

**SONLU ELEMENLAR METODU İLE TÜNEL MODELLEMESİ
VE BİR UYGULAMA**

Hüseyin KÖKÇÜOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2006
ANKARA**

Hüseyin KÖKÇÜOĞLU tarafından hazırlanan SONLU ELEMANTLAR METODU İLE TÜNEL MODELLEMESİ VE BİR UYGULAMA adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Recep KILIÇ _____

Üye : Prof. Dr. Nail ÜNSAL _____

Üye : Prof. Dr. Tekin GÜLTOP _____

Üye : Prof. Dr. Süleyman PAMPAL _____

Üye : Doç. Dr. Mehmet ORHAN _____

Tarih : 25/09/2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hüseyin KÖKÇÜOĞLU

**SONLU ELEMANLAR METODU İLE TÜNEL MODELLEMESİ
VE BİR UYGULAMA
(Yüksek Lisans Tezi)**

Hüseyin KÖKÇÜOĞLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 2006**

ÖZET

Sonlu elemanlar yöntemi, gerilme-şekil değiştirme analizinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada, tünelcilikte kaya kütle sınıflamaları ile tünelin projelendirme kriterleri açıklanarak, sonlu elemanlar yöntemi ile bir sayısal modelleme yapılmıştır. Fizibilite aşamasındaki Susurluk-Orhaneli Çayı Enerji projelerinden Deliballılar Barajı ve HES'in derivasyon tüneli uygulama yeri olarak seçilmiştir. Tünel güzergahındaki kayalar için EİE tarafından yapılan sondaj verilerine ve yüzeysel gözlemlere göre Q ve RMR jeomekanik kaya kütle sınıflamaları yapılmıştır. Tünelin sayısal modellemesi, sonlu elemanlar yöntemine göre çalışan Phase 2D adlı bilgisayar programı yardımı ile yapılmıştır. Analizlerde Mohr-Coulomb yenilme kriteri kullanılmış ve meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Uygulama projesi yapılırken ve inşaat aşamasına geçmeden önce laboratuvar çalışmalarının güncelleştirilmesi ve tünelin 3-D modellemesinin yapılması yararlı olacaktır.

Bilim Kodu : 911.1.050
Anahtar Kelimeler : Tüneller, modelleme, sonlu elemanlar
Sayfa Adedi : 83
Tez Yöneticisi : Prof.Dr. Nail ÜNSAL

MODELLING OF TUNNEL USING FEM AND A CASE STUDY
(M.Sc. Thesis)

Hüseyin KÖKÇÜOĞLU

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
September 2006

ABSTRACT

Finite elements method is a method that is widely used for stress-strain analysis. In this study, by explaining the tunnelling rock mass classifications and tunnel design criteria, numerical modelling has been implemented with finite element method. Deliballılar Dam and HPPs diversion tunnel, which is one of the Susurluk-Orhaneli Creek Power Projects at feasibility analysis stage, has been chosen as the application area. Q and RMR geomechanical rock mass classifications of the tunnel alignment have been done based on the drilling data and surface observations by EİE. Numerical modelling of the tunnel has been implemented by utilizing the Phase 2D software, which operates as per finite elements method. For the analysis, Mohr-Coulomb yield criterion have been applied and the resulting stress and strain have been calculated. Updating of the laboratory research and 3-D modelling of the tunnel during the execution design and prior to construction shall be useful.

Science Code : 911.1.050
Key Words : Tunnel, modelling, finite element method
Page Number : 83
Adviser : Prof.Dr. Nail ÜNSAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Sayın Prof. Dr. Nail Ünsal'a ve destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
HARİTALARIN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. TÜNELLER	2
2.1. Tünellerin Tarihçesi	2
2.2. Tünellerin Kullanım Alanları	4
2.3. Tünelcilikte Kaya Kütle Sınıflandırması	5
2.3.1. Terzaghi'nin kaya yükü sınıflaması	5
2.3.2. Kaya kalitesi katsayısı (RQD)	9
2.3.3. Kaya yapısı oranı (RSR)	11
2.3.4. Q kaya kütlesi sınıflama sistemi	12
2.3.5. Geomekanik sınıflama (RMR)	13
2.4. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ve Projelendirme Ölçütleri (NATM)	16
3. MODELLEMELER	26
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	32

Sayfa

4.1. Phases 2D Programı	36
5. UYGULAMA.....	41
5.1. Uygulama Yeri.....	41
5.2. Uygulama Yeri Karakteristikleri	43
5.3. Uygulama Alanı Jeolojisi	44
5.3.1. Uygulama alanında yapılan yüzeysel çalışmalar ve yer altı araştırmaları.....	44
5.4. Derivasyon Tünelleri.....	47
5.4.1. Tüneldeki kayanın kütle sınıflaması	50
5.5. Phases 2D Programı İle Modellemenin Yapılması	57
6. SONUÇ	65
KAYNAKLAR	67
EKLER	69
EK-1 Sondaj logları	70
ÖZGEÇMİŞ	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Terzaghi (1946) kaya yükü sınıflaması.	7
Çizelge 2.2. Modifiye edilmiş Terzaghi kaya yükü sınıflaması.	10
Çizelge 2.3. RMR'ye göre kaya sınıflaması	15
Çizelge 2.4. NATM ile Q ve RMR değerlerinin eşleştirilmesi	24
Çizelge 5.1. Uygulama yerinde yapılan sondajlar.	47
Çizelge 5.2. Derivasyon tüneli için hesaplanan Q değeri.....	53
Çizelge 5.3. Q kaya sistemine göre önerilen destek sistemleri önerileri	54
Çizelge 5.4. Derivasyon tüneli Q ve RMR kaya sınıflaması ilişkileri.....	54
Çizelge 5.5. RMR sınıflamasına göre tünel destek sistemleri önerileri	55
Çizelge 5.6. Derivasyon tüneli NATM kaya sınıflaması.....	56
Çizelge 5.7. NATM kaya sınıflaması destek sistemleri önerileri.....	56
Çizelge 5.8. Q ve RMR değerlerine göre deformasyon modül değeri.....	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Tipik sonlu eleman görünümü	27
Şekil 3.2. Sonlu eleman ve sınır elemanların birlikte kullanımı	28
Şekil 3.3. Ayrık eleman modeli ile birleştirilmiş sonlu eleman modeli	28
Şekil 5.1. Derivasyon tüneli tip kesiti	48
Şekil 5.2. Derivasyon tüneli boy kesiti	48
Şekil 5.3. Q kaya kütlesi sınıflandırma sistemi destekleme türleri	52
Şekil 5.4. Tünel kesitinin çizilmesi	58
Şekil 5.5. Tünel kesitinin bir sınır içine alınması	58
Şekil 5.6. Sonlu elemanların oluşturulması	59
Şekil 5.7. Oluşturulan sonlu elemanların ve düğüm noktalarının yakından görünüşü	60
Şekil 5.8. σ_1 asal gerilmeleri	61
Şekil 5.9. σ_3 asal gerilmeleri	62
Şekil 5.10. X yönündeki yer değiştirmeler.	63
Şekil 5.11. Y yönündeki yer değiştirmeler	64

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 5.1. Uygulama alanı yerbulduru haritası.....	42
Harita 5.2. Baraj yeri derivasyon tüneli güzergahına ait jeoloji haritası	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
B	Tünel taban genişliği
c	Kohezyon
De	Eşdeğer boyut
δ	Dilatasyon açısı
Φ	İçsel sürtünme açısı
Hp	Kaya yükü (metre cinsinden)
Ht	Tünel yüksekliği
Ja	Çatlak yüzeyinin durumu
Jn	Çatlak takım sayısı
Jr	Çatlak pürüzlülük sayısı
Jw	Çatlak suyu azaltma faktörü
m,s	Amprık kaya sabiti
Pb	Siyah renkli mermer
Pgş	Grafitli mikaşist
Pkş	Kalkşist
Pş	Şist
Qal	Alüvyon
Qym	Yamaç molozu
σ_1	En büyük düzlemsel asal gerilme
σ_3	En küçük düzlemsel asal gerilme
σ_c	Eksenel olmayan sıkıştırma kuvveti
Srf	Gerilme değişim faktörü

Kısaltmalar**Açıklama****BST**

Basıncılı su testi

EİE

Elektrik İşleri Etüt İdaresi

ESR

Kazı destek oranı

FEM

Sonlu elemanlar metodu

HES

Hidroelektrik Santral

NATM

Yeni Avusturya Tünel Metodu

NGİ

Norveç Geoteknik Enstitüsü

RCC

Silindirle sıkıştırılmış beton

RMR

Kaya kütlesi oranı

RQD

Kaya kalitesi derecesi

RSR

Kaya yapısı oranı

1. GİRİŞ

Tüneller, geometrilerinin ve üstlerine gelen yüklerin karmaşıklığı, kaya ve kaplama malzemelerinin özellikleri ve karşılıklı etkileşimleri nedeniyle projelendirmesi oldukça güç yapılardır.

Bu özelliklerinden dolayı çeşitli kaya kütle sınıflama sistemleri, tünel açma, sayısal analiz ve modelleme yöntemleri geliştirilmiştir.

Sonlu elemanlar sayısal analiz metodu tünel hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir.

Bu çalışmada ikinci bölümde tünellere genel bir giriş yapılarak, kaya kütle sınıflama sistemleri ile tünellerin projelendirme kriterleri verilmiştir. Üçüncü bölümde modellemeler ve dördüncü bölümde ise sonlu elemanlar yöntemi hakkında bilgilendirme yapılmıştır. Beşinci bölümde sonlu elemanlar yönteminin uygulaması Susurluk-Orhaneli çayı Deliballılar Barajı derivasyon tüneli üstünde Phases 2D programı kullanılarak yapılmış ve de elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. TÜNELLER

Tünelcilik literatüründe yeraltında yatay yada eğik olarak açılan, giriş ve çıkışı olan yapılara tünel, bir tarafı açık olanı galeri, dik olarak yapılan kazılara shaft, tünelin üstünde bulunan birime örtü ve bunun kalınlığına ise örtü kalınlığı ismi verilmektedir.

2.1. Tünellerin Tarihçesi

İnsan elinin değmediği pek çok dehliz ve mağara örnekleri vardır. Bunların arasında deniz sularının etkisi ile meydana gelenler olduğu gibi, arazinin yüksekte kalan kısımlarını delerek bunların altından geçmek suretiyle yataklarını değiştirmiş akarsuların etkisi ile karstlanma sonucu meydana gelenlere de rastlanmaktadır. İskoçyadaki Hebrides takım adalarında bulunan Fingal mağarası bunlardan birincisine karakteristik bir örnektir. 20 m yükseklik ve 70 m uzunluğundadır. Düden, Dumanlı, Damлатаş, İnsuyu, Cennet-Cehennem mağarası akarsuların açtığı dehliz ve mağaralara örnek oluşturur.

Mağara ve dehlizlerin açılması akarsu veya yer altı suyunun etkileri ile zeminin dağılması veya suların kireçtaşı tabakalarını eritmesi suretiyle uzun zamanda meydana gelmiştir. Çeşitli etkiler ile (daha çok yer sarsıntıları olduğu zaman) yer altı suları çatlaklarda ilerleyerek kireçtaşı tabakalarının boşluklarında toplanır. Zamanla kireçtaşını eriten bu sular kayacın daha kolay eriyen kısımlarına doğru ilerler. Çatlaksız ve suda erimeyen bir kayaç tabakası ise bu ilerlemenin yatay yönde olmasını sağlar.

Bu dehliz ve mağaralardan faydalanan ilk insanların, daha kullanışlı ve güvenli bir duruma getirmek için bunları genişlettikleri, ilerlettikleri ve sağlamlaştırdıkları ve doğal dehlizlerin bulunmadığı yerlerde bunlara benzetmek suretiyle küçük çapta bir takım dehlizler açtıkları söylenebilir.

Mısır Firavunları, Teb, Nübi Krallıkları, Amerika Aztekleri gibi çok eski uygarlıklardan kalma bu şekilde yapılar vardır. Özellikle Mısır ve Hindistan'daki mezar ve tapınakların girişleri bu tipte olan en eski kalıntılardır

Kagir kaplamalı ilk tünel örneğinin M.Ö.200 yıllarında olduğuna dair kalıntılar vardır. Fırat Nehri altında açılmış olan bu tünel tuğla kaplamalı ve kemerlidir. Nehrin 200 m. genişliğindeki bir yerinde olup, aşağı yukarı 3.80 m. genişlik ve 4.8 m. yüksekliğinde olup uzunluğu 960 m' yi bulmaktadır. Kurak mevsimde derivasyon yapmak, bir yarma açarak radye, kenar ayaklar ve kemer örüldükten sonra üstünü kapatmak ve nehri eski yatağına vermek suretiyle inşa edilebildiği sanılmaktadır [1].

Daha sonra galeri açmanın bir savaş tekniği olarak da kullanıldığı görülmektedir.

Mısırlılar ve Romalılar da çoğunlukla su getirmek amacıyla tüneller açmışlardır.

Yunanlılar zamanında ilk tünelin M.Ö. 687 de Sakız adasında açılmış olduğu tespit edilmiştir. Bu, bir galeri olup yüksekliği 0.6 m, uzunluğu ise 1600 m dir [1].

Bütün bu tünellerin açılmasında uygulanan yöntemler çok ilkel olmuştur.1556 tarihinde Georg Bauer tarafından yazılan De Re Metallicas Georg adlı eserde izah edilen Agricola alias yapısındaki metot uzun zaman kullanılmış olan tünel açma usulünü göstermekte olup yaklaşık olarak 350 yıl içinde yer altı inşaatında kullanılmıştır.

Barutun icadından sonra birçok alanda önemli gelişmeler olmasına karşı tünelcilik uzun zaman bundan faydalanamamıştır. XVII. yy. da gelişmeye başlayan kanal taşı tünelcilikte önemli bir aşama meydana getirmiştir.1803-1810 tarihleri arasında Fransa'da Saint – Quentin kanalı için açılan ilk taş

kemerli Tronquoy – en Bony tüneli ile 1824 te Bourgogne kanalı için açılan Pouilli tüneli söylenebilir.

Tünel açma yöntemlerinde önemli bir gelişme 1823 – 1843 yılları arasında Times nehri altında açılan tünel sırasında oldu. Fransız mühendisi Brunel'in patentini aldığı Bukliye metodu ilk defa burada uygulanmıştır. Bu 4.20 m ve 4.80 m çaplarında bir ikiz tünel olup halen hizmet vermektedir [1].

Yine bu dönemde Lord Cohrane' da sulu zeminlerde kuyu ve galeri açmak için basınçlı havadan faydalanma yöntemine ait patentini 1830 tarihinde almıştır.

Büyük tünellerin sayısının artması demiryollarının gelişmesiyle beraber olmuştur. Demiryollarında uygulanan eğimlerin küçük, yarıçaplarının ise büyük olması nedeniyle önemli tünellerin açılması zorunlu olmuştur. İlk demiryolu tünelinin 1826 da Fransa'da St. Etienne-Tere Noire hattı üzerinde açılmış olduğu iddia edilmektedir.

Günden güne trafik yoğunluğunun artmasıyla işletme ekonomisi bakımından karayolu tünel inşaatı önem kazanmıştır. Özellikle A.B.D. , Fransa, İtalya ve Almanya'daki modern otobanlarda uzun tüneller açılmıştır.

2.2. Tünellerin Kullanım Alanları

Tüneller çok değişik maksatlar için inşa edilirler, kullanılış amaçlarına göre sınıflandırılması aşağıdaki gibidir:

1. Ekonomik mineral ve maden yataklarına ulaşma maksadı ile açılan tüneller

2. Ulaştırma maksatlı açılan tüneller, bunlar :

- Yayalar için geçiş tünelleri,

- Karayolu tünelleri,
- Denizcilik maksatlı açılan tüneller,
- Demiryolu tünelleri
- Şehiriçi toplu taşıma için açılan tüneller

3. Su tünelleri

Su nakli amacıyla basınçlı veya basınçsız olarak yapılır.

4. Askeri maksatlı tüneller

Bu tip tüneller askeri hareketler ve maksatlar için inşa edilirler.

5. Yer altı boşluklarına ulaşmak için açılan tüneller

Bu tip tüneller Baraj ve HES santral inşaatlarında fazlaca açılır. Araştırma, derivasyon, drenaj, kuvvet tünelleri ile su alma yapıları için şaft ve tüneller, denge bacaları, kablo ve servis tünelleri ile türbin, ekipman vb. maksatlar için açılan tüneller bu gruba girerler.

6. Nükleer savaşta savunma amacıyla açılan tüneller.

7. Haberleşme nakil hatları, gaz nakilleri vb. maksatlar için açılan tüneller.

2.3. Tünelcilikte Kaya Kütle Sınıflandırması

2.3.1. Terzaghi'nin kaya yükü sınıflaması

Terzaghi (1946) tarafından önerilen kaya yükü sınıflaması, bu konuda yapılmış ilk ayrıntılı sınıflama olarak tarihsel bir önem taşır. Terzaghi, kayaları ve bunlardan beklenen yükleri sınıflandırmış ve kayalarda açılan tünellerde gerekli destek önlemleri, bu sınıflandırmaya dayanarak yapılmıştır (Çizelge

2.1). Bu sistem, 50 yıl süreyle çelik desteklerin tünel kazılarında yaygın şekilde kullanılmış olması nedeniyle, önemli bir gelişme olarak kabul edilmiş ve uygulanmıştır. Bu sınıflama, tünellerde çelik destek tasarımı için uygun olmakla beraber, püskürtme beton, kaya saplaması ve çelik hasır kullanımını beraberinde getiren modern tünelticilik yöntemleri için uygun bir sistem değildir.

Terzaghi, Alp dağlarındaki demiryolu tünellerinde kullanılan çelik desteklerle ilgili deneyimini ve gözlemlerini esas alarak önerdiği destek sisteminde çeşitli kaya türleri ve bunlar için değişik kaya yükleri tanımlamıştır. Terzaghi 'nin önerdiği modele göre, tünel kazısı sırasında tünelin çevresinde ve üzerinde kaya kütlesi içindeki kenetlenmenin derecesi zayıflamaktadır [2].

Çizelge 2.1' deki Terzaghi'nin verdiği bu değerlerde B tünelin taban genişliği, Ht tünelin yüksekliği ve Hp metre cinsinden kaya yükünü ifade etmektedir. Bu sınıflama tünelin $1,5(B+Ht)$ dan daha derinde açılması halinde kullanılabilir. Ayrıca Tünel tavanının yeraltı suyu seviyesinin altında bulunduğu varsayılmıştır. Eğer tünel yeraltı suyu seviyesinin üzerinde ise, 4, 5, 6 numaralı sınıflar için verilen kaya yükü değerleri % 50 azaltılabilir [2].

Daha sonra Terzaghi sınıflama sisteminde bazı değişiklikler yapılmıştır. RQD kavramı da sisteme dahil ederek bu sistem modifiye edilmiştir.

Çizelge 2.1. Terzaghi (1946) kaya yükü sınıflaması [2]

Sınıf No	Kayacın Özellikleri	Açıklama	Kaya yükü H_p (m)	Destek
1	Sağlam ve Çatlaksız	Mağmatik kayalar, tabaka kalınlığı tünel boyutunun yanında önemsiz kalan sedimanter kayalar.	0	Eğer parçalanma ve patlama oluyorsa, sadece hafif kaplama gereklidir.
2	Sağlam tabakalı veya şistozite yüzeyli	Seyrek eklemli ve çatlaklı sedimenter kayalar, çok hafif metamorfizma geçirmiş şistler.	0-0.5B	Ayrılmalara karşı koruyucu önlem olarak hafif kaplama
3	Tabakasız, orta derecede eklemli	mağmatik, metamorfik sedimanter kayalar: orta derecede eklemli ve çatlaklı, çatlaklar arasında kuvars ve kalsit gibi bağlayıcılar iyi, kil kötü yönde etkir.	0-0.25 B	Hafif Destek (Yük, bir noktadan diğerine ani olarak değişebilir.)
4	Parçalı ve çatlaklı	Makaslama ve fay zonlarının yakınında ortalama 10 cm ' den büyük aralıklı eklemli, çatlaklı ve parçalı kayalar.	0.25 B - 0.35 (B+Ht)	Yanal basınç yok.
5	Çok parçalı ve çatlaklı	Makaslama ve fay zonlarında 10 cm ' den ufak aralıklı , çok parçalı, çatlaklı kayalar.	(0.35 - 1.10) (B+ Ht)	Yanal basınç yok veya çok az
6	Tamamen parçalanmış, ancak kimyasal yönden ayrışmamış	Tamamen parçalanmış, sıkışmamış, kohezyonu çok az, ince taneli hale gelmiş veya kimyasal ve fiziksel etkilerle belirli bir sürede bu hale gelebilen kayaç.	1.10(B+Ht)	Önemli miktarda yan basınç. Tünelin tabanına doğru sızıntı etkisiyle yumuşama, sürekli destek gerektirir (daireseel destek)
7	Sıkışabilen kaya (orta derinlikte)	Killer ve kil minerallerini içeren kayalar.	(1.10-2.10) (B+Ht)	Çok fazla yan basınç, kaplama gerekir. Dairesel destek önerilir.
8	Sıkışabilen kaya (çok derinde)	Az şişen killer (kaolen mineralli)	(2.10 - 4.50) (B+ Ht)	Çok fazla yan basınç, kaplama gerekir. Dairesel destek önerilir.
9	Şişen	Çok şişen killer (montmorillonit, bentonit vb.)	450(B+Ht)-75m	Dairesel destek gereklidir. Daha kötü durumlarda esnek destek kullanılır.

Kilden türemiş kayaçlar (kiltası, silttaşı, şeyl, şist), sıkılaşıma, çimentolanma ve metamorfizma derecesine bağlı olarak, 2 ile 9 no ' lu sınıflar arasında değişim gösterebilirler.

Sağlam ve çatlaksız kaya kütlesi: Sağlam kayaç malzemesi, süreksizlik veya kılcal kırıklar içermez. Bu nedenle yenilme, sağlam–taze kayaç boyunca gelişir. Patlatmadan dolayı kayaçta oluşan ayrılmalar (kavaklanmalar), patlamayı izleyen uzun saatler veya günler sonra tavandan düşebilir. Bu tür kayaçlar, kaya patlaması olarak adlandırılan ve kaya parçalarının veya dilimlerinin ani ve şiddetli şekilde tavandan tünel içine düştüğü ortamlarda da kendini gösterebilir.

