak çok geniş kullanılan ve uygulamada çok yararlı olan bir tekniktir. Bu yöntem bilhassa, köken karşılaştırmalarında çeşitli proje tasarımlarının değerinin değerlendirilmesinde çok faydalıdır. Bu oranda da çok fazla teknik gerektirir.

Tüm projeyi içine alan çeşitli parametrelerin etkileri çalışılmalıdır ve proje değişiklikleri, diğerleri ile karşılaştırılmalıdır. Bununla beraber, analitik yöntemler henüz daha mutlak proje araçları olarak yeterli değildir, çünkü elde edilmesi gereken bazı verilerin (giriş verileri) sağlanması yeteri düzeyde olamamaktadır.

Belli bir derinlikte bulunan kazı çevresinde potansiyel kırık zonunun sınırlandırılmasında ve değişik jeolojik özelliklerin etkilerinde sayısal metotların pratik uygulamaları özellikle yapılır. Uygun kaya kırılma kriterleri kullanılarak, kazı etrafındaki zayıflık zonlarının tanınması mümkün olur ve böylelikle doğru kaya destek seçimi yapılmasına olanak doğar. Bunlara ilaveten, birbirlerini kesen kısımların etkileri, üç boyutlu sonlu eleman analizi ile ölçülür. Bu kesişme zonlarındaki stabilite sorunları aşağıdaki nedenlere bağlı olarak sıkça telaffuz edilir:

- a- Kesişmelerde, köşeler etrafında yüksek gerilme oranları oluşur ve üç boyutlu durumlar ortaya çıkar.
- b- Bir kesişmede bir açıklık için devamsızlıkların uygun yönelimi, diğer açıklıklar için daha az uygun olduğu anlamına gelir.
- c- Kesişmelerde desteklenen çatı aralığı herhangi bir açıklığın maksimum aralığından daha fazladır ve kısa ayakta kalma süresine uzun aralık uygun gelir.
- d- Bir açıklığın kenar duvarları tarafından desteklenerek önlem alınmaya çalışılması kesişme bölgelerinde kullanışlı bir yöntem değildir.

Bu sebeplerden dolayı tünel destek sistemlerinin geliştirilmesi ve özel sorunlarının çözülmesi için kaya mekaniği konusunda uzmanlaşmış kişilere ihtiyaç vardır.

4.3 Fiziksel Modelleme

Kırılma tarzının incelenmesi ile özellikle çok yararlı bilgiler sağlanabilir. Kaya mekaniğinde fiziksel modellerin bir araç olarak kullanılmasının yararı özellikle Avrupa da gittikçe artan oralarda değerlendirilmektedir. Bu sebeple bu alanda birçok araştırmacı çalışmaktadır. Bu çalışmalardan birinde, bir tünelin tavanında bulunan sayısız miktardaki yatayla 30° açı yapacak şekilde yönlendirilmiş olan kırıkların modellemesi başarılı bir şekilde yapılmıştır. Ek olarak, tavandaki tabakaların kalınlıkları, tavanın üst kısımlarında bulunan zayıf kısımların davranışları ve tünel açıklığının stabilitesine etki eden eklemlerin davranış şekilleri tespit edilmiştir. Tavan davranışının genel kinetiğinin niteliğini tespiti yönelik çalışmaları bizim tünel içinde kullanacağımız destek mekanizmasının ne olabileceğini anlamamıza yardımcı olur [17]. Tüm bu değerlere bir teknik metot kullanılarak ulaşılmıştır ve bu metot, yeniden meydana gelebilir deneysel sonuçların değerlendirilmesiyle oluşur. Bunun içinde model tasarımının doğru ve deneysel işlerin dikkatlice yapılması şarttır. Bu teknik metodun adı "Temel Sürtünme Tekniği"dir (Base friction technique). 6.8 kPa (1 Psi) kapasitesinde olan küçük gerilme sensörleri tarafından temel sürtünme modelleri içindeki gerilme yayılımı ölçülebilir. Fiziksel modelin inşa edilmesine ve test edilmesine bağlı olarak, kaya yapılarının davranışı hakkında oldukça fazla bilgi elde edilebilir ve prototiplerle mekanik davranışın bir çok tipi tanımlanabilir.

4.4 Kaya Malzeme için Kırılma Kriteri

Burada iki kriter söz konusudur:

$$1- \text{Murrel Kriteri: } \sigma_1 = F \times (\sigma_3)^A + \sigma_c \quad (4.1)$$

σ_1 = büyük asal gerilme

σ_3 = küçük asal gerilme

σ_c = eksenel olmayan sıkıştırma kuvveti

A ve F sabitler.

Normalleştirilmiş şekilde bu eşitlik aşağıdaki gibi tekrar yazılır;

$$\sigma_1 / \sigma_3 = k \times (\sigma_3 / \sigma_c)^A + 1 \quad (4.2)$$

k= sabit değer.

$$2- \text{ Hoek Kriteri: } \tau_m - \tau_0 / \sigma = B [\sigma_m / \sigma_c]^C \quad (4.3)$$

τ_m = maksimum kesme gerilmesi

σ_m = normal gerilme

$$\tau_m = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \quad \text{ve} \quad \sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 \quad (4.4)$$

B, C, ve τ_0 sabitler. Pratik uygulama için $\tau_0 = \sigma_t$ (eksenel olmayan gerilme) olarak alınır. Kırılmaya neden olan örnek için uygulanan maksimum kesme gerilmesi ve maksimum kesme gerilmesinin düzlemi üzerine etki eden normal gerilmeler gibi fiziksel yorumları τ_m ve σ_m miktarlarını verir. Onlar Mohr gerilme dairesinin kırılma esnasındaki yarıçapıdır ve başlangıçtan kendi merkezine kadar olan mesafedir. Kırılma kriteri bu yolla ifade edilirken Mohr kırılma dairesinin en tepesindeki noktanın pozisyonu tanımlanır ve maksimum kesme gerilme noktası olarak ifade edilir. Ampirik metotla tanımlanan yöntemde τ_0 'nın σ_t ye eşit olduğuna değinilmişti, ama Bianiawski (1984); eksenel olmayan çekme gerilmesi σ_t 'nin genelde eksenel olmayan basınç gerilmesi σ_c 'nin 1/10'u kadar olduğu belirtilmektedir. Bu yüzden de eşitliği ;

$$\sigma_m / \sigma_c = B [\sigma_m / \sigma_c]^C + 0.1 \quad (4.5)$$

olarak tanımlanmıştır.

4.5 Kaya Kütlesi için Kırılma Kriteri

Kaya ve kaya kütlesinde, kaya kazılarının planlamasında kullanılan ampirik kuvvet kriterleri mevcuttur.

$$\sigma_1 / \sigma_c = \sigma_3 / \sigma_c + (m \times (\sigma_3 / \sigma_c + s)^{1/2})^{1/2} \quad (4.6)$$

σ_1 = Kırıktaki 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 uygulamaları için yer altı kazılarında planlama için kriter düşünüldüğünde, bu kriterler, kaya yapısının stabilite durumu için genel bir saptama yapılmasına izin vermez. Sivil mühendislik tünellerinde gerçekleştirilen yer altı

madencilik kazılarındaki mevcut farklılıklardan dolayı, stabilite konusunun da farklı kalıplar içinde değerlendirilmesi gerekir. Bu fark, kısmen veya yerel kaya kırılmalarında veya deformasyonlarındaki oran düşük olursa, tünelcilikte kabul edilebilir olur [18]. Yer altı madenciğindeki kabul edilebilir planlama kriterleri aşağıdaki gibidir;

- 1- Karşılaştırmalı çalışmalar tasarlama kriterinin temelini oluştururlar (potansiyel kırık zonlarının karşılaştırılması).
- 2- Planlama kriterleri kaya kuvvetlerinin karşılaştırılması temeline dayanır (maden direklerinin kuvvetine).
- 3- Planlama kriterleri limitli deformasyonların tasarlanma kriterlerine (kaya tuzu içinde madencilik) dayanır.
- 4- Planlama kriterleri temel enerji değişimlerini kullanan tasarlama kriterlerine (kaya patlatılması için açığa çıkacak olan kritik enerji oranı) dayanır.



5.TÜNELLERİN DESTEKLENMESİ VE SAĞLAMLAŞTIRMA

5.1 Giriş

Sağlamlaştırma tünellerde duvar ve taban emniyetini sağlamak demektir. Gerek tünellerin kazılması sırasında, gerekse bittikten sonra stabilite ve güvenlik, geçici ve/veya kalıcı sağlamlaştırma yöntemlerine göre uygulamalar yapılmasıyla sağlanır. Sağlamlaştırma ve destekleme işlemleri; ön gerilmeli veya gerilmesiz kaya bulonu, çelik hasır, püskürtme beton (shotcrete), çelik iksadan (veya inşaat demirinden yapılmış kafes kirişleri) oluşan dış kabuk ile beton (veya betonarme) kabuktan ibarettir (Müller 1979).

NATM'de birincil destekler olarak kullanılan püskürtme beton, hasır çelik iksa ve kaya bulonları kaya kütlesiyle birlikte 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. Deformasyonlar, kontrollü bir şekilde tünel içinde göçüğe meydan vermeden veya emniyetsiz bir ortam oluşmadan gerçekleşmektedir [19].

Tünellerde sağlamlaştırma sadece stabiliteyi değil yanı sıra biten tünelin güvenli kullanımını da sağlar. Tünellerdeki sağlamlaştırma işlemlerinin tünel inşa hızı ve tünel toplam maliyeti üzerinde önemli etkileri bulunmamaktadır [8].

Bir yeraltı mühendislik yapısı için tasarlanan herhangi bir sağlamlaştırma sistemi öncelikle iki şartı yerine getirmelidir:

- a- Etkiyen yükleri, açıklığa bağlı deformasyon limitleri içinde emniyetle taşımalı (taşıyıcılık şartı).
- b- Malzeme ve işçilik masrafları elverdiği ölçüde en az olmalıdır (ekonomiklik şartı).

Projede izlenecek düşünce; tünel kazısı yapılırken kaya kütlesinin mümkün olduğu kadarıyla rahatsız edilmemesi ve kayaya stabilite yönünden zarar verilmemesidir. Unutmamak gerekir ki; tünelde yükü taşıyan kısım yine tüneli çevreleyen kayanın kendisidir. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)'nin de ana ilkesini bu nokta oluşturur [20].

Kaya kütlesindeki süreksizliklerin uygulanacak sağlamlaştırma yönteminin saptanmasında önemli rolleri vardır. Kazının hemen sonrasında açıklık ve etrafındaki kayada, kendini tutabilme süresi içinde gevşeme başlar. Bu gevşeme, zayıf kayalarda tünel açıklığı dağılan ve gevşeyen bloklarla dolana kadar sağlam kayalarda ise kemerlenme (arching) gelişene kadar sürer.

Bu yüzden sağlamlaştırma kendini tutabilme süresinin bitiminden önce yapılmalıdır. Yükler ve deformasyon destek konulana kadar geçecek sürede de artacağından destek üzerine gelen yüklerin minimumda kalmasını sağlamak için sağlamlaştırma elemanları kaya yüzüne (aynaya ve duvarlara) mümkün olduğu kadar yakın konulur.

Yeraltındaki kayalar üzerindeki mevcut ağırlıklar ve yanal deformasyon kısıtlanması sebebiyle birlikte tektonizmaya bağlı olarak karmaşık bir takım kuvvetlerin etkisi altındadır. Tünelin kazılması sonrası başlangıçta dengede olan bu kuvvetlerin büyüklükleri değişime uğrar. Tünel çevresinde deformasyonlar oluşur. Bu deformasyonların belirli sınırlar dahilinde tutulması ve yeni bir dengeli ortamın oluşturulması için genellikle tünellerin desteklenmesi gerekli görülmektedir.

Destekleme üzerine etkiyen basınçlar genellikle üç grupta incelenirler :

- 1- Şişme Basıncı
- 2- Gevşeme Basıncı
- 3- Dağ Basıncı

5.2 Şişme Basıncı

Özel bileşime sahip bazı kayaçlarda ortaya çıkan şişme eğilimi laboratuvar analizleri ile anlaşılabilir. Tünelin etrafını saran kayaçlarda bu tür bir özelliğin bulunması halinde kayaçlar, daha iç kısımlarda bulunan kayaların boşluk suyunu alarak veya havada bulunan suyu emerek şişebilirler. Kimi kayaçlarda ise kimyasal değişimler sonucunda hacim artışı görülür. Kayaçların gösterdikleri bu tür davranış sonucunda ortaya çıkan şişme basıncının değeri hesaplanamamaktadır. Kayaların bünyelerine su almaları veya hava ile temasları sonucunda ayrışmaları, kayaç yüzeyine uygulanacak ince bir püskürtme beton tabakası ile engellenebilir. Eğer bunun tatbiki mümkün değilse kayaların şişmelerine izin verilmesi, hareket durduktan sonra iksanın yerleştirilmesi uygun olacaktır [21].

5.3 Gevşeme Basıncı

Gevşeme basıncı iksa üzerindeki gevşemiş kaya kütlelerinin ağırlığından oluşur. Tünellerde hafriyat sonrası iksa yerleştirilmezse, tavanda gittikçe sivrilerek yukarıya doğru ilerleyen kama şeklinde bir kaya kütleleri tünel içine dökülür. Gevşemenin önüne geçmek için patlatma işi itina ile yapılmalıdır. Özellikle tünel çevresine yakın yerlerde patlatma yerine havalı çekiçlerle veya elle kazı yapılması daha uygun olacaktır.

Tünel açılırken üstteki kaya yükünün taşınması, tünel yan duvarları ve aynadan oluşan yarım kubbe şeklindeki bir kaya tabakası ile sağlanır.

5.4 Dağ Basıncı

İksa üzerinde yer alan gevşemiş kaya tabakalarının ağırlıklarından dolayı düşey gerilmeler, enine genleşmenin önlenmiş olmasından ötürü oluşan yatay gerilmeler vardır. Bunlardan başka tektonizmaya bağlı olarak yatay ve düşey gerilmeler de olabilir. Buna göre yeraltının derinliklerinde yer alan kayalar üç eksenli ilkel gerilmeye maruz kalırlar. Yeraltında kazı boşluğunun açılması ile birlikte yeraltı kaya yapısını saran kayalar boşluk içerisine doğru hareket etmeye başlarlar. Bu hareketin büyüklüğü geçen zamana, tünelin geometrisine, ortamın derinliğine ve ortamdaki kayaların cinsine bağlı olarak değişir. Yeraltı kaya yapısı kazı sonrası hiç vakit kaybedilmeden rijit bir kaplama ile desteklenirse kayaların hareketi engellenmiş olunur. Böyle bir durumda iksa üzerine etkiyecek kuvvet, dağ basıncının ilk anda sahip olduğu dağ basıncı değerine eşit olacaktır. Kayaların belirli bir miktarda hareketinin izin verilmesi sonrası yerleştirilecek olan sünek özelliklere sahip bir iksa üzerine etkiyecek dağ basıncı değeri daha düşük değerlerde olacaktır.

5.5 Tünel Desteklemesine Etki Eden Yük

Tünel desteklemesine etkiyen yük, şişme basıncın olmadığı durumlarda gevşeme ve dağ basıncının kombinasyonudur. İksanın zamanından önce yerleştirilmesi durumunda etkiyen dağ basıncı değeri yüksek olacaktır, geç yerleştirilmesi halinde ise gevşeyen kaya kütlelerinin kalınlığı artacak ve gevşeme basıncı büyüyecektir. O halde iksanın tam zamanında, uygun rijitlikte ve mukavemette yapılması emniyet ve ekonomi açısından büyük önem taşımaktadır.

Tünellerde sağlamlaştırma iki aşamada gerçekleşmektedir. Geçici sağlamlaştırma kafes donatı, bulonlar püskürtme beton tel kafes olup bunların bir veya birkaçının

birlikte kullanılmasıyla sağlamlaştırma gerçekleştirilir. Kalıcı sağlamlaştırma ise nihai beton kaplama ve en son yapılacak olan kontakt enjeksiyonları ile oluşturulacaktır. Kaya kendini tutamayacak kadar parçalı ise gerekli görülen desteklerin aralıkları azaltılarak ve süren (ön çakma çubuğu) kullanılarak sağlamlaştırma işlemlerinin emniyetle yapılması sağlanmaktadır. Ayrıca aynanın stabilitesinin sağlanması için aynaya püskürtme beton da atılmaktadır [22].

5.6 Püskürtme Beton

Kaya yüzeyine püskürtülmek suretiyle uygulanan ve yüzeyde bir tabaka oluşturan betona “püskürtme beton” denir. Islak ve kuru karışım şeklinde iki ayrı uygulaması vardır. Bu ayırım su, çimento ve agreganın karışma yerine göredir.

Islak karışım da su, çimento ve agrega püskürtme beton makinasına gelmeden önce karıştırılmaktadır. Kuru karışım da ise, bu karışma işlemi püskürtme memesinde (nozulun ucunda) yapılmaktadır (Anon dan sonra 1982).

Püskürtme beton, kazı yapıldıktan sonra gün yüzüne çıkan çatlaklı kaya ortamın hava ile temasa geçerek stabilitenin bozulmaması için ilk sağlamlaştırma etkisini oluşturur. Pratik olarak püskürtülen karışımın en büyük tane çapı 19 mm’ dir. Püskürtmede amaç; karışımın duvara çarptıktan sonra sıçrayan miktarın (kayıp) az olmasının sağlanmasıdır (Hoek ve Brown 1980).

İnce ve kalın agrega ile çimento karıştırılarak kullanılır. Gerekirse prizi çabuklaştırıcı katkı maddeleri de katılabilir. Karışma eklenen sıvı priz hızlandırıcı katkı maddeleri % 8 den, toz olanlar ise %10 dan fazla olmamalıdır. Agreganın yuvarlak ve doğal olanı tercih edilir. İri agreganın optimum oranda seçilmesi sıkışma iyileşmesini, yoğunluğun artmasını, büzülmenin azalmasını, bağlanmanın kuvvetlenmesini sağlar ve bükülmeye karşı direncini artırır [23].

5.7 Tel Kafes

NATM’de ek sağlamlaştırma amacıyla kullanılan bir elemandır. Tel kafes imalinde kullanılan çelik çubukların çapı $\phi 6,5$ mm dir. Genelde tel kafes boyutları 5m x 2,5 m olmakta bu da 15cm x 15 cm boyutlu karelajlardan meydana gelmektedir. Tel kafesi karakterize eden özellikler karelerin ebadı, komple hasırın ebadı, tellerin kalitesi ve cinsidir. Genellikle tel kafesin esnek olması ve konduğu yerin şekline zahmetsizce uyması istenir. Tel kafes, püskürtme betonun altına 30 cm’lik bulonlar ile tutturulur.

Tünellerde Q 221/221 tip tel kafes kullanılmaktadır. Bu tel kafesi 3,47 kg/m² dir. Tel kafesin  n görevi tünel içinde çalışan personeli düőecek ufak kaya parçalarından korumaktır. İkinci görevi ise zayıf zonlarda sağlamlaştırmayı artırıcı köprü görevini yerine getirmektedir.