Sağlam, tabakalı veya şistozite yüzeyleri içeren kaya kütlesi: Bu tür kayaçlar, tabaka düzlemleri arasındaki yüzeyler boyunca ayrılmaya karşı çok az direnç gösteren veya hiç göstermeyen münferit tabakalı kayaçlardır. Tabaka, kendisini verev yönde kesen eklemler tarafından zayıflatılmamış olabilir. Bu tür kayaçalarda ayrılma türü davranış oldukça yaygındır.

Orta derece eklemlili kaya kütlesi: Bu kaya türü, eklemleri ve kılcal çatlakları içerir. Ancak eklemler arasındaki bloklar birbiriyle oldukça kenetlenmiş bir konumda olup, tünelin yan duvarları desteklenmeyi gerektirmez. Bu tür kayaçalarda hem kavaklanma, hem de kaya patlaması ile karşılaşılabilir.

Parçalı (bloklu) ve çatlaklı kaya kütlesi: Kimyasal olarak ayrışmamış, sağlam, birbirlerinden tamamen ayrılmamış ve iyi bir şekilde kenetlenmemiş kaya parçalarının oluşturduğu bir kaya kütlesi türüdür. Bu tür kaya kütlelerinde oluşturulan düşey aynalarda (duvarlarda) destek gerekir.

Parçalanmış kaya kütlesi: Parçalanmış, ancak kimyasal olarak ayrışmamış sağlam kayaç parçalarını içeren bir kaya külesidir. Parçacıkların çoğu veya tümü ince kum tanesi kadar küçükse ve herhangi bir yerinden çimentolanma

söz konusu değilse, bu tür kayaç, yer altısuyu tablasının altında su içeren bir kum malzemesinin özelliklerini taşır.

Sıkışabilen kaya kütlesi: Bu tür malzemeler, fark edilebilir bir hacim artışı göstermeksizin, tünelin içine doğru yavaşça hareket ederler. Sıkışma için ön koşul; düşük şişme kapasiteli, fazla miktarda mikroskopik ve yarı mikroskopik mika minerallerinin veya kil minerallerinin varlığıdır.

Şişen kaya kütlesi: Bu tür malzemeler, tünel boşluğuna doğru önemli miktarda genişleme deformasyonu gösterirler. Montmorillonit gibi şişme kapasitesi yüksek kil minerallerini içeren kayaçlarda şişme oldukça fazladır.

Bu sınıflama sistemi, sadece çelik destek kullanılan tüneller için geliştirilmiş olup, destek tarafından taşınacak yüklerin tahmininde kullanılmaktadır.

2.3.2. Kaya kalitesi katsayısı (RQD)

RQD kavramı, Deer vd. (1964) tarafından önerilmiş ve silindirik şeklini koruyan, doğal süreksizlikler tarafından bölünmüş sağlam kayaç karot parçaları arasında boyu 10 cm ve daha uzun olanların toplam uzunluğunun kademe ilerlemesine oranıdır şeklinde ve yüzde olarak ifade edilmiştir [3]. RQD, kaya kalitesinin tanımında ve tünelcilik amaçlı kaya kütle sınıflamalarından Q ve RMR de kullanılmaktadır. Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği, I tipi elmas uçla yapılan sondajda elde edilen karotun en az NX çaplı (5,5 cm) olmasını önermiştir [3].

RQD ile kaya kalitesi arasındaki ilişki Deer (1964) tarafından aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

<u>RQD %</u>	<u>KAYA KALİTESİ</u>
<25	Çok zayıf
25 – 50	Zayıf

50 -75	Orta
75 -90	İyi
90 -100	Çok iyi (mükemmel)

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

RQD çabuk ve kolay öğrenilebilen bir özellik olmasına karşılık, eklem yönelimi, sıklık, eklem pürüzlülüğü ve dolgusu gibi özelliklerin tanımlanması için yeterli değildir.

Çizelge 2.2. Modifiye edilmiş Terzaghi kaya yükü sınıflaması [4]

Sınıf No	Kaya Kütlesi Özelliği	RQD(%)	Kaya yükü Hp (m)	Açıklamalar
1	Sağlam ve Çatlaksız	95 - 100	0	Terzaghi (1946) daki gibi
2	Sağlam, tabakalı veya şistozite yüzeyleri içeren	90 - 99	0- 0.5 B	Terzaghi (1946) daki gibi
3	Masif, orta derecede eklemli	85 - 95	0-0.25 B	Terzaghi (1946) daki gibi
4	Parçalı (bloklı) ve çatlaklı	75 - 85	0.25B- 0.20 ((B+Ht)	4,5,6 nol ' lu kaya türleri için kaya yükü değerlerinde yaklaşık % 50 azaltma uygulanır. Çünkü yeraltısuyu tablasının kaya yükü üzerinde çok az etkisi vardır. (tünel su tablası üzerinde ise)
5	Çok bloklı ve çatlaklı	30 - 75	(0.20-0.60) (B+Ht)	
6	Tamamen parçalanmış ancak kimyasal anlamda ayrışmamış	3 - 30	(0.60-1.10) (B+Ht)	
6 a	Kum ve çakıl	0 - 3	(1.10- 1.40) (B+Ht)	
7	Sıkışabilen kaya (orta derinlikte)	Ua	(1.10- 2.10) (B+Ht)	Terzaghi (1946) daki gibi
8	Sıkışabilen kaya (çok derinlikte)	Ua	(2.10-4.50) (B+Ht)	Terzaghi (1946) daki gibi
9	Şişen kaya	Ua	250 ft ' in (80m) üzerinde (B+Ht)'nin değerine bakılmaksızın	Terzaghi (1946) daki gibi

Ua ; RQD uygulanmaz

2.3.3. Kaya yapısı oranı (RSR)

RSR (Rock Structure Rating), 1972 yılında Wickham, Tiedemann ve Skinner tarafından geliştirilen bir kaya destek tahmin sınıflamasıdır [3]. RSR, Terzaghi'nin kaya yükü sınıflamasından sonraki ilk ayrıntılı sınıflamadır. RSR kavramı tünelcilikte kaya kütlesini etkileyen jeolojik parametreler ve yapı parametreleri göz önüne alınarak oluşturulmuştur [3].

Jeolojik parametreler,

- a) Kaya tipi,
- b) Eklem sayısı,
- c) Eklemlerin yönelimi (doğrultu ve eğim),
- d) Süreksizliklerin tipi
- e) Büyük faylar makaslamalar ve kıvrımlar,
- f) Kaya gereç özellikleri,
- g) Ayrışma ve bozuşma

Yapı parametreleri,

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

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

$RSR=A+B+C$ dir.

A, kaya yapısına bağlı bir parametredir. Kayanın kökeni (magmatik, metamorfik, tortul), kayanın sertliği (sert, orta, yumuşak, ayrılmış), jeolojik yapıya (masif, az faylı yada kıvrımlı, orta derecede faylı yada kıvrımlı, çok faylı yada kıvrımlı) bağlıdır.

B, Tünel kazısı yönüne göre süreksizliğin etkisidir. Eklem aralığı, eklem yönelimi (doğrultu, eğim) ve tünel açma yönüne bağlıdır.

C, Yer altı suyu akımı etkisidir. Kaya kütlesi niteliği, eklem durumu (iyi, orta, zayıf), su akım miktarına bağlıdır.

2.3.4. Q kaya kütlesi sınıflama sistemi

Q veya NGI (Norwegian Geotechnical Institute) sistemi olarak bilinen bu sistem, Barton vd. (1974) tarafından geliştirilmiştir [5]. Sistem uzun yıllar kullanıldıktan sonra, sistemin destek sistemlerinin seçimine yönelik bölümü Grimstad ve Barton (1993) tarafından revize edilmiştir [6].

Bu sisteme göre hesaplanması gereken Q değeri için 6 parametrenin saptanması gereklidir. Bunlar;

- 1) Kayaç Kalite Katsayısı (RQD)
- 2) Çatlak Takım Sayısı (J_n)
- 3) Çatlak Pürüzlülük Katsayısı (J_r)
- 4) Çatlak Yüzeyinin Durumu (J_a)
- 5) Çatlak Suyu Azaltma Faktörü (J_w)
- 6) Gerilme Değişim Faktörü (SRF)'dir.

Bu parametrelerin sayısal karşılıkları belirlenir ve aşağıdaki formül yardımıyla Q kaya kütlesi niceliği hesaplanır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

Bu eşitlikte, (RQD/J_n) oranı göreceli (relatif) olarak kaya bloklarının boyutlarını, (J_r/J_a) oranı görece olarak sürtünme dayanımını, (J_w/SRF) oranı

ise görece olarak suyun, fayların, dayanım-gerilim oranının, sıkışma veya şişmenin (kabarmanın) etkisini temsil etmektedir.

Barton ve diğerleri (1974) tarafından verilen Q kaya kütlesi tanımlama sisteminde Q değerlerine bağlı olarak 9 kaya kütlesi tanımlanmıştır. Bunlar;

- Olağanüstü iyi kayaç ($Q = 400 - 1000$) – (A1)
- Son derece iyi kayaç ($Q = 100 - 400$) – (A2)
- Çok iyi kayaç ($Q = 100 - 40$) – (A3)
- İyi kayaç ($Q = 10 - 40$) – (B)
- Orta kayaç ($Q = 4 - 10$) – (C)
- Zayıf kayaç ($Q = 1 - 4$) – (D)
- Çok zayıf kayaç ($Q = 0.1 - 1$) – (E)
- Son derece zayıf kayaç ($Q = 0.01 - 0.1$) – (F)
- Olağanüstü zayıf kayaç ($Q = 0.01 - 0.001$) – (G)'dir.

2.3.5. Geomekanik sınıflama (RMR)

Bieniawski (1973) tarafından geliştirilen Geomekanik sınıflama, kaya kütlesinin mühendislik verilerini saptamaya yarayan bir yöntemdir [7]. Bu yöntem tüneller, büyük yapı temelleri, şev yamaçları ve yer altı inşaatında uygun kaya destek önlemlerinin seçiminde kullanılmaktadır. Geomekanik sınıflama yöntemi, altı parametreye dayandırılmaktadır. Bu parametreler:

- 1- Kayanın tek eksenli basma dayanımı
- 2- Sondaj karotlarından elde edilen RQD değerleri
- 3- Eklem sıklığı
- 4- Eklemlerin durumu
- 5- Yer altı suyu gözlemleri
- 6- Eklemlerin yönelimi

RMR Sınıflama Sistemi; başta tünel, galeri, yeraltı odaları gibi yeraltı açıklıklarının kazısı olmak üzere, çok sayıda alanda uygulanmaktadır. Bu kaya kütlesi sınıflama sisteminden başlıca üç önemli veri elde edilmektedir [8].

Tüm jeolojik parametrelerin ortaklaşa etkisini yansıtan ve kaya kütlesinin genel koşullarıyla ilişkili "kaya kütlesi kalitesi" elde edilen verilerin başında gelmektedir. Bu veri, çalışılan alan genelinde kaya kütlesi koşullarının karşılaştırılmasına veya kaya kütlelerinin "çok iyi kaya"dan "çok zayıf kaya"ya kadar tanımlanarak, farklı kalitedeki kaya kütlelerinin sınırlarının belirlenip belgelendirme haritalarının veya kesitlerinin hazırlanmasına olanak sağlamaktadır.

Bu sınıflama sisteminden elde edilen diğer önemli bir veri de, bir kılavuzdan yararlanılarak kaya kütlesi kalitesi ve kazı yöntemine göre ön tasarım amacıyla destek türlerinin seçimidir. Sistem, bu kılavuzla birlikte her kaya sınıfı için; kaya yükü, desteksiz kalma süresi, desteksiz açıklık boyutu vb. gibi parametrelerin tahminine olanak sağlamaktadır.

RMR sistemi'nin sağladığı olanaklardan biri de, RMR puanının kullanılarak kaya kütlesinin bazı mühendislik özelliklerinin tahmin edilebilmesidir.

Q sınıflamasında, destek elemanlarının Q değeri aralığına bağlı olarak verilen açıklıklarda uygulanmasını öngörmekte, ancak tünelin "desteksiz durma süresine" ilişkin ayrıntılı veri içermemektedir. Her ne kadar Bieniawski, Q değerine ve açıklığa bağlı olarak desteksiz durma süresine özgü kimi çalışmalar yapmışsa da, anılan çalışmaların sonuçları uluslararası bilimsel ortamda pek uygulama olanağı bulamamıştır. Bu nedenle RMR sınıflamasının kazının desteksiz durma süresine ilişkin özelliğinden yararlanmak analitik çözümlemelerde zorunlu olmaktadır. Üstelik analitik çözümlemelerde kullanılan fiziksel parametreler RMR değerlerine bağlı olarak geliştirilen formüllerle ayrıca hesap edilebilir. Bunlara bağlı olarak tünel

tasarımlarında, Q ve RMR ampirik kaya sınıflamaları birbirlerini bütünler biçimde birlikte kullanılmaktadır [9].

Q ve RMR değerleri arasında, Bieniawski (1989) ve Barton (1993 ve 2002) tarafından ayrı ayrı ilişki belirlenmiştir [4,6,10]. Bu ilişkiler;

$$RMR \approx 9 \ln Q + 44 \text{ (Bieniawski, 1989)} \quad Q \approx e^{\frac{(RMR - 44)}{9}}$$

$$RMR \approx 15 \log Q + 50 \text{ (Barton, 1993 - 2002)} \quad Q \approx 10^{\frac{(RMR - 50)}{15}}$$

şeklindedir.

Barton (1993) tarafından verilen abakta Q ve RMR ilişkileri denetlenmiştir. (bkz. Şekil 5.3) Buna göre Bieniawski (1989) tarafından verilen eşitlikte Q değerlerine bağlı olarak RMR değerleri, en düşük (-18.2) ve en yüksek değerler (106.2) arasında değişmektedir. Barton (1993) tarafından verilen eşitlikte ise bu değerler en düşük (5) ve en yüksek değerler (95) arasında değişmektedir. Buna göre Barton (1993) tarafından verilen eşitlik daha gerçekçi olarak gözükmemektedir [9].

Çizelge 2.3. RMR'ye göre kaya sınıflaması [4]

RMR KAYA SINIFI BELİRLENMESİ					
RMR Değeri	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21
Sınıf No	I	II	III	IV	V
Nitel Tanım	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya

2.4. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ve Projelendirme Ölçütleri (NATM)

1950' lerden sonra, yeraltı kazılarının ve tünel açımının artması güvenli ve ucuz tünel açım yöntemlerinin de ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu yıllarda yeraltında yapılan hidrolik santrallerin kazıları sırasında bölünmüş kazı yönteminin uygulanması Avusturya Metodu olarak adlandırılmıştır. Geniş kesitli olan bu kazılarda ilk olarak invertte yakın bir galeriyle kazıya başlanıp daha sonra yan ve üst galerilerle kazı aşamalı olarak üst yarıya doğru genişletilir. Daha sonra geliştirilen bu metod Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi adını almıştır. Yeni Avusturya yönteminin esas gelişimi 70 ' li yıllarda olmuştur.

L. Von Rabcewicz (1963) bu yöntemi, ince ve geçici bir destekleme uygulayarak, deformasyonlara izin vermek, tünel içine doğru gelişen kaya basıncını azaltmak ve yükleri kazı çevresindeki kayaya dağıtmak; böylelikle son desteklemeyi (kaplama) daha az yüklemek, daha sonra yapabilmek ve daha ince bir yapı oluşturmak olarak tanımlamıştır. Bu tanımlamaya göre deformasyonlar kazı sırasında ölçülecek ve projedeki hesaplamalarla karşılaştırılacaktır [3].

Bütünüyle tünel açımı sırasında yapılacak gözlem ve deformasyon ölçümlerine dayanan NATM kaya sınıflaması bu anlamda yapım aşamasının sınıflamasıdır. Tasarım aşamasındaki nitelikleri incelendiğinde, bu kaya sınıflamasının tanımsal olduğu ve bu bağlamda da nicel veri sağlamayacağı görülür. Göreceli olarak üniform jeolojik yapıya sahip bölgelerde kaya kalitesinin sayılarla ifade edildiği ve kaya davranışının formülle tahmin edildiği kaya sınıflama sistemleri geliştirilirken, jeolojik yapının büyük değişkenlikler gösterdiği bölgelerde NATM gibi esnek yapım yöntemleri ve kazı sırasında kaya davranışını esas alan kaya sınıflama sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur.

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi hemen her türlü zemine ve kayaya intibak edebilen, ekonomik bir yöntem olarak tanınmıştır. Bu yöntemin 20'den fazla ilkesi bulunmaktadır. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ana prensibi, tünel kazısını çevreleyen zemini yük taşıyıcı destek eleman haline getirerek zamana bağlı gerilme değişimlerini etkilemek, dolayısıyla ikincil bir dengeyi, minimum destekleme önlemlerini gerektirecek şekilde kontrollü bir gerilme boşalımı ile ekonomik ve teknik bir emniyetle kurmaktadır. Bunu yapabilmek için ön sağlamlaştırmanın uygun bir yük-şekil değiştirme özelliğinin olması ve tam zamanında yerleştirilmesi gerekir. NATM belirli bir destek ve kazı işlemine bağımlı değildir ancak bazı prensiplere bağımlılık vardır.

Başlıca esasları, ana kayanın ilk sağlamlığını korumak, dağı fazla kurcalamamak ya da dağı ürkütmemek, yükü dağa taşımak, koruyucu zona boşluk yakınında oluşturmak, şekil değiştirme ve gerilmeleri, ölçümlerle denetlemek, sağlamlaştırma işlemlerini en kısa zamanda tamamlamak ve kazı kesitlerini olabildiğince yuvarlak seçmektir.

Yeni Avusturya yönteminin ana esasları;

1. Yer altı yapısının ana malzemesi dağın kendisidir. Tünelin esas taşıyıcı kısmı, boşluğu çevreleyen ana kayadır.

2. Kayanın başlangıçtaki sağlamlığı korunmalıdır.

Bu nedenle uyulması gereken baş ilke, kayacın ilkel dayanımlılığını korumaya çalışmaktır.

3. Gevşemeler önlenmelidir.

Gevşemelerin olabildiğince önüne geçilmelidir. Çünkü gevşemeler, kayanın taşıma direncini azaltırlar.

4. Tek ve iki eksenli gerilme ortamından kaçınılmalıdır.

Tek ve iki eksenli gerilme ortamından kaçınılmalıdır. Çünkü bu tür gerilmelerin etkisinde bulunan kayanın taşıma direnimi düşer.

5. Koruyucu zon, kayanın taşıma direnci azaltılmaksızın oluşturulmalıdır.

Kazı sırasında oluşan şekil değiştirmeler; koruyucu zonun oluşmasına yeterli olacak, fakat kayacı aşırı gevşeterek taşıma dayanımının azalmasına neden olmayacak şekilde denetlenmeli ve yönlendirilmelidir. Bu alanda başarılı olunduğu ölçüde, güvenlik ve ekonomiklik artar.

6. Sağlamaştırma işlemleri tam zamanında ve gerekli esneklikte yapılmalıdır.

Bunu sağlamak için sağlamaştırma işlemlerine ne çok erken, ne de çok geç başlanmalı ve iksa direncini oluşturan yapının ne çok rijit ne de çok zayıf olmamasına özen gösterilmelidir.

7. Özgül zaman faktörü (kayacın kendini tutma süresi) doğru olarak tahmin edilmelidir.

Bu nedenle, kayanın ve özellikle kaya sağlamaştırmanın birlikte zamana bağlı kırılma davranışlarını belirleyen özgül zaman faktörleri doğru olarak saptanmalıdır.

8. Ön deneyler ve ölçümler yapılmalıdır.

Zaman faktörünün ve kayanın kazı sonrasındaki şekil değiştirme davranışının önceden belirlenebilmesi için laboratuarda ve arazide deneylerin yapılması ve deneme galerisinde konverjans ve deformasyonların ölçülmesi zorunludur. Bilindiği gibi, boşluğun kendini tutma süresi, deformasyon hızı ve kaya kalitesi, yeraltı kaya mekaniğinde de projelendirme için gerekli olan en önemli etmenler arasındadır.

9. Sağlamaştırma, kuvvetleri bağlayıcı türde (püskürtme beton) olmalıdır.

Kazı sonrasında büyük şekil değiştirmelerin ve gevşemelerin beklendiği durumlarda sağlamaştırma dayanımı yayılı yükler şeklinde ve sağlamaştırma önlemi boşluk yüzeyini bağlayacak biçimde olmalıdır. Bunu sağlayan en başarılı yöntem, kısa sürede prizlenen püskürtme beton kullanımıdır.

10. Sağlamaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde olmalıdır.

Geçici ve kalıcı sağlamaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde ve bükülebilir esneklikte olmalıdır. Böylelikle kabuk içinde eğilme momentlerinin oluşması ve bunların meydana getireceği çekme ve kesme kırıkları önlenebilecektir.

11. Sağlamaştırma, çelik hasır, ankraj ve çelik bağlarla yapılmalıdır.

Sağlamaştırma, kabuğun kalınlaştırması ile değil, kabuğa gerekli esnekliği verecek olan çelik hasır bağlarla sağlanmalı, kayayı kendi kendine taşımak için etkin gerilmeler ankrajlar ile dağın içine aktarılmalıdır.

12. Sağlamaştırma zamanı ve araçları ölçümlerle saptanmalıdır.

Tünel duvarındaki ve onu çevreleyen kayaçlar içindeki deformasyonların ve gerilmelerin ölçülmesi, kayacın uygulama sırasındaki davranışı göstermesi bakımından önem taşımaktadır. Ön varsayımlara göre yapılan projeye göre yapılan projelendirme ile dağın içine girdikten sonra uygulanması gereken proje çoğu zaman beklenmedik yeni etmenlerin de ortaya çıkması nedeniyle birbirinden farklı olacaktır. Bu nedenle, yer altı kaya yapıları projelerinde sürekli değişikliği zorunlu kılan bir dinamizm vardır. Yer altı kaya yapıları mühendisliğinde bir projeden değil, adım adım ve yer yer değişen bir projeler sisteminde söz edilmelidir. Bu sistemin kendi arasındaki uyumunun ve kaya

ortamına uygunluğunun başarılabilmesi için ise, gözleme, ölçme, deneyleme, denetleme, yorumlama ve arşivlendirme gibi tüm mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği çalışmalarının eksiksiz yapılması zorunludur. Bu çalışmaların yapılmadığı ve kesitler boyunca hep aynı projenin kullanıldığı durumlarda NATM'in kullanılmadığı bilinmelidir.

13. Tünel, statik bakımdan taşıyıcı zon ile sağlamlaştırma kabuğunun oluşturduğu bir halkadır.

Modern anlamda tüneller dairesel kesitli yapılardır. Dağın içinde boşluk gerisinde oluşturulan gerilme halkası (taşıyıcı zon) ile boşluk duvarına yapıştırılan sağlamlaştırma kabuğu birlikte çalıştırılan bir halka oluştururlar. Statik bakımdan tünel, duraylık bakımından iki boyutlu bir çember ve üç boyutta ise bir tüptür.

14. Sağlamlaştırma kabuğu kapalı halka şeklinde olmalıdır.

Bir çemberin statik bakımdan tam taşıyabilir duruma gelebilmesi için halkaların kapanması zorunludur. Yay veya çentikli derzli halka statik bakımdan çembere kıyasla duraysızdır. Bu bakımdan kalot, sağ ve sol yan kazı ve sağlamlaştırılmalarından sonra taban kazısı bitirilmeli ve sağlamlaştırma kaplaması bir halka şeklinde boşluk duvarına yapışmalıdır. Anlaşılabileceği gibi bu durum en iyi biçimde ancak tam kesit kazıları izleyen çember şeklindeki sağlamlaştırma kabuklarıyla elde edilebilir. Ancak, taban kayacının taşıma özelliklerinin iyi olduğu durumlarda, tabanın sağlamlaştırılması ve sağlamlaştırma yayının bir halkaya tamamlanması gerekmeyebilir.

15. Halka en kısa zamanda oluşturulmalıdır.

Kayanın ikincil gerilmelerin oluşumu sırasındaki davranışı, kabuğun deformasyonlarına bağlıdır. Tam kapanmış bir çember, taşıyıcı halka

durumunda olmadığı için, gevşemeleri arttıran ve boşluğu çevreleyen kayaları plastikleştirerek onun taşıma direncini düşüren bir etken olmaktadır. Kaya içindeki deformasyonların ve plastik zon oluşumlarının zamanın bir fonksiyonu olduğu göz önüne alınacak olursa, sağlamlaştırma yayını en kısa zamanda halka şeklinde kapatmak çok olumlu sonuçlar verecektir. Şimdiye kadar iki boyutta ele aldığımız tünel statüğünü üç boyuttaki bir tüp içinde değerlendirecek olursak; sağlamlaştırma halkasından fazlaca uzaklaşmış kalot kazılarında, tavanın sağlamlaştırılmasıyla oluşturulan yay şeklindeki kabuğun, (daha fazla deformasyonlara izin vermesi nedeniyle) tüneli eksen doğrultusunda eğmeye çalışan bir moment meydana getirdiği görülür.

Eğilmeye zorlanan bu tüpün uç kısmındaki kalot kabuğunun yan ayaklarında çok büyük gerilme oluşarak tehlikeye sokar. Dolayısıyla kalot anosu, sağlamlaştırma halkasından fazla uzaklaşmamalı ve tünel kaplaması en kısa zamanda yapılmalıdır.

16. Dağ olabildiğince az kurcalanmalıdır.

Boşluğun açılması, ilkel gerilme durumunu bozarak yeni bir gerilme dağılımı oluşturmaktadır. Boşluğun biçimi ve boyutunu değiştirmeye yönelik her yeni kazı bir kez daha gerilmelerin yönünün, şiddetinin ve yerinin değişmesine neden olacak ve böylece kaya dokusu giderek gevşeyecek ve kayanın taşıma direnci azalacaktır. Gerilmelerin boşalması sırasında kaçınılmaz olan boşluk içine yönelen şekil değiştirmeler süreksizlik yüzeylerini açmakta, rölatif ötelenmelerle kayanın dokusu örselenmektedir. Bu durum kayanın daha fazla su getirmesi ve çatlakların mekanik davranışlarının değişmesi bakımından da önem taşımaktadır. Unutulmaması gereken nokta, kayanın en sağlam olduğu durumunun kazı öncesindeki ilk durumu olduğudur. Bu durumu en az değiştiren kazı ilkesi ise, ikincil gerilme durumunun bir defada oluşturulmasıdır. Dolayısıyla, kısmi kazılar çalışmaları karmaşıklaştırdığı ve doğal yapının giderek bozulmasına neden olduğu için tam kesit kazıları en uygun düşenidir.

17. Tünel açma yöntemi yapının güvenliği açısından önemlidir.

Tünel açma yönteminin uygulanış biçimi yeraltı kaya yapısının duraylılığı ve güvenliği açısından, kayanın zamana bağlı davranışını doğrudan doğruya etkilediği için büyük önem taşımaktadır. Yöntemler, uygulanış biçimlerine göre organizasyon ve zamanlamada büyük farklılıklar oluştururlar. Bu bakımdan ano uzunlukları, atım derinlikleri, sağlamlaştırmanın gerçekleşme süresi, tabanın kapanması, sağlamlaştırma direncinin sağlanması yeraltı yapılarının güvenliğine büyük ölçüde etkir.

18. Yuvarlatılmış boşluk profilleri kullanılmalıdır.

Yeraltı boşluğunun, tünelin en kesiti daire veya elips şeklinde olmalı, çıkıntı, çentik ve köşeler bulunmamalıdır. Bunlar yapı duvarında ve kaya içinde gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeler meydana getirerek, bunların karşılanmasını zorunlu kılan aşırı boyutlandırmaya neden olurlar veya yapının duraylılığını ve güvenliğini tehlikeye sokarlar.

19. İç kabuk ince olmalı ve dış kabuk ile sürtünmesiz fakat sıkı bağlı olmalıdır.

İki kabuklu sağlamlaştırmalarda iç kabuk da istenmeyen eğilme momentlerinin oluşmaması için ince olmalıdır. Ancak dış kabuktan gelebilecek olan yüklerin kesmeye çalışmaması için, dış kabuğa sürtünmesiz bir şekilde ve tam yüzeyiyle sıkıca oturması sağlanmalıdır.

20. Ön (geçici) sağlamlaştırma işlemleriyle yapının duraylılığı sağlanmış olmalıdır.

Kabuk ve çevresindeki kayadan oluşan yer altı kaya yapısının şekil değiştirmeleri iç kabuğun yerleştirilmesinden önce durdurulmuş, yani ikincil gerilme durumu dengeli son şeklini almış olmalıdır. İkinci kabuğun görevi

güvenliği arttırmak ve mimari görünümü sağlamaktır. Ancak yer altı sularının bulunduğu durumlarda iç kabuk tüm yükleri alacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Bu durumlarda dış kabuk ile iç kabuğun arası bitüm, jeomebran, naylon vb. malzeme ile su geçirmeyecek biçimde yalıtılmak zorundadır. Geçici sağlamlaştırmanın en önemli öğelerinden biri olan ankrajların kalıcı sağlamlaştırma durumları için de hesaba katılabilmesi için bunların belli oranda korozyona karşı korunmuş olması gerekmektedir.

21. Yapım süresi içinde yönlendirme, ve denetleme ölçümleri yapılmalıdır.

Kaya ve kabuktan oluşan sistemin yapım süreci içindeki karşılıklı davranışların bilinmesi deformasyonların sönümlenip sönümlenmediğinin belirlenmesi ve gerilmelerin, yer, büyüklük ve türlerinin saptanması açısından büyük önem taşımaktadır. Kaya ve beton içine yerleştirilen ölçme ağıt ve gereçleri yapının tamamlanmasından sonra da kontrol amacıyla kullanılmalıdır.

22. Drenajla dağdan kabuğa iletilen su basıncı boşaltılmalıdır.

Yeraltı suyunun bulunduğu durumlarda yeraltında açılan her boşluk, bir drenaj yapısı gibi çalışmakta ve suyu kendisine çekmektedir. Hem süreksizliklerin mekanik özelliklerini değiştirmesi ve hem de çalışma ortamını güç koşullar altına sokması bakımından istenmeyen su geliri, su boşaltan ağızların beton ile tıkanmasından sonra kabuk gerisinde büyük değerlere varan su basınçları oluşturabilir. Boşluk suyu basıncının sistemin taşıma gücünü azaltması nedeni ile bu suyun direne edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla boşluk çevresine drenaj boruları yerleştirilmelidir.

Bu prensiplerin önemi bilhassa zor kayaç şartlarında anlaşılmaktadır. Zor şartlar, düşük dayanımlı, yüksek plastiklikte ve ileri derecede eklemlili kayaçlar, başta yanal gerilmeler olmak üzere yüksek gerilmelere maruz

kayaçlar, üzerinde çok az ve çok fazla yük bulunan tüneller ve jeodinamik etkilerle bozuşan kayaçlardır.

Son yıllarda NATM'e göre inşa edilen tünellerde kullanılan kaya sınıflama yöntemi kazı sırasında karşılaşılan kayanın geoteknik özellikleri ve tünel yapımı sırasındaki davranışını kaya parametreleri, örtü yükü, kazı kesiti, ilerleme adım boyu, kazı sırası yer altı suyu ve geoteknik ölçüm sonuçları dikkate alınarak tanımlanır.

NATM'ın yukarda anılan "yapıma" yönelik niteliklerini, "tasarım" aşamasında kullanmak için, göreceli düzlemde yapılan kaya sınıflamalarının eşleştirilmeleri Çizelge 2.4' de sunulmuştur.

Çizelge 2.4. NATM ile Q ve RMR değerleri eşleştirilmesi [9]

NATM Sınıflandırması	Kaya Türü ve Açıklamalar	NATM Sistemine Karşılık Gelen Q Değer Aralığı	NATM Sistemine Karşılık Gelen RMR Değer Aralığı
A1	A- DURAYLI – SONRADAN AZ SÖKÜLEN KAYA KÜTLELERİ: Bu sınıfta yer alan kaya kütleleri genellikle duraylı olup, elastik davranış gösterirler. Yersel iksa uygulanmaması durumunda, yerçekimi nedeniyle, yer yer sığ göçükler oluşabilir. Göçükler genellikle izole olmuş, önemsiz eklem yapıları nedeniyle oluşur. Elastik deformasyonlar hızla azalır.	1000 - 70.4	101 - 80
A2		70.4 - 10.0	80 - 65
B1	B- GEVREK KAYA KÜTLELERİ: Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin davranışları, yapısal kenetlenme ve/vaya çekme dayanımı azlığından dolayı, hızlı ve gevşemeye ve ayrışmaya yatkındır. Hemen hemen tüm çevrede, boşluk çevresinde ikincil gerilmeler, kaya kütlelerinin dayanımını biraz aşmakta, bununla beraber bu zayıflık içerilere ulaşmamaktadır. İksa yapımının gecikmesi halinde artan çökmeler oluşur.	10.0 - 4.0	65 - 58
B2		4.0 - 1.47	58 - 47
B3		1.47 - 0.11	47 - 29

Çizelge 2.4.(Devam) NATM ile Q ve RMR değerleri eşleştirilmesi [9]

C1	C- BASKILI KAYA KÜTLELERİ: Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin davranışları genellikle, kaya basıncının yeniden dağılım süreci ve	0.11 - 0.03	29 - 20
C2	/veya deplasman sınırlamaları sonucunda oluşan gerilmelerin kaya dayanımından daha büyük olduğunu gösterir.	0.03 - 0.016	20 - 15
C3	Kaya kütleleri aşırı gerilme altında kalmasından dolayı, kabuk atma, burulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zayıflık mekanizmaları oluşur.	0.016 - 0.008	15 - 10
C4	Çatlamaya veya dökülmeye eğimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenlere sahip kaya kütleri bu gruba girer.	0.008 - 0.002	10 - 5
C5	Bu gruba giren kaya kütleleri, davranış ve kendini tutma süreleri, su sızıntılarından olumsuz yönde önemli ölçüde etkilenir.	0.002 - 0.001	5 - 2.5

3. MODELLEMELER

Kayaçlar üç fazlı (katı daneler - boşluk suyu - boşluklardaki gaz) doğal bir malzemedir. Bu üç fazın farklı davranmasından dolayı, kayacın davranışının modellenmesi oldukça karmaşıktır.

Geoteknik problemlerin çözümünde

- jeolojik ortamların homojen olmayan yapısı
- süreksizlikler
- non-lineer malzeme davranışı
- geometrinin gelişigüzelliği
- malzeme özelliklerinin zaman ve ortamla değişimi vb.

faktörler etkilidir. Bu faktörlerin bir çoğunu aynı anda göz önüne alan nümerik (sayısal) yöntemler geliştirilmiştir [11].

Jeolojik ortamların bir sürekli ortam gibi düşünülerek çeşitli etkiler karşısında davranışı (yükleme, sızıntı, konsolidasyon vb.) fiziksel bir temele dayanan teorileri geliştirmiştir. Nümerik yöntemler bu teorilerin matematiksel ifadesi, diferansiyel denklemlerin çözümünde nümerik analiz yöntemlerinin uygulanmasıdır.

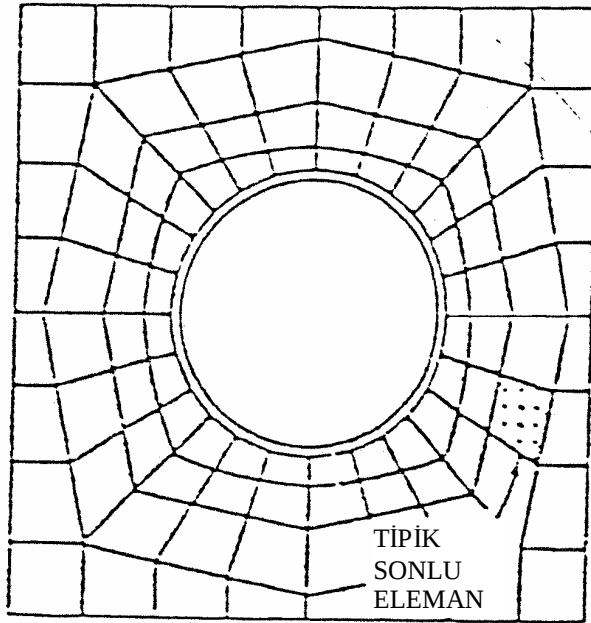
Malzeme modelleri, gerilmeler ve şekil değiştirmeler arasındaki ilişkileri tanımlayan matematiksel denklemlerdir [12].

Modellemelerde tüm projeyi içine alan türlü değişkenlerin etkileri göz önüne alınmalıdır. Bunu yaparken giriş verilerinin yeterli düzeyde sağlanmasına dikkat edilmelidir [12].

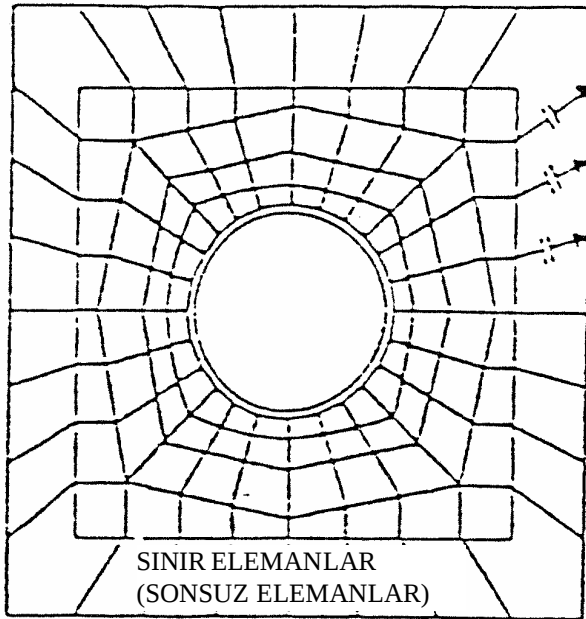
Yer altı modellemesi, özellikleri bilinmeyen farklı yer altı değişkenleri ve zemin davranışını etkileyen farklı değişkenler ile ilişkilidir. Yer altı modellemesinde kayaç, kaya ve zemin olarak ayrılabilir. Kaya kütlelerinin sayısal modellenmesinde iki yaklaşım tanımlanmaktadır. Bunlar; devamlı

yaklaşım (continuum approach) ve devamsız yaklaşım (discontinuum approach) dır. Devamlı yaklaşımlarda diferansiyel ve integral modeller olmak üzere ikiye ayrılır. Diferansiyel modeller sonlu fark ve sonlu elemanlar yöntemlerini içerirler ve çalışılan bölgenin tamamını karakterize ederler. Bu iki yöntem arasındaki temel fark bilinmeyen parametrelerin çözümünde kullanılan yaklaşımlardır. Sonlu elmanlar yöntemi kapalı, sonlu farklar yöntemi ise açık yaklaşım modeline dayanmaktadır. İntegral modellerden olan sınır elemanlar yönteminde ise sadece iç ve dış sınırlar boyunca devamsızlık ana unsurdur. Zemin veya kaya daha çok kendi içinde rijit ve ayrı bloklar halinde modellendiği ayırık elemanlar yöntemi ise devamsız bir yaklaşımdır [13-14].

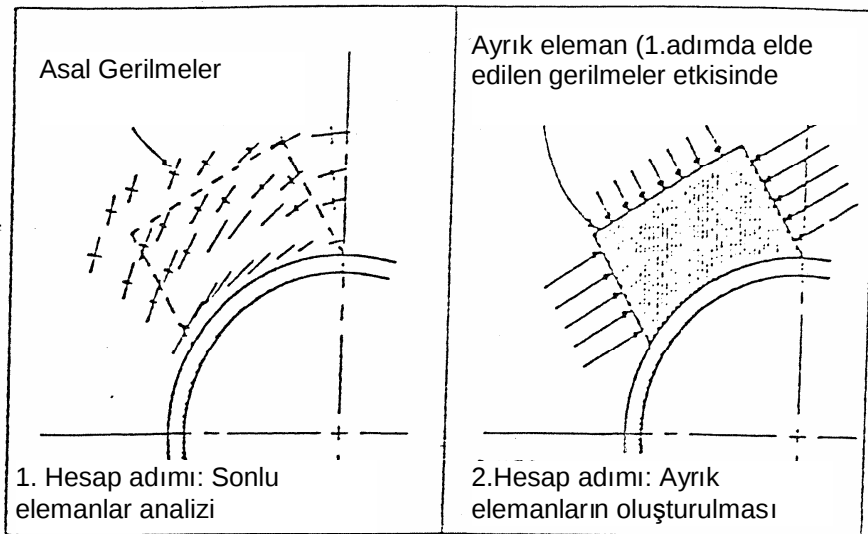
Şekil 3.1'de tipik sonlu eleman görünümü, Şekil 3.2'de sonlu ve sınırlı birlikte kullanımı ve Şekil 3.3'de ise ayırık eleman modeliyle birleştirilmiş sonlu eleman modeli verilmiştir.



Şekil 3.1. Tipik sonlu eleman görünümü [14]



Şekil 3.2. Sonlu ve sınır elemanların birlikte kullanımı [14]



Şekil 3.3. Ayrık eleman modeliyle birleştirilmiş sonlu eleman modeli [14]

Yeraltının bilinmeyen değişkenleri, yer altı ve tünel davranışının karmaşıklığı ve kayacın yapısal denklemlerinin formüle edilmesindeki zorluklar nedeni ile gerçek durumdaki koşulların aynen modellenmesi çok zordur. Bütün bu koşulları detaylı bir şekilde modellemek ne yararlı ne de mümkün olduğu için basitleştirilmiş bir model tanımlanmalıdır [15].

Model basitleştirilmesi şu yaklaşımlardan birini veya birkaçını kullanarak yapılabilir:

- Üç boyutlu durumların iki boyutta modellenmesi,
- Bölgesel simetrinin kullanılması,
- Kayacın ve tünel inşa aşamalarının basitleştirilerek modellenmesidir.

Gerçek yer altı koşullarına bakılmaksızın yeraltını modellemek için yaygın veya benzer yaklaşımlar kullanılır. Yaygın bir yaklaşım kayacın gerilme-şekil değiştirme ilişkisini belirleyen yapısal denklemler kurulmasıdır. Geoteknik mühendisliği hesaplamalarında kullanılan yapısal denklemler lineer elastik, non-lineer elastik, lineer visko-elastik, elasto-plastik, elasto-visko plastik, izotropik, anizotropik, ısı bağımlı veya tahminidir [16-17]. İlaveten söz konusu olan zemin karakteristiklerine göre özel modelleme ihtiyaçları duyulabilir.

Gerilme-şekil değiştirme analizinde drenajsız durum göz önüne alındığında malzeme değişkenleri (deformasyon modülü, kayma modülü, poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı) efektif gerilmeler cinsinden göz önüne alınmalıdır.

Tünel, modellemesinde kullanılabilecek paket programlar bulunmaktadır. Bu programların ana amacı kullanıcının belirlediği kesit ve kayaç özelliklerini kullanarak tünel açılmasından dolayı oluşması muhtemel zemin hareketlerini ve gerilme durumlarını ortaya koymaktır. Bu programların verdikleri bir yığın matematiksel sonuç, kesinlikle doğal koşullarda karşılaşılabilecek olan durumları vermez. Ancak doğru değerlendirilirler ise tünelin hem güvenli hem de ekonomik olarak boyutlandırılmasında yararlı olurlar.

Belli bir derinlikte bulunan kazı çevresinde potansiyel kırık zonunun sınırlandırılmasında ve değişik jeolojik özelliklerin etkilerinde sayısal yöntemler özellikle uygulanır. Uygun kaya kırılma kriteri kullanılarak, kazı

etrafındaki zayıflık zonlarının tanınması mümkün olur ve böylelikle doğru kaya destek sistemi seçimi yapılabilir.

Gerek tünellerin kazılması sırasında, gerekse bittikten sonra duraylılık ve güvenlik, geçici ve/veya kalıcı sağlamlaştırma yöntemlerine göre uygulamalar yapılmasıyla sağlanır. Sağlamlaştırma tünellerde duvar ve taban emniyetinin sağlanmasıdır. Sağlamlaştırma ve destekleme işlemleri; ön gerilmeli veya gerilmesiz kaya bulonu, çelik hasır, püskürtme beton (shotcrete), çelik iksadan oluşan dış kabuk ile beton (veya betonarme) kabuktan oluşmaktadır [18].

NATM'da birincil destekler olarak kullanılan püskürtme beton, hasır çelik iksa ve kaya bulonları kaya kütlesi ile 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. Şekil değiştirmeler, kontrollü bir şekilde, tünel içinde göçüğe meydan vermeden veya emniyetsiz bir ortam meydana gelmeden gerçekleşmektedir [19].