5.8 Kafes Donatı

Genellikle montaj hızı açısından birbirine bağlanan iki eő demir parçadan oluşur. Özel amaçlara göre üç veya dört parçalı da olabilir. İki parça, tam tünel tavanının ortasında birleştirilir ve dikmeler, tabanda yani ayaklarda açılan çukurlara oturtulurlar. Yapılan bu iőlemler üst yarı kazısı sonrası sağlamlaştırma sistemine özgüdür. Kafes donatı ayna gerisine mümkün olan en kısa sürede yerleştirilir [24].

Destek takımlarının yerleştirilmesinde şu sıra izlenir;

- Tam bir takım haline getirilen eğri ve dikmeler aynaya kadar taşınır.
- İstenen durumda yerine yerleştirilerek gerekli bağlantılar yapılır.

Kafes donatı şu görevleri yerine getirir:

- Tünel kesitini korumak ve emniyeti sağlamak.
- Blok düőmelerinden korumak.
- Örselenmiő ya da hareket halindeki zemin/kayanın ağırlığını tutmak.
- İlk genleőme sırasında parçalanmış olan kayanın dayanımını arttırmak.
- Kısmi bir stabilizasyon basıncı gerçekleştirmek.
- Kırılma ve genleőme tehlikesini önlemektir.

5.9 Kaya Bulonu

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

Bulonların karakteristiklerini çeliğin cinsi, çapı, boyu, diő boyu, kullanılacak plakanın şekli, ebadı ve kalınlığı, somunun tipi ve ölçüleri ile bulonun kayaya tespit şekli belli eder.

Tünellerde    çeşit bulon kullanılmaktadır. Bunlar:

- 1- Enjeksiyonlu bulon
- 2- Reçineli bulon
- 3- Swellex bulon

5.9.1 Enjeksiyonlu Bulon

Bu tür bulonlar, tünel tavan ve duvarlarında açılan bir deli e yerleştirildikten sonra bu deli e  imento  erbeti enjekte edilerek kullanılırlar. Bulonların değişik uzunluk ve çapta imal edilirler. Bulonlar yerleştirildikten ve  imento  erbeti donduktan sonra öngörülen yüke kadar gerdirilir. Bu tip bulonlama ile tünelde sa lamla tırma i i s rat kazanır. Enjeksiyonlu bulonlarda kullanılan plakaların boyutları genellikle 20 cm x 20 cm, plaka kalınlığı ise 1 cm'dir.

5.9.2 Reçineli Bulonlar

Bulon  ekli enjeksiyonlu tip ile aynı olmasına rağmen bağlayıcı eleman olarak hazır kartu lar içinde bulunan reçine kullanılması nedeniyle enjeksiyonlu bulonlardan ayrılır. Açılmış olan bulon deliğine iki adet reçine kartu u deliğin sonuna gelecek şekilde yerleştirilir. Daha sonra bulon döndürülerek deli e sokularak delik içinde bulunan reçine kartu larının parçalanması sağlanır. Döndürme işlemi reçinenin homojen bir şekilde bulon etrafında dağılması için de gereklidir. Bu işlem ile bulonun ucundan 1 m'lik kesimi kayaya ba lanmış olur. Reçinenin priz süresi 4 dakikadır. Yaklaşık 20 dakika sonra da bulon öngörülen yüke kadar gerdirilerek sa lamla tırma işlemi tamamlanmış olur.

5.9.3 Swellex Bulon

Atlas Copco firmasının geliştirmiş olduğu swellex bulonlar 3.6 – 4.5 m uzunluğunda hilal şeklinde içeri doğru kıvrılmış, i i boş, özel  elik alaşımlı bir tüpten oluşur. Bu kıvrılmış boru kayada açılan deli e elle yerleştirildikten sonra yaklaşık 200 kgf/cm² basınçlı su sağlayan özel bir pompa kullanılarak 45-50 sn içinde  işirilir.  işen t p derhal y k taşımaya ba lar.  işirilmeden  nceki çapı delik çapından küçüktür.

Swellex bulonlar 33-39 mm delik çapı aralığında kolayca uygulanır. Swellex bulonun dış çapı 36 mm, şişirilmiş haldeki dış çapı 54 mm, et kalınlığı ise 3 mm dir. Bulon yerleştirildikten sonra oluşan çekme dayanımı 20 ton'dur. Swellex bulonlarda kullanılan plakaların ebadları diğer bulonlarda kullanılanlara göre daha küçüktür. Plakaların kalınlıkları ise 0.8 cm dir.

Görülen birçok yararları yanında bulonlar, devamsızlıkları nedeniyle bazı blok düşmeleri önleyememektedirler. Bu olumsuz yan tünel tavanının tel kafes veya püskürtme betonla kaplanmasıyla önlenabilir.

Yapım süresince geoteknik ölçüm ve kontrollerle tünel çevresinde kazı esnasında oluşan yeni basınç dağılımı gözlenmeli, tünelin stabilitesi kontrol edilebilmelidir. Ölçüm verilerine göre, uygulanan kazı sırası, destek sınıfı gözden geçirilerek optimize edilebilmektedir. Tekdüze olarak gerekmedikçe beton yerine emniyeti azaltmadan ekonomik bir destekleme sistemine geçilebilmektedir.

Klasik yöntemlerden en önemli ve NATM'yi ekonomik yapan fark yapım sırasındaki kabullerin, verilerin sürekli kontrol edilebilmesi ve yapım sırasında projelendirmenin devam etmesidir. Bu nedenle dünyadaki ve ülkemizdeki otoyollardaki tünel uygulamalarında NATM yapım şartnamelerinde yapım süresince proje temsilcilerinin bulunması koşulu yer almaktadır.

NATM'de tünel kaplaması ise su yalıtımını koruyucu olup, tünel içindeki diğer elektromekanik (aydınlatma, havalandırma, kontrol sinyalizasyon vb) donanımına altyapı oluşturulmakta ve uzun dönemde tünel stabilitesinde bir problem olması halinde ikincil bir destek görevi görmektedir. NATM' de deformasyonların birincil desteklerle kontrol edilmesiyle orjinal kaya kütlelerinin dayanımında bir azalma olması engellenmektedir. Tünel çevresindeki kaya kütlelerinin taşıma kapasitesi de böylece korunmakta ve efektif bir şekilde kullanılmaktadır.

6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

6.1 Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM=finite element method) bilgisayarların gittikçe artan kullanımı 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 programlamasına uygunluğu yüzünden bugün diğer birçok mühendislik alanlarında da uygulanmaktadır.

Sonlu eleman metodunda herhangi bir sürekli ortam veya yapı sonlu eleman denilen parçacıklara 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 toplanması ile saptanır. Elde edilen bu denklemler bilinen deplasman sınır şartlarını sağlayacak şekilde değiştirildikten sonra ortaya genellikle, bilinmeyen değişkenleri deplasmanlar olan 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 almak suretiyle elde edilirler.

Sonlu eleman teknolojisinin gelişmesi sonucunda bugün çok çeşitli mühendislik yapılarının analizini yapabilecek tek bir sonlu eleman bilgisayar programı geliştirmek mümkündür. Çok çeşitli yapı sistemlerini çözebilmek için kodlanmış bu tür bilgisayar programlarına genel amaçlı programlar denilmektedir.

Genel amaçlı programların eleman kütüphanesinde, sonlu eleman literatüründe mevcut kafes-kiriş, kiriş, düzlem elastisite, üç boyutlu elastisite, ince-plak, ince-kabuk ve kalın kabuk elemanlarının çoğu kullanılabilmektedir. Bu tür programlarla çeşitli

rijit veya elastik sınır şartları ve çeşitli yükleme durumları altında uzay ve düzlem kafes-kirişler, uzay ve düzlem çerçeveler, iki veya üç boyutlu elastisite problemleri, düz veya katlanmış plaklar, plak kiriş sistemleri ve kabuk tipi yapıların statik ve dinamik gerilme analizleri kolaylıkla yapılabilmektedir.

Bu projede **smap-3d** ve **tuna plus** isimli bilgisayar programı kullanılmıştır. **Smmap-3d** ve **tuna plus**, davranışı çok farklı olabilen iki veya üç boyutlu geoteknik sistemlerinin hesaplanması için hazırlanmış bir sonlu eleman programıdır.

Bu program tünel geometrisi ve ortamı sınırlayan geometri ve mesnet ve yüklenme koşulları verildiğinde en uygun sonlu eleman ağını kendisi oluşturmakta ve kayacın mekanik parametreleri (elastisite modülü, poisson oranı ve özgül ağırlığı) ile yenilme koşullarının verilmesi halinde düğüm noktalarını ve elemanları numaralandırmakta ve koordinatların hesabını yaptıktan sonra duyarlılığı irdelemektedir.

6.2 Plastik Tünel Analizi

Yeni Avusturya Yöntemi'ne göre yük taşıyan elemanların en önemlisi olarak kabul edilen tünel çevresindeki kaya tabakaları, çatlak ve değişken bir yapıya sahip, içinde önemli ilkel gerilmeler bulunan anizotropik bir malzemedir. Tünel açılırken kayadaki gerilmelerde yeniden dağılıma olduğu ve kalıcı deformasyonların ortaya çıktığı bilinmektedir. Bu sebeple elastik tünel analizi ile gerçekçi bir çözüme ulaşılması zordur [25].

Sünek bir malzemede yapılan plastik analizde, kayma gerilmeleri akma sınırını aşamaz. Kaya ise gevrek bir malzemedir. Burada kayma gerilmeleri, Mohr-Columb kriterine göre belirlenmiş bir sınır gerilmeyi geçmemelidir. Sonlu elemanlar metodunda her elemanın elastik modülünün farklı olması mümkündür. Elemanlardaki elastik modüller öyle seçilmelidir ki hiçbir elemanda kayma gerilmesi τ_{lim} değerini geçmesin; bu sağlanacak olursa daha gerçekçi bir çözüme ulaşabileceği düşünülmektedir.

$$\tau_{lim} = (c + (\sigma_{min} + \sigma_{max}) \tan \phi / 2) \cos \phi \quad (6.1)$$

ya da teğetsel ve radyal gerilme şiddetleri dikkate alındığında plastikleşme koşulu;

$$p_k = ((\sigma_T - \sigma_R)^2 + 4\tau^2) / ((\sigma_T - \sigma_R)^2 + 2c \cot \phi^2)^2 - \sin \phi^2 \quad (6.2)$$

denkleminin $p_k \geq 0$ olacak şekilde sağlanmasını gerektirir.

6.3 Analizler

Kayanın kendini taşıma özelliği gözönüne alınarak zeminin tünel üzerinde tünel çapının üç katı mesafede kemerleşmeye geçeceği varsayılmıştır. Böylece tüm dağ kütlelerinin yükü yerine yukarıda belirtilen dağ kütlelerinin tünele etkisi olacağı kabul edilmiştir. Bu kabulün tüneldeki gerilmelere ve plastik zon sınırlarına doğrudan etkisi vardır [26].

6.4 Çatlaklı Kayaçların Malzeme Özellikleri

Tüneli çevreleyen kırılmış kaya kütleleri tam anlamıyla plastiktir ve aşağıdaki eşitlikte verilen kriteri izler:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_r \sigma_c \sigma_3 + S_r \sigma_c^2)^{1/2} \quad (6.3)$$

Burada, m_r ve s_r kırılmış kaya kütleleri malzeme sabitleridir.

Birim hacimdeki değişimler elastik bölgede elastik sabitler E ve ν ile ilgilidir. Kırılma anında kaya hacmi genişler ve birim hacim değişimleri plastisite teorisi kullanılarak hesaplanır.

Plastik bölge, kayaç gerilmesi P_o 'a, destek basıncı P_i 'ye, orijinal ve kırılmış kaya kütleleri malzeme sabitlerine ve yarıçapa bağlı olarak genişler.

Analiz edilen problem tünel eksenini etrafında bütün detaylarıyla simetriktir. Eğer kırık zondaki kayanın ağırlığı da analize katılsaydı, bu basitleştirici simetri kaybolacaktı. Ancak, kırılmış kayanın ağırlığı destek dizaynında oldukça önemli olduğundan, temel analiz yapıp bittikten sonra yaklaşık bir yolla formüllere dahil edilmektedir.

6.5 Tünellerde Yük-Deformasyon Eğrileri

Kayanın karakteristik eğrisi sırayla aşağıdaki değerlerin bulunması ile elde edilir:

$$a) \quad M = 0.5 \left\{ (m/4)^2 + m P_o / \sigma_c + S \right\}^{1/2} - m/8 \quad (6.4)$$

$$b) \quad D = \frac{-m}{m + 4 \left\{ m (P_o - M \sigma_c + S) \right\}^{1/2}} \quad (6.5)$$

$$P_o - M \sigma_c = \sigma_{re}$$

$$c) \quad N = 2 \left\{ \frac{P_o - M\sigma_c}{m_r \sigma_c} + \frac{S_r}{m_r^2} \right\}^{1/2} \quad (6.6)$$

d) Eğer $P_i > P_o - M\sigma_c$ ise tünel çevresindeki deformasyon elastiktir.

$$\frac{u_i}{r_{io}} = \frac{(1+\nu)}{E} (P_o - P_i) \quad (6.7)$$

e) Eğer $P_i < P_o - M\sigma_c$ ise tünel çevresindeki plastik zon oluşur.

$$\frac{u_e}{r_e} = \frac{(1+\nu)}{E} M\sigma_c \quad (6.8)$$

$$f) \quad \frac{r_e}{r_i} = e^{N-2} \left(\frac{P_i}{m_r \sigma_c} + \frac{\sigma_r}{m_r^2} \right)^{1/2} \quad (6.9)$$

$$g) \quad \text{Eğer } r_e / r_i < \sqrt{3} \text{ ise } R = 2D_{1n}(r_e / r_i), \quad (6.10)$$

$$h) \quad \text{Eğer } r_e / r_i > \sqrt{3} \text{ ise } R = 1.1D \quad \text{kullanılır.} \quad (6.11)$$

$$i) \quad e = \frac{2(u_e / r_e)(r_e / r_i)^2}{[(r_e / r_i)^2 - 1](1 + 1/R)} \quad (6.12)$$

$$j) \quad A = (2u_e / r_e - e_{av})(r_e / r_i)^2 \quad (6.13)$$

$$k) \quad \frac{u_i}{r_{io}} = 1 - \left\{ \frac{1 - e_{av}}{1 + A} \right\} \frac{1}{2} \quad (6.14)$$

$$l) \quad \text{Tünel tavanı için } u_i / r_{io} \text{ 'a karşı } \frac{P_i + \gamma_r(r_e - r_i)}{P_o}$$

m) Tünel yan duvarları için u_i / r_{io} 'a karşı P_i / P_o çizilir.

n) Tünel tabanı için u_i / r_{io} 'a karşı $\frac{P_i + \gamma_r(r_e - r_i)}{P_o}$ eğrisi çizilir.

Burada; γ_r = Kırılmış kaya kütlesinin birim ağırlığıdır.

6.6 Destek Rijitliği ve Maksimum Destek Basıncı

Tünellerde kullanılan desteklerin alabilecekleri maksimum deformasyonlar aŗađıdaki formülden bulunur.

$$u_i = u_{io} + \frac{P_i r_i}{k} \quad (6.15)$$

Burada,

u_{io} = Tünel kazısından sonra destekleme yapılıncaya kadar geçen zamanda

tünelin radyal deformasyonu

P_i =Radyal destek basıncı,

k =Destek rijitliği,

r_i =T nel yarıçapıdır.

6.6.1 Beton Kaplama ve Püskürtme beton için Destek Rijitliği ve Maksimum Destek Basıncı

Yarıçapı r olan bir tünelin içine yapılan t kalınlığındaki beton veya shotcrete kaplaması tarafından yaratılan destek basıncı aŗađıdaki eŗitlikten bulunur:

$$P_i = \frac{k_c u_{io}}{r_i} \quad (6.16)$$

$$k_c = \frac{E_c (r_i^2 - (r_i - t_c)^2)}{(1 + \nu_c) [(1 - 2\nu_c) r_i^2 + (r_i - t_c)^2]} \quad (6.17)$$

Burada,

r_i = Tünel yarıçapı

E_c = Shotcrete veya betonun elastisite modülü,

ν_c = Shotcrete veya betonun poisson oranı,

t_c = Kaplama kalınlığı.

Shotcrete veya beton kaplama tarafından yaratılabilecek maksimum destek basıncı:

$$P_{c\max} = \frac{1}{2} \sigma_{c.cone} \left[1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \quad (6.18)$$

Burada,

$\sigma_{c.cone}$ = Shotcrete veya betonun tek eksenli basınç dayanımıdır.

Tünel iç kaplama betonu, genellikle tünel etrafındaki kayaların deplasmanı tamamlandıktan sonra yapılmaktadır. Bu sebeple bir yük taşımayan ikinci bir emniyet tabakası olarak düşünülmektedir. Buna karşılık shotcrete en büyük yükü taşıyan destekleme elemanıdır.

6.6.2. Çelik İksa için Destek Rijitliği ve Maksimum Destek Basıncı

Çelik iksanın düzgün yayılı radyal yüklenmesi halinde rijitliği aşağıdaki formülle tanımlanır.

$$k_s = \frac{E_s A_s}{S r_i} \quad (6.19)$$

Burada;

E_s = Çelik iksanın elastisite modülü,

A_s = Çelik iksanın kesit alanı,

S = Çelik iksanın tünel eksenine yönünde ara mesafesi.

Çelik iksa tarafından yaratılan maksimum destek basıncı ise,

$$P_{s\max} = \frac{A_s \sigma_{ys}}{r_i S} \quad (6.20)$$

formülünden bulunur.

Burada; σ_{ys} = Çeliğin akma mukavemetidir.

Yukarıdaki formülün geçerli olması için çelik iksanın arkası tamamen shotcrete ile doldurulmalıdır.

6.6.3 Mekanik veya Kimyasal Ankrajlı Enjeksiyonsuz Kaya Bulonları için Destek Rijitliği ve Maksimum Destek Basıncı

Mekanik veya kimyasal ankrajlı enjeksiyonsuz kaya bulonunun rijitliği aşağıdaki formülden bulunur:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{s_c - s_e}{r_i} \left(\frac{4L}{\pi d_b 2E_b} + Q \right) \quad (6.21)$$

Burada;

S_c = tünel çevresi yönünde kaya bulonu ara mesafesi

S_e = tünel eksenini yönünde kaya bulonu ara mesafesi

L = kaya bulonu bağlanma ucu ile kafa arasındaki serbest uzunluk,

D_b = bulon çapı

E_b = bulon malzemesinin elastisite modülü

Q = ankraj ve kafa için yük deformasyon sabitidir.