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 yüzeyine (aynaya ve duvarlara) mümkün olduğu kadar yakın konulmalıdır.

Yer altındaki kayalar üzerindeki mevcut ağırlıklar ve yanal şekil değiştirme 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 şekil değiştirmeler oluşur. Bu şekil değiştirmelerin belirli sınırlar dahilinde tutulması ve yeni bir dengeli ortamın oluşturulması için genellikle tünellerin desteklenmesi gerekli görülmektedir.

Destekleme üzerine etkiyen basınçlar şişme basıncı, gevşeme basıncı ve dağ basıncı olmak üzere üç grupta incelenebilir.

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM=finite element method) gerilme-şekil değiştirme analizinde en yaygın kullanılan yöntemdir.

Tünel mühendisliğinde,

- Değişken (sürekli-süreksiz) zemin tabakaları
- Zeminin elastoplastik özelliği
- Zemin kaplama ilişkileri vb.

durumlar göz önüne alındığında yeni geliştirilen tünel inşa yöntemlerine de uygun olan sonlu elemanlar yöntemi tünel hesabında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar nümerik analiz yöntemi, Zienkiewicz (1977) tarafından matematiksel ifadelerle tanımlanan sürekli problemlerin genel çözüm yöntemi olarak tanımlanmıştır [20]. Geoteknik problemler için matematiksel ifadeler; su akışı (boşluk suyu basıncını içeren problemler) ve denge eşitlikleri, sınır durumları ve deformasyonların uygunluğu ve gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi tanımlayan eşitliklerdir [16].

Sonlu elemanlar yöntemi ilk başlarda sadece yapısal analizler için geliştirilmiş olmasına rağmen, dayandığı teori ve prensiplerin genelliği ve bilgisayar programlanmasına uygunluğu yüzünden bugün diğer birçok mühendislik alanında da uygulamaları kullanılan bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemi mühendisliğin çok geniş bir alanında (Katı cisim mekaniği, termoelastisite, termodinamik, akışkanlar mekaniği, magnetizma vb.) sınır değer problemlerine uygulanabilmektedir [21].

Sonlu elemanlar yöntemi; karmaşık sınır koşulları ve non-lineer malzeme davranışını modellemeye uygundur ve homojen olmayan malzemeler gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir programlama için elverişlidir.

Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli bir sistemi problemin karakterine uygun sonlu elemanlara ayırarak, elde edilen elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetlerin enerjisinin minimum olması ve sonra bu elemanların birleştirilmesi şeklinde bir çözüm yöntemi uygulamaktadır [21]. Bunun sonucu olarak sınır koşulları, sisteme ait özellikler, dış yüklerin sürekli veya ani değişimleri kolayca göz önüne alınabilmekte, ayrıca sürekli sistemin tipik bölgelerinde eleman boyutları küçültülerek o bölgenin daha ayrıntılı incelenmesi mümkün olmaktadır. Diğer bir avantajı da sınır şartlarının problemin çözüm sırasına göre en son adımda dahil edilmesidir. Böylece çeşitli sınır şartlarını probleme uygularken baştaki yoğun hesapların tekrarına gerek kalmamaktadır.

Sonlu eleman yönteminde herhangi bir sürekli ortam veya yapı sonlu eleman denilen parçacıklara bölünmektedir. Elemanlar birbirine, 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.

Yöntemde, önce bir eleman için davranış denklemleri kullanılarak düğüm noktalarının deplasmanları hesaplanır. Tüm yapının davranış denklemleri ise yapıyı oluşturan elemanların denge denklemlerinin, elemanlar arasındaki deplasman sürekliliğinin sağlayacak şekilde toplanması ile bulunur. 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.

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasına 1966 yılında başlanmıştır. Clough ve Woodward (1967), dolguda gerilmeleri, yanal

ve düşey hareketleri belirlemek ve Reyes ve Deene (1966), yeraltında kayada kazı yapılması uygulamalarında kullanmışlardır [22-23].

Çoğu geoteknik sonlu eleman analizleri gerçek yapımı modelleyecek şekilde adım adım (aşamalı yükleme, aşamalı kazı) yapılmaktadır. Analizin adımlar halinde yapılabilmesi iki önemli avantaj sağlamaktadır:

- Analizlerde dolgu yerleştirilmesi veya kaldırılması durumunda, geometri her bir adımda değişmektedir. Geometrideki değişim sonlu elemanlar ağına eleman ekleyerek veya kaldırılarak modellenenilmektedir.
- Analizlerde, zemin kütlesi içinde gerilmelerin değişimi sonucu her bir yükleme kademesinde zemin özellikleri değişmektedir.

Geoteknik mühendisliği problemlerinde sonlu elemanlar analizleri sonucunda gerilmeler, yanal ve düşey hareketler, boşluk suyu basınçları ve yeraltı suyu akışı vb. belirlenebilmektedir.

Yeraltının modellenmesi

Ortamı modelleyen sonlu elemanlar ağının seçiminde dikkatli davranılmalıdır. Analizin doğruluğunu, çözümün yakınsaklığını ve sayısal hesap sırasındaki yuvarlatma hatalarını en aza indirecek sonlu eleman tipinin ve boyutunun seçilmesi önemlidir.

Eleman sayısının çokluğu genellikle daha doğru sonuç verecektir, fakat daha büyük bilgisayar kapasitesi ve zaman gerektirecektir.

Seçilen sonlu elemanlar sahte enerji şekilleri yaratmamalı, kayma kilitletmesine veya kabuk kilitletmesine neden olmamalıdır [21].

Elemanların en uzun ve en kısa boyutları oranı üçü geçmemelidir. Aksi takdirde önemli hesap hataları yapılabilir.

Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı non-lineer olduğundan bu davranışın sonlu elemanlar analizlerinde modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapımdan önceki başlangıç gerilme durumu, zeminin non-lineer gerilme-şekil değiştirme ve dayanım özellikleri ve yükleme aşamaları arasındaki bekleme süreleri analizlerde gerçek duruma yakın olarak belirlenmelidir.

Sonlu elemanlar yönteminin matematiksel işleyişi

- Bütün eleman yöntemlerinde olduğu gibi incelenen yapı veya kaya kütlesi küçük boyutlu elemanlara ayrılır.
- Bu küçük elemanların komşu elemanlarla ortak düğüm noktalarından bağlandıkları varsayılır.
- Bir yük sistemi altında sadece düğüm noktalarında incelenen yer değiştirmeler daha sonra bu elemanların iç noktalarındaki yer değiştirmelerin bulunmasında kullanılır
- Çeşitli geometrik şekillerdeki kirişler, plakalar, prizmatik elemanlar ve kabuklar yalnız veya birlikte yapının son fiziksel şeklini oluşturmakta kullanılır.

Temel olarak bütün eleman yöntemleri, bir problemin gerilme, şekil değiştirme ve yer değiştirme gibi fiziksel davranışlarını tanımlayan matematiksel işlemleri (cebirsal, diferansiyel veya integral) yapabilmek için matris cebirini kullanır[21].

Sonlu elemanlar yönteminin matematiksel ifadesi

- Sonlu elemanlar yöntemi, uygun seçilmiş sonlu elemanlarla yapının temsil edilmesidir.

- Sonlu elemanlar yine sonlu sayıda düğüm noktasında birbiri ile bağlantılıdır. Bu sonlu elemanlar ayırık elemanlardır.
- Dış yükleme durumunda elde edilen düğüm noktası yüklerinden, bilinen geometrik şekillerinden ve sonlu elemanların tahmin edilen veya seçilen malzeme özelliklerinden yararlanarak her sonlu elemanın düğüm noktası yer değiştirme ve gerilme alanı sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanır. Bunun için problemi modelleyen sonlu elemanların rijitlik matrislerinin belirlenmesi gerekir.

Bu araştırmada, fizibilite seviyesindeki Susurluk-Orhaneli Çayı Enerji projelerinden Deliballılar Barajı ve HES'in derivasyon tüneli zemini gerilme-şekil değiştirme davranışı sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu jeolojik ortamda sınır koşullarının ve ortamın davranışının (malzeme davranışı yönünden elasto-plastik) karmaşık olması ve bu koşulların değişmesi sonlu elemanlar yöntemi tarafından göz önüne alınabildiğinden bu yöntem tercih edilmiştir. Analizlerde derivasyon tüneli zemini gerilme-şekil değiştirme davranışı geoteknik problemlerin çözümüne yönelik olarak geliştirilen Phase 2D adlı bir bilgisayar programı kullanılarak araştırılmıştır.

4.1. Phases 2D Programı

Phases 2D, (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) iki boyutta yer altı açıklıklarının analizi için sınır elemanlar ve sonlu elemanlar yönteminin uygulandığı ve kullanıldığı bir paket programdır. Phases 2D programı Toronto üniversitesinde E.Hoek, J.L.Carvalho ve B.T. Corcum'un da içinde yer aldığı kaya mühendisliği grubu tarafından geliştirilmiştir [24]. Bu programda sınır elemanlar programı, sonlu elemanlar programı veya bu iki yöntemin birlikte kullanılması mümkündür.

Her modelleme için Phases 2D programında önce tünel kesitinin bilgisayar ekranına çizilmesi gerekmektedir. Tünel kesitleri çizildikten sonra bu tünel dikdörtgen veya karemsi bir sınır içine alınmaktadır. Bu sınır gerilme ve deformasyonların büyüklüğüne göre küçük veya büyük seçilebilmektedir. Eğer sınır koordinatları girilerek vakit kaybedilmek istenmiyorsa *automatic* komutuna girilerek hem tünelin sınır çerçevesi hem de *mesh* otomatik olarak elde edilebilir. Ancak bu komut kullanılırsa farklı özelliklerdeki tabakaların gösterilmesi ve bu tabakaların özelliklerinin bilgisayara girilmesi mümkün olmamaktadır.

Modelleme yapılan kesitteki bir diğer işlem farklı tabakaların sınırlarla birbirinden ayrılmasıdır. Bu işlem hem farklı kayaç türleri için hem de tüneli çevreleyen püskürtme betonu, çelik iksa, çelik tel hasır, kaplama betonu için de yapılabilmektedir. Böylece sınırlarla ayrılan farklı özelliklerdeki kayaç çeşitlerinin ve tahkimatın her birinin özelliklerini bilgisayara girebilmek mümkün olmaktadır.

Kullanılan kaya civataları (bulon) *bolt* komutuyla çizilebilmektedir. Bulonun başlangıç ve bitim noktası işaretlendiğinde program otomatik olarak bulonu çizebilmektedir. Bulonların özellikleri *define prop* komutu ile girilebilmektedir. Bu komuta girildiği takdirde ekrana *bolt table* adıyla bir tablo gelmektedir. Bulon özellikleri bu tabloya yazılarak programa girilebilmektedir.

Yukarıda sayılan işlemler gerçekleştirildikten sonra sıra *mesh* oluşturmaya gelmektedir. *Mesh* komutuna girilerek *mesh* oluşturulabilmektedir. Phases 2D programı otomatik *mesh* (element) oluşturma özelliğine sahiptir. Bu özellik kullanıcıya, problemin elemanlara bölünmesi konusunda önemli ölçüde kolaylık ve zaman sağlamaktadır. Programın otomatik olarak oluşturduğu üçgen sayısı programa daha önceden girilen sınır eleman (boundary element) sayısına bağlı olarak fazla yada az olabilmektedir. Sınır eleman sayısı çok girilmişse program daha küçük ve çok sayıda, az girilmişse daha büyük ve az sayıda sonlu eleman (finite element) üçgeni oluşturmaktadır.

Sonlu elemanların kesiştiği noktalara düğüm noktası (nod) adı verilmektedir. Her bir düğüm noktası bir yada birkaç üçgenin köşesi olmaktadır. Program düğüm noktalarını gerilme ve deformasyonların daha fazla olduğu yer altı açıklığına yakın yerlerde çok daha sık, açıklıktan uzak dolayısıyla gerilme ve deformasyonların az olduğu yerlerde ise daha seyrek olarak otomatik olarak oluşturmaktadır.

Program, gerilme ve yer değiştirmeleri her bir düğüm noktası için ayrı ayrı hesaplamaktadır. Her bir noktanın gerilme ve deformasyon değeri hesaplandığı için de gerilme ve yer değiştirmeler programın otomatik olarak oluşturduğu eş gerilme ve eş yer değiştirme eğrilerinden rahatlıkla görülebilmektedir.

Mesh oluşturulduktan sonra, daha önceden birbirinden sınırlarla ayrılmış olan kayaç kütlelerinin ve tahkimatın özellikleri programa girilir. Kayaç ve tahkimatın özelliği olarak birim ağırlık (MN/m^3), elatisite modülü (MPa), poisson oranı, çekme direnci (MPa), kohezyon (MPa) ve sürtünme açısı girilir. Program farklı tabakalara ait verilerin girilmesiyle farklı tabakaları farklı çizgilerle taramaktadır.

Bütün veriler programa girildikten sonra *compute* komutuyla programın bilgileri değerlendirip hesaplama yapması beklenir. Hesaplamalar girilen bilgilerin büyüklüğüne, düğüm noktası sayısına ve oluşan sonlu eleman sayısına göre kısa yada daha uzun bir zaman sürebilmektedir.

Bütün veriler programa girilip hesaplatma yaptırdıktan sonra *interpret* komutuyla sonuçlara ulaşılabilir. Programdan en büyük düzlemsel ana gerilmeler σ_1 (σ_1), en küçük düzlemsel ana gerilmeler σ_3 (σ_3) ve yer değişmeler (toplam yer değişmeler, x ve y eksenleri yönündeki yer değişmeler) çıktı olarak elde edilebilir. Sayılan bu çıktılar kontur olarak, taramalı olarak yada renkli olarak alınabilmektedir. Ayrıca daha detaylı olarak

görölmek istenen bir bölge istenilen oranda *zoom* yapılarak büyütülebilmektedir.

Phases programında istenildiği takdirde veri olarak bilgisayara girilen değerler değiştirilebilmekte ve yeni verilere göre kayaç kütlesinin davranışında ne gibi değişikliklerin olacağı, gerilmelerin artıp-azalışı, yer değiştirmelerin azalıp-çoğalması kısa zamanda bilgisayara hesaplatılarak sonuçlar ekranda veya yazıcıdan alınabilmektedir.

Program temel olarak girilen veriler ve tanımlanan alan için gerilme ve şekil değiştirmeleri (deplasman) hesaplar. Programda üç değişik yenilme modeli mevcuttur. Bunlar,

- Mohr-Coulomb
- Hoek-Brown
- Modifiye Hoek-Brown modelleridir [24].

F ile akma potansiyelleri ve Q ile de şekil değiştirme potansiyeli gösterilirse,

Mohr-Coulomb :

$$F = \frac{I_1}{3} \sin \phi + \sqrt{J_2} \cos \theta - \frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi - c \cos \phi = 0$$

$$Q = \frac{I_1}{3} \sin \delta + \frac{\sqrt{3} \sqrt{J_2}}{2} = 0$$

c: kohezyon, Φ : içsel sürtünme açısı, δ : dilatasyon açısı

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$$

Hoek-Brown:

$$F = \frac{m\sigma_c I_1}{3} + 4J_2 \cos^2 \theta + m\sigma_c \sqrt{J_2} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) - s\sigma_c^2 = 0$$

$$Q = \frac{\alpha\sigma_c I_1}{3} + 3J_2 + \frac{\alpha\sigma_c \sqrt{3}\sqrt{J_2}}{2} = 0$$

σ_c : bozulmamış kayanın eksenel olmayan sıkışma kuvveti

m ve s amprik sabitler (kayanın yapısal özelliklerine ve normal çevre basınçları altında kayanın kırılma derecelerine bağlıdır)

α : kaya dilatasyon değişkeni

Modifiye Hoek-Brown:

$$F = (2\sqrt{J_2} \cos \theta)^{1/a} + m\sigma_c^{(1-a)/a} \left[\sqrt{J_2} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) + \frac{I_1}{3} \right] = 0$$

$$Q = (\sqrt{3}\sqrt{J_2})^{1/a} + \alpha\sigma_c^{(1-a)/a} \left(\frac{\sqrt{3}\sqrt{J_2}}{2} + \frac{I_1}{3} \right) = 0$$

σ_c : bozulmamış kayanın eksenel olmayan sıkışma kuvveti

a: eğriliği kontrol eden üssel parametre

m: amprik kaya sabiti

α : kaya dilatasyon değişkeni

5. UYGULAMA

Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) Genel Müdürlüğü tarafından Susurluk-Orhaneli çayının 635-360 m kotları arasındaki düşünün enerji yönünden en iyi şekilde değerlendirilmesi ve önceliklerin belirlenmesi için fizibilite (yapılabilirlik) çalışması yürütülmektedir.

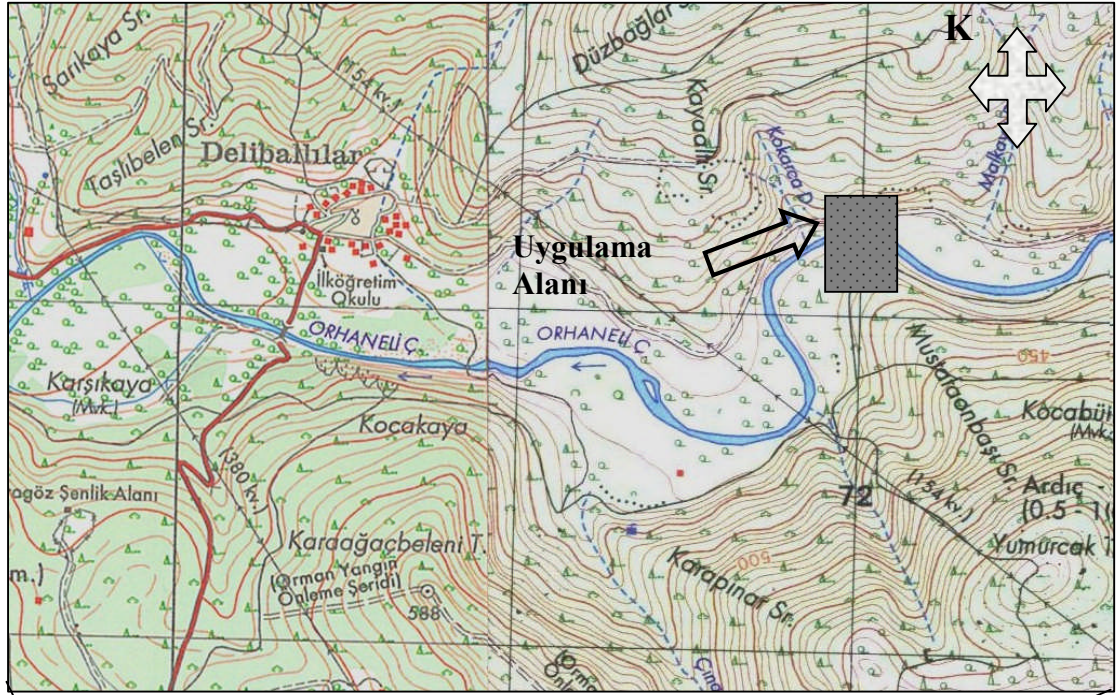
Bu çalışmada Susurluk-Orhaneli Çayı Enerji projelerinden Deliballılar Barajı ve HES'in derivasyon tünellerinin sayısal modellenmesi uygulama yeri olarak seçilmiştir. Tünelin modellenmesi sonlu elemanlar yöntemine göre çalışan Phase 2D adlı bilgisayar programı ile yapılmıştır.

5.1. Uygulama Yeri

Susurluk Orhaneli Havzası $39^{\circ}02'30''$ ile $39^{\circ}57'00''$ kuzey enlemleri, $28^{\circ}30'00''$ ile $29^{\circ}50'00''$ doğu boylamları arasında yer alır. Derivasyon tünellerinin sonlu elemanlar ile modellenmesi uygulama yeri olarak seçilen Deliballılar Barajı ve HES Bursa İli, Orhaneli İlçesi'ne bağlı Deliballılar Köyü'nün doğusu ile Kabaklar Köyü'nün batısı arasında yer almaktadır.

Uygulama alanının yerbulduru haritası Harita 5.1'de gösterilmiştir.

Uygulama alanını kapsayan ve Harita Genel Komutanlığı tarafından hazırlanmış 1/250 000 ölçekli NJ 35-4; 1/100 000 ölçekli Kütahya-İ21 ve Kütahya-İ22; 1/25 000 ölçekli Kütahya İ21-b2 ve Kütahya-İ22-a1 haritaları mevcuttur. Ayrıca tesis yerlerine ait 1/5 000 ve 1/1 000 ölçekli haritalar EİE İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından bu haritalardan yararlanılarak hazırlanmıştır.



Harita 5.1. Uygulama alanı yerbulduru haritası

5.2. Uygulama Yeri Karakteristikleri

Susurluk-Orhaneli çayının su potansiyelinin güncelleştirilerek değerlendirilmesi ile enerji üretimine yönelik teknik, sosyo-ekonomik ve çevre etki yönlerinden en olumlu havza gelişme planını belirleyebilmek amacıyla pek çok seçenek irdelenmiştir. Ayrıntılı çalışmalar sonucunda pek çok seçenek ekonomik nedenlerle elenmiş ve Orhaneli çayının 493-358 m kotları arasında iki adet projenin yapılması uygun bulunmuştur. Bu projeler 82 m yüksekliğindeki Ağaçhisar Barajı ve HES ile 60 m yüksekliğindeki Deliballılar Barajı ve HES projeleridir. Bu tesislerden derivasyon tünelinin sayısal modellemesi uygulama yeri olarak seçilen Deliballılar Barajı ve HES'in ana özellikleri ise aşağıda sunulmuştur [25].

Hidroloji

Yıllık ortalama doğal akım	: 571 hm ³
10 yıl yinelemeli taşkın pik debisi	: 408 m ³ /s
25 yıl yinelemeli taşkın pik debisi	: 548 m ³ /s
Kadastrfal taşkın debisi	: 3 573 m ³ /s

Baraj

Tipi	: Silindirle Sıkıştırılmış Beton (RCC)
Talveg kotu	: 360,00 m
Kret kotu	: 420,00 m
Talvegden yüksekliği	: 60,00 m

Derivasyon (Çevirme) Tüneli

Yeri	: Sol sahil
Tipi	: Dairesel
İç çapı	: 7,50 m
Uzunluğu	: 365,00 m

Tasarım debisi (Q25) : 548 m³/s

Batardolar

Akış yukarı batardosu kret kotu : 378,00 m

Akış yukarı batardosu yüksekliği : 18,00 m

Akış aşağı batardosu kret kotu : 367,00 m

Akış aşağı batardosu yüksekliği : 9,00 m

Santral

Kurulu güç : 2 x 8 MW = 16 MW

Santral Kuyruksuyu Seviyesi : 360,00 m

Brüt Düşü : 54.00 m

Proje Debisi : 33,20 m³/s

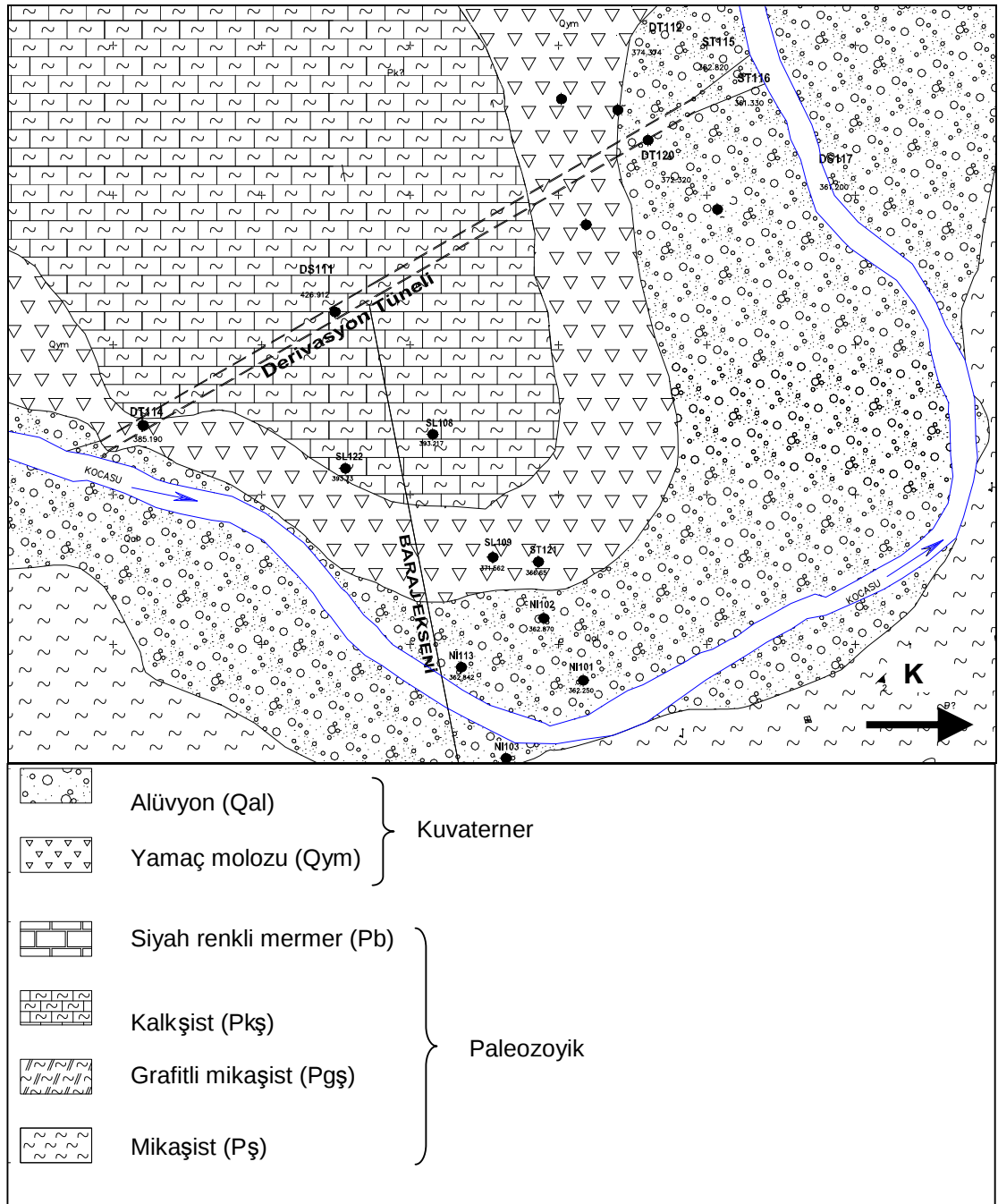
5.3. Uygulama Alanı Jeolojisi

Jeolojik durumun incelenmesinin amacı, Orhaneli çayı'nın 635-360 m kotları arasındaki hidroelektrik potansiyelinin değerlendirilmesi için depolama seçeneklerinin ve HES'lerin jeolojik-jeoteknik koşullarının irdelenmesidir.

5.3.1. Uygulama alanında yapılan yüzeysel çalışmalar ve yer altı araştırmaları

Baraj yerinin ve yakın çevresinin 1/1 000 ölçekli, baraj göl alanının 1/25 000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası EİE tarafından yapılmıştır. Yüzeysel gözlemlerle edinilen bilgiler, bu haritalara işlenerek değerlendirilmiştir. Jeolojik birimlerdeki, gerek tektonik olaylar, gerekse yüzeysel ayrışmalar sonucu oluşan değişiklikler gözlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Sondaj çalışmalarından edinilen bilgiler ile, bölgedeki eski çalışmalar göz önünde tutularak, yaş ilişkileri ve jeolojik yapı ortaya çıkartılmıştır. Baraj yeri ve derivasyon tüneli güzergahına ait jeoloji haritası Harita 5.2'de verilmiştir.



Harita 5.2. Baraj yeri ve derivasyon tüneli güzergahına ait jeoloji haritası

Yeraltı araştırmalarını, yalnızca sondaj çalışmaları oluşturmaktadır. Baraj yerinde sondaj alışmaları, EİE tarafından yapılmıştır. Baraj yerinde, ön yüzü beton kaplamalı kaya dolgu ve silindirle sıkıştırılmış katı dolgu seçeneklerine yönelik olarak 23 adet toplam 1081,00 m derinlikte sondaj yapılmıştır. Baraj yerinde açılan temel araştırma sondajlardan 6 tanesi baraj yeri sağ yakada, 4 tanesi baraj yeri sol yakada, 4 tanesi baraj yeri nehir içinde, 3 tanesi seçenekli santral yerlerinde, 4 tanesi seçeneklere göre derivasyon tüneli giriş ve çıkışında, 1 tanesi dolusavak dş havuzunda ve 1 tanesi ise dolusavak eşik yapısında açılmıştır. Sol yakada açılan DS-111 nolu sondaj aynı zamanda derivasyon tünelinin tanımlanmasına yöneliktir. Silindirle sıkıştırılmış beton baraj seçeneğine göre derivasyon tüneli çıkışında açılan DT-120 nolu sondaj ise, aynı zamanda ön yüzü beton kaplamalı kaya dolgu seçeneğinde yer alan dolusavak iletim kanalı ve kazı palyelerine yönelik açılmıştır. Proje yerinde açılan sondajlara ait zet bilgiler izelge 5.1’de verilmiştir.

Sondajlı alışmalar sırasında; mümkün olan yerlerde %100 karot alınmasına, ana kayada her 2 m’de bir “Basınçlı Su Testi” (BST), alüvyonda ise 2 m’de bir sızma deneyi yapılmasına çalışılmıştır. Basınçlı su deneylerinde, 3-6-10-6-3 atmosferlik basınçlar, 10’ar dakikalık sürelerle uygulanmıştır. Sondajlardan elde edilen karotlar üzerinde yapılan incelemelerde, birimlerin mühendislik özellikleri (litoloji, ayrışma, erime, süreksizlik düzlemlerinin durumu, eklem sıklığı, geçirimlilik, vb.) hakkında bilgi edinilmiştir.

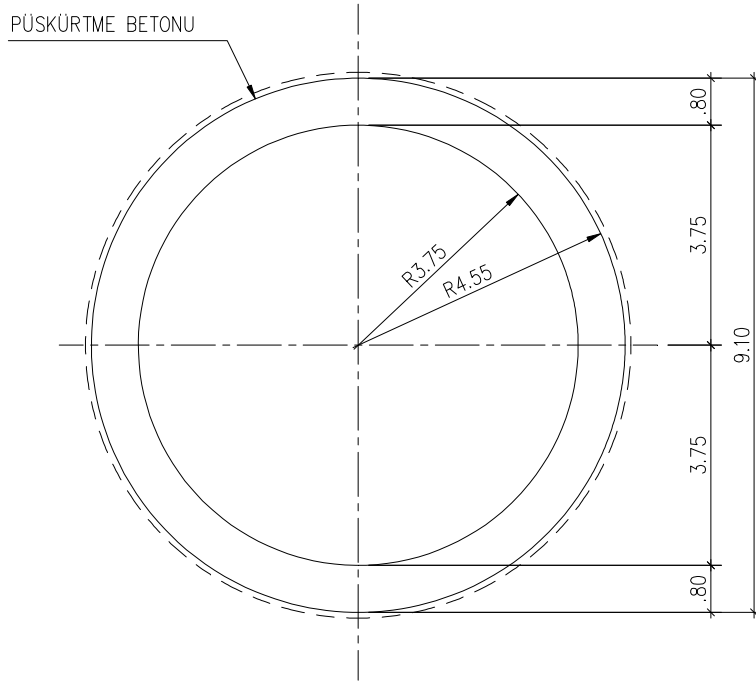
Sondaj sırasında ve sonrasında yapılan yeraltı suyu (YAS) lmleriyle, statik su düzeyi ve değişimleri izlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.1. Proje yerinde yapılan sondajlar [9]

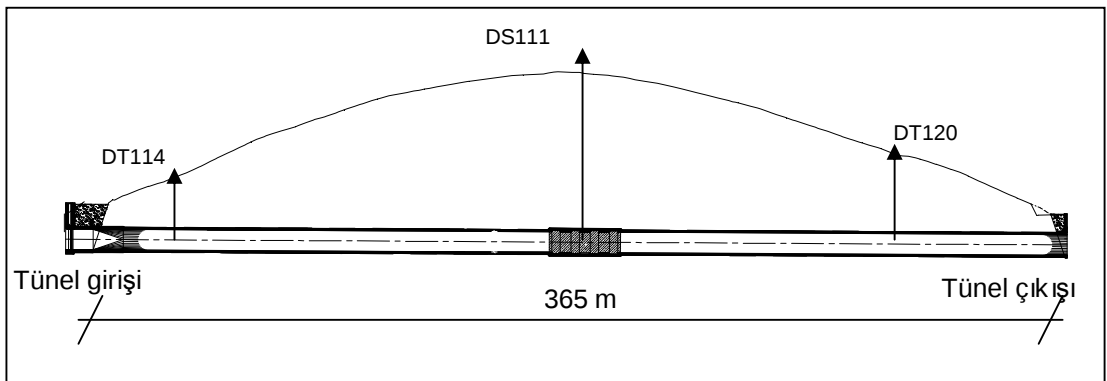
Genel Yeri	Sondaj No	Yeri	Derinlik (m)	Kot (m)	YASS Kotu (m)
Sağ Yaka	SG-104	Baraj yeri, Sağ yaka, Kret kotu	65,00	433,00	-
	SG-105	Baraj yeri, Sağ yaka, Yamaç	55,00	392,00	360,70
	SG-106	Sağ yaka, Göl alanı	50,00	394,00	387,70
	SG-123	Sağ yaka, yamaç (Ön yüzü beton seçeneği)	55,00	390,00	-
	SG-118	Baraj yeri, Sağ yaka, Kret başı	75,00	425,00	396,50
	SG-119	Baraj yeri, Sağ yaka, Yamaç	55,00	397,00	360,60
Nehir İçi	Nİ-101	Baraj yeri, Sağ Yaka, Nehir içi	60,00	362,00	360,20
	Nİ-102	Baraj yeri, Sağ Yaka, Nehir içi	33,00	363,00	360,80
	Nİ-103	Baraj yeri, Sağ Yaka, Nehir içi	47,00	363,00	360,80
	Nİ-113	Baraj yeri, Sol Yaka, Nehir içi	40,00	363,00	361,30
Sol Yaka	SL-107	Baraj yeri, Sol yaka	60,00	421,00	367,80
	SL-108	Baraj yeri, Sol yaka, Yamaç	60,00	393,00	365,40
	SL-109	Baraj yeri, Sol Yaka, Yamaç ortası	50,00	372,00	360,30
	SL-122	Sol yaka, yamaç (Ön yüzü beton seçeneği)	60,00	394,00	-
Dolusavak ve Derivasyon Tüneli	DT-110	Derivasyon tüneli girişi	30,00	374,00	361,20
	DS-111	Dolusavak ve derivasyon tüneli	75,00	427,00	373,70
	DT-112	Derivasyon tüneli çıkışı	30,00	374,00	362,10
	DT-120	Derivasyon tüneli çıkışı (SSKD seçeneği)	30,00	372,00	-
	DS-117	Dolusavak düşü havuzu (Ön yüzü bet.Seç.)	35,00	361,00	-
	DT-114	Derivasyon tüneli girişi (SSKD seçeneği)	30,00	385,00	-
Santral Yeri	ST-115	Santral yeri, Sol Yaka (Ön yüzü bet.seç.)	25,00	363,00	-
	ST-116	Santral yeri, Sol Yaka (Ön yüzü bet.seç.)	31,00	361,00	-
	ST-121	Santral yeri (SSKD beton seçeneği)	30,00	367,00	-

5.4. Derivasyon Tünelleri

Yapım sırasında Orhaneli çayının suları sol sahilde yapılacak 7,50 m iç çapında, 365 m uzunluğunda daire kesitli derivasyon tüneli ile akış aşağıya aktarılacaktır. Şekil 5.1’de derivasyon tüneli tip kesiti, Şekil 5.2’de ise derivasyon tüneli boykesiti verilmiştir.



Şekil 5.1. Derivasyon tüneli tip kesiti



Şekil 5.2. Derivasyon tüneli boy kesiti

Derivasyon tünelinin projelendirilmesinde 10 yıl ve 25 yıl yinelemeli taşkın değerleri göz önüne alınmıştır. 10 yıl yinelemeli taşkını akışaşağı aktaracak derivasyon tünelinin boyutlandırılmasında ön batardoda 2 m hava payı olacağı göz önüne alınmıştır. 25 yıl yinelemeli bir taşkını akışaşağıya aktaracak çevirme tünelinin boyutlandırılmasında ise ön batardoda hava payının kalmayacağına göre değerlendirme yapılmıştır. Bu iki seçenekten gayri müsait olanı göz önüne alınmıştır [26]. Derivasyon tüneli 25 yıl

yinelemeli taşkın debisi olan 548 m³/s'ye göre boyutlandırılmıştır. Tünelde beton kalınlığı 0,80 m püskürtme betonu 0,10 m alınması planlanmıştır. Püskürtme betonunun 350 dozlu olacağı kabul edilmiş ve birim ağırlığı 2,0 t/m³ alınmıştır.

Baraj tipi için iki seçenek üzerinde durulmuştur. Derivasyon tüneli, barajın ön yüzü beton kaplamalı kaya dolgu yada silindirle sıkıştırılmış katı dolgu olması seçeneklerinin her ikisine göre de sol yakadadır. 7,50 m iç çapında dairesel planlanan derivasyon tüneli, geçkiyi temsil eden sondaj verilerine göre, tamamen grafitli mikaşistler ve mikaşistlerde açılacaktır. Baraj yeri ve göl alanının oldukça büyük bir kısmında yüzlek veren şistler (Pş), ilksel olarak geçirimsizdirler. Özellikle killeşmiş grafitli mikaşistlerin çatlak ve boşlukları kendi gereci ile dolduğundan ve nispeten açık çatlaklı mikaşistlerle grift olduğundan dolayı genel olarak mikaşistler, geçirimsiz kabul edilebilir.

Tünelin del-patlat sistemi ile açılacağı düşünülmüştür. Tünelde iki ağızdan çalışma yapılacağı ve iki vardiyada her iki ağızda 5 m ilerleme olacağı kabul edilmiştir. İki ağızda da yapılacak ikişer ilerleme (round) da 2,5 m uzunlukta kazı yapılacağı kabul edilmiştir. Delme işleminin 3 kollu Jumbo ile yapılacağı kabul edilmiştir. Delme hızı 2 feet/dakika olarak alınmıştır.

Derivasyon tünelinde, konsolidasyon enjeksiyonlarının, 3 m aralıklarla şaşırtmalı olarak, her kesitte 8 adet ana kayada 6 m uzunluğunda yapılması uygun olacaktır. Tünelde kontak enjeksiyonları, "beton kalınlığı+0,20 m" uzunluğunda ve tünel betonarme betonunun % 5'i mertebesinde olması önerilmektedir.

Deliballılar barajı derivasyon tünelinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

İç çapı (Diç)= 7,50 m

Beton kalınlığı= 0,80 m

Püskürtme betonu= 0,10 m

A-B hatları mesafesi= 0,15 m

Dış çap(Ddış)= 9,10 m

Uzunluğu (L) = 365,00 m

Kazı alanı = 80,12 m²

Temel sondaj verileri ve yüzeysel gözlemler kullanılarak jeolojik kesit hazırlanmış ve tünelin açılacağı grafitli mikaşist için jeomekanik sınıflamalar (Q - Rock Mass Quality ve RMR - Rock Mass Rating) yapılmıştır.

5.4.1. Tüneldeki kayanın kütle sınıflaması

Tünel destekleme tasarımlarında, uluslararası uygulamalarda, amprik bağlamda, çeşitli kaya sınıflamaları kullanılmaktadır. Bu kaya sınıflamalarından ikisi; Tünel Destekleme Tasarımı İçin Kaya Kütlelerinin Mühendislik Sınıflaması (Q - N. Barton, R. Lien ve J. Lunde) ve Eklemlili Kaya Kütlelerinin Jeomekanik Sınıflaması (RMR-Bieniawski,1989) sayısal sınıflamalardır. Kimi Avrupa ülkelerinde kullanılan NATM (ÖNORM-B2203), kaya sınıflaması, özünde tanımsal niteliktedir. Q sınıflaması her boyutta tünel için destek elemanı önermesine karşın, kazının desteksiz durma süresi konusunda somut öneriler getirememektedir. Öte yanda, genelde madencilğe özgü yeraltı kazıları için geliştirilmiş olan RMR sınıflamasında destek önerileri 10 m'lik açıklıklar ile sınırlıdır. Bu açıklamalar bağlamında, her iki sınıflamanın güçlü yönleri birleştirilerek, tünel destekleme tasarımında birlikte kullanılmaları daha sağlıklı veriler sağlar. Tünel açımı sırasında yapılacak gözlemlerle ve deformasyon ölçümleri ile denetlenen NATM, tanımsal niteliği gereği, Q ve RMR sınıflamalarına göre çok daha öznel jeoteknik verilere dayanmaktadır.

Bu projede, kayaçların kütle özellikleri; Q ve RMR sınıflamalarına göre belirlenmiş ve Q, RMR ve NATM sınıflandırmalarına göre destekleme sistemleri belirlenmiştir.

Tünelin giriş çıkış portalları ve tünel kesimlerinde jeolojik birim değişmemektedir. Bu nedenle portallar ve tünel kesimi için tek Q kaya sınıflaması yapılmıştır. Bu sınıflamanın sonucunda, tavan ve duvarları için destekleme önerileri sunulmuştur.

Duvar destek tasarım önerileri için özgün Q değerleri bağlamında, aşağıdaki bağlantılar kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} Q > 10 & \quad \text{ise} \quad \rightarrow \quad Q_{\text{duvar}} = 5 \times Q_{\text{hesaplanan}} \\ 0.1 < Q < 10 & \quad \text{arasında ise} \quad \rightarrow \quad Q_{\text{duvar}} = 2.5 \times Q_{\text{hesaplanan}} \end{aligned}$$

Hesaplamalarda kullanılan RQD değeri için, tünel kesimi + tünel tavanından itibaren tünel yüksekliğinin 3 katı kadar olan kesimde kesilen birimlerin ortalama RDQ değeri alınmıştır.

Q sisteminde kazı destekleme sistemlerinin belirlenmesi için öncelikle "Eşdeğer Boyut - De" aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

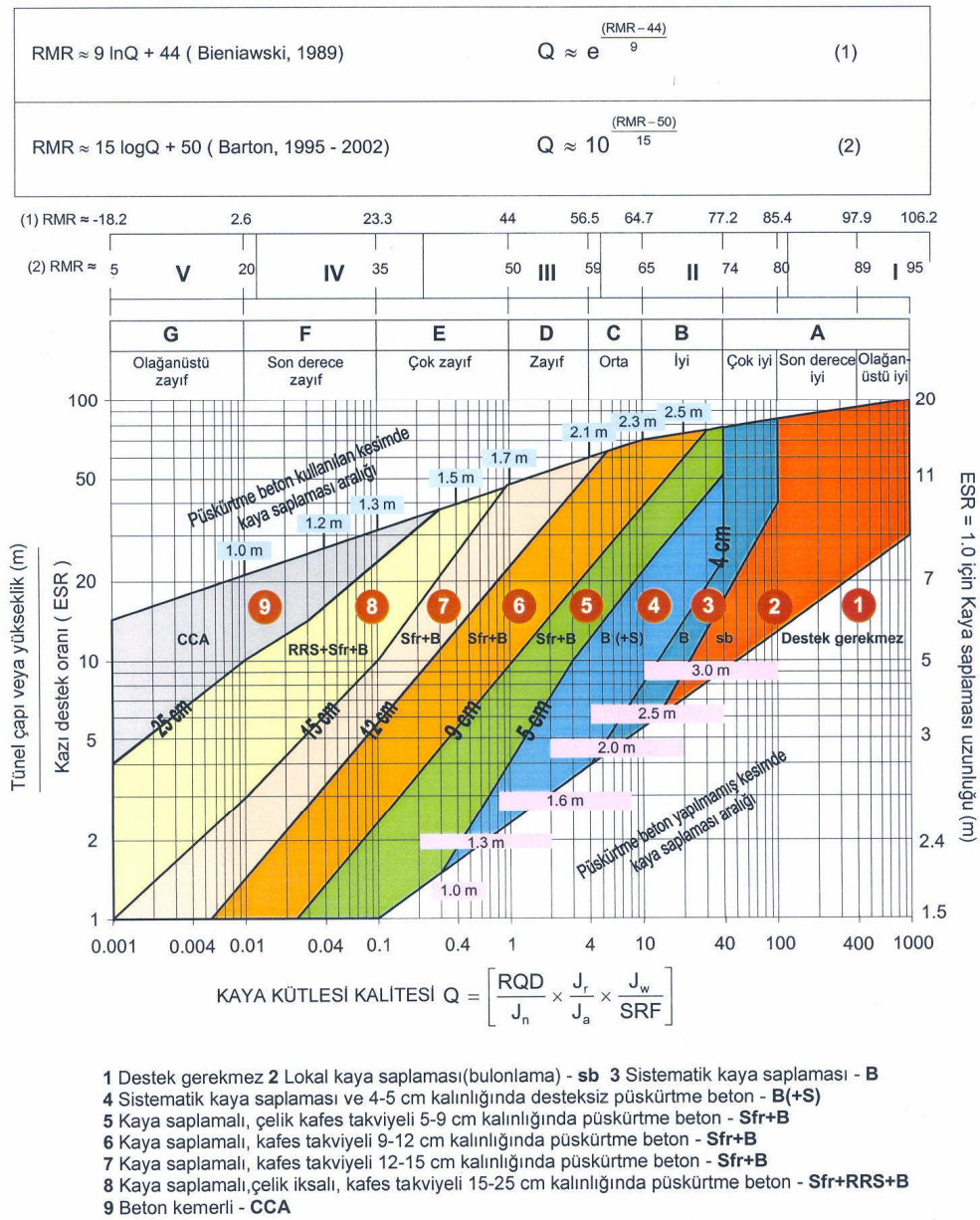
$$\text{Eşdeğer boyut (De)} = \frac{\text{Kazı eni, çapı veya yüksekliği (m)}}{\text{Kazı destek oranı - ESR}}$$

Q sınıflamasının değişkenleri, kayaçların kütle ve örnek özellikleri birlikte yorumlanarak saptanmıştır. Bu değişkenler portal ve tünel kesimleri için ayrı ayrı belirlenmiştir. Portal kesimi olarak, tünel üstündeki et kalınlığının tünel açıklığının üç katına eriştiği kesimler için kullanılmıştır.