Bir kaya bulonu sisteminde kaya kütlelerinin deformasyonu ile yaratılan maksimum destek basıncı aşağıdaki formülden bulunur;

$$P_{b\max} = \frac{T_{bf}}{s_c s_e} \quad (6.22)$$

Burada;

T_{bf} = tünelde karşılaşılan kaya kütlelerinin benzerleri üzerinde yapılan çekip çıkarma deneyinden elde edilen kaya bulonunun taşıma yüküdür;

6.6.4 Birkaç Destek Tipi Birarada Kullanıldığında Destek Rijitliği ve Maksimum Destek Basıncı

Tünellerde kullanılan destekleme sistemi, püskürtme beton ve kaya bulonları veya bunlara ek olarak çelik iksadan oluşmaktadır. Bu tip destekleme sisteminin rijitliği ve maksimum destek basıncı aşağıdaki hesaplama sırası izlenerek bulunmuştur.

Püskürtme beton ve kaya bulonlarından oluşan destekleme sistemi için, püskürtme beton ve kaya bulonlarının maksimum destek basınçları (sırasıyla $P_{c\max}$ ve $P_{b\max}$) ve buna karşılık gelen deformasyonlar ($U_{c\max}$ ve $U_{b\max}$) yukarıda gösterildiği gibi bulunur.

U_{cmax} ve U_{bmax} 'nın küçük olanı ($\bar{u}$) kullanılarak aşağıdaki formülden sistemin maksimum destek basıncı hesaplanır;

$$P_{max} = \frac{\bar{u}(k_c + k_b)}{r_i} \quad (6.23)$$

Püskürtme beton, kaya bulonları ve çelik iksadan oluşan destekleme sisteminde çelik iksa sünebilir ve gerilme akma sınırına geldikten sonra da yük taşımaya devam eder. Bu tip sistemin maksimum destek basıncı aşağıdaki gibi bulunmuştur.

- a) P_{cmax} , P_{bmax} ve P_{smax} (çelik iksanın maksimum destek basıncı) ile bunlara karşılık gelen U_{cmax} , U_{bmax} ve U_{smax} (çelik iksanın gösterdiği maksimum deformasyon) yukarıdaki hesaplardan bulunur.
- b) U_{cmax} ve U_{bmax} ve U_{smax} içerisinde minimum olan (u) bulunur.
- c) Eğer $u = U_{cmax}$ veya U_{bmax} ise

$$P_{max} = \frac{\bar{u}(k_c + k_b + k_s)}{r_i} \quad (6.24)$$

- d) Eğer $\bar{u} = U_{smax}$ ise; çelik akmadan önce

$$P_{max1} = \frac{\bar{u}(k_c + k_b + k_s)}{r_i}, \quad (6.25)$$

$$P_{max2} = P_{max1} + \frac{(k_c + k_b)(u_{cmax} - u_{smax})}{r_i} \text{ dir.} \quad (6.26)$$

7. SONUÇLAR

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimi sonucu, Finite Element Methodu (Sonlu Eleman Methodu) tünel mühendislik hesaplarında sayısal metotların önem kazanmasıyla birlikte hızla gelişmiştir. Tünel mühendisliğinde, bu metot ile geometrik açıdan çok karmaşık olan tünel yapıları heterojen malzeme özellikleri ile birlikte statik olarak modellenebilmektedir. Zemin – kaya mekaniğinde ve özellikle tünel mühendisliğinde finite element method'un uygulamaları ile ilgili geniş bir literatür mevcuttur.

Bu çalışmanın hazırlanabilmesi için öncelikle, Yeni Avusturya Tünel Açma Methodu prensiplerine göre çalışan Smap-3d ve Tuna-plus sonlu elemanlar programları öğrenilmiştir. Daha sonra Çayeli Tünel modeli oluşturularak çözüme gidilmiştir.

Tünel inşaatının finite element analizi, kazı aşamaları, I ve II. destekleme yapıları göz önünde bulundurularak ilk önce tüm dağ yüklenerek, kemerleşme mesafesi belirlenmiştir. Daha sonra gerilmelerin hesaplanan değişimleri ve sapmaları dikkate alınarak modelin genişliği belirlenmeye çalışılmıştır. Bu modelde tünel çapı ve iki tünel arasındaki mesafe dikkate alınarak tünel dışlarındaki 2D mesafedeki gerilmelerin sapmaları ihmal edilmiştir.

Smap-3d ve Tuna plus finite element (sonlu elemanlar) programları ile yapılan 3 boyutlu analizlerden elde edilen sonuçlar kazı aşamalarına göre reaksiyon kuvvetlerinin (eksenel yük, moment ve kesme kuvvetleri) yanı sıra arazide ve tünel kesitinde meydana gelen deplasmanlar, çevre zemini içinde oluşan asal gerilmelerin yönü ve büyüklükleri ve plastikleşen bölgeler hakkında bilgi vermektedir. Hesaplanan sonuçlar her kazı aşaması ve yük durumuna göre sayısal değerleri ve grafik çıktıları ile birlikte verilmektedir.

Yapılan analizler sonucunda tünelde düşey doğrultuda maksimum 2.90 mm, yatay doğrultuda da 0.40 mm deformasyon meydana geldiği hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Ertunç, A.**, 1983. Tünellerde yapılan kaya sınıflamaları, *Tünelcilik Semineri*, Ankara 5-12 Ocak, s. 164-205.
- [2] **Vardar, M.**, 1981. Tünel İnşaatı için Kaya (Dağ) Sınıflamaları-Lauffer, Müh. Jeol. Türk Milli Kom. Bülteni 4, 17-21.
- [3] **Maidl, B., Herrenknecht, M. and Anheuser. L.**, 1995. Mechanised Shield Tunnelling, Berlin.
- [4] **Barton, N. and Choubey V.**, 1978. Norges Geotekniske In-stitut, **119**. 1-11.
- [5] **Bieniawski, Z. T.**, 1984. Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling Balkema Press, Rotterdam.
- [6] **O'Rourke, T.D.**, 1984. Guidelines for Tunnel Lining Desing, *Technical Committee on Tunnel Lining Design of the Underground Technology Research Council of thr ASCE Technical Council on Resarch*, New York, USA, 1984, pp 4-17.
- [7] **Bozkurt, M.**, 1987. Tüneller Ders Notları, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul
- [8] **Arioğlu, E. ve Yüksel, A.**, 1999. Tünel ve Yeraltı Mühendislik Yapılarında Çözümlü Püskürtme Beton Problemleri, TMMOB Maden Müh. Odası Yayını, İstanbul.
- [9] **Vardar, M.**, 1977. Zeiteinfluss auf das Bruchverhalten des Gebirges in der Umgebung von Tunneln, Veröff. des Institutes für Bodenmech. und Felsmech. der Univ. Karlsruhe,
- [10] **Vardar, M.**, 1995. Projelendirmede ve Uygulamada Tünelcilik Yaklaşımları, İTÜ İnşaat Fak Prof. İ. Turgan Sabis Semp., İstanbul, s. 185-196,
- [11] **Vardar, M.**, 1994. Metro Tünellerinde Duraylığın Korunması ve Sağlanması, Sağlama-İyileştirme-Destekleme-İyileştirme, Ulaşımında Yeraltı Kazıları Sempozyumu, Maden Mühendisleri Odası, İstanbul, s. 41-51,
- [12] **Vardar, M.**, 1979. Yeraltı kaya yapıları mekaniğinde yeni Avusturya tünel açma yönteminin ana ilkeleri, ankrajlar ve boyutlandırılması, *6. Mühendislik Jeolojisi Konferansı*, Yalova, 10-17 Haziran, s. 4-16.
- [13] **Verbundplan Ges.m.b.H.**, 1987. The New Austrian Tunnelling Method (NATM), Vienna, Austria.

- [14] **Akçelik, N., Solak, T., ve Mucukgil, R.,** 1999. NATM uygulamalı yer altı tünelleri teknik şartnamesi ve tünellerin yapımında karşılaşılan problemler, TCK Genel Müdürlüğü, Ankara, 8-12 Kasım, s.13-21.
- [15] **Önorm B2203,** 1994. Untertagebauarbeiten Werkvertragsnorm, Österreichischer Normen, Österreich.
- [16] **Attewell, P.B.,** 1995. Tunnelling Contracts and Site Investigation, London.
- [17] **Vardar, M.,** 1986. Doğal Gerilme Durumlarının ve Süreksizliklerin Yeraltı Kaya Yapılarının Deformasyonuna Etkisi, Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşaatı Sem., Adana, Cilt 1, s. 1-4
- [18] **Vardar, M.,** 1988. Geoteknikteki Güvenlik Sayıları Üzerine Düşünceler, Erguvanlı Mühendislik Jeolojisi Semp., Müh. Jeol. Türk Milli Kom. Bülteni 10, s. 15-21,
- [19] **Vardar, M., Müller, L., Sauer, G.,** 1978. Dreidimensionale Spannungsumlagerungs-prozesse im Bereich der Ortsbrust, Rock Mech. Suppl. 9, 67-85,
- [20] **Vardar, M.,** 1979. Mühendislik Jeolojisi-Yeraltı Kaya Mekaniği ilişkisi, DSI 6. Müh. Jeol. Semp., Ankara
- [21] **Balkır, G.,** 1974. Karayolları Tünelleri Proje Esasları, TCK Matbaası, Ankara.
- [22] **Abdelsalam, M.E.,** 1994. Tunneling and Ground Conditions. Balkema Press, Rotterdam.
- [23] **Kırbaş, T.,** 1995. Tünel açma işlemleri, karşılaşılan sorunlar ve uygulanan çözüm yolları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] **Mahtab, A. M., and Grasso, P.,** 1992. Geomechanics Principles in the Design of Tunnels and Caverns in Rock. Elsevier Press, Amsterdam.
- [25] **Bieniawski, Z. T.,** 1992. Design Methodology in Rock Engineering, Balkema Press, Rotterdam.
- [26] **Vardar, M.,** 1982. Tünel Projelerinde Kaya Mekaniği Çalışmaları, Ulusal Kaya Mekaniği Bülteni 1, s. 9-26.

EKLER

Çayeli Tünel güzergahındaki;

Birimlerin Mekanik Parametreleri:

1. Birimin:

Elastisite Modülü	$E = 16 \text{ E}+4 \text{ t/m}^2$
Kohezyon	$C = 30 \text{ t/m}^2$
İçsel Sürtünme açısı	$\phi = 30^\circ$
Poisson Oranı	$\nu = 0.2$
Birim Hacim Ağırlığı	$\gamma = 1.9 \text{ t/m}^3$

2. Birimin:

Elastisite Modülü	$E = 20 \text{ E}+4 \text{ t/m}^2$
Kohezyon	$C = 100 \text{ t/m}^2$
İçsel Sürtünme açısı	$\phi = 33^\circ$
Poisson Oranı	$\nu = 0.22$
Birim Hacim Ağırlığı	$\gamma = 2 \text{ t/m}^3$

3. Birimin:

Elastisite Modülü	$E = 44 \text{ E}+4 \text{ t/m}^2$
Kohezyon	$C = 225 \text{ t/m}^2$
İçsel Sürtünme açısı	$\phi = 35^\circ$
Poisson Oranı	$\nu = 0.25$
Birim Hacim Ağırlığı	$\gamma = 2.28 \text{ t/m}^3$

4. Birimin:

Elastisite Modülü	$E = 20 \text{ E}+4 \text{ t/m}^2$
Kohezyon	$C = 600 \text{ t/m}^2$
İçsel Sürtünme açısı	$\phi = 40^\circ$
Poisson Oranı	$\nu = 0.33$
Birim Hacim Ağırlığı	$\gamma = 2.32 \text{ t/m}^3$

Destekleme Elemanlarının Mekanik Parametreleri:

Bu sınıf için belirlenen püskürtme beton kalınlığı $d = 25\text{cm}$,

İksa aralığı $a = 1.2\text{m}$ (I 160)

Kullanılacak bulon çapı $\phi = 26\text{ mm}$

Püskürtme betonunun özellikleri

Elastisite Modülü	$E: 28 \text{ E}+5 \text{ t/m}^2$
Poisson Oranı	$\nu : 0.2$
İçsel Sürtünme açısı (deg.)	$\phi: 30$
Kohezyon	$C: 500 \text{ t/m}^2$
Birim Hacim Ağırlığı	$\gamma : 2.4 \text{ t/m}^3$

İç kaplama betonunun özellikleri

Betonun Elastisite Modülü	$E_c: 32 \text{ E}+5 \text{ t/m}^2$
Betonun Poisson Oranı	$\nu_c: 0.2$
Betonun İçsel Sürtünme açısı (deg.)	$\phi : 30$
Betonun Kohezyonu	$C: 600 \text{ t/m}^2$
Birim Hacim Ağırlığı	$\gamma : 2.5 \text{ t/m}^3$
Donatının elastisite modülü	$E_r: 2.1 \text{ E}+7 \text{ t/m}^2$

Kaya bulonlarının özellikleri

Kesit alanı	$A : 0.00053 \text{ m}^2$
Birim uzunluğunu ağırlığı	$W_L: 0.00417 \text{ t/m}$
Elastisite Modülü	$E : 2.1 \text{ E}+7 \text{ t/m}^2$
Akma gerilmesi	$\sigma_y : 2.4 \text{ E}+4 \text{ t/m}^2$

Hesaplarda ;

Püskürtme beton kalınlığı $T_s = 25\text{cm}$,

İç kaplama kalınlığı $T_L = 40 \text{ cm}$

İksa aralığı $a = 1.2\text{m}$ (I 160)

Kullanılacak bulon çapı $\phi = 26 \text{ mm}$ olarak alınmıştır.

Finite Element Analizler

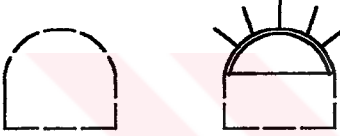
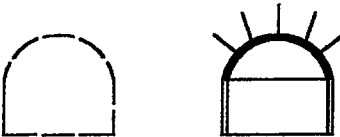
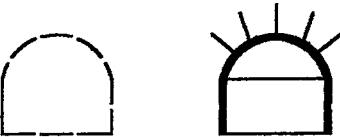
Finite Element Analizleri, çift tüp tünel kazı sırasına göre aşamalara bölünmüştür. Her kazı aşamasında, deplasman (şekil değiştirmeler) ve gerilmelerin artışı sırasıyla belirlenmiş, geometri ve malzeme özellikleriyle birlikte onu izleyen aşamanın gerilme hali kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Çayeli Tünelleri Kazı ve İmalat Aşamaları

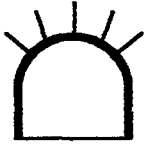
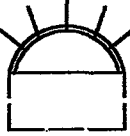
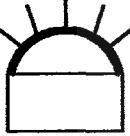
Çayeli Tünelleri iki aşamalı olarak kalot ve kemer kazısı olmak üzere iki aşamada incelenmiştir. Analizlerde toplam 8 yapım aşaması  ng r lm ş ve bu aşamalar sırasıyla analiz edilmiştir.



Simulation of construction sequence

Step	Construction Step	Descriptions	
1,2		In situ Ko State	
3		50 % Stress Relief	Upper Core Excavation (Right Tunnel)
4		75 % Stress Relief Soft Shotcrete Rock Bolt	
5		100 % Stress Relief Hard Shotcrete Rock Bolt	
6		50 % Stress Relief	Lower Core Excavation (Right Tunnel)
7		75 % Stress Relief Soft Shotcrete	
8		100 % Stress Relief Hard Shotcrete	

Simulation of construction sequence (continued)

Step	Construction Step	Descriptions	
9	 	50 % Stress Relief	Upper Core Excavation (Left Tunnel)
10	 	75 % Stress Relief Soft Shotcrete Rock Bolt	
11	 	100 % Stress Relief Hard Shotcrete Rock Bolt	
12	 	50 % Stress Relief	Lower Core Excavation (Left Tunnel)
13	 	75 % Stress Relief Soft Shotcrete	
14	 	100 % Stress Relief Hard Shotcrete	

Simulation of construction sequence (continued)

Step	Construction Step	Descriptions	
15		Lining Subjected to: weight	Lining Analysis
16		Lining Subjected to: weight + Water pressure	
21		Lining Subjected to: weight + Water pressure +loosening load	
22		Lining Subjected to: weight + Water pressure +loosening load +rock bolt deactivation	

STEP NO.	DESCRIPTIONS
5	Excavation of Upper Right Core in Right Tunnel Excavation of Upper Left Core in Right Tunnel
8	Excavation of Lower Right Core in Right Tunnel Excavation of Lower Left Core in Right Tunnel
11	Excavation of Upper Right Core in Left Tunnel Excavation of Upper Left Core in Left Tunnel
14	Excavation of Lower Right Core in Left Tunnel Excavation of Lower Left Core in Left Tunnel
15	Lining Subjected Weight
18	Lining Subjected Weight Water Pressure
21	Lining Subjected Weight Water Pressure Loosening Load
22	Lining Subjected Weight Water Pressure Loosening Load Rock Bolt Deactivation & Shotcrete Degradation

<u>PLOT NO</u>	<u>TITLE</u>
1	FINITE ELEMENT MESH ÇAYELİ TÜNELİ
2	DEFORMED SHAPE AT LOAD STEP = 5 ÇAYELİ TÜNELİ
3	DEFORMED SHAPE AT LOAD STEP = 8 ÇAYELİ TÜNELİ
4	DEFORMED SHAPE AT LOAD STEP = 11 ÇAYELİ TÜNELİ
5	DEFORMED SHAPE AT LOAD STEP = 14 ÇAYELİ TÜNELİ
6	DEFORMED SHAPE AT LOAD STEP = 5 ÇAYELİ TÜNELİ
7	DEFORMED SHAPE AT LOAD STEP = 8 ÇAYELİ TÜNELİ
8	DEFORMED SHAPE AT LOAD STEP = 11 ÇAYELİ TÜNELİ
9	DEFORMED SHAPE AT LOAD STEP = 14 ÇAYELİ TÜNELİ
10	PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTION AT LOAD STEP = 5 ÇAYELİ TÜNELİ
11	PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTION AT LOAD STEP = 8 ÇAYELİ TÜNELİ
12	PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTION AT LOAD STEP = 11 ÇAYELİ TÜNELİ
13	PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTION AT LOAD STEP = 14 ÇAYELİ TÜNELİ

- 14 PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTION
AT LOAD STEP = 5
ÇAYELİ TÜNELİ
- 15 PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTION
AT LOAD STEP = 8
ÇAYELİ TÜNELİ
- 16 PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTION
AT LOAD STEP = 11
ÇAYELİ TÜNELİ
- 17 PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTION
AT LOAD STEP = 14
ÇAYELİ TÜNELİ
- 18 Contours of Safety Factor
AT LOAD STEP = 5
ÇAYELİ TÜNELİ
- 19 Contours of Safety Factor
AT LOAD STEP = 8
ÇAYELİ TÜNELİ
- 20 Contours of Safety Factor
AT LOAD STEP = 11
ÇAYELİ TÜNELİ
- 21 Contours of Safety Factor
AT LOAD STEP = 14
ÇAYELİ TÜNELİ
- 22 AXIAL STRESS
AT LOAD STEP = 5
ÇAYELİ TÜNELİ
- 23 AXIAL STRESS
AT LOAD STEP = 8
ÇAYELİ TÜNELİ
- 24 AXIAL STRESS
AT LOAD STEP = 11
ÇAYELİ TÜNELİ
- 25 AXIAL STRESS
AT LOAD STEP = 14
ÇAYELİ TÜNELİ
- 26 DEFORMED SHAPE
AT LOAD STEP = 15
ÇAYELİ TÜNELİ
- 27 DEFORMED SHAPE
AT LOAD STEP = 18
ÇAYELİ TÜNELİ