"Kazı destek oranı - ESR" Enerji santralleri, karayolu ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, tünel ağızları ve yeraltında birbirini kesen açıklıkların kesişme yerleri için 1 kabul edilmektedir. ESR değeri (=1) ve tünel yüksekliği (=7.50) yardımıyla Eşdeğer boyut (De) = 7.50 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan (De) ve (Q) değerleri ile Şekil 5.3'de sunulan

abak yardımıyla destek sistemleri belirlenmiştir.

Aynı kesimde yer alan duvarlara ait Q değerleri, tavan Q değerlerine göre daha büyüktür. Bu nedenle “Desteksiz Kazılabilecek En Büyük Açıklık – B_{max} (m)” duvarlara göre daha duraysız olan tavanların Q değerlerine göre hesaplanmıştır.



Şekil 5.3. Q kaya kütlesi sınıflandırma sistemi destekleme türleri [6]

Q sınıflaması için kullanılan değişkenler ile hesaplanan Q değerleri ve destek sistemi Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Derivasyon tüneli için hesaplanan Q değeri

DERİVASYON TÜNELİ		Q Parametreleri						Hesapla- nan Q Değeri	Kaya Niteli- ği	Destek- leme Sınıfı	B _{max} (m)
		RQD (ort)	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF				
Portallar (2xJn)	Tavan	10	12	1.5	4	1	2.5	0.125	E	7	0.90
	Duvar	$0.1 < Q < 10 \rightarrow Q_{\text{duvar}} = 2.5 \times Q_{\text{hesaplanan}}$						0.30	E	6	-
Tünel Kesimi	Tavan	10	6	1.5	4	1	2.5	0.25	E	6	1.10
	Duvar	$0.1 < Q < 10 \rightarrow Q_{\text{duvar}} = 2.5 \times Q_{\text{hesaplanan}}$						0.625	E	5	-

Kaya Kütlesi Niteliği (Q) değerlerine karşılık Eş Değer Boyut (De) değerleri kullanılarak logaritmik ölçekle hazırlanmış olan diyagram yardımıyla derivasyon tüneline destekleme türleri araştırılmıştır. Buna göre mikaşistler 5. grupta (E) “çok zayıf kaya” olarak yer almaktadır (Şekil 5.3).

Yukarıdaki açıklamalardan sonra, kaya saplamaların uzunlukları ile saplama aralıkları Şekil 5.3’de sunulan abak ve eşitlikler yardımıyla bulunmuştur. Bu değerler, destek sistemleri açıklamalarının da yer aldığı Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Bu projenin sayısal çözümlemelerinde kullanılan RMR değerleri, Barton (1993) ve Bieniawski (1989) formülleri ile verilen bağlantılardan bulunan RMR değerlerinin ortalamalarıdır. Ortalama RMR değerleri kullanılarak RMR kaya sınıfları belirlenmiştir. Derivasyon tüneli için Q ve RMR kaya sınıflamalarının ilişkileri çizelge 5.4 de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Q Kaya sistemine göre önerilen destek sistemleri önerileri

Destekleme Sınıfı	Q Sistemine göre önerilen destekleme
5	Merkezden merkeze (M/M) 2.0 m aralıklı, Ø26mm ve L=4m uzunluğunda, sistematik kaya saplamalı, çelik kafes ile destekli 5+5 cm kalınlığında 2 kat püskürtme beton
6	Merkezden merkeze (M/M) 1.5 m aralıklı, Ø26mm ve L=4m uzunluğunda, sistematik kaya saplamalı, çelik kafes ile destekli 15 cm (7.5+7.5) kalınlığında 2 kat püskürtme beton
7	Merkezden merkeze (M/M) 1.5 m aralıklı, Ø26mm ve L=4m uzunluğunda, sistematik kaya saplamalı, çelik kafes ile destekli 5+5+5 cm kalınlığında 3 kat püskürtme beton, gerekli yerlerde çelik iksa

Çizelge 5.4. Derivasyon tüneli Q ve RMR kaya sınıflaması ilişkileri

DERİVASYON TÜNELİ		Hesaplanan Q Değeri	Barton'a göre RMR Değeri	Bieniawski'ye göre RMR Değeri	Ortalama RMR değeri	KAYA SINIFI
PORTALLAR (2xJn)	Tavan	0.125	36.45	25.29	30.87	IV (Zayıf Kaya)
	Duvar	0.30	42.16	33.16	37.66	IV (Zayıf Kaya)
TÜNEL KESİMİ	Tavan	0.25	40.97	31.52	36.25	IV (Zayıf Kaya)
	Duvar	0.625	46.94	39.77	43.35	III (Orta Kaya)

RMR Sınıflamasına göre destekleme türleri belirlenmiş, tünel kesimlerinde yer alan kayaların genel özellikleri ile birlikte Çizelge 5.5'de sunulmuştur.

Çizelge 5.5. RMR sınıflamasına göre tünel destek sistemleri önerileri

RMR KAYA SINIFI	III (Orta Kaya) En düşük RMR :43	IV (Zayıf Kaya) En düşük RMR :30
Tek Eksenli Basma Dayanımı (Mpa)	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa
Kohezyon c (Mpa)	0.20 – 0.30	0.20 – 0.30
İçsel Sürtünme Açısı ϕ (°)	25 - 35	15 - 25
Ortalama Duraylılık Süresi	5 m açıklık için 1 hafta	2.5 m açıklık için 10 saat
Desteksiz Kazılabilecek En Büyük Açıklık (m)	1.7	1.0
Kazı	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme Tavandan 1.5 - 3 m ilerleme. Komple destek (Aynaya 10 m mesafeye kadar gerekli)	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme Tavandan 1.5 - 3 m ilerleme. Komple destek (Aynaya 10 m mesafeye kadar gerekli)
RMR Sistemine Göre Destek Sistemi Önerileri	Sistematik olarak Ø26mm, L=4m uzunluğunda, 1.5 – 2 m aralıklarla tel kafesle destekli saplama + 10 cm kalınlığında iki kat (5+5 cm), püskürtme beton	Sistematik olarak Ø26mm, L=4-5 m uzunluğunda, 1-1.5 m aralıkla tel kafes destekli saplama + 15 cm kalınlığında 3 kat püskürtme beton + Gerektiğinde çelik iksa (aralık 1.5 m.)

Derivasyon tüneli için portal ve tünel kesimleri için göre ayrı ayrı NATM kaya sınıflaması yapılmıştır (Çizelge 5.6).

Bu değerlendirmeler sonucunda, NATM sınıflandırmasına göre tünelde B3 sınıfı kaya kütlelerinin olduğu anlaşılmaktadır. Bu sınıfa ait özellikler ve NATM destekleme sistemleri önerileri belirlenmiş ve Çizelge 5.7’de sunulmuştur

Çizelge 5.6. Derivasyon tüneli NATM kaya sınıflaması

DERİVASYON TÜNELİ		Hesaplanan Q Değeri	Ortalama RMR değeri	NATM Sınıfı	NATM'e Göre Kaya Türü
PORTALLAR (2xJn)	Tavan	0.125	30.87	B3	Taneli
	Duvar	0.30	37.66	B3	Taneli
TÜNEL KESİMİ	Tavan	0.25	36.25	B3	Taneli
	Duvar	0.625	43.35	B3	Taneli

Çizelge 5.7. NATM kaya sınıflaması destek sistemleri önerileri

NATM Kaya Sınıfı	B3
Kazı Aşaması	İki aşamalı alt ve üst yarı kazısı
Kazı Yöntemi	Delme-düzgün patlatma, gerektiğinde mekanik kazı
Raunt Uzunluğu	Üst yarıda 1.5-2 m. Alt yarıda en çok 3 m
Duraylılık Süresi	5 saatten az
Destek Zamanı	Destek aynanın hemen gerisinde uygulanacaktır. Kaya kütlelerini iyileştirici, desteksiz durma süresini artırıcı önlemler alınacak, üst yarıda taşıma gövdesi (topuk) bırakılacaktır.
NATM Sistemine Göre Destek Sistemi Önerileri	1 m aralıklarla, Ø26 mm, L=4-6m uzunluğunda, 2 kat tel kafesle destekli sistematik kaya bulonu, 20 cm (7.5+7.5+5cm) kalınlığında üç kat püskürtme beton, I140/100 çelik iksa. Gerektiğinde süren (Ø26 L=4 m aralık 0.4 m), aynada taşıma gövdesi (topuk)

RMR ve Q değerleri ile deformasyon modülü (E_{mass}) arasında bağıntı kurulabilir. RMR sisteminde, Deformasyon modülü E_{mass} 1978 yılında ilk defa $E_{mass} = 2RMR - 100$ (GPa) eşitliği ile ele alınmıştır. Ancak bu eşitlik $RMR > 50$ olması koşulunda geçerlidir. Bundan dolayı, Serafim ve Pereira (1983) tarafından $RMR < 50$ koşulu için, $E_{mass} = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$ (GPa) eşitliği

verilmiştir. Deformasyon modülü Barton (1980) tarafından Q sisteminde, $E_{mass} = 25 \log_{10} Q$ (GPa) eşitliği ile açıklamıştır. Fakat bu eşitlik $Q > 1$ koşulunda geçerlidir. Hesaplanan Q değerlerinin hepsi 1'den küçük olduğu için sadece RMR kullanılarak deformasyon modülü hesaplanmıştır. RMR değerleri ile kullanılarak yapılan hesaplamalar ise $RMR < 50$ koşuluna uygun olarak yapılmıştır (Çizelge 5.8)

Çizelge 5.8. Q ve RMR değerlerine göre deformasyon modül değerleri

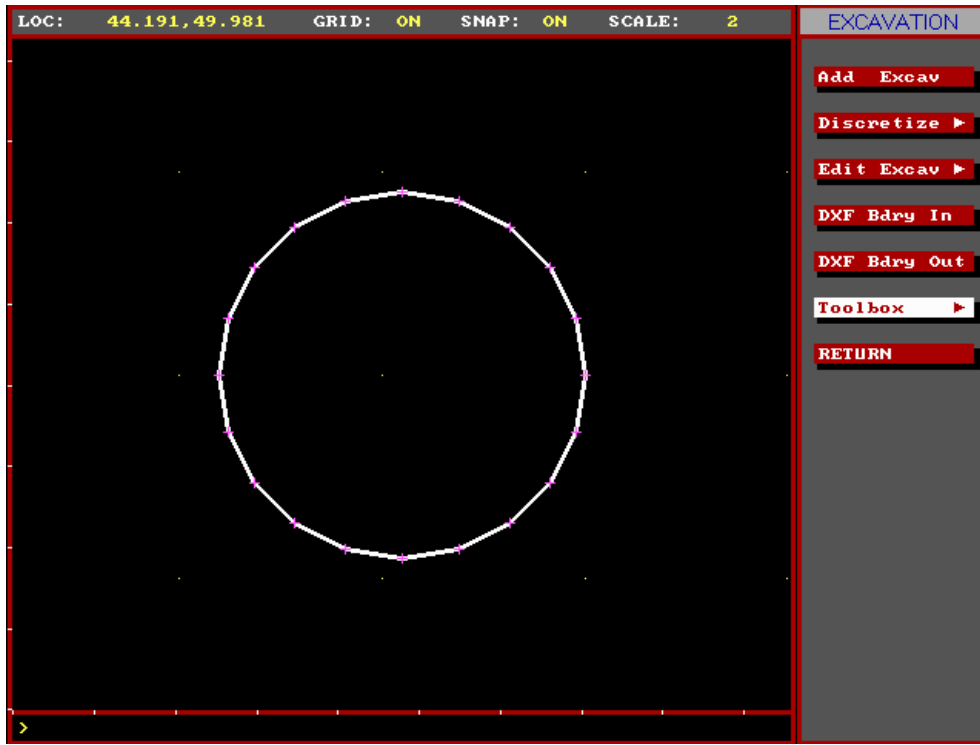
Yeri		ORTALAMA RMR	RMR Değerlerine Göre
			E (MPa)
Portallar	Tavan	31	3 325
	Duvar	38	4 915
Tünel Kesimi	Tavan	36	4 531
	Duvar	43	6 821

5.5. Phases 2D Programı İle Modellemenin Yapılması

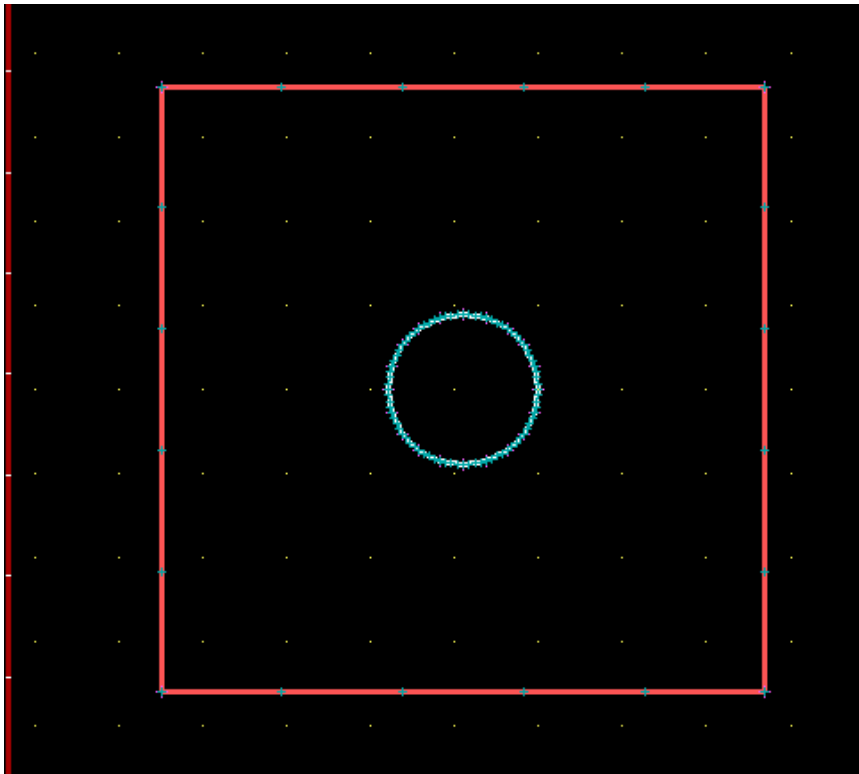
Tünelin modellenmesi yer altı açıklığında oluşan gerilme ve deplasmanların sonlu elemanlar yöntemine göre çalışan Phases 2D programı ile hesaplanması şeklinde yapılmıştır.

Programda modelleme Mohr-Coulomb elasto-plastik malzeme modeline göre yapılmıştır.

Şekil 5.4'da tünel kesitinin çizilmesi, Şekil 5.5'de çizilen tünel kesitinin dikdörtgen bir sınır içine alınması gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Tünel kesitinin çizilmesi



Şekil 5.5. Tünel kesitinin bir sınır içine alınması

Modellemenin yapılması için girilen giriş verileri aşağıda verilmiştir.

Tünel kesitinde:

İç çapı (Diç)= 7,50 m

Dış çap(Ddış)= 9,10 m

Beton kalınlığı= 0,80 m

Püskürtme betonu= 0,10 m

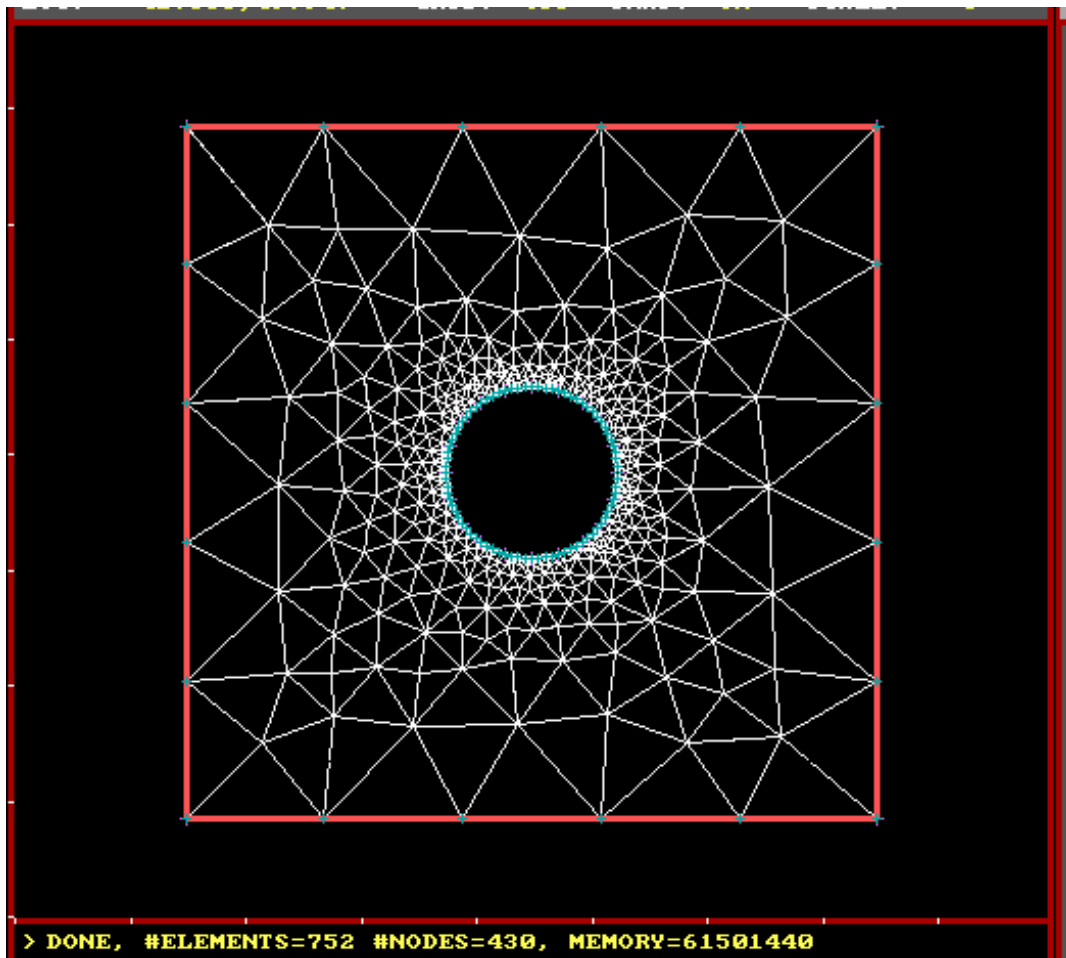
A-B hatları mesafesi= 0,15 m

Kohezyon (c) = 0,3 MPa

İçsel sürtünme açısı = 35°

Poisson oranı = 0,2

Birim hacim ağırlık = 27 kN/m³

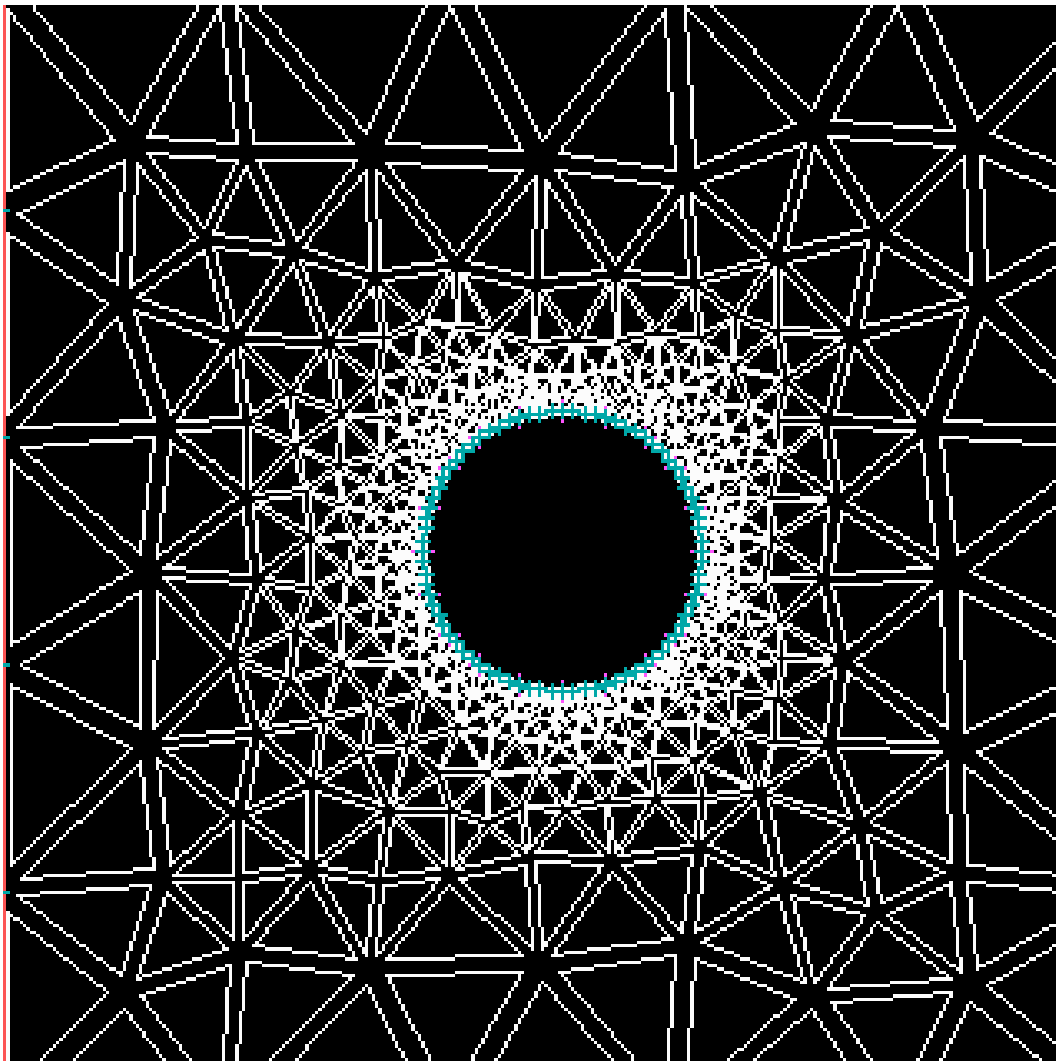


Şekil 5.6. Sonlu elemanların oluşturulması

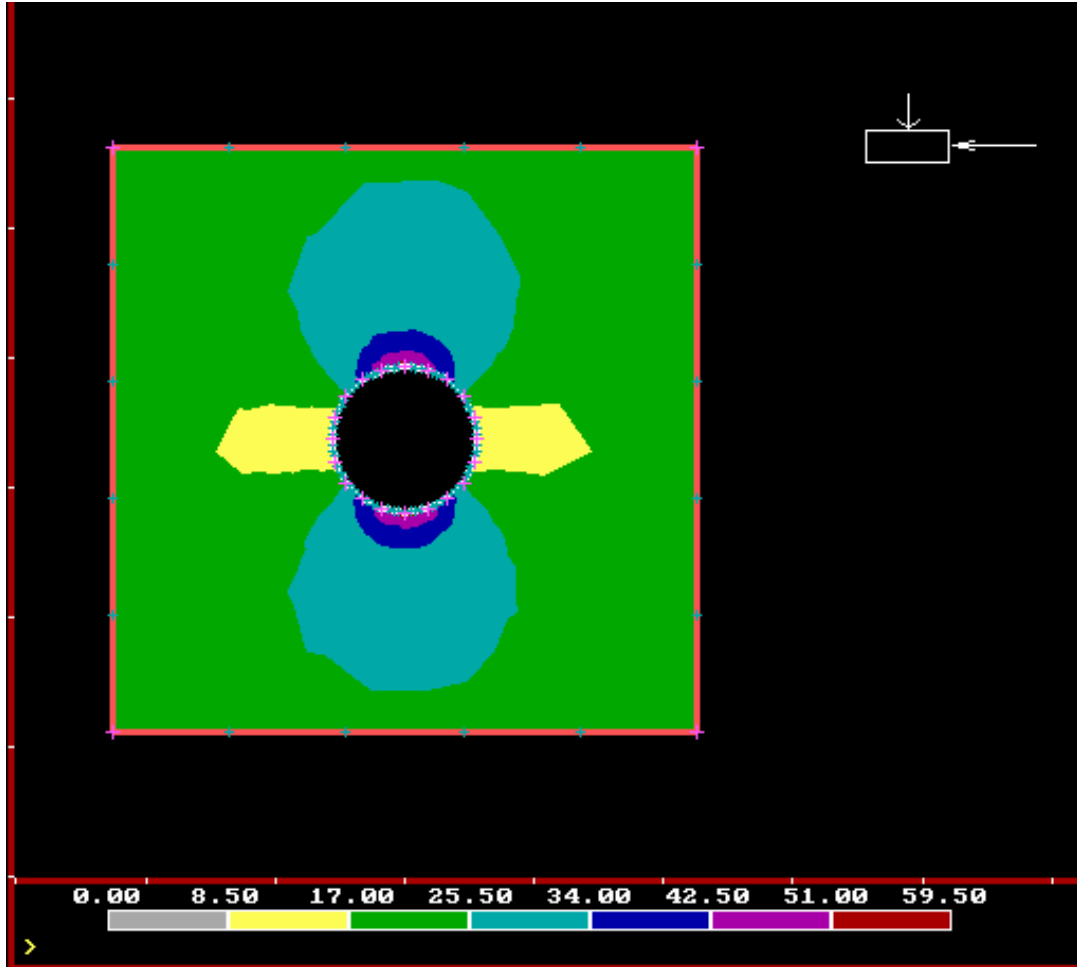
Çizilen tünel kesitinin etrafı sınır içine alındıktan sonra sonlu elemanlar oluşturulmuştur (şekil 5.6). Oluşturulan bu sonlu elemanlar 430 düğüm noktasından birbirlerine bağlanmaktadır.

Bu düğüm noktaları yardımıyla sistemin çözümüne gidilecektir. Program her bir düğüm noktası için gerilme ve deformasyon değerlerini ayrı ayrı hesaplamaktadır.

şekil 5.7’da oluşturulan sonlu elemanlar ve düğüm noktalarının yakından görünüşü gösterilmiştir.



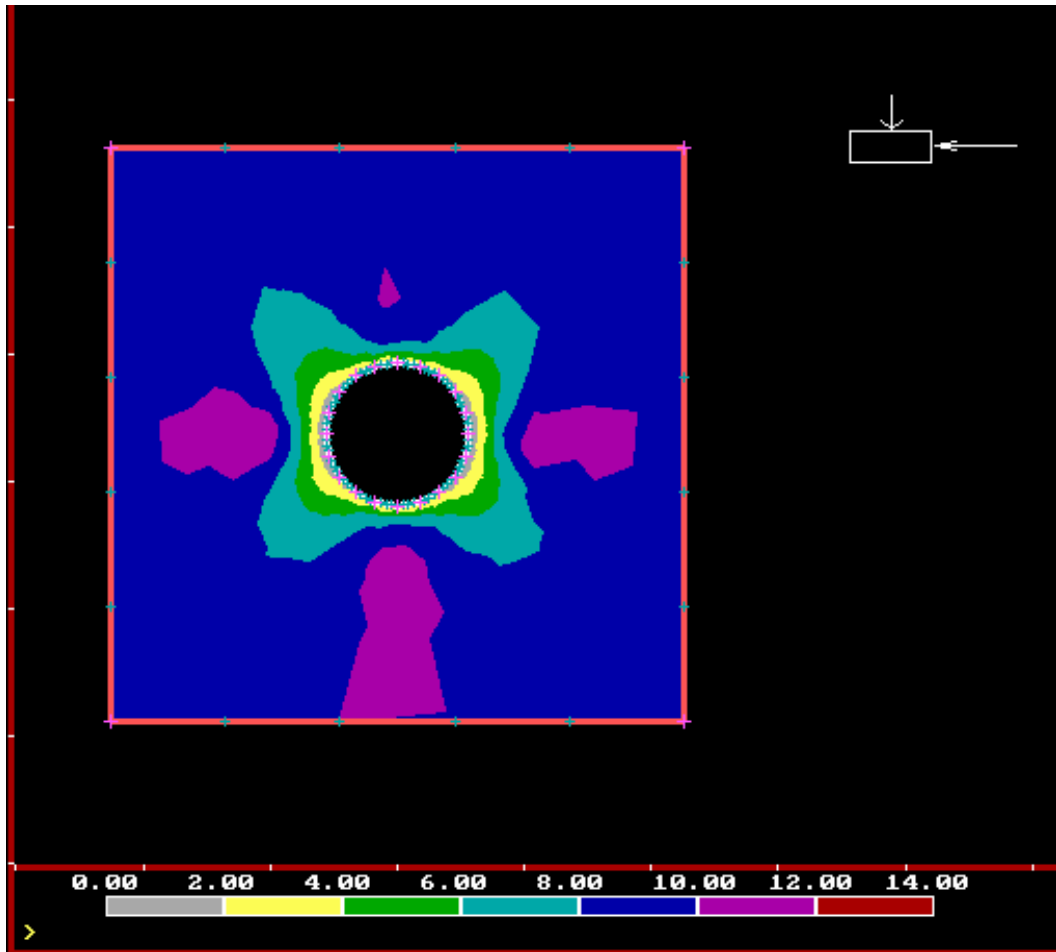
şekil 5.7. Oluşturulan sonlu elemanlar ve düğüm noktalarının yakından görünüşü



Şekil 5.8. σ_1 asal gerilmeleri

Şekil 5.8 incelenecek olursa, sarı renkli kısımlara 8,5 - 17 MPa, yeşil renk ile temsil edilen bölgelere ise 17 - 25 MPa, mavi kısımlara 34 - 42,5 MPa, mor kısımlara da 42,5 – 51 MPa düşey yönde yük geleceği görülmektedir.

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi tünele düşey yönde gelen en büyük gerilme mor renk ile temsil edilmiştir. Bu yük bindirmeleri en fazla tünel tavan ve tabanında hissedilmektedir.



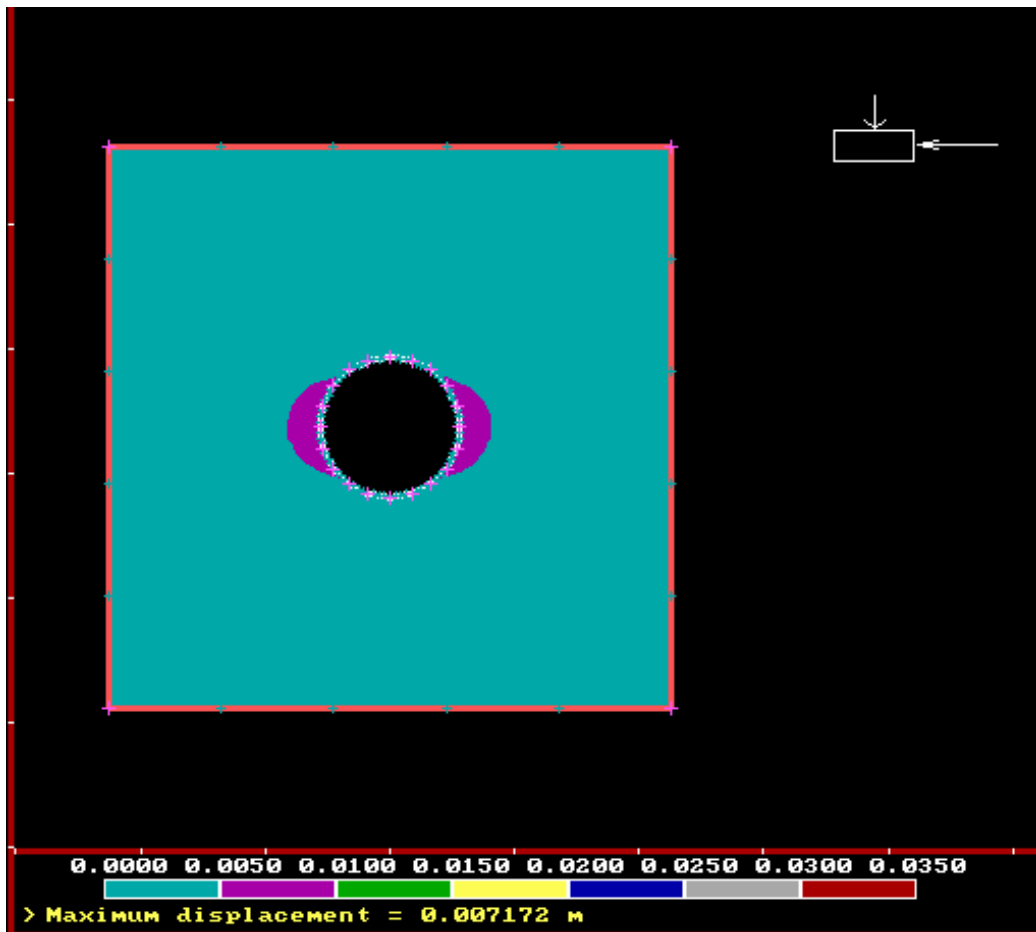
Şekil 5.9. σ_3 asal gerilmeleri

Şekil 5.9 incelenecek olursa, sarı renkli kısımlara 2 - 4 MPa, yeşil renk ile temsil edilen bölgelere ise 4 - 6 MPa, turkuaz kısımlara 6 - 8 MPa, mavi kısımlara 8 - 10 MPa ve mor kısımlara da 10 - 12 MPa yatay yönde yük geleceği görülmektedir.

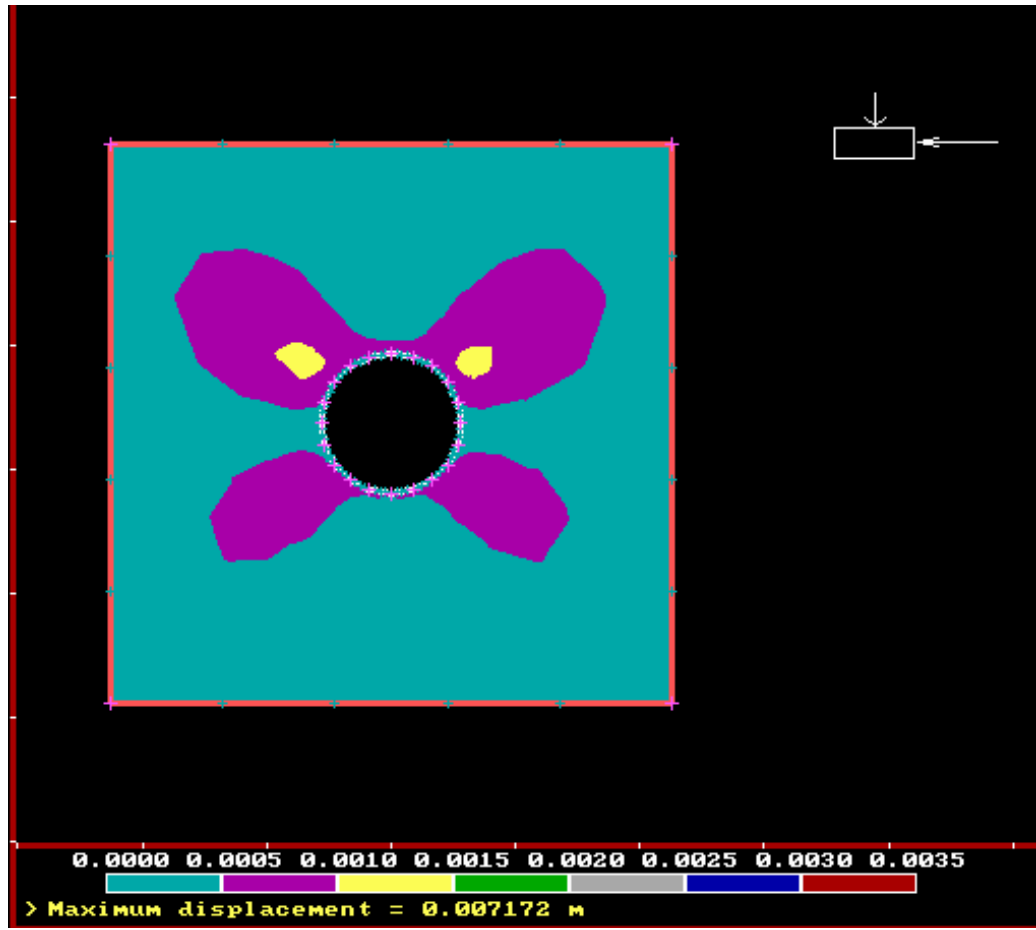
Şekil 5.9'da görüldüğü gibi tünele yatay yönde gelen en büyük gerilme mor renk ile temsil edilmiştir. Bu yük bindirmeleri direkt olarak tünel kesiti ile temas etmemektedir.

Şekil 5.10'da x yönündeki yer değiştirmeler ve Şekil 5.11'de ise y yönündeki yer değiştirmeler gösterilmiştir. Yapılan modelleme sonucunda Şekil 5.10'da

mor renk ile gösterilen bölgede 7,1 mm, Şekil 5.11'de ise 1,5 mm yer değiştirme meydana gelmiştir. Buna göre en büyük yer değiştirmenin 7,2 mm ile Şekil 5.10'da x yönünde meydana geldiği görülmektedir. Mor renk ile temsil edilen yerlerde görülen yer değiştirmenin çok büyük bir sorun yaratmayacağı düşünülebilse de kazı sırasında önlem almak gerekebilecektir.



Şekil 5.10. x yönündeki yer değiştirmeler



Şekil 5.11. y yönündeki yer değiştirmeler

6. SONUÇ

Gelişen teknolojiye paralel olarak hem tünel açma yöntemleri, hem de analiz yöntemleri hızla gelişmektedir. Bu gelişmeler ışığında yapılan modellemeler ve incelemeler tünellerin inşasının ve de kullanımının güvenli, ekonomik ve olabildiğince sorunsuz olmasını sağlamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi pek çok geoteknik problemin çözümünde olduğu gibi tünel mühendisliği hesaplamalarında da gelişen bilgisayar teknolojisine paralel olarak önem kazanmış ve gelişmiştir. Tünel mühendisliğinde bu yöntem ile geometrik açıdan çok karmaşık olabilen tüneller heterojen malzeme özellikleri ile birlikte modellenebilmektedir.

Bu çalışmanın hazırlanabilmesi için sırasıyla sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme ve bu yöntemle göre çalışan Phases programı kullanılmıştır. Deliballılar Barajı derivasyon tünellerinde uygulama yapılarak çözüme gidilmiştir.

Temel sondaj verileri ve yüzeysel gözlemler kullanılarak jeolojik kesit hazırlanmış ve tünelin açılacağı grafitli mikaşist için Q ve RMR geomekanik sınıflamaları yapılmıştır. Yapılan sınıflamalara göre Q değeri tünel tavanında 0,25 duvarda 0,625; RMR değeri ise tünel tavanında 36 duvarda ise 43 olarak bulunmuştur. Yapılan çalışmalara göre derivasyon tünelinin giriş ve çıkış portalları ve tünel kesiminde jeolojik birim değişmemektedir. Bu nedenle portallar ve tünel kesimi için tek Q sınıflaması yapılmıştır.

Tüneli temsil eden sondaj verilerine göre tamamen grafitli mikaşist ve mikaşistlerde açılacak olan Deliballılar barajı derivasyon tünelleri için yapılan analizler sonucunda derivasyon tüneline oluşabilecek gerilme ve deformasyonlar bulunmuştur. Tünelde düşey ve yatay doğrultuda oluşan deformasyonlar 0,5 mm ile 7,2 mm arasında değişmektedir. Maksimum eksenel gerilmenin 8,5 MPa – 51 MPa ve minimum asal gerilmenin ise 2 - 12 MPa arasında değiştiği görülmüştür.

Bu çalışma, tünelin incelenen kesimi için kaya davranışının ve uygun tahkimat sisteminin belirlenmesi için genel bir yaklaşım getirmektedir. Varılan sonuçlar fizibilite aşaması için yapılan araştırmalardan elde edilen kayaç kütlesinin mevcut koşulları için geçerlidir. Kazı esnasındaki durum ve koşullara göre kaya sınıfı değişebileceğinden, analizler sonucu bulunan yer değiştirme özellikleri de değişebilecektir. Kayaç koşullarında meydana gelebilecek değişiklikler göz önüne alındığında uygulama projesi yapılırken ve yapıma geçmeden önce laboratuvar çalışmalarının detaylandırıp güncelleştirilmesi ve tünelin 3-D modellemesinin yapılması yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Epstein, S.B., "Tunnels" **Little Brown Company**, USA, 3-76 (1985).
2. Terzaghi, K., "Rock defects and loads on tunnel support", In Rock tunnelling with steel supports, **Commercial Shearing and Stamping Company**, 17-99 (1946).
3. Karaoğlu H., "Kaya zeminde tünel tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 10-18, 35-49 (2002).
4. Bieniawski, Z.T., "Engineering rock mass classifications" **John Willey and Sons**, Newyork, 10-137 (1989).
5. Barton,N., Lien, R., Lunde, J., "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support" **Rock Mechanics 6**, 189-243 (1974).
6. Grimstad, E., Barton, N., "Updating the Q-system for NMT" **Proceeding international symposium on sprayed concrete**, 44-66 (1993).
7. Bieniawski, Z.T., "Engineering classification of jointed rock masses" **Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs 15**, 335-344 (1973).
8. Çakan, A.G., "Analysis of tunnel advance in soft ground using finite element method, a case study on Bolu tunnels", Yüksek Lisans Tezi, **Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 24-66 (2000).
9. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Gen.Md., "Deliballılar Barajı ve HES Mühendislik Jeolojisi Raporu", **Eİİ Gen.Md.**, Ankara, 34-44 (2005).
10. Barton, N., "Some new Q-value correlation to assist in site characterisation and tunnel design", **International journal of rock mechanics & mining sciences 39**, 185-219 (2002).
11. Hoek, E., "In situ and induced stresses", Practical Rock Engineering, **Evert Hoek Consulting Engineering**, Canada, 137-160 (2000).
12. Giani, G.P., Ferrero A.M., "Numerical modelling for tunnel and mine design", Soil structure interaction: numerical analysis and modelling, **E&FN Spon**, London, 359-395 (1994).
13. Brady B.H.G., "Stress analysis for rock masses", Engineering in Rock Masses, **Butterworth Heinemann Ltd**, 117-133 (1992).