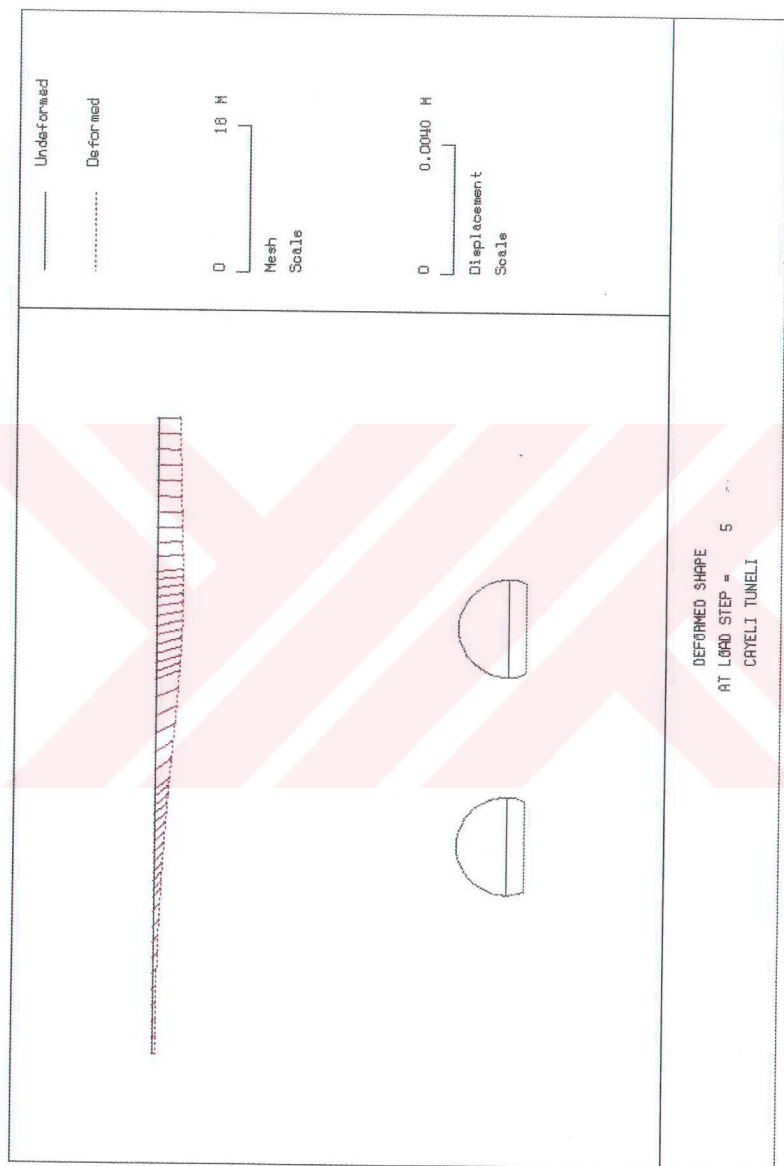
28	DEFORMED SHAPE AT LOAD STEP = 21 ÇAYELİ TÜNELİ
29	DEFORMED SHAPE AT LOAD STEP = 22 ÇAYELİ TÜNELİ
30	BENDING MOMENT AT LOAD STEP = 15 ÇAYELİ TÜNELİ
31	THRUST AT LOAD STEP = 15 ÇAYELİ TÜNELİ
32	SHEAR AT LOAD STEP = 15 ÇAYELİ TÜNELİ
33	INNER EXTREME FIBER STRESS AT LOAD STEP = 15 ÇAYELİ TÜNELİ
34	OUTER EXTREME FIBER STRESS AT LOAD STEP = 15 ÇAYELİ TÜNELİ
35	INNER REINFORCING BAR STRESS AT LOAD STEP = 15 ÇAYELİ TÜNELİ
36	OUTER REINFORCING BAR STRESS AT LOAD STEP = 15 ÇAYELİ TÜNELİ
37	BENDING MOMENT AT LOAD STEP = 18 ÇAYELİ TÜNELİ
38	THRUST AT LOAD STEP = 18 ÇAYELİ TÜNELİ
39	SHEAR AT LOAD STEP = 18 ÇAYELİ TÜNELİ
40	INNER EXTREME FIBER STRESS AT LOAD STEP = 18 ÇAYELİ TÜNELİ

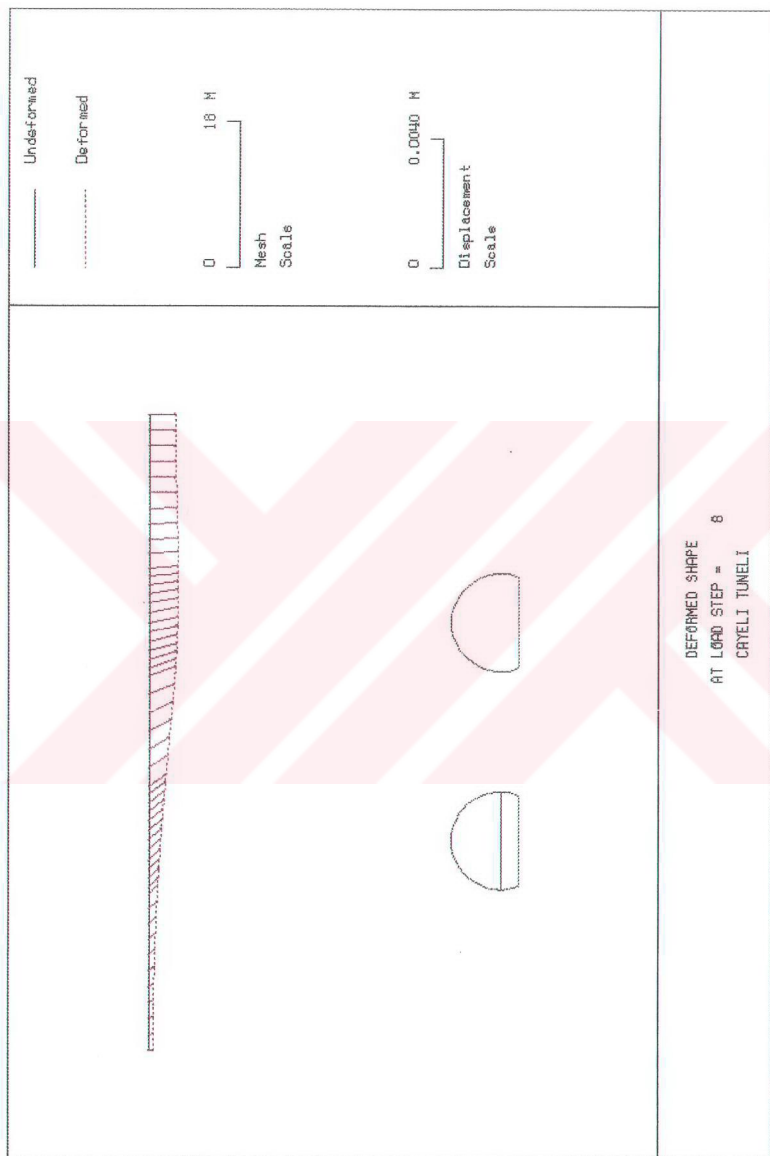
- 41 OUTER EXTREME FIBER STRESS
 AT LOAD STEP = 18
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 42 INNER REINFORCING BAR STRESS
 AT LOAD STEP = 18
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 43 OUTER REINFORCING BAR STRESS
 AT LOAD STEP = 18
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 44 BENDING MOMENT
 AT LOAD STEP = 21
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 45 THRUST
 AT LOAD STEP = 21
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 46 SHEAR
 AT LOAD STEP = 21
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 47 INNER EXTREME FIBER STRESS
 AT LOAD STEP = 21
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 48 OUTER EXTREME FIBER STRESS
 AT LOAD STEP = 21
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 49 INNER REINFORCING BAR STRESS
 AT LOAD STEP = 21
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 50 OUTER REINFORCING BAR STRESS
 AT LOAD STEP = 21
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 51 BENDING MOMENT
 AT LOAD STEP = 22
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 52 THRUST
 AT LOAD STEP = 22
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 53 SHEAR
 AT LOAD STEP = 22
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 54 INNER EXTREME FIBER STRESS
 AT LOAD STEP = 22
 ÇAYELİ TÜNELİ

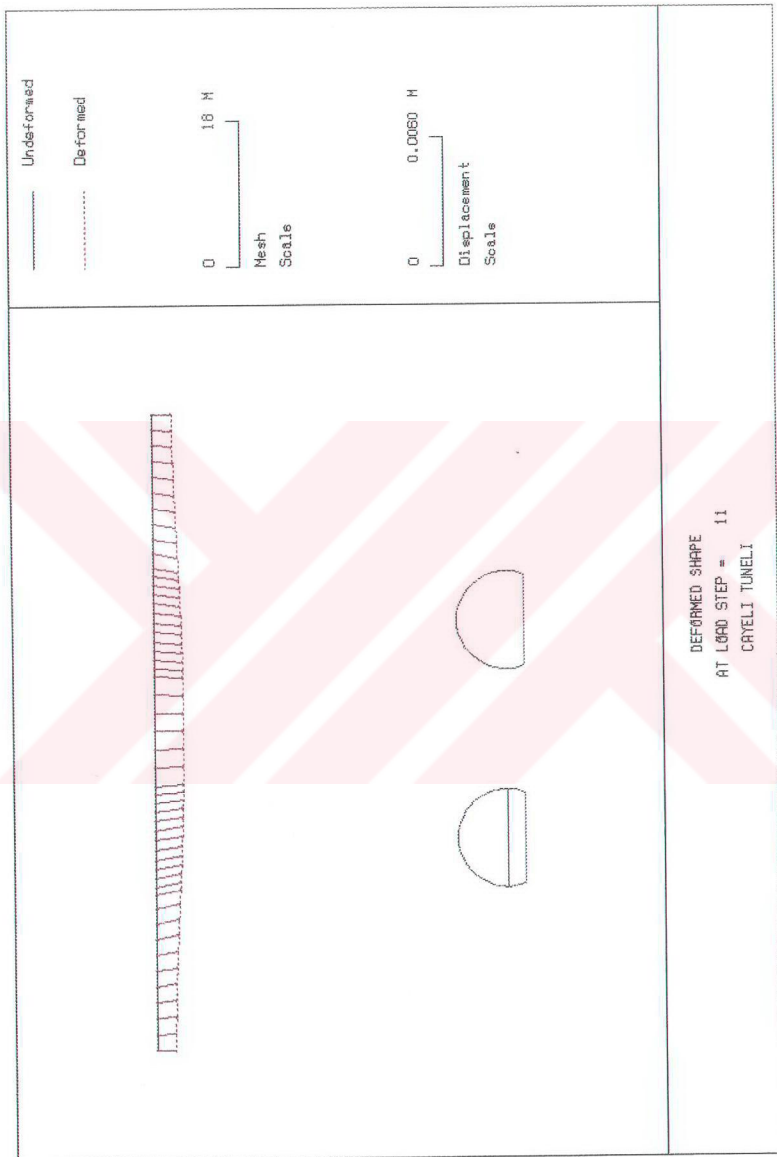
- 55 OUTER EXTREME FIBER STRESS
 AT LOAD STEP = 22
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 56 INNER REINFORCING BAR STRESS
 AT LOAD STEP = 22
 ÇAYELİ TÜNELİ
- 57 OUTER REINFORCING BAR STRESS
 AT LOAD STEP = 22
 ÇAYELİ TÜNELİ

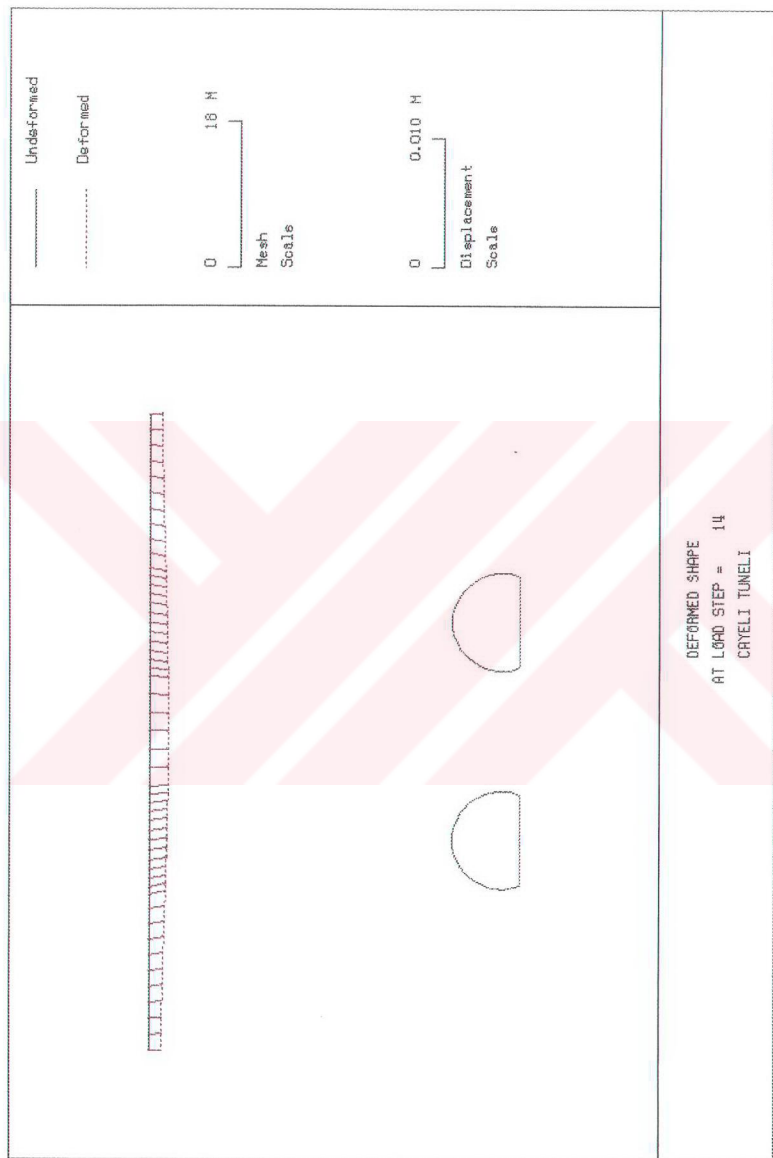


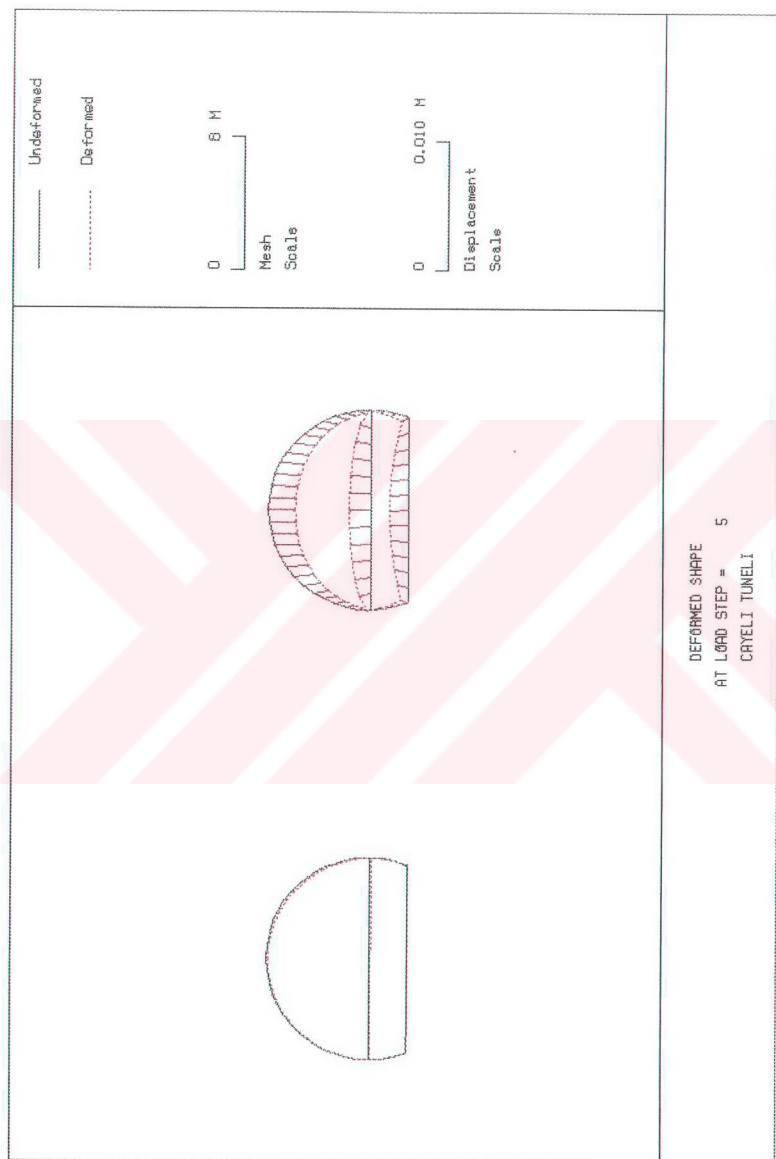


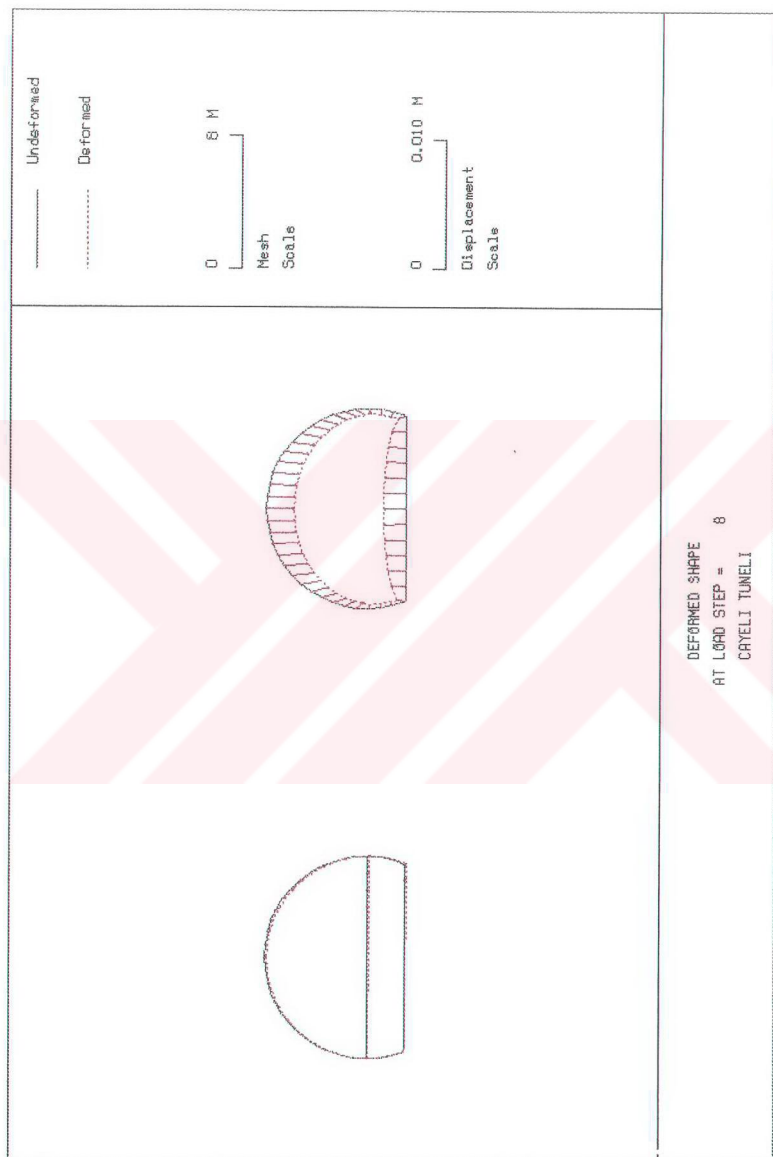


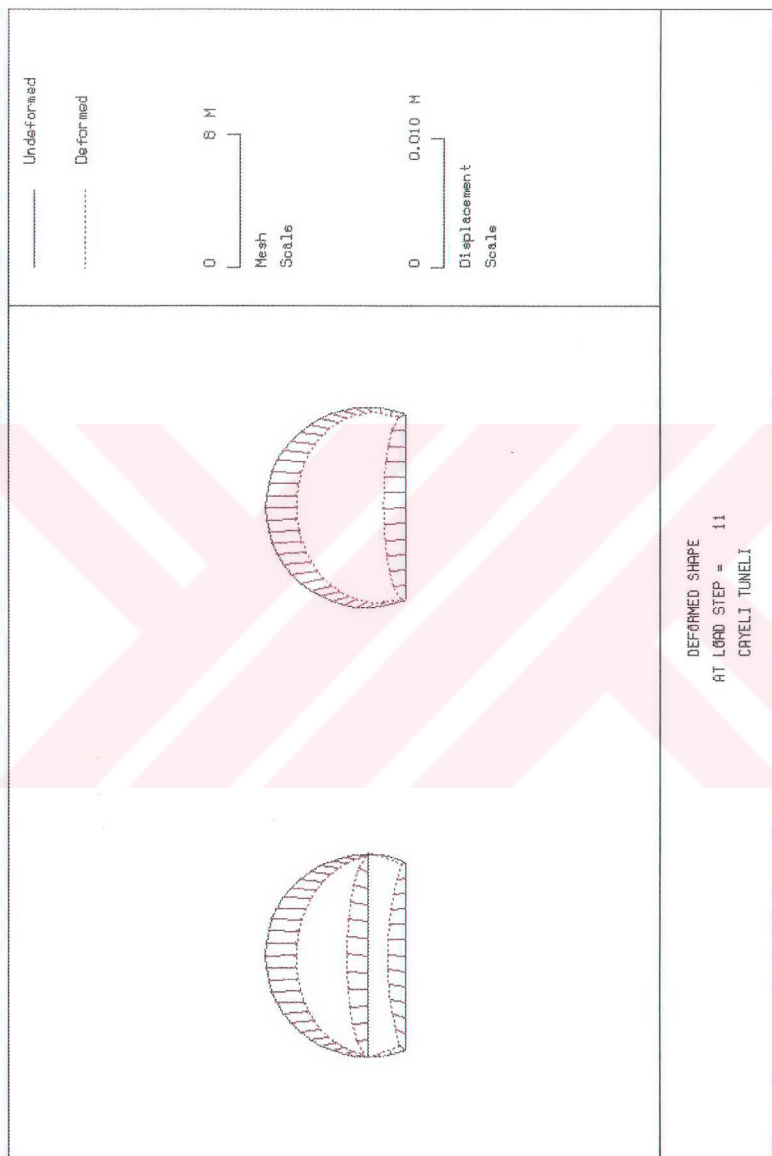


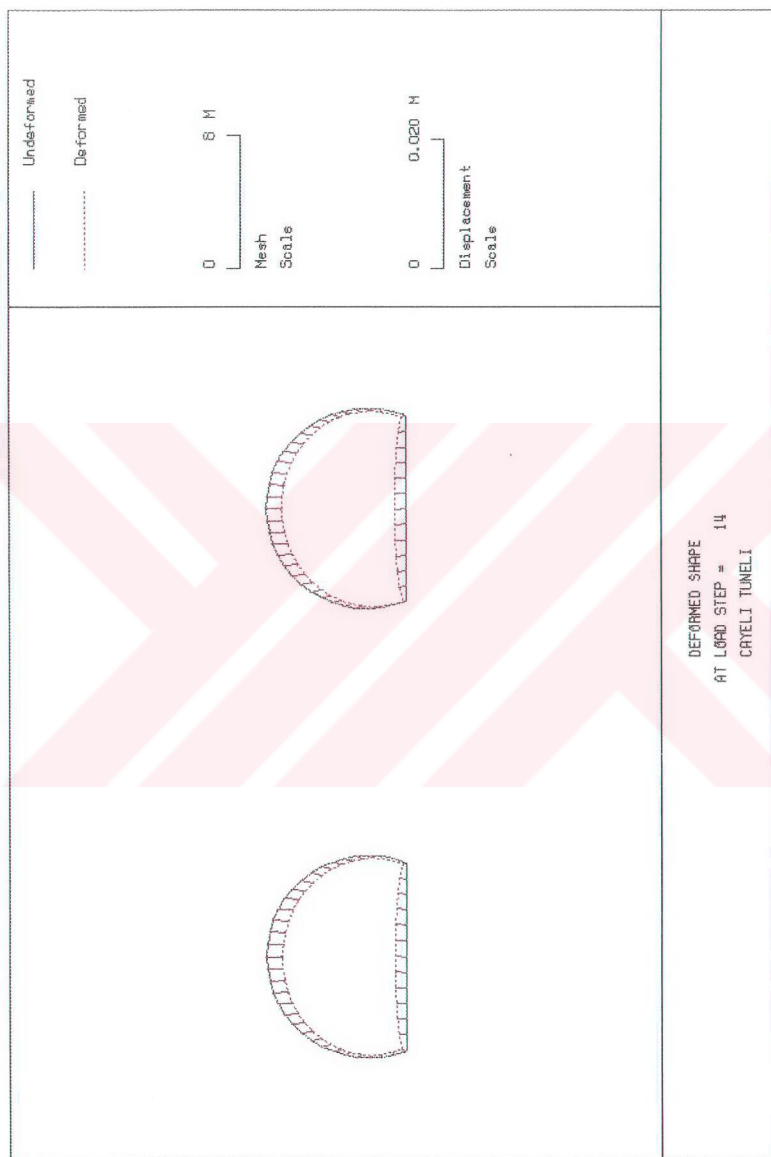


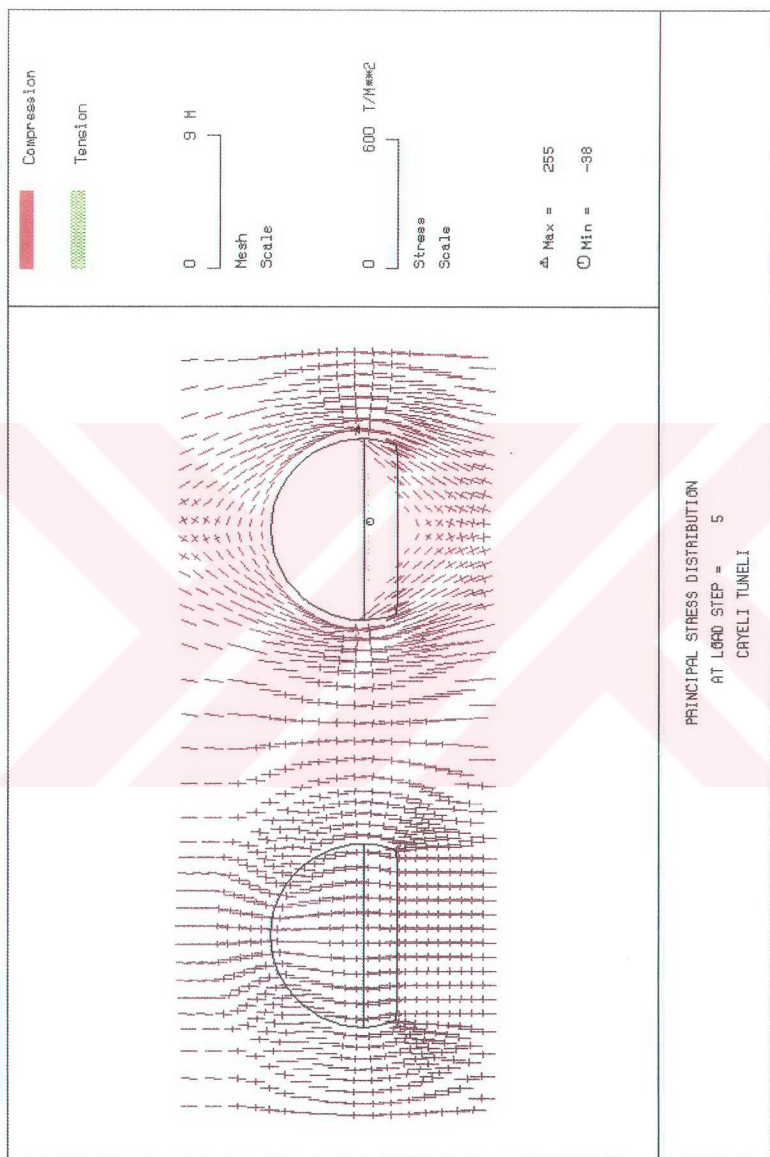


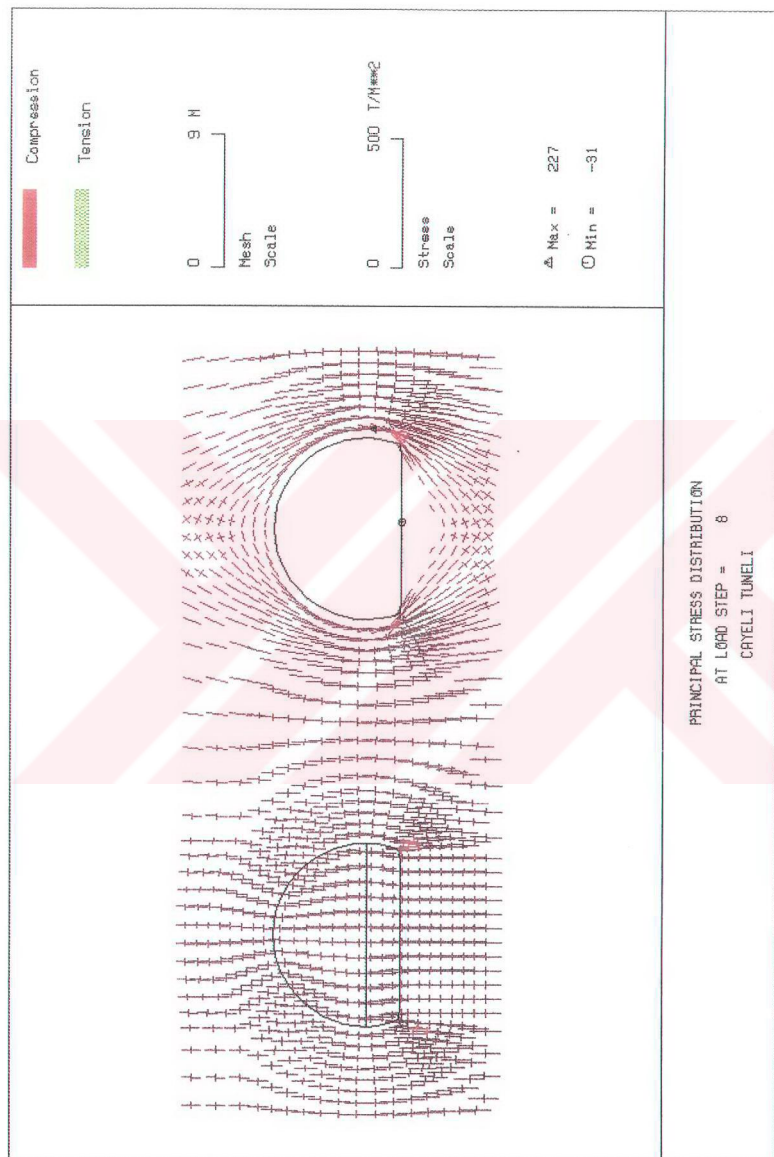


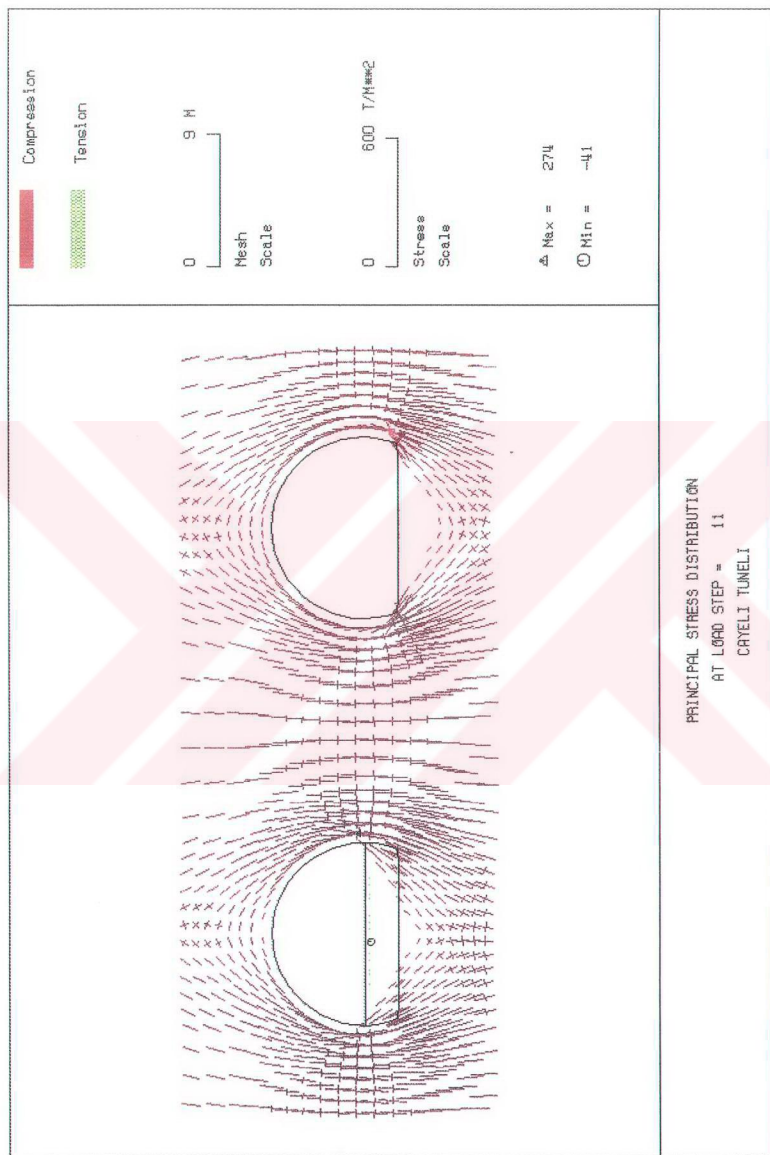


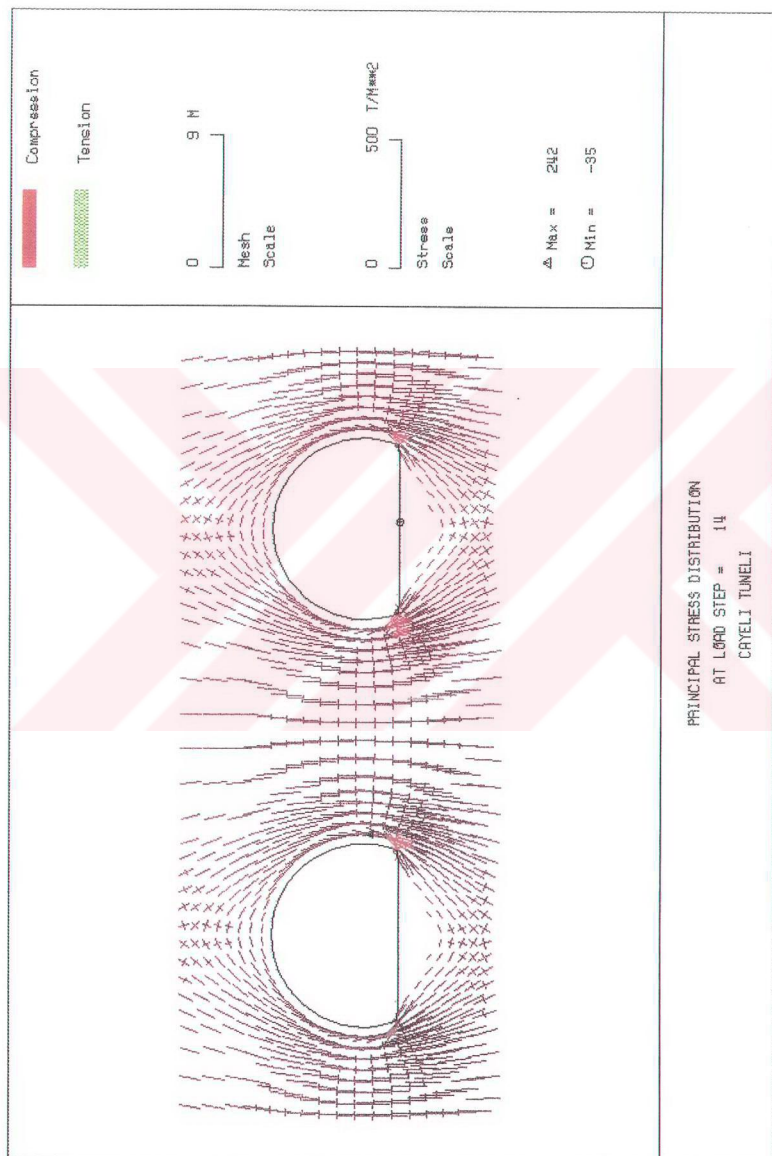










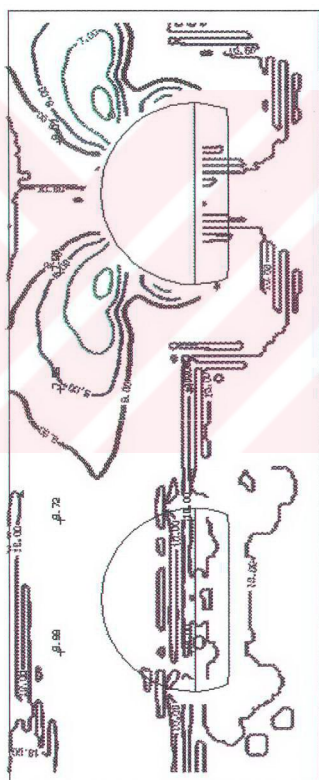












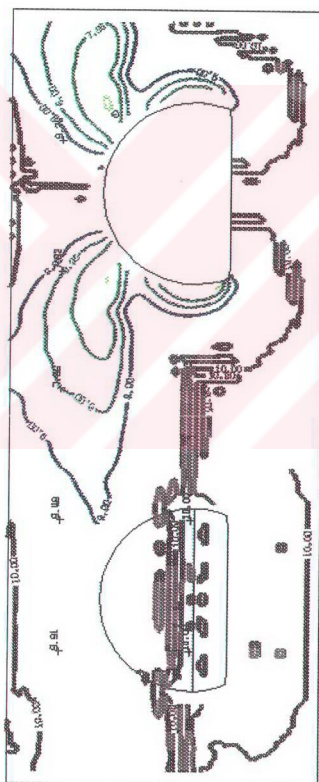
Δ Max = 10.00

□ Min = 5.00

0 9 M
Meşh
Scale

Contours of Safety Factor
AT LOAD STEP = 5
CAYELI TUNNEL

Δ Max = 10.00
 $\odot$ Min = 5.14
 0 9 M
 Mech
 Scale



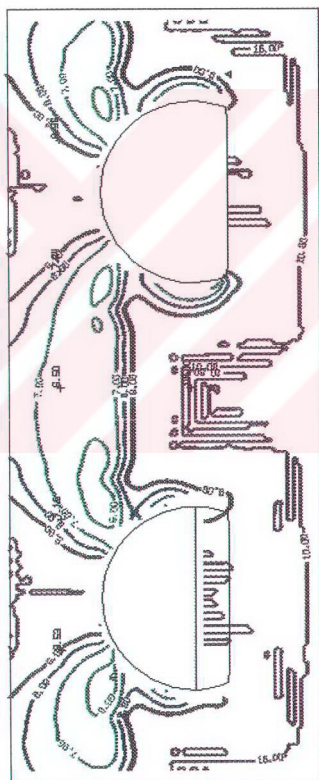
Contours of Safety Factor
 AT LOAD STEP = 8
 CAYELI TUNELI

△ Max = 10.00

○ Min = 4.75

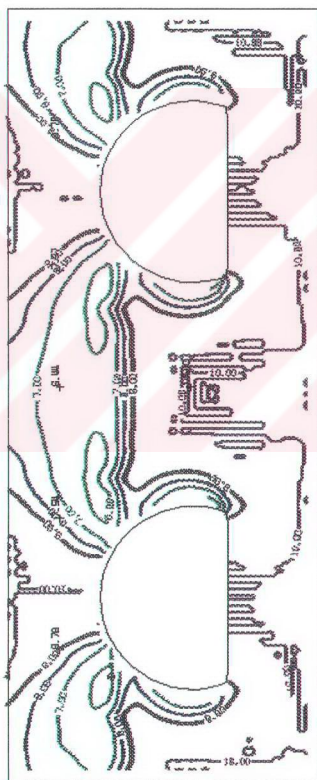
0 9 M

Neck
Scale



Contours of Safety Factor
AT LOAD STEP = 11
CRYEJI TUNNEL

Δ Max = 10.00
 $\square$ Min = 4.88
 0 9 M
 Meen
 Scale



Contours of Safety Factor
 AT LOAD STEP = 14
 CAYELI TUNELI

Compression



Tension



0 9 H

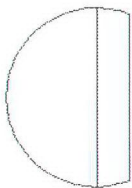
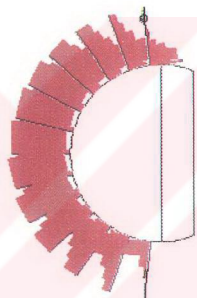
Mesh
Scale

0 4000 T/M²

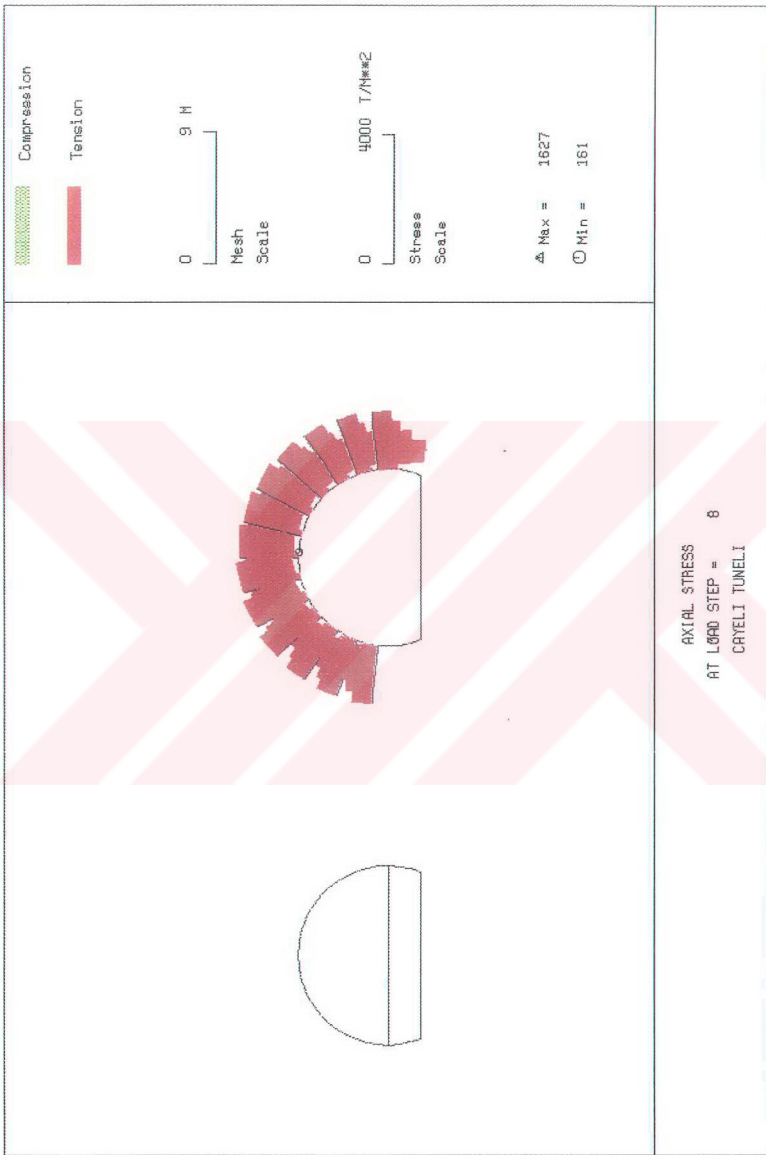
Stress
Scale

△ Max = 1615

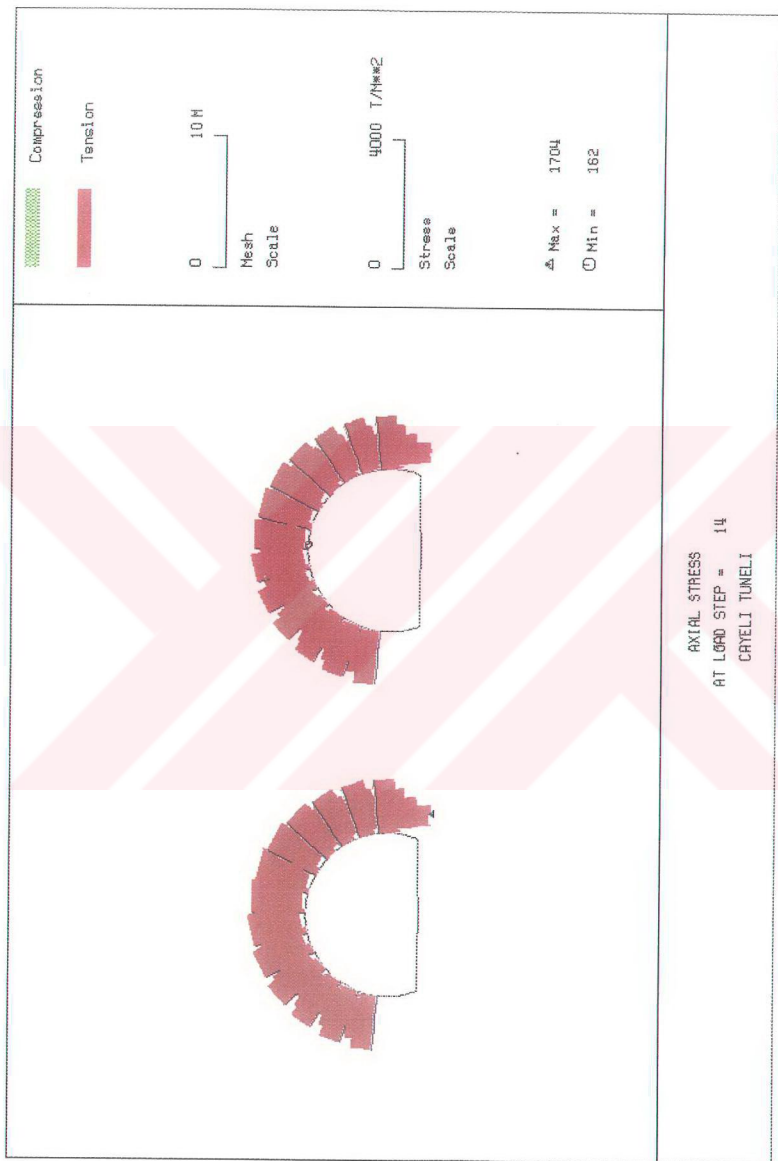
○ Min = -22

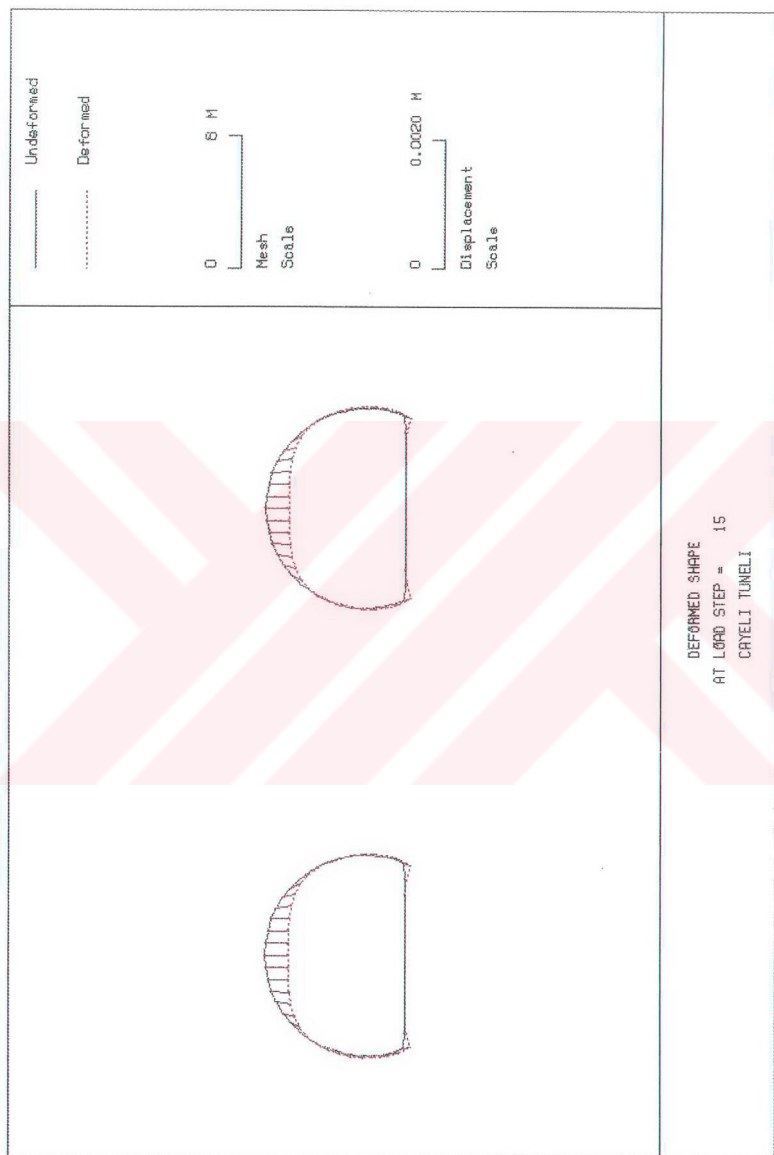


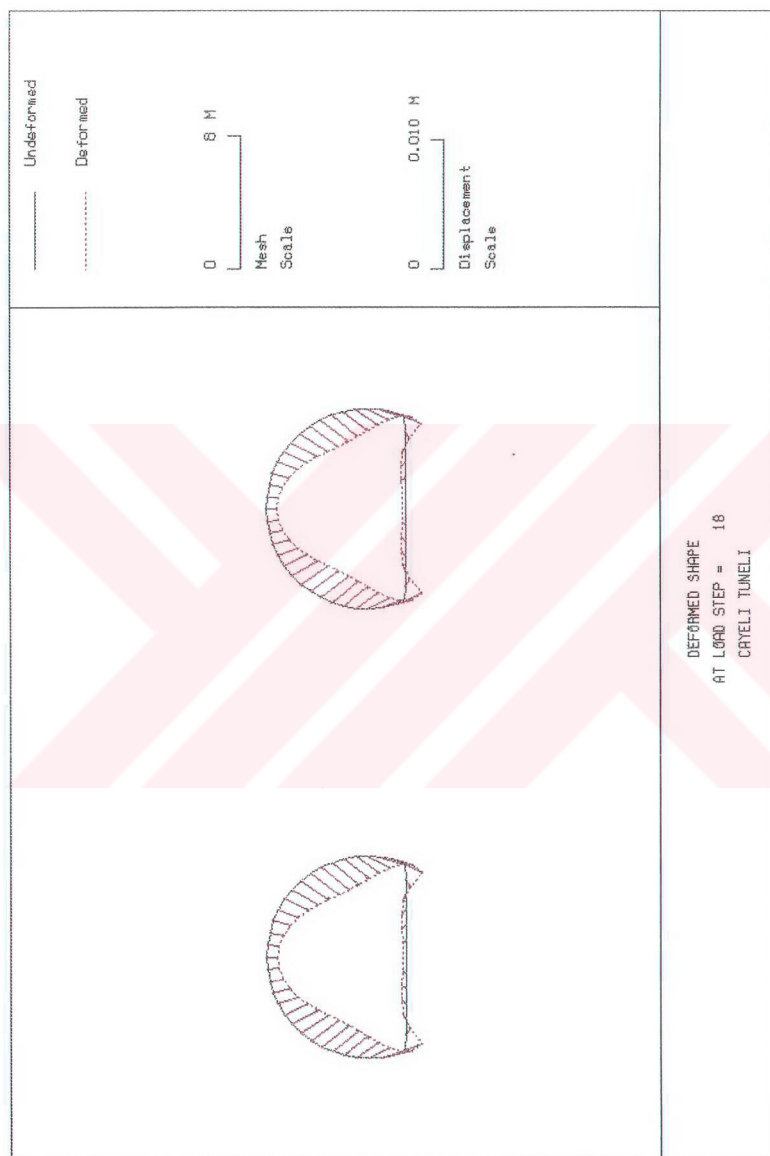
AXIAL STRESS
AT LOAD STEP = 5
CRYEII TUNELI

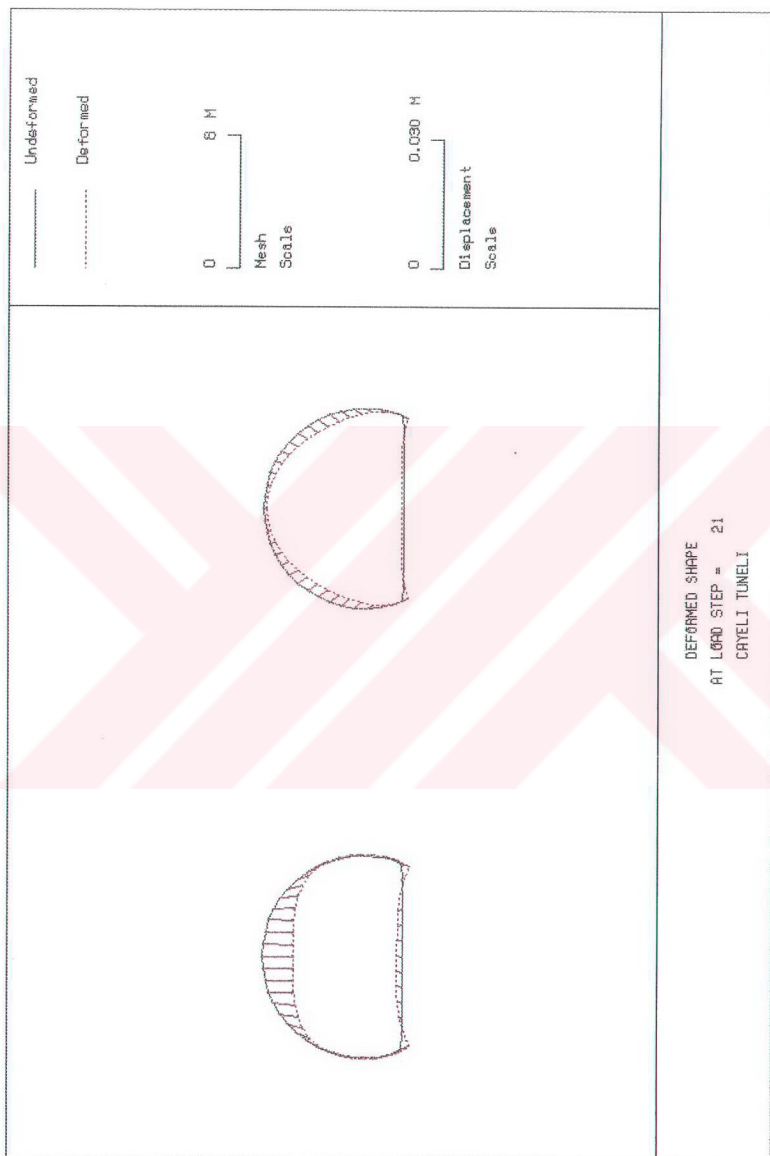


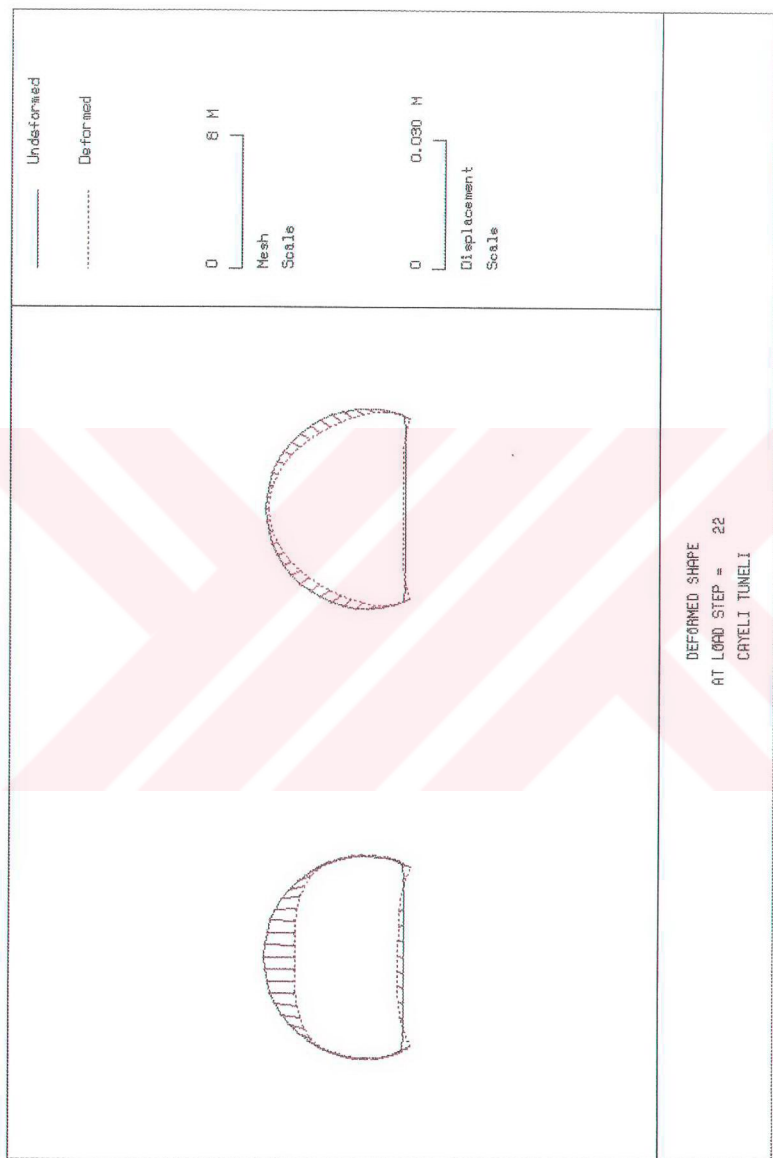






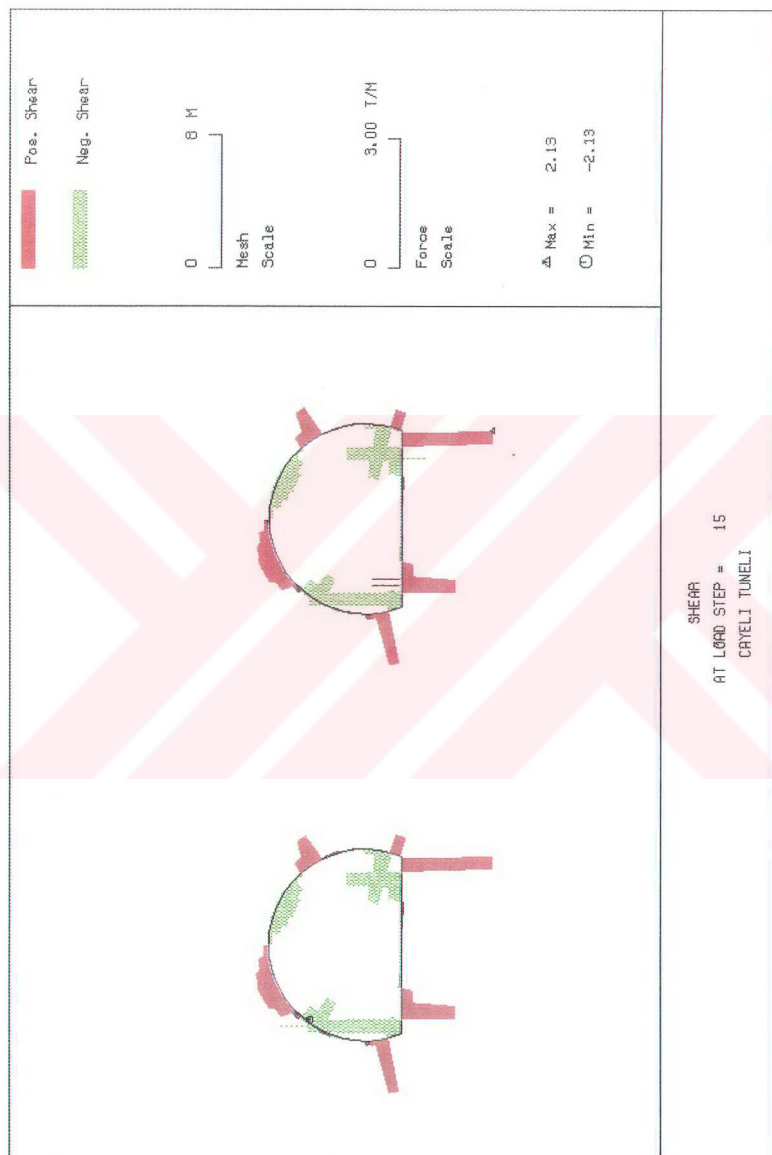


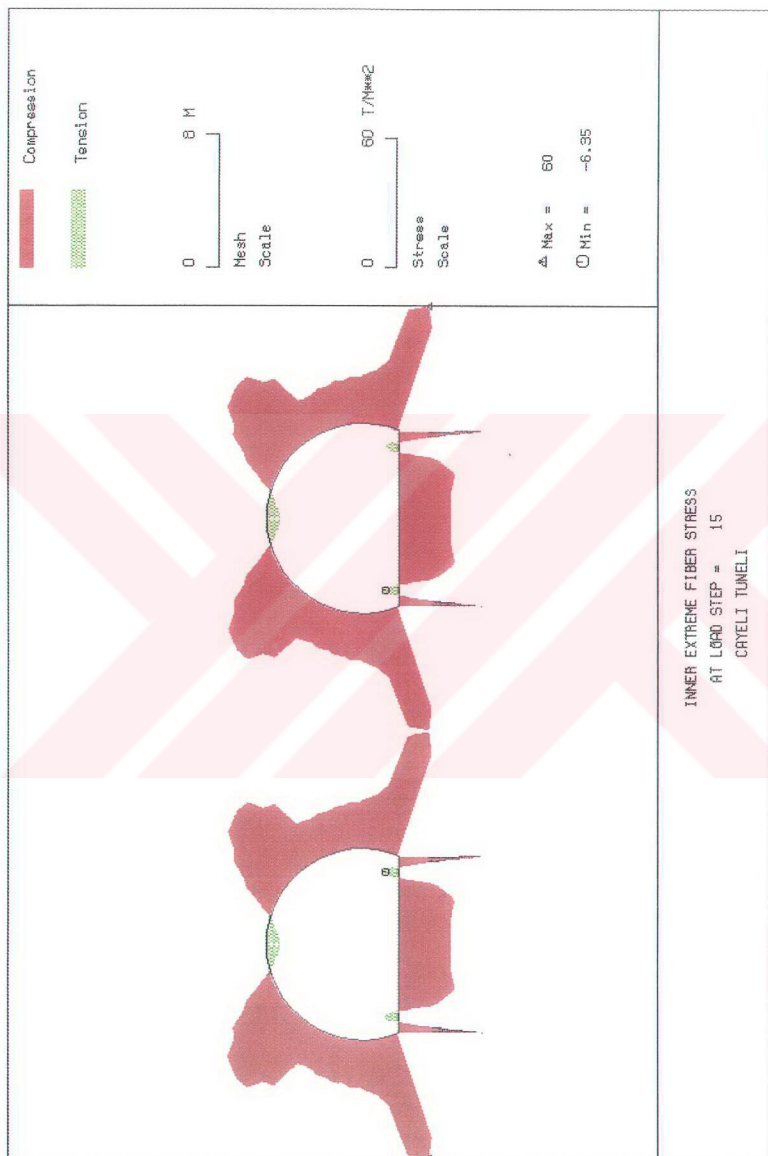




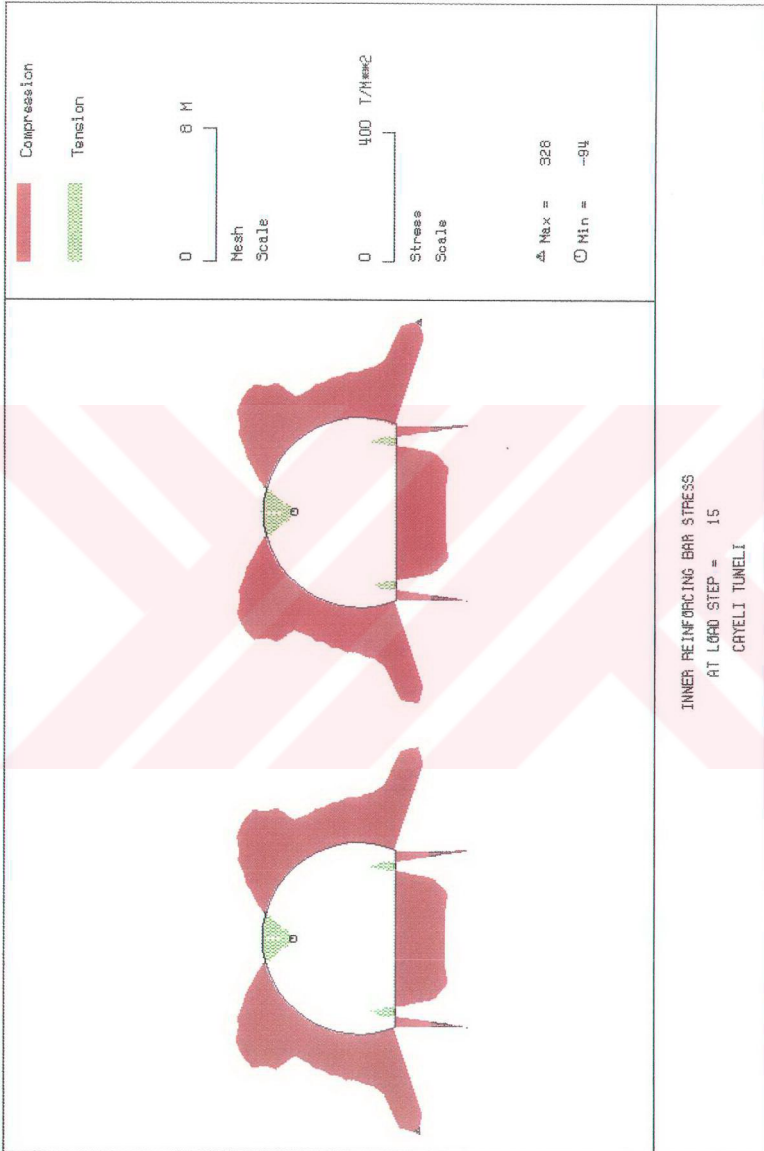




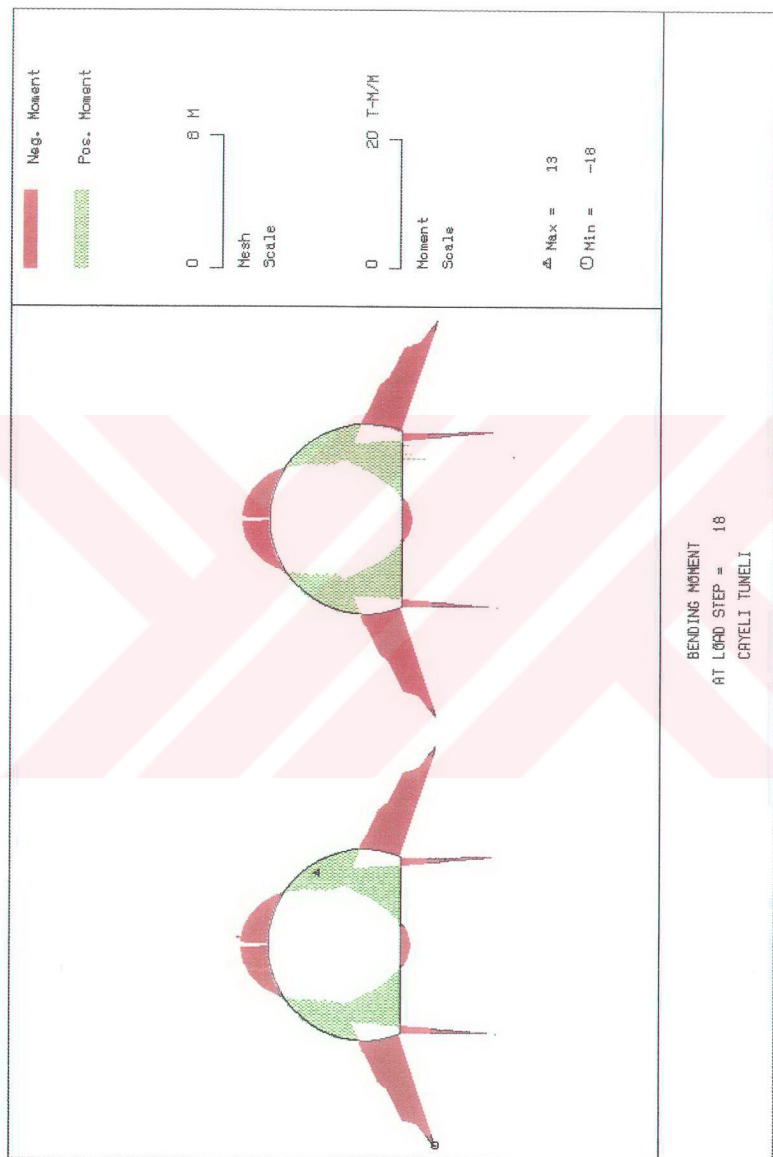














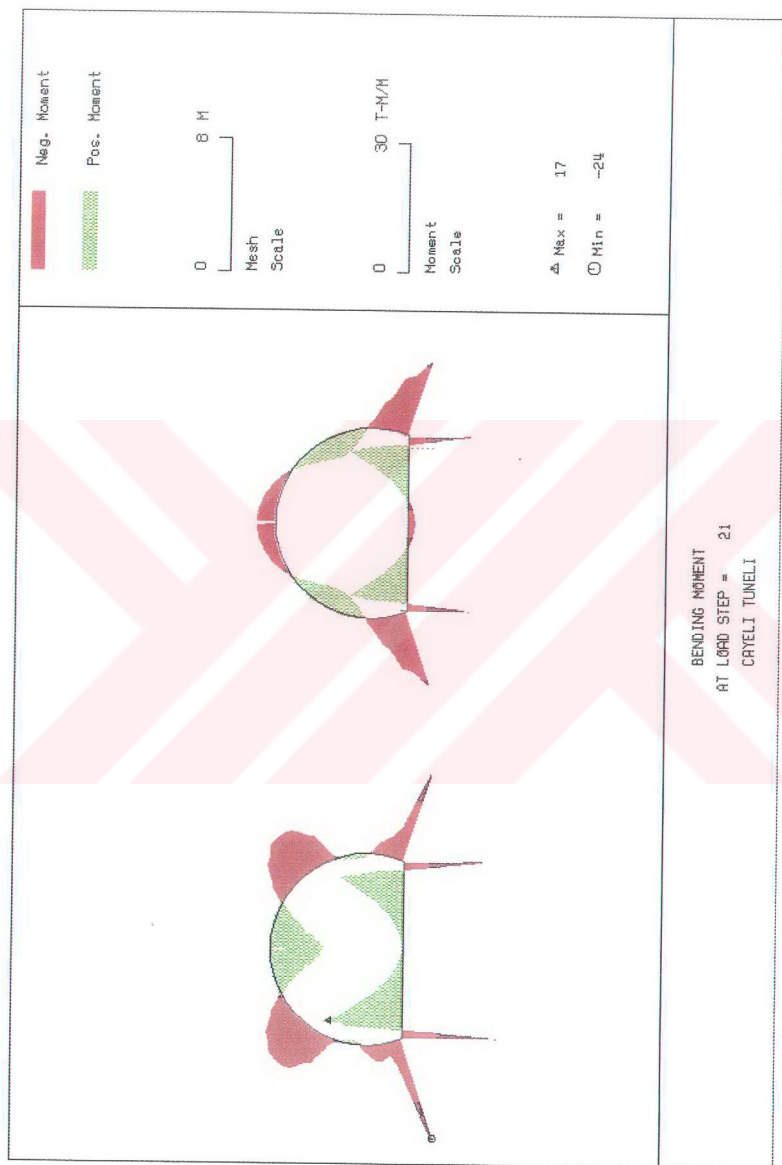














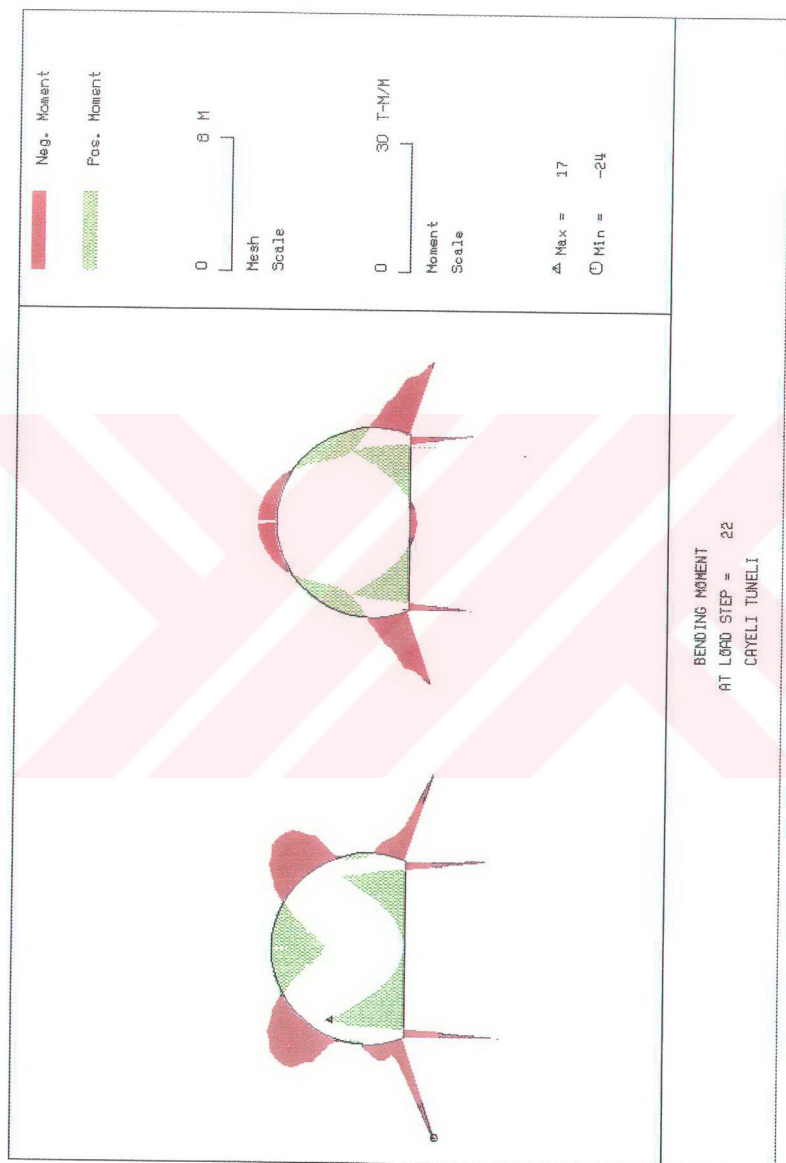




















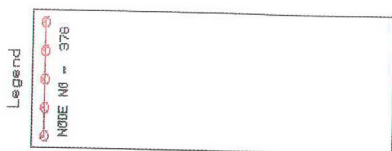
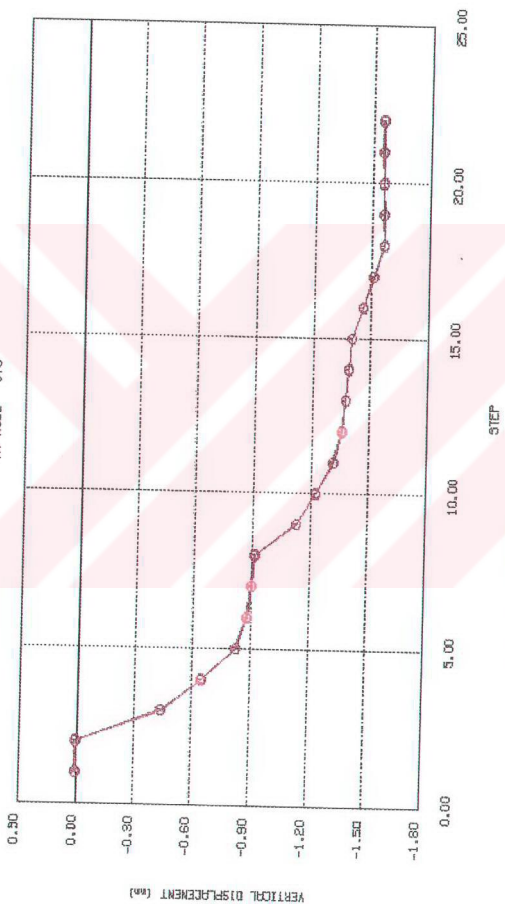




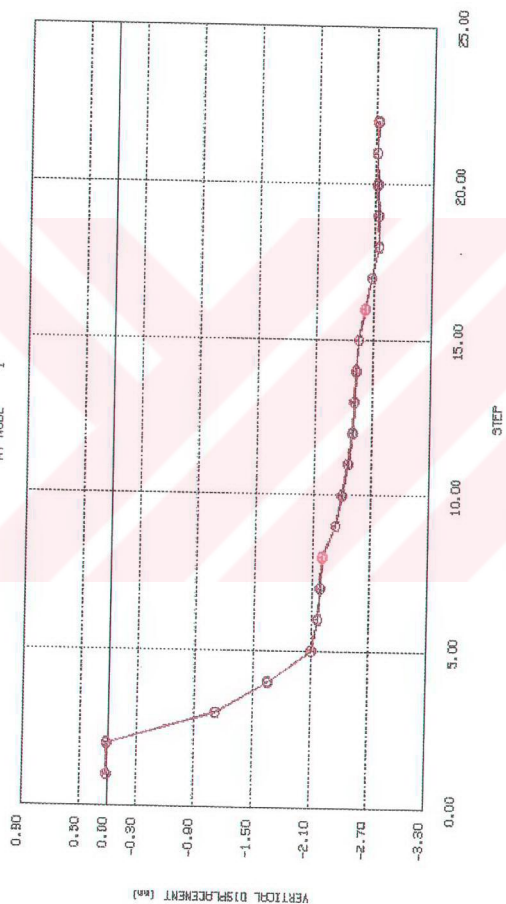
PLOT NO**TITLE**

1	DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 1 AT NODE 376
2	DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 2 AT NODE 1
3	DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 3 AT NODE 200
4	DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 4 AT NODE 14
5	DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 5 AT NODE 875
6	DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 6 AT NODE 1775
7	DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 7 AT NODE 1400
8	DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 8 AT NODE 1599
9	DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 9 AT NODE 2274
10	DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 10 AT NODE 1413

DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 1
AT NODE 376

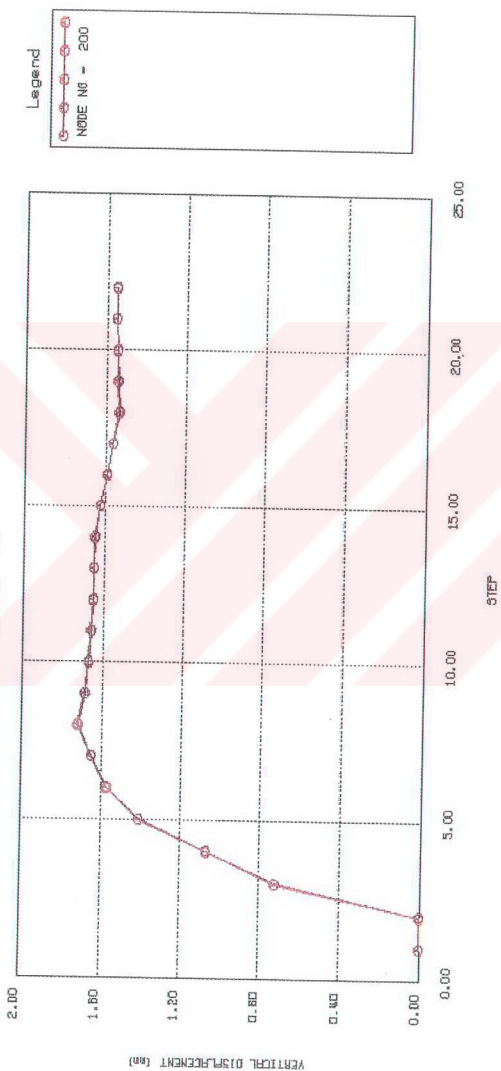


DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION # 2 AT NODE 1

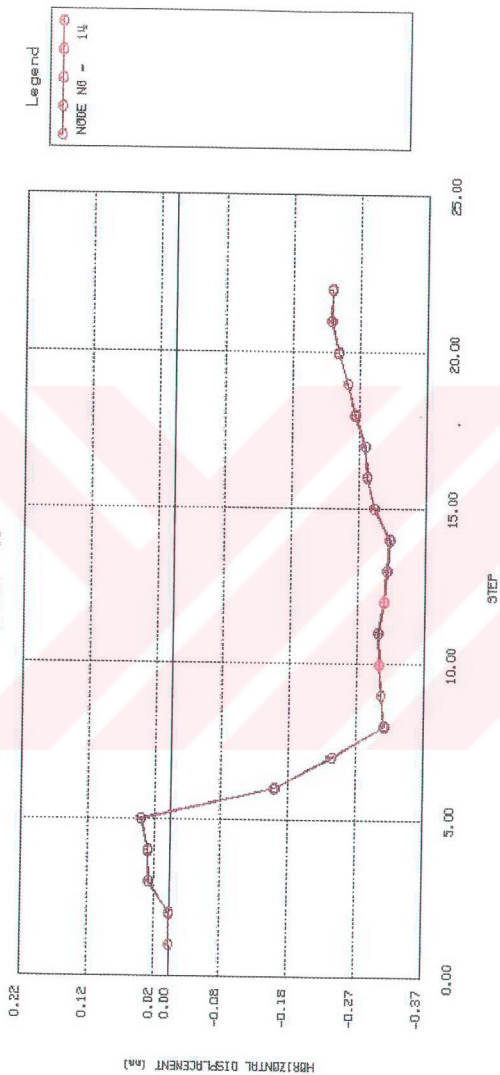


Legend
NODE NO 1

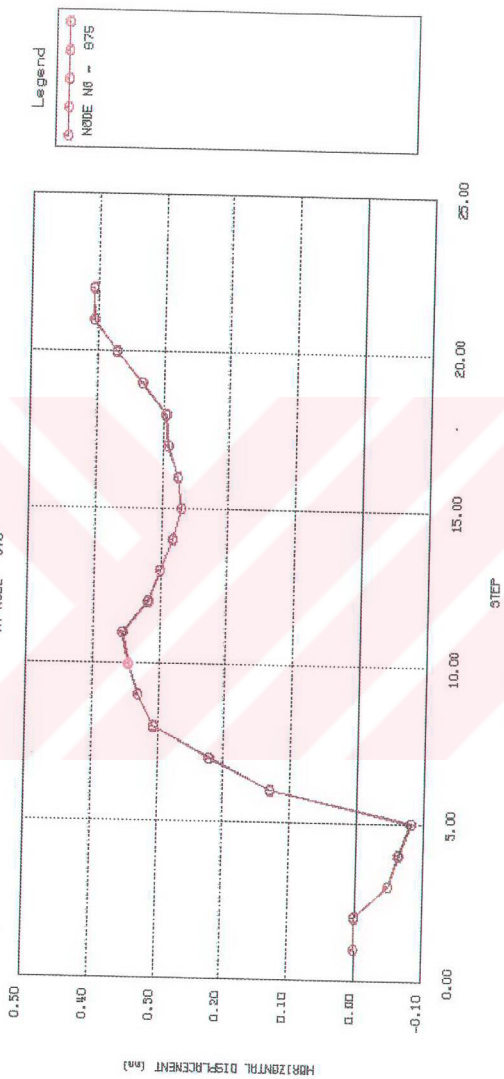
DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 3
AT NODE 200



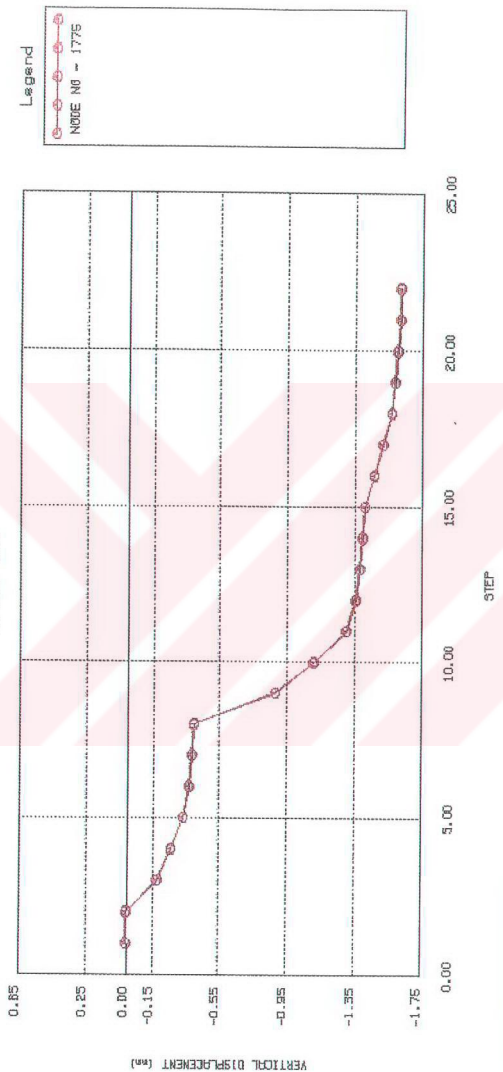
DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION , U
AT NODE 14



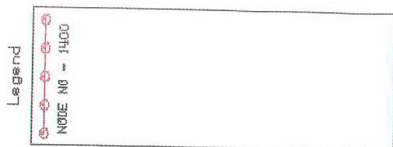
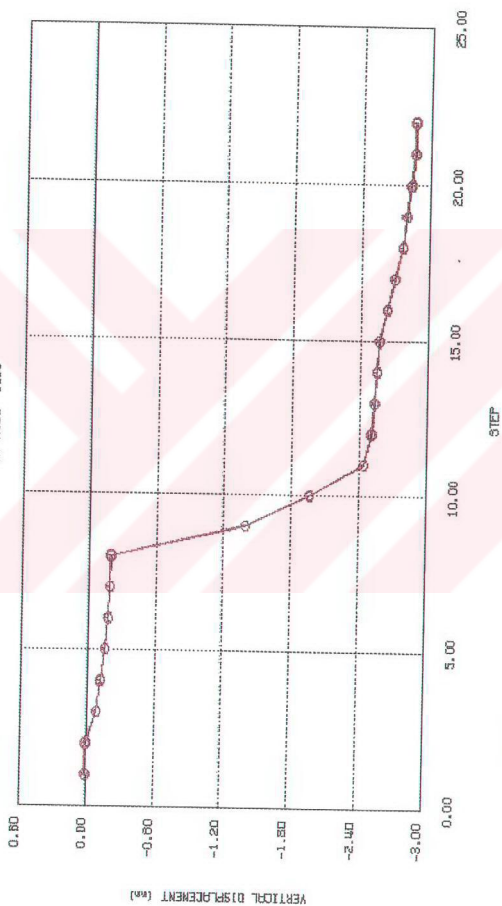
DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 5
AT NODE 875



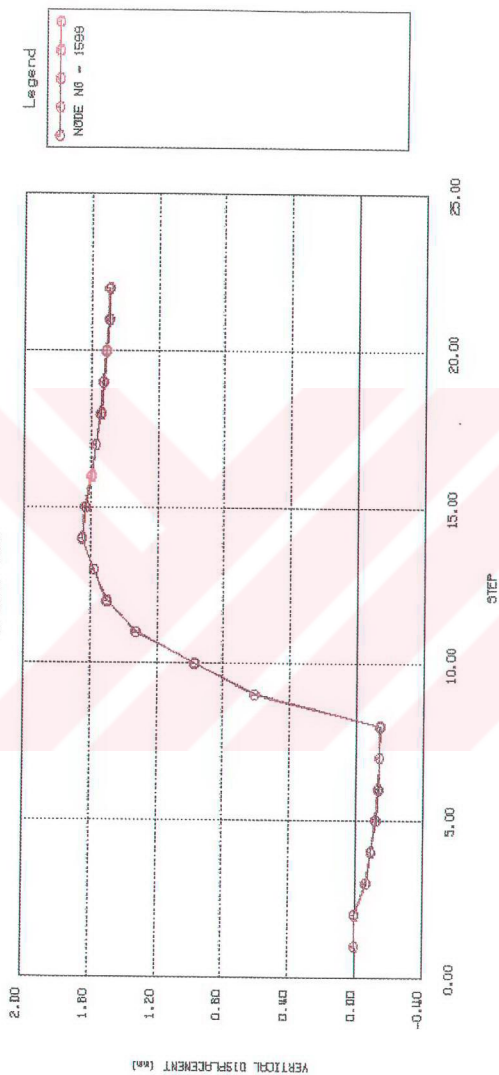
DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 6 AT NODE 1775



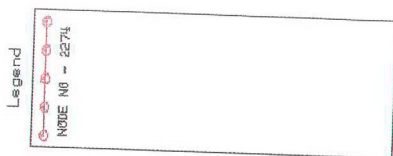
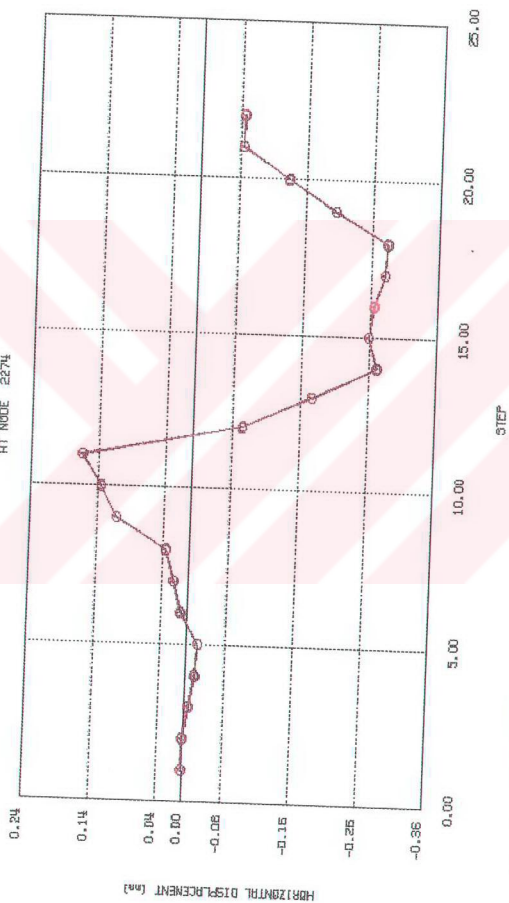
DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 7
AT NODE 1400



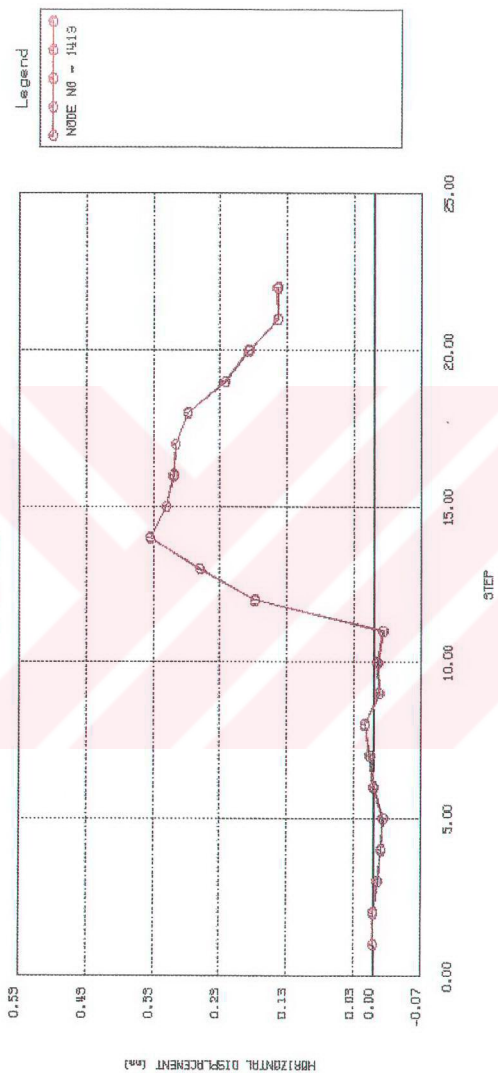
DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 8
AT NODE 1599



DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 9
AT NODE 2274



DISPLACEMENT HISTORY AT LOCATION : 10 AT NODE 1413



ÖZGEÇMİŞ

Halil KARAOĞLAN, 1976 yılında Balıkesir’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Balıkesir’de tamamladı. 1994 yılında Balıkesir Muharrem Hasbi Koray Lisesi’nden birincilikle mezun olduktan sonra yine aynı yıl İ.T.Ü İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1998 yılında İnşaat Mühendisliği ünvanı ile bu okuldan mezun oldu. Aynı yıl Geoteknik Anabilim Dalında yüksek lisans programına başladı. Halen özel bir şirkette proje yöneticisi olarak çalışmaktadır.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON BİRİMİ