14. Gnisen, R. "Numerical methods", Underground structures design and instrumentation, **Elsevier Science Publishers B.V.**, Netherlands, 84-127 (1989).
15. Dudgeon, H., "Tunnelling in rock masses", Engineering in Rock Masses, **Butterworth Heinemann Ltd**, 423-439 (1992).
16. Bahar, M.A., "Tünellerde, Ön Araştırma, Zemin İyileştirmesi ve Stabilité Analizleri" Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 50-66 (1994).
17. Egger, P., "Design and construction aspect of deep tunnels" **Tunnelling and underground space technology** 15, 403-408, (2000).
18. Hoek, E., "Big tunnel in bad rock" **The journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, 726-740 (2001).
19. Farias, M.M., vd., "Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations", **Tunnelling and underground space technology** 19, 283-293 (2004).
20. Zienkiewicz, O.C., "Finite element method", **McGraw-Hill**, London, 20-42, 93-118 (1977).
21. Azizi, F., "Finite element modelling in geotechnics", Applied analyses in geotechnics, **E & FN Spon**, London, 713-741 (2000).
22. Clough, R.W., Woodward, R.J., "Analysis of embankment stress and deformation", Journal of soil mechanics and foundation division, **ASCE** 93, 529-549 (1967).
23. Reyes, S.F. ve Deene, "Elastic stress analysis of underground openings by the finite element method", **1 st congress of the international society of rock mechanics**, Lisbon, 477-486 (1966).
24. Hoek, E., Carvalho, J.L. ve Corcum, B.T., "Phases 2D program manual", **University of Toronto**, 6-69 (1993).
25. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Gen.Md., "Deliballılar Barajı ve HES yapılabirlik Raporu", **Eİİ Gen.Md.**, Ankara, 6.1-6.39 (2006).
26. Şentürk F., "Hydraulics of diversion structures" Hydraulics of dams and reservoirs, **Water resources publications**, 505-563 (1995).

EKLER

EK-1 Sondaj logları

KUYU LOGLARI İÇİN TANIMLAMA
1-TANIMLAMADA GÖZÖNÜNDE TUTULMASI GEREKEN BİLGİLER
A-KAYAÇ MALZEMESİNİN TANIMLANMASI:

RENK			TANE BOYU	DOKU	FABRİK
1	2	3			
Açık Koyu	Pembemsi Kırmızımsı Sarımsı Kahverengimsi Zeytuni Yeşilimsi Mavimsi Griimsi	Pembe Kırmızı Sarı Kahverengi Zeytuni Yeşil Mavi Gri Beyaz Siyah	Çok Kaba Taneli > 60 mm Kaba Taneli 60-2 mm Orta Taneli 2 mm-60µ İnce Taneli 60-2µ Çok İnce Taneli < 2µ	Porfirik Kristalen Kriptokristalen Taneli Şekilsiz Camsı	Masif Tabakalı Klivalı Şistli Foliasyonlu Akma Yapılı Gnaysik Diğerleri

ATMOSFERİK AYRISMA VE DEĞİŞME DERECELERİ			KAYAÇ MALZEMESİNİN DİRENCİ		
TAZE	I	Kayaç malzemesinde ayrışmaya ilişkin hafif renk bozulması dışında görülebilir bir belirti yok.	TERİM	Tek Eksenli Basınç Direnci MN/m ²	Sertliğin Arazide Tanımı
AZ AYRIŞMIŞ	II	Tüm kayaç malzemesinin rengi ayrışma etkisiyle bozulmuş ve malzeme taze durumuna göre oldukça zayıflamış olabilir.	ÇOK YÜKSEK	> 100	Çok sert kayaç, numuneyi kırmak için birden fazla çekiç darbesi gerekir.
ORTA DERECEDE AYRIŞMIŞ	III	Kayaç malzemesinin yarısından daha az bir kısmı zemin oluşturacak şekilde bozulmuş ve/veya parçalanmıştır. Taze ve rengi bozulmuş kaya ya bir arada sürekli ya da aralıklıdır.	YÜKSEK	50-100	Sert kayaç. Elde tutulan numune tek bir çekiç darbesiyle kırılabilir.
ÇOK AYRIŞMIŞ	IV	Kayaç malzemesinin yarısından fazlası zemin oluşturacak şekilde bozulmuş ve/veya parçalanmıştır. Taze ve rengi bozulmuş kaya ya bir arada sürekli ya da aralıklıdır.	ORTA YÜKSEK	50-12,5	Yumuşak kayaç. Çekicin sivri ucu ile 5 mm'lik çentik açılabilir.
TÜMÜYLE AYRIŞMIŞ	V	Tüm kayaç malzemesi zemin oluşturacak şekilde bozulmuş ve/veya parçalanmıştır. Kayaç ana yapısı, yine de büyük ölçüde sağlamdır.	ORTA	12,5-5	Elle üç eksenli bir numune elde etmek çok zor.
TAŞINMAMIŞ ZEMİN	VI	Tüm kayaç malzemesi zemine dönüşmüştür. Kütleli yapısı ve malzemenin fabrikası bozulmuştur. Hacimde büyük değişiklik olmakla birlikte, zemin önemli derecede taşınmamıştır.	DÜŞÜK	5-1,25	Çok yumuşak kayaç malzeme, çekiçle yapılan kuvvetli bir vuruşla ufalanır.
			ÇOK DÜŞÜK	< 1,25	Gevrek ve/veya elle kırılmaya karşı dayanıklı.

B- KAYA KÜTLESİNİN TANIMLAMASI:

Bu bölümde yalnızca süreksizlikler ele alınmıştır.

SÜREKSİZLİKLER: Cinsi, eklem takımı sayısı, yeri ve konumu, aralığı ve sıklığı, açıklığı, dolgu durumu, pürüzlülüğü ve ek bilgileri.

CİNSİ	SÜREKSİZLİK ARALIKLARI	Eklem Sıklığı (1 m'deki Eklem Sayısı)	SÜREKSİZLİK YÜZEYLERİNİN AÇIKLIĞI	PÜRÜZLÜLÜK
FAY	AŞIRI GENİŞ > 2 m	ÇOK SEYREK 0	GENİŞ > 20 cm	CİLALI
EKLEM	ÇOK GENİŞ 2 m-60 cm	SEYREK 0-2	ORTA GENİŞ 20-6 cm	SÜRTÜNME İZLİ
TABAKALANMA	GENİŞ 60-20 cm	ORTA SIK 2-5	ORTA DAR 6-2 cm	PÜRÜZSÜZ
YAPRAKLANMA	ORTA GENİŞ 20-6 cm	SIK 5-20	DAR 2 cm-6 mm	PÜRÜZLÜ
AMİNALANMA	ORTA DAR 6-2 cm	ÇOK SIK > 20	ÇOK DAR 6-2 mm	BELİRGİN SIRTILI
DAMAR	DAR 2 cm-6 mm		AŞIRI DAR 2-0 mm	KÜÇÜK BASAMAKLI
	ÇOK DAR < 6 mm		KAPALI 0 mm	ÇOK PÜRÜZLÜ

2- LOG ÇİZİMİ İÇİN AÇIKLAMA

RQD (KAYA KALİTESİ)	Eklem Sıklığı	GEÇİRLİLİK	AYRISMA DERECESESİ	GÜNLÜK DURUM		"Günlük İlerleme" sütunu, tarih ve su seviyesini birlikte içerir. "Su seviyesi", günlük olarak yapılan gözlemlerden, sabah yapılanı temel alınarak belirlenir. Su seviyeleri, "Su Seviyesi" sütununda numaralandırılır ve "Günlük İlerleme" sütununda ilgili tarihin altına yazılır.
ÇOK İYİ % 90-100	ÇOK SEYREK	GEÇİRLİSİZ < 1 LUGEON	TAZE I	Günlük İlerleme	Su Seviyesi	
İYİ % 75-90	SEYREK	AZ GEÇİRLİ 1-5 LUGEON	AZ AYRIŞMIŞ II			
ORTA % 50-75	ORTA SIK	GEÇİRLİ 5-25 LUGEON	ORTA DERECEDE AYRIŞMIŞ III			
KÖTÜ % 25-50	SIK	ÇOK GEÇİRLİ > 25 LUGEON	ÇOK AYRIŞMIŞ IV			
ÇOK KÖTÜ < %25	ÇOK SIK		TÜMÜYLE AYRIŞMIŞ V			
			TAŞINMIŞ ZEMİN VI			
				04.08	2	

Not: Kuyu logları için düzenlenen bu açıklama İngiltere Jeoloji Kurumunca 1977 yılında yayınlanan "The Quarterly Journal of Engineering Geology" dergisinin Cilt 10, Sayı 4, Sayfa 355-388'deki "The Description of Rock Masses for Engineering Purposes" adlı makalesinden yararlanılarak hazırlanmıştır.

EK-1 (Devam) Sondaj logları

[illegible]

EK-1 (Devam) Sondaj logları

EİE		ELEKTRİK İŞLERİ ETÜT İDARESİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ ELECTRICAL POWER RESOURCES SURVEY AND DEVELOPMENT ADMINISTRATION		JEOLJİ VE SONDAJ DAİRESİ BAŞKANLIĞI GEOLOGY AND DRILLING DEPARTMENT		KUYU LOGU GEOLOGIC LOG OF BOREHOLE													
PROJE Project		: DELİBALLILAR BARAJ VE HES		KOORDİNATLAR Coordinates		X : 4422317 Y : 415998													
YERİ Location		: Derivasyon Tüneli Girişi - Sol Sahil		YÜKSELTİ, m Elevation		: 374													
BAŞLANGIÇ TARİHİ Date begun		: 06.01.2005		KONUM Bearing and inclination		: Düşey													
BİTİŞ TARİHİ Date finished		: 28.01.2005		KUYU DERİNLİĞİ, m Depth of hole		: 30													
TANIMLAMAYI YAPAN Described by		: B.G. ÖZEL - R. GÜMÜŞBOĞA		SONDÖZ Drilling machine		: D750 DD 3													
LOGU YAPAN Logged by		: H. AKSU - R. ÖZYURT-S. AKSU		SONDÖR Driller		: Kenan YILDIZ													
KUYU NO BOREHOLE No.		: DT-110		SAYFA NO SHEET ... OF...		: 2 / 2													
ÖLÇEK SCALE		: 1/100																	
Derinlik, m Depth	Günlük İlerleme Daily progress	Günlük Durum Daily situation	Kuyu çapı Diameter of borehole	Küçülcü uzun eksen Type of bit	İlerleme hızı (dak.) Duration of progress (min.)	Çalma borusu Drilling pipe	Mühürleme borusu Casing	Sondaj suyu (renk ve %) Water return colour and %	Çimentolama Cementation	Korutma yüzdesi, % Core recovery	RQD	Kaya niteliği Rock quality	Etkem sıklığı Fracture frequency	BASINÇLI SU DENEYİ Water pressure test				TANIMLAMA Description	Formasyon ve simgesi Formation and symbol
	Su seviyesi Groundwater level	Kuyu çapı Diameter of borehole												Küçülcü uzun eksen Type of bit	İlerleme hızı (dak.) Duration of progress (min.)	Çalma borusu Drilling pipe	Mühürleme borusu Casing		
21	25.01 3																		
22																			
23																			
24	26.01 3																		
25																			
26																			
27	27.01 3																		
28																			
29																			
30																			

KUYU SONU

ORHANELİ BİRLİĞİ

Mikagist: Yeşilimsi ve gri renkli, az-orta derecede ayrılmış, sık eklemlili, orta dayanımlı serizit-muskovit gışt.

Grafitli Mikagist: Siyahimsi gri renkli, az-orta derecede ayrılmış, sık eklemlili, orta dayanımlı gışt.

EK-1 (Devam) Sondaj logları

[illegible]

EK-1 (Devam) Sondaj logları

EİE		ELEKTRİK İŞLERİ ETÜT İDARESİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ ELECTRICAL POWER RESOURCES SURVEY AND DEVELOPMENT ADMINISTRATION		JEOLOJİ VE SONDAJ DAİRESİ BAŞKANLIĞI GEOLOGY AND DRILLING DEPARTMENT		KUYU LOGU GEOLOGIC LOG OF BOREHOLE														
PROJE : DELİBALLILAR BARAJ VE HES				KOORDİNATLAR X : 4422260 Y : 416751		KUYU NO BOREHOLE No.														
YER : Dolusavak - Sol Sahil				YÜKSELTİ, m : 427		DS-111														
BAŞLANGIÇ TARİHİ : 03.01.2005				KONUM : Düşey		SAYFA NO SHEET ... OF...														
BİTİŞ TARİHİ : 18.02.2005				KUYU DERİNLİĞİ, m : 75		3 / 4														
TANIMLAMAYI YAPAN : B.G. ÖZEL - R. GÜMÜŞBOĞA				SONDÖZ : XC 90		ÖLÇEK SCALE														
LOGU YAPAN : H. AKSU - S. AKSU				SONDÖR : Fahri KAYA		1/100														
Derinlik, m Depth	Günlük Durum Daily situation	Kuyu çapı Diameter of borehole	Kudajı için elmas Type of bit	İşin ilerlemesi (dakika) Duration of progress (min)	Çalışma durumu Working type	Mühürleme durumu Sealing	Sondaj suyu (renk ve kıvam) Water return color and %	Çimentolama Cementation	Kara yüzdesi, % Core recovery	RQD	BASINÇLI SU DENEYİ Water pressure test		Lujyon değeri Lugeon value	Geçirimsizlik Impermeability	Uygulanan basınç Pressure applied	Emilim katsayısı Coefficient of permeability	Ayrışma Weathering grades	Log Graphic log	TANIMLAMA Description	Formasyon ve simgesi Formation and symbol
											Lujyon Lugeon	Lujyon değeri Lugeon value								
41																				
42	1.01																			
43																				
44																				
45	01.02																			
46																				
47		101 mm																		
48	02.02																			
49																				
50																				
51	03.02																			
52																				
53																				
54	04.02																			
55																				
56																				
57	07.02																			
58																				
59																				
60																				
61																				
62																				
63																				
64																				
65																				
66																				
67																				
68																				
69																				
70																				
71																				
72																				
73																				
74																				
75																				

Kalkış: mavimsi, beyazimsı açık gri renkli renkli, az ayrışmış, orta sık eklemlili, eklemler yüzeyleri oksidasyon izli, yer yer erime boşluğu, orta-yüksek dayanımlı.

ORHANELİ BİRLİĞİ

EK-1 (Devam) Sondaj logları

EİE		ELEKTRİK İŞLERİ ETÜT İDARESİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ ELECTRICAL POWER RESOURCES SURVEY AND DEVELOPMENT ADMINISTRATION		JEOLJİ VE SONDAJ DAİRESİ BAŞKANLIĞI GEOLOGY AND DRILLING DEPARTMENT		KUYU LOGU GEOLOGIC LOG OF BOREHOLE															
PROJE Project : DELİBALLILAR BARAJ VE HES				KOORDİNATLAR Coordinates X : 4422260 Y : 415751		KUYU NO BOREHOLE No.															
YERİ Location : Dolusavak - Sol Sahil				YÜKSELTİ, m Elevation : 427		DS-111															
BAŞLANGIÇ TARİHİ Date begun : 03.01.2005				KONUM Bearing and inclination : Düşey		SAYFA NO SHEET ... OF...															
BİTİŞ TARİHİ Date finished : 18.02.2005				KUYU DERİNLİĞİ, m Depth of hole : 75		4 / 4															
TANIMLAMAYI YAPAN Described by : B.G. ÖZEL - R. GÜMÜŞBOĞA				SONDÖZ Drilling machine : XC 90		ÖLÇEK SCALE															
LOGU YAPAN Logged by : H. AKSU - S. AKSU				SONDÖR Driller : Fahri KAYA		1/100															
Derinlik, m Depth	Günlük Durum Daily situation	Kuyu çapı Diameter of borehole	Keskiç kuyu çapı Type of bit	İlerleme durumu (dak.) Duration of progress (min)	Çekme hızı Drilling rate	Mühürleme durumu Casing	Sondaj suyu (renk ve %) Water return colour and %	Çimentolama Cementation	Karot yüzdesi, % Core recovery	RQD	Kaya niteliği Rock quality	Eldem sıklığı Fracture frequency	Basınçlı su deneyi Water pressure test	Lujyon değeri Lugeon value	Çekimlilik Stickability	Yıpranma hızı Wear rate	Emilme katsayısı (L.m.dak.) Water loss	Ayrışma Weathering grades	Log Graphic log	TANIMLAMA Description	Formasyon ve simgesi Formation and symbol
09.02 2																					
61																					
62																					
63																					
64																					
65																					
66																					
67																					
68																					
69																					
70																					
71																					
72																					
73																					
74																					
75																					
76																					

Kalkış: mavimsi, beyazimsi açık gri renkli renkli, az ayrılmış, orta sık eklemler, eklemler yüzeyleri oksidasyon izli, yer yer erime boşluklu, orta-

Grafitli Mikajist: Koyu gri, yeşillimsi renkli, orta derecede ayrılmış, çok sık eklemler, çok düşük dayanımlı.

ORMANELİ BİRLİĞİ

KUYU SONU

EK-1 (Devam) Sondaj logları

ELEKTRİK İŞLERİ ETÜT İDARESİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ ELECTRICAL POWER RESOURCES SURVEY AND DEVELOPMENT ADMINISTRATION		JEOLJİ VE SONDAJ DAİRESİ BAŞKANLIĞI GEOLOGY AND DRILLING DEPARTMENT		KUYU LOGU GEOLOGIC LOG OF BOREHOLE																			
PROJE Project : DELİBALLILAR BARAJ VE HES		KOORDİNATLAR X : 4422136 Y : 415598		KUYU NO BOREHOLE No. : DT-112																			
YERİ Location : Derivasyon Tüneli Çıkışı - Sol Sahil		YÜKSELTİ, m : 374		SAYFA NO SHEET... OF... : 212																			
BAŞLANGIÇ TARİHİ Date begun : 14.12.2004		KONUM Bearing and inclination : Düşey		ÖLÇEK SCALE : 1/100																			
BİTİŞ TARİHİ Date finished : 29.12.2004		KUYU DERİNLİĞİ, m : 30																					
TANIMLAMAYI YAPAN Described by : B.G. ÖZEL - H. AKSU		SONDÖZ Drilling machine : D 750 DD3																					
LOGU YAPAN Logged by : H. AKSU - S. AKSU		SONDÖR Driller : Kenan YILDIZ																					
Derinlik, m Depth	Günlük Durum Daily situation	Günün ilerleme Drilling progress	Su seviyesi Groundwater level	Kuyu çapı Diameter of borehole	Kesici uçun ebatları Type of bit	İlerleme hızı (dak.) Duration of progress (min.)	Çalma borusu Drilling pipe	Muhafaza borusu Casing	Sondaj suyu (renk ve %) Water return color and %	Cimentolama Cementation	Karot yüzdesi, % Core recovery	RQD	Kaya niteliği Rock quality	Eklem sıklığı Fracture frequency	BASINÇLI SU DENEYİ Water pressure test	Lujyon değeri Lugeon value	Gecikme Delay	Yırtılma basıncı Pressure applied	Emilme katsayısı (Um. dak.) Water loss	Kırılma Weathering grades	Log Geoplot log	TANIMLAMA Description	Formasyon ve simgesi Formation and symbol
21	23.12	1		86 mm	86 mm T Tipi E188 H40/60 Taşlı Elmas						70												
22											60												
23											100												
24	24.12	3									90												
25											10												
26											0												
27	27.12																						
28																							
29	28.12	2																					
30																							

KUYU SONU

Grafikli Mikajist: Silyahımsı gri renkli, orta-çok ayrışmış, sık eklemli, orta dayanımlı.

ORİJİNELİ BİRLİĞİ

EK-1 (Devam) Sondaj logları

[illegible]

EK-1 (Devam) Sondaj logları

ELEKTRİK İŞLERİ ETÜD İZİRETESİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
ELECTRICAL POWER RESOURCES SURVEY AND DEVELOPMENT
ADMINISTRATION

JEOLOJİ VE SONDAJ DAİRESİ BAŞKANLIĞI
GEOLOGY AND DRILLING DEPARTMENT

KUYU LOGU
GEOLOGIC LOG OF BOREHOLE

PROJE : DELİBALILAR BARAJ VE HES ERİ : Derivasyon Tüneli Girişi -Sol Sahil İAŞLANGİÇ TARİHİ : 22.08.2008 İTTİS TARİHİ : 29.08.2009 ANILAMAYI YAPAN : B.G. ÖZEL - H AKSU OGU YAPAN : H. AKSU - S. AKSU		KOORDİNATLAR X : 4422334 Coordinates Y : 415880 YÜKSELTİ, m : 385 KONUM : Düşey Bearing and inclination KUYU DERİNLİĞİ, m : 30 Depth of hole SONDÖZ : D750 DD 3 Drilling machine SONDÖR : HÜSEYİN UĞUZ Driller		KUYU NO BOREHOLE No. DT-114 SAYFA NO SHEET ... OF... 2 / 2 ÖLÇEK SCALE 1/100
--	--	--	--	--

Derinlik, m Depth	Günlük Durum Daily situation	Günlük ilerleme Drilling progress	Su seviyesi Groundwater level	Kuyu çapı Diameter of borehole	Kesit açısı (derece) Type (angle (degree))	İlerleme hızı (m/dk) Diameter of progress (m/hr)	Çalışma borusu Drilling pipe	Mühafaza borusu Casing	Sondaj suyu (renk ve %) Water return colour and %	Çimentolama Cementation	RQD		Kaya niteliği Rock quality	Eklemler sıklığı Fracture frequency	BASINÇLI SU DENEYİ Water pressure test		Lujyon değeri Lugeon value	Çökeltimlilik Permeability	Uygulanmış basınç Pressures applied	Emilime katkısı (m/dk) Water loss	İzlemiş sıklığı Weathering grades	Log Graphic log	TANIMLAMA Description	Formasyon ve simgesi Formation and symbol
											%	%			Lujyon	Lugeon								

25.08
1

21

22

23

24
26.08

25

26

27

28

29

30

88 mm

88 mm T Tipi Taşlı Elmas

GELİYOR

85

100

80

75

60

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

II-III

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

Grafitli Mikajest: Siyahımsı gri renkli, az-orta derecede ayrılmış, sık eklemlili, orta dayanımlı.

Grafitli Mikajest: Siyahımsı gri renkli, az-orta derecede ayrılmış, sık eklemlili, orta dayanımlı.

KUYU SONU

ORHANELİ BİRLİĞİ

EK-1 (Devam) Sondaj logları

[illegible]

EK-1 (Devam) Sondaj logları

[illegible]

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KÖKÇÜOĞLU, Hüseyin
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 20.08.1979 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (533) 250 38 86
e-mail : kokcuoglu@hotmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi, İnşaat Müh.	2003
Lise	Çankaya-yabancı dil ağırlıklı-Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005 -	EİE İdaresi Gen. Md.	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce