

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ORUÇLU TÜNELİ GÖÇÜK BÖLGESİNİN ŞEMSIYE KEMER YÖNTEMİ İLE DESTEKLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisi Sinan DEĞİRMENCİ**

**MAYIS 2019  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Sinan DEĞİRMENCİ Tarafından Hazırlanan**

**ORUÇLU TÜNELİ GÖÇÜK BÖLGESİNİN ŞEMSIYE KEMER YÖNTEMİ İLE  
DESTEKLENMESİ**



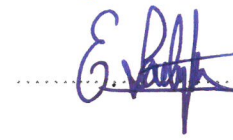
başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 17 / 04 / 2019 gün ve 2563 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Doç. Dr. Tufan ÇAKIR**

**Üye : Doç. Dr. Sabriye Banu İKİZLER**

**Üye : Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU**

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU  
Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, tez danışmanlığımı üstlenerek, çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübelerinden yararlanmama imkân sağlayan ve değerli vaktini bana ayırma konusunda hiçbir zaman çekinmeyen Sayın Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU'na sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca hep yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, maddi ve manevi bütün zorluklara katlanarak bugünlere gelmemde en büyük rolü oynayan, fedakâr ve saygıdeğer annem ve eşim başta olmak üzere tüm aile bireylerime minnettarlığımı belirtir, sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım. Ayrıca, bu tez çalışmasının güzel ülkemizin ve milletimizin yararına olmasını yürekten dilerim.

Sinan DEĞİRMENCİ  
Trabzon 2019



## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Oruçlu Tüneli Göçük Bölgesinin Şemsiye Kemer Yöntemi İle Desteklenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, çalıştığım kurumdan izinli olarak aldığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 03/05/2019

Sinan DEĞİRMENCİ

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	XI
SUMMARY.....	XII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XIII
TABLolar DİZİNİ.....	XVIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XXII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tüneller.....	2
1.3. Tanımlar.....	2
1.3.1. En Kesit Şekillerine Göre Tüneller.....	3
1.3.2. Yapım Yöntemlerine Göre Tüneller.....	5
1.3.3. Yapım Amaçlarına Göre Tüneller.....	7
1.4. Tünel Yapımında Yararlanılan Çeşitli Yöntemler.....	8
1.5. Kaya Kalite ve Kaya Destek Sınıflamaları.....	9
1.5.1. Giriş.....	9
1.5.2. Kaya Kütlelerinin Tanımlanması.....	11
1.6. Kaya Kalite ve Destek Sistemleri.....	12
1.6.1. Müller (1963) Sınıflaması.....	12
1.6.2. Pacher-Rabcewicz (1974) Sınıflaması.....	13
1.6.3. Terzaghi (1946) Kaya Yüğü Sınıflama Sistemi.....	15
1.6.4. Stini (1950) Sınıflaması.....	18
1.6.5. Lauffer (1958) Sınıflaması.....	18
1.6.6. Kaya Yapısı Oranı (RSR).....	19
1.6.7. Deere (1964)' in Kaya Kalitesi (RQD) Tanımı.....	20
1.6.8. Kaya Kütle Kalitesi Sınıflandırma Sistemleri.....	22

1.6.9.	RMR Kaya Sınıflama Sistemi.....	27
1.7.	Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM).....	30
1.7.1.	Kayalarda Gerilme Durumu.....	30
1.7.2.	Tarihçe.....	31
1.7.3.	Tanımlar ve İlkeler.....	31
1.8.	Yeni Avusturya Yönteminde Önorm B 2203/1994’e Göre Yinelenmesi ve Sürekli Kazılar İçin Kaya Davranışı.....	33
1.8.1.	A “Sağlam-Zamanla Kırılğan” Davranışlı Kayaçlar.....	33
1.8.1.1.	A1 Sağlam Kayaçlar.....	33
1.8.1.2.	A2 Zamanla Kırılğan Davranış Gösteren Kayaçlar.....	34
1.8.2.	B “Kırılğan” Davranışlı Kayaçlar.....	34
1.8.2.1.	B1 Kırılğan Kayaçlar.....	34
1.8.2.2.	B2 Çok Kırılğan Kayaçlar.....	35
1.8.2.3.	B3 Döküntülü Kayaçlar.....	36
1.8.3.	C “Plastik” Davranış Gösteren Kayaçlar.....	37
1.8.3.1.	C1 Kaya Patlatmalı Kayaçlar.....	37
1.8.3.2.	C2 Plastik Davranış Gösteren Kayaçlar.....	38
1.8.3.3.	C3 Aşırı Plastik Davranış Gösteren Kayaçlar.....	39
1.8.3.4.	C4 Yumuşak Kayaçlar.....	39
1.8.3.5.	C5 Şişen-Kabaran Kayaçlar.....	40
1.9.	NATM’a Göre Kaya Sınıflamalarının Belirlenmesi.....	41
1.10.	Tünellerde Sağlamaştırma, Destekleme ve İyileştirme.....	41
1.10.1.	Sağlamaştırma ve Destekleme.....	43
1.10.2.	Püskürtme Beton.....	44
1.10.3.	Hasır Çelik.....	45
1.10.4.	Kaya Bulonu.....	45
1.10.5.	Çelik İksa.....	46
1.10.6.	Çelik Kuşaklar (Straps).....	46
1.11.	Kaya Sınıflama Sistemleri ile Destek Basıncı ve Destek Seçimi Arasındaki İlişki.....	47
1.11.1.	RSR Sistemi ile Destek Basıncı ve Destek Seçimi Arasındaki İlişki.....	47
1.11.2.	RQD Sistemi ile Destek Basıncı ve Destek Seçimi Arasındaki İlişki.....	47

1.11.3.	Q Sistemi ile Destek Basıncı ve Destek Seçimi Arasındaki İlişki.....	50
1.11.4.	RMR Sistemi ile Destek Basıncı ve Destek Seçimi Arasındaki İlişki.....	52
1.12.	Tünellerde Zemin İyileştirme.....	54
1.12.1.	Dolgu Enjeksiyonu.....	54
1.12.1.1.	Çimento Enjeksiyonu.....	55
1.12.1.2.	Kimyasal Madde Enjeksiyonu.....	56
1.12.1.3.	Jet Grouting (Jet Dolgu).....	57
1.12.2.	Zeminin Geoteknik Özelliklerinin Korunması.....	58
1.12.2.1.	Borularla Tavan Kemer Oluşturma (Cellular Arch).....	59
1.12.2.2.	Şemsiye Kemer Yöntemi (Umbrella Arch).....	60
1.12.2.3.	Ön Kazı (Advance Precutting).....	68
1.12.2.4.	Enjeksiyon Kemer (Jet Grouting Arch).....	69
1.12.2.5.	Ön Süren Yöntemi ile Kazı.....	70
1.12.3.	Yeraltı Su Seviyesinin Düşürülmesi.....	71
1.12.4.	Yeraltı Suyunun Dondurulması .....	72
1.12.5.	Basıncılı Hava.....	72
1.13.	Yerinde Kaya Dayanım Parametrelerinin Belirlenmesi.....	73
1.14.	Homojen Bölgeleme.....	80
1.15.	Amaç ve Kapsam.....	82
1.16.	Literatür Araştırmaları.....	84
2.	ORUÇLU TÜNEL GÜZERGÂHI VE MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ.....	88
2.1.	Proje Alanının Tanımlanması.....	88
2.2.	Depremsellik.....	88
2.3.	Bölge Jeolojisi.....	90
2.3.1.	Paleozoyik Artvin Granitoidi (Pza).....	92
2.3.2.	Hamur Kesen Formasyon (Jh).....	93
2.3.3.	Yamaç Molozu.....	95
2.4.	Yapısal Jeoloji.....	95
2.5.	Hidrojeoloji.....	96
2.6.	Jeofizik Rezistivite Ölçüleri ve Değerlendirmeler.....	97
2.6.1.	Göçük Bölgesinde Yapılan Rezistivite Deneyine Göre Belirlenen Zemin Durumu.....	97
2.6.2.	Kullanılan Alet ve Uygulanan Metot.....	98

2.6.3.	Ölçüler ve Değerlendirmeler.....	98
2.7.	Kesitler.....	99
2.7.1.	Kuzeydoğu-Güneybatı Doğrultulu Kesitler (Tünel Ekseni Üstü ve 30-40 m Paralelindeki Hatlar).....	104
2.7.2.	Kuzeybatı-Güneydoğu Doğrultulu En Kesitler.....	106
2.7.3.	Rezistive Deneyi Verilerinin Değerlendirilmesi.....	108
2.7.4.	Kuzeydoğu-Güneybatı Doğrultulu Kesitler (Tünel Ekseni Üstü ve Paralelindeki Hatlar).....	109
2.7.5.	Kuzeybatı-Güneydoğu Doğrultulu En Kesitler.....	110
2.8.	Tünel Kazısı Sırasında Elde Edilen Ayna Haritalarına Göre Belirlenen Zemin Durumu.....	112
2.9.	Belirlenen Tünel Tip Kesiti.....	116
3.	ORUÇLU TÜNELİNİN KAZI VE DESTEKLEME SİSTEMLERİNİN AMPİRİK YÖNTEMLE TASARIMI.....	117
3.1.	İksa Sınıfları.....	117
3.1.1.	RMR Sistemine Göre İlk Destekleme Sistemi.....	117
3.1.2.	Q Sistemine Göre İlk Destekleme Sistemi.....	118
3.1.3.	NATM'a Göre İksa Sınıfı.....	121
3.1.3.1.	İksa Sınıfı B2.....	122
3.1.3.2.	İksa Sınıfı B3.....	123
3.2.	Kaya Kütle Sınıflaması ve Geoteknik Parametrelerin Belirlenmesi.....	124
3.2.1.	Jeolojik ve Jeoteknik Raporu Göre Belirlenen Zemin Durumu.....	124
3.2.1.1.	KM:43692+43+410 Giriş Portal Aynası.....	126
3.2.1.1.1.	Geoteknik Parametreler.....	126
3.2.1.1.2.	Doruk (Peak) Tasarım Parametreleri.....	127
3.2.1.1.3.	Residüel Tasarım Parametreleri.....	128
3.2.1.1.4.	RMR Sınıflama Sistemi.....	129
3.2.1.1.5.	Q Sınıflama Sistemi.....	130
3.2.1.1.6.	Kaya Kütlelerinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı.....	131
3.2.1.1.7.	Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları.....	132
3.2.1.1.8.	Tasarım Parametreleri Özeti.....	132

3.2.1.2.	Kilometre 43+710-45+950.....	134
3.2.1.2.1.	Geoteknik Parametreler.....	134
3.2.1.2.2.	Doruk (Peak) Tasarım Parametreleri.....	135
3.2.1.2.3.	Residüel Tasarım Parametreleri.....	136
3.2.1.1.4.	RMR Sınıflama Sistemi.....	137
3.2.1.1.5.	Q Sınıflama Sistemi.....	138
3.2.1.1.6.	Kaya Kütlesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı.....	139
3.2.1.1.7.	Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları.....	139
3.2.1.1.8.	Tasarım Parametreleri Özeti.....	140
3.2.1.3.	Kilometre 45+950-45+965 Çıkış Portal Aynası.....	141
3.2.1.3.1.	Geoteknik Parametreler.....	141
3.2.1.3.2.	Doruk (Peak) Tasarım Parametreleri.....	142
3.2.1.3.3.	Residüel Tasarım Parametreleri.....	143
3.2.1.3.4.	RMR Sınıflama Sistemi.....	144
3.2.1.3.5.	Q Sınıflama Sistemi.....	145
3.2.1.3.6.	Kaya Kütlesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı.....	145
3.2.1.3.7.	Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları.....	146
3.2.1.3.8.	Tasarım Parametreleri Özeti.....	146
3.3.	Kaya Sınıflarına Göre Destekleme Sistemi Seçimi.....	152
3.3.1.	Tünel Kazı ve Destekleme Sistemleri.....	153
3.3.1.1.	Göçük İslah Kazı ve Destek Sistemi Tip-1.....	153
3.3.1.2.	Göçük İslahı Kazı ve Destek Sistemi Tip-2.....	154
4.	SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	156
4.1.	NATM Yöntemine Uygun Hesap Yöntemleri.....	156
4.2.	Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	157
4.3.	Sayısal Analizler.....	161
4.3.1.	NATM'ın Genel Prensipleri ve Sayısal Analiz Modelleri.....	162
4.3.2.	Sayısal Analizlerde Kullanılacak Parametreler.....	165
4.3.3.	Tünel Kritik Kesitlerinin Sayısal Analiz Modelleri.....	166
5.	BULGULAR.....	171
5.1.	Tünel Analizleri.....	171
5.1.1.	Göçük Kesimi (Km:45+017-45+047).....	171
5.1.2.	Analiz Sonuçları.....	172

5.1.3.	Drenaj Sistemi.....	181
5.1.4.	Kemer Betonu ve Taban Kaplaması.....	181
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	185
7.	KAYNAKLAR.....	187
8.	EKLER.....	190
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ORUÇLU TÜNELİ GÖÇÜK BÖLGESİNİN ŞEMSIYE KEMER YÖNTEMİ İLE  
DESTEKLENMESİ

Sinan DEĞİRMENCİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU  
2019, 189 Sayfa, 52 Sayfa Ek

Zeminin kendini taşıyamadığı yerler olarak adlandırılır ve bu gibi yerlerde kemerleşmenin sağlanması için zeminin iyileştirilmesi gerekmektedir. Şemsiye Kemer Yöntemde; tünel kazısı esnasında kemerleşmenin sağlanmadığı bölgelerde uygulanarak zemini iyileştiren bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemin amacı, tünel cidarı çevresine tünel eksenine doğrultusunda, belirli uzunlukta içi boş çelik borular yerleştirmek suretiyle tünel çevresinde kemerleşmeyi sağlayacak taşıyıcı bir katman oluşturulur. Bu yöntem ile tünellerde oluşabilecek zemin gerilmelerinin önüne geçilerek, gerilmeler ve buna bağlı olarak gelişen yer değiştirmeler önemli ölçüde azaltılmış olacaktır.

Bu çalışmada, “Oruçlu Tüneli Göçük Bölgesi” incelenmiştir. Tünel göçük güzergâhı jeolojik ve geoteknik açıdan değerlendirilmiştir. Yapılan arazi incelemeleri, jeofizik incelemeler (rezistivite deneyi) sondajlar ve laboratuvar deneyleri sonuçlarına göre tünel göçük güzergâhı boyunca yer alan jeolojik birimler tanımlanmıştır. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi esasları gözetilerek inşa edilen bu tünelin sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda; inceleme konusu tünelin, yeraltında ve yer üstünde yol açması beklenen yer değiştirmeler izin verilebilir sınırlar içinde kalacağı, herhangi bir göçme olasılığı bulunmadığı ve önerilen destekleme elemanlarının yeterli olacağı anlaşılmıştır. Farklı değişkenlerin tünel ve çevresine etkilerini incelemek için oluşturulan modeller üzerinde Phase<sup>2</sup> sonlu elemanlar programı ile yapılan analiz sonuçları değerlendirilerek göçük kısmının güvenli bir şekilde açılmasında ve imalatın yapılmasında önemli yeri olan parametrelerin olası etkileri ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Rezistivite, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi, Elastik kiriş, Sonlu elemanlar, Şemsiye kemer yöntemi



Master Thesis

SUMMARY

SUPPORTING WITH UMBRELLA ARCH METHOD OF ORUÇLU TUNNEL  
MIGRATION REGION

Sinan DEĞİRMENÇİ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Erol ŞADOĞLU  
2019, 189 Pages, 52 Pages Appendix

It is called as the places where the ground cannot carry itself, and the ground needs to be improved in order to ensure the arching in such places. Umbrella Belt Method; It has been developed as a method that improves the ground by applying it in the regions where the belt has not been provided during the tunnel excavation. The purpose of this method is to create a carrier layer to provide belt arching around the tunnel wall by placing hollow steel tubes of a certain length in the direction of the tunnel axis. With this method, the stresses that can occur in the tunnels will be prevented and the stresses and the related displacements will be reduced significantly.

In this study, “Oruçlu Tunnel Migration Region”, was investigated. The tunnel drain route was evaluated geologically and geotechnically. According to the results of the field investigations, geophysical investigations (resistivity test), drillings and laboratory tests, the geological units along the tunnel drain route were defined. This tunnel was constructed by considering the new Austrian Tunneling Method principles by using finite element method. As a result of the analysis; it was understood that the tunnel under examination was expected to be within the permissible limits, and that the proposed support elements would be sufficient. In order to examine the effects of different variables on the tunnel and its surroundings, the results of the analysis performed with the Phase<sup>2</sup> finite element program were evaluated and the possible effects of the parameters that have an important role in the safe opening of the dent section and the production were revealed.

**Key Words:** Resistivity, New Austria Tunneling Method, Elastic beam, Finite element, Umbrella arch method.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.	Tünel Tanımları.....	2
Şekil 2.	Tünel En Kesit Örnekleri.....	4
Şekil 3.	Tünel Tip Kesiti Örneği.....	5
Şekil 4.	Makinalı ve Konvensiyonel Kullanılan Araçlar.....	6
Şekil 5.	Ovit Tüneli Giriş Kısmı.....	8
Şekil 6.	Terzaghi Kaya Yükü Modeli.....	15
Şekil 7.	Lauffer'e Göre Aktif İksasız Kazı Boşluğunun Ayakta Kalma Süresi.....	19
Şekil 8.	1.Çalışma Bölgesi (Üst Yarı) ve 2.Çalışma Bölgesi (Alt Yarı).....	36
Şekil 9.	Fenner-Pacher Eğrisi.....	42
Şekil 10.	RSR Kavramı-6,5 m Çaplı Tünel İçin Destek Tablosu.....	47
Şekil 11.	Tünel Destekleme Seçiminde RQD'nin Kullanılması.....	48
Şekil 12.	Q Sisteminde Destekleme Önerileri.....	50
Şekil 13.	Tüneli Çevreleyen Zeminin Dolgu Enjeksiyonu Yardımıyla İyileştirilmesi...55	
Şekil 14.	Borularla Tavan Kemerinin Oluşturulması.....	59
Şekil 15.	Borularla Tavan Kemerinin Oluşturulması.....	60
Şekil 16.	Şemsiye Kemer Yönteminde Yüklerin Dağılımı.....	61
Şekil 17.	Şemsiye Kemer Yönteminin Destekleme Mekanizmasının Şeması.....	61
Şekil 18.	Şemsiye Kemer Yöntemi Boru Uygulaması.....	62
Şekil 19.	Şemsiye Kemer Yöntemi Robit Uçu.....	63
Şekil 20.	Şemsiye Kemer Yöntemi Zemin Delgi Makinesi.....	64
Şekil 21.	4" Delikler İçin Delici Uçlar.....	64
Şekil 22.	Boru Uç Tipleri.....	65
Şekil 23.	Jumbo Makinesi.....	65
Şekil 24.	Şemsiye Kemer Yöntemi ve Kayacın Yenilmesi Arasındaki İlişki.....	66
Şekil 25.	Parametrik Çalışmalarda Kullanılan Değişkenler.....	67
Şekil 26.	Şemsiye Kemer Borularının Uygulama Şeması.....	67
Şekil 27.	Şemsiye Kemer Yöntemi Analitik Modeli.....	68
Şekil 28.	Mekanik Ön Kazı ile Tünel Tahkimatı.....	69

Şekil 29.	Ön Sürenlerle Tünel Duraylılığının Sağlanması.....	71
Şekil 30.	Kaya Mekaniğindeki Aynı Ortamın Sistem Bükülüğüne Bağlı Olarak Farklı Şekilde Davranmasının Post-Failure Davranışı ile Açıklanması.....	75
Şekil 31.	Tek Eksenli Basınç Direncine Bağlı Taş-Kaya İlişkisi.....	75
Şekil 32.	GSI ile $c/\sigma$ İlişkisi.....	79
Şekil 33.	GSI ile İçsel Sürtünme Açısı İlişkisi.....	79
Şekil 34.	Tünel Projelerinde Homojen Bölgeleştirme.....	81
Şekil 35.	Çalışma alanı Yer Gösterim Haritası.....	88
Şekil 36.	Artvin İli Deprem Haritası.....	89
Şekil 37.	Stratigrafik Kesit.....	91
Şekil 38.	Rezistivite Ölçüm Noktaları Google Earth Görüntüsü.....	97
Şekil 39.	İnceleme Yapılacak Bölgenin Google Earth Görüntüsü.....	97
Şekil 40.	Tünel Eksenine Rezistivite Ölçüm Planı.....	98
Şekil 41.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Kesitleri-1.....	100
Şekil 42.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Kesitleri-2.....	101
Şekil 43.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Kesitleri-3.....	102
Şekil 44.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Kesitleri.....	103
Şekil 45.	Oruçlu Tüneli Göçük Malzemesi Fotoğrafı.....	108
Şekil 46.	Tünel Jeolojik Haritasının 3 Boyutlu Gösterimi.....	112
Şekil 47.	Tünel Jeolojik Haritası.....	113
Şekil 48.	Taban Kemerli Tünel Tip Kesiti.....	116
Şekil 49.	RMR Kaya Kütle Sınıflarına Göre Desteksiz Durma Süresi ve Desteksiz Tavan Açıklığı Arasındaki İlişki.....	118
Şekil 50.	Q Kaya kütle Sınıflandırma Sistemi Destekleme Türleri.....	120
Şekil 51.	Tünelin Google Earth Üzerindeki Görünümü.....	125
Şekil 52.	Demirkent Magmatik Karmaşığı.....	126
Şekil 53.	Hoek'a Göre RMR <sub>89</sub> Eklem Durumu Koşullarına Göre GSI Tahmini.....	127
Şekil 54.	Hoek'a Göre RMR <sub>89</sub> Eklem Durumu Koşullarına Göre GSI Tahmini.....	134
Şekil 55.	Hoek'a Göre RMR <sub>89</sub> Eklem Durumu Koşullarına Göre GSI Tahmini.....	141
Şekil 56.	SK-1 SN:1 (0-18 m).....	148
Şekil 57.	SK-1 SN:2 (18-22 m).....	148
Şekil 58.	SK-1 SN:3 (22-27 m).....	149

Şekil 59.	SK-1 SN:4 (27-33 m).....	149
Şekil 60.	SK-1 SN:5 (33-37 m).....	149
Şekil 61.	TSK-3 SN:6 (325-330 m).....	150
Şekil 62.	TSK-3 SN:10 (340-345 m).....	150
Şekil 63.	Sonlu Elemanlar Yönteminde Düğüm Noktası, Gerilme Noktaları ve Eleman.....	158
Şekil 64.	Oruçlu Tüneli Km:45+030 Kesimi İçin Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli.....	159
Şekil 65.	Oruçlu Tüneli Km:45+030 Kesimi İçin Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli-2.....	159
Şekil 66.	İlerleyen Bir Tünel Etrafındaki Yer Değiştirme Paterni.....	163
Şekil 67.	Ayna İlerlemesine Bağlı Olarak Tünel Radyal Yer Değiştirmenin Değişimi.....	164
Şekil 68.	Kaya Kütleleri İçin Önerilen Göçme Sonrası Gerilme-Birim Yer Değiştirme Davranışı.....	166
Şekil 69.	Analiz Model Aşaması-1.....	167
Şekil 70.	Analiz Model Aşaması-2.....	168
Şekil 71.	Analiz Model Aşaması-3.....	169
Şekil 72.	Analiz Model Aşaması-4.....	170
Şekil 73.	Sonlu Elemanlar Analiz Modeli ve Malzeme Özellikler.....	172
Şekil 74.	Toplam Deplasman Miktarları (1. Tüp İksa Sonrası).....	173
Şekil 75.	Toplam Deplasman Miktarları (Depremlili Durum).....	173
Şekil 76.	Bulonlara Gelen Eksenel Kuvvetler.....	174
Şekil 77.	Püskürtme Betonuna Gelen Maksimum Eksenel Kuvvet.....	174
Şekil 78.	Püskürtme Betonuna Gelen Maksimum Moment.....	175
Şekil 79.	Püskürtme Betonuna Gelen Maksimum Kesme Kuvveti.....	175
Şekil 80.	Çelik İksa ve Püskürtme Beton Destek Kapasite Diyagramı-Üstyarı.....	176
Şekil 81.	Çelik İksa ve Püskürtme Beton Destek Kapasite Diyagramı-Altyarı.....	177
Şekil 82.	Çelik İksa ve Püskürtme Beton Destek Kapasite Diyagramı-Taban.....	178
Şekil 83.	Kemer Beton Destek Kapasite Diyagramı.....	179
Şekil 84.	Taban Kaplaması Destek Kapasite Diyagramı.....	180

Şekil 85.	Kemer Betonunu N-M Diyagramı.....	182
Şekil 86.	Kemer Betonunu N-V Diyagramı.....	183
Şekil 87.	Taban Kaplaması N-M Diyagramı.....	183
Şekil 88.	Taban Kaplaması N-V Diyagramı.....	184
Ek 1.	Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları SK-1.....	190
Ek 2.	Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları TSK-2.....	191
Ek 3.	Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları TSK-3.....	192
Ek 4.	Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları TSK-4.....	193
Ek 5.	Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları TSK-5.....	194
Ek 6.	Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları TSK-5-1.....	195
Ek 7.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:660 m.....	199
Ek 8.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:697 m.....	200
Ek 9.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:711 m.....	201
Ek 10.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:735 m.....	202
Ek 11.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:752 m.....	203
Ek 12.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:755 m.....	204
Ek 13.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:763 m.....	205
Ek 14.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:758 m.....	206
Ek 15.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:765 m.....	207
Ek 16.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:734 m.....	208
Ek 17.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:733 m.....	209
Ek 18.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:728 m.....	210
Ek 19.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:712 m.....	211
Ek 20.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:703 m.....	212
Ek 21.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:670 m.....	213
Ek 22.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:663 m.....	214
Ek 23.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:694 m.....	215
Ek 24.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:710 m.....	216
Ek 25.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:731 m.....	217
Ek 26.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:749 m.....	218
Ek 27.	Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:768 m.....	219
Ek 28.	Şemsiye Kemer Detayı L=9 m .....	220
Ek 29.	SN Bulon Detayı .....	220

Ek 30.	Tip-2 Tünel Kesiti .....	221
Ek 31.	Enjeksiyon Tip Kesiti.....	222
Ek 32.	Çelik İksa Kesiti.....	223
Ek 33.	Donatı Detayı .....	224
Ek 34.	Tünel Boykesiti .....	225
Ek 35.	Tünel Göçük Bölgesi .....	226
Ek 36.	Tünel Göçük Bölgesi Püskürtme Beton Atılması .....	226
Ek 37.	Tünel Göçük Bölgesi Çift Sıra Şemsiye Kemer Sırası .....	227
Ek 38.	Tünel Göçük Bölgesi Kazı Çalışması .....	227
Ek 39.	Tünel Göçük Bölgesi Enjeksiyon Yapılması .....	228
Ek 40.	Tünel Göçük Bölgesi Enjeksiyon Delgisi Yapılırken.....	228
Ek 41.	Tünel Göçük Bölgesi Şemsiye Kemer Borusu Sürerken .....	229
Ek 42.	Tünel Göçük Bölgesi Çift Sıra Şemsiye Kemer Aynası .....	229
Ek 43.	Tünel Göçük Bölgesi .....	230
Ek 44.	Tünel Göçük Bölgesi Şemsiye Kemer Delgisi Yapılırken .....	230
Ek 45.	Phase <sup>2</sup> Analiz Bilgileri.....	231

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.	Tünel Kesit Alanları.....	5
Tablo 2.	Dünya'daki Çeşitli Tüneller Hakkında Bilgi.....	7
Tablo 3.	Dünya'da Yaygın Olarak Kullanılan Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemleri.....	11
Tablo 4.	Ayrılma Derecesi ve Çatlak Sıklığına Bağlı Olarak Müller Kaya Sınıflaması.....	13
Tablo 5.	Pacher-Rabcewicz (1974)'e Göre Kaya Sınıflaması.....	14
Tablo 6.	Terzaghi'ye Göre Beklenen Dağ Basınçları.....	16
Tablo 7.	Terzaghi Sisteminin Deere ve Arkadaşları Tarafından Geliştirilmiş Hali.....	17
Tablo 8.	RQD Kaya Kalitesi Arasındaki İlişki.....	20
Tablo 9.	Deere ve Miller (1966) Sınıflaması.....	21
Tablo 10.	Eklem Dolgularının Tünel Davranışına Etkileri.....	21
Tablo 11.	Q Sınıflamasına Göre Çatlak (Eklem) Takımı Sayını $J_n$ Değerleri.....	23
Tablo 12.	Q Sınıflamasına Göre Çatlak Pürüzlülük Durumu $J_r$ Değerleri .....	23
Tablo 13.	Q Sınıflamasında Çatlak Ayrışma Durumu $J_a$ Değerleri .....	24
Tablo 14.	Q Sınıflamasına Göre Çatlak Suyu İndirgeme Faktörü $J_w$ Değerleri .....	25
Tablo 15.	Q Sınıflamasında Gerilme İndirgeme Faktörü SRF Değerleri .....	26
Tablo 16.	RMR Sınıflandırma Parametreleri ve Dereceleri (A) .....	28
Tablo 17.	RMR Sınıflandırma Süreksizlik Yönelimleri İçin Düzeltmeler (B).....	29
Tablo 18.	(A) ve (B)'den Elde Edilen RMR Değerleri ve Kaya Sınıfları.....	29
Tablo 19.	Tünel Projelerinde Dikkate Alınması Gereken Gerilme Türleri ve Nedenleri .....	30
Tablo 20.	Püskürtme Beton İçerisinde Bulunan Malzemeler ve Karışım Oranları .....	45
Tablo 21.	RQD'ye Bağlı Olarak Kaya Tünellerinde (6 m-12 m) Tavsiye Edilen Destekleme.....	49
Tablo 22.	Kazı Tipine Göre Kazı Destek Oranı .....	51
Tablo 23.	RMR'ye Bağlı Olarak Kaya Kütlesi Sınıflarının Yorumu ve Dayanım Parametrelerinin Tahmini .....	52

Tablo 24.	RMR'ye Bağlı Olarak Yeraltı Kaya Tünellerinde Destekleme ve Kazı Şeklinin Belirlenmesi .....	53
Tablo 25.	Jet Enjeksiyon Sistemleri .....	58
Tablo 26.	Genelde Kullanılan Değişkenler .....	67
Tablo 27.	Farklı Kayaç Türleri İçin Direnç Düşüm Değerleri .....	76
Tablo 28.	Kayaç Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tahmini .....	77
Tablo 29.	Hoek Sınıflamasında Kullanılan mi Değerleri .....	78
Tablo 30.	GSI Sınıflaması.....	78
Tablo 31.	Etkin Yer İvme Katsayısı .....	89
Tablo 32.	Jeolojik Haritalama Formu .....	114
Tablo 33.	Jeolojik Haritalama Bilgi Formu .....	115
Tablo 34.	Kaya Sınıflamaları ve Mühendislik Parametreler .....	116
Tablo 35.	Kaya Kütle Sınıflaması (RMR) Sistemine Göre 5-12 m Genişlikteki Tünellerde Önerilen İlk Destekleme Sistemleri.....	117
Tablo 36.	Hesaplanan RMR Değerleri ve Desteksiz Durma Süreleri.....	118
Tablo 37.	Kilometre Aralıklarına Göre Hesaplanan Q Değerleri .....	119
Tablo 38.	Kazı Destek Oranları (ESR) .....	119
Tablo 39.	Q Sistemine Göre Destek Sınıfları .....	121
Tablo 40.	Konvansiyonel Tüneller İçin NATM Şartnameleri .....	121
Tablo 41.	TBM İle Açılacak Tüneller İçin NATM Şartnameleri .....	122
Tablo 42.	B2 Klası Kazı, Püskürtme Beton ve İksa Uygulamaları .....	121
Tablo 43.	B2 Klası Süren ve Bulon Uygulamaları.....	123
Tablo 44.	B3 Klası Kazı, Püskürtme Beton ve İksa Uygulamaları .....	124
Tablo 45.	B3 Klası Süren ve Bulon Uygulamaları.....	124
Tablo 46.	Tünel Destekleme Zonları .....	125
Tablo 47.	20 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Doruk Geoteknik Girdi Parametreleri...	128
Tablo 48.	20 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Hesaplanan Doruk Kaya Kütle Parametreleri....	128
Tablo 49.	20 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Rezidüel Geoteknik Girdi Parametreleri.....	129
Tablo 50.	20 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Hesaplanan Rezidüel Kaya Kütle Parametreleri.....	129
Tablo 51.	Km:43+692-43+710 Arası RMR Sınıflaması .....	130



Tablo 52.	Km:43+692-43+710 Arası Q Sınıflaması .....	131
Tablo 53.	Kaya Kütlesi Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Hesaplamaları .....	132
Tablo 54.	Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları .....	132
Tablo 55.	Kilometre 43+692-43+710 Arası Tünel Tasarım Parametreleri .....	133
Tablo 56.	320 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Doruk Geoteknik Girdi Parametreleri.	135
Tablo 57.	320 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Hesaplanan Doruk Kaya Kütle Parametreleri..	136
Tablo 58.	320 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Rezidüel Geoteknik Girdi Parametreleri.....	136
Tablo 59.	320 m'lik Örtü Kalınlığı için Hesaplanan Rezidüel Kaya Kütle Parametreleri.....	137
Tablo 60.	Kilometre 43+710-45+950 Arası RMR Sınıflaması.....	137
Tablo 61.	Kilometre 43+710-45+950 Arası Q Sınıflaması .....	138
Tablo 62.	Kaya Kütlesi Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Hesaplamaları .....	139
Tablo 63.	Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları.....	139
Tablo 64.	Kilometre 43+710-45+950 Arası Tünel Tasarım Parametreleri.....	140
Tablo 65.	14 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Doruk Geoteknik Girdi Parametreleri...	142
Tablo 66.	14 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Hesaplanan Doruk Kaya Kütle Parametreleri....	143
Tablo 67.	14 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Rezidüel Geoteknik Girdi Parametreleri.....	143
Tablo 68.	14 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Hesaplanan Rezidüel Kaya Kütle Parametreleri.....	144
Tablo 69.	Kilometre 45+950-45+965 Arası RMR Sınıflaması .....	144
Tablo 70.	Kilometre 45+950-45+965 Arası Q Sınıflaması .....	145
Tablo 71.	Kaya Kütlesi Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Hesaplamaları .....	146
Tablo 72.	Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları .....	146
Tablo 73.	Kilometre 45+950-45+965 Arası Tünel Tasarım Parametreleri .....	147
Tablo 74.	Tek Eksenli, Elastisite Modülü ve Poisson Oranları.....	151
Tablo 75.	Km:45+030 Kesit Değerleri .....	171
Tablo 76.	Destek Elemanlarına Etkiyen Tesirler .....	181
Ek Tablo 1.	Tünel Araştırma Sondajları Karot Numuneleri Tek Eksenli Basınç Deneyi..	196
Ek Tablo 2.	Tünel Araştırma Sondajları Karot Numuneleri Tek Eksenli Basınç Deneyi..	196
Ek Tablo 3.	Tünel Araştırma Sondajları Karot Numuneleri Tek Eksenli Basınç Deneyi..	197

Ek Tablo 4.Tünel Araştırma Sondajları Karot Numuneleri Tek Eksenli Basınç Deneyi..197

Ek Tablo 5.Tünel Araştırma Sondajları Karot Numuneleri Tek Eksenli Basınç Deneyi..198



## SEMBOLLER DİZİNİ

$L_p$	: 100 mm ve 100 mm' den büyük karot parçalarının toplam uzunluğu
$L_t$	: Karotlu sondajlarda ilerleme uzunluğu
$\sigma_c$	: Tek eksenli basınç dayanımı
$E_t$	: Elastisite modülü
$\emptyset$	: İçsel sürtünme açısı
$c$	: Kohezyon
$H$	: Tünel Derinliği
$P_a$	: Tünele etkiyen yüklerin bileşkesi
$u$	: Deplasman
$t$	: Zaman
$n$	: Porozite
$S_a$	: Suyu doyum oranı
$\nu$	: Poisson oranı
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu
$P_i$	: Derinlik basıncı
$\tau$	: Kayma gerilmesi
$\sigma_z$	: Basınç gerilmesi
$B$	: Galeri genişliği
$B_i$	: Kemerleşme alanının genişliği
$H$	: Örtü kalınlığı
$H_t$	: Tünel yüksekliği
$H_p$	: Kemerleşme yüksekliği
RQD	: Kaya kalite değeri
$L$	: Karot uzunluğudur.
RSR	: Kaya yapısı oranı
RMR	: Kaya kütle oranı
$\gamma$	: Birim hacim ağırlık
$S$	: Gerilme faktörünü (yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranı)
$J_n$	: Eklem takım sayısı
$J_r$	: Eklem pürüzlülük sayısı

Ja	: Eklem alterasyon sayısı
Jw	: Eklem suyu indirgeme sayısı
SRF	: Gerilme indirgeme faktörüdür
r	: Yarı çap
R	: Plastikleşen bölgenin yarıçapı
$\Delta r$	: Tünel cidarında oluşan radial deformasyon
$P_i^S$	: Püskürtme beton direnci
$P_i^{st}$	: Çelik malzemelerin mukavemeti
$P_i^R$	: Kayacın taşıyıcı kemerinin kayma kapasitesi
$P_i^A$	: Kaya bulonlarının mukavemeti
$P_i^W$	: Toplam taşıma kapasitesi
d	: Kaplamanın kalınlığı
e,t	: Kaya bulonlarının aralıkları
s	: Kayma düzleminin uzunluğu
w	: Taşıyıcı ringin uzunluğu
$\sigma_{gs}$	: Kayanın aksenal olmayan basınç dayanımı
$\tau^s$	: Kaplamanın kayma dayanımı
$\tau^{st}$	: Donatının kayma dayanımı
$E^{st}, E^s$	: Çeliğin ve püskürtme betonunun elastisite modülleri
$\alpha^s$	: Kaplamanın kayma açısı
$F^{st}$	: Kaya bulonunun alanı
$\tau^R$	: Kayanın kayma dayanımı
$\sigma_n^R$	: Kayanın basınç dayanımı
$\alpha$	: Kayanın kayma açısı
$\beta$	: Kaya bulonlarının açısı
v	: Poisson Oranı
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Dünya nüfusunun hızlı artışı ve şehirlerin hızla büyümesi yer üstü kullanımını artırmakla birlikte yer altının kullanımını da zorunlu hale getirmiştir. Yeraltında yapılan yapılar birçok alanda hizmet vermektedir. Bunlar enerji tesisleri, ulaşım, madencilik, kaynakların ve atıkların depolanması, soğuk hava depoları, santraller gibi alanlarda kullanılmaktadır. Her alana girmiş olan teknolojiye meydana gelen gelişmeler inşaat sektöründe de kullanılan eski yöntemlerden uzaklaşmaya ve yeni yöntemlerin uygulanmasına ortam sağlamıştır. Bu gelişmelerden en önemli olanı ulaşım sektöründe olan gelişmelerdir. Ulaşım alanındaki gelişmeler, ulaşım sağlanamayan yerlere karayolları ve demiryolları tünelleri vasıtasıyla ulaşılmıştır. Bu da daha uzun yollar yerine kısa mesafeli çözümlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Ayrıca makine sanayisinin ilerlemesi ile tünel kazı çalışmalarında kullanılan makine, ekip ve ekipmanların değişimine ve farklılaşmasına etki etmiştir. Daha ekonomik ve daha hızlı makinelerin kullanılması ile daha kısa sürede ve maliyetleri düşük yeraltı yapılarının yapımına neden olmuştur. Kaya ve zemin mekaniğinde, araştırmacılar tarafından yürütülen çalışmalar, bilinen tünelcilik anlayışının değişmesine neden olmuştur. Bu değişimin etkisiyle günümüzde karayolları ve diğer tünel kazılarında en fazla kullanılan ve en çok başarılı olan Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin (NATM) ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Klasik tünel açma yöntemlerine nazaran uygulanması kolay ve her aşaması kontrol edilebilir olan bu sistemlerin, tasarlanmasında ve hesaplanmasında firmalar tarafından üretilen çeşitli yazılım programları vasıtasıyla zemin koşullarının ve çözüm yönteminin doğruya en yakın şekilde modellenmesiyle daha hızlı ve doğru sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür.

Ülkemizde trafik sorunlarının çözümünde, karayolları tünelleri önemli derecede yer tutan mühendislik yapılarıdır. Son yıllarda ülkemizde bu alanda büyük inşaatlar gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilmeye devam etmektedir. Bunlar arasında Marmaray Projesi, Ovit Tüneli vb. projeler en güzel ve güncel uygulamalardır. Bu kapsamda tünel yapımı tamamlanarak trafiğe açılan Artvin-Yusufeli Devlet Karayolunun en uzun tüneli olan

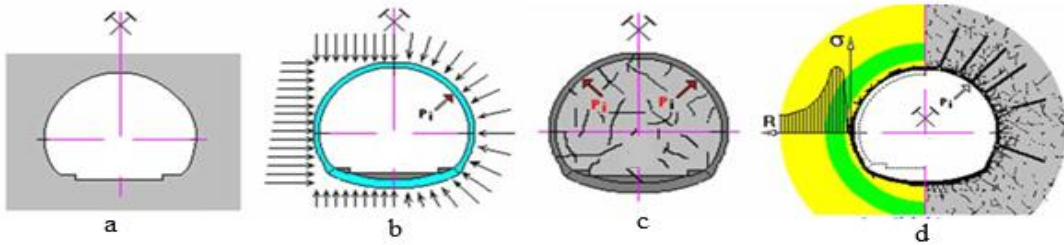
Oruçlu Tüneli ile Artvin-Yusufeli arası karayollarında meydana gelen heyelan, taş düşmesi vs. gibi sorunların çözümünde katkısı olacaktır.

Yüksek lisans tezi kapsamında; Devlet Su İşleri 26. Bölge Müdürlüğü tarafından SARGIN İnşaat ve Makine Sanayi A.Ş. firmasına projelendirilen ve imalatı yaptırılan Oruçlu Tünelinde meydana gelen yaklaşık 200 metrelik kısımdaki göçük bölgesinin çözümü incelenmiştir. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi esasları çerçevesinde inşa edilen tünelin sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla analizleri yapılmıştır. Analizlerin sonuçlarına göre tasarlanan çözüm yönteminin uygunluğu test edilmiştir.

## 1.2. Tüneler

### 1.3. Tanımlar

Yeraltı kaya yapısı; yer kabuğu içinde herhangi bir boşluğun açılmasından sonra bu boşluğu çevreleyen ana kayadan oluşan, mühendislik açısından yeterli ve güvenli taşıyıcı sistemlerdir [1]. Kendi ağırlığını taşıyabilen veya olabildiğince kendi ağırlığını taşıması için zorlanan doğal ortamda çeşitli destekleme, sağlamlaştırma ve iyileştirme yöntemleri ile taşıyıcı kabuk sisteminin oluşturulması yani kemerleşmenin sağlanması ile yeraltı yapıları meydana getirilmektedir. Karayolu tünelleri, demiryolu tünelleri, temiz su veya atık su tünelleri, derivasyon tünelleri, metro tünelleri yeraltı yapılarıdır. Genel anlamda bir zemin ortamının kazılması ve desteklenmesi suretiyle oluşturulan, iki ucu açık ve belirli bir eğime sahip sistemlerdir (Şekil 1).



Şekil 1. Tünel Tanımları (a) Yeraltı Boşluğu-Kazılan Alan (b) Taşıyıcı Sistem (c)

Kazılması ve Desteklenmesi Gereken Alan (d) Kendi Ağırlığını Taşıyabilen  
veya Olabildiğince Kendi Ağırlığını Taşıması İçin Zorlanan Doğal Ortam

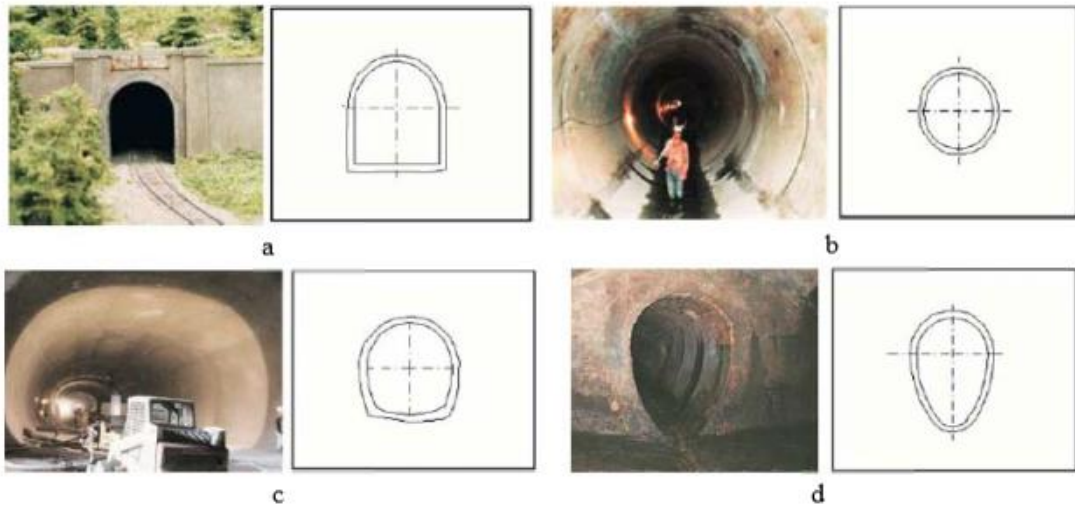
(Vardar, 2005)

İnsanoğlu su ihtiyacını karşılamak ve uzak yerlerden su getirmek amacıyla uzun yıllar önce tünel açmaya başlamış olsa da, özellikle 19. yy'dan sonra zorlu jeolojik koşullar altında, daha uzun ve büyük kesitli tüneller açmaya başlamışlardır (Thema Larousse, 1993). Makinalı yöntemlerin ve patlayıcı teknolojisinin gelişimi ile birlikte artık her türlü zeminde tünel açılabilir duruma gelinmiştir. Ülkemiz ve dünyada insanların bir yerden bir yere gitmek için zamanla yarışması neticesinde ulaşım araçlarının da değişimine ve daha hızlı olmasına neden olmuştur. Ulaşım araçlarının değişimi yolların değişimini tetiklemiş ve demiryolları, otoyolları, köprüler, viyadükler ve en önemlisi tünellerin yapımını hızlandırmıştır. Yerleşim birimlerinde, şehir dokusunun yoğunluğu ve nüfus artışı gibi etkenler, ulaşım ve donanım sorunlarının ortaya çıkması ile yeraltında çözümler bulma yoluna itmiştir. Zemin Mekaniği ve Kaya Mekaniği konularında günümüzde ulaşılan ileri teknoloji ve delme, destekleme ve kaplama yöntemlerindeki önemli gelişmelerin sonucu olarak, her çeşit zeminde tam güvenlik içerisinde tünel yapımına olanak sağlanmış ve inşaat yapım hızı arttırılmıştır. Tünelleri en kesit şekilleri, yapım yöntemleri ve yapım amaçlarına göre sınıflamak mümkündür (Öztürk, Durmuş,2008).

### **1.3.1. En Kesit şekillerine Göre Tüneller**

Tünellerin en kesit tiplerinin belirlenmesinde iki unsur ortaya çıkmaktadır. Bunlar; ulaşım yolunun cinsine ve yolun geçeceği zeminden gelecek etkilere göre belirlenmektedir. Zeminin kaya olduğu ortamlarda genellikle en kesitler dairesel kemer ve iki düşey yan duvardan oluşacak şekilde yapılmaktadır. Yumuşak zeminlerde açılan tünellerin ise yatayda oluşacak basınçları karşılayacak kesitlere sahip olması gerekmektedir. Aksi halde tüneller açılmayacaktır. Bu tür zeminlerde açılan tünel en kesitlerinin tam daire veya at nalı şeklinde olması gerekmektedir. Dairesel en kesitli tüneller teorik olarak iç ve dış kuvvetleri en iyi şekilde karşılayan ve zemine ileten tünellerdir. Dairesel tüneller en küçük çevre ile en büyük en kesite ulaşmamızı sağlar. Ancak bu üstünlükleri olmasına karşın bazı olumsuz durumları da bulunmaktadır. Bunlardan ilki; tabanlarının yuvarlak olması nedeniyle ulaşım yolu için fazla dolgu ihtiyacı olması, diğeri ise; yapılacak beton kaplamanın zorluğudur. Günümüzde kemerli ve dairesel en kesit şekiller arasında olması sebebiyle mühendisler daha çok at nalı şeklindeki en kesitleri tercih etmektedir. At nalı şeklindeki tünel tip kesitinin tabanı ulaşım yolu için yeteri kadar düz olduğu gibi eğrisel kenarları ve tavanı da kemer gibi çalıştığından

dış kuvvetlere karşı koymak için daha uygun olmaktadır. Yumurta şeklindeki en kesitler ise; şehir atık sularıyla, taşkın debilerini geçiren birleşik kanalizasyon tünellerinde daha çok tercih edilen en kesitlerdir. Ancak tabanları dar olduğundan karayolu, demiryolu tünelleri için uygun değildir. Dikdörtgen en kesitli tüneller, kaplamaların yapım zorluğu ile köşelerde meydana gelen gerilme yığılmalarından dolayı aç-kapa tüneller ile su altı tünelleri haricinde uygulanmamaktadırlar.

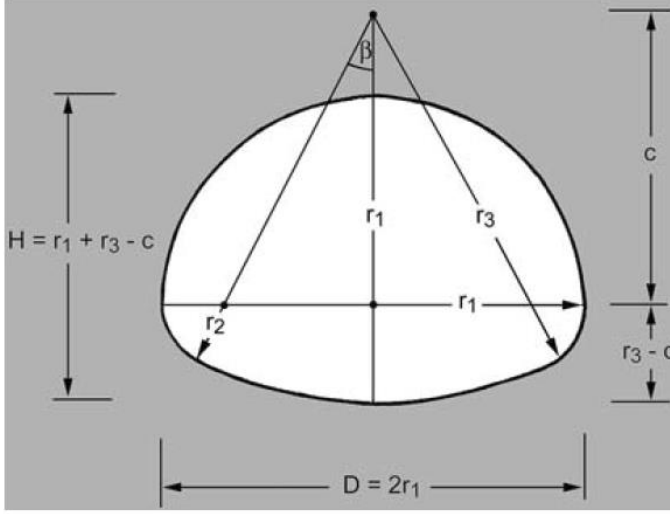


Şekil 2. Tünel En Kesit Örnekleri (a) At Nalı Tünel En Kesiti (b) Dairesel Tünel En

Kesiti (c) Dairesel Tünel En Kesiti (d) Yumurta Tipi Tünel En Kesiti

Karayolu tünellerinde genellikle tünel en kesitleri için dairesel tipler tercih edilmektedir. Tünellerin geometrileri genelde bir merkezden geçen daireler olabildiği gibi, birden fazla yay kullanılarak da kesit oluşturulabilir. Aşağıdaki şekilde bir tünel tipine ait örnek boyutlandırma gösterilmiştir (Şekil 3.) (Kolymbas, 2005).





$$\sin \beta = \frac{r_1 - r_2}{r_3 - r_2}$$

$$c = \sqrt{r_3^2 - 2r_2(r_3 - r_1) - r_1^2}$$

Şekil 3. Tünel Tip Kesiti Örneği

Uygulamalarda tünel yüksekliği  $1,5r$  alınırken, genişliği  $2r$  olmaktadır. Uygulama amaçlarına göre tünel kesit alanları aşağıdaki gibidir (Tablo 1).

Tablo 1. Tünel Kesit Alanları

Tünel Tipi	Kesit Alanı (m <sup>2</sup> )
Kanalizasyon	10
Hidroelektrik tünelleri	10-30
Tek şerit karayolu	75
Demiryolu (tek hat)	50
Metro (tek hat)	35
Hızlı tren (tek hat)	50
Hızlı tren (çift hat)	80-100

### 1.3.2. Yapım Yöntemlerine Göre Tüneller

Yapım şekillerine göre tüneller 3 sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar;

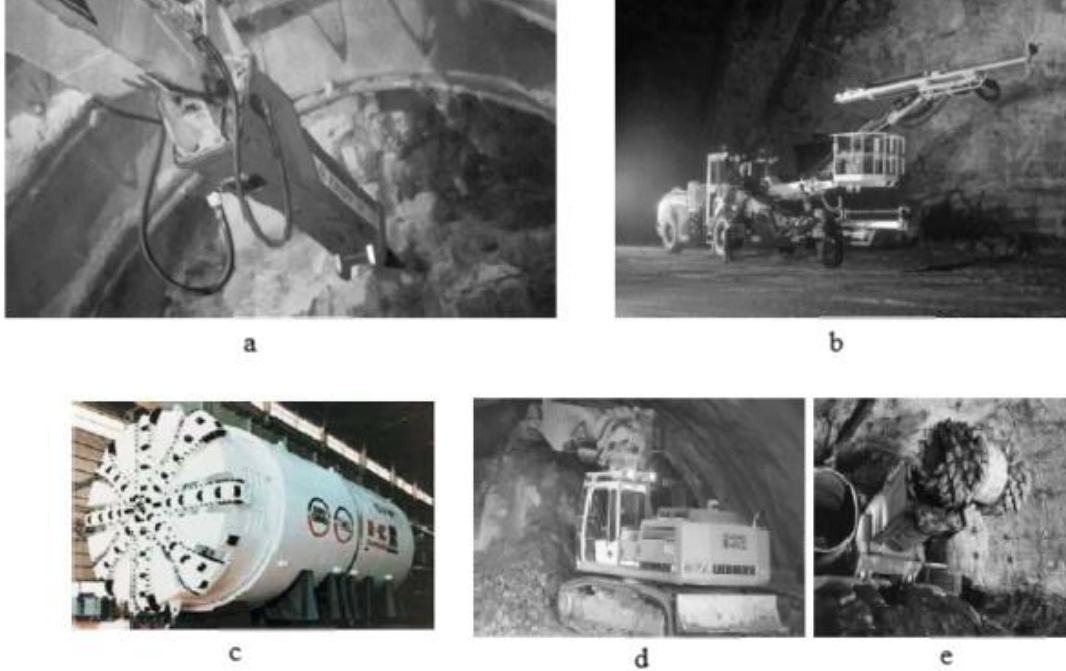
1. Kaya ortamlarda açılan,
2. Zeminlerde açılan
3. Su altında yapılanlar şeklinde sınıflandırılmaktadır.

Kaya ortamlarda inşa edilen tünellerde delme patlatma yöntemi veya değişik tipteki

delgi araçları kullanılmaktadır. Kaya ortamların kendi ağırlığını taşıyabilir özellikte olması nedeniyle bu tip zeminlerde inşa edilen tünellerde duraylılık sorunlarıyla nadir karşılaşmaktadır.

Zemin içerisinde inşa edilecek olan tünellerde ise zeminin cinsine göre oluşan koşulların kaya ortamlarına göre çok daha zor olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, zemin sınıflarının iyi tespit edilmesi daha sonra yapılabilecek zemin iyileştirilme açısından önemlidir. Bu zeminlerde tünel açılması sırasında çeşitli destekleme ve iyileştirme yöntemleri olan kalkan, boru sürme, şemsiyeleme ve aç-kapa vb. kullanılmaktadır. Bu zeminlerde açılacak tünellerin en kesitleri seçilirken, kaplamalara gelecek çekme gerilmelerinin en düşük düzeyde olmasına dikkat edilmelidir.

Su altı tünelleri ise; şantiyede üretilen prefabrik, çelik vb. tünel elemanlarının suya batırılıp tabana oturtulduktan sonra üzerleri örtülmek suretiyle ya da suda tabana oturtulmadan yüzer şekilde inşa edilmektedirler (Öztürk, Durmuş, 2008). Şekil 4'te patlayıcı kullanmak suretiyle ve makinalı yöntemlerle tünel açmada kullanılan, hidrolik kırıcı, ekskavatör, roadheader, TBM makinası, Jumbo araçları görünmektedir (Kolymbas, 2005).



Şekil 4. Makinalı ve Konvensiyonel Yöntemlerde Kullanılan Araçlar (a) Hidrolik Kırıcı (b)

Jumbo (c) TBM (d) Ekskavatör ve (e) Roadheader

### 1.3.3. Yapım Amaçlarına Göre Tüneller

Tünellerin en bilinen kullanım amaçları; ulaşım ve su taşımaktır. Bunların dışından barınak, maden galerileri, kanalizasyon, korunma ve savunma amaçlı, vahşi hayvan geçişleri ya da derivasyon amaçlı olarak daha özel hizmetlerde de tünellere rastlamak mümkündür. Karayolu tünelleri, trafiğin önemine bağlı olarak aydınlatma, havalandırma, işaret ve denetim donatımları içerir. Dünya da en çok bilinen tüneller hakkında bazı bilgiler aşağıda gösterilen Tablo 2'deki gibidir (Kolymbas, 2005).

Tablo 2. Dünya'daki Çeşitli Tüneller Hakkında Bilgi

<b>En Eski Tüneller</b>	
Eupalinos Tüneli	1 km
Urner Loch (İsviçre Alplerindeki ilk tünel, 1707)	64 km
Mont-Cenis (Fransa-İtalya, 1857-1870)	12 km
St. Gotthart Demiryolu tüneli (İsviçre 1872-1878)	15 km
Karaköy Tüneli (İstanbul Galata-Beyoğlu, 1871-1875)	573 m
<b>En Uzun Tüneller</b>	
Seikan (Japonya, 1981-1984)	54 km
Euro-Tunnel (Manş Tüneli, Fransa-İngiltere 1986-1993)	50 km
Simplon I (İsviçre-İtalya 1898-1906)	20 km
Grand Apennin (İtalya 1921-1930)	19 km
Yeni Gotthard (İviçre 1969-1980)	16 km
<b>En Uzun Metro Tünelleri</b>	
Londra Metrosu	414 km
Moskova	254 km
NewYork	221 km
Tokyo	203 km
Paris	165 km

Ülkemizde ise en uzun karayolu tüneli; Karadeniz'i Doğu Anadolu'ya bağlayan, Rize-Erzurum karayolunun Ovit Dağı Geçidi'nde inşa edilen Ovit tüneli 14 bin 200 metre uzunluğunda çift tüpten oluşmakta olup Türkiye' de bitmiş olan en uzun tüneldir.



Şekil 5. Ovit Tüneli Giriş Kısmı (URL 1)

#### 1.4. Tünel Yapımında Yararlanılan Çeşitli Yöntemler

Bir tünelin yapımında, ard arda ve birbirinden ayrılmaz bağla bağlı (yani biri tamamlanmadan diğer imalata geçiş yapılamayan) işlem adımları bulunmaktadır. Bunlar; kazı, pasana nakliyesi, geçici destekleme, kalıcı destekleme, kesin kaplama, ince inşaat vb. sıralanmaktadır. Uygulamada tünel ayna kazısının yapılacağı yerin alanı sınırlıdır ve tünel içerisindeki diğer işler için gerekli geniş alanı sağlanamamaktadır. Bir tünelin hangi yöntemle yapılacağı belirlenmesinde ilk olarak arazinin (zeminin) durumu belirler. Kazı sonrası desteklemenin yerleştirilmesi için gereken süre zeminin dayanım sınıfına bağlıdır ve kazının yapılacak uzunluğuna bağlı olarak bu süre azalır ya da artar. Zemin sınıfına göre kazı adımları iyi belirlenmelidir. Buna bağlı olarak birçok tünelde çeşitli kazma yöntemleri geliştirilmiştir. Ekonomik nedenlerle, tünel kazılarının büyük kesitte yapılması istenmektedir. Ancak kazının büyük kesitte yapılması alınacak önlemleri artırmaktadır. Bu nedenle arazi ve kesit büyüklüğü seçilirse, öncelikle tonozlu üst bölüm (üst yarı) kazılır ve

desteklenir sonra orta bölüm kazılır (yarım kesit kazısı). Zor arazide çalışıldığında, çeşitli yöntemlerle bölümlenmiş kesitlere göre kazı gerçekleştirilir (Schubert, 2002).

## **1.5. Kaya Kalite ve Kaya Destek Sınıflamaları**

### **1.5.1. Giriş**

Sınıflama denilince ilk akla gelen, nesnelerin ortak özelliklerine göre gruplandırılması şeklinde tanımlanır. Kaya Mekaniği alanında, kaya kütlelerinin sınıflandırılmasına ihtiyaç duyulmuş ve bu amaçla çeşitli sınıflama sistemleri belirlenmiştir. Bu sistemler, kaya mühendisliğinde tasarımın gerekli bir parçası olduğu gibi, uzun yıllar süren deneyim ve gözlemlere bağlı istatistiksel değerlendirmeler dikkate alınarak belirlenmiş yöntemlerdir. Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin bu kapsamda değerlendirilmesi ve doğru kullanması halinde, günümüzde birçok mühendislik projesinin tamamlanmasında başarı ile kullanıldıkları bilinmektedir. Aşağıda bu yöntemlere örnek olacak tasarımlar sıralanmıştır (Ulusay, Sönmez, 2007 ve Karaoğlan, 2002).

#### **A-Ampirik Tasarım Yöntemleri**

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

#### **B-Gözleme Dayalı Tasarım Yöntemleri**

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

#### **C-Analitik-Sayısal Tasarım Yöntemleri**

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

Bieniawski (1988), kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin başlıca amaçlarını aşağıdaki şekilde belirtmektedir.

- a. Kaya kütlesinin davranışını etkileyen önemli parametreleri tayin etmek
- b. Kaya kütlesini kendi içerisinde benzer özellikler gösteren bölgelere ayırarak değişik kalitedeki kaya kütlesi sınıflarını belirlemek
- c. Her kaya kütlesi sınıfının özelliklerinin anlaşılması amacıyla esaslar oluşturmak
- d. Herhangi bir sahadaki kaya kütlesi koşullarıyla ilgili olarak kazanılan deneyimleri diğer sahalarda karşılaşılan koşullarla karşılaştırılıp ilişki kurmak
- e. Mühendislik tasarımı için sayısal veri tabanı ve bir kılavuz oluşturmak
- f. Mühendisler arasında ortak temele dayalı teknik iletişimi sağlamak

Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden elde edilecek kazanımlar ise aşağıda sıralanmıştır.

- a. En az sayıda sınıflama parametresi esas alınarak, toplanan verilerle saha çalışmalarının kalitesinin artırılması
- b. Tasarıma yönelik amaçlar için sayısal veri sağlanması
- c. Daha doğru mühendislik kararlarının alınabilmesinin ve projelerde daha etkin bir iletişimin sağlanması

Herhangi bir kaya kütlesi sınıflama sisteminden elde edilen sonuçlar, doğrudan o sistem tarafından kullanılan girdi parametreleriyle ilgilidir. Bu nedenle, girdi parametrelerinin tayin edilebilir ve kaya kütlesinin özelliklerini yansıtabilir nitelikte olması önemli bir husustur. Bieniawski (1988) tarafından söylendiği gibi, kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında özellikle aşağıda belirtilen girdi parametrelerinin dikkate alınmasında yarar vardır.

- a. Kaya malzemesinin dayanımı: Bu parametre, kaya kütlesinin dayanımının en üst sınırının belirlenmesinde açısından önemlidir. Ayrıca kaya mekaniğinde sıkıştırıcı gerilme alanlarının önemi dikkate alındığında, tek eksenli sıkışma dayanımının sınıflama açısından gerekli bir parametre olduğu açıktır.
- b. RQD: Bu parametre, kaya karotlarının kalitesinin bir göstergesi olmakla birlikte, süreksizlik yöneliminin etkisini göstermez. Bununla birlikte, tünel projelerinde yaygın olarak kullanılan ve farklı tünel koşullarında kaya davranışının karşılaştırılmasına olanak sağlayan sayısal bir indeks olması açısından önemlidir.
- c. Geoteknik parametreler: Süreksizliklerin aralığı, yönelimi ve yüzey koşulları (pürüzlülük, açıklık, bozunma, dolgu, devamlılık)

- d. Yeraltı suyu koşulları
- e. Gerilme alanı
- f. Başlıca faylar ve kıvrımlar

1946'dan bu tarafa, çeşitli araştırmacılar çok sayıda kaya kütlesi sınıflama sistemi geliştirmişlerdir. Başlıca sınıflama sistemleri Tablo 3.'de görülmektedir.

Tablo 3. Dünya' da Yaygın Olarak Kullanılan Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemleri

	<b>Sınıflama sistemini adı</b>	<b>Geliştiren</b>	<b>Geliştirildiği ülke</b>	<b>Uygulama alanları</b>
<b>1</b>	Kaya yükü	Terzaghi, 1946	ABD	Çelik destekli tüneller
<b>2</b>	Desteksiz durma süresi	Lauffer, 1958	Avustralya	Tünelcilik
<b>3</b>	NATM (Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi)	Rabcewicz, 1963	Avusturya	Tünelcilik
<b>4</b>	RQD	Deere vd., 1967	ABD	Karot loglama, tünelcilik
<b>5</b>	RSR	Wickham vd., 1972	ABD	Tünelcilik
<b>6</b>	RMR sistemi	Bieniawski, 1973	G. Afrika	Tüneller, madenler (şevler, temeller)

### 1.5.2. Kaya Kütlelerinin Tanımlanması

Araştırmacılar kaya kütlelerini, eklem durumu ve mekanik özelliklerine bağlı olarak şöyle tanımlamaktadır:

- a. Eklemsiz (sağlam) kaya; ayrışma zonunun altında kalan birçok kaya kütesinin içinde süreksizlikler tarafından sınırlandırılmış ve içerisinde herhangi bir çatlak bulunmayan kaya bloğudur.
- b. Nispeten çatlaklı kaya; üç sürekli eklem takımından daha az eklem takımına sahip olup her hangi bir kazı yapılıncaya kazı boşluğu çevresinde genellikle serbest blok oluşmayan kaya kütesidir.
- c. Az bloklu kaya; sürekli eklem takımı sayısı üçten az fakat eklemleri açık ya da yumuşak olan kaya olup bu eklem takımlarını kesen ilave bir çatlak sistemi vardır.

- Oluşacak bir yer değiştirme sonucu bu eklem sistemlerinden herhangi birinin zayıflaması (açılması) serbest blokların oluşmasına yol açar.
- d. Bloklu Kaya; üç veya daha fazla eklem takımı içeren kaya küttlesidir. Eklemler belirgin olup açık veya yumuşak dolgulu olabilir. Çekme direnci ölçülemeyecek kadar küçüktür. Bu tür kaya ortamında yapılan kazı sonrasında belirgin yüzeylere sahip bloklar ortaya çıkar.
  - e. Çok Gözenekli kaya; bu tür kayalarda gözenekler kayanın mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Gözeneklerde su bulunması ve su basıncında meydana gelen herhangi bir artış kayanın direncinde önemli azalmalara neden olur.
  - f. Çok çatlaklı kaya; sık ve kısa (süreksiz) çatlaklara sahiptir. Bu çatlaklar çok kırılğan kayaçlarda ortaya çıkar ve kayanın mekanik özelliklerini etkiler.
  - g. Sıkışan veya şişen kaya; su etkisiyle reaksiyon sonucu genişleyen aktif kil mineralleri içerirler.
  - h. Sıkışmış kaya molozu; farklı özelliklere sahip ardalanmış kayalardır. Ritmik olarak ardalanmış kumtaşı ve şeyl bu tür kaya grubundan sayılabilir.
  - i. Çözünebilir kaya; esas olarak eriyebilen (çözünür) kireçtaşı, dolomit, jips ve kaya tuzu ile çözünebilen çimentolarla bağlanmış karstik sedimanter kayalardır (Karaoğlan, 2002)

## 1.6. Kaya Kalite ve Destek Sistemleri

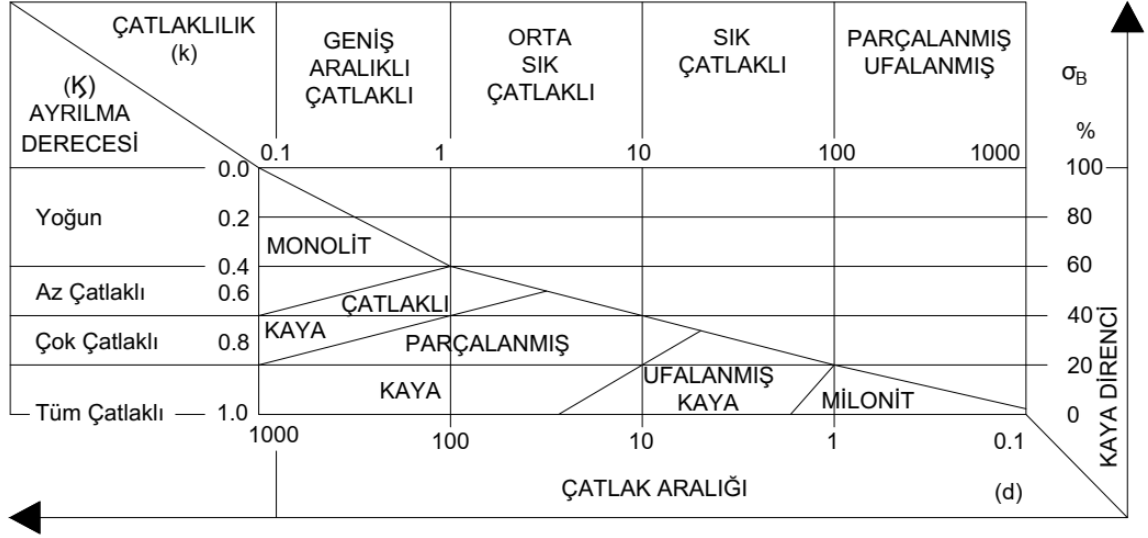
### 1.6.1. Müller (1963) Sınıflaması

Kayanın taşıma direncindeki düşümleri  $k$  (çatlaklılık) ve  $\chi$  (ayrılma derecesi)'nin fonksiyonu olarak ifade eden bir sınıflamadır. Kayanın mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yardımcı olmaktadır. Tablo 4.'de sınıflama grafiği görülmektedir (Yüzer, Vardar, 1986). Bu tabloda;  $d$ : çatlak aralığı,  $\sigma_B$ : kaya direncini göstermektedir.



Tablo 4. Ayrılma Derecesi ve Çatlak Sıklığına Bağlı Olarak Müller Kaya Sınıflaması


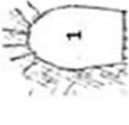




(1963)



### 1.6.2. Pacher-Rabcewicz (1974) Sınıflaması

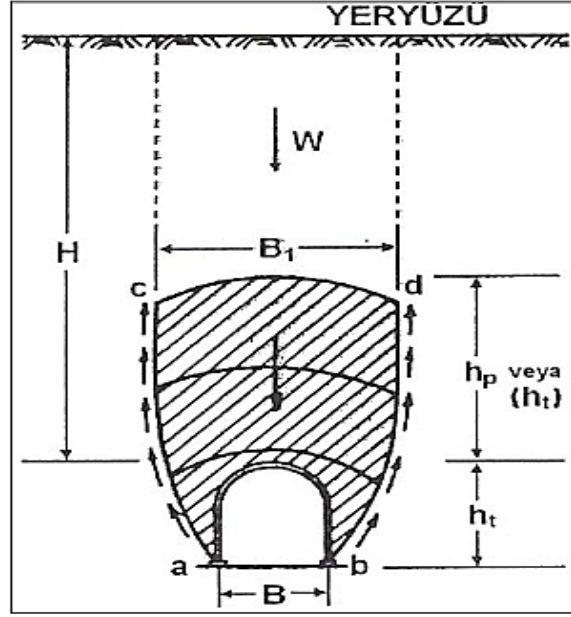
Orta Avrupa araştırmacıları tarafından çok sık kullanılan ve arazi koşulları dikkate alınarak belirlenebilen bir kaya sınıflamasıdır. Kazı sonrasında beklenen gerilme ve yer değiştirmeleri, gerekli sağlamlaştırma önlemlerini ve önlemlerin uygulanma zamanını göstermektedir. Tablo 5.'de Rabcewicz-Pacher sınıflamasına göre tünel açmada kaya sınıflamasını belirlemek için kullanılan tablo verilmiştir (Yüzer, Vardar, 1986)

Tablo 5. Pacher-Rabcewicz (1974)'e Göre Kaya Sınıflaması

	I		II		III		IV		V	
	SAĞLAM ZAMANLA AZ KIRILGAN	SAĞLAM ZAMANLA AZ KIRILGAN	KIRILGAN ZAMANLA ÇOK KIRILGAN	Tabakalanma ve çatlaklanma nedeniyle belirgin süresizlikler, yer yer kilitli çatlak doğuları ve şistli ara katmanlar	GEVREK ÇOK GEVREK	BASKILILI	ÇOK BASKILILI	a	b	AKICI
DOKUSU	Yoğun belirsiz süresizlik işleri	Yüksek basınçlı basınçlı (σ <sub>B</sub> kaya) boşluk duvarına ekleşen teğetsel gerilmelerden (σ <sub>B</sub> ) daha büyük	Tabakalanma ve çatlaklanma nedeniyle belirgin süresizlikler, yer yer kilitli çatlak doğuları ve şistli ara katmanlar	Yapıkanma ve çatlakların etkisiyle her yönde yaygın ve etkin parçalanma, kilitli ezilme ve milonitleşme bölgeleri	Teğetsel gerilmelerin kayanın taşıma direncinin üstünde olması nedeniyle kaya plastik davranarak	Gelişmiş ötelenme izleri, kıvrılmış ve hamurlaşmış ve milonitleşmiş kayac geveşmiş dokuda az koberzonlu ayrık zemin karakterinde	Tümüyle ufalanmış, hamurlaşmış ve milonitleşmiş kayac geveşmiş dokuda az koberzonlu ayrık zemin karakterinde			Ayrık, akıcı dancılı zemin
DAVRANIŞ	Sürekli duray (stabül) yersel koruyucu önlemler (kaya patlamalarına dikkat!)	$\sigma_{\text{dış}} > \sigma_B$	Kalotun sağlamlaştırıldığı durumlarda sürekli duraylılık (stabülite)	Boşluk davranışındaki teğetsel gerilmeler kaya direncinin üstünde, Açık veya kapalı bir taşıyıcı halkanın oluşturulması gerekli	az ve yavaş	etkin ve hızlı				V a daki gibi
TOPRAK İŞİ	Yok	Öncümsüz	Öncümsüz	Çatlak dolgu malzemesi üzerinde oldukça fazla	Belirgin	Bazı koşullarda çok fazla (Yumuşatıcı)				
KAZI	Tam kesit (yelpare) (atmalı)	Tam kesit (atmalı)	Tam kesit (atmalı)	Kalot ve stros	Parçalı kazı (1-4)	Parçalı kazı				
KAZI ŞEKLİ SAĞLAMLAŞTIRMA VE GÜVENLİK ÖNLEMLERİ										Cok parçalı kazı (1-5) Kalot, sağ üst gövde, sol üst gövde, sağ alt gövde, sol alt gövde, taban, Arında ve tavanda özel destekleme. V b'de V'a daki gibi ancak özel koşulları dikkate alan bir şema dahilinde.
SAĞLAMLAŞTIRMA	Gereksiz	Tavanda sistematik ankraj	Tavanda sistematik ankraj	Tavanda ve yanlarda gevşek hafif taşıyıcı halka	Kapalı halka oluşturulması	Kapalı halka oluşturulması				Kapalı halka oluşturulması
ÖNLEM UYGULAMASI VE ZAMANI	Yersel zayıf kısımların tutulması ve gerektiğinde kaya patlamalarına karşı önlemler	Sınırlı değildir ve çoğu zaman büyük bir engel oluşturmaz.	Kalotta daha yaygın bir sağlamlaştırma, gerektiğinde yan duvarların (ayakların) sağlamlaştırılması	Kavialanmalara karşı yüzeyin sağlamlaştırılması ve korunması kaya içinde taşıyıcı bir sistem oluşturur.	Önlemler, inşaat çalışmalarının her bölümünü tek tek güvenli altına almayı, deformasyonları durdurmayı, kapalı bir taşıyıcı halka oluşturmayı kayayı kendi kendine taşımayı amaçlar. Kazı yüzeylerini hemen güvenli altına almak ve sağlamlaştırma işlemlerini öngörülen süre içinde tamamlanmış olmak gerekir.					

### 1.6.3. Terzaghi (1946) Kaya Yüğü Sınıflama Sistemi

Terzaghi'nin kaya yüğü modelini açıklayan basitleştirilmiş bir model Şekil 6.'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Terzaghi Kaya Yüğü Modeli (Terzaghi, 1946)

Şekil 6'ya göre; tünel kazısı esnasında açıklığın yanlarında ve üzerinde gevşemiş kaya kütleleri oluşacaktır. "abcd" alanı içinde yer alan gevşeyen kaya tünel açıklığına doğru hareket etmek isteyecektir. Aynı zamanda oluşan sürtünme kuvvetleri "W" arazi yükünün büyük bir bölümünü tünelin her iki yanındaki kaya kütesine aktaracaktır. Tünel tavanının ve yanlarının ancak geriye kalan kaya yükünü ( $h_p$ ) taşıması gerekecektir. Hareket olduğu kaya kütlelerinin  $B_1$  genişliği, kaya kütlelerinin özelliklerine ve tünelin genişliği ( $B$ ) ile yüksekliğine ( $h_t$ ) bağlıdır. Terzaghi'nin kaya yüğü sınıflaması Tablo 6.'da, bu sınıflama sisteminin Deere ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş durumu, Tablo 7.'de gösterilmektedir (Karpuz, Hindistan, 2006)

Tablo 6. Terzaghi'ye Göre Beklenen Dağ Basınçları

Grup	Kayacın özellikleri	Metre cinsinden dağ basıncı	Açıklamalar
1	Sağlam	-	Ufak tefek kavlaklanmalar görülüyorsa tünel içinde kaplama gerekli
2	Katı, tabakalı	$0-0,5B_1$	Hafif kaplama, basınç yer yer değişiklik gösterebilir
3	Masif, az çatlaklı	$0-0,25B_1$	Hafif kaplama
4	Az bloklu ve geniş	$0,25-0,35(B_1+h_p)$	Yanal basınç yok
5	Çokça parçalanmış fakat ayrışmamış	$(0,35-1,1) (B_1+h_p)$	Hiç veya pek az yanal basınç
6	Bütünüyle parçalanmış fakat ayrışmamış	$1,1(B_1+h_p)$	Önemli yan basınçlar, sızan suların yumuşatıcı etkisi tabanda önemli yapı gerektirir.
7	Baskılı (yüzeye yakın tünel)	$(1,1-4,5) (B_1+h_p)$	Büyük yan basınç, taban bağı zorunlu, dairesel kesit önerilir.
8	Baskılı (derindeki tünel)	$(2,1-4,5) (B_1+h_p)$	Büyük yan basınç
9	Kabarma basınçlı ortam	$(B_1+h_p)$ değeri göz önüne alınmaksızın 80 m' ye kadar gerekli	Dairesel kesit gerekli, uygun olmayan şartlar altında kayıcı bağlar kullanılması
10	Sıkışmış kum	$(0,62-1,38) (B_1+h_p)$	-
11	Gevşek kum	$(1,08-1,38) (B_1+h_p)$	-

Tablo 7. Terzaghi Sisteminin Deere ve Ark.(1970) Tarafından Geliştirilmiş Hali (Karpuz, Hindistan, 2006)

Kırık aralığı (cm)	RQD (%)	Kaya Durumu	Kaya Yüğü, $h_p$		Notlar	
			İlk	Son		
50	98	1. Sert ve Sağlam	0	0	Genellikle yan basınç yok. Noktadan noktaya değişen düzensiz yük. Kavlama veya patlama olursa kaplama	
	95	2. Sert Tabakalı veya Şistoz	0	0.25B		Genel olarak kaplama
	90		0	0.5B		
	20	3. Masif: orta derecede eklemli	0	0.25B ila 0.35C		
10	75	4. Orta derecede bloklu ve damarlı	0	0.35C ila 1.1C	Az veya hiç yan basınç yok	
	50	5. Çok bloklu, damarlı ve parçalanmış	0 ila 0.6C	1.1C		
5	25	6. Tamamen parçalanmış		1.1C	Önemli miktarda yan basınç, devamlı (tavan ve taban) tahkimat gerekir.	
	10					
2	2	7. Çakıl ve kum	0.54C ila 1.2C	0.62C ila 1.38C	Yoğun yan basınç $P_h=0.3\gamma(0.5h_t+h_p)$ Gevşek	
			0.94C ila 1.2C	1.08C ila 1.38C		
ZAYIF VE KOHEZYONLU		8. Sıkışan kaya orta derinlik		1.1C ila 2.1C	Yüksek tan basınç Devamlı tahkimat gerekir.	
		9. Sıkışan kaya büyük derinlik		2.1C ila 4.5C		
		10. Şişen, kabaran kaya		250 ft'e kadar (76.2 m)	Dairesel bağlar gereklidir. Aşırı durumlarda geçme bağlar kullanılır.	

Notlar: 1) Kaya durumu 4, 5, 6 ve 7 için, su tablasının üstünde yükleri % 50 azaltınız.

2)  $C=B+h_t$  (=tünel genişliği+yüksekliği) 3)  $\gamma$ : kayanın birim hacim ağırlığı

Terzaghi'nin destekleme yöntemi gözlemleri çapı 5-10 m arasında değişen tünelleri

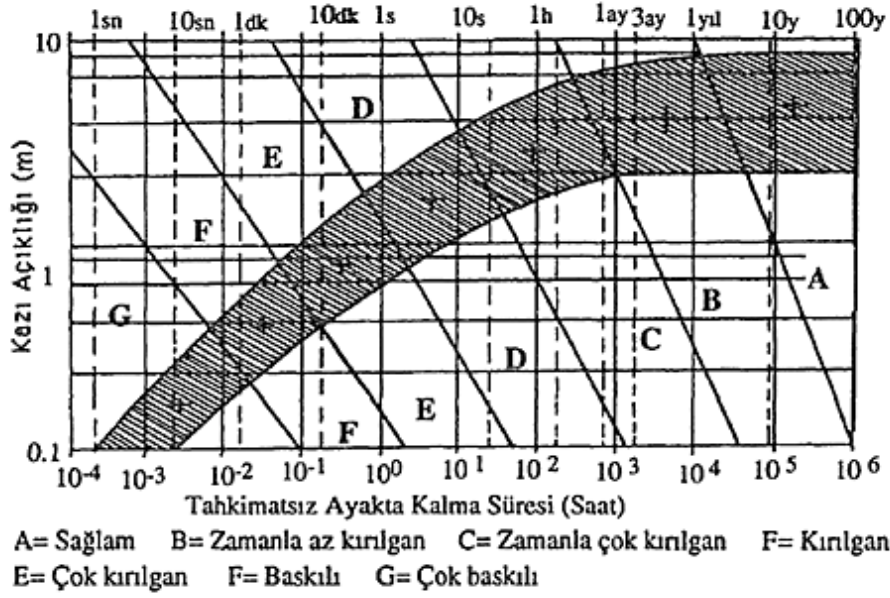
kapsamaktadır. Tünel kazıları sırasında desteklemede kullanılan bütün yöntemlerde, tünel çevre kayacında yer değiştirmelerin olacağı kesindir. Özellikle dayanımı düşük kayalarda (sıkışan şişen kayalar hariç) eğer başlangıç desteği çok fazla yumuşak ise veya destek yapılması gecikirse, son yükler daha fazla olmaktadır. Kontrol edilmeyen yer değiştirmeler, kazı yerinin etrafında gevşemelere neden olacak ve buna bağlı olarak son yüklerin artmasına sebep olacaktır. Bu durumun önüne geçebilmek için ilave destekleme tedbirleri olarak püskürtme beton ve/veya bulonlama ile geçici destek yaparak son yükleri azaltmak mümkündür. Bu şekilde kemerlemeye yetecek, fakat gevşemeye neden olmayacak kadar yer değiştirmeye izin verileceği için çelik kiriş ve ahşap destekleme yöntemine göre son yükler en az düzeye indirilir (Karaoğlan, 2002)

#### **1.6.4. Stini (1950) Sınıflaması**

Stini (1950) bir kaya kütlesi sınıflaması önermiş ve tünellerde karşılaşılabilecek olumsuzlukları belirlemiştir. Ayrıca kaya kütlesindeki yapısal kusurlardan ve gerilmelerden söz etmiş ve fay dalım yönüne paralel tünel açılmasından kaçınılmasını belirtmiştir.

#### **1.6.5. Lauffer (1958) Sınıflaması**

Lauffer (1958) tarafından yapılan kaya sınıflamasının amacı; Stini (1950)'nin çalışmalarına dayanmaktadır. Stini kaya kütlesinin içerisinde bulunan yapısal kusurların öneminden bahsetmektedir. Lauffer tarafından önerilen kaya sınıflamasında, herhangi bir açıklığın tahkimatsız olarak geçmeden ayakta kalma süresi, kaya kütlesinin sınıflaması ile ilgili olduğunu ortaya koymuştur. Kaya kütlesinin özelliklerine bağlı olarak aktif iksasız herhangi bir açıklığın ayakta kalma süresi Şekil 7.'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Lauffer'e Göre Aktif İksasız Kazı Boşluğunun Ayakta Kalma Süresi

Lauffer sınıflamasının en önemli özelliği, tünel kazı açıklığında meydana gelen artışın ayakta kalma süresini önemli ölçüde azalttığını açıklamasıdır. Ayrıca, daha sonra geliştirilen yeni kaya kütlesi sınıflandırma sistemlerinin geliştirilmesinde oldukça etkili olmuştur (Kılıç, 1997).

### 1.6.6. Kaya Yapısı Oramı (RSR)

RSR (Rock Structure Rating) kavramı, Wickham, Tiedemann ve Skinner (1972) tarafından ortaya atılan bir kaya destek tayin modelidir. RSR, Terzaghi'nin kaya kütlesi sınıflama sisteminden sonraki ilk ayrıntılı kaya kütlesi sınıflama sistemidir. RSR kavramı tünelcilikte kaya kütlesini etkileyen faktörlerin iki genel durumunu dikkate almıştır (Karaoğlan, 2002). Bunlar jeolojik parametreler ve yapı parametreleridir ve A, B ve C olmak üzere üç grupta toplanmıştır.  $RSR=A+B+C$  dir.

A.Kaya yapısının genel tanımını şu esaslara göredir.

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

faylı ya da kıvrımlı).

B.Tünel kazısı yönüne göre süreksizlik örneğinin etkisi:

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

C.Yeraltı suyu akımı etkisi

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

### 1.6.7. Deere (1964)' in Kaya Kalitesi (RQD) Tanımı

Deere (1964) sondajlardan elde edilen 10 cm ve daha uzun karotların toplam karot uzunluğuna oranı şeklinde sayısal bir indeks sunmuştur. Bu kaya kalite göstergesi (Rock Quality Designation, RQD) tünel desteklemesinin seçiminde oldukça kullanışlıdır. RQD indeksi ile kaya kalitesi arasındaki ilişki Tablo 8.'de verilmektedir (Kılıç, 1997)

Tablo 8. RQD Kaya Kalitesi Arasındaki İlişki (Deere, 1964)

RQD (%)	Kaya Kalitesi
<25	Çok Zayıf
25-50	Zayıf
50-75	Orta
75-90	İyi
90-100	Çok İyi (Mükemmel)

Deere ve Miller (1966) kayaların dayanım özelliklerini esas alan yeni bir sınıflama geliştirmişlerdir. Bu sınıflama sisteminde kayacın tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ) ve tanjant elastisite modülü oranı ( $E_t/\sigma_c$ ) değerleri esas alınmıştır. Deere ve Millerin dayanım özellikleri ve modül oranına göre kaya sınıflaması Tablo 9.'da verilmektedir.



Tablo 9. Deere ve Miller (1966) Sınıflaması

Tek eksenli basınç direnci (kg/cm <sup>2</sup> )	Modül oranı (E <sub>t</sub> /σ <sub>c</sub> )	Kaya dayanımı	Örnek kayaç
>2200	-	Çok yüksek	Kuarsit, gabro, bazalt
1100-2200	>500	Yüksek	Granit, gnays
550-1100	200-500	Orta	Şeyl, kumtaşı
275-550	<200	Düşük	Kömür, şist, siltaşı
<275	-	Çok düşük	Kaya tuzu, çalk

Breke ve Howard (1972) RQD sınıflamasının bir yeraltı açıklığını çevreleyen kaya kütlelerinin davranışını doğrudan etkileyen eklem dolgusu ile birlikte eklem yönelimi hakkında da sayısal değerler vermediğini söylemişler ve süreksizliklerin belli özelliklere bağlı olarak sınıflandırılmasını söylemişlerdir. Breke ve Howard tünel kazısı sırasında karşılaşılabilecek dolgu ve süreksizliklerin doğuracağı sonuçları Tablo 10.'da özetlemektedir.

Tablo 10. Eklem Dolgularının Tünel Davranışına Etkileri (Breke ve Howard, 1972)

Dolgudaki etkin malzeme	Dolgu malzemesinin potansiyel etkileri	
	Kazı sırasında	Kazıdan sonra
Kabaran Kil	Serbestçe kabarak kavlaklanır. Tahkimat üzerinde sıkışma ve kabarma basıncı oluşturur.	Sıkışma ve kabarma basıncı tahkimat veya kaplama üzerine etki eder, kaplamanın yetersiz olduğu durumlarda kabaran kısımlar dökülerek veya yıkanarak uzaklaşır.
Aktif Olmayan Kil Dolgu	Sıkışma etkisiyle kavlaklanma oluşur. Bazı durumlarda sıkışma çok fazladır	Tahkimat üzerinde sıkışmalar olur.
Klorit, talk, grafit veya serpantin	Tel tel ayrılarak dökülme oluşur.	Özellikle su ile temas ettikleri zaman; dayanımlarındaki azalmalara bağlı olarak ağır yükler oluşabilir.
Gözenekli kalsit veya jips		Ayrışarak kaya kütlelerinin duraylılığının bozulmasına neden olabilir.

### 1.6.8. Kaya Kütlesi Kalitesi Sınıflandırma Sistemleri

Tünel destekleme sistemlerinin seçilerek projelendirilmesinde kullanılmak amacı ile çok sayıda parametrenin göz önüne alındığı kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri geliştirilmiştir. Tünel destekleme projelerinde çok sayıda parametrelerin hepsinin göz önüne alındığı kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri kullanılmaktadır (Karaoğlan,2002)

Kaya kütlesi niteliğini (Q) tahmin etme yöntemi

Barton ve arkadaşlarının tünellerde yaptıkları araştırma sonuçlarını değerlendirerek ortaya koydukları sınıflandırma sistemlerinde, “Kaya Kütlesi” büyüklüğü,

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

bağıntısı ile bulunmaktadır (Barton vd., 1974).

RQD: Kaya kalite göstergesi

$J_n$  : Çatlak (eklem) takımı sayısı

$J_r$ : Çatlak pürüzlülük sayısı

$J_a$ : Çatlak ayrışma sayısı

$J_w$ : Çatlak suyu indirgeme faktörü

SRF: Gerilme indirgeme faktörü

Bu parametreleri diğerleri Tablo 11., Tablo 12., Tablo 13. ve Tablo 14.’te verilmiştir.

Tablo 11. Q Sınıflamasına Göre Çatlak (Eklem) Takımı Sayısı  $J_n$  Değerleri

Çatlak (Eklem) Takımı Sayısı		$J_n$
A.	Masif birkaç çatlak takımı veya hiç çatlak yok	0,5-1,0
B.	Bir çatlak takımı	2
C.	Bir çatlak takımı+düzensiz çatlaklar	3
D.	İki çatlak takımı	4
E.	İki çatlak takımı+düzensiz çatlaklar	6
F.	Üç çatlak takımı	9
G.	Üç çatlak takımı+düzensiz çatlaklar	12
H.	Dört veya daha fazla çatlak takımı, düzensiz veya çok çatlaklı küp şeker görünümlü	15
J.	Tamamen ufalanmış kaya, toprak görünümlü	20
i.	Tünel kesişme kesitlerinde ( $3 \times J_n$ )	
ii.	Tünel girişlerinde ( $2 \times J_n$ ) değerleri alınmalıdır.	

Tablo 12. Q Sınıflamasına Göre Çatlak Pürüzlülük Durumu  $J_r$  Değerleri

<b>Çatlak Pürüzlülük Durumu</b>		<b><math>J_r</math></b>
a. Çatlak yüzeyleri temasta veya $b=10 \text{ cm}^2$ den az kayma hareketiyle temasta		
A.	Süreksiz çatlaklar	4
B.	Dalgalı-pürüzlü	3
C.	Dalgalı-düz	2
D.	Dalgalı cilalı	1,5
E.	Düzlemsel-pürüzlü	1,5
F.	Düzlemsel-düz	1
G.	Düzlemsel-cilalı	
i. Dalgalı düzlemsel gibi tanımlamalar çatlakların en az 2 m'lik uzunluğu boyunca olan genel karakterini, pürüzlü, düz, cilalı tanımlamaları ise çatlak yüzeyinin küçük ölçekteki özelliklerini tanımlar		0,5
b. Makaslama ile çatlak yüzeylerinin teması sağlanmadığında		
H.	Çatlak yüzeylerinin temasını önleyecek kadar kalın kil dolgusu	1
I.	Çatlak yüzeylerinin temasını önleyecek kalınlıkta kum, çakıl ve breş dolgusu	
ii. Ortalama çatlak aralığı 3 m'den fazla ise değerlere eklenmelidir.		
iii. Makaslama hareketi izleri taşıyan ve bu izlerin olumlu yönde bulunduğu düzlemsel-cilalı çatlaklar için $J_r=0,5$ değeri alınabilir.		1

Tablo 13. Q Sınıflamasında Çatlak Ayırışma Durumu  $J_a$  Değerleri

Çatlak ayırışma durumu		$\phi$	Ja
a. Çatlak yüzeyleri temasta (Mineral dolgu-kil kaplaması yok)			
A.	Sıkıca kaynaşmış sert yumuşamayan geçirimsiz dolgu	25°-35°	0,75
B.	Ayrışmamış çatlak yüzeyleri, sadece lekeli yüzey	25°-35°	1
C.	Az ayrışmış eklem yüzeyleri, yumuşamayan yüzey mineralleri ile kaplanmış, kum tanecikleri, kil içermeyen parçalı kaya	25°-35°	2
D.	Siltli veya kumlu killi kaplama, yumuşak olmayan kil parçaları	20°-25°	3
E.	Yumuşamayan, düşük sürtmeli kil mineralleriyle kaplı, az miktarda akıcı kil. Örnek kalonit veya mika, klorit, talk, jips, grafit ve az miktarda akıcı kil	8°-16°	4
b. 10 cm'den az bir kayma hareketiyle çatlak yüzeylerinin teması sağlanabildiğinde			
F.	Kum tanecikleri, kil içermeyen parçalanmış kaya	25°-30°	4
G.	Aşırı derecede konsolide olmuş, yumuşamayan kil dolgulu (<5 mm'den az kalınlıkta ve sürekli)	16°-24°	6
H.	Orta derecede veya az miktarda konsolide olmuş, yumuşamayan kil dolgulu (<5 mm'den az kalınlıkta ve sürekli)	12°-16°	8
J.	Şişen kil dolgusu, montmorillonit vb. (sürekli, kalınlığı 5 mm'den az $J_a$ değerleri şişme özelliği olan kil boyutundaki parçaların % sine bağlıdır.	6°-12°	8-12
c. Çatlak yüzeylerinde kayma durumunda temas yok (ince mineral dolgu)			
K- L- M	Ufalanmış veya parçalanmış kaya ve kil bantları veya zonları (Kil özelliklerinin tanımı için G,H,J koşullarına bkz.)	6°-24°	6-8, 8-12
N	Silt veya kum boyutunda killerden oluşan bantlar veya zonlar, kil içeriği az (yumuşamayan)		5
O- P- R	Kalın sürekli kil bantları veya zonları (kil özelliklerinin tanımı için G,H,J koşullarına bkz.)		10-13

Tablo 14. Q Sınıflamasına Göre Çatlak Suyu İndirgeme Faktörü  $J_w$  Değerleri

Çatlak Suyu İndirgeme Faktörü		Su Basıncı Kg/cm <sup>2</sup>	$J_w$
A.	Kuru kazılar veya yer yer az su geliri, lokal olarak 5lt/dak	<1	1
B.	Orta miktar su geliri veya su basıncı, dolgu yer yer su ile yıkanıp akarak boşalabilir.	1-2,5	0,66
C.	Kendi kendini tutabilen kayalarda dolgunsuz çatlaklardan çok miktarda su geliri veya basıncı	2,5-10	0,5
D.	Çok miktarda su geliri veya basıncı, dolgu tümüyle yıkanarak akmış	2,5-10	0,33
E.	Patlama ile ortaya çıkıp zamanla azalan çok aşırı su geliri veya basıncı	>10	0,2-0,1
F.	Zamanla azalmaya çok aşırı su geliri veya su basıncı	>10	0,1-0,05
i. C ve F'deki faktörler gözlemlerle kabaca tahmin edilir. Drenaj sağlanırsa $J_w$ artırılmalıdır.			
ii. Suyun donması, buz oluşumu gibi özel problemler dikkate alınmamıştır.			

Tablo 15. Q Sınıflamasında Gerilme İndirgeme Faktörü SRF Değerleri

<b>Gerilme İndirgeme Faktörü</b>		$\sigma_c/\sigma_1$	$\sigma_t/\sigma_1$	<b>SRF</b>
a. Kazıyı kesen, tünel kazısı yapıldığında kaya kütlelerinde gevşemelere neden olabilecek zayıf zonlar				
A.	Kil içeren ve kimyasal ayrışmaya uğramış birden fazla zayıflık zonu, çok gevşemiş kaya kütleleri			10
B.	Kimyasal ayrışmaya uğramış kaya veya kil içeren tek zayıflık zonu (kazı derinliği>50m)			5
C.	Kimyasal ayrışmaya uğramış kaya ve kil içeren tek zayıflık zonu			2,5
D.	Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada birden fazla makaslama zonu			7,5
E.	Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada birden fazla makaslama zonu			5
F.	Kendi kendini tutabilen ve kil içermeyen kayada tek makaslama zonu (kazı derinliği>50m)			2,5
G.	Gevşek, açık (dolgusuz) çatlaklar, çok çatlaklı veya küp şeker (herhangi bir derinlikte)			5
i. Makaslama zonlarının kazıyı kesmediği fakat etkilediği durumlarda SRF değerleri %25-50 oranında azaltılır.				
b. Sağlam kayada kaya gerilmesi problemleri				
H.	Az derinlikte kazı, düşük gerilme koşulları, açık çatlaklar	>200	<0,01	2,5
I.	Orta derecede kaya gerilmesi koşulları	200-10	0,01-0,03	1
J.	Yüksek gerilme, çok sıkı yapısal unsurlar, gerilme koşulları genellikle elverişli, fakat duvarlarda stabilite problemleri oluşabilir	10-5	0,3-0,4	0,5-2
K.	Masif kayada orta derecede, kabuk şeklinde kaya parçası ayrılması (kazıdan sonraki 1 saat içerisinde)	5-3	0,5-0,65	5,50
L.	Masif kayada kazıdan hemen sonraki dakikalarda aşırı derecede, kabuk şeklinde parça ayrılması veya kaya patlaması oluşumu	3-2	>1	50-200
M.	Masif kayada şiddetli kaya patlaması ve ani dinamik yer değiştirmeler	<2	>1	200-400
c. Sıkışan kaya; kendi kendini tutamayan kayanın yüksek gerilme altında plastik akma yer değiştirme				
N.	Sıkışan kayada orta derecede gerilme koşulları		1,5	5-10
O.	Sıkışan kayada aşırı gerilme koşulları		>5	10-20
P.	Şişen kayada orta derecede gerilme koşulları			5-10
R.	Şişen kayada aşırı gerilme koşulları			10-20

Q sistemi yardımıyla, kaya sınıflandırmasının yanı sıra yeraltı mühendislik yapılarında kullanılacak destekleme tipleri konusunda öneriler yapılabilmektedir.

### 1.6.9. RMR Kaya Sınıflama Sistemi (Rock Mass Rating)

Bieniawski tarafından 1973 yılında Güney Afrika'da geliştirilmiş bir yöntem olan RMR (Rock Mass Rating), 1973'den 1989 yılına kadar yenilenecek günümüzdeki kullanım şekline gelmiştir. Bu sınıflama sistemi, yapılan sondaj karotları ile arazide yapılan ölçümler neticesinde elde edilen altı koşula bağlıdır. Bu koşullar:

- Sağlam kaya numunesinin tek eksenli basınç direnci,
- Sondaj karotlarından elde edilen RQD değeri,
- Eklem sıklığı,
- Eklemlerin durumu,
- Yeraltı suyu,
- Eklemlerin yönelimi.

Geomekanik sınıflamaya başlamadan önce tünellerin geçeceği güzergâhlar boyunca geoteknik özelliklere bağlı olarak bölümlere ayrılır. Sınıflama sisteminin şartları her bir jeolojik bölgede yapılan ölçümler sonucu elde edilecek geoteknik özelliklere ait veriler sonucu belirlenir.

Geomekanik sınıflamaya ait ilk 5 parametre Tablo 16.'da farklı nisbi değerlere bağlı olarak 5 gruptan oluşur. Yapılacak değerlendirme neticesinde, oran ne kadar yüksek olursa kaya kütesinin kalitesinin daha yüksek olması anlamına gelmektedir.

Sınıflandırma parametrelerinin değerlendirilmesi yapıldıktan sonra, Tablo 16'da görülen beş parametreye ait değerler dikkate alınarak bölgedeki kaya kütesinin kalitesinin bulunabilmesi için alt alta toplanır.

Tablo 17.'de süreksizliklerin doğrultu ve eğimleri değerlendirilmektedir. Süreksizliklerin doğrultu ve eğimleri değişik mühendislik uygulamaları (tüneller, temeller, madencilik, şevler v.s.) için farklı önem taşıdıklarından ayrı ayrı değerlendirilir.

Süreksizlik yönelimlerinden kaynaklı düzeltmeler yapıldıktan sonra, kaya kütesini Tablo 18'e göre sınıflandırılır ve kaya kütesinin kalitesinin 5 gruptan hangisine dâhil olduğu tespit edilir.

Kaya kütesini sınıflaması yöntemi kullanılarak mühendislik problemleri arasında bağlantı kurulabilir. Tünelcilik ve yeraltında geomekanik sınıflamadan elde edilen değerler yardımıyla tahkimatsız olarak ayakta kalabilme süresi ve maksimum duraylı (stabil) tavan açıklığı belirlenebilir.

Tablo 16. RMR Sınıflandırma Parametreleri ve Dereceleri (A)

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



Tablo 17. RMR Sınıflandırma Süreksizlik Yönelimleri İçin Düzeltmeler (B)

Eklemlerin Doğrultu ve Eğim Yönleri		Çok Uygun	Uygun	Orta	Uygun Değil	Hiç Uygun Değil
Derecelendirme	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

Tablo 18. (A) ve (B)'den Elde Edilen RMR Değerleri ve Kaya Sınıfları

Derece toplam (RMR)	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
Kaya sınıfı	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi Kaya	Orta Kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya

Yapılan tünellerin gözlenmesi, incelenmesiyle kazanılan tecrübelerle dayanarak oluşturulan ampirik yöntemlerde, kaya kütlelerinin kalitesi ve duraylılığı sınıflandırılmış ve daha önce benzer özellikteki kaya ortamlarında denenmiş ve başarılı olmuş destek sistemleri seçilir. Genellikle tünel çözümlerinde yaygın olarak kullanılan kaya sınıflama yöntemleri, Barton'un geliştirdiği Q sistemi ve Bieniawski'nin geliştirdiği RMR (Rock Mass Rating) geomekanik sınıflamalarıdır. Tünelin geçeceği güzergâhın yer aldığı kayanın özelliği, çatlak sistemi ve koşulları, yeraltı suyunun bulunması gibi özelliklerini sayısal olarak değerlendirerek sınıflandıran bu sistemlerin yanında, kayanın tüm davranış özelliklerini bir bütün olarak tanımlayan ve NATM sınıflaması olarak anılan ÖNORM B-2203 sınıflaması da, özellikle Avrupa ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tünelin açılması esnasında yapılacak gözlemlere ve yer değiştirme ölçümlerine dayanarak denetlenen NATM sınıflaması, Bieniawski'nin belirttiği ve Lauffer'in de katıldığı gibi, Q ve RMR sınıflamalarını tamamlar niteliktedir (Karagöz, 2007).

## 1.7. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)

### 1.7.1. Kayalarda Gerilme Durumu

Yeraltı kaya yapıları mekaniğine göre; yeraltı açıklığının etrafında bulunan kayalar hem tüneli yüklemekte, hem de komşu bölgelerden gelen yükleri taşımaktadır. Tünelde oluşan bu gerilmelerin ortaya çıkarılması ve anlaşılması, projelendirme çalışmalarında olduğu kadar uygulama sırasında da en önemli konular arasındadır. Tablo 19.'da tünel projelerinin yapılmasında dikkate alınması gereken gerilme türleri ve nedenleri gösterilmiştir.

Tablo 19. Tünel Projelerinde Dikkate Alınması Gereken Gerilme Türleri ve Nedenleri



Bunlardan ilk ikisi primer (doğal, ilkel) gerilme durumunu oluşturmaktadır. Yeraltı kazısıyla birlikte kaya ortamında bulunan ilk gerilme ortamı bozulmaya başlamaktadır. Böylece, mevcut gerilmeler kayacın gevşemesine bağlı olarak yer, yön ve şiddet değiştirerek zamanla ikincil (sekonder) gerilmelere dönüşmektedir.

Kazının bitmesi ile birlikte ideal-elastik malzeme özelliğindeki kayada, ikincil gerilme-yer değiştirme durumunun son şeklini alması beklenir. Ancak arazi ölçümleri kazı

etrafındaki yer değiştirmelerin zamana bağlı olarak farklı hızlarda geliştiğini kanıtlamaktadır.

İkincil gerilmelerin oluşumu esnasında, boşluk çevresinde oluşan yeni gerilmelerin şiddetlerine ve kayanın dokusuna bağlı olarak ‐kemerlenme‐ adı verilen yüklerin bulunduğu bölgeler meydana gelmektedir.

Tünel kazısı yapılırken kaya kütlelerinde denge halinde bulunan birincil kuvvetler, değişerek yine denge durumundaki ikincil hale dönüşürler. Bu değişim ancak gerilmelerin yeniden dağılması sürecinin başarılı bir geçiş dönemi ile sağlanabilir. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi, ekonomiklik ve güvenlik gibi konuları göz önünde bulundurarak bu geçiş dönemini kontrol altında tutmayı amaçlar (Koçak, 2006 ve Vardar, 2004)

### **1.7.2. Tarihçe**

1950 yıllarına kadar tünelcilik faaliyetlerinde, kalıcı tünel destek sistemlerinin montajı yapılabildiği kadar ahşap destek ve çelik destek sistemleri kullanılmıştır. Hidroelektrik santrallerin yapımı sırasında uygulanan bölünmüş kazı yönteminde, önce tabana yakın bir galeriyle kazıya başlanır. Daha sonra yan ve üst galerilerde kazı aşamalı olarak üst yarıya doğru genişletilirdi. Bu yöntem Avusturya Tünel Açma Yöntemi denilirdi. Bu yöntemin zamanla geliştirilmesi ve eski yöntemin tecrübelerinden yararlanılarak Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM metodu) ortaya çıkmıştır (Schurbert, 2002 ve IACES, 1995).

1957-1965 yılları arasında geliştirilen bu tünel yapım metodu, Rabcewicz tarafından Koruyucu Zon teorilerinin incelemesiyle 1963 yılında NATM adıyla ortaya konulmuştur. Yöntem bilimsel ve ampirik bir yöntemdir.

Yöntem birçok araştırmacı tarafından farklı yönleriyle incelenmiştir. NATM metodu kullanılarak yapılan ilk büyük ölçekli tünel, Rabcewicz tarafından Venezuela’da yapılmıştır (Koçak, 2006, Karaoğlan, 2002 ve Kılıç, 1997).

### **1.7.3. Tanımlar ve İlkeler**

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM), bir kaya sınıflama sistemi değildir. Bu yöntem tünel inşaatı sırasında yeraltı kazılarının performansını gözleyen ve yük altındaki

kaya kütlelerinin davranışının prensiplerini içeren bir yaklaşımdır.

Bu nedenle NATM kesin olarak belirlenmiş kazı ve tahkimat sistemlerini içermemektedir. Ancak, en duraylı ve ekonomik tahkimat miktarının elde edilmesi için tahkimatın sürekli olarak gözden geçirilmesi ve kaya hareketlerinin gözlenmesi esas olmak kaydıyla tünelcilik ve kazı yöntemlerinin hepsi kullanılabilir (Kılıç, 1997).

Yöntem; özellikle duraysız (zayıf) zeminlere adapte edilen, ince bir püskürtme beton tabakasıyla yüzey sağlamlaştırması yapılan, kaya bulonları yardımıyla sağlamlaştırılan ve mümkün olduğu kadar kısa bir süre içerisinde ters kemer betonu ile kaplanan yeni bir tünelcilik yöntemidir (Karaoğlan, 2002 ve Aygar, 2000).

Tünelin açılmasıyla birlikte kaya kütleleri içerisindeki birincil gerilme bölgesi ikincil gerilme bölgesine doğru değişim gösterir. Tünel etrafındaki kaya arkının altındaki bölgelerde zamana bağlı olarak gerilmenin tekrardan dağılması süreci oluşur. Bu durum plastik ve elastik davranış bölgelerini kapsar.

Bu yöntemin ilk ve en önemli ilkesi; kayanın mukavemetini korumak ve harekete geçmemesi için tünel etrafındaki kayada kendisini destekleyen bir halka oluşturmaktır. Ön sağlamlaştırma, kayanın kendini desteklemesine yardımcı olmak için oluşturulur. Bunun için ön sağlamlaştırmanın uygun bir yük-yer değiştirme özelliğinin olması ve tam zamanında yerleştirilmesi gerekir. NATM'ın ikinci ilkesi, tüneldeki yer değiştirmelerin ve kaplamada toplanan gerilmelerin aletlerle ölçülmesidir. NATM'ın üçüncü ilkesi; karar verip, anlaşmazlıkları çözerken de, tünel işi ile ilgili bütün tarafların tam bir işbirliği içinde bulunmaları gereğidir. NATM'ın dördüncü ilkesi; her türlü tünel şartına uygun olması ve tünelde mevcut şartlara göre kolaylıkla uygulanabilmesidir. Bu özelliği NATM'ın bir kazı veya sağlamlaştırma yöntemi değil de bir felsefe olmasının gereğidir (Karaoğlan, 2002).

1977 yılında Müller tarafından 22 maddeden oluşan NATM sisteminin temel ilkeleri yayınlanmıştır. NATM, prensipte her türlü arazi koşullarında uygulanabilecek önlem, iş ve işlemlerin optimizasyonuna yönelik bir tünelcilik felsefesinin adı olarak tanımlanmıştır [18].

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

Son yıllarda NATM metodunun prensiplerine göre inşa edilen tünellerde kullanılan kaya sınıflama yöntemi, kazı sırasında karşılaşılan kayanın geoteknik özellikleri ve tünel

yapımı sırasında davranışını kaya parametreleri, örtü yükü, kazı kesiti, ilerleme adımı boyu, kazı sırası yeraltı suyu ve geoteknik ölçüm sonuçlarını dikkate alarak tanımlar (Karaoğlan, 2002).

## **1.8. Yeni Avusturya Yönteminde Önorm B 2203/1994'e Göre Yinelenmesi ve Sürekli Kazılar için Kaya Davranışı**

Kaya sınıfları, NATM'da kayanın davranışına bağlı olarak 3 ana grupta toplanmıştır. Her bir kaya grubunun kendi içindeki alt grupları (A1, A2, B1, B2, B3, C1, C2, C3, C4, C5) vardır ve bu gruplar kendine has özelliklerle tanımlanmıştır.

Kazı ve ilerleme anolarının 4 boyutta (en kesitte, ilerleme yönünde ve zamanlamada) belirlenmesi, sağlamlaştırması, destekleme türlerinin seçimi, nitelikleri, sayısı ve boyutları yararlanılan geoteknik verilerin ve bilgilerin doğruluğuna bağlıdır. Bu nedenle, Yeni Avusturya Yönteminin önerilmesi halinde, planlama ve projelerde kazı öncesinde, sırasında ve sonrasında ölçüm, gözlem ve yönlendirme çalışmalarının takibi mutlaka yapılmalıdır.

### **1.8.1. A "Sağlam-Zamanla Kırılğan" Davranışlı Kayaçlar**

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

#### **1.8.1.1. A1 Sağlam Kayaçlar**

Hemen sonlanan çok az sayıda yer değiştirme olur. Belirgin süreksizlik olmayan masif kaya görünümündedir. Yer değiştirmeler çok küçük ve milimetre mertebesindedir. Kavlakların (serbest malzemeler) temizlenmesinden sonra hiçbir sökülme, düşme meydana gelmez. Su etkisi yoktur. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre (duraysızlık süresi) 3 haftadan fazladır. Sıralı kazıda destekleme gerekmez. İlerleme adımlarının uzunluğu ilke olarak çalışma tekniğince kısıtlanır. Sürekli kazıda destekleme gerekmez. Bu tür zeminlerde tüneldeki diğer imalatların devam edebilmesi için 5 cm kalınlığında

püskürtme beton atılır.

### **1.8.1.2.A2 Zamanla Kırılğan Davranış Gösteren Kayaçlar**

Çok kısa sürede sona eren düşük yer değıştirmeler oluşmaktadır. Bunlar milimetre mertebesindedir. Tünel tavanında ve yan duvarların üst kısımlarında süreksizliklerin konumu nedeniyle yüzeysel dökülmeler ve kama tipi kopmalar olabilir. Yenilme zonu yoktur. Su etkisi önemsizdir. Kama tipi kopma olan bölgelerde veya olması muhtemel bölgelerde lokal bulonlama, asimetrik yükleme ve sığ örtü kalınlığı olan tünel kesitlerinde projesinde gösterildiği şekilde lokal sistematik bulonlama yapılabilir. Patlatma yumuşak patlama yöntemi ile yapılmalı, ilerleme kazı adımı üst yarıda 2,5 – 3,5 m, alt yarıda kazı adımı 4 m ile sınırlı tutulmalıdır.

Tünelin desteksiz olarak ayakta kalabileceği süre 4 gün ile 3 hafta arasındadır. Sıralı kazıda destekleme; tavanda, omuzlarda ve üst yanlarda yer yer, tekil parçaların sağlama alınması için gerekir. İlerleme adımlarının uzunluğuna aşırı sökümlerin kısıtlanması amacıyla sınırlama getirilir. Sürekli kazıda destekleme; tavanda, omuzlarda ve üst yanlarda yer yer, tekil parçaların sağlama alınması için gerekir. Destekleme ve sağlamlaştırma çalışmaları ayna önündeki ikinci çalışma bölgesinde yapılır.

### **1.8.2. B “Kırılğan” Davranışlı Kayaçlar**

Bu kayaç sınıfı süreksizliklere bağlı doku dayanımının ve/veya gerilme kemerlenmesinin yetersizliği nedeniyle gevşemeye yatkın ortamları ihtiva eder. B1, B2 ve B3 olmak üzere üç altsınıfa ayrılır.

#### **1.8.2.1.B1 Kırılğan Kayaçlar**

Çok kısa sürede sonlanan düşük yer değıştirmeler ve süreksizliklere bağlı dayanım azalması vardır. Patlatma ile oluşan sarsıntılara bağlı gevşemelere ve tavanda veya üst omuzlarda sökümlere sebep olur. Yer değıştirmeler 2-3 cm civarında olup hızla azalır ve sönümlenirler. Su etkisi genellikle önemsizdir. Üst yarıda sistematik bulonlama, alt yarıda

gerektiğinde lokal bulonlama yapılır. Patlatma yumuşak patlatma yöntemi ile yapılmalı, ilerleme adımı üst yarıda 2-3 m alt yarıda 4 m ile sınırlanmalıdır. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 10 saat ile 4 gün arasındadır. Sıralı kazıda destekleme düzenli olmakla birlikte dar kapsamlıdır. İlerleme adımları, tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süreye, serbest açıklık boyuna ve sağlamaştırma ve destekleme elemanlarının oluşturulması için gereken süreye bağlı olarak belirlenir. Yer yer aynanın desteklenmesi gerekebilir. Sürekli kazıda B1.1 ve B1.2 olmak üzere iki alt sınıf tanımlanmıştır:

**B1.1:** Düzenli fakat dar kapsamlı destekleme; tavanda, omuzlarda ve üst yanlarda ayna öncesindeki 2. çalışma bölgesinde makineli kazıyı engellemeksizin gerçekleştirilir. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 2 gün ile 4 gün arasındadır.

**B1.2:** Tavanda, omuzlarda ve üst yanlarda düzenli ve dar kapsamlı destekleme 1. ve 2. çalışma bölgesinde gerçekleştirilir. Kazı makinesinin çalışmaları destekleme ve sağlamaştırma önlemlerinin alınması sırasında kısıtlanır. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 10 saat ile 2 gün arasındadır.

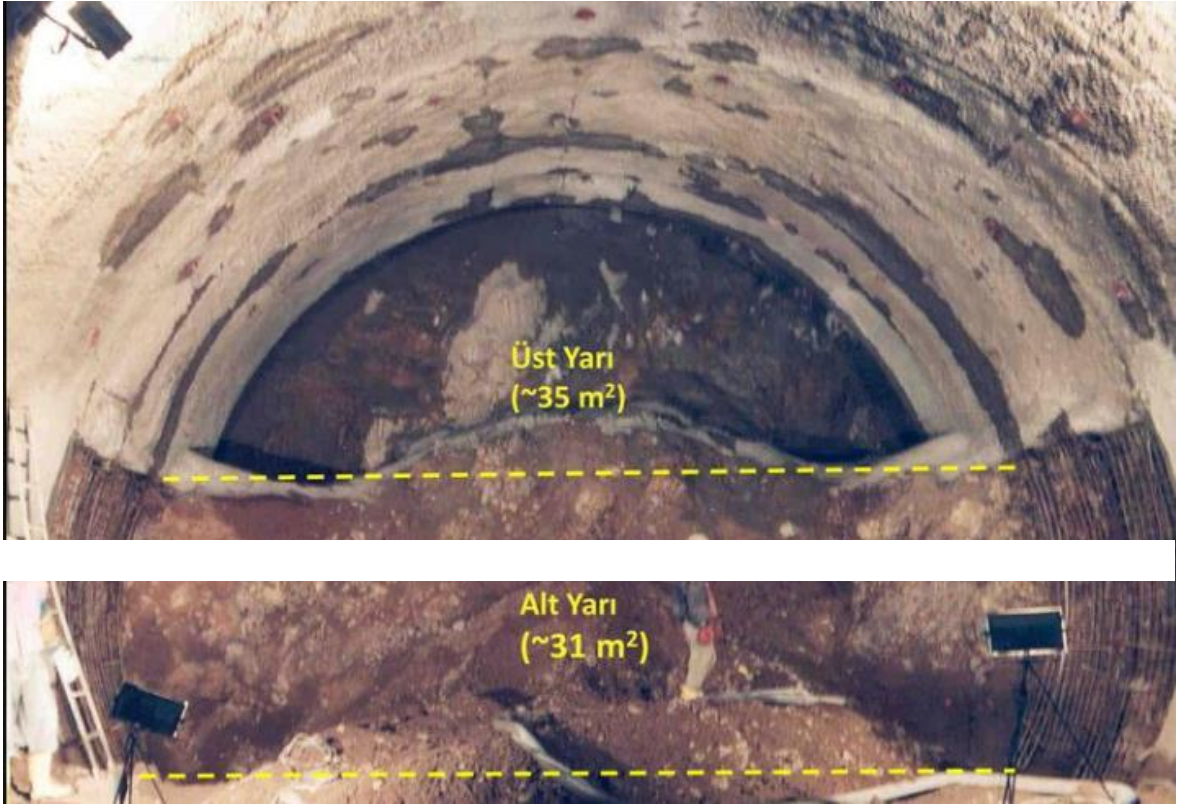
### **1.8.2.2. B2 Çok Kırılgan Kayaçlar**

Çok kısa sürede sonlanan düşük yer değiştirmeler ve süreksizliklere bağlı dayanım azalması, düşük kemerlenme, yüksek doku hareketliliği belirgindir. Patlatmaların etkisiyle desteklenmemiş yüzeylerden parçaların kopması gibi hızlı ve derine ulaşan gevşemeler görülür. Bozunmuş kayada su akışı ile birlikte sınırlı yenilme bölgeleri oluşur. Desteklemenin zamanında yapılması durumunda yer değişmeler 3-5 cm civarında kalır. Tünel kesitinde sistematik destekleme yapılır, gerektiğinde tavanda süren uygulanır. Patlatma yumuşak patlatma yöntemi ile yapılmalı, ilerleme adımı üst yarıda 2-2,5 m, alt yarıda 3,5 m ile sınırlanmalıdır. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 2 saat ile 10 saat arasında, hatta daha kısadır. Sıralı kazıda destekleme tavanda, omuzlarda ve yanlarda düzenli ve çoğu aynayı da içerecek şekilde geniş kapsamlıdır. Parçalı kazı kesitleri gerekir. İlerleme adımları tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süreye, serbest açıklık boyuna göre belirlenir ve ayna sürekli olarak desteklenir. Sürekli kazıda B2.1 ve B2.2 olmak üzere iki alt sınıf tanımlanmıştır:

**B2.1:** Kazı başının hemen arkasından başlamak üzere düzenli destekleme gerçekleştirilir. İlerleme hızını bu çalışmaların gerektirdiği süre belirler. Yüksek hızlarda

dönen (frezeli) makine kullanılacaksa parçalı kazı yapılabilir. Tünelin desteksiz olarak ayakta kalabileceği süre 10 - 5 saat arasındadır.

**B2.2:** Kazı başının hemen arkasında ön çalışma bölgesini (1.bölgeyi) çepeçevre saracak şekilde düzenli destekleme gerekir. İlerleme hızını bu çalışmaların gerektirdiği süre belirler. Yüksek hızlarda dönen (frezeli) makine kullanılacaksa parçalı kazı yapılabilir. 1. ve 2. çalışma bölgesinde gerçekleştirilir. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre ayna desteklenmeksizin 2 - 5 saat arasındadır.



Şekil 8. 1. Çalışma Bölgesi (Üst Yarı) ve 2. Çalışma Bölgesi (Alt Yarı) (URL-2)

### 1.8.2.3.B3 Döküntülü Kayaçlar

Küçük parçalı kazı kesitlerinin kazılmasında bile kayaç parçaları içeriye dökülür. Duraylılık (stabilite) yetersizliğinin nedeni, kohezyonun ve kayaç dokusundaki kenetlenmenin azlığı ve su etkisidir. Yer değiştirmeler 10 cm'ye kadar çıkabilir. Gevşeme zonu derinlikleri artar. Tünel kesitinde sistematik destekleme yapılır ve lokal süren uygulaması gerçekleştirilebilir. Patlatmalar genellikle yumuşak patlatma ile yapılmalı,



titreşime hassas kayalarda mekanik kazı yapılmalı, ilerleme adımı üst yarıda 1,5-2 m, alt yarıda 3 m ile sınırlanmalıdır.

B3 kaya sınıfında invert uygulanması, düşük örtü kalınlığı, asimetric yüklenme, haritasal ölçümlerle belirlenen yer değiştirmeler sonlanmayarak devam etmesi ve 10 cm'yi aşması durumunda, halkanın (ring) kapanmayarak yük dağılımının dengelenmesi amacı ile yapılmalıdır.

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

Sıralı kazıda; aynanın ön sürenlerle desteklenmesi, çok parçalı kazıda çalışabilmek için bile kayaç niteliğini iyileştirici ve duraylılığı artırıcı önlemlerin alınması gereklidir. Aynayı da kapsamak üzere tüneli çepeçevre saracak şekilde düzenli ve yoğun bir destekleme gerekir. Sürekli kazıda şiltsiz makinalar ancak ön sağlamlaştırma gibi çok özel önlemlerin alınmış olduğu durumlarda kullanılabilir. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 2 saatten daha azdır.

### **1.8.3. C “Plastik” Davranış Gösteren Kayaçlar**

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

#### **1.8.3.1. C1 Kaya Patlatmalı Kayaçlar**

Primer (doğal ilk) gerilmeler genelde yoğun, sert ve kırılğan kayaçlarda elastik enerji olarak depolanır. Kazı sırasında bu enerji aniden boşalır ve kayaç parçalarının koparak etrafa

dağılmasına neden olur. Kırılma olaylarının derinlere ulaşmadığı serbest kazı yüzeylerinden dışarıya fırlayan bu parçalar çoğunlukla sırcalanmış şekildedir.

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

Sıralı kazıda; destekleme çoğu belirli bölgelerde hemen ve oldukça sık yerleştirilmiş kısa kaya saplamalarıyla yapılır. Gerekğinde çelik hasır da kullanılır. Kayadaki gerilmelerin boşaltılması için gevşetme delikleri açılabilir veya patlatma ile ortam gevşetilebilir. Sürekli kazıda 1. çalışma bölgesinde sık aralıklarla kısa kaya saplamaları ve gerektiğinde çelik hasır kullanılır. Makinalı kazı bundan etkilenmez.

### **1.8.3.2. C2 Plastik Davranış Gösteren Kayaçlar**

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

Sıralı kazıda; destekleme ve sağlamlaştırma bütün kesiti kaplayacak şekilde düzenli olarak yapılır. Duraylılığın korunması ve artırılması için aynada kazı kesiti ve biçiminin en uygun olacak şekilde seçilmesi gerekir. Sağlamlaştırma işlemlerinin hedefi yenilme mekanizmalarını denetleyerek kırılmaları sınırlandırmaktır. Atım-ilerleme boyu aynadaki duraylılığa göre belirlenir. Sürekli kazıda C2.1 ve C2.2 olmak üzere iki alt sınıf tanımlanmıştır:

**C2.1:** Destekleme düzenli ve kapsamlı şekilde 1. ve 2. çalışma bölgesinde tavanda, omuzlarda ve yanlarda kademeli olarak gerçekleştirilir. Bu çalışmalar makinalı kazı çalışmalarını engeller. Makinanın sıkışmasının önüne geçmek için gerekli önlemler alınmalıdır. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 2 gün ile 10 saat arasındadır.

**C2.2:** Kazı kafasının hemen arkasından başlamak üzere düzenli destekleme

gerçekleştirilir. İlerleme hızını bu çalışmaların gerektirdiği süre belirler. Parçalı kazı yapılarak ilerlenir. Tünel açma makinasının sıkışmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 5 - 10 saat arasındadır.

### **1.8.3.3.C3 Aşırı Plastik Davranış Gösteren Kayaçlar**

Başlangıçta yüksek yer değiştirme hızları gösteren, uzun sürede ve çok yavaş sonlanan büyük yer değiştirmeler görülür. Bu sırada derine ulaşan yenilme mekanizmaları ve plastikleşme bölgeleri oluşur ve gelişir. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre 2 saat ile 5 saat arasındadır.

Sıralı kazıda bütün serbest yüzeylerin desteklenmesi ve sağlamlaştırılması gereklidir. Parçalı kazı kesitleri gerekir. Bunların boyutları aynanın desteklenebilirliği ile sınırlıdır. Yer değiştirmelerin büyüklüğü çoğunlukla yer değiştirme yarıkları veya biçim değiştirebilen destek öğelerinin kullanımı gibi özel yapısal önlemlerin alınmasını zorunlu kılar. İlerleme adımları aynanın duraylılığı ve yer değiştirme hızlarına göre belirlenir ve ayna sürekli olarak desteklenir. Sürekli kazıda düzenli ve yoğun bir destekleme kazı kafasının hemen arkasındaki ön çalışma bölgesini (1.bölgeyi) çepeçevre saracak şekilde gerçekleştirilir. Yüksek hızla dönen makineler kullanılarak yapılan kazı ancak parçalı olarak ve önemli duraksamalarla yapılabilir. Tünel açma makinasının sıkışmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süre ayna desteklenmeksizin 2 - 5 saat arasındadır.

### **1.8.3.4.C4 Yumuşak Kayaçlar**

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

Sıralı kazıda; gerçekleştirilen iyileştirme ve aynanın ön sürenlerle desteklenmesi gibi özel önlemler, çok parçalı kazıda ilerlemeyi sağlayacak şekilde önceden veya imalat sırasında düşünülmelidir. Her parçada aynayı ve kazı yüzeylerini çepeçevre saracak şekilde düzenli, yoğun destekleme ve sağlamlaştırma önlemlerinin alınması gerekir. Sürekli kazıda şiltsiz makineler (sert ve kendini tutabilen zeminlerde kullanılır) ancak ön sağlamlaştırma

gibi çok özel önlemlerin alınmış olduğu durumlarda kullanılabilir. Tünelin desteksiz olarak ayakta durabileceği süresi 2 saatten daha azdır.

### **1.8.3.5. C5 Şişen-Kabaran Kayaçlar**

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

Sıralı kazıda zaman içinde şişme-kabarma basınçlarını karşılayabilen uygun destekleme önlemleri ve işlemleriyle kabarmaya bağlı yer değiştirmelerin oluşumu önlenebilir ya da bunların zararlı etkileri engellenebilir.

Sürekli kazıda zaman içinde şişme-kabarma basınçlarını karşılayabilen uygun destekleme önlemleri ve işlemleriyle kabarmaya bağlı yer değiştirmelerin oluşumu önlenebilir ya da bunların zararlı etkileri engellenebilir. Şiltsiz makinalar ancak çok özel önlemlerin alınmış olduğu durumlarda kullanılabilir.

Tünelin desteksiz olarak ayakta kalabileceği süre için veri yoktur.

C2, C3, C4 ve C5 kaya ortamlarında jeolojik haritalamaya ek olarak kazı sırasında bazı arazi ve laboratuvar araştırmaları ile geoteknik ölçümlerinin yapılması gerekir.

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

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

NATM'da kazı sırasındaki araştırma çalışmaları ve geoteknik ölçümlerden elde edilen veriler projede göz önüne alınan tünelin bulunduğu ortamın jeolojik yapısı, uygulanan kazı yöntemi (bölünmüş kazı, ilerleme adımı), destekleme sırası ve aralıkları, yer değiştirme toleransları ile birlikte değerlendirilmelidir. Projede baskılı kaya ortamı ile karşılaşılması durumunda, tünelin emniyetli gerekse tünelin kazı geometrisinin oluşturulması bakımından yapım sırasında elde edilen veriler de göz önüne alınarak proje çalışması yapılmalıdır (Vardar, 2004 ve Akçelik, Solak, Mucukgil, 1999).

## 1.9. NATM'a Göre Kaya Sınıflamalarının Belirlenmesi

Yeni Avusturya Tünel Açma Metoduna göre kaya sınıflamalarının tespitinde aşağıdaki sıra izlenmelidir (Karaoğlan, 2002).

### 1. Tünel kazısı yapılacak olan kaya kütesinin karakterinin belirlenmesi:

Projede tünelin yapılacağı güzergâha ait jeolojik, hidrojeolojik ve geoteknik bilgilerin, tünelin kazısı sırasında yapılan jeolojik haritalamadan elde edilen bilgilerle karşılaştırılmalıdır. Esas olarak projede öngörülen kaya formasyonu, litolojisi ve kaya birimleri ile karşılaştırılmalı ve ön görülen kaya formasyonun kazı esnasında belirlenen kaya formasyonu ile uyumlu olup olmadığı kontrol edilmelidir.

### 2. Kazı sırasında kaya kütesi tipinin belirlenmesi:

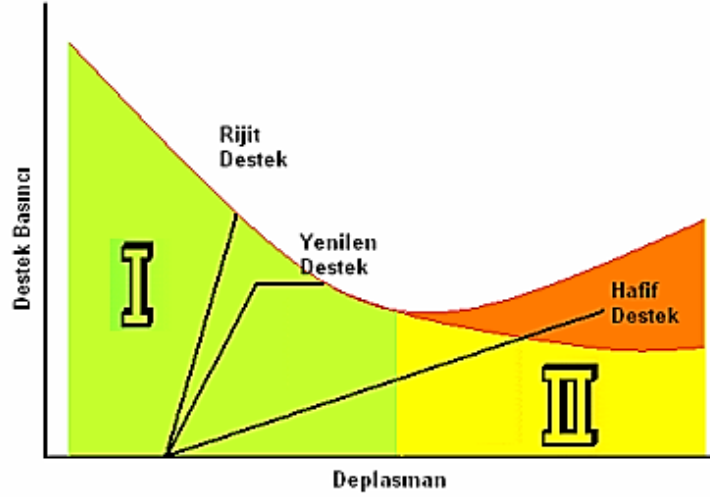
Jeolojik haritalama esnasında tespit edilen süreksizlik, süreksizliklerin arasındaki dolgunun niteliği, su sızıntıları, bozuşma dereceleri, kayanın mukavemeti, aşırı sökülme, fayların tünel kesitine göre konumları ve etkileme alanı v.b. bilgiler kullanılarak kazısı yapılan kaya kütesinin davranışının yorumlanması ve buna göre kaya tipinin ÖNORM 2203/1994' e göre üç ana gruptan (stabil A, gevrek B, baskılı C) hangisine girdiği belirlenmelidir.

Jeolojik haritalamadan tespit edilen verilerle sayısal olarak kayayı sınıflayan RMR ve Q sistemi gibi kaya sınıflamaları elde edilmektedir. Bu kaya sınıflamalarında kaya kütesinin geoteknik parametreleri (kohezyon, içsel sürtünme açısı, elastisite modülü), uygulanan projenin karakteristik özellikleri (kazı geometrisi v.b) kaya kütesinin anizotropisi ve zamana bağlı davranışı gibi karmaşık özellikler tek bir sayısal değere indirgenmektedir. Bu sınıflamalarda kullanılan girdi parametrelerinde kayanın yenilme mekanizması, yer değiştirmeleri ve kaya-destek etkileşimi dikkate alınmamakta, tasarıma esas parametre ve destek seçimi için yetersiz kalmaktadır.

## 1.10. Tünelde Sağlama, Destekleme ve İyileştirme

Pacher 1964 yılında gerilme ile yer değiştirme arasındaki ilişkiyi incelemiş ve kalıcı yer değiştirmenin rijit bir destek sistemi ile durdurulabileceğini tespit etmiştir. Kayaç elastik kaldığı sürece, yer değiştirmeler ile destek basıncı ters orantılı olmaktadır. Kayacın dayanım değeri aşıldığında ise, yeraltı açıklığından çevre kayacın derinliklerine doğru koruyucu zon

adı verilen bölge oluşmaya başlamaktadır. Zamana bağlı olarak açıklık etrafındaki sıkışmış olan malzeme arazi basıncının etkisi ile boşluğa doğru patlamaktadır. Şekil 8’de Fenner-Pacher eğrisi olarak bilinen bu davranış gösterilmiştir. Kritik yer değiştirme sınırı denetlenerek arazi basıncı kontrol edilebilmekte ve gerekli destek basıncı bu sayede belirlenebilmektedir.



Şekil 9. Fenner-Pacher Eğrisi (Vardar, 2005)

Şekle göre, rijit bir destek sistemi uygulandığında yüksek destek basıncı elde edilmekte, yer değiştirmelerin oluşumu engellenebilmektedir. Metro tünelleri gibi yüksek yer değiştirmelere izin verilmeyen sistemlerde uygulanan bu yöntemin aksine, bir miktar yer değiştirmeye izin verildiğinde gerekli olan destek basıncı azalmakta, daha az ve esnek bir destekleme ile imalat yapılabilmektedir.

Bu aşamada, yer değiştirme engellemez ise arazi basıncının ve gevşemelerin etkisi ile mevcut destek sistemine ek olarak ilave destek sistemine ihtiyaç olacaktır. Aksi halde yer değiştirmeler kontrol edilemez bir duruma gelmektedir.

Yeraltı kaya yapılarının inşaatı sırasında içinde çalışılan ortam ve koşullar değişmektedir. Bu değişimin derecesi, kuvvetler ve moment dengesinin ya da gerilme durumunun teknik girişim sonucunda ne kadar bozulmuş olduğuna bağlıdır. Zamana bağlı gerilme-yer değiştirme ilişkisi ve çevre kayacın psödoplastikleşmesi (yalancı plastikleşme), denge durumu ile etkileşimin ölçütü ve nedeni olmaktadır. Bu etkileşim miktarının teknik girişim için öngörülen sınırları aşması durumunda ise duraylılık sorunu başlamaktadır. Duraylılığın bozulması, yeraltı kaya yapısının çevresi ile olan ilişkisine bağlıdır. Örneğin bir

metro tüneline hiçbir olumsuzluk olmamasına rağmen yüzeyde oturmaların olması duraysızlık kabulü için yeterli olacaktır. Benzer şekilde yerleşimden uzak bir yerde inşa edilen bir tünelde, yeryüzündeki oturmalar duraysızlık olmayacak, tünelde göçüğe neden olabilecek yer değiştirmeler duraysızlık olarak kabul edilecektir. Duraysızlığın önlenmesi ve/veya giderilmesi için alınan önlemler;

- Sağlamaştırma
- Destekleme
- İyileştirme

olarak düzenlenmekte ve ön, geçici veya kalıcı olarak sınıflandırılmaktadır.

Alınabilecek bu önlemler kuvvetler dengesini ve gerilme durumunu değiştirebilmekte ya da ortam koşullarını iyileştirebilmektedir (Koçak, 2006).

### **1.10.1. Sağlamaştırma ve Destekleme**

Kaya sağlamaştırma (rock reinforcement); bir yeraltı kazı boşluğunun çevresindeki kayanın yük taşıma özelliğini koruması ve duraylılığın artırılması için kaya bulonları, kablo bulonlar veya herhangi bir kaya sağlamaştırma elemanının yerleştirilmesi ve kayanın zaten var olan direncinin de harekete geçirilmesidir. Böylece kaya kütlesi "*kendi kendini destekler*" duruma gelir. Kaya sağlamaştırma elemanları kaya kütlesinin içerisine yerleştirildiğinden kaya kütlesinin bir parçası haline gelir.

Kaya desteklemesi ise; beton kaplama, çelik iksa veya diğer tür mühendislik elemanları kullanılarak kaya kütlesinin hareketlerini kontrol etmektir. Kaya tahkimat elemanları kaya kütlesinin dışında yer alır.

Sağlamaştırma, tünellerde duvar ve taban emniyetini sağlamak anlamına gelmektedir. Gerek tünellerin kazılması sırasında, gerekse bittikten sonra duraylılık ve güvenlik, geçici ve/veya kalıcı sağlamaştırma yöntemlerine göre uygulama yapılmasıyla sağlanır. Sağlamaştırma ve destekleme işlemleri; ön gerilmeli veya gerilmemiş kaya bulonu, çelik hasır, püskürtme beton, çelik iksadan (veya inşaat demirinden yapılmış kafes kirişleri) oluşan dış kabuk ile beton (veya betonarme) kabuktan ibarettir.

NATM'da birincil destekler olarak kullanılan püskürtme beton, hasır çelik ve kaya bulonları kaya kütlesiyle birlikte karma (kompozit) bir yapı oluşturmaktadır. Kaya ve destek elemanlarından oluşan bu karma (kompozit) sistem tünel çevresinde oluşan basınçların

yeniden dağılımını sağlayarak kayanın gevşeme sonucu azalmakta olan dayanımının artırılmasını sağlamaktadır. Yer değiştirmeler, kontrollü bir şekilde tünel içinde göçüğe meydan vermeden veya emniyetsiz bir ortam oluşmadan gerçekleştirilmelidir.

Tünellerde sağlamlaştırma iki aşamada gerçekleşmektedir. Geçici sağlamlaştırma kafes donatı, bulonlar, püskürtme beton, tel kafes olup bunların bir veya birkaçının birlikte kullanılmasıyla sağlamlaştırma gerçekleştirilir. Kalıcı sağlamlaştırma ise nihai beton kaplama ve en son yapılacak olan kontak enjeksiyonları ile oluşturulacaktır. Kaya kendini tutamayacak kadar parçalı ise gerekli görülen desteklerin aralıkları azaltılarak ve süren (ön çakma çubuğu) kullanılarak sağlamlaştırma işlemlerinin emniyetle yapılması sağlanmaktadır. Ayrıca aynanın duraylılığının sağlanması için aynaya püskürtme beton da atılmaktadır.

### **1.10.2. Püskürtme Beton**

Püskürtme beton; minimum 400 dozlu, ince kum, agrega, çimento, çelik elyaf, priz artırıcı veya akışkanlaştırıcı karışımlardan oluşan kuru ya da ıslak olarak pnömatik pompalar yardımıyla kazı yüzeyine püskürtmek suretiyle yapıştırılabilen ve çok yönlü kullanım amacı olan bir çeşit betondur.

Püskürtme beton kazı yüzeyine yakın zemin/kayanın kesme dayanımını artırır, tünel kesiti çevresindeki kayanın gevşemesini, kayadaki süreksizlikleri doldurarak dökülmeleri ve sökülmeleri önler. Kazıdan hemen sonra oluşan gerilme ve yer değiştirmelerin bir kısmını karşılar. Taşıyıcı eleman olarak donatılı ve donatısız kullanılır.

Su/çimento oranı kuru karışımlar için 0,3-0,5 arasında değişir. Bölgesel şartlara uyum sağlaması için bu oran kullanıcı tarafından ayarlanabilir. Islak karışımlar için su/çimento oranı 0,4-0,6 arasındadır. Tipik bir püskürtme beton karışımında bulunan maddeler ve karışım içindeki oranları Tablo 20'de belirtildiği gibidir (Kılıç, 1997)



Tablo 20. Püskürtme Beton İçerisinde Bulunan Malzemeler ve Karışım Oranları

Çimento	% 15-20
İri Agrega (Çakıl)	% 30-40
İnce Agrega (Kum)	% 40-50
Hızlandırıcı	% 2-5
Çelik Elyaf	% 2-5

### 1.10.3. Hasır Çelik

Çelik hasırlar kaya ve zemin destekleme uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Kaya bulonlarıyla birlikte iki tür çelik hasır kullanılmaktadır. Bunlar birbirlerine zincir şeklinde geçmeli tellerden oluşturulan hasırlar ve birbirlerine kaynatılarak tutturulan çelik hasırlardır. Hasır kullanımının amacı, eklemlerin sık ve bulon aralıklarının fazla olduğu kaya ortamlarında bulonlar arasında kalan blokların desteklenmesi ve püskürtme betonun mukavemetinin artırılmasıdır.

Çelik hasırlar püskürtme betonla birlikte kullanıldıklarında (özellikle tüneller, ana nakliyat galerileri, band yolları, yeraltı tamir-bakım istasyonları, v.s.) sağlam betonlar gibi çalışır, kayaca sağlamlık verir, hava ve nem etkilerine karşı korur ve bulonların sağlamlaştırma etkilerine ek olarak esaslı bir sağlamlaştırma sağlar.

### 1.10.4. Kaya Bulonu

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

Kaya bulonları tünel kesiti çevresindeki kayanın desteklenmesinde kullanılan ana destek elemanlarından biridir. Kaya bulonu, kaya bloklarının sabitlenmesinde tekil olarak

kullanıldığı gibi çevredeki kayanın dayanımını arttırılması amacıyla sistematik olarak da kullanılabilir.

#### **1.10.5. Çelik İksa**

Çelik iksa, kazı yapılan tünel kesitinde püskürtme beton dayanımını kazanıncaya kadar geçen sürede yapım güvenliğini sağlamak ve püskürtme betonda yük dağılımına yardımcı olmak amacıyla kullanılırlar. Uygulanan çelik iksa tipleri kaya ortamına göre I, H, TH, E ve kafes kiriş olarak seçilebilir. Bu tür destekleme elemanları az eklemli kaya ortamlarında kullanılabilirdiği gibi kazıyı müteakip aşırı çatlakların oluştuğu kaya ortamlarında da kullanılabilir. Çok çatlaklı kaya ortamlarında çelik iksa ve kazı duvarı arasında çelik hasır, çelik çubuk, ağaç takoz veya çelik plakalar yerleştirilerek küçük kaya bloklarının düşmesi önlenir.

Çelik takımlar kazıyı çevreleyen kaya kütlelerini güçlendirmezler. Ancak, yer değiştirme sonucu zayıflayan çevre kayasına destek olurlar. Ön yüklemeye tabi tutulamadıkları için kazı duvarına aktif bir basınç uygulayamazlar. Bu nedenle, çelik takımların etkinlikleri iksa ile duvar arasında yerleştirilen takozların kalitesine bağlıdır.

#### **1.10.6. Çelik Kuşaklar (Straps)**

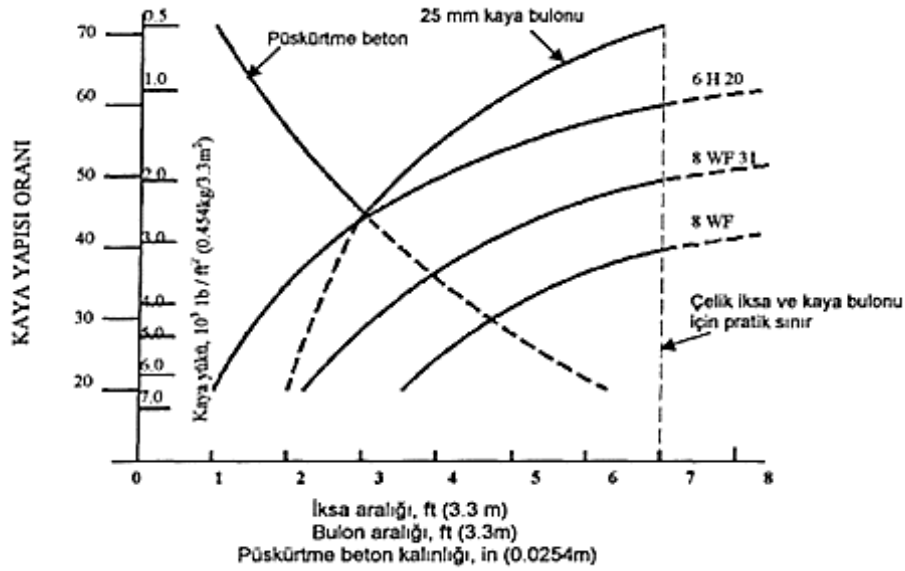
Çelik kuşaklar 6 mm kalınlığında, 100 mm eninde ve değişik uzunluklarda imal edilebilen kolaylıkla şekil verilebilen çelik bandlardır. Çelik kuşaklar kaya bulonlarının yalnız başlarına kullanılmaları durumunda orta ve ince kaya tabakalarını desteklemede yetersiz kaldıklarında bulonlarla birlikte kullanılır.

Çelik kuşaklara kazı tavan veya duvarına yerleştirilebilmeleri için kolayca şekil verilebilir. Bunlar düzenli olarak kaya bulonları ile tespit edilirler. Bu kuşaklar sürekli olarak zayıflık düzlemine dik yönde yerleştirilir (Karaoğlan, 2002 ve Kılıç, 1997).

## 1.11. Kaya Sınıflama Sistemleri ile Destek Basıncı ve Destek Seçimi Arasındaki İlişki

### 1.11.1. RSR Sistemi ile Destek Basıncı ve Destek Seçimi Arasındaki İlişki

Belirlenen RSR değeri, iksaya esas olmak üzere kaya kütesinin niteliğini yansıtır. RSR değeri 19'dan küçük olan kayalarda kuvvetli iksa gerekir. RSR değeri 80 veya daha fazla olan kayalarda iksa gerekmediği sonucuna varılmıştır. Şekil 9.'da 6,50 m çapında tüneller için iksa gereksinimi gösterilmiştir [11].



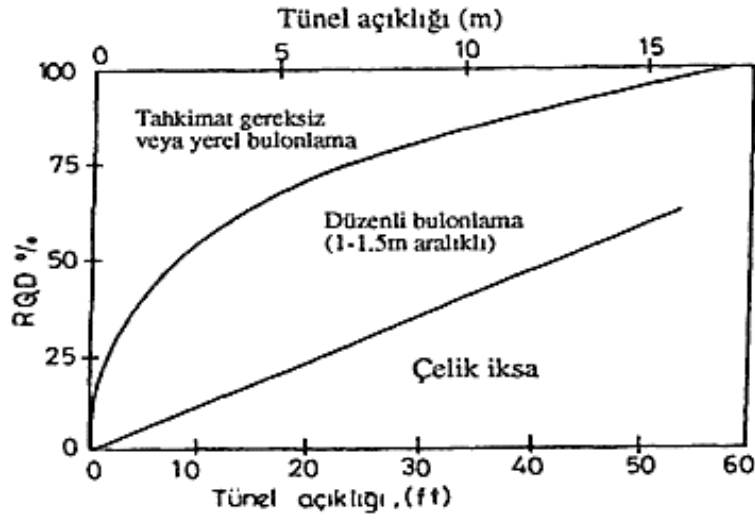
Şekil 10. RSR Kavramı-6,5 m Çaplı Tünel İçin Destek Tablosu

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

### 1.11.2. RQD Sistemi ile Destek Basıncı ve Destek Seçimi Arasındaki İlişki

RQD indeksine bağlı olarak kaya tünellerinde tavsiye edilen destekleme ve sağlamlaştırma yöntemi Tablo 21.'de verilmektedir. Merrit (1972) yaptığı çalışmalarda

RQD indeksinin sağlam kayalar için açılan tünellerdeki tahkimat ihtiyaçlarının belirlenmesinde oldukça kullanışlı olduğu, ancak ince kil dolgusu içeren eklemlere sahip kayalarda ve sulu ortamlarda bu indeksin kullanılmasının bazı sakıncalarının olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 11.'de Merrit tarafından önerilen RQD-Sağlamlaştırma ilişkisi verilmektedir.



Şekil 11. Tünel Destekleme Seçiminde RQD' nin Kullanılması

Tablo 21. RQD'ye Bağlı Olarak Kaya Tünellerinde (6 m-12 m) Tavsiye Edilen

## Destekleme

Kaya kalitesi	Tünel açma yöntemi	Alternatif Destekleme Sistemleri		
		Çelik destekleme <sup>(2)</sup>	Kaya bulonları <sup>(3)</sup>	Püskürtme beton
Çok iyi <sup>(1)</sup> RQD>90	Tünel açma mak.	Gerek yok.Kaya yükü (0-0,2)B	Gerek yok	Gerek yok
	Delme-patl.	Gerek yok.Kaya yükü (0-0,3)B	Gerek yok	Bazı bölgelerde gerekirse 5-8 cm kalınlıkta
İyi <sup>(1)</sup> 75<RQD<90	Tünel açma mak.	Gerekirse 1,52-1,83 m aralıklı hafif kaburgalar. Kaya yükü (0-0,4)B	Gerekirse 1,52-1,83 m aralıklı bulonlar	Bazı bölgelerde gerekirse 5-8 cm kalınlıkta
	Delme-patl.	1,52-1,83 m aralıklı hafif kaburgalar. Kaya yükü (0,3-0,6)B	1,52-1,83 m aralıklı bulonlar	Bazı bölgelerde gerekirse 5-8 cm kalınlıkta
Orta 50<RQD<75	Tünel açma mak.	1,52-1,83 m aralıklı orta büyüklükte kaburgalar. Kaya yükü (0,4-1)B	1,22-1,83 m aralıklı bulonlar	Tavanda 5-11 cm kalınlıkta
	Delme-patl.	1,22-1,52 m aralıklı hafif ya da orta büyüklükte kaburgalar. Kaya yükü (0,6-1,3)B	0,9-1,52 m aralıklı bulonlar	Tavan ve yan duvarlarda 11 cm veya daha fazla kalınlıkta
Zayıf 25<RQD<50	Tünel açma mak.	0,9-1,22 m aralıklı yarım daire kaburgalar. Kaya yükü (1-1,6)B	0,9-1,52 m aralıklı bulonlar	Bulonlarla birlikte tavan ve yanlarda 11-15 cm kalınlıkta
	Delme-patl.	Orta büyüklükte veya apır kaburgalar. Kaya yükü (1,3-2)B	0,6-1,22 m aralıklı bulonlar	Bulonlarla birlikte 15 cm veya daha kalın tavan ve yanlarda
Çok Zayıf RQD<25 (kabarma basıncı olmayan ortamlar)	Tünel açma mak.	0,6 m aralıklarla orta veya ağır, dairesel kaburgalar. Kaya yükü (1,6-2,2)B	0,6-1,22 m aralıklı bulonlar	Orta büyüklükte kaburgalar ile birlikte kesit boyunca 15 cm veya daha fazla püskürtme beton
	Delme-patl.	0,6 m aralıklı ağır kaburgalar. Kaya yükü (1,6-2,2)B	0,9 m aralıklı bulonlar	Orta büyüklükte veya daha ağır kaburgalar ile birlikte kesit boyunca 15 cm veya daha kalın
Çok zayıf (şişen kaya ortamı)	Tünel açma mak.	0,6 m aralıklı çok ağır, dairesel kaburgalar. Kaya yükü>76,2 m	0,6-0,9 m aralıklı bulonlar	Ağır kaburgalarla birlikte tüm kesit boyunca 15 cm veya daha kalın
	Delme-patl.	0,6 m aralıklı çok ağır, dairesel kaburgalar. Kaya yükü>76,2 m	0,6-0,9 m aralıklı bulonlar	Ağır kaburgalarla birlikte tüm kesit boyunca 15 cm veya daha kalın



Sürekli iksasız maksimum proje açıklığı

Sürekli iksasız açıklıkların gerçek sınırları şöyle ifade edilebilir:

$$\text{Açıklık} = 2 \cdot \text{ESR} \cdot \frac{Q^{0,4}}{(2 \cdot \text{ESR})} \quad (2)$$

Burada ESR, destek oranıdır. Kazı tipine göre kazı destek oranı Tablo 22.'de görülmektedir.

Tablo 22. Kazı Tipine Göre Kazı Destek Oranı

Kazı Tipi	ESR
A. Geçici maden kazıları	3-5
B. Sürekli maden kazıları, hidrolik enerji amaçlı su tünelleri (yüksek basınçlı cebri boyutlar hariç), büyük kazılar için pilot tüneller, yarmalar ve aynalar v.s.	1,6
C. Depolar, su tasfiye tesisleri, küçük yol ve demiryolu tünelleri, denge bacaları, yaklaşım tünelleri v.s.	1,3
D. Santral binaları, büyük yol ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları	1
E. Yer altı nükleer santralleri, fabrikalar, spor ve kamu tesisler	0,8

### Bulonlama

Eğer 20 mm çaplı bir bulon için 10 tonluk aktif bir yük kabul edilirse, destek basıncı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P = \frac{1}{a^2} \quad (3)$$

P=Destek basınç kapasitesi (kg/cm<sup>2</sup>)

a=Bulon açıklığı (m)

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

Tavan	:	Bulon L=2+0,15B/ESR	(4)
	:	Ankraj L=0,4B/ESR	(5)
Duvarlar	:	Bulon L=2+0,15H/ESR	(6)
	:	Ankraj L=0,35H/ESR	(7)

L=uzunluk (m)

B=kazı eni (m)

H=kazı boyu (m)

ESR=kazı destek oranı

#### 1.11.4. RMR Sistemi ile Destek Basıncı ve Destek Seçimi Arasındaki İlişki

Kaya kütlesi sınıflaması ile mühendislik problemleri arasında ilişki kurulabilir. Tünelcilik ve yeraltı açıklıklarında geomekanik sınıflamadan elde edilen değerler yardımıyla tahkimatsız olarak ayakta kalabilme süresi ve maksimum duraylı (stabil) tavan açıklığı belirlenebilir (Tablo 23).

Tablo 23. RMR' ye Bağlı Olarak Kaya Kütlesi Sınıflarının Yorumu ve Dayanım

##### Parametrelerinin Tahmini

Kaya sınıfı		I	II	III	IV	V
Kaya Kütlesi Kohezyonu (c)	1976	>300 kPa	200-300 kPa	150-200 kPa	100-150 kPa	<100 kPa
	1990	>400 kPa	300-400 kPa	200-300 kPa	100-200 kPa	<100 kPa
İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ )	1976	>40°	40°-45°	35°-40°	30°-35°	<30°
	1990	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°
Ortalama desteksiz ayakta kalma süresi		15 m açıklıkta 10 yıl	8 m açıklıkta 6 ay	5 m açıklıkta 1 hafta	2,5 m açıklıkta 10 saat	1 m açıklıkta 30 dk.
Kazılabilirlik		Çok zayıf	Kolaylıkla büyük parçalar çıkmaz	Orta	Kolay kazılır	Çok kolay kazılır

Geomekanik sınıflamaya bağlı olarak yeraltı kaya tünellerinde kazı şekli ve sağlamlaştırma esaslarının belirlenmesi Tablo 24.'te verilmektedir.



Tablo 24. RMR' ye Bağlı Olarak Yeraltı Kaya Tünellerinde Destekleme ve Kazı Şeklinin Belirlenmesi

Kaya kütle sınıfı	Kazı şekli	Tahkimat		
		Kaya bulonu	Püskürtme beton	Çelik iksa
<b>I</b> Çok sağlam kaya (RMR:100-81)	Tam cephe kazı, 3 m ilerleme	Genel olarak tahkimat gereksiz. Gerektiğinde yerel bulonlama		
<b>II</b> Sağlam kaya (RMR:80-61)	Tam cephe kazı, 1-1,5 m ilerleme. Kazı aynasından 20 m geride tüm tahkimat yapılmalıdır.	Tavanda yerel bulonlama. Bulon uzunlukları 3m aralıkları 2,5 m olmalı, nadiren çelik hasırla	Gerektiğinde tavan kısmında 50 mm kalınlıkta	Gerekmez
<b>III</b> Orta sağlam kaya (RMR:60-41)	Üst ve alt yarı ayrı kazılır. 1,5-3 m'lik ilerleme. Her patlatmanın ardından destekleme elemanı yerleştirilir. Kazı aynasından 10 m geride tüm destekleme yapılmalıdır.	4 m uzunluk ve 1,5-2 m aralıklı tavan ve yanlarda çelik hasırla birlikte	Tavanda 50-100 mm yanlarda 30 mm kalınlıkta	Gerekmez
<b>IV</b> Zayıf kaya (RMR:40-21)	Üst ve alt yarı ayrı kazılır. 1-1,5 m'lik ilerleme. Kazı aynasından 10 m geride kazıya paralel olarak destekleme yapılmalıdır.	4-5 m uzunlukta 1-1,5 m aralıklarla çelik hasırla birlikte. Tavan ve yanlarda	Tavanda 100-150 mm kenarlarda 100 mm kalınlıkta	Gerekliyorsa 1,5 m aralıklarda hafif iksa
<b>V</b> Çok zayıf kaya (RMR:20-0)	Küçük kesitli kazılarla. 0,5-1,5 m'lik ilerleme. Kazıya paralel olarak destekleme yapılır. Patlatmanın hemen ardından püskürtme beton uygulanmalıdır.	5-6 uzunluk, 1-1,5 m aralıklarla ve çelik hasırla birlikte sistematik bulonlama. Tabana bulon yerleştirilir.	Tavana 150-200 mm yanlara 150 mm ve kazı arına 50 mm kalınlıkta	Çelik fırçalarla desteklenen 0,75 m aralıklı orta ve ağır iksa. Tabana ters kemer yerleştirilir.

Q ve RMR sınıflamalarına göre yapılan tünel tasarımlarında yapım sırasında bazı

sorunlar yaşanabilmektedir. Bu nedenle Q ve RMR sınıflamalarından ön proje çalışmalarında yararlanılmaktadır. Uygulama projesi ve yapım aşamasında kaya kütlelerinin karmaşık özellikleri, zamana bağlı davranışı göz önüne alınarak tünelin açılacağı ortamın geoteknik modelinin oluşturulması, destek sisteminin bu modele göre belirlenmesi, aynada yapılacak jeolojik haritalama ve geoteknik ölçümlere göre modelin ve destek sisteminin devamlı kontrol edilmesi gereklidir.

### **1.12. Tünelde Zemin İyileştirilmesi**

Yapılan tünellerin toplam maliyetinin yaklaşık %70-80 oranını kazı ve destekleme harcamaları oluşturmaktadır. Bazen bu maliyetlerin ön görülen zemin ortamından daha kötü ortam özellikleri ya da koşullarıyla karşılaşılması sebebiyle daha da arttığı görülür. Bu durumda maliyetleri azaltabilmek ve güvenli çalışma ortamında tünel kazısına devam edebilmek için zemini iyileştirmek ve mutlaka sistemin denetim altına alınması gerekir. Zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde veya çıkan problemlerin çözümünde kullanılan yöntemler genellikle; çimento ve kimyasal madde enjeksiyonu, jet grouting, koruyucu kemer oluşturulması, yer altı su seviyesinin alçaltılması, yer altı suyunun dondurulması ve bentonit çamuru ya da basınçlı hava ile duraylılığın sağlanması şeklinde olmaktadır. Bu yöntemlerden oluşan probleme uygun olanları ya tek başlarına ya da birkaçının veya tümünün birlikte kullanılmasıyla uygulanmaktadırlar. Bentonit çamuru ya da basınçlı hava yöntemi yalnızca açım sırasında kullanılabilirken, diğer yöntemler ön iyileştirme-sağlama yöntemleri olarak da kullanılabilirler (Vardar, 1994).

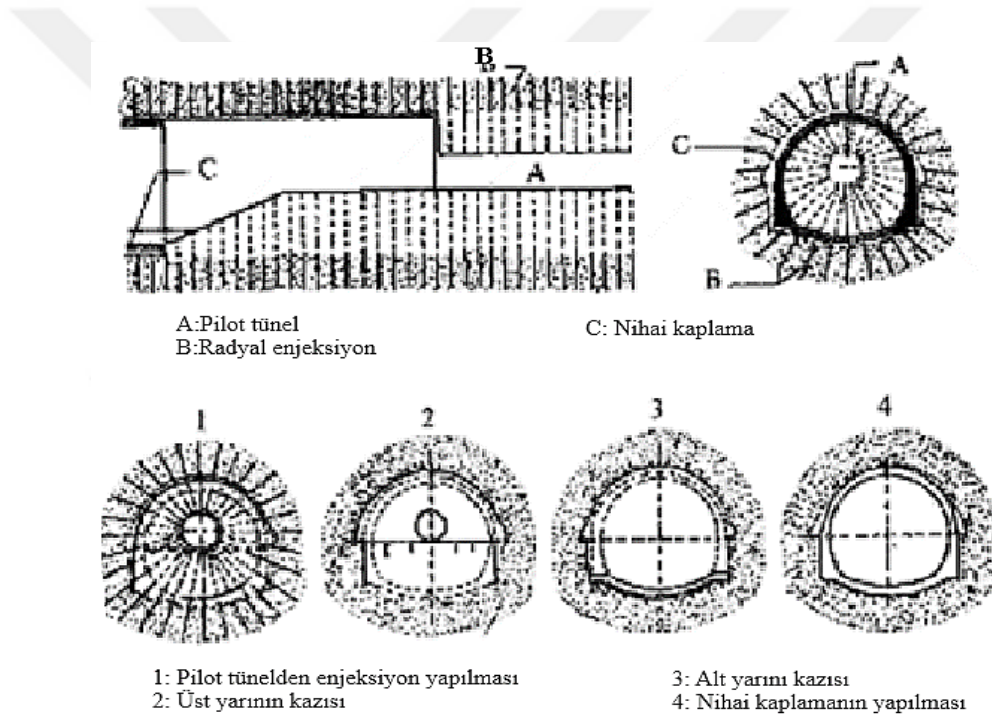
#### **1.12.1. Dolgu Enjeksiyonu**

Bu zemin iyileştirme yöntemi etkisi uzun süren bir yöntemdir. Bu yöntemde; 20-40 bar basıncındaki dolgu enjeksiyon karışımı zemin içine gönderilir. Bu karışım zemindeki boşluk ve gözenekleri doldurarak zeminin geçirgenliğini azaltır ve geoteknik parametrelerini yükseltir. Dolgu çimento veya kimyasal esaslı olabilir. Bu yöntem daha çok siltli, kumlu ve çakıllı ortamlarda kullanılır. Zemin kohezyonsuz olduğu için yüzeyde oluşabilecek

tasmandan kaynaklanan ve binaların çökmesine neden olabilecek hareketlerin önlenmesi ve tüneldeki su gelirinin azaltılması sağlanır.

Bu yöntemde güzergâh boyunca açılan küçük çaplı bir pilot tünelden daha sonra açılacak olan esas tünel çevresine dolgu enjeksiyonu Şekil 12’de görülen şekilde uygulanır. Dolgu enjeksiyonunun yapılabilmesi için;

1. Ana tünel eksenini boyunca daha küçük çaplı bir pilot tünel açılır.
2. Dolgu enjeksiyonu çevresel olarak tünel çevresine basılır.
3. Tünelin üst yarısı uygun ilerleme boyu kadar kazılır. Çelik iksa, çelik hasır ve püskürtme betonla tahkim edilir.
4. Tünelin alt yarısı kazılır. Tabana ters kemer betonu yerleştirilir.



Şekil 13. Tüneli Çevreleyen Zeminin Dolgu Enjeksiyonu Yardımıyla İyileştirilmesi

#### 1.12.1.1.Çimento Enjeksiyonu

Çimento enjeksiyonunun da kullanılan en önemli bileşen çimentodur. Çimentonun, kum ve su ile karışımı, ayrık ya da çatlaklı kayaç içine basıldığında boşlukları ve/veya çatlakları doldurur, sertleştiğinde tanecik ve kayaç parçalarını birbirine yapıştırarak ortamı tek bir

zemin ortamı haline getirir. Böylece başta kohezyon olmak üzere, ortamın içsel parametreleri artar ve mekanik davranışı homojenleşir.

Çimento enjeksiyonu sırasında çeşitli amaçlarla karışıma eklenen katkı maddeleri ile bu maddelerin işlevleri aşağıda verilmektedir:

1. Prizi çabuklaştıran maddeler: Sodyum klorür, kalsiyum klorür, sodyum silikat.
2. Prizi geciktiren maddeler: Doygun tuzlu su, selüloz bileşimleri odun özü, şeker, alçıtaşı.
3. Yoğunluğu artırıcı maddeler: Barit, ilmenit.
4. Yoğunluğu azaltıcı maddeler: Su, bentonit.

Çimento enjeksiyonları tünellerde yaşanan sorunlara göre ve zemin ortamına göre çeşitli yoğunluklarda hazırlanabilir. Örneğin; 1/1, 3/5, 5/7 vs.

#### **1.12.1.2. Kimyasal Madde Enjeksiyonu**

Zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan kimyasal maddelerle yapılan enjeksiyon başarılı olmakla birlikte maliyeti yüksek bir yöntem olması nedeniyle zorunlu hallerde uygulanır. Kimyasal enjeksiyon şerbetinin tanecik ihtiva etmemesi, düşük viskosite de olması ve sertleşme zamanının kontrol edilebilmesi gibi avantajları vardır. Kimyasal enjeksiyonda reaksiyon, kullanılan farklı maddelerin bir araya gelmesiyle oluşur. Karışım zemine uygulanmadan önce bir araya getirilerek karıştırılabileceği gibi zemin içerisinde de karıştırılabilir. En uygun olanı uygulama öncesi malzemeleri karıştırdıktan sonra zemine uygulamaktır.

Kullanılan başlıca kimyasal enjeksiyon maddeleri silikatlar, ligninler ve reçinelerdir.

- Silikat enjeksiyonları: Bu yöntemde iyileştirilmesi istenen zemin içinde önce sodyum silikat, daha sonra kalsiyum klorid enjeksiyonu yapılır. Böylece kalsiyum klorit, sodyum silikat ile tepkimeye girerek kalsiyum silikat jeli oluşturur. Bu jel kum taneciklerini bağlayarak zayıf çimentolu bir kumtaşı oluşumunu sağlar.

- Ligninli enjeksiyonlar: Kağıt sanayinin yan ürünü olarak elde edilen ligno sülfat ile bikromat karışımı düşük viskositeli bir enjeksiyon maddesi oluşturmaktadır. Bu karışım 10 dakika ile 10 saat arasında sertleştiğinden ve sağlam bir jelatin kütlesi oluşturduğundan kumlu zeminlerin iyileştirilmesinde başarıyla kullanılmaktadır.

- Reçineli enjeksiyonlar: Çok yüksek derecede nüfuz etme özelliği olan bu tür

enjeksiyon maddeleri organik kimyasal maddelerin polimerizasyonundan oluşmaktadır. Geçirimsizliği çok düşük olan ince taneli ve kumlu zeminlerde viskozitesi su ile aynı olan ve belirli süre sonunda aniden sertleşen reçine özellikli enjeksiyonlar kullanılmaktadır. İdeal bir enjeksiyon karışımında aşağıdaki 5 özelliğin bulunması gerekmektedir. Bunlar:

1. Düşük vizkoziteye sahip olmalı
2. Kontrol edilebilir çökelme zamanına sahip olmalı
3. Zeminde yüksek mukavemete neden olmalı
4. Toksik içermemeli
5. Kalıcı ve ekonomik olmalıdır.

### **1.12.1.3. Jet Grouting (Jet Dolgu)**

Jet-grout yönteminde, tasarım derinliğine kadar delgi yapılmakta ve delgi için kullanılan tijlerin ucundaki küçük deliklerden yüksek basınçlarda çimento şerbeti zemine enjekte edilmektedir. Bu esnada tijler belirli bir hızda döndürülmekte ve yine belirli bir hızda tünel çeperine doğru çekilmektedir. Böylece, belirli bir çapta ve boyda zemin içinde silindirik bir kolon oluşturulmaktadır. Jet enjeksiyonu aslında bir enjeksiyon tekniği değil bir karıştırma yöntemidir. Sonuçta zemin içerisinde beton-zemin karışımı yüksek dayanımlı ve düşük geçirimli kolonlar elde edilmektedir. Sonuçta zeminin mevcut geoteknik özelliklerine kıyasla daha sağlam bir yapı oluşur. Yöntem killi, kumlu, çakıllı, kumtaşlı ve çakıltaşlı zeminlerde iyi sonuçlar verir. Kohezyon olmadığı için kazı sırasında aşırı yer değiştirmeler oluşabilir.

Tablo 25. Jet Enjeksiyon Sistemleri

<b>Jet Enjeksiyonu Sistemi</b>	<b>Tekil</b>	<b>İkili</b>	<b>Üçlü</b>
Uygulanan zemin	Kaba granüler zeminler, zayıf yıpranmış kayalar	Kaba granüler zeminler ve zayıf kayalar ile bazı killi zeminler	Her tipteki granüler zeminler, yumuşak ile orta ve sert killi zeminleri karışık alüvyonlu ve bazı zayıf kayalar
Kolon çapı	En küçük çap, tipik olarak 0,5-0,6 m	Orta büyüklükte çap	En büyük çap, sıkıştırılmış hava ve su jeti yardımı, tipik olarak 0,5-0,6 m
Uygulama	Yüksek basınçlı enjeksiyon doğrudan zemin içerisine uygulanıyor.	Yüksek basınçlı enjeksiyon hava jeti yardımıyla doğrudan zemin içerisine uygulanıyor.	Hava jeti ile yüksek basınçlı su jeti zemini aşındırıyor, enjeksiyon ise düşük basınçlarda uygulanıyor.
Zemin hareketi	Birikinti malzemeler tıkanmalarla beraber basınçların artmasına neden olabilir. Siltlerde ve killerde zemin hareketlerine yol açacak hidrolik çatlatma meydana gelebilir.	Tekli sistemle aynı	Hava kaçakları meydana gelebilir ve zayıf zemin tabakaları aşınabilir, enjeksiyon akıntı birikimleri hava jeti yardımıyla azaltılıyor, fakat yumuşak killerdeki derin muhafazasız delikler kapanabilir ve tıkanmaya yol açabilir.
Basınçlar	Enjeksiyon 300-500 bar	Enjeksiyon 300-500 bar Hava 2-15 bar	Enjeksiyon 5-30 bar Hava 2-15 bar Su 500 bar'a kadar
Diğer özellikler	Daha zayıf kolonlar elde edilmekte, teknik olarak ikili ve üçlü sisteme göre daha alt seviyede	Orta seviyede	Su jeti enjeksiyon malzemesinin daha katı kıvamda ve daha iyi bir şekilde akmasını sağlamakta

### 1.12.2. Zeminin Geoteknik Özelliklerinin Korunması

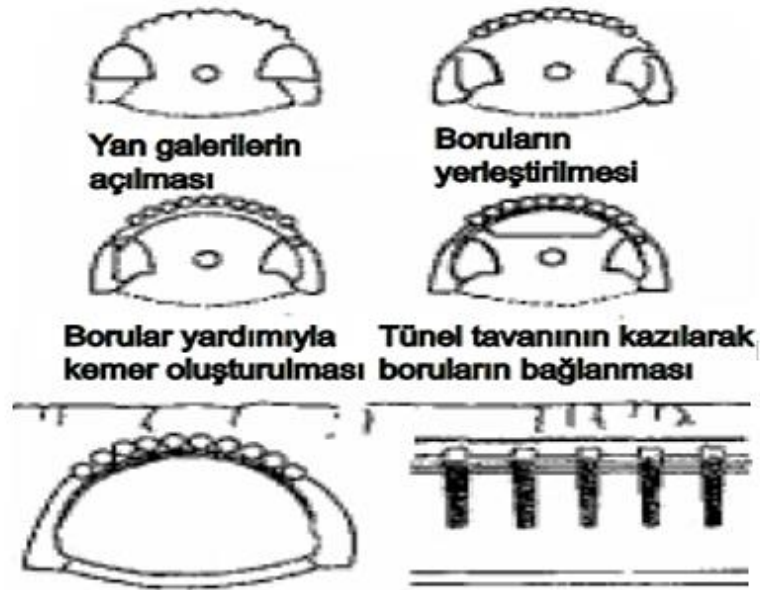
Geoteknik parametrelerinin korunması amacıyla yapılan çalışmalar sonucu zeminin mekanik özelliklerinin zayıflaması önlenir. Kazının çevresindeki gerilmelerden asgari düzeyde etkilenmesi sağlanır. Bu çalışmaların amacı kazı boşluğu çevresinde oluşacak yer

değiştirmeleri mümkün olduğu kadar azaltmaktır. Bu yöntemler aşağıda sıralanmaktadır.

### 1.12.2.1. Borularla Tavan Kemerini Oluşturma (Cellular Arch)

Boyca kısa, hacimce geniş yeraltı kazılarında uygulanan bir yöntemdir. Destekleme işlemi kazıdan önce gerçekleştirilir. Bu yöntem diğer sağlamlaştırma yöntemlerinin uygulanmasının mümkün olmayacağı kadar ince örtü tabakası altında açılan (ok sığ) tünellerde oldukça uygundur.

Yöntemin esası; tünel üst kısmında ve ilerleme yönüne paralel olacak şekilde geniş çaplı boruların uzunlamasına yerleştirilmesidir. Daha sonra boruların içi betonla doldurulur ve bağlantı elemanları yardımıyla birbirlerine bağlanırlar (şekil 14).



şekil 14. Borularla Tavan Kemerini Oluşturulması



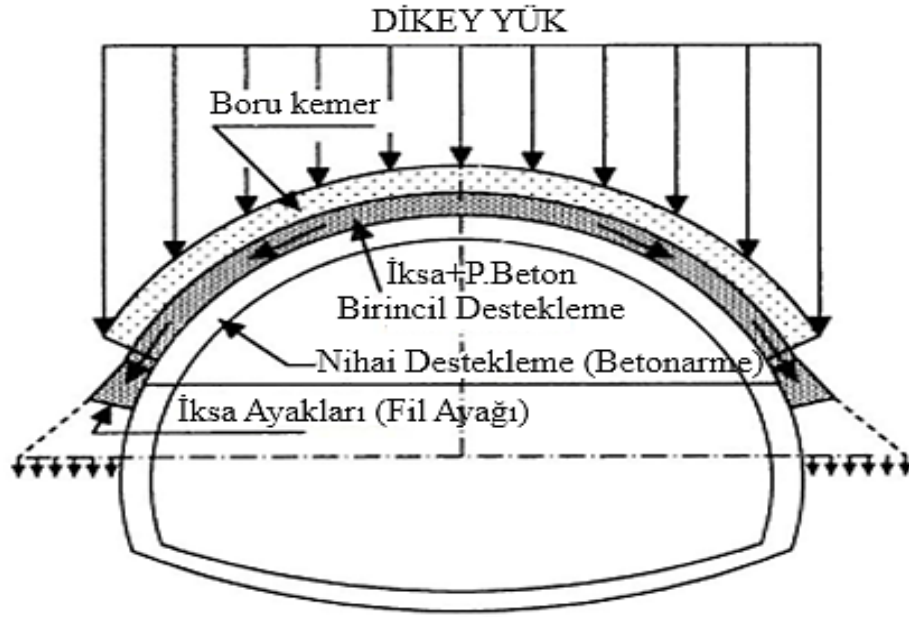
Şekil 15. Borularla Tavan Kemerin Oluşturulması (URL-3)

### 1.12.2.2. Şemsiye Kemer Yöntemi (Umbrella Arch)

İnsanların yaşadığı şehirlerde ve bölgelerde yapılacak olan yüzeye çok yakın tünellerde, yüzey oturmalarının düşük olması gerekmektedir. Diğer tünellerden farklı olarak bu tip tünellerde sadece tünelin duraylılığını değil, çevre yapıların olumsuz etkilenmemesini de sağlamaktır. Çelik boru kemer yöntemi bu durumları önlemek için geliştirilmiştir. Tünel kazısı esnasında bilinen tahkimatlar ile zeminin ayakta tutulamayacağı anlaşılması halinde bu yöntem başarılı bir şekilde uygulanmaktadır.

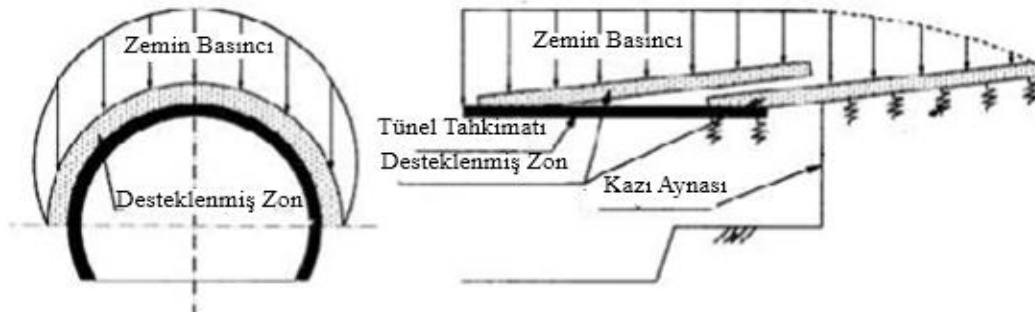
Şemsiye Kemer Yöntemi, tünel çevresinde kaya/zemin kütlelerinde oluşturulan destekleme örneği ile güçlendirilmiş bir kabuk oluşturularak birincil destekleme aşamasında duraylılığı sağlamaktadır. Tünel cidarına aksenal olarak etki eden yüklerin, kazı aşamalarının ardından yan duvarlara ve son olarak tünel kapmasının gerilmeleri dağıtan geometrik şekli nedeniyle tünel cidarına dağıtılması düşüncesiyle tasarlanmış bir destekleme sistemidir (Şekil 16).





Şekil 16. Şemsiye Kemer Yönteminde Yüklerin Dağılımı (Muraki, 1986)

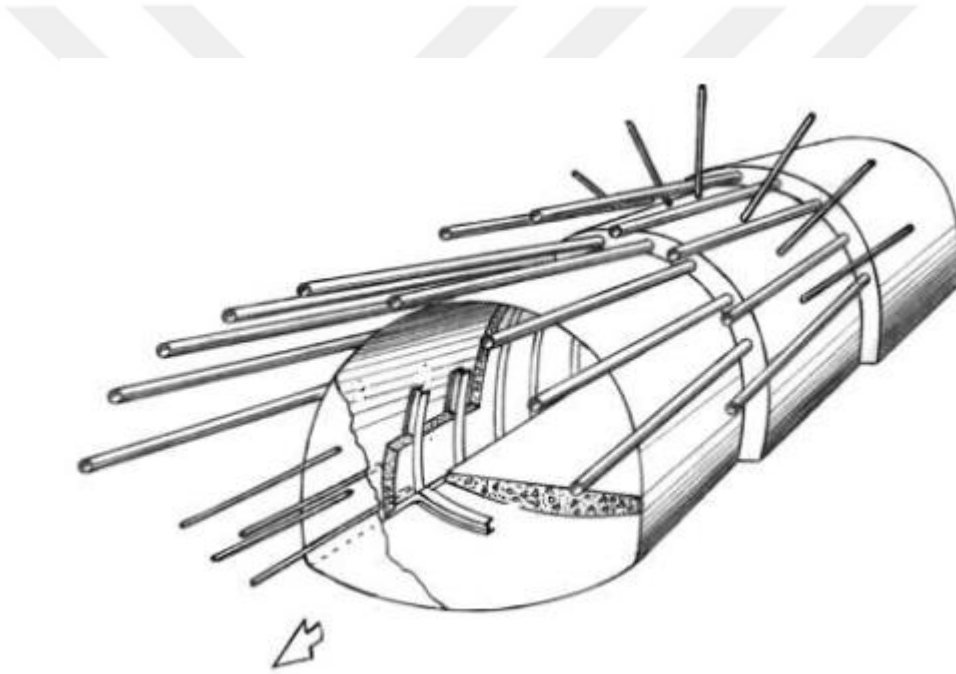
Şemsiye Kemer Yöntemi, kazı başlamadan önce kazı aynasının önüne uygulanan bir zemin destekleme tekniğidir. Bu yöntemin amacı tünel aynası ve çevresini mümkün olduğunca duraylı tutmaktır. Bu yöntemde, aynanın üstünde bir yapay kabuk oluşturularak tünel kazısının hızlıca ve güvenli olarak yapılmasına olanak sağlayarak, şemsiye benzeri bir yapı oluşturulur. Boru kemer yönteminin tahkim etme kabiliyeti, aynayı hem enlemesine hem uzunlamasına yönlerde duraylı etmesinden kaynaklanır. Aynaya gelen yükler ve çelik boru kemerin davranışı Şekil 17.'de görülmektedir.



Şekil 17. Şemsiye Kemer Yönteminin Destekleme Mekanizmasının Şeması [29]

Bu yöntem sayesinde ayna duraylılığı artmakta, dolayısıyla zemin oturmaları sınırlanmakta, tünel tahkimatlarının boyutları azalmakta ve ayna yüzeyi genişletilerek daha büyük makinelerin kullanılmasına imkân sağlanmaktadır.

Şekil 18.'de görüldüğü gibi, tünel cidarında belirli uzunlukta ve düşük eğimle ( $5^{\circ}$ - $10^{\circ}$ ) delinen deliklerin içine belirli ve farklı çaplarda ve içi boş çelik borular sokulmaktadır. Delgi işlemi ve boru yerleştirme işleminde boruların birer atlaması olarak 1,3,5,7,...olarak yapılması gerekmektedir. Daha sonra zemine sokulan boruların içine enjeksiyon pompalanarak delik ile donatılar arasında boşluk kalmaması sağlanır. Enjeksiyon 1/1 oranında koyu kıvamlı olarak boru içerisine basılması gerekir. Çimento şerbeti prizini aldıktan sonra kazı çalışmalarına devam edilmelidir.



Şekil 18. Şemsiye Kemer Yöntemi Boru Uygulaması (Hoek, 2001)

Yöntemin uygulama aşamaları aşağıdaki şekildedir.

- Boru deliklerinin delinmesi
- Boruların yerleştirilmesi
- Boru ağzlarının enjeksiyon manşonuyla kapatılıp, etrafının yalıtılması
- Borulara enjeksiyon yapılması

Bu sistemde boru delikleri önceden delinebileceği gibi robıt denilen ve boru başlarına montaj yapılarak kendinden delgili bir yöntem kullanılarak da yapılabilir. Bu

yöntemde boru ucuna takılan robit delgiye başlayarak hem delgi hem de borunun açılan deliğe birlikte ilerlemesini sağlamaktadır. İlk yönteme göre önce delgi sonra deliğe boru sürümü şeklinde değil aynı anda hem delgi hem de boru sürümü gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde ilk yönteme göre maliyeti fazla olsa da zaman tasarrufu sağlamaktadır.



Şekil 19. Şemsiye Kemer Yöntemi Robit Uçu

Bu yöntemde kullanılan boru çapları 1,5", 2", 2,5", 3", 3,5" ve 4" dir. Ancak genellikle 4" (114 mm) çapında olan borular kullanılmaktadır. Bu boruların deliklerinin delinebilmesi için özel delme makineleri kullanılmaktadır (Şekil 20 ve 21). Daha sonra bu deliklere boruların yerleştirilmesi için de yine aynı makineler veya ekskavatör kullanılmaktadır. Bu borulara da bazı özel işlemler yapılmaktadır. Bunlar; boruların deliklere kolayca çakılabilmesi için uçlarının daraltılması (Şekil 22) ve üzerine delikler açılması işlemleridir (Şekil 23).



Şekil 20. Şemsiye Kemer Yöntemi Zemin Delgi Makinesi



Şekil 21. 4" Delikler İçin Delici Uçlar

Şekil 20.'de görülen delik delme makinesi kullanılacağı gibi robotli yöntemde ise Jumbo delgi makinesi kullanılmaktadır.



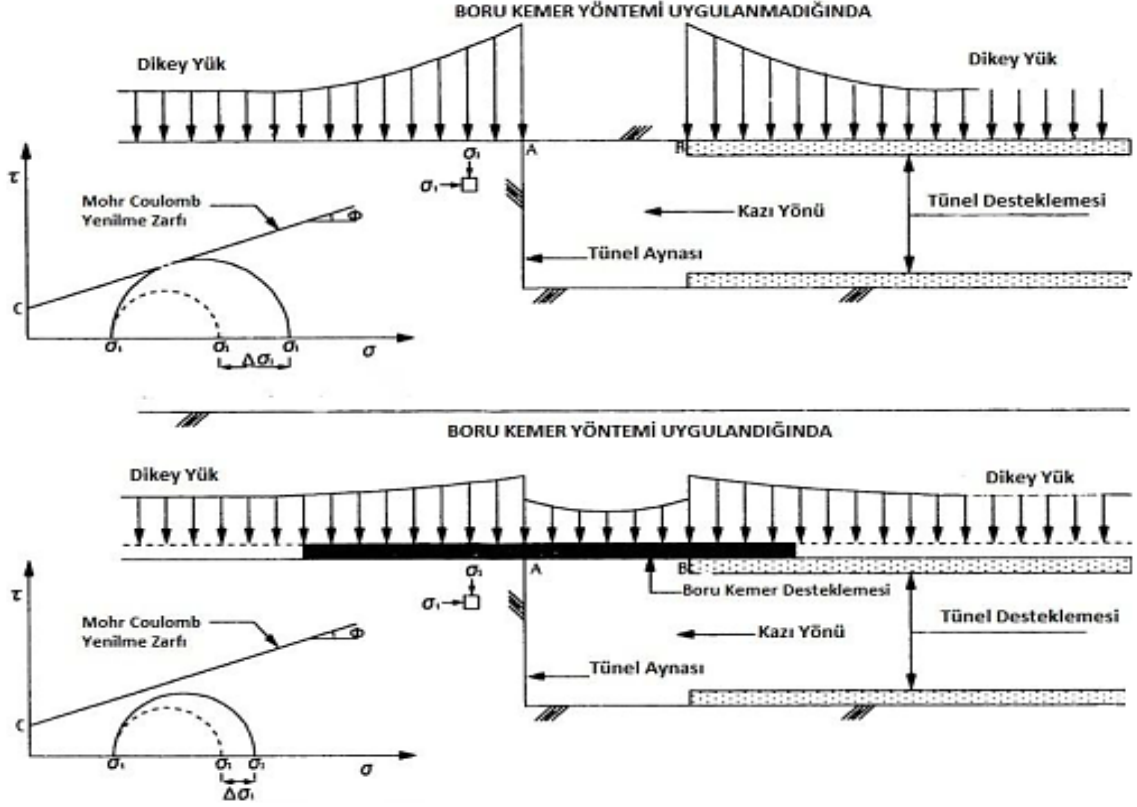


Şekil 22. Boru Uç Tipleri



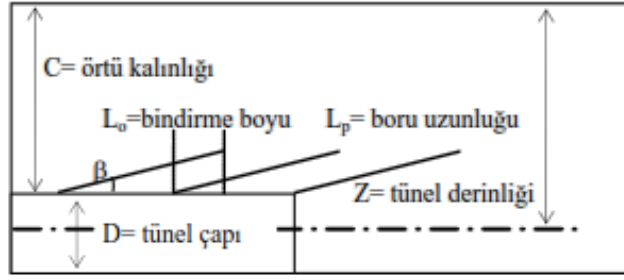
Şekil 23. Jumbo Makinesi

Şemsiye Kemer Yöntemi ile tünel kazı aynası ve gerisinde oluşan yer değiştirmelerin kontrol altına alınması, kazı adımlarında tünelin çevre kayacında oluşacak yenilmenin istenilen seviyede tutulması ve oluşan tünel içi (konverjans) yer değiştirmelerinin projelendirme sınırlarının aşılması istenmemektedir (Şekil 24). Kazı aynasında kazı yapılması esnasında değişecek olan gerilemelerden dolayı duraylılık ve akma sorunlarının ön kemerlenmeli bir yöntem ile kaya/zemin koşullarının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Üst yarı kazısından sonra devam eden alt yarı ve taban (invert) kazılarıyla birincil destekleme sistemi tamamlanmış olur.



Şekil 24. Şemsiye Kemer Yöntemi ve Kayacın Yenilmesi Arasındaki İlişki (Muraki, 1986)

Şemsiye-kirişlerin zemin ortamlarındaki davranışlarını araştırmak üzere iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Birinci yaklaşım olarak analitik çözüm; şemsiye kemer kiriş boruları çoklu mesnetler üzerine yerleşen elastik kirişler analogjisi kullanılır. Burada borular için kesit seçimi, en kritik olduğu düşünülen kirişlerin son mesneti ile aynaya sabitlendiği kısımdaki momentlerin hesaplanmasıyla gerçekleştirilir (Çeçen, İncecik, 2008). İkinci yaklaşım ise analitik yaklaşımdır. Bu yaklaşımda muhtemel ankastre yük olarak kabul edilip oluşacak maksimum moment hesabına gidilirken destekleme sisteminin duraylılığını sağlayacak parametreler seçilir (Şekil 25).

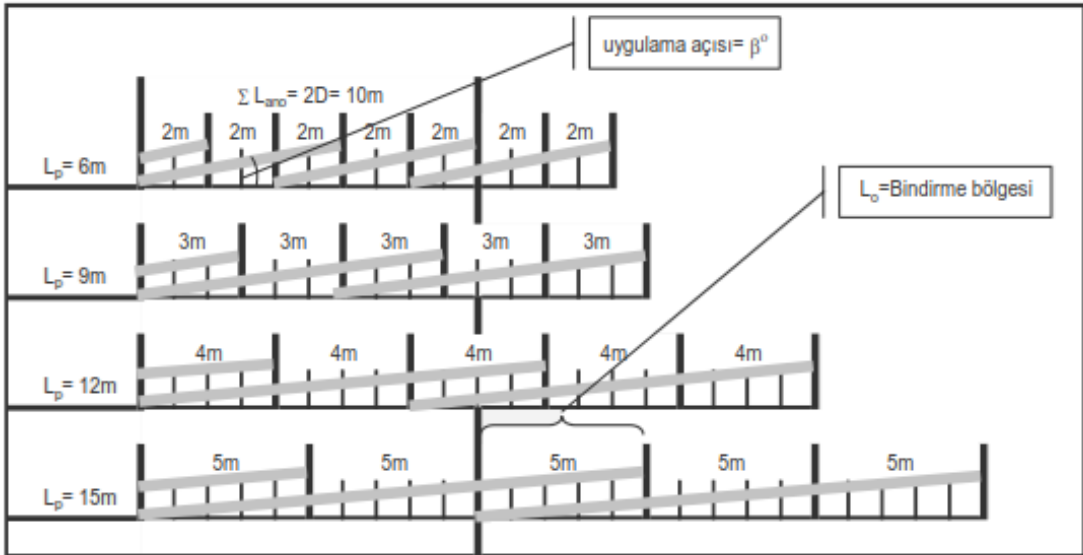


Şekil 25. Parametrik Çalışmalarda Kullanılan Değişkenler (Çeçen, İncecik, 2008)

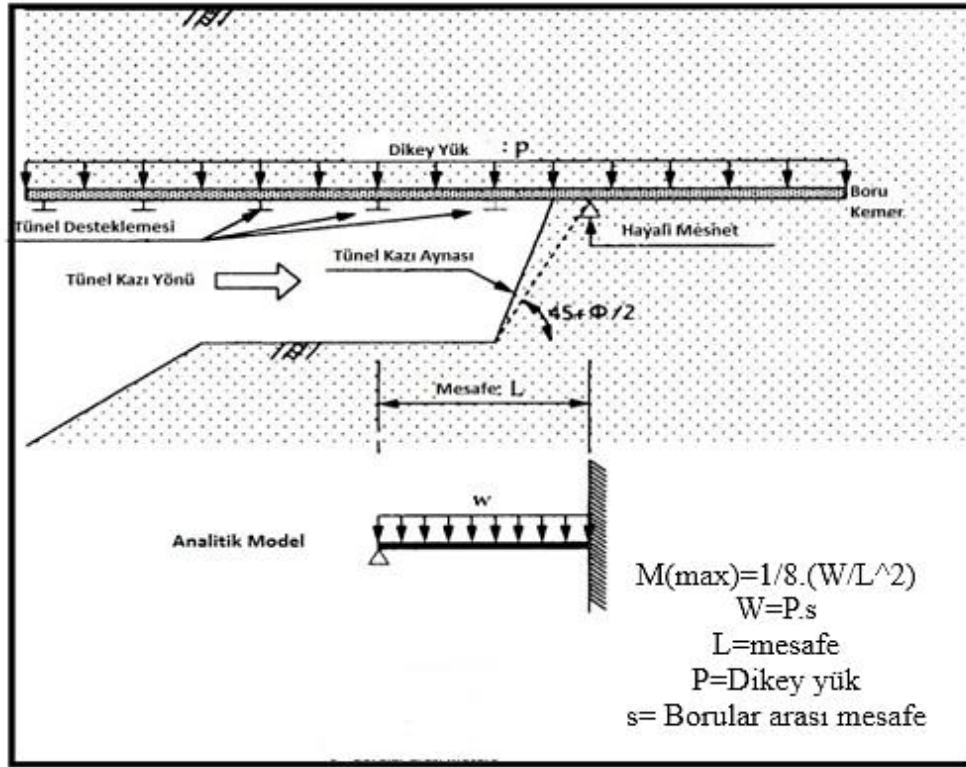
Parametrik çalışmalarda değişken tünel derinlikleri için boru uzunlukları ve bindirme boyları ile uygulama açılarının tünel ve yüzey yer değişmelerinde iyileştirmeye neden olmaktadır.

Tablo 26. Tünelde Kullanılan Değişkenler (Çeçen, İncecik, 2008)

$L_p$	6 m	9 m	12 m	15 m
$L_o$	2 m	3 m	4 m	5 m
$\beta$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$
$C$	1,5D	2,5D	5,5D	10,5D



Şekil 26. Şemsiye Kemer Borularının Uygulama Şeması (Çeçen, İncecik, 2008)

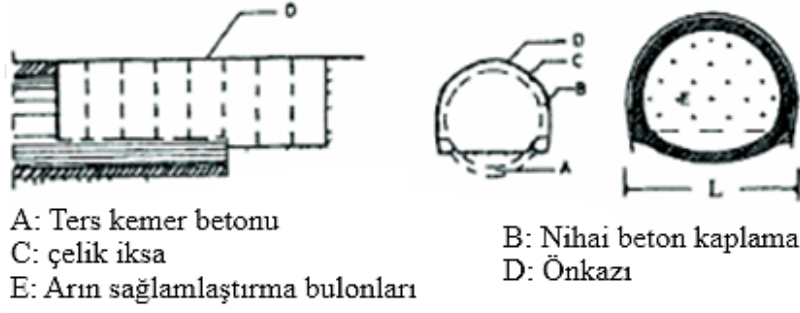


Şekil 27. Şemsiye Kemer Yöntemi Analitik Modeli (Muraki, 1986)

### 1.12.2.3. Ön Kazı (Advance Precutting)

Etkisi sürekli olan bu yöntemde özel olarak imal edilmiş zincirli bir testere ile tünel çevresi kazılır. Açılan bu boşluğa çelik-fiber karışımı içeren ve yüksek mekanik özelliklere sahip olan beton doldurulur. Betonun donması ile tünel çevresinde yüksek mukavemetli bir beton kemer oluştuğundan sonra kazı işlemine başlanır. Şekil 28.'de yöntem şematik olarak gösterilmektedir.





Şekil 28. Mekanik Ön Kazı İle Tünel Tahkimatı

Bu yöntem genellikle kil, kum ve ince agregadan oluşan ve kohezyonsuz zeminlerdeki tünellerin iyileştirilmesinde kullanılır. Bu tür zeminlerde tünelin göçmesine sebep olabilecek aşırı yer değiştirmeler oluşabilir.

#### 1.12.2.4. Enjeksiyon Kemer (Jet Grouting Arch)

Kazıya başlamadan önce tünel profilinin üst kısımlarında yataya yakın (0-5 derece), alt yarının duvar kısmında ise düşeye yakın delinen delikler yardımıyla enjekte edilen dolgularla tünel çevresi sağlamlaştırılır. Böylece tünel çevresinde sağlam bir kemer oluşturulur. Bu kemer kazı sırasında tahkimat işlevi görürken nihai tahkimat elemanları üzerine gelen gerilmelerin de düzenli olması sağlanır.

Enjeksiyon yöntemi çok zayıf kaya ortamları ile tamamen ayrılmış, kohezyonsuz zeminlerde genellikle tercih edilen bir yöntemdir. Enjeksiyona başlamadan önce tünel kazı aynasının püskürtme betonla (bazen püskürtme beton+çelik hasır ile) kapatılır. Aynadaki muhtemel yer değiştirmeleri ve göçükleri önlemek için tünel eksenine boyunca kazı aynasına 15-20 m uzunluğunda ibo bulonlar yerleştirilir. İbo bulonlara uygulanan dolgu enjeksiyonu bulon ankrajını sağlamasının yanında tünel eksenine boyunca zeminin geoteknik parametrelerini de iyileştirir. Kazı arının ilerisinde toplanan yeraltı sularının uzaklaştırılması ve zeminin sudan arındırılması amacıyla tünel eksenine paralel 6-9 m uzunluğa kadar drenaj boruları konulur. Delgi sırasında havalı delik delme yöntemi kullanılmalıdır. Yukarıdaki hazırlık işlemlerinin bitirilmesinden sonra kemer enjeksiyonu işlemine geçilir. Bunun için;

1. Kazı profili boyunca 0-5 derece açı ile 30-60 cm aralıklarla 2 inç (51 mm) çap ve 6-9 m boyunda 1. kademe enjeksiyon boruları, 25 derece açı ile 110-130 cm aralıklarla 2 inç

çap ve 6-9 m boyunda 2. kademe enjeksiyon boruları, 50 derece açı ile 120-140 cm aralıklarla 2 inç çap ve 6-9 m boyunda 3. kademe enjeksiyon boruları yerleştirilir. Yerleştirilen enjeksiyon borularına 5-10 kg/cm<sup>2</sup>'lik bir basınçla çimento enjeksiyonu uygulanmaya başlanır. Enjeksiyondaki çimento/su oranı; 1.kademe için 100/50, 2. ve kademeler için 100/70 civarındadır. Enjeksiyon basıncı artmaya başlayınca durdurulur ve diğer boruların enjeksiyonuna geçilir.

2. Tünelin üst yarısı bölümlere ayrılarak bir round boyu (0,8-1,0 m) kadar kazılır.

3. Çelik hasır ve çelik iksa yerleştirilerek püskürtme beton (300 mm kalınlıkta) atılır. Ayrıca, kazı arınına da püskürtme beton (50 mm) atılır ve tünel aynasında açığa çıkan drenaj boruları ve bulonların fazlalıkları kesilerek bulonlara yeni yüzey plakaları takılır ve kazı arınının duraylılığı sağlanır. Enjeksiyon borularının bitimine 3 m kalınca yeni enjeksiyon boruları yerleştirilir.

4. Tünelin alt yarısındaki duvarlar düşeye yakın olarak delinen deliklere yerleştirilen enjeksiyon borularından basılan enjeksiyonla sağlamlaştırılır.

5. Tünelin alt yarısında kazı işlemine başlanır.

6. Ters kemer betonu imalatı yapılarak işlem tamamlanır.

#### **1.12.2.5. Ön Süren Yöntemi ile Kazı**

Tamamen ayrılmış ve yer yer büyük bloklar içeren zeminlerde kazı yapıldığı zaman, henüz destekleme işlemine başlanılmadan önce tünel tavanı ve kazı aynası göçer. Bu tür akıcı zeminlerde kazıya başlamadan önce tünel profili boyunca sık delikler delinerek 9-13 m uzunluğunda 32 mm çapında çelik çubuklar 10-20 cm aralıklarla veya 2 inç (51 mm) çapında içi boş borular yerleştirilerek destekleme işleme yapılır. İçi boş çelik boruların yerleştirilmesi durumunda, bu borular yardımıyla zemine çimento enjeksiyonu da yapılabilir. Bu durumda kazı ve tahkimat işlemi aşağıdaki sıraya göre yapılır.

1. Çelik çubuk veya çelik borular tünelin tavan kısmına yataya yakın bir şekilde yerleştirilir. Gerekirse enjeksiyon yapılır.

2. Tünelin aynası bölümlere ayrılarak 1 round boyu kadar ilerletilir.

3. Çelik hasır, iksa ve püskürtme beton atılır.

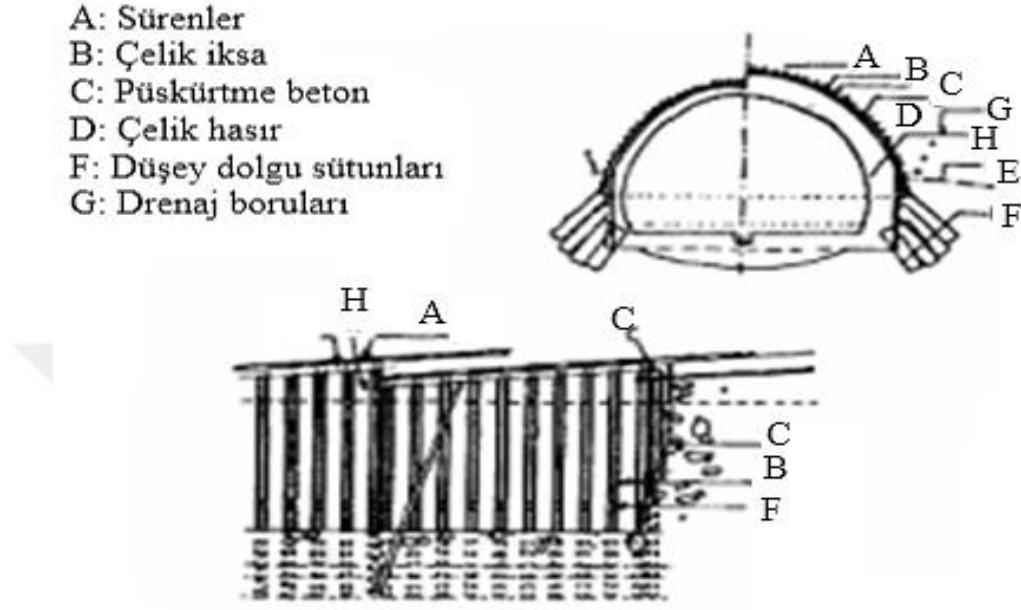
4. 4-6 m bazen de 9 m' ye kadar çevresel bulonlarla tünel sağlamlaştırılır.

5. Yaklaşık 10 m ilerlemenin ardından (önceden yerleştirilen sürenlerin bitimine 3 m

kala) profil boyunca yeni delikler delinerek sürenler yerleştirilir.

6. Alt yarı kazılarak ters kemer betonu atılır. Sürenlerle tünel sağlamlaştırma yöntemi

Şekil 29.'da gösterilmektedir.



Şekil 29. Ön Sürenlerle Tünel Duraylılığının Sağlanması

### 1.12.3. Yeraltı Su Seviyesinin Düşürülmesi

Tünelin açılması sırasında tünel zemininin geoteknik özelliklerinin yanında en önemli konu yeraltı suyunun varlığıdır. Tünel kazısına başlamadan önce yeraltı suyunun kontrol altına alınması önem arz etmektedir. Alınacak önlemlerden ilki öncelikle su seviyesinin düşürülmesi veya geçirimsiz birimler arasında yer alan geçirimli seviyelerdeki suyun dikey sondaj kuyuları açılmak suretiyle azaltılması denenmelidir. Açılacak pompaj kuyularının sayısı zeminin veya tünel güzergâhında su sorununu yaratan olayın cinsi ve şekline göre tek veya birkaç tane olabileceği gibi belirli bir sıra dâhilinde yerleştirilen bir diziden de ibaret olabilir. Eğer iki tünel yan yana açılıyorsa kuyuların iki tünel arasına yerleştirilmesi daha uygundur.

#### 1.12.4. Yeraltı Suyunun Dondurulması

Bu yöntem ile tünel zemini içerisindeki suyun akışı kesilmekte ve kendisini uzun süre tutabilen zeminler oluşturulmaktadır. Tünel inşaatında suyun dondurulması, düşey ve yatay olarak iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Yatay olarak suyun dondurulmasında ince bir kabuk elde edileceğinden ve düşeye göre daha küçük bir hacim dondurulması ile sonuca ulaşılabileceğinden daha avantajlıdır.

Yeraltı suyunun dondurulması yönteminin uygulanmasında zeminin jeolojik ve geoteknik karakterleri büyük önem kazanmaktadır. Özellikle boşlukların hacmi, zeminin su muhtevası, zeminin ısı iletme katsayısı, zeminin başlangıçtaki ısı derecesi ile zemin içindeki yer altı suyunun hızının bilinmesi gereklidir. Yeraltı suyunun dondurulması yöntemi genelde iki ana gruptan oluşmaktadır.

1-Tuzlu su kullanarak dondurma: En ekonomik yöntem olmakla beraber işleme cevap verme süresi uzundur (20-25 gün). Bu yöntemde tuzlu su kapalı bir devrede dolaştırılarak soğutma sağlanmaktadır. Zemin içinde  $-20^{\circ}$  ile  $-40^{\circ}$  C soğukluğundaki sıvının borular içinde dolaştırılmasıyla zemin içindeki su dondurulmaktadır. Amonyak ya da karbondioksit soğutucu olarak kullanılır.

2- Sıvı azot kullanarak dondurma: Bu yöntemde işleme cevap verme süresi çok kısa (30-40 saat) olmakla beraber maliyeti oldukça yüksektir. Bu yöntemde önce sıvı azot zemine verilmekte, daha sonra bir havalandırma borusu yardımıyla havaya bırakılmaktadır. Böylece çok düşük seviyelerdeki soğukluk nedeniyle çok kısa sürede donma sağlanabilmektedir.

Yeraltı suyunu dondurma yöntemiyle zeminin iyileştirilmesi enjeksiyon veya diğer yöntemlerin uygulanması durumunda başarılı olabilmektedir. Ancak donma sırasında zeminin kabarması, tünel kazısı nedeniyle zeminin gevşemesi ve donun çözülmesi sırasındaki konsolidasyon gibi nedenlerle yüzeydeki yapılarda yer değiştirmeler oluşabileceği unutulmamalıdır.

#### 1.12.5. Basınçlı Hava

Tünele basınçlı hava pompalanarak yapılan ilerlemeye basınçlı hava yöntemi denir. Burada amaç, tünel içindeki hidrostatik basıncı dengeleyerek su, kum, çakıl ve yumuşak malzemenin hareketini önlemektir. Bu yöntem:

- Yeraltı suyunun zemin ortamından uzaklaştırılması sırasında önemli ölçüde yer değiştirmeye uğruyorsa, (aşırı yüzey oturmaları oluşuyorsa)

- Ortamdan suyun uzaklaştırılmasında kullanılacak olan kuyuların açımı, yüzeydeki yapılar veya diğer nedenlerle zor ise,

- Su taşıyan tabakaların hacim ve geçirgenlikleri pompaj işlemi için fazla ise,

- Zemin aynada kendini tutamıyor ise,

- Akıcı zemin davranışları, (sıvılaşma bekleniyorsa)

- Göl ve akarsu tabanı çökelleri içinden geçiliyorsa kullanılmaktadır.

Bu sistemde tünel en kesiti bir basınç duvarı ile kapatılır. Tünel kazısının yapıldığı kısma havanın geri kaçmasını önlemek için bölme ve basınç odası yerleştirilir. Basınç odası her iki tarafında hava sızdırmaz kapı olan bir hücreden oluşur. Kapatılan bu kısma yeryüzündeki bir kompresör istasyonundan basınçlı hava pompalanır. Kullanılan havanın basıncı zemin suyu basıncına eşit olmalıdır. Bu yöntemde ilerleme yönünde sadece elektrikle çalışan makineler kullanılır. Kazılan toprak ve taşlar basınç duvarına bağlantısı olan ulaşım galerisinden geçilerek nakliye edilir. Eğer kazı esnasında zemin içinden hava kaybı meydana geliyorsa hava basıncını düşürerek ilerlemek veya yüzeyden, tünelden ya da bir kuyudan enjeksiyon yaparak zemin içinden hava kaybını önlemek mümkündür (Kılıç, 1997, Vardar, 1994, Özaydın, 2007 ve Özaydın, 2003).

### **1.13.Yerinde Kaya Dayanım Parametrelerinin Belirlenmesi**

Polilit olarak adlandırılan çok parçalı, çatlaklı ortamlar monolit (tek, çatlaksız kayaç) ortamlara göre daha düşük direnç gösterir ve kolayca şekil değiştirerek plastikleşebilir. Bunun nedeni, bir gerilme durumunda kayaya aktarılan kuvvetlerin süreksizliklerden ötürü farklı noktalarda farklı büyüklüklere ulaşmasıdır. Parçadan parçaya kuvvet aktarımları sırasında pürüzlü çatlak yüzeylerinde gerilme yığılmaları oluşur. İkincil etmenler arasında ise süreksizlik yüzeylerinin geçmişteki oluşumları sırasında geçirdikleri örselenmeler ve buna bağlı olarak gelişen ayrışma olayları gösterilebilir. Sonuç olarak; süreksizliklere yakın kesimlerde yer alan parçacık, iç kesimlere göre önceden daha fazla zorlanmış ve örselenmiştir. Parçacık küçüldükçe bu zayıf kesimlerin hacim içerisindeki payı artar, sonuçta çok parçalılık arttıkça kayanın dayanım parametreleri laboratuvarında incelenen taş örneklerinde bulunan değerlere kıyasla çok belirgin azalmalar gösterir.

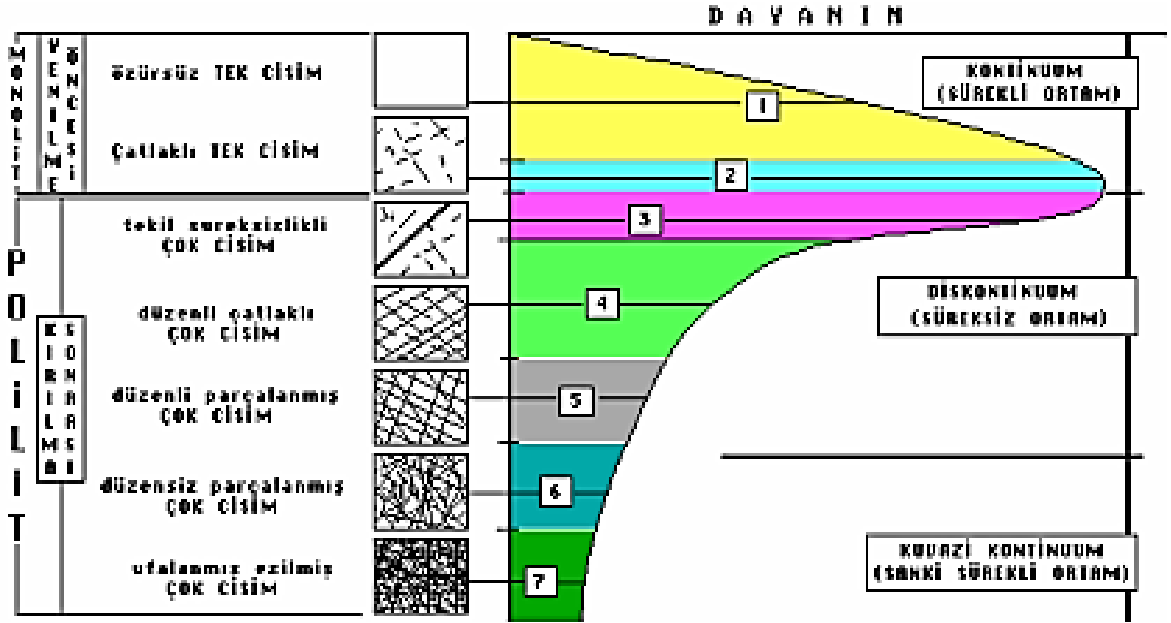
Sağlam kaya numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar kayaçlara doğrudan uygulanamaz. Çatlaklar, kırıklar, fissürler, tabakalar, eklemler, faylar gibi kayaçların içindeki süreksizlik yüzeyleri ve bunlar üzerindeki pürüzler sağlamlığı azaltmakta ve dolayısıyla kayaçlar için sağlam numuneye oranla daha düşük taşıma ve dayanım elde edilmektedir.

Kaya mekaniğinde kayaçların arazide sahip oldukları geomekanik büyüklükleri belirlemek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir (Hoek&Brown, Lama, Denkhaus&Bieniwaski, Protodjakonov gibi).

Hoek&Brown tarafından geliştirilen ve laboratuvarda ortamında bulunan taş örneğinin tek eksenli basınç dayanımı değeri ile birlikte kayacın arazide sahip olduğu süreksizlik miktarını ve örselenme durumunu kullanarak hesaplama yöntemi, RocLab. 1.0 yazılımı ile uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır.

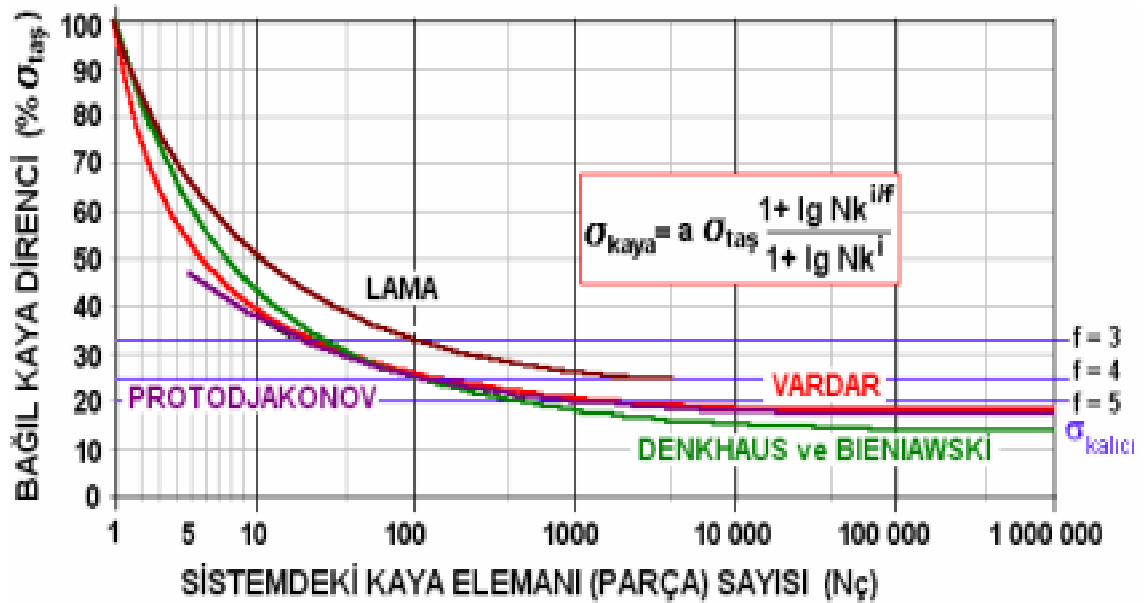
Modern kaya mekaniğinin kurucularından olan Müller L. tarafından temeli atılan ve Vardar tarafından geliştirilen bir başka yöntem ile kayacın dokusal özellikleri, süreksizlik özellikleri, tek eksenli basınç dayanımı ve sistem büyüklüğü kullanılarak kayaç için yerinde geomekanik büyüklükler hesaplanabilmektedir.

Sistem büyüklüğü, teknik girişimin etkileşimde olduğu büyüklüktür. Uygulamada kazı açıklığının 8 katı olarak alınabilmektedir. Sistem büyüklüğü veya ölçek etkisi aynı ortamda dikkate alınan değerlendirme sınırındır. Şekil 30.'da görülebileceği gibi aynı ortam ne kadar küçük bir alan içerisinde incelenirse, o sistemde etkili olan süreksizliklerin sayısı da azalmış, kayaç monolite yaklaşmış olacaktır (Yüzer, Vardar, 1986).



Şekil 30. Kaya Mekanikinde Aynı Ortamın Sistem Büyüğüne Bağlı Olarak Farklı Şekilde Davranmasının Post-Failure Davranışı İle Açıklanması (Vardar, 2005)

Kayaçların yerinde mekanik büyüklüklerinin saptanmasında kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarından yola çıkılmaktadır. Şekil 31’de bu dirençlerine bağlı olarak taş (laboratuvar örneği) – kaya (arazide) ilişkisini göstermektedir.



Şekil 31. Tek Eksenli Basınç Direncine Bağlı Taş-Kaya İlişkisi (Vardar, 2005)

Direnç düşüm sayısı (f) farklı kayaç türleri için yapılan post-failure deneylerinden elde edilmektedir. Tablo 27.'de farklı kayaç türleri için elde edilmiş değerleri gösterilmektedir.

Tablo 27. Farklı Kayaç Türleri İçin Direnç Düşüm Değerleri

Kayaç Türü	Direnç düşüm sayısı "f"
Obsidiyen	>40
Kuarsit	30-40
Granit	25-35
Bazalt	20-30
Kumtaşı	15-25
Kireçtaşı	12-20
Marn	8-15
Kiltaşı	3-12

a değeri anizotropi sayısıdır. Yönlü örneklerde elde edilen tek eksenli basınç dirençlerinin karşılaştırılması ile ulaşılmaktadır. Büyüklük, tek eksenli basınç dayanım değerlerinden en küçük değer ile en büyük değer birbirlerine olan oranından belirlenebilmektedir.

$$a = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (8)$$

Kayacın teknik kohezyonu ve içsel sürtünme açısı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$c_{\text{kaya}} = c_{\text{lab}} \cdot \sqrt{i} \cdot \left( \frac{\sigma_{\text{arazi}}}{\sigma_{\text{lab}}} \right) \quad (9)$$

$$\Phi_{\text{kaya}} = 90 - \left( 2 \arctan \left( 2 \cdot \frac{c_{\text{kaya}}}{\sigma_{\text{kaya}}} \right) \right) \quad (10)$$

Dış etkilere maruz bırakılan kayanın içsel parametrelerinin zaman, su ve psödoplastikleşme ile alabileceği son değerler için Barton ve Bieniawski parametreleri ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$c_{\text{rez}} = c_{\text{kaya}} \cdot 0,018 \quad (11)$$



$$\Phi_{rez} = \Phi_{kaya} \cdot J_w \cdot \frac{RMR_{final}}{RMR_{basic}} \quad (12)$$

Hoek ve Brown tarafından geliştirilen yöntemde; kayaların türüne, dokusal özelliklerine, tek eksenli basınç dayanımlarına ve kazı yönteminin hassasiyetine bağlı olarak değerlendirme yapılmakta, kayaların yerinde dayanımları belirlenebilmektedir. RocLab. 1.0 programı kullanılarak kayaların yerinde mekanik dayanımları kayaların kalite ve yapısal özelliklerine bağlı olarak hesaplanabilmektedir (Tablo 28).

Tablo 28. Kayaç Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tahmini

Derece (Brown)	Dayanım	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (Mpa)	Nokta Yükleme İndeksi (Mpa)	Araziye Durumu	Örnekler
R6	Çok yüksek dayanımlı	>250	>10	Sadece jeoloji çekici ile küçük parça kopmaları	Taze bazalt, diabaz, gnays, granit
R5	Çok dayanımlı	100-250	4-10	Kırılması için jeoloji çekici ile sıkça vurulmalı	Bazalt, tüfit
R4	Yüksek dayanımlı	50-100	2-4	Kırılması için jeoloji çekici ile birden fazla darbe gerektirir.	Kireçtaşı, kumtaşı, şist
R3	Orta dayanımlı	25-50	1-2	Çakı ile çizilemez, jeoloji çekicinin tek darbesi ile kırılır	Kiltaşı, kömür, beton, şist
R2	Zayıf dayanımlı	5-25	-	Zorlanırsa çakı ile kesilebilir, çekiç ucu ile delinebilir	Potas, kaya tuzu
R1	Çok zayıf dayanımlı	1-5	-	Çekiç ucu ile vurulduğunda parçalanır, çakı ile kesilebilir	Çok ayrılmış kayaç
R0	Oldukça zayıf dayanımlı	0,25-1	-	Tırnak ile çizilebilir	Zemin

Hoek tarafından yapılan sınıflamalarında kullanılan  $m_i$ ,  $m_b$ ,  $s$  ve GSI değerleri ise aşağıda görülen Tablo 29.'dan alınabilir.

Tablo 29. Hoek Sınıflamasında Kullanılan  $m_i$  Değerleri

Kayaç	$m_i$	Kayaç	$m_i$
Granit	33	Gabro	27
Riyolit	16	Dolorit	19
Obsidiyen	19	Bazalt	17
Granadiyorit	30	Aglomera	20
Dasit	17	Breş	18
Diyorit	28	Tüf	15
Andezit	19		





$$m_b = m_i \cdot 10^{\left(\frac{GSI-100}{28}\right)} \quad (13)$$

ve

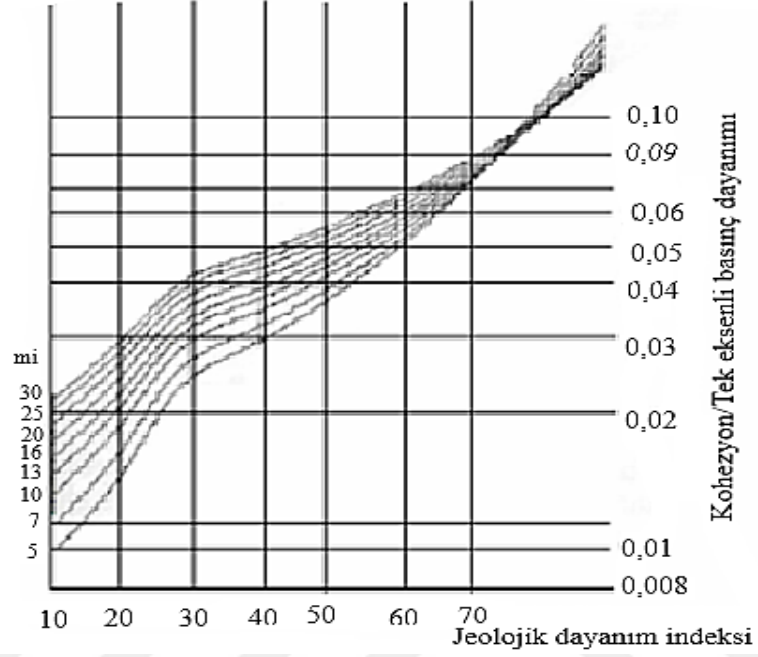
$$s = 10^{\left(\frac{GSI-100}{9}\right)} \quad (a = 0,5 \text{ için}) \quad (14)$$

$a=0,65-(GSI/200)$  ile hesaplanır.  $GSI < 25$  olduğu durumlarda  $s=0$  olarak alınmaktadır. GSI değerleri Tablo 30.'dan alınabilir.

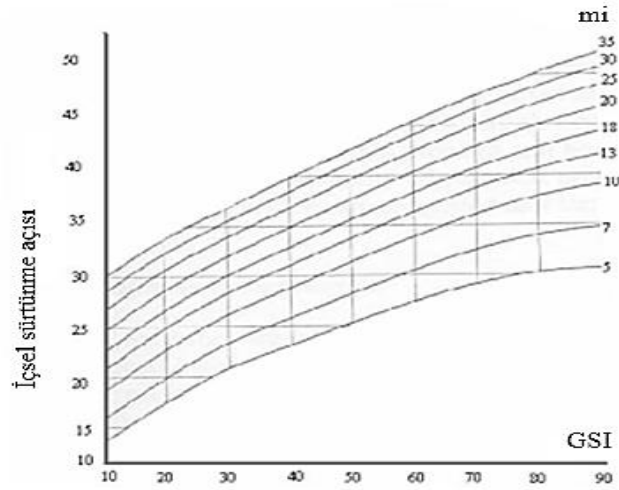
Tablo 30. GSI Sınıflaması (Hoek&Brown)

	YÜZEY KOŞULLARI				
	çok iyi	iyi	orta	zayıf	çok zayıf
	Kötüleşen Arazi Koşulları →				
 MASİF - MONOLİT	90	80	70	N/A	N/A
 PARÇALI 3 Eldem Takımı	80	70	60		
 PARÇALI 4 veya daha fazla eldem takımı			50		
 BLOKLU-PARÇALI kavımlarınmalara sahip, pistozite etkili			40	30	
 UFALANMIŞ KAYAÇ				20	
 KESME DÜZLEMLERİ	N/A	N/A			10

GSI değerine bağlı olarak kohezyon ve içsel sürtünme açıları aşağıdaki şekillerden bulunabilmektedir (Tablo 29, 30).



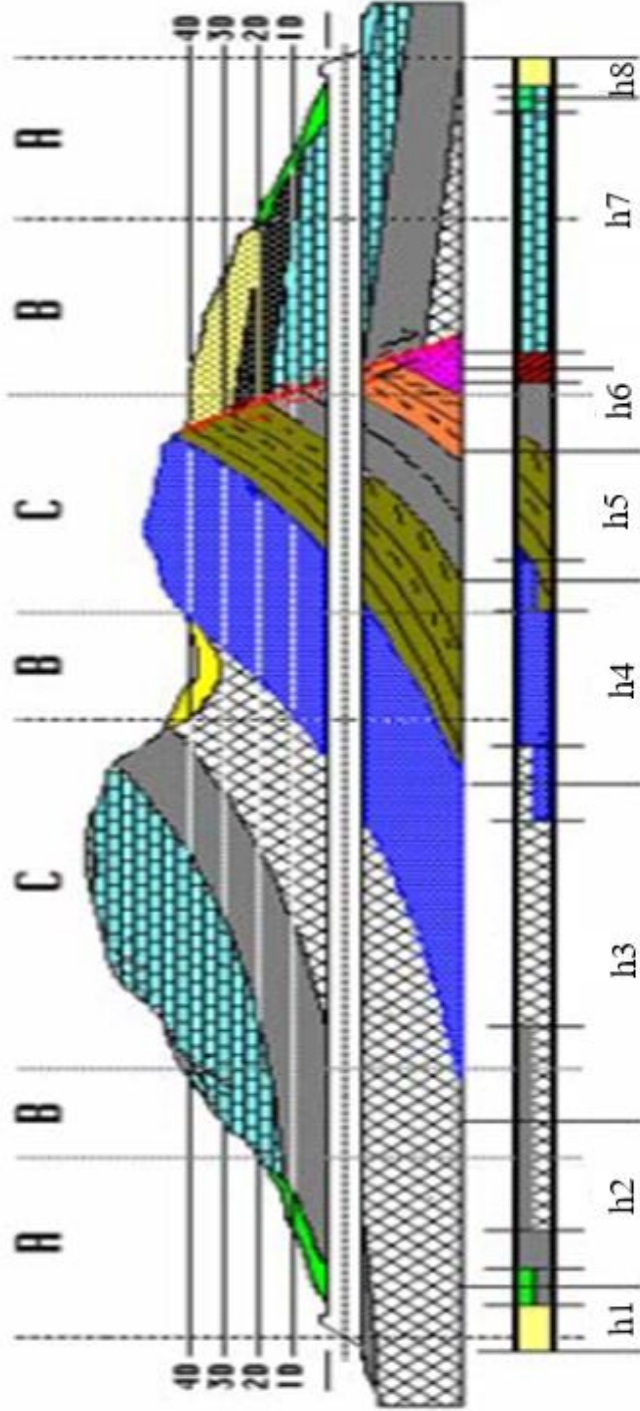
Şekil 32. GSI İle  $c/\sigma$  İlişkisi



Şekil 33. GSI İle İçsel Sürtünme Açısı İlişkisi

### 1.14. Homojen Bölgeleme

Yeraltı kaya yapısı güzergâhı jeomorfoloji, jeoloji veya mühendislik jeolojisi açısından kendi içerisinde aynı özellik ve davranışı gösteren kısımlara ayrılabilir. Homojen bölgeleme (dar anlamda kayaç sınıfı) olarak tanımlanan bu çalışma ile yapım sırasında alınması gereken önlemler anlatılmaktadır. Bu bölgeler önlem, işlem, yöntem değişimi gerektirmeyen ve risk açısından benzerlik gösteren kesimlerdir. Homojen bölgeleme yapılırken kesimler; zemin kaya kökeni, türü, dokanak sınırları, yeraltı su seviyesi, zemin kayaç özellikleri, niteliği, niceliği, süreksizlikleri, ayrışma durumu, kaya kalitesi, porozite-geçirimsizlik durumu, kayacın erime-kabarma-şişme özellikleri, geomekanik özellikler, kazılabilirlik, delinebilirlik, patlatılabilirlik özellikleri, güzergâh morfolojisi ile yeraltı kaya yapısı ilişkisi (sığ-derin-çok derin tünel, portal bölgesi, yamaç tüneli, vadi-akarsu altında yer alan tünel, heyelan sahası vb) gibi özellikler dikkate alınarak ayrılırlar (Koçak, 2006). Şekil 34.'de tünel güzergâhı için bir bölgeleme örneği verilmiştir.



### TÜNEL PROJELERİNDE BÖLGELENDİRME

- A: Sığ tünel giriş bölgesi
  - B: Yüzeyle yakın tünel  $20 < H < 40$
  - C: Az derin, çok derin tünel ( $H > 40$ )
- Homojen Bölgeler ve fay zonları (h1-h8)

Şekil 34. Tünel Projelerinde Homojen Bölgeleendirme (Vardar, 2005)

### 1.15. Amaç ve Kapsam

Deriner Barajı ve HES Projesinin yapımından dolayı baraj gölü havzası altında kalan Artvin-Erzurum Devlet Karayolu eski güzergâhını, baraj göl kotunun üzerine çıkarmak suretiyle Artvin-Yusufeli-Erzurum Devlet Karayolu yeniden inşa edilmiştir. Bu iş kapsamında, Artvin-Yusufeli Devlet Karayolunun yaklaşık 44+000-47+000 kilometreleri aralığında meydana gelen heyelanlar yol güzergâhının değiştirilmesine neden olmuştur. Bu maksatla, heyelanların kayma düzlemi dışında kalacak şekilde göl kenarından yaklaşık 250 m iç kısımda Oruçlu Tüneli planlanmıştır. 2277 m uzunluğundaki Oruçlu Tünelinin kazı ve destekleme yapımı aşamasında, 20 m'lik bölgede meydana gelen göçük ve buna bağlı olarak 200 m'lik kısımda yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Bu yer değiştirmelerin önlenmesi ve göçük kısmının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Oruçlu Tüneli göçük bölgesi iyileştirme projesi kapsamında, tünelde 200 m'lik kısım B3 zemin sınıfı olarak belirlenmiş ve bu zemin sınıfına göre önceden yapılmış olan I160'lık iksa, çelik hasır ve püskürtme betonların sökümü yapılmıştır. Tünel tavan kısmının iyileştirilmesi için L=9 m uzunluğunda 4" çapında 4,9 mm et kalınlığında çelik boru kullanılmıştır. 9 m'lik çelik boru boyunun 3 m'lik kısmı bir sonraki çelik borunun bindirmesi olarak yapılmıştır. Bu da bize 6 m'lik kazı ilerlemesine olanak tanımıştır. Bu projede, bir en kesitte tek sıra olmak üzere 67 adet, çift sıra da ise 114 adet çelik boru kullanılmıştır. Öncelikle drenaj amaçlı 10 m uzunluğunda drenaj delikleri açılarak mevcut yeraltı suyunun ve yüzey sularının drene edilmesi sağlanmıştır. Daha sonra tünel çapı kadar mesafede tünel çevresindeki formasyonun iyileştirilmesi için 9 m olacak şekilde tünel çevresinin tamamında enjeksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ardından çelik boruların tünel tavanına yerleştirilmesi yapılarak, boru içlerine enjeksiyon yapılarak tünel kazısı ile destekleme elemanları yapılmıştır.

Bu tez kapsamında, yapılan çalışmalara ait aşamalar şöyledir. Birinci aşama; Oruçlu Tünelinin inşaat mühendisliği ve geoteknik açıdan etüdü ile özellikle göçük bölgesinin incelenerek elde edilen verilere bağlı olarak göçük bölgesinde uygulanacak olan destekleme, sağlamlaştırma ve iyileştirme yöntemlerinin belirlenmesi ile birlikte tünel tip kesitinin oluşturulması ve kabuller yapılarak sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesidir. İkinci aşama ise; zemin incelemesine dayalı yapılan kabuller çerçevesinde göçük bölgesi için düşünülen şemsiye kemer (umbrella arch) iyileştirme yönteminin arazide uygulamasını takip

etmek ve kontrollerinin yapılmasıdır. Tez çalışmasına ait bölümlerin kapsamı aşağıda maddeler halinde özetlemiştir.

- ❖Günümüz tünelcilik yöntemleri ile ilgili genel bilgiler açıklanmıştır.
- ❖Kaya kalite ve destek sınıflamaları özetlenerek, gelişme sırasına göre Terzaghi Kaya Sınıflamasından başlamak üzere literatürde sıkça bahsedilen diğer sınıflandırmalara değinilmiştir. Ülkemizde yapılan tünel imalatlarında zemin sınıfının belirlenmesinde kullanılan RQD, RMR, RSR, Q-BARTON gibi sınıflama sistemleri detaylı olarak açıklanmıştır.
- ❖Tünel kazı yöntemi olarak dünyada sıkça kullanılan Yeni Avusturya Tünel Açma (NATM) Yöntemi açıklanmıştır. Tünel kazısı esnasında zeminde meydana gelen gerilme durumları, NATM, tarihçesi, ilkeleri, sınıflandırmasının belirlenmesi ve NATM yönteminde ÖNORM B 2203' e göre kaya davranışı incelenmiştir.
- ❖Tünellerde destekleme, sağlamlaştırma ve iyileştirme yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır.
- ❖Laboratuvarda yapılan deney sonuçlarının arazi koşulları dikkate alınarak yeniden değerlendirilmesini sağlayan Hoek-Brown ve Vardar yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir.
- ❖“Homojen bölgelendirme” kavramı üzerinde durulmuştur. Homojen bölgelendirmenin hangi parametrelere, birimlere ve hangi unsurlara bağlı olarak belirlendiği anlatılmıştır. Belirlenen homojen bölgelerin projelendirme ve yapım esnasında ne gibi yararları olduğu incelenmiştir.
- ❖Sonlu elemanlar yöntemi anlatılmıştır.
- ❖Oruçlu Tüneli örnek proje olarak seçilmiş, tünel projelendirme esasları kullanılarak bu projeye ait genel jeoloji, mühendislik jeolojisi, geomekanik ve geoteknik özellikler açıklanmış, laboratuvar deneyleri sonuçları kullanılarak yerinde geomekanik parametreler hesaplanmıştır.
- ❖Örnek tünel için homojen bölgelendirme yapılmıştır. Elde edilen homojen kesim için NATM kaya destek sınıflamaları belirlenmiş ve destekleme sistemleri önerilmiştir. Bu kesitler Phase<sup>2</sup> paket programına sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Analiz neticesinde meydana gelmesi beklenen yer değiştirme ve gerilme değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan zemin yer değiştirmelerinin belirli değişkenlere bağlı olarak değişimi incelenmiştir.

- ❖ Tezin son bölümünde ise, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

### 1.16. Literatür Araştırmaları

Literatürde benzer konuları kapsayan farklı çalışmalar araştırıldığında, Şemsiye Kemer Yönteminin tünel destekleme çalışmalarında tünelde oluşan gerilemeleri azaltıcı yönde etkisinin olduğu, yapım güvenliği vb. sağladığı ortaya koyulduğu görülmüştür. Özellikle tünellerde kemerleşmenin sağlanamadığı durumlarda bu yöntem kullanılarak faydalı sonuçlar alındığı ve tünel imalatlarının sağlıklı bir şekilde yapılabileceği ortaya konulmuştur. Aşağıda bu konudaki araştırmalar sunulmaktadır.

Dalgıç (2000), uzunluğu 625 m ve yüksekliği 10,60 m olan sığ ve gevşek zeminde inşa edilen Beykoz tüneline incelemiştir. Tünelin RQD değeri %25 olarak hesaplanmıştır. Desteklemesi yapılmış olan üst yarının göçmesi ve kazı esnasında desteklemenin yapılmadığı bölgede meydana gelen kaya düşmelerinin sebebi olarak püskürtme betonun uygulama zamanı ve priz alma süresi gösterilmiştir. Tünel içerisindeki yer altı suyu girişi, tünelde meydana gelen göçmelerin nedeni olarak gösterilmektedir. Bu olumsuzlukların kaldırılması için, kazı ilerleme adımlarının düşürülmesi, boru kemer şemsiye kullanılması ve drenaj önerilmiştir.

Harazaki vd. (1998), karayolu tünelineki çelik boru gerilmelerini ve yüzey oturmalarını ölçerek, tünel çevresindeki formasyonun iyileştirilmesi ve tünel duraylılığının sağlanması açısından şemsiye kemer yönteminin etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Karaoğlan (2002), kaya zeminde NATM metoduyla kazısı yapılan bir tüneline incelemiştir. NATM prensipleri doğrultusunda çalışan Smap-3d ve Tuna-plus ile modelle yapılmıştır. Kazı aşamaları ve desteklemeler dikkate alınarak öncelikle tüm dağdan dolayı oluşan yükler yüklenmiş ve kemerlenme mesafesi bulunmuştur. Kaya ortamın davranışının modellenmesi amacıyla Murrel ve Hoek kırılma kriterleri oluşturulmuştur. İlgili programlar ile Çayeli Tüneline analiz edilmiştir. Tünel kesiti ile etrafında meydana gelen yer değiştirmeler, gerilmeler ve plastikleşen bölgeler belirlenmiştir. Tünelde düşey doğrultuda en büyük 2,90 mm, yatay doğrultuda da 0,40 mm yer değiştirme meydana geldiği hesaplanmıştır.



Kontothanassis vd. (2005), NATM metoduna göre inşa edilen, marn, konglomera ve kil zeminde açılmış Atina metrosunun istasyon tünellerini incelenmiştir. Kesit alanları  $195 \text{ m}^2$ - $215 \text{ m}^2$  arasında olan tüneller, yüzeyden yaklaşık 18 metre derinliktedir. 40 cm kalınlığında C25/30 kalitesinde püskürtme beton, 1 m ara ile 6 metre uzunluğunda kaya bulonları, 12 metre süren uzunluğu ve 2 sıra çelik hasır ile destekleme yapılmıştır. Kazı adımları 1 metredir. Bu çalışmada kaya bulonları ve sürenler ayna duraylılığının sağlanmasında en büyük ölçüt olarak belirtilmiştir. Bu iki elemanın birlikte kullanımının, ayna önünde bulunan plastik zonun ve yüzey oturumlarının kontrolü açısından son derece gerekli ve önemli olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca aynaya uygulanan fiberglas boru ile sürenlerdeki sapma ve dönme momenti etkisinin azaldığı sonucuna varmışlardır.

Denek ve Özçelik (2007), Göcek tüneli projesinde, daha önce uygulanan NATM'ın yetersiz kaldığı noktaları belirlemiş, NATM'den sonra uygulamaya başlanan şemsiye kemer yöntemini anlatmış ve Göcek tünelineki uygulamalarını inceleyerek sonuçlarını değerlendirmişlerdir.

Aksoy ve Onargan (2010), Tünel açma faaliyetleri esnasında, özellikle riskli bölgelerden geçerken ve zayıf zemin koşullarında çelik boru şemsiye kemer uygulaması yaygınlaşmıştır. Tünel güzergâhında bulunan binalar, yeryüzünde oluşan oturumlar sonucu hasarlanabilmektedir. Bu hasarları önlemek için uygulanan çelik boru şemsiye kemer yönteminde, boru çapları değişebilmektedir. Ancak, hangi boru çapının kullanılacağı hem projenin ekonomisini hem de süresini etkilemektedir. 4 inç'lik çelik boru şemsiye kemer uygulamasında özel delici makine gerekirken, daha küçük çaplı boruların tünel çevresine ekskavörlere bağlanan delici bir ekipman vasıtası ile yerleştirilmesi mümkün olabilmektedir. Uygun çelik boru çapı ise tünel önüne gelen yüklerin ve gerilmelerin karşılanmasında önem arz etmektedir. Bu çalışmada, İzmir Metrosu 2. Aşama İnşaatı kapsamında uygulanan 2 inç'lik çelik boru şemsiye kemer yönteminin uygunluğunun sayısal modelleme ile belirlenmesi ve uygulama sonucunda elde edilen verilerin, mod elleme çalışması ile uyumu tartışılmıştır. Bu çalışmada İzmir metro inşaatının 2. etabının bir parçası olarak şemsiye kemer-ayna bulon uygulamalarının zemin oturumları üzerindeki etkileri sayısal modelleme ve yerinde ölçümlerle belirlenmiştir. Sonuçlar, şemsiye kemer ve ayna bulon uygulamalarının, zemin oturumlarını azaltarak ve yakınsama oranını sırasıyla% 69 ve% 57 olarak azaltarak, binalar üzerindeki yerleşim yeri hasar riskini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir.

Elyasi, Javadi, Moradi, Javad, Parnian, Amrac. (2016), Tavanların ve büyük tünellerin duvarlarının çökmesini önlemek için, özellikle zor jeolojik koşullarda, sıralı bir kazı yöntemi (SEM) veya zemin güçlendirme yöntemi veya her ikisinin bir kombinasyonu kullanılabilir. Kuzeybatı İran'daki Adit tünelinin ilk kısmı alüvyon malzemesinde çok zayıf geoteknik parametrelerle delinmiştir. Bu tüneli inşa ederken bir SEM uygulamasına rağmen, FLAC3D kullanılarak yapılan sayısal modellemenin analizi ve ayrıca delme sırasında gözlem yapılması, tünel kararsızlığını gösterir. Çalışma güvenliğini arttırmak ve çökmeyi önlemek için ön destek sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Çalışma sırasında gözlemlerin eşlik ettiği sayısal modellemenin sonuçları ve ayrıca verilerin değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçları, bu yöntemin, tünel yolu boyunca alüvyon malzemesinde çökmeyi önleme etkinliğini göstermektedir. Şemsiye kemerinin davranışının modellenmesi, maksimum sıkıştırma kuvvetinin konumunun, tünel ark bölgesindeki bir değişiklik ile değişeceğini göstermektedir. Ayrıca, borular üzerine uygulanan yer değiştirme, kuvvet ve moment, delme adımları sırasında belirli bir desene göre değişecektir.

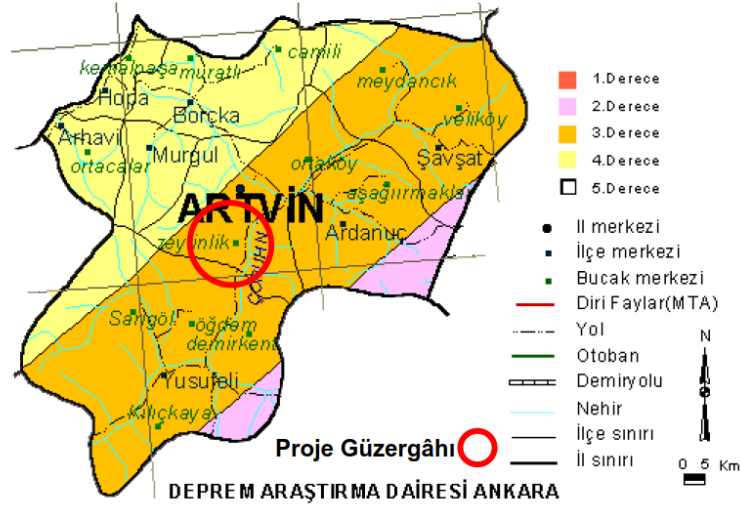
Ocak, Möröy (2006), metro tünellerinde, kazıdan önce ve sonra yüzeyde oluşan ve yüzeyde bulunan yapılara zarar veren, hatta yıkılmalarına neden olan yüzey oturmalarının, izin verilebilir değerler arasında olması ve bu aralıkta tutulabilmesi çok önemlidir. Aksi halde, metro tüneline beklenen fayda elde edilemeyeceği gibi metrodan beklenen kazanımlar da olmayacaktır.. Bu amaçla, İstanbul Metrosu 2. Aşama kazıları Unkapanı-Yenikapı bölümünde değişik formasyonlarda yapılan tünel kazıları üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ve özellikle hassas bölgelerde bu metoda ek olarak yapılan koruyucu kemer (KK) yöntemi karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda özellikle killi zeminlerde koruyucu kemer yöntemi ile yüzey yer değiştirmelerin büyük ölçüde kontrol edilebildiği görülmüştür.

Çelik, Türkmen (2015), Ramdane Tünel inşası süresince farklı kaya/zemin şartlarıyla karşılaşılmasına rağmen temel hedef, kazı adımları boyunca işçi ve yapım güvenliğini göz önünde bulundurmadır. Tünelin baskılı ve zayıf kısımlarında yapılan desteklemelerde meydana gelen sorunlar nedeniyle, bu bölgelerde farklı destekleme sistemi olan Şemsiye Kemer (Boru Kemer) yöntemi uygulanmıştır. Bu yönteminin yapılma amacı, tünel etrafında kaya/zemin kütlelerinde yapılan destekleme modeli ile güçlendirilmiş bir kabuk oluşturarak birincil destekleme sırasında duraylılığın sağlanmasıdır. Tünel güzergâhı boyunca geçilen zayıf kaya/zemin şartlarında kazı ortamının ilk dengesinin korunması, tünel içi (konverjans) yer değiştirmelerinin kontrol altında tutulması ve düşük kohezyonlu zeminlerde tünel aynası

gerisinde oluşan yer değiştirmelerin önlenmesi için uygulanan şemsiye Kemer Yöntemi ve uygulanişı incelenmiştir.







Şekil 36. Artvin İli Deprem Haritası

Tablo 31. Etkin Yer İvme Katsayısı

Deprem Bölgesi	$A_0$
1	0,40
2	0,30
3	0,20
4	0,10

Çalışma alanının tamamı 3. derece deprem bölgesi sınırları içerisinde yer aldığından, Tablo 31.'de görülen deprem bölgesine göre belirlenen etkin yatay yer ivmesi değeri  $A_0 = 0,20$  g olarak esas alınmıştır.

Nümerik analizlerde Phase<sup>2</sup> yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımda deprem analizi Pseudo-Statik (statik gibi) yöntemle yapılmıştır. Bu yöntem, girilen en büyük yatay yer ivmesi değerini model alanının kütlesiyle çarparak elde ettiği kuvveti tanımlanan yönde “statikmiş gibi” etkimektedir. Bu durum ve deprem dalgalarının milisaniye mertebesindeki bir zaman içinde yönelim değiştirmesi göz önüne alındığında en büyük yatay yer ivmesi değerinin 0.20 g değerine asla ulaşamayacağı düşünülebilir. Bu nedenle Pseudo-Statik deprem analizlerinde bu değer yarısı olan 0.10 g değeri esas alınmıştır. Bu değer, deprem anında yüzeyde beklenen en büyük yatay yer ivmesini temsil etmektedir. Dikey yöndeki en

büyük yatay yer ivmesi değeri olarak ise bu değerin 2/3' ü kullanılmıştır (Y.M.A. Hashash vd., 2001).

Tünellerin önceki tasarımları boyunca, tünellerin yakınlarında meydana gelen depremlerde en büyük hasarın tünel portallarında gerçekleştiği gözlenmiştir. Kaya veya zemin ortamlarında, derinlere inildikçe bu değerin tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir [33], 30 m'den derindeki tünellerde yüzeydeki ivme değerinin 30 % oranında azaltılmasını önermektedir. Bu nedenle, gövde bölgesindeki analizlerde 0.07 g en büyük yatay yer ivmesi değeri esas alınmıştır. Dikey yöndeki en büyük yatay yer ivmesi değeri olarak ise yine bu değerin 2/3'ü olan 0.05 g kullanılmıştır.

### **2.3. Bölge Jeolojisi**

İnceleme alanında temelde Paleozoyik yaşlı magmatik kayalardan Artvin granitoyidi ve üstünde Liyas yaşlı Hamurkesen formasyonu ve yamaçlarda da yer yer yamaç molozu bulunmaktadır.





### 2.3.1. Paleozoyik Artvin Granitoyidi (Pza)

Çoruh Vadisi boyunca, Artvin doğusunda ve güneyinde yüzeylenen Paleozoyik yaşlı granitoidler Yılmaz ve diğerleri (1997) tarafından Artvin granitoyidi olarak adlandırılmıştır. Kraeff (1963) birimi albit granodiyorit, olarak tanımlanmıştır. Tarhan (1984) Artvin güneyinde yüzeylenen granit türü kayaçları Artvin graniti olarak adlandırılmıştır. Adamia ve diğerleri (1992) tarafından üç granitoid grubu ayırt edilmiştir. Bunlar lökogradit, granitik-gnays ve S tipi plajiyogradittir.

Granitoidler, Artvin'in hemen güneyinde KD-GB doğrultusunda uzanan ve yaklaşık 60-70 kilometrelik bir alanı kaplamaktadır (Tarhan, 1984). Artvin çevresinde incelemeler yapan Kraeff (1963), bu granitik kayacı albit granodiyorit olarak tanımlanmıştır. Kayaç ksenomorf kuvars, hipidiyomorf albit ve K-feldispat kristalleri yanında K-feldispat mikroklin, mikropertit içerir. Tali, mineral olarak muskovit, serisit, klorit ve hornblend bulunur. Albit granodiyoritler, Artvin KB'sında, Çoruh Nehri'nin batısında yüzeylenir. Albit granodiyoritler içinde kuvars damarları da izlenir (Kraeff, 1963). Lökogradit asidik plajiyoklaz (albit-oligoklaz), potaslı feldispat-pertit ve kuvarstan oluşmuş iri-taneli hipidiyomorf dokuludur. Bu granitoidler, içlerinde ince-taneli kuvars, serisit, karbonat ve kloritten meydana gelen ince damarlar içerir. Çok düşük oranlarda apatit, zirkon ve cevher mineralleri tali mineral olarak bulunmaktadır. Lökograditler, petrolojik ve jeokimyasal özellikleri açısından kalk-alkalen eğilimler gösterir ve kıtasal granofirlerin alanına düşmektedir (Adamia ve diğerleri, 1992). Plajiyograditler genel olarak asidik plajiyoklaz ve kuvarstan oluşurlar. Ayrık ksenomorf taneler ya da ince-taneli biçimler halinde bulunurlar. Ender durumlarda kloritleşmiş ve serisitleşmiş psödomorflar şeklinde biyotit gözlenebilir. Yer yer granit-gnayslar, gözlü gnayslar, biyotit ve serisit şistler de gözlenebilir. Bu kayaçlar çoğunlukla kataklastik ve milonitik dokular göstermekte olup çok sayıda diyabaz, gabro, granit porfir ve dasit daykının etkisine uğramıştır.

Tarhan (1964)'ın Artvin graniti olarak tanımladığı granit türü kayaçlar genelde orta ve iri kristalli olup, mineral tür ve yüzdelerine göre açık pembemsi, koyu gri ve yeşilimsi renklerde görülür. Kayacı oluşturan minerallerden ortoklazların boyutları 2 santimetreye erişir ve daha çok granit intrüzyonunun orta kısımlarında görülür. Kenar kısımlarında mineral boyutları küçültülmektedir. Artvin granitinde değişik derecede ayrışma izlenir. Örneklerin mikroskop incelmesinde Artvin granitinin başlıca tonalit, granodiyorit türünde olduğu, bazı yerlerde ise asıl granit niteliği gösterdiği görülmüştür. Kuvarslar, ksenomorf,



makro ve mikro kristaller halinde ve bazı kesitlerde dalgalı sönme gösterirler. Feldispat, biyotit ve hornblend kristalleri otomorf ve subomorf olup, yer yer ayrıışmışlardır. Ayrıışma sonucunda bu mineraller yer yer klorit, serisit, kalsir ve kile dönüşmüştür. Ayrıca ender olarak zirkon, apatit, sfen ve opak mineraller izlenmiştir. Granitin oluşumuyla ilgili boşluklar hidrotermal kökenli klorit ve epidot kristalleri tarafından doldurulmuştur (Tarhan, 1984).

Birim içindeki anklavlarda şist, metagranit, milonitik gnays ve metadiyabaz gibi kaya türleri de saptanmıştır. Granitler içinde tektonik hareketlere bağılı olarak gelişen kırıklı, çatlaklı ve yer değıştirme yapıları izlenir.

Artvin granitoyidi inceleme alanı güneyinde Narlık ilçesi dolayında Liyas yaşı Hamurkesen formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülür. Yine bu granitoyitler inceleme alanı dışında Tortum-G46 paftasında, Çoruh Nehri'nin Sırakonuklar Dere ile kesiştiğı yerde Liyas yaşı Hamurkesen formasyonu tarafından uyumsuz olarak yüzeylenir (Güven, 1998).

KD-GB yönünde uzanan ve kuzeye doğıru devrik antiklinalin çekirdeğinde yer alan granitoyid, inceleme alanının (Artvin – F47 paftası) en yaşı birimini temsil etmektedir. Gümüşhane granitiyle deneştirilebilen bu birim, kimi yerlerde Geç Kretase'nin sığ denizel-karasal ve karbonat çökellerinin kalk-alkalen volkaniklerle ardalanmalı olduğı istif tarafından üzerlenir (Yılmaz ve diğerleri, 1997). Hamurkesen formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülen bu granitin yaşı için Jura öncesi veya Paleozoyik yaşı verilmiştir. Eski temele ait granitler inceleme alanı dışında GB'da Kaçkar granitoyidleri içerisinde yüzeylenir (Güven, 1993; Yılmaz ve diğerleri, 1997). Ustaömer ve Robertson (2009), Artvin çevresinde yüzeylenen en yaşı kayaçların bölgesel olarak şist ve gnayslara sıcak dokanaklar ile sokulan Erken Karbonifer yaşı granitler olduğunu belirtirler.

### **2.3.2. Hamur Kesen Formasyon (Jh)**

İnceleme alanında yüzeylenen bazaltik-andezitik-dasitik lav ve piroklastikleri ile kumtaşı, marn, ammonitiko-rosso fasiyesinde çökelen kırmızı kireçtaşı ve şeylden oluşun volkano-tortul istif ilk kez Açar (1977) tarafından Hamurkesen formasyonu olarak adlandırılmıştır. Hamurkesen formasyonu adlaması (Korkmaz ve Baki, 1984; Akdeniz, 1984, 1988; Keskin ve diğerleri, 1989) tarafından yaşı ve litofasiyes kapsamı kısmen genişletilerek yaygın biçimde kullanılmıştır.

Hamurkesen formasyonunun tip ve yeri inceleme alanı dışında Bayburt ili Gökçedere-Bizgili yolu, Hamurkesen Dere dolaydır. Birim inceleme alanında Artvin güneyinde Zeytinlik dolayında, Çoruh Vadisi boyunca, Artvin KD' sunda ve Ortaköy (Berta) dolaylarında yüzeyleir.

Hamurkesen formasyonu genelde mor, yeşilimsi gri renkli bazaltik lav ve pirolastikleri ile kumtaşı, marn ve şeyl ara düzeylerinden oluşur. Bazalt lavı intersertal, intergranüler ve mikrolitik pofirik dokulu olup, bol olivinlidir. Kayaçta albitleşme, serisitleşme, kalsitleşme ve kloritleşme yaygındır. Olivin kristallerinin büyük ölçüde iddingsitleşmiş olması nedeni ile bazaltlar arazide kırmızı benekli bir görünüm kazanmıştır. Birimi oluşturan lav ve pirolastikler içinde 3-5 metre kalınlığında kırmızı-bordo renkli kumtaşı ve killi kireçtaşı katmanları bulunur. Bu kırmızı renkli kireçtaşı katmanları bol makro ve mikro formlar içerir.

Hamurkesen formasyonu altta, Paleozoyik yaşlı Artvin granitoyidi üzerinde uyumsuz olarak yer alır. Bu uyumsuzluk inceleme alanı doğusunda Artvin, Erzurum ve Şavşat karayolları kavşağı yakınlarında izlenebilir. Burada Artvin granitoyidleri ile Hamurkesen formasyonu arasında yer değiştirme geçirmiş bir konglomera düzeyi yer alır. Bu konglomeranın çakılları granitik kayaçlardan oluşmaktadır (Yılmaz ve diğerleri, 1997). Birim inceleme alanı dışında Gümüşhane-Bayburt dolaylarında Pulur metamorfileri üzerine bir çakıltaşı düzeyi ile transgresif olarak gelmektedir (Keskin ve diğerleri, 1989). Birim üstte Madenler formasyonu tarafından uyumlu olarak üzerlenir.

Güven (1993, 1998) birimin kalınlığının bölgede 600-1800 metre arasında değiştiğini belirtir. İstifin fasiyesi yer yer yanal ve düşey değişimler sergilemektedir. Birim yaklaşık 3-5 kilometre kalınlığına sahiptir (Yılmaz ve diğerleri, 1997).

Adamia ve diğerleri (1992, 1995b) sadece radyolarya türlerine göre birimin yaşını Jura (Erken Jura) olarak belirlemişlerdir (Yılmaz ve diğerleri, 1997'den).

Hamurkesen formasyonunun yaşı, Liyas (Sinemuriyen-Toarsiyen) olarak belirlenmiştir (Keskin ve diğerleri, 1989; Güven, 1998).

Hamurkesen formasyonunun çökme ortamı sığ denizel ortamdan, pelajik ortama kadar değişmektedir. Birim başta bataklık-lagün, sığ denizel, ve volkanik aktivitenin yer yer etkin olduğu derin denizel bir ortamda çökelmiştir.

### 2.3.3. Yamaç Molozu

Yamaç molozları, inceleme alanında yüksek kesimlerde yer almaktadır. Çoruh nehri boyunca yamaç döküntüleri görülür.

## 2.4. Yapısal Jeoloji

İnceleme alanında gözlenen kayaçların konumları incelendiğinde, bölgede, Paleozoikten günümüze kadar tektonik hareketler meydana gelmiştir.

İnceleme alanı Doğu Pontid-Adjaro-Trialet ve Artvin-Bolnisi jeotektonik birimlerinde yer almaktadır (Yılmaz, 1989; Adamia ve diğerleri, 1992). Muhtelif Sovyet bilim adamları tarafından yapılan incelemelerden elde edilmiş sonuçlara dayanarak, Küçük Kafkasya'da görülen jeotektonik ve metalojenik üniteler sınıflandırılmıştır. Bu üniteler, herhangi bir kesintiye uğramadan, batı yönünde, Karadeniz ve Anadolu'ya doğru devam ederler. Bu suretle Adjaro-Trialet sistemi, batı uzantısı Karadeniz'de kaybolan Pontid jeotektonik ünitesine kavuşur.

Kafkasya'nın tektonik kuşakları ile Kuzeydoğu Türkiye'nin tektonik kuşakları karşılaştırıldığında Büyük Kafkasya'da ve Transkafkasya'nın kuzey kesiminde yer alan tektonik kuşaklar Kuzeydoğu Türkiye'de izlenmemektedir. Adjara-Trialetian kuşağı, Karadeniz'in kıyıları boyunca devam eder.

Transkafkasya'nın güney kesimini oluşturan Somchetikafan (Karabakh) kuşağı Pontid kuşağına denk gelir. Ancak kuşakların her iki kesiminde stratigrafik dizlim ve fasiyes değişimleri yönüyle önemli farklılıklar da izlenmektedir. Kafkasya'nın ve Kuzeydoğu Türkiye'nin birbirine karşılık gelen tektonik kuşakları karşılaştırıldığında, benzerliklerin yanı sıra, önemli fasiyes değişimleri de dikkat çeker. Farklılıkların büyük bir bölümü ise kuşakların yanal ve dikey yöndeki fasiyes değişimlerinden kaynaklanmaktadır (Yılmaz 1989).

Aşırı kıvrımlı ve yatık kıvrımı devrik yapılar Bakırköy dolayında yüzeylenen türbiditik istiflerde belirgin olarak izlenmektedir. Kıvrımlı devrik yapıların gelişimini sağlayan doğu-batı doğrultulu sıkışmalar nedeni ile türbiditik çökel kayaçlar ile dokanak yapan asidik ve bazik volkanitlerin sınırlarında kırılma ve kopmalar olmuş, bu sıkışma sonucunda batı yönünde bindirmeler oluşmuştur. Devrik ve bindirmeli yapıların özellikle

cevherli horizonların bulunduğu alanlar üzerinde yapısal denetimleri olduğunu vurgulamak gerekir. İnceleme alanında ayrıca KD-GB ve KB-GD doğrultularında gelişen makaslama fayları izlenmiştir. Eosen sonu genç magmatizmaya bağlı olarak andezit, dasit dayk, sil ve stokları ile inceleme alanı doğusunda riyolit stokları gelişmiştir.

İnceleme alanında Çoruh nehri vadisi boyunca KD-GB doğrultulu fay bulunmaktadır. Yer alan en büyük ters fay Artvin 1 merkezinden geçen sürüklenme hattıdır. Bu bindirme hattı inceleme alanı güney kesiminde Hamurkesen formasyonu ile Çatak formasyonunu etkilemiş olup Hamurkesen formasyonu Çatak formasyonu üzerinde itilmiştir. Bunun devamı olarak Kuzey paftalarında ise Kaynarca köyü civarında dasitik piroklastiklerden oluşan Kızılkaya ve Çağlayan formasyonu, bu bindirmenin etkisiyle genç Bazik serinin üzerine itilmiştir. Diğer bir sürüklenme hattı çalışma alanı GD ucunda yer alır. KD-GB uzanımlı bu hat boyunca Çağlayan formasyonu Palaktepe volkaniti üzerinde yer alır.

İnceleme alanında ikinci bir bindirmenin varlığında Ağıllar köyü civarında saptanmıştır. Burada, Ağıllar formasyonu ve Çağlayan formasyonu daha genç olan hornblend andezitler üzerine itilmiştir. Her iki bindirme KD-GB doğrultusunda olup, kilometrelerce devam eder. İnceleme alanında bindirmelerden başka birçok gravite fayları gözlenmiştir. Bunların en büyüğü K-G doğrultulu olup, 5 kilometre devam eden Salucor Mahallesi'ndeki faydır. Ayrıca Dikmenli yöresinde izlenmektedir.

## 2.5. Hidrojeoloji

İnceleme alanında bulunan bazaltlar tektonik hareketler nedeniyle bol kırıklı ve çatlaklı yapı özelliği kazanmışlardır. Bazaltlar beslenme şartlarına bağlı olarak kırık ve çatlakları vasıtasıyla su taşıyıp iletirler.

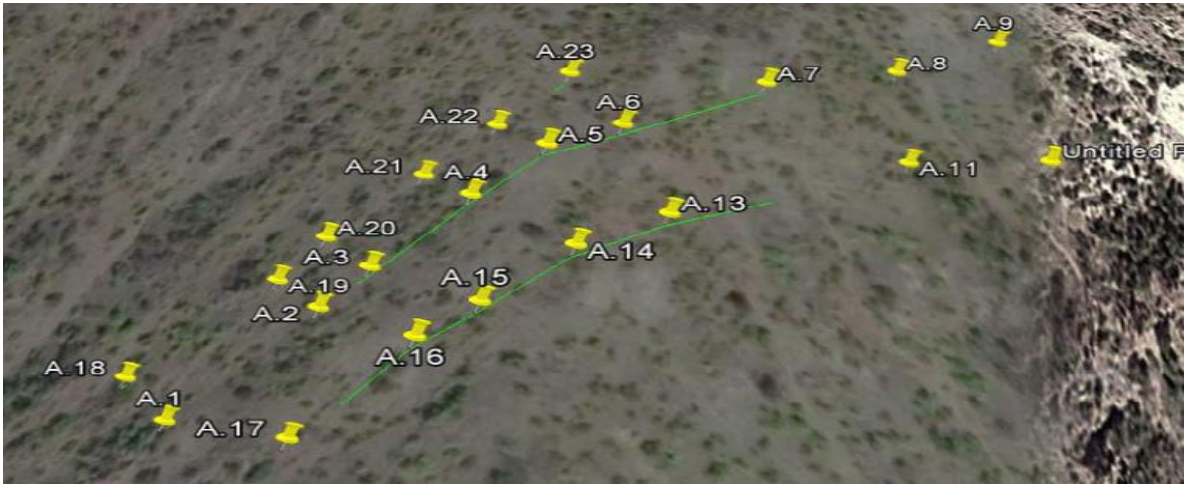
Etüt sahasında, bazı bölgelerde ki bazaltlar çok miktarda kırılmalara bağlı olarak parçalanmışlardır. Bu nedenle kışın yağın karların erimesi sonucu oluşan sular tünel boyunca boşalmalara neden olmaktadır. Tünelde 2 – 2,5 l/s miktarında su boşalmaları gözlenmektedir.

## 2.6. Jeofizik Rezistivite Ölçüleri ve Değerlendirmeler

### 2.6.1. Göçük Bölgesinde Yapılan Rezistivite Deneyine Göre Belirlenen Zemin

#### Durumu

Tünelin 45+050-44+900 kilometre aralığında meydana gelen göçük nedeniyle göçük bölgesi ve civarındaki kayaların fiziksel yapısının belirlenmesi amacıyla Jeofizik Rezistivite Etüdü yapılarak zemin durumları gözlemlenmiştir.



Şekil 38. Rezistivite Ölçüm Noktaları Google Earth Görüntüsü

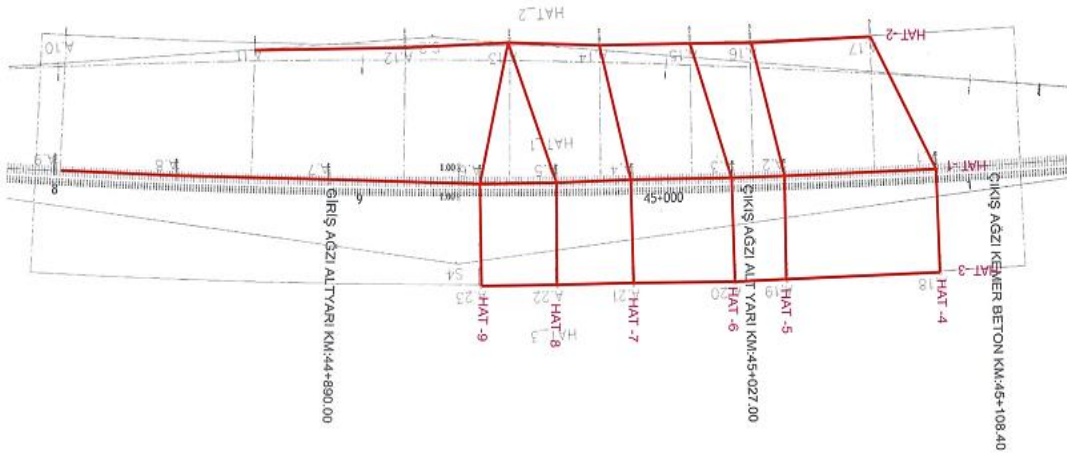


Şekil 39. İnceleme Yapılacak Bölgenin Google Earth Görüntüsü

Ölçüm yapılan alanın topoğrafik şartları göz önüne alınarak inceleme yapılan alanda, yayılımı bulunan kayaçların devamlılığı, kalınlığı ve yapısal özelliğini tespit etmek amacıyla 3 hat boyunca 25 m ve 50 m aralıklar ile 300 m derinliğe inilecek şekilde 21 noktada jeofizik rezistivite düşey elektrik sondaj ölçümleri yapılmıştır.

### 2.6.2. Kullanılan Alet ve Uygulanan Metot

Arazi ölçüleri derin rezistivite aleti ile alınmış olup akım kaynağı olarak 12 voltluk akü ve elektrot olarak da paslanmaz çelik çubuklar kullanılmıştır. Ölçüler, Schlumberger ölçü sistemine göre 3 hat boyunca 25 ve 50 m aralıklar ile 300 m derinliğe inilecek şekilde açılımlar yapılarak 21 noktada Düşey Elektrik Sondaj ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 40. Tünel Ekseni Rezistivite Ölçüm Planı

### 2.6.3. Ölçüler ve Değerlendirmeler

Etüt sahasında alınan elektrikli sondaj ölçü değerleri hesaplanarak çift logaritmik kağıtlara zahiri rezistivite (ohm metre) ve açılım uzaklığının (metre) fonksiyonu olarak çizilmiştir. Elde edilen eğriler ayrı ayrı iki tabaka abakları yardımıyla değerlendirilerek yer altındaki tabakaların rezistiviteleri bulunmuştur. Ölçülen rezistivite değerlerine ait şekil ve tablolar ekte görülmektedir. Elde edilen rezistivite değerleri ve ölçülerin eğri karakterleri ile jeolojik veriler değerlendirilerek tabakaların litolojik cinsleri saptanmıştır.

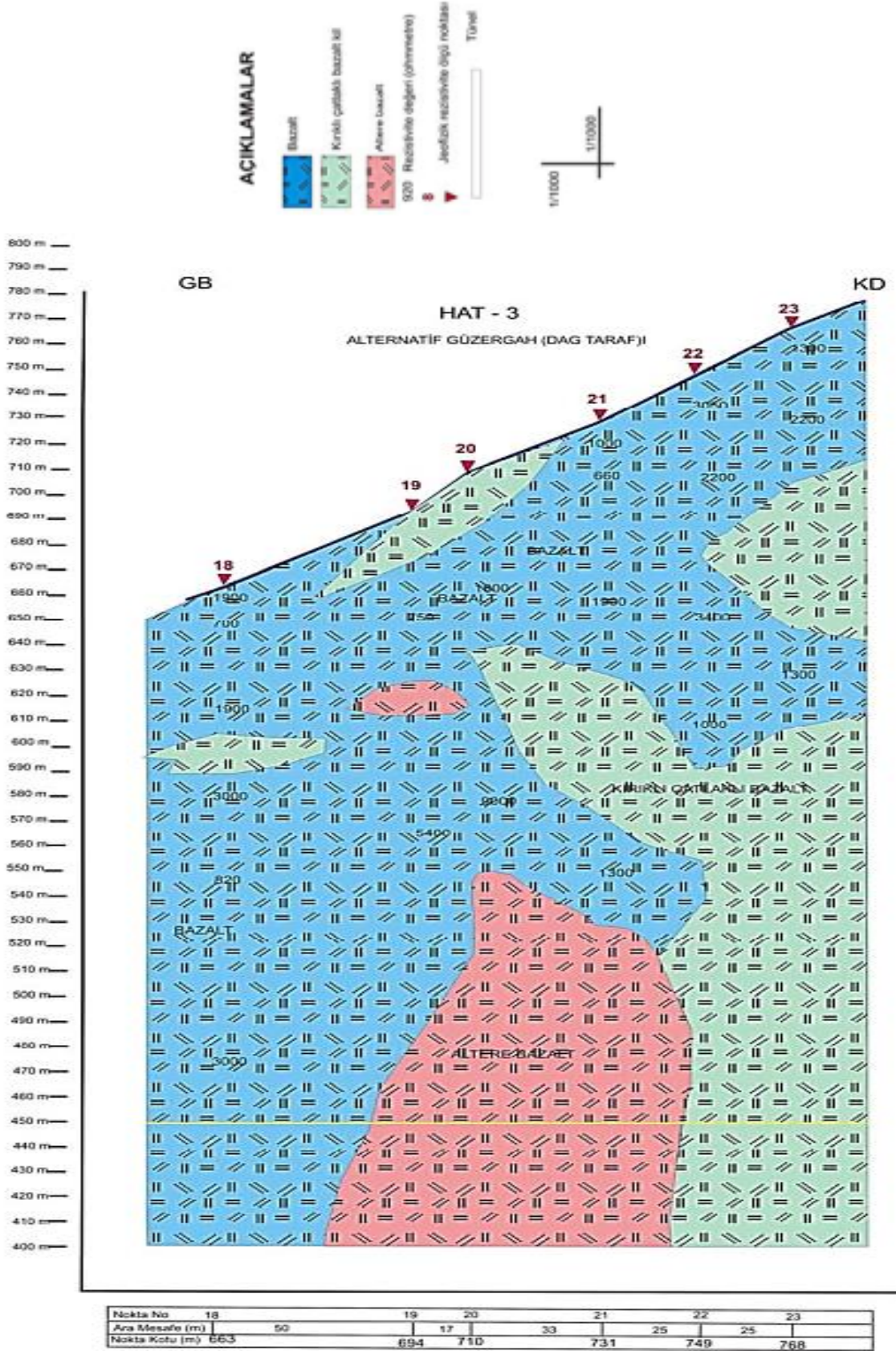
## 2.7. Kesitler

Oruflu tüneli sahasında 21 noktada alınan Düşey Elektrikli Sondaj ölçülerinde belirlenen kayaçların eğri karakterleri ve rezistivite değerleri ile jeolojik veriler ile değerlendirilerek kayaçların yapısal özelliği, yayılım, kalınlığı ve litolojik cinsleri belirlenmiştir.

Oruflu tüneli sahasında, Kuzeydoğu - Güneybatı doğrultusunda 3 adet ve Kuzeybatı – Güneydoğu 6 adet olmak üzere toplam 9 adet kesit çıkarılmıştır.

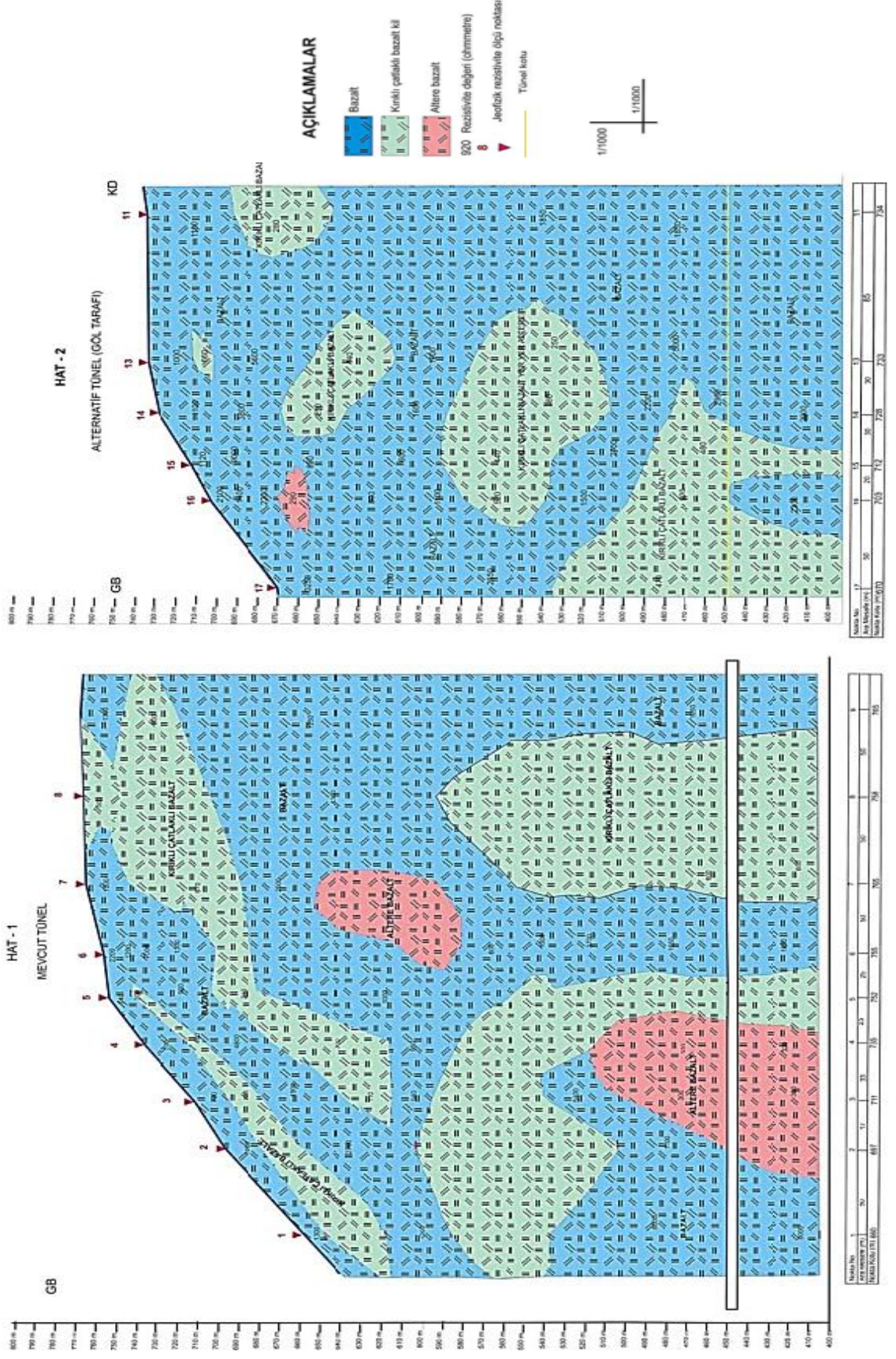






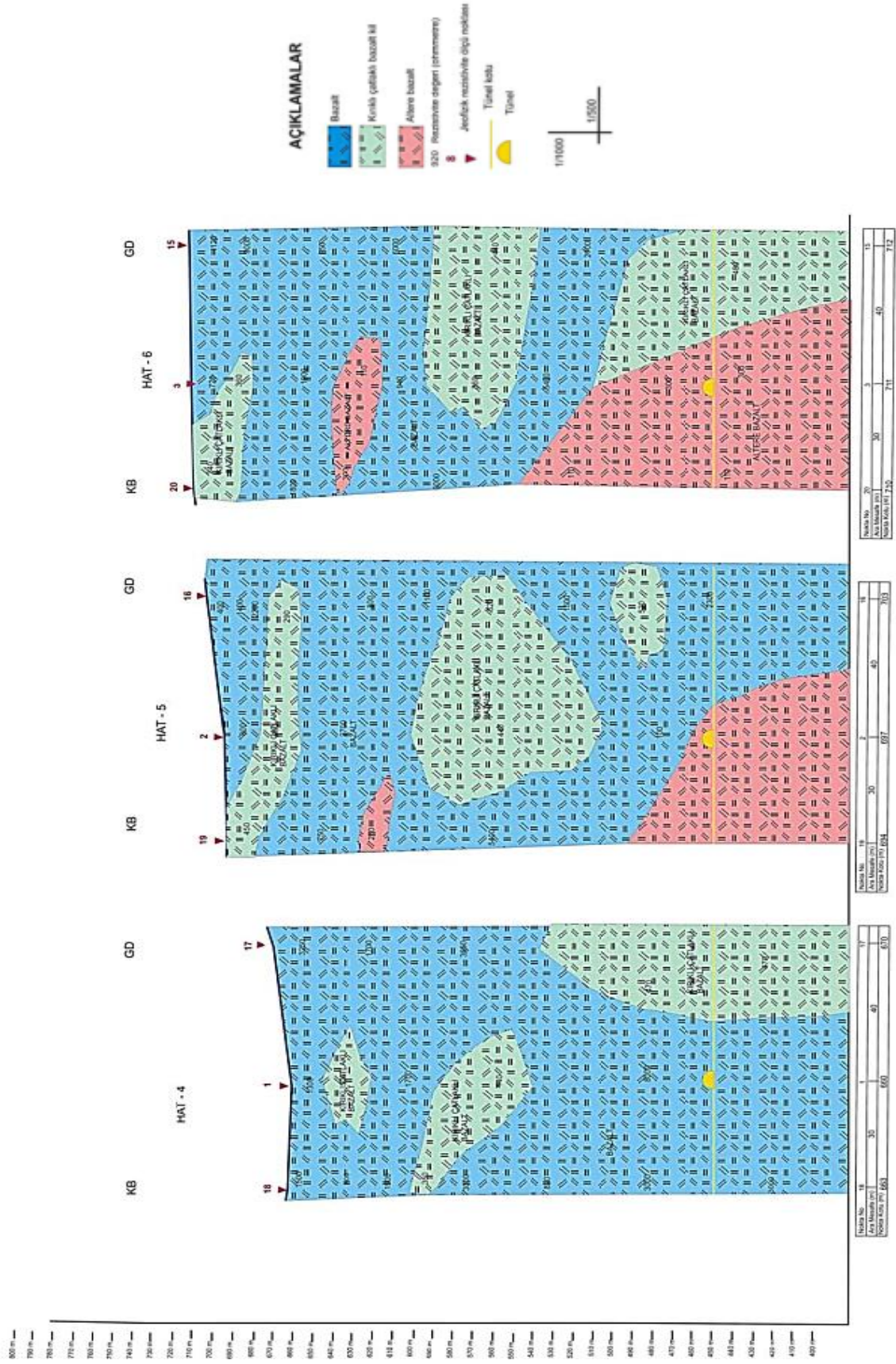
Şekil 41. Oruçlu Tüneli Rezistivite Kesitleri-1





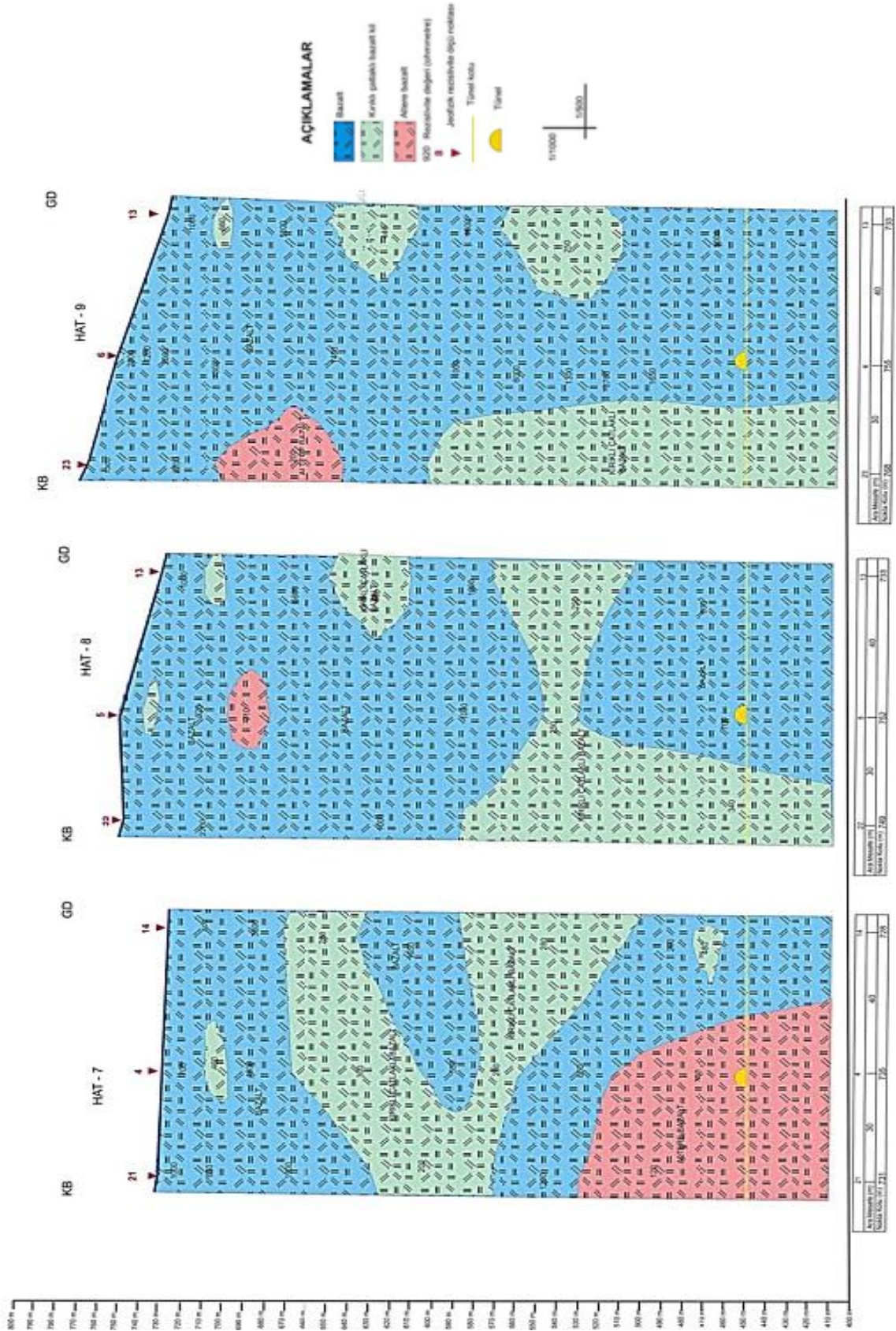
Şekil 42. Oruçlu Tüneli Rezistivite Kesitleri-2





Şekil 43. Oruçlu Tüneli Rezistivite Kesitleri-3





Şekil 44. Oruçlu Tüneli Rezistivite Kesitleri

### **2.7.1. Kuzeydoğu-Güneybatı Doğrultulu Kesitler (Tünel Ekseni Üstü ve 30-40 m Paralelindeki Hatlar)**

HAT-1 kesiti (Tünel Ekseni Üstü)

Kuzeydoğu - Güneybatı doğrultusunda alınan bu kesit, tünel ekseninin üstünde alınan A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8 ve A9 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesit 45+090.00 dan başlayıp 44+800.00 bitmektedir. Belirlenen noktalarda alınan DES ölçülerinden hazırlanan kesitteki yapılan değerlendirmede;

A1. Noktasında, 10-40 m, 70-120 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Bunun dışındaki metrajlarda ölçüm derinliği olan 300 m' ye kadar tamamen kompakt bazaltlar yer almaktadır.

A2. Noktasında, 15 - 40 m, 90 - 190 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. 190 - 240 m'ler arasında bazalt ve 240 m'nin altında 300 m' ye kadar ve tünel kotunu da geçen altere bazalt yer almaktadır.

A3. Noktasında, 15 - 30 m, 70 - 95 m ve 115 - 160 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. 160 - 200 m'ler arasında kompakt bazalt ve 200 m' nin altında ise 300 m' ye kadar ve tünel kotunu da geçen altere bazalt yer almaktadır.

A4. noktasında, 20 - 30 m, 60 - 120 m ve 150 - 170 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. 170 - 215 m'ler arasında bazalt ve 215 m'nin altında ise 300 m' ye kadar ve tünel kotunu da geçen altere bazaltlar yer almaktadır.

A5. noktasında, 10 - 20 m, 50 - 70 m ve 195 - 215 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Diğer metrajlar ve tünel kotunu da geçen seviyeler de bazalt yer almaktadır.

A6. noktasında, bu lokasyonda genellikle kompakt yer almaktadır.

A7. noktasında, 20 - 75 m, 110 - 210 m' ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. 210 - 300 m' ler arasında diğer metrajlar ve tünel kotunu da geçen seviyeler de az kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır.

A8. noktasında, 17 - 170 m'ler arasında kompakt bazalt ve 170 - 300 m'ler arasında tünel kotunu da geçen seviyeler de az kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır.

A 9. noktasında, 20 - 50 m' ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Diğer metrajlar ve tünel kotunu da geçen seviyelerde de kompakt bazalt yer almaktadır.

### HAT-2 kesiti Alternatif Tünel Ekseni (Göl Tarafı)

Kuzeydoğu - Güneybatı doğrultusunda alınan bu kesit, tünel ekseninin 40 m güneydoğusunda bulunan alternatif eksen üzerinde alınan A17, A16, A15, A14, A13 ve A 11 nolu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesit 45+070.00 dan başlayıp 44+865.00 sonuçlanmaktadır. Belirlenen noktalar alınan DES ölçülerinden hazırlanan kesitteki yapılan değerlendirmede;

A17. noktasında, 120 m'ye kadar bazalt, 120 m' nin altında 300 m'ye kadar kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır.

A16. noktasında, 30 – 45 m, 120 – 160 m ve 200 – 250 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Bunun dışındaki metrajlarda ölçüm derinliği olan 300 m' ye kadar tamamen kompakt bazaltlar yer almaktadır.

A15. noktasında, 120 – 170 ve 220 – 300 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Bunun dışındaki metrajlarda tamamen kompakt bazaltlar yer almaktadır.

A14. noktasında, 55 – 85 ve 140 – 215 m ve 250 – 265 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Bunun dışındaki metrajlarda ölçüm derinliği olan 300 m' ye kadar tamamen kompakt bazaltlar yer almaktadır.

A13. noktasında, 20 – 30 m, 80 – 120 m, 160 – 220 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Bunun dışındaki metrajlarda ölçüm derinliği olan 300 m' ye kadar tamamen kompakt bazaltlar yer almaktadır.

A11. noktasında, 40 – 90 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Bunun dışındaki metrajlarda ölçüm derinliği olan 300 m'ye kadar tamamen kompakt bazaltlar yer almaktadır.

### HAT-3 Kesiti Alternatif Tünel Ekseni (Dağ Tarafı)

Kuzeydoğu - Güneybatı doğrultusunda alınan bu kesit, tünel ekseninin 30 m kuzeybatısındaki eksen üzerinde alınan A18, A19, A20, A21, A22 ve A23 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesit 45+090.00'dan başlayıp 44+940.00 bitmektedir. Belirlenen noktalar alınan DES ölçülerinden hazırlanan kesitteki yapılan değerlendirmede;

A18. noktasında, 60 – 75 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Bunun dışındaki metrajlarda ölçüm derinliği olan 300 m'ye kadar tamamen kompakt bazaltlar yer almaktadır.

A19. noktasında, 0 – 17, 65 – 80 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır.

210 m'nin altında tünel kotunu da geçecek şekilde altere bazalt yer almaktadır.

A20. noktasında, 0 – 20, 70 – 75 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. 70 – 160 m'ler arasında kompakt bazalt yer almaktadır. 160 m'nin altında tünel kotunu da geçecek şekilde altere bazalt yer almaktadır.

A21. noktasında, 0 – 100 m'ler arasında bazalt yer almaktadır. 100 – 160 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. 160 – 200 m'ler arasında kompakt bazalt yer almaktadır. 200 m'nin altında tünel kotunu da geçecek şekilde altere bazalt yer almaktadır.

A22. noktasında, 0 – 60 m'ler arasında bazalt yer almaktadır. 60 – 120 ve 150 – 220 m' ler arasında altere bazalt ve 220 m'nin altında ise tünel kotunu da geçecek şekilde kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır.

A23. noktasında, 0 – 60 m'ler arasında bazalt yer almaktadır. 60 – 110 ve 150 – 300 m' ler arasında ise tünel kotunu da geçecek şekilde kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır.

### **2.7.2. Kuzeybatı-Güneydoğu Doğrultulu En Kesitler**

#### **HAT-4 Kesiti**

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A18, A1 ve A17 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

A18 no.lu ölçüde 60 – 75, A1 no.lu ölçüde 70 – 120 ve A17 no.lu ölçüde ise 130 m'den tünel kotunu da geçecek şekilde kırıklı çatlaklı bazaltlar yer almaktadır.

#### **HAT-5 Kesiti**

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A19, A2 ve A16 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

A19 no.lu ölçüde 120 m, A2 no.lu ölçüde 140 m'nin altında tünel kotunu da geçecek şekilde altere bazaltlar yer almaktadır. 30 – 45 m, 120 – 160 ve 200 – 240 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazalt bulunmaktadır. 240 m'nin altında ise kompakt bazalt bulunmaktadır.

#### **HAT-6 Kesiti**

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A20, A3 ve A15 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

A20 no.lu ölçüde 160 m, A3 no.lu ölçüde 200 m'nin altında tünel kotunu da geçecek

şekilde altere bazaltlar yer almaktadır. A15 no.lu ölçü yerinde de 120 – 170 ve 220 – 300 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazaltlar yer almaktadır.

#### HAT-7 Kesiti

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A21, A4 ve A 14 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

A21 no.lu ölçüde 200 m, A4 no.lu ölçüde 215 m'nin altında tünel kotunu da geçecek şekilde altere bazaltlar yer almaktadır. A14 no.lu ölçü yerinde de 140 m'nin altında 55 – 85 ve 140 – 215 m'ler arasında kırıklı çatlaklı bazaltlar ve 215 m'nin altında 300 m'ye kadar kompakt bazalt yer almaktadır.

#### HAT-8 Kesiti

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A22, A5 ve A13 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir. Bu hatta bazalt ve kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır.

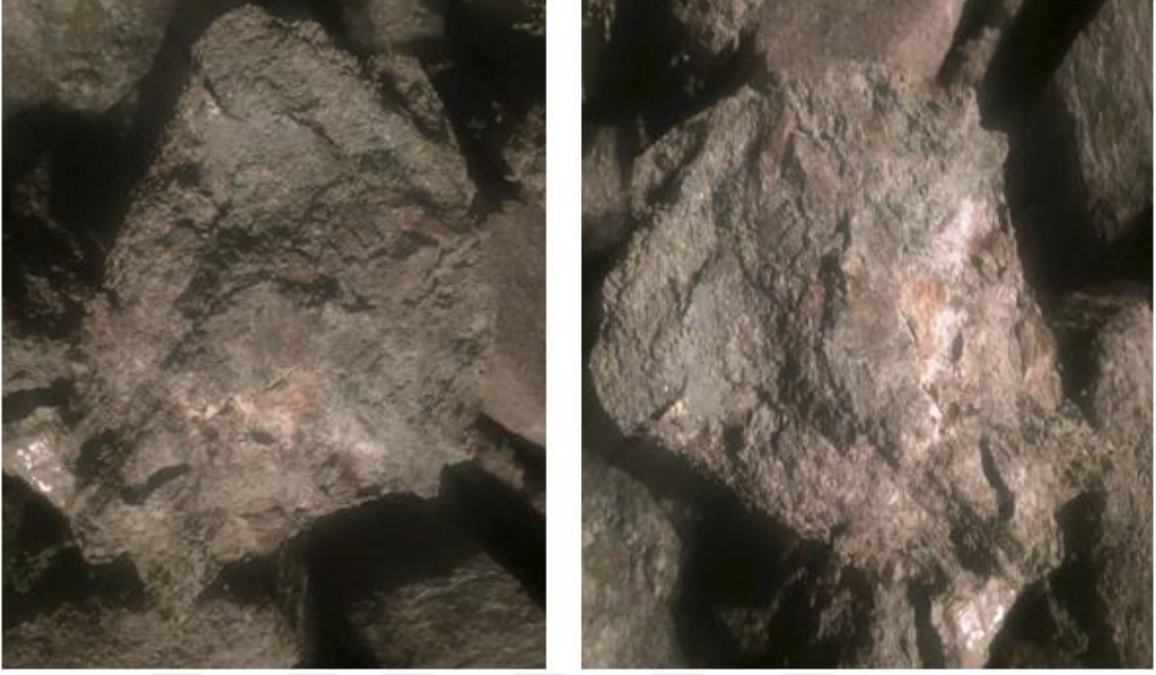
#### HAT-9 Kesiti

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A23, A6 ve A13 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir. Bu hatta bazalt ve kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır.

### **2.7.3. Rezistivite Deneyi Verilerinin Değerlendirilmesi**

Artvin-Erzurum Yolu üzerinde inşa edilen Oruçlu tünelinin 45+037,3 – 45+023,0 arasında göçük meydana gelmesi nedeniyle, göçük bölgesi ve civarındaki kayaçların fiziksel yapısının belirlenmesi amacıyla tünel giriş ağzından 44+800 ile 45+090 m'ler arasındaki alanda Jeofizik Rezistivite Etüdü yapılmıştır.

Sahada yapılan incelemeler sonucunda belirlenen yerlerde, yayılımı bulunan kayaçların devamlılığı, kalınlığı ve yapısal özelliğini tespit etmek amacıyla, 3 hat boyunca 25 ve 50 m aralıklarla tünel kotunu da kat eden 300 m derinliğe inilecek şekilde açılımlar yapılarak 21 noktada Düşey Elektrik Sondaj ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 45. Oruçlu Tüneli Göçük Malzemesi Fotoğrafi

Etüt sahasında, temelde Paleozoyik yaşlı Artvin granitoyidi ile üstünde Liyas yaşlı ve genelde mor, yeşilimsi gri renkli bazaltik-andezitik-dasitik lav ve piroklastikleri ile kumtaşı, marn, ammonitiko-rosso fasiyesinde çökelen kırmızı kireçtaşı ve şeylden oluşan Hamurkesen formasyonu yayılım göstermektedir. Vadi yamaçlarında yamaç molozu yer almaktadır.

İnceleme alanında bulunan bazaltlar tektonik hareketler nedeniyle bol kırıklı ve çatlaklı yapı özelliği kazanmışlardır. Ayrıca Oruçlu köyü güneyinde, Zeytinlik bucağı kuzeydoğunda Kalburlu köyü civarında mostra veren Artvin granitoyidi tünel hattına yakın intrüzyon yapmıştır. Isı ve basınç etkisiyle fay zonu boyunca ilerlemesi Hamurkesen formasyonunun bazı bölümlerinde ayrışma meydana getirmiş olabilir.



Etüt sahasında, bazaltlar beslenme şartlarına bağlı olarak kırık ve çatlakları vasıtasıyla su taşıyıp iletme özelliğindedir. Hamurkesen formasyonunun bazı bölümlerindeki bazaltlar kırılmalara bağlı olarak parçalanmışlardır. Bu nedenle kışın yağın karların erimesi sonucu oluşan sular tünel içerisinde boşalmalara neden olmaktadır. Tünelde 2 – 2,5 l/s miktarında su boşalımları gözlenmektedir.

Düşey Elektrikli Sondaj ölçülerinin eğri karakterleri ve kayaçların rezistivite değerleri ile jeolojik veriler ve sondaj verileri ile karşılaştırılarak litolojik cinsleri belirlenen kayaçların yayılımı, kalınlığı ve derinliği bulunmuştur.

Kuzeydoğu - Güneybatı doğrultusunda 3 adet ve Kuzeybatı – Güneydoğu doğrultusunda 6 adet olmak üzere toplam 9 adet kesit çıkarılmıştır.

#### **2.7.4. Kuzeydoğu-Güneybatı Doğrultulu Kesitler (Tünel Ekseni Üstü ve Paralelindeki Hatlar)**

##### **HAT-1 Kesiti (Tünel Ekseni Üstü)**

Kuzeydoğu - Güneybatı doğrultusunda alınan bu kesit, tünel ekseninin üstünde alınan A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8 ve A9 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesitin değerlendirilmesinde; tünel kotunda, 44+ 800 m'den yaklaşık olarak 44+900 m'ye kadar kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Buradaki bazaltlar kırık ve çatlakları vasıtasıyla az miktarda yeraltısuyu taşıma ve iletme özelliğindedir. 44+900 m'den yaklaşık 44+945 m'ye kadar bazalt yer almaktadır. 44+905 m den 44+970 m'ye kadar kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Buradaki bazaltlar kırık ve çatlakları vasıtasıyla bir miktar yeraltısuyu taşıma ve iletme özelliğindedir. 44+970 m'den yaklaşık 45+050 m'ye kadar altere olmuş bazalt yer almaktadır. Altere olmuş bazaltlar yeraltısuyu taşıma ve iletme özelliğindedir. 45+050 m'den 45+100 m istikametine doğru kompakt bazaltlar devam etmektedir.

##### **HAT-2 Kesiti Alternatif Tünel Ekseni (Göl Tarafı)**

Kuzeydoğu - Güneybatı doğrultusunda alınan bu kesit, tünel ekseninin 40 m güneydoğusunda bulunan alternatif eksen üzerinde alınan A17, A16, A15, A14, A13 ve A 11 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesitin değerlendirilmesinde; tünel kotunda, 44+ 865 m'den yaklaşık olarak

44+990 m'ye kadar kompak bazalt yer almaktadır. 44+990 m'den yaklaşık 45+020 m'ye kadar kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Buradaki bazaltlar kırık ve çatlakları vasıtasıyla bir miktar yeraltı suyu taşıma ve iletme özelliğindedir. 45+020 m'den 45+050 m'ye kadar kompak bazalt yer almaktadır. 45+050 m'den 45+100 m istikametine doğru kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. Buradaki bazaltlar kırık ve çatlakları vasıtasıyla bir miktar yeraltı suyu taşıma ve iletme özelliğindedir.

#### HAT-3 Kesiti Alternatif Tünel Ekseni (Dağ Tarafı)

Kuzeydoğu - Güneybatı doğrultusunda alınan bu kesit, tünel ekseninin 30 m kuzeybatısındaki eksen üzerinde alınan A18, A19, A20, A21, A22 ve A23 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesitin değerlendirilmesinde; tünel kotunda, 44+ 940 m'den yaklaşık olarak 44+975 m'ye kadar kırıklı çatlaklı bazalt yer almaktadır. 44+975 m'den yaklaşık 45+060 m'ye kadar altere bazalt yer almaktadır. 45+060 m'den 45+100 m'ye kadar kompak bazalt yer almaktadır.

### 2.7.5. Kuzeybatı-Güneydoğu Doğrultulu En Kesitler

#### HAT-4 Kesiti

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A18, A1 ve A17 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesitin değerlendirilmesinde; tünel kotunda ve sadece A 17 no.lu ölçü noktasında kırıklı çatlaklı bazaltlar bulunmaktadır.

#### HAT-5 Kesiti

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A19, A2 ve A16 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesitin değerlendirilmesinde; tünel kotunda, A 19 no.lu ölçü noktasından A 16 no.lu ölçü noktasına doğru yaklaşık 50 m altere bazalt yer almaktadır.

#### HAT-6 Kesiti

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu

kesit, A20, A3 ve A15 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesitin değerlendirilmesinde; tünel kotunda, A 20 no.lu ölçü noktasından A 15 no.lu ölçü noktasına doğru yaklaşık 50 m altere bazalt yer almaktadır.

#### HAT-7 Kesiti

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A21, A4 ve A 14 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesitin değerlendirilmesinde; tünel kotunda, A 21 no.lu ölçü noktasından A 14 no.lu ölçü noktasına doğru yaklaşık 50 m altere bazalt yer almaktadır.

#### HAT-8 Kesiti

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A22, A5 ve A13 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

Bu kesitin değerlendirilmesinde; tünel kotunda, A 22 no.lu ölçü noktasından tünel eksine doğru yaklaşık 15 m kırıklı çatlaklı bazalt bulunmaktadır. Bu yerden A 13 no.lu ölçü noktasına kadar bazalt bulunmaktadır.

#### HAT-9 Kesiti

Tünel eksenine dik olacak şekilde Kuzeybatı - Güneydoğu doğrultusunda alınan bu kesit, A23, A6 ve A13 no.lu ölçü noktalarından geçmektedir.

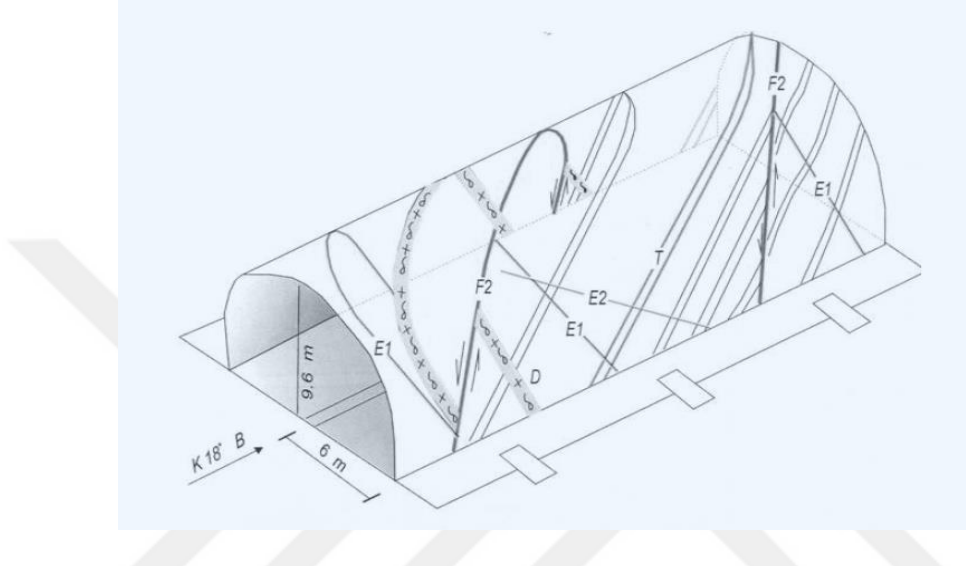
Bu kesitin değerlendirilmesinde; tünel kotunda, A 23 no.lu ölçü noktasından tünel eksine doğru yaklaşık 15 m kırıklı çatlaklı bazalt bulunmaktadır. Bu yerden A 13 no.lu ölçü noktasına kadar bazalt bulunmaktadır.

## **2.8. Tünel Kazısı Sırasında Elde Edilen Ayna Haritalarına Göre Belirlenen**

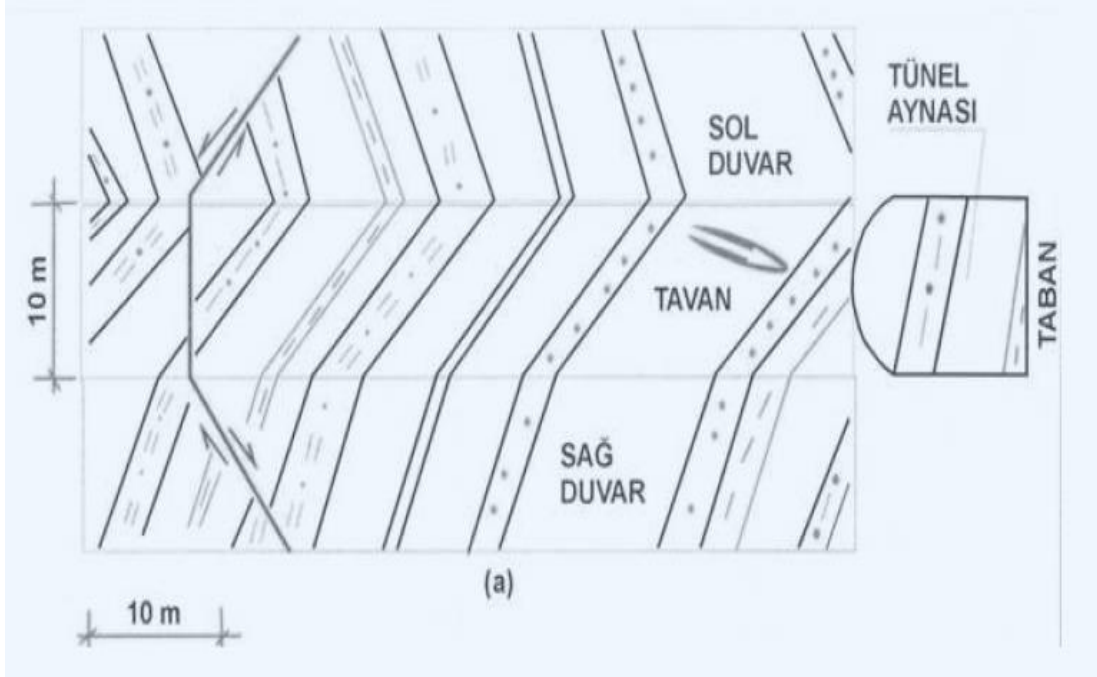
### **Zemin Durumu**

Tünel yapımı aşamasında yapılacak jeolojik-geoteknik çalışmalar, proje aşamasında öngörülen kaya koşullarının, jeolojik yapının, yeraltı suyu durumunun denetlenmesi ve ön görülen farklı jeolojik koşullarla karşılaşılması halinde kaya sınıfının ve destek sisteminin, yeni koşullara göre revize edilmesine yönelik veri toplamak amacıyla aşağıdaki formlar tutulmaktadır (Karayolları Teknik Şartnamesi 2013).

Bu formlar düzenlenirken, kaya kütlesi bozuşması, tektonik gerilme (kesme, fay ve kıvrım oluşumu) etkilerine göre değişik kalitelere göre kaya kütle koşulları kaya sınıflama sistemi RMR ve Q'ye göre değerlendirilmektedir. Ayrıca zemindeki süreksizlikler, eklem takımlarının durumu, kaya mukavemeti, kaya kütlelerinin davranışı vb. durumlar incelenerek elde edilecek bilgiler bu formlara doldurularak zemin cinsi belirlenmektedir.



Şekil 46. Tünel Jeolojik Haritasının 3 Boyutlu Gösterimi



Şekil 47. Tünel Jeolojik Haritası

Tablo 32. Jeolojik Haritalama Formu

<b>JEOLJİK HARİTALAMA FORMU</b>					
<b>TÜNEL</b>	<b>YER</b>	<b>İSTASYON</b>	<b>KAZI</b>	<b>HARİTALAYAN</b>	<b>TARİH/SAAT</b>

Tablo 33. Jeolojik Haritalama Bilgi Formu

<b>JEOLJİK HARİTALAMA – BİLGİ FORMU</b>									
TÜNEL :	YER :	KAZI :	HARİTALAYAN :	TARİH/SAAT :					
		İSTASYON :							
KAYA TİPLERİ / KAYA KÜTLE TİPLERİ									
SÜREKSİZLİKLER	NO	TİP	YÖNELİM	ŞEKİL	PÜRÜZLÜLÜK	DEVAMLILIK	ARALIK	DOLGU/ NOTLAR	NOTLAR
KAYA KÜTLESİ EKLEMLERİ	EKLEMLİ GÖVDE ŞEKLİ					KAYA KÜTLE GENİŞLEMESİ Süreksizlikler Kapalı Süreksizlikler Kısmen Açık Süreksizlikler Çoğunlukla Açık			
SUDA BOZUŞMA	KAZI SIRASINDA GÖRÜLEN SU : (YER, MİKTAR, DURUM, KAYAYA ETKİSİ)					BOZUŞMA DERECEŚİ <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> HW <input type="checkbox"/> SW <input type="checkbox"/> CW <input type="checkbox"/> MW <input type="checkbox"/> RS			
KAYA KÜTLESİ DAVRANIŞI	KAZI SIRASINDA DAVRANIŞI : <input type="checkbox"/> STABİL <input type="checkbox"/> SONRA SÖKÜLEN <input type="checkbox"/> GEVREK <input type="checkbox"/> BASKILI <input type="checkbox"/> GEVŞEK					AŞIRI SÖKÜLME ŞEKLİ / YERİ :			
GENEL NOTLAR :					NUMUNE :				
					FOTOĞRAFLAR :				

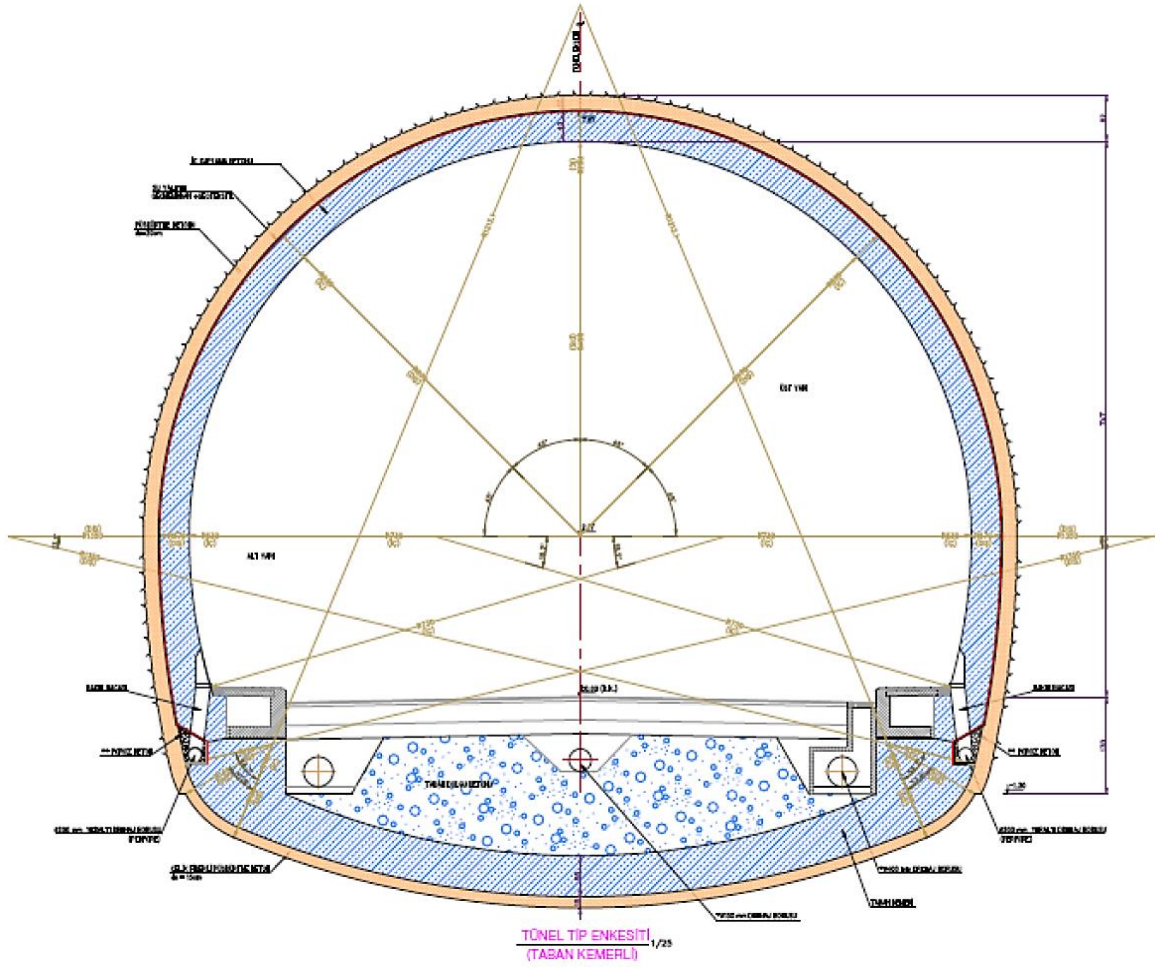
Bu doğrultuda çalışma konusu olan tünelde, kazı aşamasında belirlenen kaya sınıflaması ve mühendislik parametreleri aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Tablo 34. Kaya Sınıflamaları ve Mühendislik Parametreleri

Km Aralığı	Birim	NATM Sınıfı	$\sigma_u$ (Mpa)	GSI	$m_i$	$E_i$ (GPa)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\nu$
43+710-45+950	PzTRd	B3	96	54	27	11.7	28	0.25

## 2.9. Belirlenen Tünel Tip Kesiti

Tünelde uygulanacak tip en kesit, karayolları tünel tasarım şartnamesinde yer alan şartlara göre belirlenmiştir.



Şekil 48. Taban Kemerli Tünel Tip Kesiti



### 3. ORUÇLU TÜNELİNİN KAZI VE DESTEKLEME SİSTEMLERİNİN

#### AMPİRİK YÖNTEMLE TASARIMI

##### 3.1. İksa Sınıfları

##### 3.1.1. RMR Sistemine Göre İlk Destekleme Sistemi

Tablo 35.'de kaya kütlesi sınıflama sistemi RMR' ye göre 5-12 m genişliğindeki tünellerde önerilen ilk destekleme, tünel destek sınıfı II ve III no'lu kaya sınıfı içerisinde açılacaktır.

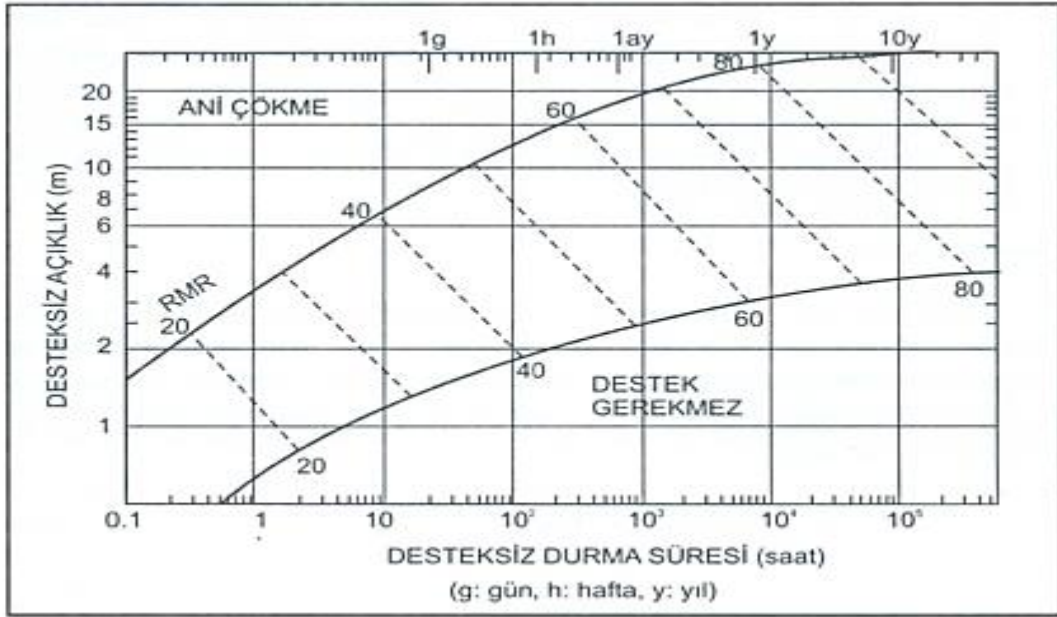
Tablo 35. Kaya Kütlesi Sınıflaması (RMR) Sistemine Göre 5-12 m Genişlikteki Tünellerde Önerilen İlk Destekleme Sistemleri

RMR Sınıflaması	Kazı	Kaya bulonu	Püskürtme beton	Çelik iksa
<b>I</b> Çok iyi kaya (RMR:100-81)	Tam kesit 3 m ilerleme	Gerektiğinde	Gerektiğinde	Yok
<b>II</b> İyi kaya (RMR:80-61)	Tam kesit 1-1,5 m ilerleme	Hasır çelik+2-2,5 m aralıklı bulonlar aynadan 20 m mesafede	Gerektiğinde 5 cm	Yok
<b>III</b> Orta kaya (RMR:60-41)	Üst yarı/alt yarı ilerleme. Üst yarı 1,5-3 m ilerleme	3-4 m uzunlukta sistematik bulonlama hasır çelik+1,5-2 m aralıklı aynaya 10 m mesafeden takip edecektir.	Tavan kemerinde 50-100 mm. Alt yarıda 30 mm	Yok
<b>IV</b> Zayıf kaya (RMR:40-21)	Üst yarı/alt yarı ilerleme. Üst yarı 1-1,5 m ilerleme	4-5 m uzunlukta sistematik bulonlama 1-1,5 m aralıklı aynaya 10 m mesafeden takip edecektir	Tavan kemerinde 100-150 mm alt yarıda 100 mm kazıdan hemen sonra	Gereken yerlere 1,5 m aralıklı hafif çekil iksa
<b>V</b> Çok zayıf kaya (RMR:20-0)	Üst yarı/alt yarı ilerleme. Üst yarı/alt yarı 0,5-1 m ilerleme.	5 m uzunlukta sistematik Bulonlama 1-1,5 m aralıklı. Aynaya 5 m mesafeden takip edecektir.	Tavan kemerinde 150-200 mm alt yarıda 150 mm aynada 50 mm kazıdan hemen sonra	Gereken yerlere 1,5 m aralıklı hafif çelik iksa

Tablo 36.'da tünel için hesaplanan temel ve nihai RMR değerleri görülmektedir. Ayrıca Bieniawski (1989)'da önermiş olduğu desteksiz durma süreleri Şekil 49. yardımıyla hesaplanmıştır.

Tablo 36. Hesaplanan RMR Değerleri ve Desteksiz Durma Süreleri

Kilometre Aralığı	RMR <sub>TEMEL</sub>	RMR <sub>NİHAİ</sub>	Desteksiz Durma Süresi
43+692-43+710	45	40	1 gün
43+710-45+950	56,5	51,5	1 gün
45+950-45+965	45	40	1 gün



Şekil 49. RMR Kaya Kütleleri Sınıflarına Göre Desteksiz Durma Süresi ve Desteksiz Tavan Açıklığı Arasındaki İlişki (Bieniawski 1989)

### 3.1.2. Q Sistemine Göre İlk Destekleme Sistemi

Yukarıda Q (NGI) sistemine göre değerler ayrı ayrı hesaplanmış ve Tablo 37.'de sunulmuştur.

Tablo 37. Kilometre Aralıklarına Göre Hesaplanan Q Değerleri

Kilometre Aralığı	RMR	Q değeri (RMR=9lnQ+44)	Q değeri (Hesaplanan)
43+692-43+710	40	0,641	0,3677
43+710-45+950	51,5	2,301	2,0533
45+950-45+965	40	0,641	0,3677

Destek sisteminin belirlenmesi için kazı destek oranı (ESR) ve eşdeğer boyut (De) değerleri,

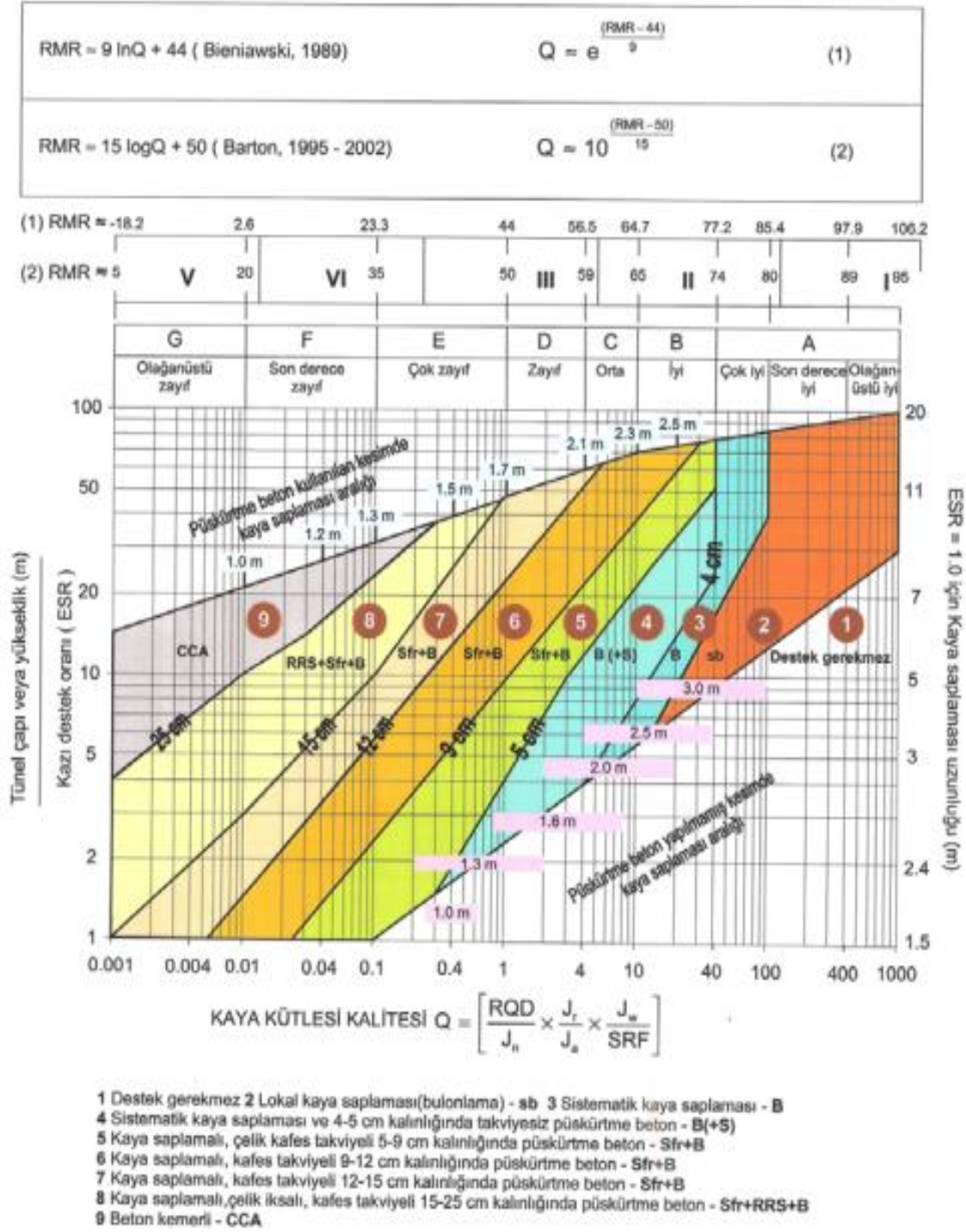
$$\text{Eşdeğer boyut (De)} = \frac{\text{Kazı eni, çapı veya yüksekliği (m)}}{\text{Kazı destek Oranı-ESR}} \quad (25)$$

eşitliğinden faydalanılarak hesaplanır.

Tablo 38. Kazı Destek Oranları (ESR)

<b>KAZI DESTEK ORANLARI FAKTÖRÜ (ESR)</b>		<b>ESR</b>
<b>Kazı tipi</b>		
A.	Geçici maden kazıları	3-5
B.	Sürekli maden kazıları, hidrolik enerji amaçlı su tünelleri (yüksek basınçlı cebri borular hariç), büyük kazılar için pilot tüneller, yarmalar ve aynalar vb.	1.6
C.	Depolar, su tasfiye tesisleri, küçük yol ve demiryolu tünelleri, denge bacaları, yaklaşım tünelleri vb.	1.3
D.	Santral binaları, büyük yol ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları	1
E.	Yeraltı nükleer santralleri, fabrikaları spor ve kamu tesisleri	0.8

Kazı destek oranı (ESR) Tablo 38.'da karayolları tünelleri için 1 olarak verilmektedir. Bu durumda tünel çapının 12 m alınması ile eşdeğer boyut 12 olmaktadır. Şekil 50.'da bu değerler yerine konulduğunda;



Şekil 50. Q Kaya kütlesi Sınıflandırma Sistemi Destekleme Türleri (Grimstad ve Barton

1993, Barton 1995 ve 2002)

Tablo 39.'daki değerler ve destekleme sınıfları belli olmaktadır.

Tablo 39. Q Sistemine Göre Destek Sınıfları

Q değeri (Hesaplanan)	Destek Sınıfı	Açıklama
0,3677	6	Kaya saplamalı, kafes takviyeli 9-12 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B)
2,0533	5	Kaya saplamalı, elik kafes takviyeli 5-9 cm kalınlığında püskürtme beton (Sfr+B)

### 3.1.3. NATM' a Göre İksa Sınıfı

NATM ilk olarak 1975 yılında standardı çıkan Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu yıllar içerisinde revizyona uğrayarak son halini konvansiyonel tüneller için 2001 yılında almıştır. 2000'li yıllardan sonra ise tünel kazı sistemlerinin mekanik ve/veya delme-patlatma yönteminden ziyade özellikle uzun tünellerde tünel açma makinalarının (TBM) tercih edilmesi sebebiyle Avusturya Standartları Enstitüsü (Österreichisches Normungsinstitut) TBM tünelleri için NATM yöntemini geliştirmiş ve ilk olarak 2004 yılında yayınlanmış fakat bu yöntem 2005 yılında revizyona uğramıştır. Aşağıdaki tablolarda her iki yöntemin tarihçesi sıralanmıştır.

Tablo 40. Konvansiyonel Tüneller İçin NATM şartnameleri

No	Adı
ÖNORM B 2203-1:2001 12 01	Yeraltı işleri-İş sözleşmesi-Bölüm 1: Döngüsel Sürüş (Geleneksel tünel açma)
ÖNORM B 2203-1:2001 06 01	Yeraltı işleri-Döngüsel sürüş-İş sözleşmesi
ÖNORM B 2203-1:2000 08 01	Yeraltı işleri-İş sözleşmesi
ÖNORM B 2203-1:1994 10 01	Yeraltı işleri-İş sözleşmesi
ÖNORM B 2203-1:1994 03 01	Yeraltı işleri-İş sözleşmesi
ÖNORM B 2203-1:1983 07 01	Yeraltı işleri; malzeme ve işçilik sözleşmeleri
ÖNORM B 2203-1:1978 07 01	Yeraltı işleri; malzeme ve işçilik sözleşmeleri için rehber
ÖNORM B 2203-1:1975 02 01	Yeraltı yapıları; malzeme ve işçilik için genel ilkeler ve sözleşme koşulları

Tablo 41. TBM İle Açılacak Tüneller İçin NATM Şartnameleri

No	Adı
ÖNORM B 2203-2:2005 01 01	Yeraltı işleri-İş sözleşmeleri-Bölüm 2: Devamlı Sürüş (TBM ile tünel açma)
ÖNORM B 2203-2:2004 06 01	Yeraltı işleri-İş sözleşmeleri-Bölüm 2: Devamlı Sürüş

### 3.1.3.1. İksa Sınıfı B2

Kaya Kütlelerinin Davranışı: “Çok gevrek” kaya kütleleri olarak adlandırılır. Tünel desteklemesinin zamanında yapılması halinde yer değiştirmeler hızla azalır. Zamanında destekleme yapılmaması veya destekleme elemanlarının yetersiz olması halinde derinlere ulaşan gevşemeler ve buna bağlı olarak kopmalar meydana gelir.

Su Etkisi: Bozuşmuş veya ayrılmış kaya kütleleri içerisinde fazla su akışının kaya kütlelerinin mukavemeti üzerinde etkisi bulunmaktadır.

Kazı: Kazı tünel kesitine bağlı olarak bölünür. İlerleme adımı uzunluğu, desteksiz durma süresi ve desteksiz açıklığına bağlı olarak belirlenir. İlerleme adımı üst yarı kazısında 1,5 – 2,0 m alt yarıda ise 3,0 – 3,5 m’den fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlatma ile yapılır.

Destekleme ve Zamanlaması: Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik destekleme gereklidir. Gerekliğinde tavanda süren kullanılacaktır. Süren için delme ve benzeri işlemlerin aynadaki veya tavadaki kaya kütleleri üzerindeki olumsuz etkileri önlenecektir. Püskürtme beton ve hasır çelik yerine fiber katkılı püskürtme beton düşünülebilir.

Tablo 42. B2 Klası Kazı, Püskürtme Beton ve İksa Uygulamaları

İlerleme			Püskürtme beton		İksa	
Üst yarı atım boyu (m)	Alt yarı atım boyu (m)	Invert (m)	Püskürtme beton (mm)	Püskürtme beton cinsi	Çelik kuşak	Hasır çelik (Q221/211)
1,5-2	3-3,5	-	200	C20/25	I-120	Üst Yarı/Alt Yarı

Tablo 43. B2 Klası Süren ve Bulon Uygulamaları

Süren			Bulon (PG)			
Cinsi	Boy (m)	Aralık (cm)	Boy (L) (m)	Adet	Round boyu x Bulon Aralığı (m)	P <sub>ULT</sub> (KN)
Ø1 ½” enjeksiyonlu borular	4 m/Min 1 atım boyu bindirmeli (gereken yerlerde)	C/C30 cm Üst yarı alın bölgesinde	6	19	1,75x1,75	250

### 3.1.3.2. İksa Sınıfı B3

**Kaya Kütlelerinin Davranışı:** Temel kaya kütleleri olarak adlandırılır. Bölünmüş kazıda bile kaya kütlelerinde dökümler meydana gelir. Kohezyonun az olması ve az çimentolaşma kazının duraylılığında yetersizliğe neden olur.

**Su Etkisi:** Bozuşmuş veya ayrılmış kaya kütleleri içerisinde fazla su akışının kaya kütlelerinin dayanımı üzerinde etkisi bulunmaktadır.

**Kazı:** Bölünmüş kazı ile ilerleyebilmek için kaya kütlelerini iyileştirici, desteksiz durma süresini artırıcı önlemler alınmalıdır. İlerleme adımı uzunluğu üst yarı kazısında 1.25 – 1.50 m, alt yarıda ise 3 m’den fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlatma ile yapılır, titreşime hassas kaya kütlelerinde mekanik kazı metotları kullanılacaktır. Taban kazısı ve bir taban beton kemeri yapılması gerekli olabilir.

**Destekleme ve Zamanlaması:** Tünel tavanı ve yan duvarlarda, aynada ve aynanın ilerletilmesinden önce monte edilecek sistematik destekleme gerekmektedir. Süren kullanımı yerel olarak gerekebilir. Sistematik çelik iksa kullanılacaktır. Jeolojik şartlara göre, üst yarı aynasından 100 -150 m’den daha geride olmamak üzere, yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerekebilir. Püskürtme beton ve hasır çelik yerine fiber katkıli püskürtme beton düşünülebilir.

Tablo 44. B3 Klası Kazı, Püskürtme Beton ve İksa Uygulamaları

İlerleme			Püskürtme beton		İksa	
Üst yarı atım boyu (m)	Alt yarı atım boyu (m)	Invert (m)	Püskürtme beton (mm)	Püskürtme beton cinsi	Çelik kuşak	Hasır çelik (Q221/211)
1,25-1,75	~3,50	Gereken yerde 6-12 m	200	C20/25	I-160	Üst Yarı/Alt Yarı

Tablo 45. B3 Klası Süren ve Bulon Uygulamaları

Süren			Bulon (PG)			
Cinsi	Boy (m)	Aralık (cm)	Boy (L) (m)	Adet	Round boyu x Bulon Aralığı (m)	P <sub>ULT</sub> (KN)
Ø1 ½" enjeksiyonlu borular	4 m/Min 1 atım boyu bindirmeli	C/C30 cm Üst yarı alın bölgesinde	6	19	1,25x1,25	250

### 3.2. Kaya Kütle Sınıflaması ve Geoteknik Parametrelerin Belirlenmesi

Tünel geoteknik parametreleri ve kaya kütesinin belirlenmesi maksadıyla, tünel güzergâhında yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen verilerle hazırlanan jeolojik ve jeoteknik rapordan, göçük bölgesinde yapılan rezistivite deneyi sonuçlarından ve tünel kazısı sırasında elde edilen ayna haritalarından faydalanılmıştır.

#### 3.2.1. Jeolojik ve Jeoteknik Rapora Göre Belirlenen Zemin Durumu

Tünel güzergâhı tamamıyla paleozoyik-mesozoyik yaşlı demirkent magmatik karmaşığında oluşmaktadır. Üst kesimlerde tamamen çok ayrılmış olan bu birim alt kotalarda ise az ayrılmış taze olarak gözlemlenmiştir.





Şekil 51. Tünelin Google Earth Üzerindeki Görünümü

Tünel destek klasları ise portal yapılarına, litolojilere ve örtü kalınlıklarına göre seçilmiştir.

Tablo 46. Tünel Destekleme Zonları

No	Kilometre Aralığı		Uzunluk (m)	Litoloji	Örtü Yük. (m)
	Başlangıç	Bitiş			
1	43+692	43+710	18	Demirkent Mağmatik Karmaşığı (Portal)	0-20
2	43+710	45+950	2240	Demirkent Mağmatik Karmaşığı	20-320
3	45+950	45+965	15	Demirkent Mağmatik Karmaşığı (Portal)	0-15

### 3.2.1.1.KM:43+692-43+710 Giriş Portal Aynası

Projenin başlangıç bölümü olan ve tünelin giriş portalının bulunduğu bu kesim dokusal değişimle birbirlerine geçiş sunan pegmatitik gabro, gabro ve mikrogabro özellikli yan kayanın granitik, tonalitik, diyoritik, dasitik ve diyabazik karakterli çeşitli kalınlıklardaki dayk ve damarlarca sıkça kesilmesiyle oluşan tektonik dilim halindeki demirkent magmatik karmaşığı içerisinde bulunmaktadır.



Şekil 52. Demirkent Magmatik Karmaşığı

#### 3.2.1.1.1.Geoteknik Parametreler

Giriş portalı kilometre 43+692-43+710 arası için geoteknik parametreler Hoek&Brown kırılma ölçütleri ile tespit edilmiş olup bu amaçla kullanılan değerler,  $\sigma_{ci}$  (masif kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı), GSI (Jeolojik dayanım indeksi),  $m_i$  (Kayaç malzemesine ait boyutsuz malzeme sabiti), D (Örselenme faktörü),  $E_i$  (Elastisite modülü) ve  $\gamma$  (Birim ağırlık) tır. Proje güzergâhında jeolojik haritalama ve mühendislik jeolojisi çalışmaları sırasında gabrolar için GSI değeri Hoek tarafından 2013 yılında revize edilmiş olan,

$$GSI = 1,5x]xCond89 + \frac{RQD}{2} \quad (15)$$

eşitlikliği kullanılmış olup yaklaşık olarak 41 olarak hesaplanmıştır.

Definition of JCond<sub>89</sub>, after Bieniawski (1989)

Condition of discontinuities	Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Sloped surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1 – 5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous
Rating	30	25	20	10	0

Guidelines for classification of discontinuity conditions

Discontinuity length (persistence)	< 1 m	1 to 3 m	3 to 10 m	10 to 20 m	More than 20 m
Rating	6	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	More than 5 mm
Rating	6	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Sloped
Rating	6	5	3	1	0
Infilling (gouge)	None	Hard infilling < 5 mm	Hard infilling > 5 mm	Soft infilling < 5 mm	Soft infilling > 5 mm
Rating	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderate weathering	Highly weathered	Decomposed
Rating	6	5	3	1	0

Şekil 53. Hoek'a göre RMR<sub>89</sub> Eklem Durumu Koşullarına Göre GSI Tahmini

Tünel güzergâhında geçilecek olan kaya kütlelerinin elastoplastik davranış sergileyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle kaya kütlelerinin bu kesim için doruk (peak) ve rezidüel parametreleri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

### 3.2.1.1.2. Doruk (Peak) Tasarım Parametreleri

Tünel güzergâhında bu birim içerisinde 5 adet sondaj açılmıştır. Bu bölümde Portal yapılarında açılan TSK-1 ve TSK-5 sondajlarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Buna göre, bu kesim için seçilen tek eksenli sıkışma dayanımı  $\sigma_{ci} = 53$  Mpa, masif kayanın elastisite modülü  $E_i = 6,8$  Gpa, birim ağırlığı  $\gamma = 28$  kN/m<sup>3</sup> ve malzeme sabiti  $m_i = 24$  olarak öngörülmüştür. Ayrıca örselenme faktörü  $D = 0,5$  olarak öngörülmüştür.

Tablo 47.'de gösterilen değerler portal girişinden kilometre 43+710'a kadar olan bölümde örtü kalınlığının en yüksek (20 metre) kısmı göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 47. 20 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Doruk Jeoteknik Girdi Parametreleri

Tek eksenli dayanım	Jeolojik dayanım indeksi	Malzeme sabiti	Örselenme faktörü	Elastisite modülü	Birim Ağırlık
$\sigma_{ci}$ MPa	GSI	$m_i$	D	$E_i$ GPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
53	40	24	0-0,5	6,8	28

Geoteknik parametreler tünel tasarımında kullanılmak ve örselenmiş zon için  $D = 0,5$  ve örselenmemiş zon için  $D = 0$  kabul edilerek hesaplanmıştır. Ayrıca Mohr-Coulumb değerleri verilmişse de örtü yüksekliğinden bağımsız olarak kullanılan Hoek-Brown ölçütleri  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$ 'da öngörülmüştür. Hesaplamalar, RocData v5.003 bilgisayar yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Tablo 48).

Tablo 48. 20 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Hesaplanan Doruk Kaya Kütle Parametreleri

Örselenme Faktörü	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı	Yer Değiştirme Modülü	Hoek-Brown Ölçütleri		
				$m_b$	$s$	$a$
D	$c$ kPa	$\phi^\circ$	$E_m$ GPa			
0	260	62	1,1	2,8157	0,0013	0,5114
0,5	190	58	0,52	1,3784	0,0003	0,5114

### 3.2.1.1.3. Residüel Tasarım Parametreleri

Residüel tasarım parametrelerini hesaplariken bir üst başlıkta anlatılan bütün girdi parametreleri aynı alınmış sadece  $GSI_r$  değeri Cai ve diğ. (2007)'lerinin önermiş olduğu aşağıda verilmiş olan

$$GSI_r = GSI_e^{-0,0134GSI} \quad (16)$$

eşitlikten hesaplanmıştır. Buna göre  $GSI_r$  değeri 23 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca RocData v5.003 bilgisayar yazılımı kullanılarak 20 metrelik örtü kalınlığı için rezidüel tasarım parametreleri hesaplanmıştır (Tablo 50).

Tablo 49. 20 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Rezidüel Geoteknik Girdi Parametreleri

Tek eksenli dayanım	Jeolojik dayanım indeksi	Malzeme sabiti	Örselenme faktörü	Elastisite modülü	Birim ağırlık
$\sigma_{ci}$ MPa	GSI	$m_i$	D	$E_i$ GPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
53	23	24	0,5 ve 0	6,8	28

Tablo 50. 20 m' lik Örtü Kalınlığı İçin Hesaplanan Rezidüel Kaya Kütle Parametreleri

Örselenme Faktörü	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı	Yer Değiştirme Modülü	Hoek-Brown Ölçütleri		
D	c kPa	$\phi^\circ$	$E_m$ GPa	$m_b$	s	a
0	155	58	0,36	1,5343	0,0002	0,5358
0,5	110	51	0,22	0,6135	0,00003	0,5358

#### 3.2.1.1.4.RMR Sınıflama Sistemi

Tünel kazısı sırasında karşılaşılabilecek kesimlerin kaya kütlesi sınıflama puanları (RMR) Bieniawski (1989)'a göre hesaplanmıştır. Bieniawski'ye göre RMR sınıflama tablosu aşağıda verilmiştir.

Tablo 51. Km:43+692-43+710 Arası RMR Sınıflaması

A	Parametre	Değer/Tanım	Puan
1	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	53	5
2	Kaya kalite göstergesi (RQD%)	50	11
3	Süreksizlik aralığı (mm)	200	8
4	Süreksizliklerin durumu		
	Devamlılık	3-10 m	2
	Açıklık	1-5 mm	1
	Pürüzlülük	Az pürüzlü	3
	Dolgu	Yumuşak dolgu<5 mm	2
	Bozunma derecesi	Orta bozunmuş	3
5	Yeraltı suyu durumu	Nemli	10
	<b>Temel RMR</b>	<b>Orta Kaya</b>	<b>45</b>
B	Süreksizlik yönelimi	Orta	-5
	<b>Nihai RMR</b>	<b>Orta Kaya</b>	<b>40</b>

Giriş portal kesimi için nihai RMR 40 olarak hesaplanmıştır. O halde,

$$c_m = 5 \times \text{RMR} \text{ (kPa)} \quad (17)$$

eşitliğinden kaya kütesinin kohezyonu  $c = 200$  kPa,

$$\varphi_m = 0,5 \times \text{RMR} + 5 \quad (18)$$

eşitliğinden ise içsel sürtünme açısı  $\varphi = 25^\circ$  hesaplanmıştır.

### 3.2.1.1.5.Q Sınıflama Sistemi

Kaya tünelcilik kalitesi Q, birbirinden bağımsız 6 parametrenin fonksiyonu olarak,

$$Q = \frac{\text{RQD}}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{\text{SRF}} \quad (19)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

Q sınıflamasına göre Tablo 52. aşağıda verilmiştir.

Tablo 52. Km:43+692-43+710 Arası Q Sınıflaması

No	Parametre		Puan	
1	RQD	:	Kaya kalite göstergesi	50
2	Jn	:	Eklem takımı sayısı	9x2
3	Jr	:	Eklem pürüzlülük sayısı	2
4	Ja	:	Eklem alterasyon sayısı	4
5	Jw	:	Eklem su azaltma faktörü	0,66
6	SRF	:	Gerilme azaltma faktörü	2,5

Eşitlik 5'ten yararlanılarak giriş portal kesimi için  $Q = \frac{50}{9 \times 2} \times \frac{2}{4} \times \frac{0,66}{2,5} = 0,3667$  olarak hesaplanmıştır. O halde,

$$\varphi_m = \tan^{-1} \left( \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{1} \right) \quad (20)$$

eşitliğinden kaya kütesinin kohezyonu  $c = 588$  kPa,

$$c_m = \left( \frac{RQD}{J_n} \times \frac{1}{SRF} \times \frac{\sigma_{ci}}{100} \right) \quad (21)$$

eşitliğinden ise içsel sürtünme açısı  $\varphi = 18^\circ$  hesaplanmıştır.

### 3.2.1.1.6. Kaya Kütesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı ( $\sigma_{cm}$ )

Kaya kütesinin tek eksenli sıkışma dayanımı aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 53. Kaya Kütlesi Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Hesaplamaları

Eşitliği Öneren	Yılı	Eşitlik	Sonuç	
			D=0	D=0,5
Aydan vd.	1997	$\sigma_{cm} = 0,0016 \times RMR^{2,5}$	16,1	-
Hoek vd.	2002	$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \right]$	<b>1,75</b>	<b>0,88</b>
Barton	2002	$\sigma_{cm} = 5\gamma \left( Q \frac{\sigma_{ci}}{100} \right)^{1/3}$	8,1	-

### 3.2.1.1.7. Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları ( $E_m$ )

Kaya kütlesinin yer değiştirme modülü Tablo 54.'de verilmektedir.

Tablo 54. Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları

Eşitliği Öneren	Yılı	Kullanılan parametre	Eşitlik	Sonuç	
				D=0	D=0,5
Nicholson ve Bieniawski	1990	$E_i, RMR$	$E_m = E_i \left( 0,0028RMR^2 + 0,9e^{RMR/22,82} \right)$	0,82	-
Hoek ve Diederichs	2006	$E_i, GSI, D$	$E_m = E_i \left( 0,02 + \frac{1 - (D/2)}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$	1,1	0,52
Sönmez vd.	2006b	$E_i, RMR$	$E_m = E_i 10^{\left[ \frac{(RMR-100)(100-RMR)}{4000 \exp(-RMR/100)} \right]}$	0,44	0,13

Burada dikkat edilmesi gereken husus, hesaplamalarda nihai RMR değil, temel RMR değerinin alınmasıdır.

### 3.2.1.1.8. Tasarım Parametreleri Özeti

Yapılan hesaplamalar neticesinde; kilometre 43+692-43+710 arası tasarım parametreleri aşağıdaki Tablo 55.'de özetlenmiştir.



Tablo 55. Kilometre 43+692-43+710 Arası Tünel Tasarım Parametreleri

		Örselenmemiş (D=0)	Örselenmiş (D=0,5)
$\sigma_{ci}$ , Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)		53	53
<b>GSI</b> , Jeolojik Dayanım İndeksi		40 (23)	40 (23)
<b>mi</b> , Malzeme sabiti		24	24
<b>D</b> , Örselenme faktörü		0	0,5
<b>Ei</b> , Elastisite Modülü (GPa)		6,8	6,8
$\gamma_n$ , Birim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )		28	28
<b>v</b> , Poisson oranı		0,25	0,25
<b>H</b> , Ektin kaya yüksekliği (m)		20	20
<b>c</b> , Kohezyon (kPa)	RMR	200	-
	Q	588	-
	Hoek & Brown	<b>260* (155)*</b>	<b>190* (110)*</b>
<b>Ø</b> , İçsel Sürtünme Açısı (°)	RMR	25	-
	Q	18	-
	Hoek & Brown	<b>62* (58)*</b>	<b>58* (51)*</b>
<i>Hoek - Brown Ölçütleri</i>	<b>mb</b>	2,8157 (1,5343)	1,3784 (0,6135)
	<b>s</b>	0,0013 (0,0002)	0,0003 (0,0001)
	<b>a</b>	0,5114 (0,5358)	0,5114 (0,5358)
<b>Em</b> , Deformasyon Modülü (GPa)	Nicholson & Bieniawski	0,82	-
	Hoek & Diederichs	<b>1,1* (0,36)*</b>	<b>0,52* (0,22)*</b>
	Sönmez vd.	0,44	0,13
$\sigma_{cm}$ , Kaya Kütleli Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	Aydan vd.	16,1	-
	Hoek vd.	<b>1,75*</b>	<b>0,88*</b>
	Barton	8,1	-
		Örselenmemiş (D=0)	Örselenmiş (D=0,5)
<b>RMR</b> , Kaya Kütleli Sınıflama Puanı	Temel	45 (orta kaya)	
	Nihai	40 (orta kaya)	
<b>Q</b> , Tünelcilik Kalite İndeksi		0,3667	
<b>NATM</b> , iksa Sınıfı		B3	

\*Önerilen

Tablo 55.'de parantez içindeki değerler kaya kütlelerinin rezidüel değerleridir.

### 3.2.1.2. Kilometre 43+710-45+950 Arası

Tünelin bu kesimi dokusal değişimle birbirlerine geçiş sunan pegmatitik gabro, gabro ve mikrogabro özellikle yan kayanın granitik, tonalitik, diyoritik, dasitik ve diyabazik karakterli çeşitli kalınlıklardaki dayk ve damarlarca sıkça kesilmesiyle oluşan dilim halindeki demirkent magmatik karmaşığı içerisinden geçecektir.

#### 3.2.1.2.1. Geoteknik Parametreler

Kilometre 43+710-45+950 arası için geoteknik parametreler Hoek&Brown kırılma ölçütleri ile tespit edilmiş olup bu amaçla kullanılan değerler,  $\sigma_{ci}$  (masif kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı), GSI (Jeolojik dayanım indeksi),  $m_i$  (Kayaç malzemesine ait boyutsuz malzeme sabiti), D (Örselenme faktörü),  $E_i$  (Elastisite modülü) ve  $\gamma$  (Birim ağırlık)tır. Proje güzergâhında jeolojik haritalama ve mühendislik jeolojisi çalışmaları sırasında gabrolar için GSI değeri RocData v5.003 bilgisayar yazılımında bulunan ve Hoek (2013) tarafından revize edilmiş eşitlik (1) kullanılmış olup yaklaşık olarak 54 olarak tespit edilmiştir.

Condition of discontinuities	Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1 – 5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous
Rating	30	25	20	10	0

Discontinuity length (persistence)	< 1 m	1 to 3 m	3 to 10 m	10 to 20 m	More than 20 m
Rating	6	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	More than 5 mm
Rating	5	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
Rating	5	5	3	1	0
Infilling (gouge)	None	Hard infilling < 5 mm	Hard infilling > 5 mm	Soft infilling < 5 mm	Soft infilling > 5 mm
Rating	5	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderate weathering	Highly weathered	Decomposed
Rating	6	5	3	1	0

Şekil 54. Hoek'a Göre  $RMR_{99}$  Ekleme Durumu Koşullarına Göre GSI Tahmini

Tünel güzergâhında geçilecek olan kaya kütlelerinin elastoplastik davranış sergileyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle kaya kütlelerinin bu kesim için doruk (peak) ve residüel parametreleri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

### 3.2.1.2.2. Doruk (Peak) Tasarım Parametreleri

Tünel güzergâhında bu birim içerisinde 5 adet sondaj açılmıştır. Bu bölümde TSK-2, TSK-3 ve TSK-4 sondajlarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Buna göre, bu kesim için seçilen tek eksenli sıkışma dayanımı  $\sigma_{ci} = 96$  Mpa, masif kayanın elastisite modülü  $E_i = 11,7$  Gpa, birim ağırlığı  $\gamma = 28$  kN/m<sup>3</sup> ve malzeme sabiti  $m_i = 27$  olarak öngörülmüştür. Ayrıca örselenme faktörü  $D = 0,5$  olarak öngörülmüştür.

Tablo 56.'da gösterilen değerler kilometre 43+710-45+950 arası örtü kalınlığının en yüksek (320 metre) kısmı göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 56. 320 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Doruk Geoteknik Girdi Parametreleri

Tek eksenli dayanım	Jeolojik dayanım indeksi	Malzeme sabiti	Örselenme faktörü	Elastisite modülü	Birim ağırlık
$\sigma_{ci}$ MPa	GSI	$m_i$	D	$E_i$ GPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
96	54	27	0 ve 0,5	11,7	28

Geoteknik parametreler tünel tasarımında kullanılmak ve örselenmiş zon için  $D = 0,5$  ve örselenmemiş zon için  $D = 0$  kabul edilerek hesaplanmıştır. Ayrıca Mohr-Coulumb değerleri verilmişse de örtü yüksekliğinden bağımsız olarak kullanılan Hoek-Brown ölçütleri  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$  da öngörülmüştür. Hesaplamalar RocData v5.003 bilgisayar yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Tablo 57).

Tablo 57. 320 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Hesaplanan Doruk Kaya Kütle Parametreleri

Örselenme Faktörü	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı	Yer Değiştirme Modülü	Hoek-Brown Ölçütleri		
				$m_b$	$s$	$a$
<b>D</b>	<b>c</b> kPa	<b><math>\phi^\circ</math></b>	<b><math>E_m</math></b> GPa			
0	2220	54	4,5	5,2225	0,006	0,5043
0,5	1880	51	2,2	3,4678	0,0022	0,5043

### 3.2.1.2.3. Residüel Tasarım Parametreleri

Rezidüel tasarım parametrelerini hesaplarırken bir üst başlıkta anlatılan bütün girdi parametreleri aynı alınmış sadece  $GSI_r$  değeri Cai ve diğ. (2007)'lerinin önermiş olduğu (2) numaralı eşitlikten hesaplanmıştır. Buna göre  $GSI_r$  değeri 26 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca RocData v5.003 bilgisayar yazılımı kullanılarak 320 metrelik örtü kalınlığı için residüel tasarım parametreleri hesaplanmıştır.

Tablo 58. 320 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Rezidüel Geoteknik Girdi Parametreleri

Tek eksenli dayanım	Jeolojik dayanım indeksi	Malzeme sabiti	Örselenme faktörü	Elastisite modülü	Birim ağırlık
$\sigma_{ci}$ MPa	GSI	$m_i$	<b>D</b>	<b><math>E_i</math></b> GPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
96	26	27	0,5 ve 0	11,7	28

Tablo 59. 320 m'lik Örtü Kalınlığı için Hesaplanan Rezidüel Kaya Kütle Parametreleri

Örselenme Faktörü	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı	Yer Değiştirme Modülü	Hoek-Brown Ölçütleri		
				$m_b$	$s$	$a$
<b>D</b>	<b>c</b> kPa	<b><math>\phi^\circ</math></b>	<b><math>E_m</math></b> GPa			
0	1400	47	0,74	2,2059	0,0003	0,5292
0,5	1000	39	0,43	0,9141	0,00005	0,5292

#### 3.2.1.2.4. RMR Sınıflama Sistemi

Tünel kazısı sırasında karşılaşılabilecek kesimlerin kaya kütle sınıflama puanları (RMR) Bieniawski (1989)'a göre hesaplanmıştır. Bieniawski'ye göre RMR sınıflama Tablo 60.'da verilmiştir.

Tablo 60. Kilometre 43+710-45+950 Arası RMR Sınıflaması

A	Parametre	Değer/Tanım	Puan
1	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	96	9,5
2	Kaya kalite göstergesi (RQD%)	70	14
3	Süreksizlik aralığı (mm)	400	10
4	Süreksizliklerin durumu		
	Devamlılık	3-10 m	2
	Açıklık	1-5 mm	1
	Pürüzlülük	Az pürüzlü	3
	Dolgu	Yumuşak dolgu<5 mm	2
	Bozunma derecesi	Az ayrılmış	3
5	Yeraltı suyu durumu	Nemli	10
	<b>Temel RMR</b>	<b>Orta Kaya</b>	<b>56,5</b>
B	Süreksizlik yönelimi	Orta	-5
	<b>Nihai RMR</b>	<b>Orta Kaya</b>	<b>51,5</b>

Kilometre 43+710-45+950 arası için nihai RMR 51,5 olarak hesaplanmıştır. O halde, (17) numaralı eşitsizlikten yararlanarak kaya kütlelerinin kohezyonu  $c = 258$  kPa, (18) numaralı eşitsizlikten yararlanılarak ise içsel sürtünme açısı  $\phi = 31^\circ$  hesaplanmıştır.

### 3.2.1.2.5. Q Sınıflama Sistemi

Kaya tünellilik kalitesi Q, birbirinden bağımsız 6 parametrenin fonksiyonu olarak, (19) numaralı eşitsizlikten yararlanılarak hesaplanmıştır. Q sınıflamasına göre Tablo 61. aşağıda verilmiştir.

Tablo 61. Kilometre 43+710-45+950 Arası Q Sınıflaması

No	Parametre		Puan	
1	RQD	:	Kaya kalite göstergesi	70
2	Jn	:	Eklem takımı sayısı	9
3	Jr	:	Eklem pürüzlülük sayısı	2
4	Ja	:	Eklem alterasyon sayısı	2
5	Jw	:	Eklem su azaltma faktörü	0,66
6	SRF	:	Gerilme azaltma faktörü	2,5

Eşitlik 19'ten yararlanılarak kilometre 43+710-45+950 arası için  $Q = \frac{70}{9} \times \frac{2}{2} \times \frac{0,66}{2,5} = 2,0533$  olarak hesaplanmıştır. O halde,

$$\varphi_m = \tan^{-1} \left( \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{1} \right) \quad (22)$$

eşitliğinden kaya kütleinin kohezyonu  $c = 2980$  kPa,

$$c_m = \left( \frac{RQD}{J_n} \times \frac{1}{SRF} \times \frac{\sigma_{ci}}{100} \right) \quad (23)$$

eşitliğinden ise içsel sürtünme açısı  $\varphi = 33^\circ$  hesaplanmıştır.

### 3.2.1.2.6. Kaya Kütlesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı ( $\sigma_{cm}$ )

Kaya kütlesinin tek eksenli sıkışma dayanımı aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 62. Kaya Kütlesi Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Hesaplamaları

Eşitliği Öneren	Yılı	Eşitlik	Sonuç	
			D=0	D=0,5
Aydan vd.	1997	$\sigma_{cm} = 0,0016 \times RMR^{2,5}$	30,4	-
Hoek vd.	2002	$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \right]$	7,3	4,3
Barton	2002	$\sigma_{cm} = 5\gamma \left( Q \frac{\sigma_{ci}}{100} \right)^{1/3}$	27,6	-

### 3.2.1.2.7. Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları ( $E_m$ )

Kaya kütlesinin yer değiştirme modülü aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 63. Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları

Eşitliği Öneren	Yılı	Kullanılan parametre	Eşitlik	Sonuç	
				D=0	D=0,5
Nicholson ve Bieniawski	1990	$E_i, RMR$	$E_m = E_i \left( 0,0028RMR^2 + 0,9e^{RMR/22,82} \right)$	2,3	-
Hoek ve Diederichs	2006	$E_i, GSI, D$	$E_m = E_i \left( 0,02 + \frac{1 - (D/2)}{1 + e^{(60+15D-GSI)/11}} \right)$	4,5	2,2
Sönmez vd.	2006b	$E_i, RMR$	$E_m = E_i 10^{\left[ \frac{(RMR-100)(100-RMR)}{(4000 \exp(-RMR/100))} \right]}$	1,7	0,76

Burada dikkat edilmesi gereken husus, hesaplamalarda nihai RMR değil, temel RMR değerinin alınmasıdır.

### 3.2.1.2.8. Tasarım Parametreleri Özeti

Yapılan hesaplamalar neticesinde; kilometre 43+710-45+950 arası tasarım parametreleri Tablo 64.'de özetlenmiştir.

Tablo 64. Kilometre 43+710-45+950 Arası Tünel Tasarım Parametreleri

		Örselenmemiş (D=0)	Örselenmiş (D=0,5)
$\sigma_{ci}$ , Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)		96	96
<b>GSI</b> , Jeolojik Dayanım İndeksi		54	54
<b>mi</b> , Malzeme sabiti		27	27
<b>D</b> , Örselenme faktörü		0	0,5
<b>Ei</b> , Elastisite Modülü (GPa)		11,7	11,7
$\gamma_n$ , Birim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )		28	28
$\nu$ , Poisson oranı		0,25	0,25
<b>H</b> , Ektin kaya yüksekliği (m)		320	320
<b>c</b> , Kohezyon (kPa)	RMR	258	-
	Q	2980	-
	Hoek & Brown	<b>2220* (1400)*</b>	<b>1880* (1000)*</b>
<b><math>\theta</math></b> , İçsel Sürtünme Açısı (°)	RMR	31	-
	Q	33	-
	Hoek & Brown	<b>54* (47)*</b>	<b>51* (39)*</b>
<b>Hoek - Brown Ölçütleri</b>	<b>mb</b>	5,2225 (2,2059)	3,4678 (0,9141)
	<b>s</b>	0,006 (0,0003)	0,0022 (0,0001)
	<b>a</b>	0,5043 (0,5292)	0,5043 (0,5292)
<b>Em</b> , Deformasyon Modülü (GPa)	Nicholson & Bieniawski	2,3	-
	Hoek & Diederichs	<b>4,5* (0,74)*</b>	<b>2,2* (0,43)*</b>
	Sönmez vd.	1,7	0,76
$\sigma_{cm}$ , Kaya Kütlesi Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	Aydan vd.	30,4	-
	Hoek vd.	<b>7,3*</b>	<b>4,3*</b>
	Barton	27,6	-
		<b>Örselenmemiş (D=0)</b>	<b>Örselenmiş (D=0,5)</b>
<b>RMR</b> , Kaya Kütlesi Sınıflama Puanı	Temel	56,5 (orta kaya)	
	Nihai	51,5 (orta kaya)	
<b>Q</b> , Tünelcilik Kalite İndeksi		2,0533	
<b>NATM</b> , iksa Sınıfı		B2	

\*Önerilen

Tablo 64.'de parantez içindeki değerler kaya kütlelerinin rezidüel değerleridir.



### 3.2.1.3.KM:45+950-45+965 Çıkış Portal Aynası

Projenin bitiş bölümü olan ve tünelin çıkış portalının bulunduğu bu kesim dokusal değişimle birbirlerine geçiş sunan pegmatitik gabro, gabro ve mikrogabro özellikli yan kayanın granitik, tonalitik, diyoritik, dasitik ve diyabazik karakterli çeşitli kalınlıklardaki dayk ve damarlarca sıkça kesilmesiyle oluşan tektonik dilim halindeki demirkent magmatik karmaşığı içerisinden geçecektir.

#### 3.2.1.3.1. Geoteknik Parametreler

Tünel çıkış portalı kilometre 45+950-45+965 arası için geoteknik parametreler Hoek&Brown kırılma ölçütleri ile tespit edilmiş olup bu amaçla kullanılan değerler,  $\sigma_{ci}$  (masif kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı), GSI (Jeolojik dayanım indeksi),  $m_i$  (Kayaç malzemesine ait boyutsuz malzeme sabiti), D (Örselenme faktörü),  $E_i$  (Elastisite modülü) ve  $\gamma$  (Birim ağırlık)tır. Proje güzergâhında jeolojik haritalama ve mühendislik jeolojisi çalışmaları sırasında gabrolar için GSI değeri RocData v5.003 bilgisayar yazılımında bulunan ve Hoek (2013) tarafından revize edilmiş eşitlik (15) kullanılmış olup yaklaşık olarak 41 olarak tespit edilmiştir.

Definition of JCond89, after Bieniawski (1989)

Condition of discontinuities	Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1 - 5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous
Rating	30	25	20	10	0

Guidelines for classification of discontinuity conditions

Discontinuity length (persistence)	< 1 m	1 to 3 m	3 to 10 m	10 to 20 m	More than 20 m
Rating	5	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	More than 5 mm
Rating	5	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
Rating	6	5	3	1	0
Infilling (gouge)	None	Hard infilling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft infilling < 5 mm	Soft infilling > 5 mm
Rating	5	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderate weathering	Highly weathered	Decomposed
Rating	6	5	3	1	0

Şekil 55. Hoek'a Göre RMR<sub>89</sub> Eklem Durumu Koşullarına Göre GSI Tahmini

Tünel güzergâhı boyunca geçilecek olan jeolojik birimlerin, yapısal ve mühendislik özellikleri ile yeraltı suyu durumunu tespit etmek üzere 5 adet sondaj yapılmıştır. Yapılan sondajlara ait sondaj logları ve karot fotoğrafları ekler bölümünde görülmektedir.

Tünel güzergâhında geçilecek olan kaya kütlelerinin elastoplastik davranış sergileyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle kaya kütlelerinin bu kesim için doruk (peak) ve rezidüel parametreleri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

### 3.2.1.3.2. Doruk (Peak) Tasarım Parametreleri

Tünel güzergâhında bu birim içerisinde 5 adet sondaj açılmıştır. Bu bölümde Portal yapılarında açılan TSK-1 ve TSK-5 sondajlarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Buna göre, bu kesim için seçilen tek eksenli sıkışma dayanımı  $\sigma_{ci} = 53$  Mpa, masif kayanın elastisite modülü  $E_i = 6,8$  Gpa, birim ağırlığı  $\gamma = 28$  kN/m<sup>3</sup> ve malzeme sabiti  $m_i = 24$  olarak öngörülmüştür. Ayrıca örselenme faktörü  $D = 0,5$  olarak öngörülmüştür.

Tablo 65.'de gösterilen değerler çıkış portalın da örtü kalınlığının en yüksek (14 metre) kısmı göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 65. 14 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Doruk Geoteknik Girdi Parametreleri

Tek eksenli dayanım	Jeolojik dayanım indeksi	Malzeme sabiti	Örselenme faktörü	Elastisite modülü	Birim ağırlık
$\sigma_{ci}$ MPa	GSI	$m_i$	D	$E_i$ GPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
53	40	24	0 ve 0,5	6,8	28

Geoteknik parametreler tünel tasarımında kullanılmak ve örselenmiş zon için  $D = 0,5$  ve örselenmemiş zon için  $D = 0$  kabul edilerek hesaplanmıştır. Ayrıca Mohr-Coulumb değerleri verilmişse de örtü yüksekliğinden bağımsız olarak kullanılan Hoek-Brown ölçütleri  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$  da öngörülmüştür. Hesaplamalar RocData v5.003 bilgisayar yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Tablo 66).

Tablo 66. 14 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Hesaplanan Doruk Kaya Kütle Parametreleri

Örselenme Faktörü	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı	Yer Değiştirme Modülü	Hoek-Brown Ölçütleri		
				$m_b$	$s$	$a$
<b>D</b>	<b>c</b> kPa	<b><math>\phi^\circ</math></b>	<b><math>E_m</math></b> GPa			
0	220	65	1,1	2,8157	0,0013	0,5114
0,5	155	61	0,52	1,3784	0,0003	0,5114

### 3.2.1.3.3. Rezidüel Tasarım Parametreleri

Rezidüel tasarım parametrelerini hesaplariken bir üst başlıkta anlatılan bütün girdi parametreleri aynı alınmış sadece  $GSI_r$  değeri Cai ve diğ. (2007)'lerinin önermiş olduğu (16) numaralı eşitlikten hesaplanmıştır. Buna göre  $GSI_r$  değeri 23 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca RocData v5.003 bilgisayar yazılımı kullanılarak 14 metrelik örtü kalınlığı için rezidüel tasarım parametreleri hesaplanmıştır (Tablo 68).

Tablo 67. 14 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Tünelin Rezidüel Geoteknik Girdi Parametreleri

Tek eksenli dayanım	Jeolojik dayanım indeksi	Malzeme sabiti	Örselenme faktörü	Elastisite modülü	Birim ağırlık
$\sigma_{ci}$ MPa	GSI	$m_i$	<b>D</b>	<b><math>E_i</math></b> GPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
53	23	24	0,5 ve 0	6,8	28

Tablo 68. 14 m'lik Örtü Kalınlığı İçin Hesaplanan Rezidüel Kaya Kütle Parametreleri

Örselenme Faktörü	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı	Yer Değiştirme Modülü	Hoek-Brown Ölçütleri		
				$m_b$	$s$	$a$
<b>D</b>	<b>c</b> kPa	<b><math>\phi^\circ</math></b>	<b><math>E_m</math></b> GPa			
0	125	60	0,36	1,5343	0,0002	0,5358
0,5	88	53	0,22	0,6135	0,00003	0,5358

### 3.2.1.3.4.RMR Sınıflama Sistemi

Tünel kazısı sırasında karşılaşılabilecek kesimlerin kaya kütlesi sınıflama puanları (RMR) Bieniawski (1989)' a göre hesaplanmıştır. Bieniawski'ye göre RMR sınıflama Tablo 69.'da verilmiştir.

Tablo 69. Kilometre 45+950-45+965 Arası RMR Sınıflaması

A	Parametre	Değer/Tanım	Puan
1	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	53	5
2	Kaya kalite göstergesi (RQD%)	50	11
3	Süreksizlik aralığı (mm)	200	8
4	Süreksizliklerin durumu		
	Devamlılık	3-10 m	2
	Açıklık	1-5 mm	1
	Pürüzlülük	Az pürüzlü	3
	Dolgu	Yumuşak dolgu<5 mm	2
	Bozunma derecesi	Orta bozunmuş	3
5	Yeraltı suyu durumu	Nemli	10
	<b>Temel RMR</b>	<b>Orta Kaya</b>	<b>45</b>
B	Süreksizlik yönelimi	Orta	-5
	<b>Nihai RMR</b>	<b>Orta Kaya</b>	<b>40</b>

Kilometre 45+950-45+965 arası için nihai RMR 40 olarak hesaplanmıştır. O halde, (17) numaralı eşitsizlikten yararlanarak kaya kütlesinin kohezyonu  $c = 200$  kPa, (18) numaralı eşitsizlikten yararlanılarak ise içsel sürtünme açısı  $\phi = 25^\circ$  hesaplanmıştır.

### 3.2.1.3.5. Q Sınıflama Sistemi

Kaya tünellilik kalitesi Q, birbirinden bağımsız 6 parametrenin fonksiyonu olarak, (19) numaralı eşitsizlikten yararlanılarak hesaplanmıştır. Q sınıflamasına göre Tablo 70.'de verilmiştir.

Tablo 70. Kilometre 45+950-45+965 Arası Q Sınıflaması

No	Parametre		Puan	
1	RQD	:	Kaya kalite göstergesi	50
2	J <sub>n</sub>	:	Eklem takımı sayısı	9x2
3	J <sub>r</sub>	:	Eklem pürüzlülük sayısı	2
4	J <sub>a</sub>	:	Eklem alterasyon sayısı	4
5	J <sub>w</sub>	:	Eklem su azaltma faktörü	0,66
6	SRF	:	Gerilme azaltma faktörü	2,5

Eşitlik 19'dan yararlanılarak kilometre 45+950-45+965 arası için  $Q = \frac{50}{9 \times 2} \times \frac{2}{4} \times \frac{0,66}{2,5} = 0,3667$  olarak hesaplanmıştır. O halde,

$$\varphi_m = \tan^{-1} \left( \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{1} \right) \quad (23)$$

eşitliğinden kaya kütesinin kohezyonu  $c = 588$  kPa,

$$c_m = \left( \frac{RQD}{J_n} \times \frac{1}{SRF} \times \frac{\sigma_{ci}}{100} \right) \quad (24)$$

eşitliğinden ise içsel sürtünme açısı  $\varphi = 18^\circ$  hesaplanmıştır.

### 3.2.1.3.6. Kaya Kütesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı ( $\sigma_{cm}$ )

Kaya kütesinin tek eksenli sıkışma dayanımı Tablo 71.'de verilmektedir.

Tablo 71. Kaya Kütlesi Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Hesaplamaları

Eşitliği Öneren	Yılı	Eşitlik	Sonuç	
			D=0	D=0,5
Aydan vd.	1997	$\sigma_{cm} = 0,0016 \times RMR^{2,5}$	16,1	-
Hoek vd.	2002	$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \right]$	<b>1,75</b>	<b>0,88</b>
Barton	2002	$\sigma_{cm} = 5\gamma \left( Q \frac{\sigma_{ci}}{100} \right)^{1/3}$	8,1	-

### 3.2.1.3.7. Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları ( $E_m$ )

Kaya kütlesinin yer değiştirme modülü Tablo 72.'de verilmektedir.

Tablo 72. Yer Değiştirme Modülü Hesaplamaları

Eşitliği Öneren	Yılı	Kullanılan parametre	Eşitlik	Sonuç	
				D=0	D=0,5
Nicholson ve Bieniawski	1990	$E_i, RMR$	$E_m = E_i \left( 0,0028RMR^2 + 0,9e^{RMR/22,82} \right)$	0,82	-
Hoek ve Diederichs	2006	$E_i, GSI, D$	$E_m = E_i \left( 0,02 + \frac{1 - (D/2)}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$	1,1	0,52
Sönmez vd.	2006b	$E_i, RMR$	$E_m = E_i 10^{\left[ \frac{(RMR-100)(100-RMR)}{(4000 \exp(-RMR/100))} \right]}$	0,44	0,13

Burada dikkat edilmesi gereken husus, hesaplamalarda nihai RMR değil, temel RMR değerinin alınmasıdır.

### 3.2.1.3.8. Tasarım Parametreleri Özeti

Yapılan hesaplamalar neticesinde; kilometre 45+950-45-965 arası tasarım parametreleri Tablo 73.'de özetlenmiştir.

Tablo 73. Kilometre 45+950-45+965 Arası Tünel Tasarım Parametreleri

		Örselenmemiş (D=0)	Örselenmiş (D=0,5)
$\sigma_{ci}$ , Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)		53	53
$GSI$ , Jeolojik Dayanım İndeksi		40 (23)	40 (23)
$mi$ , Malzeme sabiti		24	24
$D$ , Örselenme faktörü		0	0,5
$Ei$ , Elastisite Modülü (GPa)		6,8	6,8
$\gamma_m$ , Birim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )		28	28
$\nu$ , Poisson oranı		0,25	0,25
$H$ , Ektin kaya yüksekliği (m)		20	20
$c$ , Kohezyon (kPa)	RMR	200	-
	Q	588	-
	Hoek & Brown	<b>220* (125)*</b>	<b>155* (88)*</b>
$\theta$ , İçsel Sürtünme Açısı (°)	RMR	25	-
	Q	18	-
	Hoek & Brown	<b>65* (60)*</b>	<b>61* (53)*</b>
<i>Hoek - Brown Ölçütleri</i>	$mb$	2,8157 (1,5343)	1,3784 (0,6135)
	$s$	0,0013 (0,0002)	0,0003 (0,0001)
	$a$	0,5114 (0,5358)	0,5114 (0,5358)
		Örselenmemiş (D=0)	Örselenmiş (D=0,5)
$E_m$ , Deformasyon Modülü (GPa)	Nicholson & Bieniawski	0,82	-
	Hoek & Diederichs	<b>1,1* (0,36)*</b>	<b>0,52* (0,22)*</b>
	Sönmez vd.	0,44	0,13
$\sigma_{cm}$ , Kaya Kütlesi Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	Aydan vd.	16,1	-
	Hoek vd.	<b>1,75*</b>	<b>0,88*</b>
	Barton	8,1	-
$RMR$ , Kaya Kütlesi Sınıflama Puanı	Temel	45 (orta kaya)	
	Nihai	40 (orta kaya)	
$Q$ , Tünelcilik Kalite İndeksi		0,3667	
$NATM$ , iksa Sınıfı		B3	

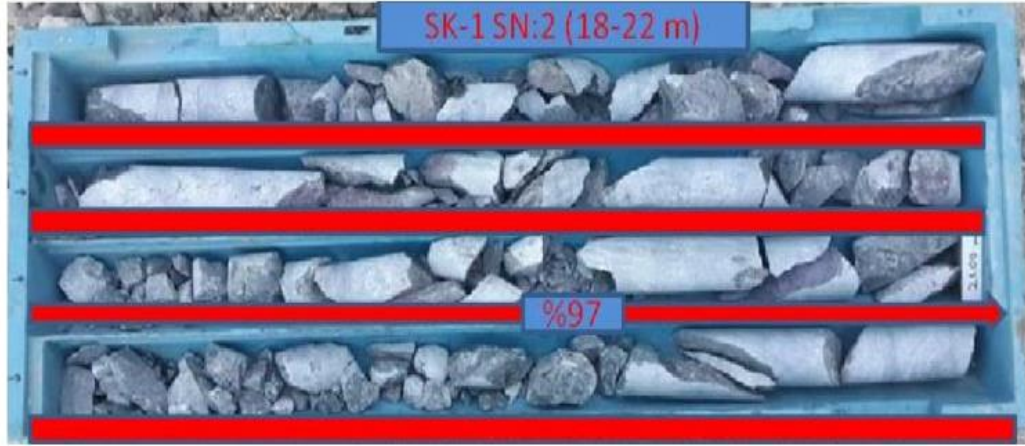
\*Önerilen

Tablo 73.'de parantez içindeki değerler kaya kütlesinin rezidüel değerleridir.

Yapılan sondajlardan alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiş ve tünel güzergâhında karşılaşılabilecek olan farklı litolojiler için geoteknik parametrelerin belirlenmiştir.

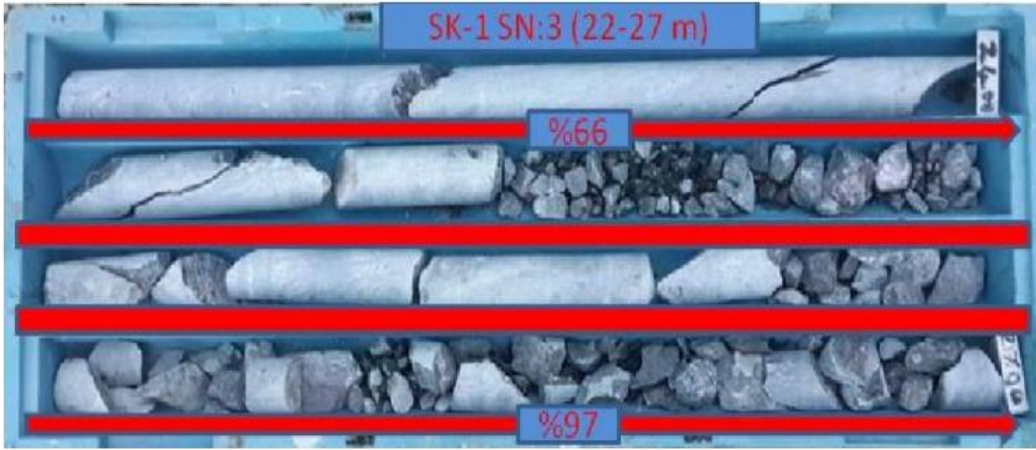


Şekil 56. SK-1 SN:1 (0-18 m)

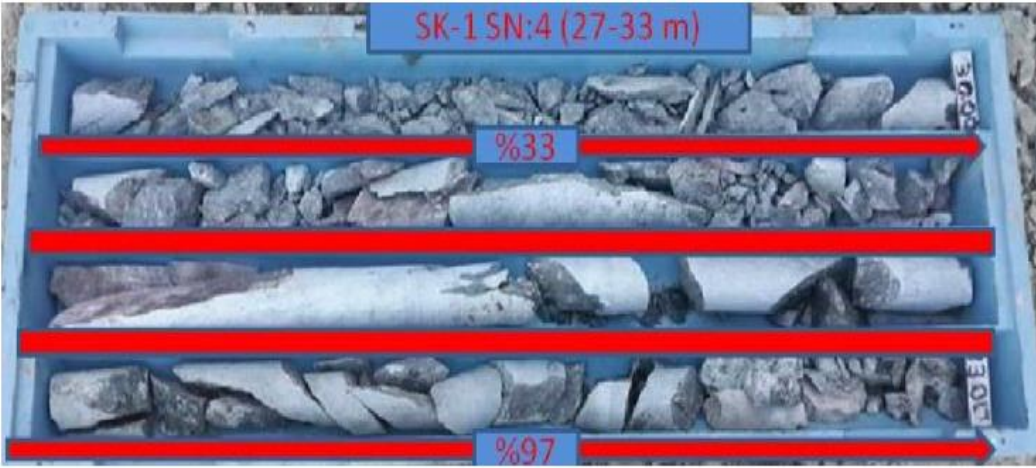


Şekil 57. SK-1 SN:2 (18-22 m)

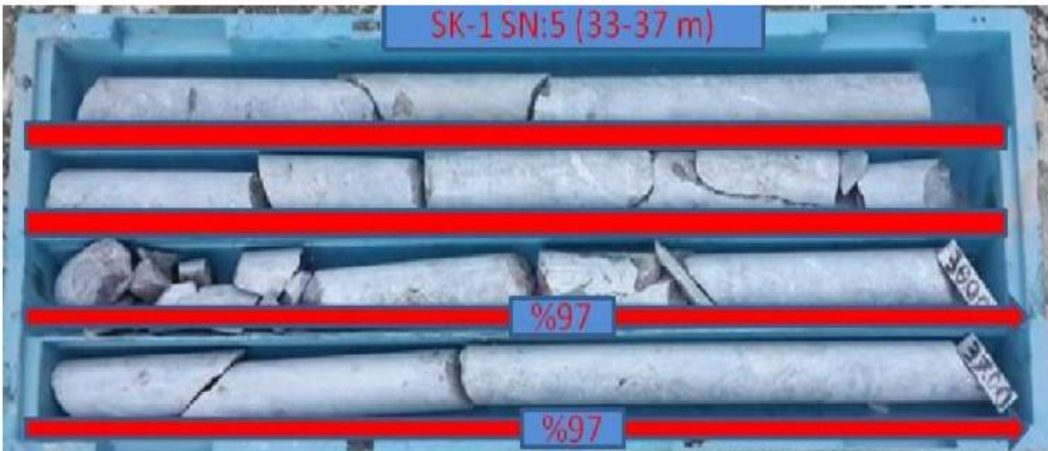




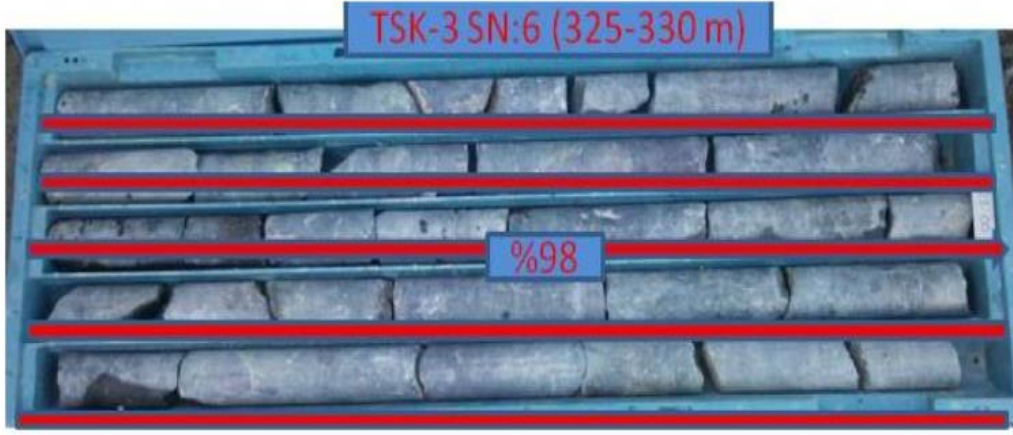
Şekil 58. SK-1 SN:3 (22-27 m)



Şekil 59. SK-1 SN:4 (27-33 m)



Şekil 60. SK-1 SN:5 (33-37 m)



Şekil 61. TSK-3 SN:6 (325-330 m)



Şekil 62. TSK-3 SN:10 (340-345 m)

Alınan sondajlardan elde edilen numuneler üzerinde yapılan kaya mekaniği deney sonuçları Tablo 74.'de görülmektedir.

Tablo 74. Tek Eksenli, Elastisite Modülü ve Poisson Oranları

Sondaj No	Derinlik		Birim Hacim	Tek Eks. Sıkışma	Elastisite	Poisson	Litoloji
	Baş.	Bitiş	Ağırlık	Dayanımı	Modülü	Oranı	
	[m]	[m]	$\gamma_n$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_{ci}$ [MPa]	$E_i$ [GPa]	$\nu$	
TSK-1	22.00	22.75	28.27	22.90	-	-	Gabro
TSK-1	23.00	23.50	28.64	60.00	8.52	0.26	Gabro
TSK-1	25.25	25.50	28.27	46.50	-	-	Gabro
TSK-1	33.00	33.25	28.73	44.40	7.08	0.23	Gabro
TSK-1	34.50	34.75	29.03	38.60	4.91	0.31	Gabro
TSK-2	202.30	202.50	27.29	30.60	-	-	Gabro
TSK-2	203.15	203.35	27.62	63.90	-	-	Gabro
TSK-2	203.75	204.00	27.50	97.10	-	-	Gabro
TSK-2	205.00	205.25	27.37	89.30	-	-	Gabro
TSK-2	208.50	208.75	27.75	113.40	-	-	Gabro
TSK-2	209.00	209.25	27.61	82.10	12.70	0.25	Gabro
TSK-2	209.75	210.00	27.72	81.20	-	-	Gabro
TSK-2	212.80	212.90	27.56	85.90	-	-	Gabro
TSK-2	215.20	215.40	28.16	182.60	10.65	0.25	Gabro
TSK-2	216.50	216.75	27.40	80.00	-	-	Gabro
TSK-2	218.20	218.40	27.39	93.70	12.43	0.22	Gabro
TSK-2	219.00	219.25	27.69	91.90	-	-	Gabro
TSK-2	219.25	220.00	27.56	153.00	15.96	0.30	Gabro
TSK-2	223.80	223.90	27.61	94.90	-	-	Gabro
TSK-3	315.00	315.25	27.24	34.40	-	-	Gabro
TSK-3	326.50	326.75	27.18	127.40	-	-	Gabro
TSK-3	328.50	328.75	27.20	61.40	-	-	Gabro
TSK-3	329.25	329.50	27.51	106.20	8.58	0.26	Gabro
TSK-3	331.75	332.00	27.58	103.00	-	-	Gabro
TSK-3	336.50	336.75	27.18	65.00	12.82	0.21	Gabro
TSK-3	339.75	339.90	26.91	76.80	-	-	Gabro
TSK-3	344.25	344.50	27.08	133.70	11.30	0.24	Gabro
TSK-3	344.75	345.00	27.31	72.80	-	-	Gabro
TSK-4	263.50	263.75	26.44	65.50	-	-	Gabro
TSK-4	266.15	266.30	26.55	116.60	-	-	Gabro
TSK-4	267.50	267.75	28.12	86.00	11.61	0.21	Gabro
TSK-4	270.00	270.50	26.12	99.50	-	-	Gabro
TSK-4	273.50	273.70	27.66	147.30	8.96	0.24	Gabro
TSK-4	275.00	275.25	27.73	168.20	-	-	Gabro
TSK-4	279.25	279.50	27.31	77.90	-	-	Gabro
TSK-5	6.00	6.50	28.61	64.60	-	-	Gabro
TSK-5	8.00	8.50	28.01	81.10	-	-	Gabro
TSK-5	25.00	26.00	29.81	34.60	-	-	Gabro
TSK-5	46.25	46.50	27.06	86.00	-	-	Gabro

### 3.3. Kaya Sınıflarına Göre Destekleme Sistemi Seçimi

Uluslararası tünelcilik faaliyetlerinde kabul görmüş ve destekleme sistemlerinin ampirik tasarımında yaygın olarak kullanılmakta olan kaya sınıflama yöntemleri ile tünel güzergahında mevcut kaya formasyonları için yapılmış sınıflamaların sonuçları yukarıda anlatılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda Q, RMR ve ÖNORM B 2203 (NATM)'e göre yapılmış olan destekleme sistemi ön tahminleri bu kısımda verilecektir.

Tünelin projelendirilmesinde, NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi temel olarak alınmıştır. NATM'in genel prensibi uyarınca tünelin açıldığı kaya ortamı, uygun destek elemanlarını kullanmak suretiyle, yük taşıyabilir bir kütle haline getirilmektedir. Bu amaca hizmet edebilmek için bahse konu kaya sınıflama yöntemlerinin destekleme sistemi için kullandıkları elemanlar;

- a) Püskürtme Betonu
- b) Kaya Bulonu
- c) Süren Boruları
- d) Çelik Hasır Donatı
- e) Çelik İksa
- f) Taban Kemer Betonu

maddelerinden kaya ortamına göre gerekli ve uygun olanlarıdır.

Oruçlu Tünelinde yaşanan göçük sonrasında yapılan Jeofizik Resistivite Etüdü'nde bölgede yer alan bazaltların genel olarak parçalı ve çok kırıklı yapıda olduğu belirlenmiştir. Yukarıda verilen destek elemanlarından kaya sınıflaması doğrultusunda RMR, Q ve ÖNORM-B sistemlerinde önerilen kazı ve tahkimat sistemleri birlikte değerlendirilerek belirlenen ön destekleme sisteminin NATM'in genel prensibinde yer alan kazı çevresinde kemerleşmeyi sağlayarak kayayı kendi kendine taşıtmada yetersiz kaldığı ve bunun sonucunda göçük yaşandığı tahmin edilmektedir.

Bu durumda, -göçüğün yaşandığı ~Km:45+022 – 45+042 aralığını da kapsayacak şekilde- göçüğe bağlı yer değiştirmelerin ve iksa burkulmalarının gözlemlendiği Km: 44+900 – 45+050 aralığında yukarıda maddelenen destek elemanlarına ek önlemler alınarak mevcut deforme olmuş tahkimatın sökülmesi ve tekrar destekleme yapılması uygun görülmüştür. Ek önlem olarak ise destekleme öncesi kazı çevresinde genel bir zemin iyileştirmesi yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda yapılan incelemeler neticesinde; şemsiye kemer (umbrella arch) yönteminin uygulanmasına karar verilmiştir. Bu yöneme başlamadan önce tünel

çevresinin sıkılaştırarak şekilde katılaştırma enjeksiyonun yapılması uygun görülmüştür. Katılaştırma enjeksiyonu, göçük bölgesinde sıklaşacak şekilde Km: 44+900 – 45+050 arasında uygulanacaktır. Delgi boyu olarak L=9 m düşünülmüş ve tünel çevresinde yaklaşık 1 çap kadar iyileştirilmiş bölge oluşturması açısından yeterli bulunmuştur. Kaya kütleindeki çatlakları doldurarak kayanın homojen yapıda olmasını ve birlikte hareket etmesini sağlayacaktır. Enjeksiyon ile iyileştirme sonrasında tahkimatın yeniden yerleştirilmesi aşamasında tünel tavanında L=9 m boyunda borularla şemsiye kemer uygulaması yapılacaktır. Şemsiye kemer uygulamasında borulardan ayrıca enjeksiyon verilerek ve tünel çeperindeki örselenmiş bölgede enjeksiyon sonrası kalan boşluk varsa çimento şerbeti ile doldurulacaktır. Bu sayede tünel tavanında enjeksiyona ek olarak ~2-3 m kalınlığında mukavim bir zon oluşturularak hem olası yer değiştirmeler önlenmiş olacak hem de imalat esnasında tavandan parça vb. kopma/düşmesine karşı yeterli güvenlik sağlanmış olacaktır. Şemsiye kemer uygulamasının enjeksiyonla doldurulacak göçük bölgesinde çift kat, kalan yer değiştirme bölgelerinde ise tek uygulanması yeterli görülmüştür.

Sonuç olarak tünelde; Km: 44+900 – 45+050 arasında uygulanmak üzere detayları aşağıda verilen Göçük Islahı Kazı ve Destek Sistemi – Tip – 1 ve Göçük Islahı Kazı ve Destek Sistemi – Tip – 2 belirlenmiştir.

Göçük Islahı Kazı ve Destek Sistemi – Tip – 1, Km: 44+900 – 45+017 ve Km: 45+047 – 45+050 aralıklarında, Göçük Islahı Kazı ve Destek Sistemi – Tip – 2 ise Km: 45+017 – 45+047 aralığında uygulanacaktır.

### **3.3.1. Tünel Kazı ve Destek Sistemleri**

#### **3.3.1.1. Göçük Islahı Kazı ve Destek Sistemi-Tip-1**

1. Üst yarı için ilerleme boyu (Raunt Boyu) 1.00 m olacaktır.
2. Alt yarı için ilerleme boyu (Raunt Boyu) ~2.00 m ya da maksimum iki üst yarı uzunluğu kadar olacaktır.
3. Taban için ilerleme boyu (Raunt Boyu) ~4.00 m ya da maksimum dört üst yarı uzunluğu kadar olacaktır.
4. Kazılar tam alanda gerçekleştirilecektir.



5. Destekleme öncesinde 3 rauntta bir, radyal yönde 3m ara ile L=9m boyunda delgi ve enjeksiyon işlemleri yapılarak kazı çevresinde zemin iyileştirme yapılacaktır.

6. Üst yarıda ve alt yarıda püskürtme beton kalınlığı 20cm'dir. Püskürtme beton 2 kat Q221/221 çelik hasır ile donatılacaktır.

7. Tabanda püskürtme beton kalınlığı 15 cm'dir. Püskürtme beton 2 kat Q221/221 çelik hasır ile donatılacaktır ve püskürtme betonda çelik fiber kullanılacaktır.

8. Çelik iksa (NPI160) 1 m ara ile kullanılacaktır. Üst yarıda yerleştirilen çelik iksalar, alt yarı kazısı sonrası alt yarı kısımlarında da tamamlanacaktır.

9. D=4" çapında L=9 m boyunda Şemsiye kemer boruları, 0.25 m radyal aralık ile tek kat olarak yerleştirilecek, 6 rauntta bir bindirme yapılarak bu işlem tekrarlanacaktır.

10. Üst Şemsiye kemer uygulanmayan bölgelerde ve alt yarıda radyal yönde 2 m ara ile L=4.00 m boyunda Ø 26 mm çapında SN tipi bulon yerleştirilecektir.

11. Kazı, makineli kazı şeklinde yapılacaktır.

12. Püskürtme betonda C20/25 beton kullanılacaktır.

13. Kemer betonunda C30/37, temel kirişleri ve taban kaplamasında C25/30 beton kullanılacak, kemer betonu, temel kirişi ve taban kaplaması donatılı imal edilecektir.

### **3.3.1.2. Göçük Islahı Kazı ve Destek Sistemi-Tip-2**

1. Üst yarı için ilerleme boyu (Raunt Boyu) 1.00 m olacaktır.

2. Alt yarı için ilerleme boyu (Raunt Boyu) ~2.00 m ya da maksimum iki üst yarı uzunluğu kadar olacaktır.

3. Taban için ilerleme boyu (Raunt Boyu) ~4.00 m ya da maksimum dört üst yarı uzunluğu kadar olacaktır.

4. Kazılar tam alanda gerçekleştirilecektir.

5. Destekleme öncesinde 2 rauntta bir, radyal yönde 2m ara ile L=9 m boyunda delgi ve enjeksiyon işlemleri yapılarak kazı çevresinde zemin iyileştirme yapılacaktır.

6. Göçük malzemesinde, aynada 30 cm kalınlığında fiberli püskürtme beton ve giriş ve çıkış tarafından yapılacak enjeksiyon uygulaması ile iyileştirme yapılacaktır.

7. Üst yarıda, alt yarı ve tabanda püskürtme beton kalınlığı 20cm'dir. Püskürtme beton 2 kat Q221/221 çelik hasır ile donatılacaktır.

8. Çelik iksa (NPI160) 1 m ara ile kullanılacaktır. Üst yarıda yerleştirilen çelik iksalar,

alt yarı kazısı sonrası alt yarıda, taban kazısı sonrası da tabanda tamamlanacaktır.

9. D=4" çapında L=9 m boyunda Şemsiye kemer boruları, 0.25 m radyal aralık ile çift kat olarak yerleştirilecek, 6 rauntta bir bindirme yapılarak bu işlem tekrarlanacaktır.

10. Üst ve alt yarıda radyal yönde 2 m ara ile L=4.00 m boyunda Ø 26 mm çapında SN tipi bulon yerleştirilecektir.

11. Kazı makineli kazı şeklinde yapılacaktır.

12. Püskürtme betonda C20/25 beton kullanılacaktır.

13. Kemer betonunda C30/37, temel kirişleri ve taban kaplamasında C25/30 beton kullanılacak, kemer betonu, temel kirişi ve taban kaplaması donatılı imal edilecektir.



## 4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

### 4.1. NATM Yöntemine Uygun Hesap Yöntemleri

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde, tünel güzergâhını çevreleyen zemin veya kaya ortamı; aynı zamanda tünel yapısına etkiyen yükü ve tünel kaplaması ile birlikte taşıyıcı sistemi oluşturduğu için, tünelin açımından önce ki ve sonra ki durumunu birlikte gösteren bir hesap modelinin yapılmasını mümkün kılmamaktadır. Kazının ve destek sisteminin karşılıklı etkileşmesinden doğan ikincil gerilme durumunu tespit edebilmek için, birincil gerilme durumunun belirlenmesi gerekmektedir.

Birincil gerilme durumunun belirlenmesi, zemini anizotrop, süreksiz ve heterojen yapısından dolayı birçok kayaçta oldukça zordur. Tüm bu hesapların yapılabilmesi için geoteknik koşullar, statik sistem, hesap, kazı ve iksa yöntemleri, güvenlik ilkeleri ve yerinde ölçümler bir bütün olarak ele alınmalıdır. Böylece çeşitli aşamalarda yapılabilen kabul hataları, koşulların daha iyi belirlenmesi ve tecrübe yardımıyla düzeltiler. Bu neden NATM'in en önemli özelliklerinden biridir.

Tünelin kazılmasından sonra oluşacak gerilme ve yer değiştirmeler ile tünel kaplamalarına gelecek yüklerin belirlenebilmesi için üç yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlar: ampirik yöntemler, analitik yöntemler ve sayısal yöntemlerdir. Bu yöntemler birlikte kullanılacağı gibi tek tek de kullanılabilirler.

Ampirik yöntemler genellikle örnek zemin veya kaya üzerinde yapılan ölçümlere ve arazi verilerine dayanır. Daha önce yapılmış olan tünel kazıları ve yer değiştirme ölçümleri ile kaplama tipi seçimleri incelenerek hesaplamalarda kullanılır.

Mühendislik mekaniğinde problemler basit elemanlara ayrılarak kolay çözülebilir, eşitliklerle ifade edilir ve bu eşitlikler çözümlenerek analiz yapılır. Bu tür çözümler için ortaya konan analiz yöntemi analitik yöntemdir. Karmaşık şekilli kazılarda, kaya kırık zonları olan bölgelerde, simetrik olmayan problemlerde ve izostatik gerilme durumuna uymayan arazi gerilme durumlarında analitik yöntemler başarıyla uygulanamamaktadır. Bu tip problemlerde çözülmesi gereken eşitlik sayısı büyük oranda artmaktadır. Bu nedenle bu tür problemler için diğer yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır.

Tünel kazılarının karmaşık geometrik ve jeolojik biçimlere sahip olması durumunda



gerilme-şekil değiştirme analizleri bölgelendirmeyi gerektirir. Bu analiz yöntemleri çok karmaşıktır ve elle çözülmesi mümkün olmadığından sayısal yöntemlerin kullanılmasını gerektirir. Sayısal hesap yöntemleri tünel mühendisliğinde kullanılan hesap yöntemlerinin günümüzde tercih edilen en verimli ve karmaşık grubunu oluşturmaktadırlar. Bu durumyla sayısal hesap yöntemleri analitik yöntemlerin ileri bir aşaması olarak görülebilir.

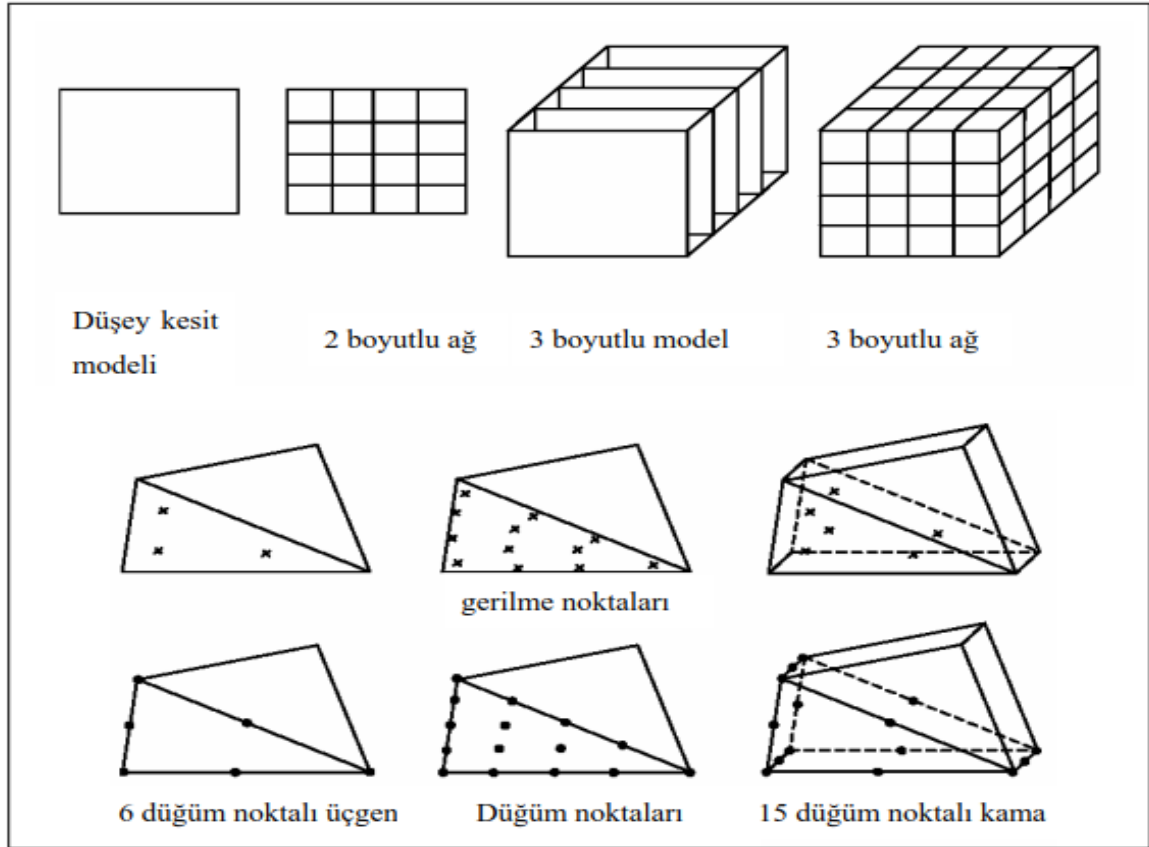
Sayısal yöntemlere temel olan üç farklı model tanımlanmıştır. Bunlar süreklilik modeli, süreksizlik modeli ve yatak katsayısı modelleridir. Süreklilik modeline uygun sayısal yöntemler; sonlu elemanlar yöntemi, sonlu farklar yöntemi ve sınır elemanlar yöntemidir. Süreksizlik modeline uygun hesap yöntemi ayrık (bölgesel) elemanlar yöntemidir. Yatak katsayısı modeline uygun hesap yöntemi de elastik kiriş elemanlar yöntemidir (Ergin, 1992).

Bu tez kapsamında yapılan tünel analizlerinde sonlu elemanlar yöntemini kullanan Phase<sup>2</sup> programı kullanılmıştır.

#### **4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi**

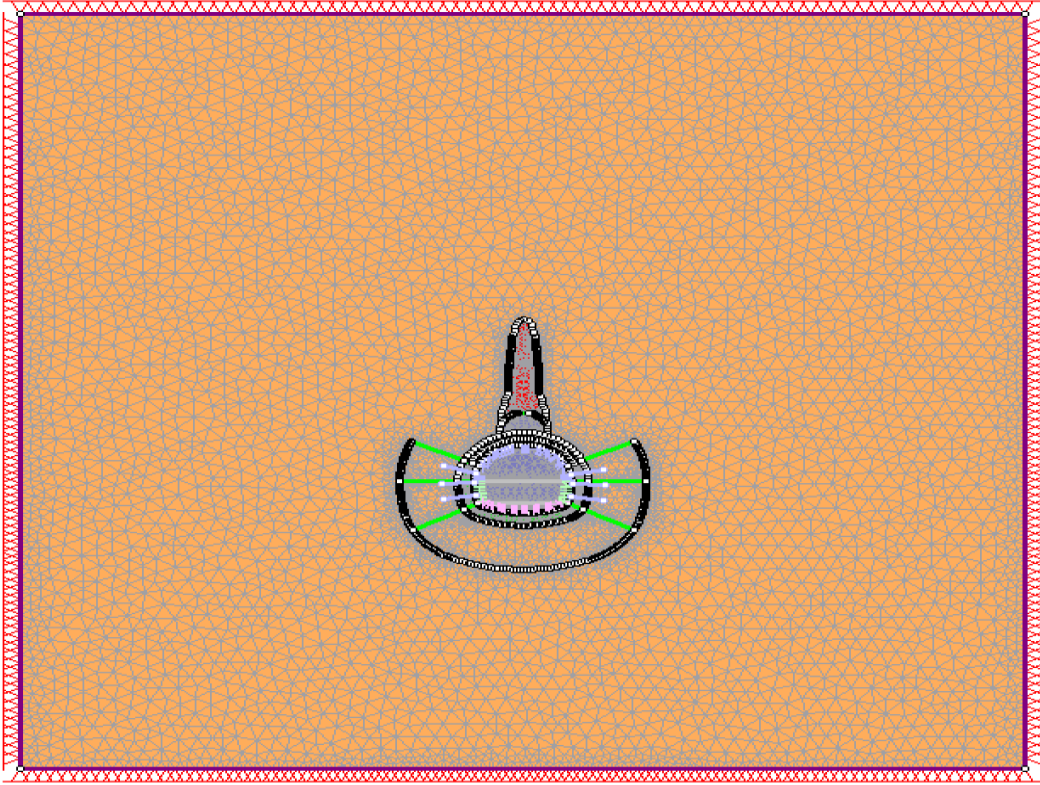
Sayısal çözüm yöntemlerinden olan sonlu elemanlar yönteminin kullanımı, bilgisayarların günümüz teknolojik gelişmeleri neticesinde kullanımının artması ile birlikte hızla gelişme göstermiştir. Önceleri sadece yapı analizi için kullanılan bilgisayarlar, günümüzde dayandığı prensipler ve çalışma yönteminin uygunluğu sonucunda tüm mühendislik alanlarında kullanılmaktadır.

Yöntemin genel çalışması incelendiğinde; herhangi bir sürekli ortamın sonlu eleman denilen (yani geometrik olarak tanımlı ve boyut olarak sınırlı) parçacıklara bölünmesi esas alınır (Şekil 63). Süreksizlikler ise ayrıca modellenebilmektedir. Bu elemanlar birbirlerine düğüm noktası denilen köşe noktalarından bağlıdırlar. Her bir sonlu elemana ait gerçek yer değiştirme değerleri bazı basit fonksiyonlar yardımıyla kurulduktan sonra bu yer değiştirmelerin düğüm noktalarındaki değerleri yaklaşık olarak bulunur.

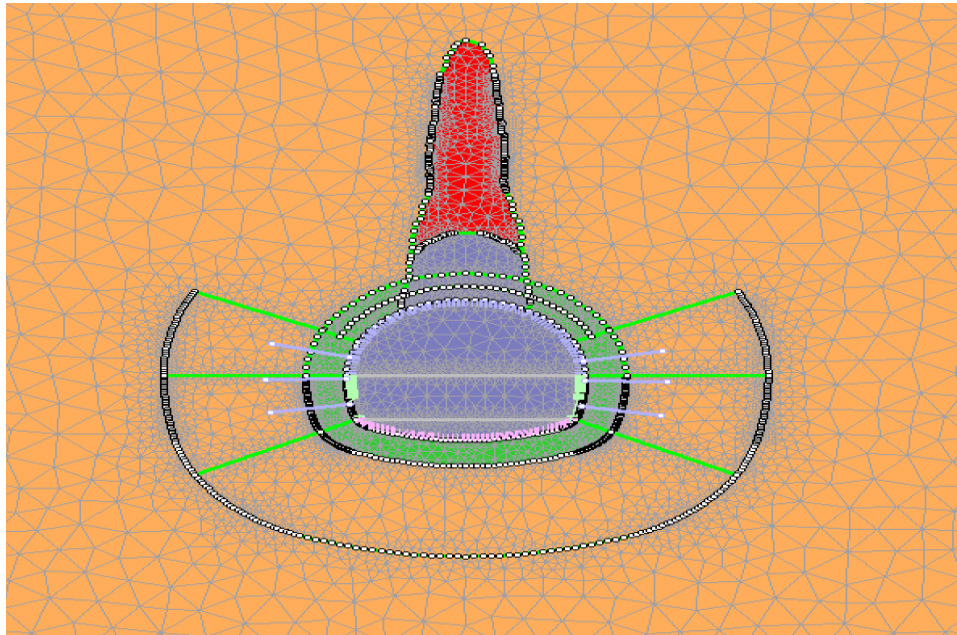


Şekil 63. Sonlu Elemanlar Yönteminde Düğüm Noktası, Gerilme Noktaları ve Eleman  
(Brinkgreve, Broere, 2004)

Bir sonlu elemanın davranış denklemi kullanılarak, düğüm noktalarının yer değiştirme değerleri elde edilir. Tüm yapının davranış denklemleri ise yapıyı oluşturan elemanların denge denklemlerinin, elemanlar arasındaki yer değiştirme sürekliliğini sağlayacak şekilde toplanması ile belirlenir. Elde edilen bu denklemler bilinen yer değiştirme sınır şartlarını sağlayacak şekilde değiştirildikten sonra ortaya genellikle, bilinmeyen değişkenleri yer değiştirmeleri olan bir lineer cebirsel denklem takımı ortaya çıkar. Denklem takımının çözülmesi ile düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler hesaplanmış olur. Bu yer değiştirme değerlerinden türetilen ifadeler yardımıyla şekil değiştirme ve gerilme değerleri elde edilir. Bu çalışmada incelenen tüneller için oluşturulan bir sonlu elemanlar modeli Şekil 64. ve 65.'de gösterilmiştir.



Şekil 64. Oruçlu Tüneli Km:45+030 Kesimi İçin Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli



Şekil 65. Oruçlu Tüneli Km:45+030 Kesimi İçin Oluşturulan Sonlu Elemanlar

Modeli-2

Geoteknik mühendisliğinde geleneksel yöntemlerle çözülemeyen karmaşık problemlerin hesaplanmasında sonlu elemanlar yönteminin kullanımı artmıştır. Özellikle tünel mühendisliğinde inşaat kademeleri, değişken zemin tabakaları, zeminin elasto-plastik özellikleri, zemin kaplama ilişkileri ve benzeri özellikler dikkate alındığında yöntemin kullanılmasının büyük avantajları olduğu açıktır.

Bu karmaşık problemlerin çözümünün yanı sıra sonlu elemanlar yöntemi; yapının son boyutlarında karara varılmasında, ölçüm tekniklerinden elde edilmiş gözlemsel davranışların değerlendirilmesinde, değişik yükleme ve geometri şartlarının uygulanmasında ve diğer yöntemler ile yapılmış tasarımın güçlendirilmesinde etkili bir şekilde kullanılabilir.

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi için oluşturulan bir Sonlu Elemanlar Modelinde bazı hususlara dikkat edilmelidir. Bunlar aşağıda sıralanmıştır (Ergin, 1992):

1. Oluşturulan modelin dış sınırlarının, bulunan şekil değiştirme, gerilme ve yer değiştirme değerlerini etkilememesi için sınırların tünelden yeterince uzakta olmalıdır.

2. Yeraltının bilinmeyen özellikleri, yeraltı ve tünel davranışının karmaşıklığı ve zeminin yapısal denklemlerinin formüle edilmesindeki zorluklar nedeniyle gerçek koşulları modellemek mümkün değildir. Bütün koşulları detaylı şekilde modellemek ne yararlı ne de mümkün olduğu için basitleştirilmiş bir model kullanılmalıdır. Model basitleştirilmesi şu yaklaşımlardan birini veya birkaçını kullanarak yapılabilir.

- Üç boyutlu durumların iki boyutta modellenmesi
- Bölgesel simetrinin kullanılması

3. Bugün dünyada kullanılan, birçok genel amaçlı sonlu elemanlar programı vardır. Her programın kendi eleman şekilleri vardır. Programı kullanmadan önce özel yeraltı yapılarına uygun elemanları içerip içermediği incelenmelidir (örneğin: ankraj, tünel kaplaması, geogrid vs...).

4. Yeraltının modellenmesi de, hesap modelinin oluşturulması kadar önemlidir. Aşağıda yeraltı modellenmesi sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar sıralanmıştır.

- Hesap modelinin basitleştirilmesi kavramı yeraltı modeli için de geçerlidir.
- Analizin doğruluğu, çözümün yakınsaklığı ve sayısal hesap sırasındaki yuvarlatma hatalarını en aza indirecek sonlu eleman tipinin ve boyutunun seçilmesine dikkat edilmelidir.

•Teknik girişim ile çevre etkileşimi (yeryüzündeki yapılar, altyapı tesisleri vs.) modelleme esnasında dikkate alınmalıdır.

- Yeraltı suyu dolaşımı, su-yapı etkileşiminin modellenmesi, kumlu zeminlerde

sıvılaşma riskleri göz önünde bulundurulmalıdır.

- Deprem vb. dinamik yüklerin modellenmesi dikkatle yapılmalıdır. Göz ardı edilmemelidir.

- Ortamı oluşturan mühendislik jeolojisi özelliklerinin (ayırışma durumu, çatlaklılık-kırık durumu gibi süreksizlikler, faylar, kayacın dokusal özellikleri, yerinde kaya dayanım özellikleri) geomekanik büyüklükler ile doğru olarak temsil edilmesi gereklidir.

- Kazı ilerleme yönüne bağlı olarak tünel aynasında meydana gelecek gerilme ve yer değiştirmelerin belirlenmesine yönelik 3 boyutlu analiz yapılmalıdır.

- NATM'in temel prensiplerinden olan kademeli elemanlarının modellenmesi sağlanmalıdır.

- Uygulanacak olan sağlamlaştırma ve iyileştirme elemanlarının modellenmesi yapılmalıdır.

Bu sayısal hesaplamalar sonucunda; yüzeyin, yeraltının ve tünel kaplamasının yer değiştirmesi, zemindeki, kaplamadaki ve zemin ile kaplama arasındaki gerilmeler elde edilir. Elde edilen bu gerilme ve yer değiştirme değerlerinin tünel inşası sırasında ve daha sonra doğrulanan ölçüm değerleri ile karşılaştırılması sonucunda çeşitli sonuçlara ulaşılır. Bunlar:

- Tünel tasarımı ve hesaplarının doğrulanması

- Ölçülen değerlerin yorumlanması; hesaplanan değerler arazide ölçülen değerlerin önemini belirlemek için bir referans olmaktadır.

- Sayısal modelin geçerliliğinin kanıtlanması ve kalibrasyonu

Model basitleştirmenin etkisini öğrenmek ve tasarımında kullanılan malzeme ve zemin özelliklerinin tahminlerini doğrulamak için modelin onaylanması ve kalibrasyonu çoğunlukla gereklidir. Bunlar test edilmeden yapılan hesap sonuçlarının doğru olup olmadığının tespiti zor olacaktır.

### 4.3. Sayısal Analizler

Kaya sınıflama yöntemleri ile değerlendirmesi yapılan kaya ortamlarında yapılacak tünel kazısını emniyetli olarak taşıyacak destek sistemleri, yine aynı kaya sınıflama sistemleri tarafından önerilen ve geçmişteki durum analizlerinden biriken verilerle oluşturulmuş tablo ve grafikler yardımıyla seçilmiş ve taşıyıcı sistemler bir ön boyutlama şeklinde tahmin edilmiştir.

Bu kısımda kaya sınıflama yöntemleri ile ön boyutlandırması yapılmış destek sistemleri bir başlangıç noktası olarak alınıp, sayısal bir yöntem kullanılarak tünel kazısı ve destek sistemleri analiz edilecek ve tasarlanacaktır.

Sayısal analizler için sonlu elemanlar metodu ile hesaplama yapan bir bilgisayar programı olan “Phase<sup>2</sup>” kullanılacaktır. Phase<sup>2</sup> yeraltı kazıları için 2 boyutlu gerilme hesabı ve destek sistemi tasarımı için özel olarak geliştirilmiş bir bilgisayar programıdır.

Program 2 boyutlu analiz yapabildiği için, oluşturulabilecek modeller “Düzlem Birim Yer Değiştirme (Plane Strain)” ve “Eksenel Simetrik (Axisymmetric)” ile sınırlıdır.

Tez çalışmasına konu olan proje için “Düzlem Birim Yer Değiştirme” modeli kullanılmıştır. Bu noktada, 2 boyutlu modeller kullanarak “Düzlem Birim Yer Değiştirme” analizi yapmanın beraberinde getirdiği kabullerden kısaca bahsedilecek olursak;

- Hazırlanacak modelde kullanılacak sonlu elemanlar ağı örgüsü genişliği için, tünel kazısının yanlarında ve altında yeterli miktarda mesafenin bırakılması (Literatürde tavsiye edilen değerler: yanlarda 3 tünel çapı, altta 2,5 tünel çapı kadar bir mesafe).

- Sınır koşullarının (boundary conditions) yer değiştirme ve gerilmeleri doğru yansıtabilecek biçimde seçilmesi.

- Kaya ortamının homojen ve izotropik (her yönde aynı mekanik özelliklere sahip) kabul edilmesi.

- Tünelin açılacağı derinlikte gerilme ölçümü yapılmadığı için, gerilmelerin derinlikle doğru orantılı ve kayanın birim hacim ağırlığına bağlı olarak arttığı.

- Tünelin, analizinin yapıldığı kesite dik yönde, sonsuz uzunlukta olduğu ve bu yöndeki gerilme ve yer değiştirmelerin sıfır olduğu

- Tünel kesitinin değişmediği olarak sayılabilir.

Analiz yapılacak kesitler, aynı tip kaya sınıfının, tünel güzergâhı boyunca kaya örtü kalınlığı en fazla olan noktasından seçilerek işlemler gerçekleştirilmiştir.

#### **4.3.1. NATM’in Genel Prensipleri ve Sayısal Analiz Modelleri**

Yeraltında açılan bir oyuğun çevresindeki kaya ortamı, kazı yüzeyine uygulanacak göreceli olarak hafif bir destekleme ile oldukça etkili yük taşıyabilir bir eleman haline dönüştürülebilir. Bu noktadan yola çıkarak NATM’in 3 temel prensibini şöyle

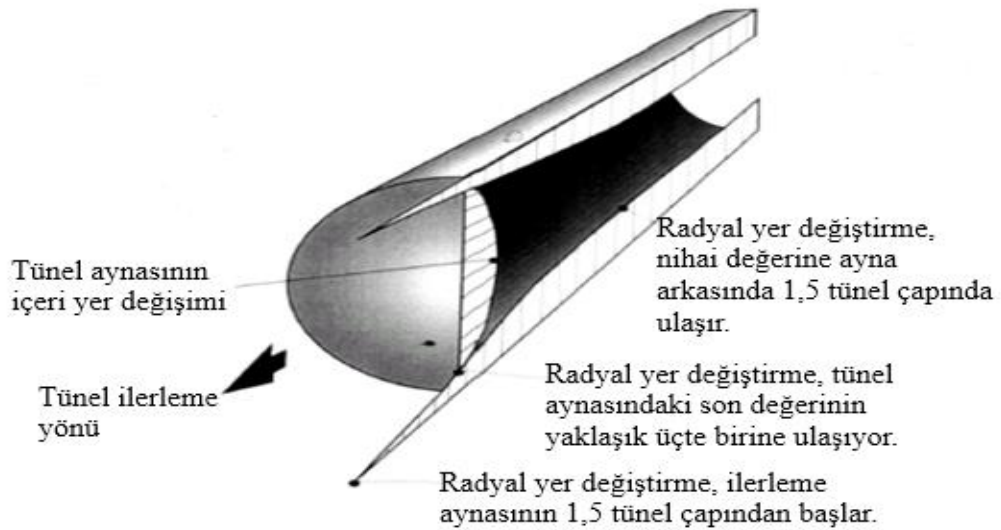
sıralayabiliriz;

1. Bir tünel kazısı, çevresindeki kaya ortamı tarafından maksimum derecede (mümkün olan en fazla miktarda) desteklenecek biçimde gerçekleştirilmelidir.

2. Uygulanacak destekleme sistemi (ya da sistemleri) tünel kazısı çevresindeki kaya ortamının elastik yer değiştirmelerin izin verecek ancak gevşemesine müsaade etmeyecek şekilde tasarlanmalıdır.

3. Tasarlanan destekleme sisteminin amaca uygun olup olmadığı saha ölçümleri ile takip edilmeli, yer değiştirmelerin istenilen düzey aralığında kalması ile akabinde iç kaplama betonu tatbik edilmelidir.

NATM' in genel prensiplerine kısaca baktıktan sonra, bu prensiplere uygun bir tasarım yapabilmek için yeraltında gerçekleştirilen bir kazının çevresindeki kaya ortamının davranışını irdelemekte fayda vardır. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan gözlemler, deneyler ve analitik çalışmalardan bilindiği üzere yeraltı kazıları etrafındaki yer değiştirme ve gerilme dağılımları üç boyutlu bir karaktere sahiptir. Şekil: 66'de görüldüğü gibi kaya ortamındaki yer değiştirmeler ilerlemekte olan bir tünelin aynasından 1.0 - 1.5 tünel çapı ileriden başlayıp, tünel aynasında maksimum (nihai) yer değiştirme değerinin yaklaşık üçte birine ulaşır, tünel aynasının yine 1.0 - 1.5 tünel çapı kadar gerisinde ise maksimum (nihai) yer değiştirme oluşur.



Şekil 66. İlerleyen Bir Tünel Etrafındaki Yer Değiştirme Paterni (E. Hoek 2000)

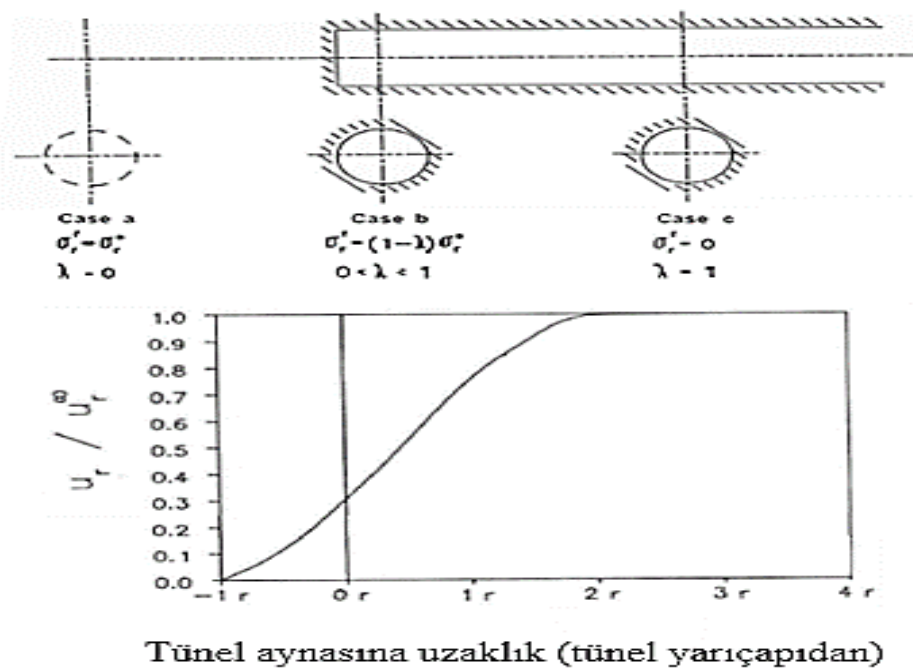
Daha önce bahsedildiği gibi yeraltı kazısı ve destek sistemlerini analiz etmek ve



tasarlamak için 2 boyutlu modelleme yapabilen bir bilgisayar programı kullanılacaktır. Bu durumda kaya ortamında oluşacak 3 boyutlu gerçek davranışın, 2 boyutlu bilgisayar modellerine gerçeği en iyi biçimde yansıtacak teknikler kullanılarak adapte edilmesi gerekmektedir.

Matematiksel formülasyon ve çözümleme bilgisayar programı "Phase<sup>2</sup>" ile yapılacağı için, burada fiziksel davranış üzerinde durmak yerinde olacaktır.

Üç boyutlu davranışın iki boyuta indirgenmesi ve düzlem birim yer değiştirme problemi haline getirilmesi, incelenen tünel enkesitinde radyal yer değiştirmelerin ne kadarının, kazının hangi aşamasında gerçekleştiğini kestirebilmeyi gerektirir. Tünel inşaatının ayna bölgesinde gerçekleştirildiği düşünülürse tünel aynasındaki yer değiştirme miktarları ayrı bir önem kazanır, Hoek (2000) bu oranı nihai yer değiştirmenin 1/3' ü olarak, Panet & Guenot (1982) ise bu oranı nihai yer değiştirmenin %30' u olarak vermektedirler (Şekil 67).



Şekil 67. Ayna İlerlemesine Bağlı Olarak Tünel Radyal Yer Değiştirmenin Değişimi  
(Panet & Guenot (1982))

Yukarıdaki açıklamalardan yola çıkarak destekleme sisteminin hemen aynada ve toplam radyal yer değiştirmenin belirli bir kısmının oluşmuş olduğu durumda uygulanacağı kabul edilmiştir, bunun bir diğer anlamı destekleme sisteminin aynada oluşmuş yer değiştirme ile nihai toplam yer değiştirme miktarı arasındaki farktan kaynaklanacak kaya



yükünü karşılayacak olmasıdır.

Yaklaşan tünel kazısının, tünel aynası içerisinde kalan kaya ortamı üzerindeki gevşetici etkisi de destekleme sisteminin alacağı yükün doğruya en yakın biçimde tahmin edilebilmesi için göz önüne alınmalıdır. Bu etki, kayanın elastik parametrelerinin belirli oranlarda azaltılmasıyla yapılan çözümlemeyle sonuçlara yansıtılabilir.

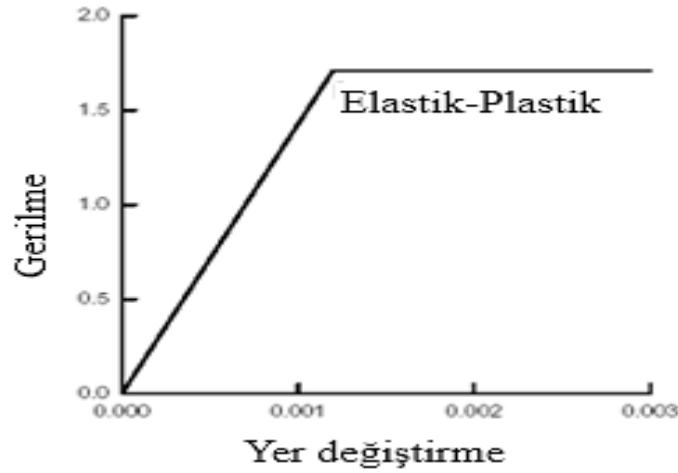
Yapılacak sayısal analizlerde dikkate alınması gereken diğer bir konu ise, tünel güzergâhında mevcut kaya formasyonunda yapılabilecek kazının ancak aşamalara bölünerek gerçekleştirilebilecek olması ve bu aşamaların gerçeğe en yakın biçimde matematiksel modele yansıtılmasıdır.

#### **4.3.2. Sayısal Analizlerde Kullanılacak Parametreler**

Yapılmış olan jeolojik çalışmalar, sondajlar ve gözlemsel jeolojik çalışmalar neticesinde ortaya çıkan tünel güzergâhı kaya formasyonları, oluşturulacak sayısal analiz modelinde yer değiştirme ve göçme özelliklerini veren parametrelerle tanımlanmak durumundadır. Bunun yanında tünel kazısının yapılacağı ortamda kazıdan önceki ve sonraki gerilme dağılımlarını doğruya en yakın biçimde tespit edebilmek, yapılacak analizin sağlıklı sonuçlar verebilmesi için çok önemlidir. Bahse konu mühendislik parametreleri önceki bölümlerde detaylı biçimde anlatılmış ve güzergâhta mevcut kaya türleri için yer değiştirme özellikleri ve göçme kriterleri tanımlanmıştır.

Sayısal modeller kullanılarak, kaya ortamında gelişen göçme sonrası (post-failure) plastik davranışı dikkate alarak, yapılan gerilme analizlerinde göçme sonrası kaya mukavemet ve elastik parametrelerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Yapılabilecek tahminlere ilişkin çok kesin ve belirli kurallar olmamakla birlikte, geçmiş deneyim ve çalışmalardan elde edilen ipuçları çeşitli kaynaklarda verilmektedir.

Bahse konu kaya kalitesindeki ortamlarda tünelin açıldığı bölge çevresindeki göçme sonrası kaya malzemesi davranışı mükemmel plastik davranış kabulüyle matematik model haline dönüştürülebilmektedir (Şekil 68.). Bunun anlamı mukavemetin aşıldığı gerilme bölgelerinde kaya herhangi bir hacim değişikliğine uğramadan, sabit gerilme seviyesinde deforme olmaya devam edecektir (Hoek&Brown 1997, Hoek 2000).



şekil 68. Kaya Kütelleri İçin Önerilen Göçme Sonrası Gerilme-Birim Yer Değiştirme Davranışı (Hoek&Brown, 1997)

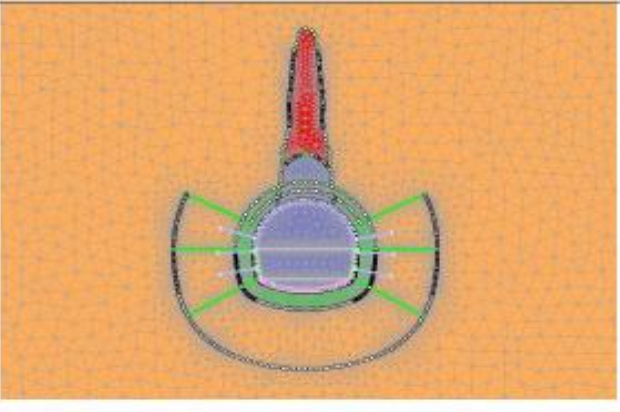
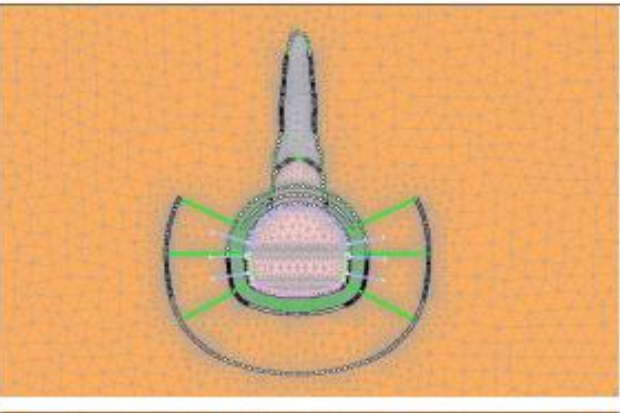
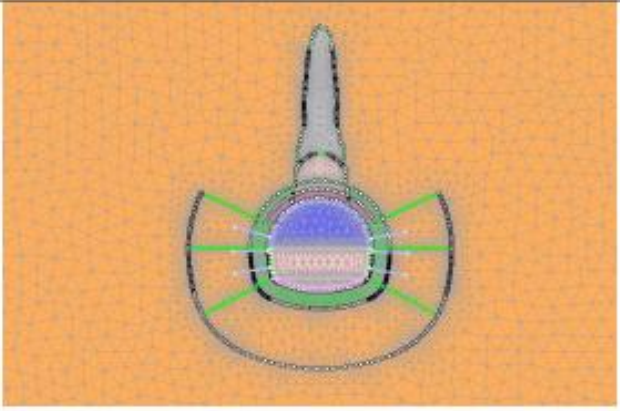
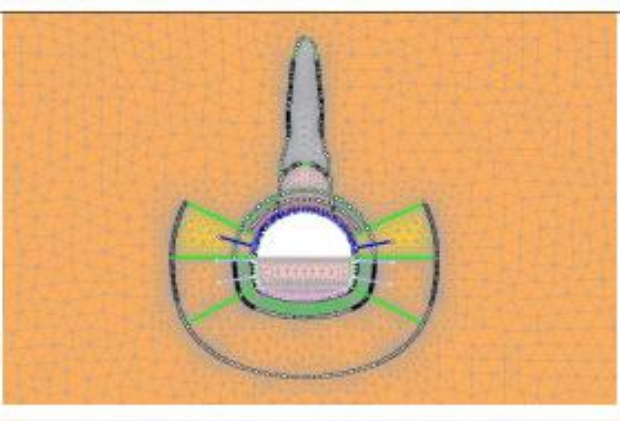
#### 4.3.3. Tünel Kritik Kesitlerinin Sayısal Analiz Modelleri

Bu analizlerde, kaya birimleri Hoek-Brown yenilme ilkelerine tabi elasto-plastik malzemeler olarak kabul edilerek ilgili parametreler önceki bölümlerde ifade edilen kaya sınıflamaları ve özellikle RMR puanları yardımıyla belirtilmiştir. Analizler Phase<sup>2</sup> programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kazı ve destekleme aşamaları dikkatli ve ayrıntılı bir şekilde etüt edilmiş ve söz konusu aşamalar arasındaki etkileşimin uygun şekilde modellenmesine gayret edilmiştir.

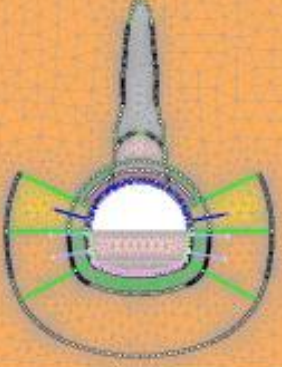
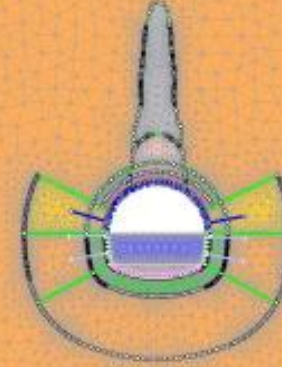
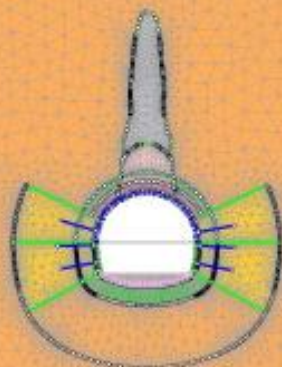
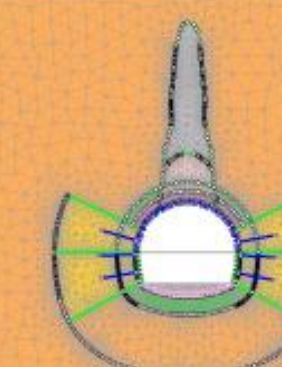
İlerlemekte olan tünel kazısının ayna çevresinde yaratacağı gevşemeden dolayı oluşacak yer değiştirmelerin modelde de gerçekleşmesi amacıyla malzemenin örselenmiş durumdaki elastisite modülü % 40-60 oranında azaltılmıştır.

Ayrıca yapım aşamalarının gerçeğe en uygun şekilde modellenmesi amacıyla püskürtme betonun mukavemeti aşama aşama arttırılmış, bu sayede beton karakteristik mukavemetine ulaşana kadar gerçekleşecek yer değiştimelere izin verilmiştir. Bu amaçla C20 betonun elastisite modülü ilk aşamada 0.5 GPa, daha sonra 5 GPa, son olarak da nihai değer olan 22.5 GPa'ya çıkarılmıştır.

Tünel kritik kesitinde gerçekleştirilen analizlerin aşamalarını açıklamak amacıyla aşağıda bir örnek analiz modelinin aşamaları anlatılmaktadır.

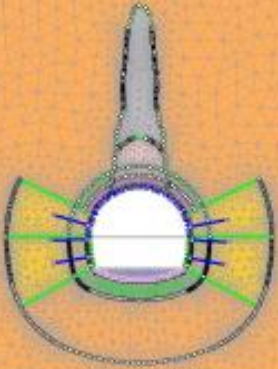
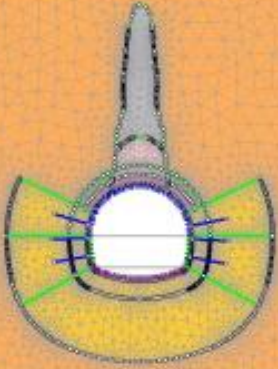
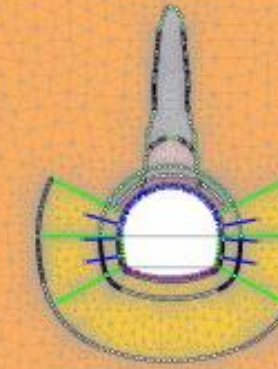
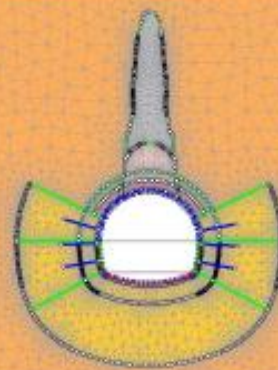
	<p><b>1. Aşama:</b> Tünel kazısı öncesi göçük durumu modele yansıtılmıştır.</p>
	<p><b>2. Aşama:</b> Göçüğün enjeksiyonlar doldurulması ve göçük malzemesinde enjeksiyon uygulaması yapılması modele yansıtılmıştır.</p>
	<p><b>3. Aşama:</b> Deformasyon modülü düşürme üstyarı için uygulanmış ve tahkimat öncesi enjeksiyonlanmış birimde oluşacak deformasyona izin verilmiştir.</p>
	<p><b>4. Aşama:</b> Üst yarı kazısı gerçekleştirilmiş, enjeksiyon uygulaması ile birlikte kaya bulonu ve püskürtme betonundan oluşan destekleme sistemi tanımlanmıştır.</p>

Şekil 69. Analiz Model Aşaması-1

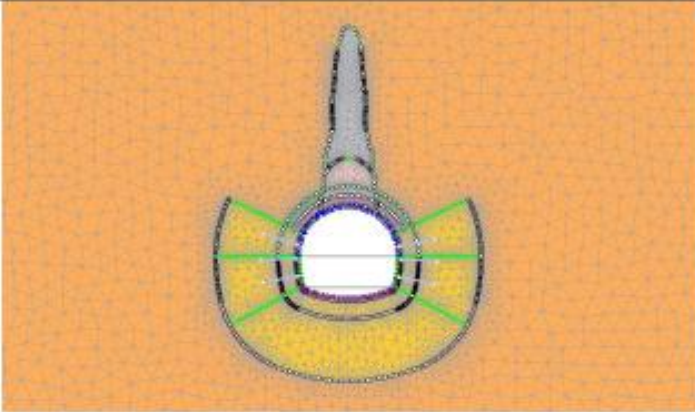
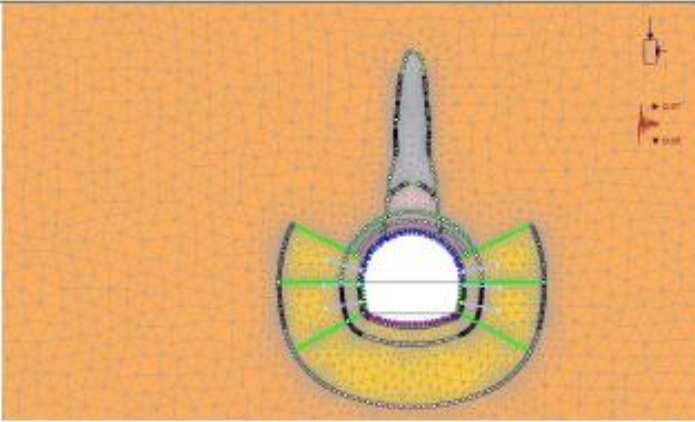
	<p><b>5. Aşama:</b> Üstyarı için püskürtme beton dayanım parametreleri artırılmıştır.</p>
	<p><b>6. Aşama:</b> Deformasyon modülü düşürme altyarı için uygulanmış ve iksa öncesi enjeksiyonlanmış birimde oluşacak deformasyona izin verilmiştir.</p>
	<p><b>7. Aşama:</b> Altyarı kazısı gerçekleştirilmiş, enjeksiyon uygulaması ile birlikte kaya bulunu ve püskürtme betonundan oluşan destekleme sistemi tanımlanmıştır.</p>
	<p><b>8. Aşama:</b> Altyarı için püskürtme beton dayanım parametreleri artırılmıştır.</p>

Şekil 70. Analiz Model Aşaması-2



	<p><b>9. Aşama:</b> Deformasyon modülü düşürme taban için uygulanmış ve iksa öncesi enjeksiyonlanmış birimde oluşacak deformasyona izin verilmiştir.</p>
	<p><b>10. Aşama:</b> Taban kazısı gerçekleştirilmiş, enjeksiyon uygulaması ile birlikte kaya bulunu ve püskürtme betonundan oluşan destekleme sistemi tanımlanmıştır.</p>
	<p><b>11. Aşama:</b> Taban için püskürtme beton dayanım parametreleri artırılmıştır.</p>
	<p><b>12. Aşama:</b> Püskürtme beton dayanımları nihai değerlerine çıkartılmıştır.</p>

Şekil 71. Analiz Model Aşaması-3

	<p><b>13. Aşama:</b> Kemer betonu e taban kaplaması inşası tamamlanmış ve uzun dönemde bulonların etkilerini kaybettiği kabulü yapılmıştır.</p>
	<p><b>14. Aşama:</b> Yatay ve düşey deprem kuvvetleri sisteme pseudo - statik olarak etkilmiştir.</p>

Şekil 72. Analiz Model Aşaması-4

## 5. BULGULAR

### 5.1. Tünel Analizleri

Tünelde göçük bölgesi, Km: 45+030'da Göçük Islahı Kazı ve Destek Sistemi - Tip – 2 ve yukarıda özetlenen parametreler ile oluşturulan sonlu elemanlar analizi kullanılarak incelenmiştir.

Tablo 75. Km:45+030 Kesit Değerleri

Kesim No	Km	Analiz Kesiti	Destek Sınıfı	Örtü Yüksekliği (m)
1	43+710-45+950	45+030	Tip-2	255

#### 5.1.1. Göçük Kesimi (Km:45+017-45+047)

Tünelin göçük bölgesinde, göçük ıslahı kazı ve destek sistemi önerilmiştir. Bu kazı ve destek sisteminin tahkiki amacı ile Km: 45+030'daki en kesit esas alınarak sayısal analiz yapılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ve modelde kullanılan parametreler Şekil 85.'de gösterilmiştir.

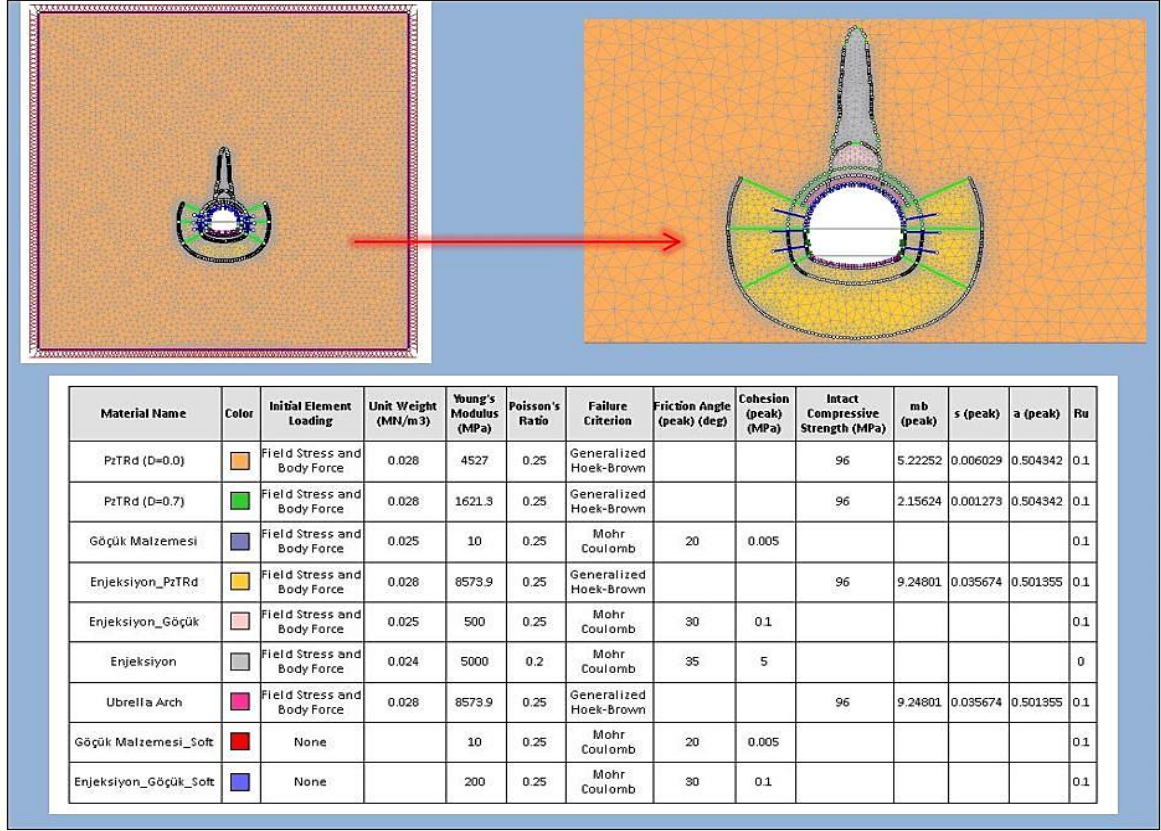
Kaya birimin parametreleri yukarıda verildiği şekilde kullanılmıştır. Örtü yükü için 255 m örtü yükü analizde tanımlanmış ve yatay zemin yükünün, düşey zemin yüküne oranı "k" değeri;

$$k = \frac{k_h}{k_v} = 0.33 + 9.5 \times E_h \left( 0.001 \frac{1}{z} \right) \quad (26)$$

eşitliği kullanılarak bulunur (Sheorey 1994).

$$k = \frac{k_h}{k_v} = 0.33 + 9.5 \times 4.5 \left( 0.001 + \frac{1}{255} \right) = 0.54 \quad (27)$$

olarak hesaplanmış ve kullanılmıştır.

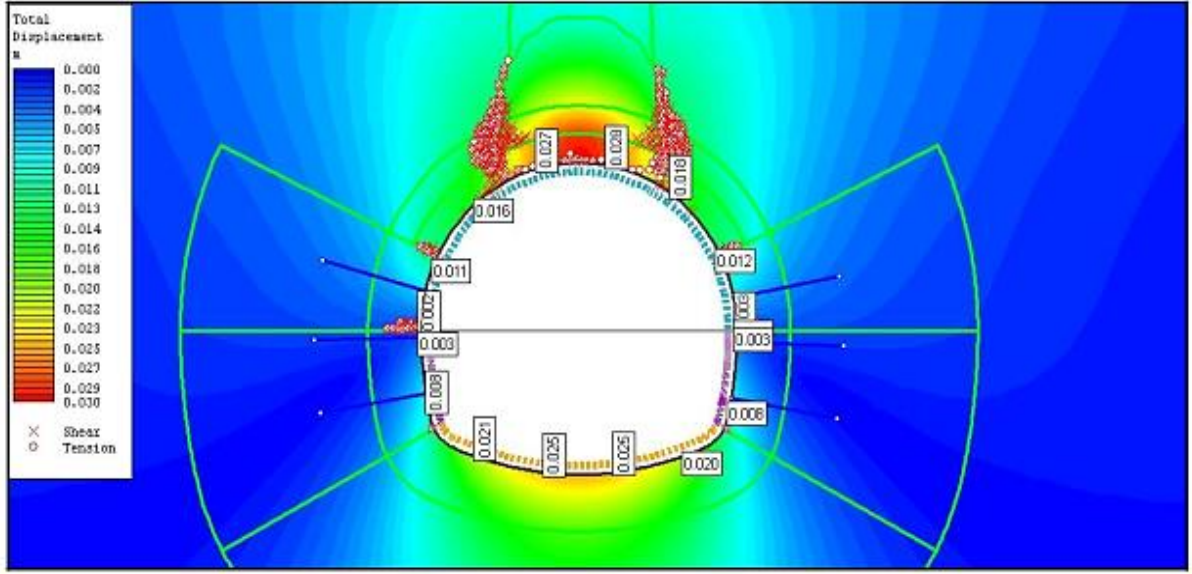


Şekil 73. Sonlu Elemanlar Analiz Modeli ve Malzeme Özellikleri

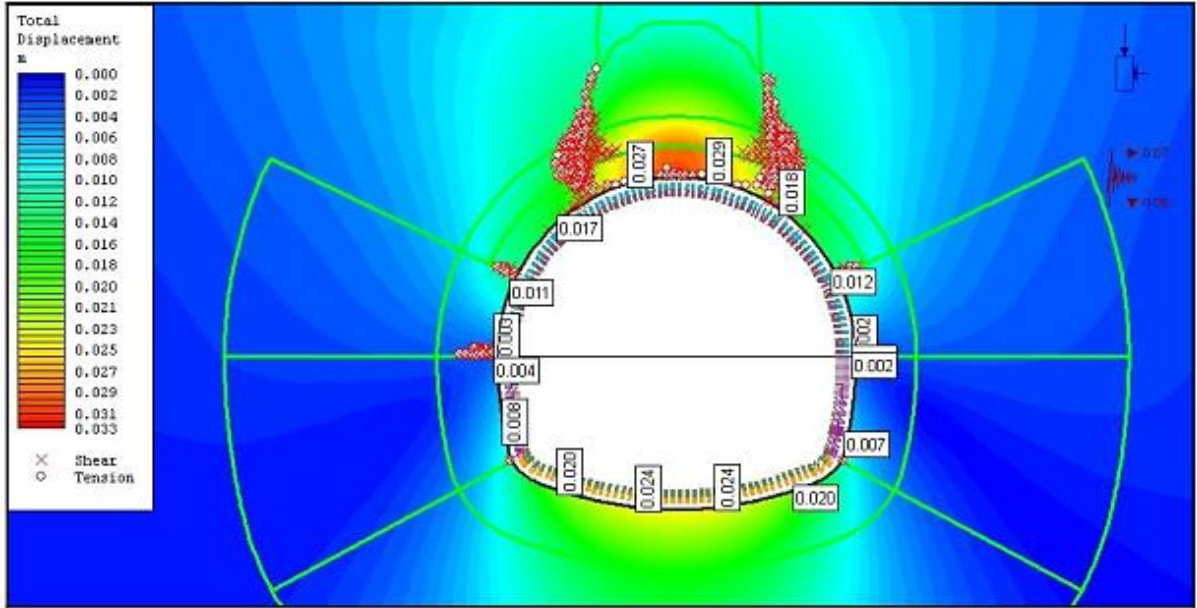
### 5.1.2. Analiz Sonuçları

Ön destekleme sonunda ve uzun dönem depremlili durumda elde edilen yer değiştirme değerleri ve kaya yenilme zonları Şekil 74. ve 75.'de görülmektedir.





Şekil 74. Toplam Deplasman Miktarları (1. Tüp İksa Sonrası)

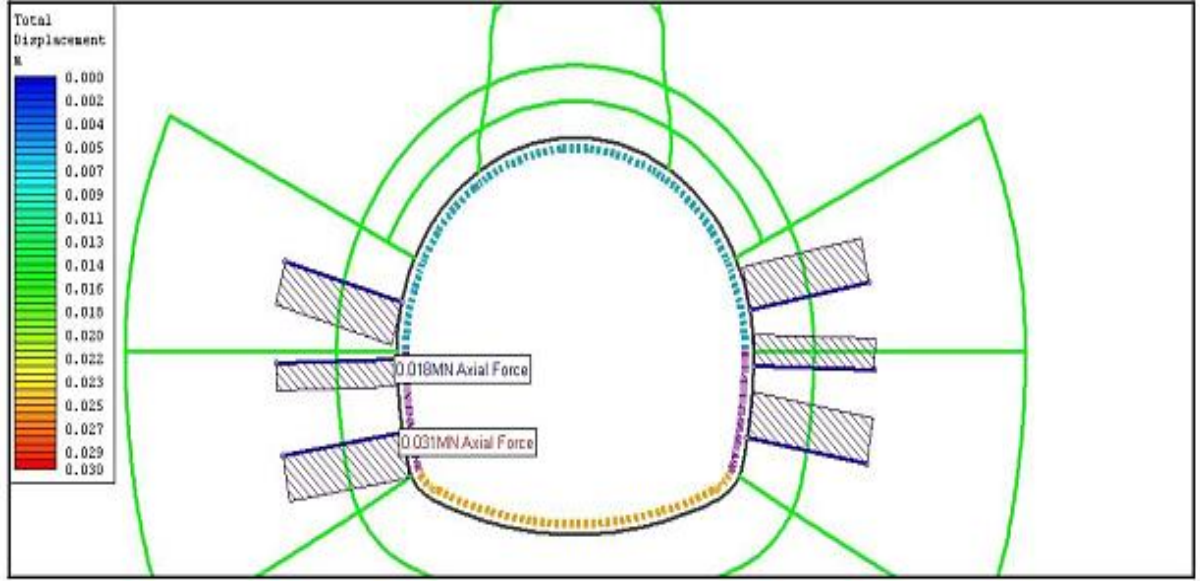


Şekil 75. Toplam Deplasman Miktarları (Depremlı Durum)

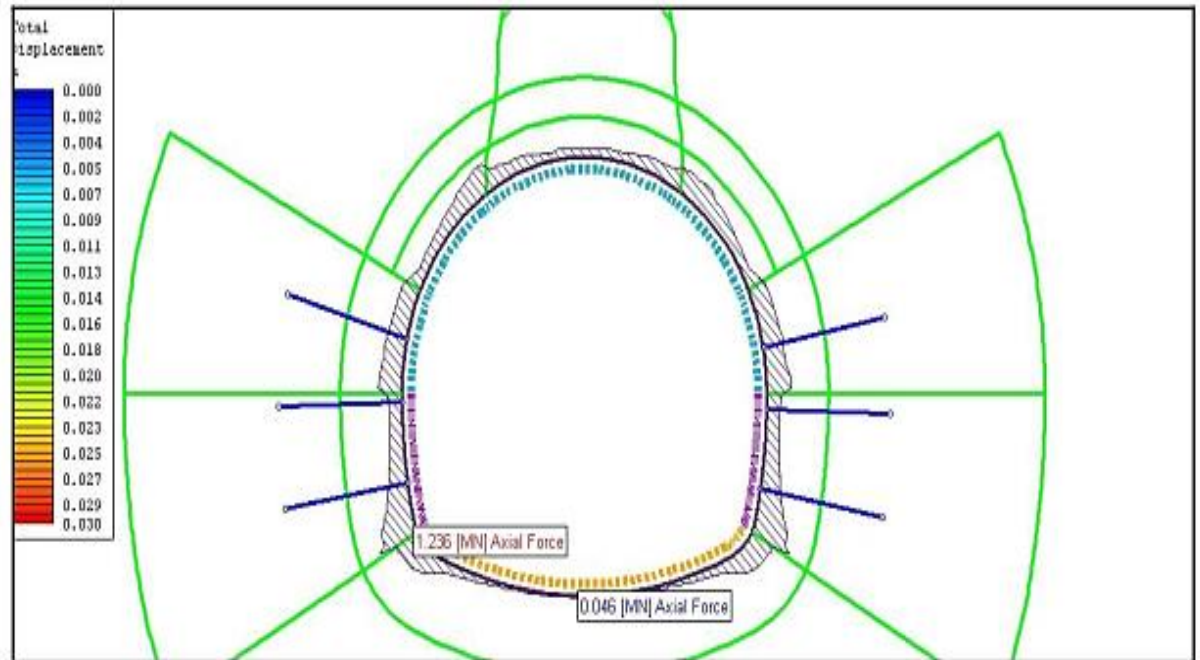
Yukarıdaki analiz çıktılarından görüleceği gibi, kazısı yapılacak tünelde oluşacak yer değiştirme miktarı 3 cm mertebesinde bulunmuştur. Bu değerler göçük ıslahı kazı ve destek sistemi için öngörülen değerler ile karşılaştırıldığında toleranslar dâhilinde olup güvenli mertebede olduğu hesaplanmıştır.

Ayrıca yenilme (plastik) bölgesi genişliği, göçük bölgesi hariç kazı çevresinde oluşması öngörülen örselenmiş bölge sınırlarını aşmamıştır. Aşağıdaki analiz çıktılarında

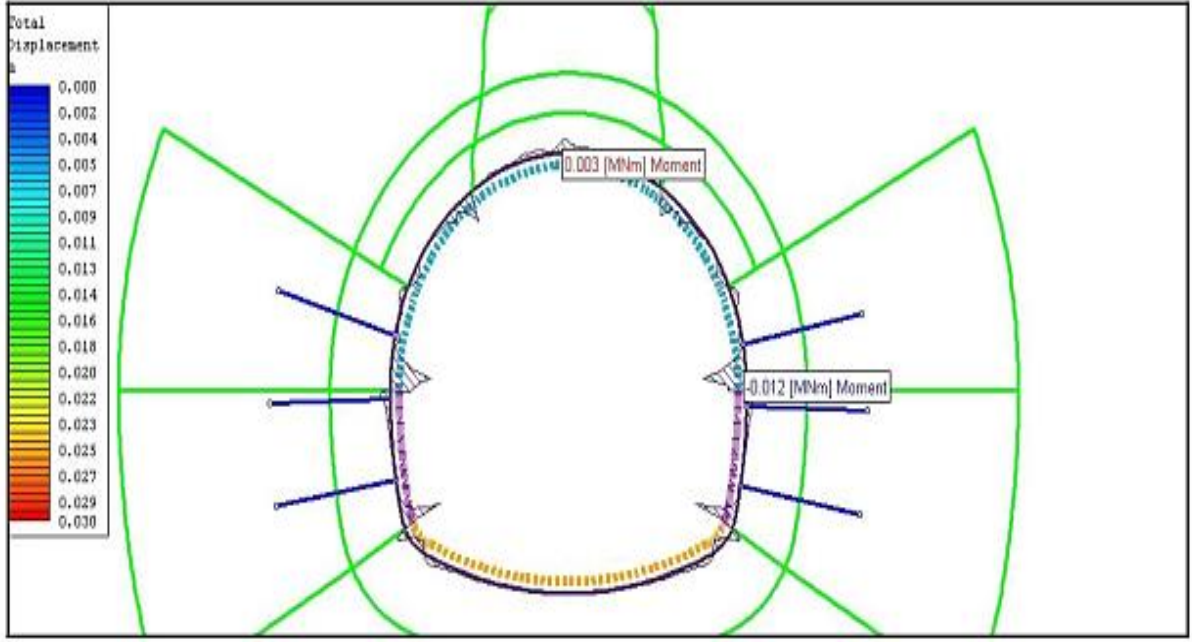
Şekil 76., Şekil 77., Şekil 78. ve Şekil 79.'de bulon ve ilk iksa kesitine gelen yükler görülebilir. Gelen maksimum kuvvetler şekil üzerinde gösterilmiştir.



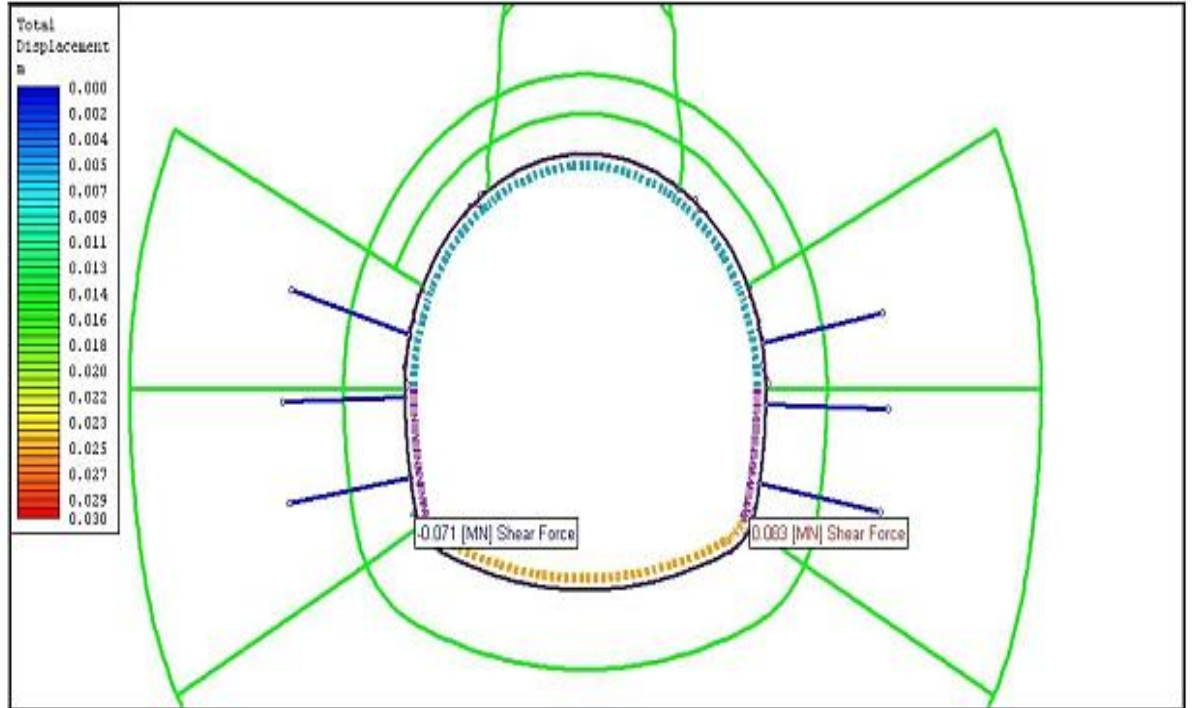
Şekil 76. Bulonlara Gelen Eksenel Kuvvetler (N=31 kN)



Şekil 77. Püskürtme Betonuna Gelen Maksimum Eksenel Kuvvet (N=1236 kN)



Şekil 78. Püskürtme Betonuna Gelen Maksimum Moment ( $N=12$  kNm)

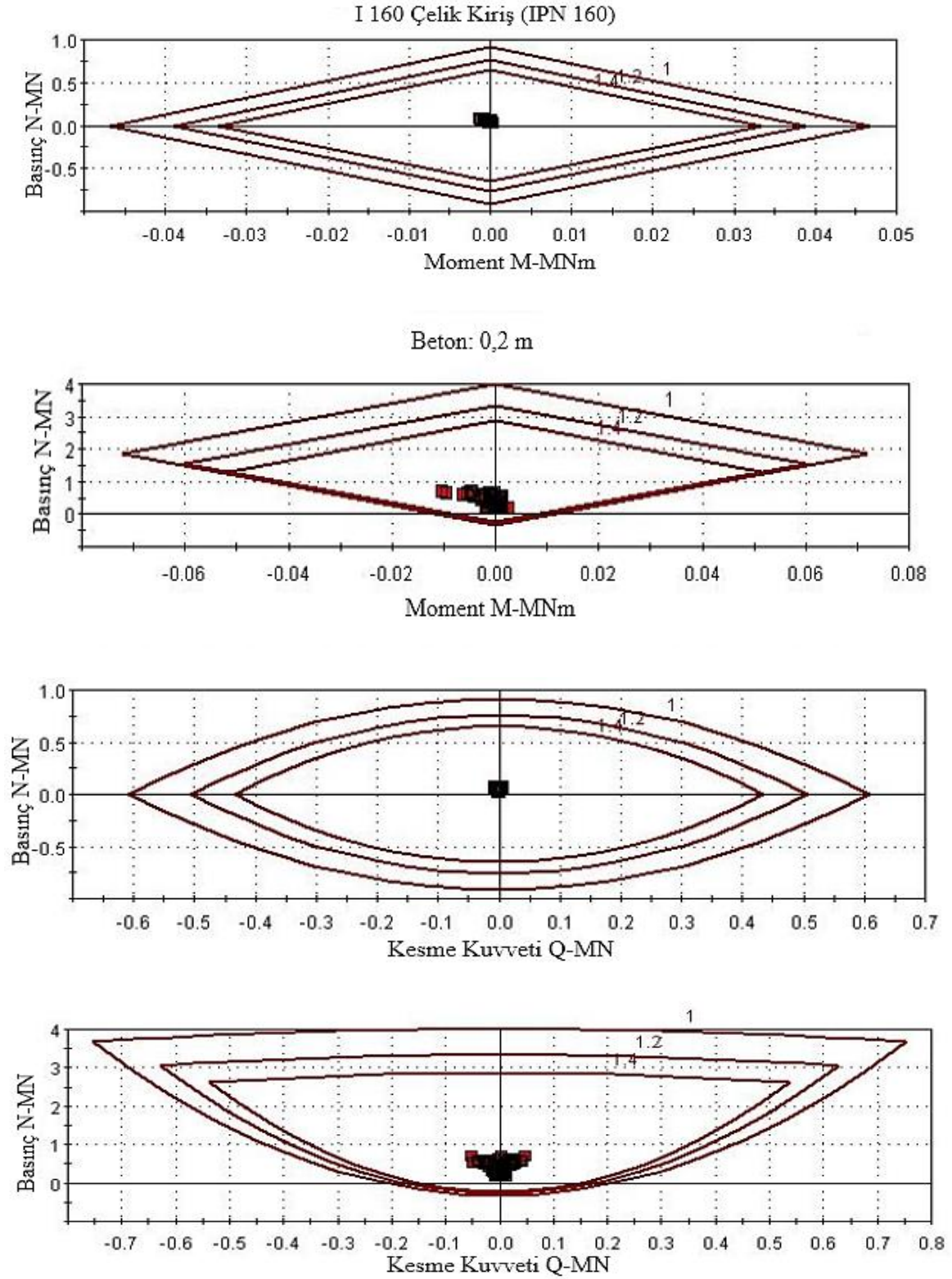


Şekil 79. Püskürtme Betonuna Gelen Maksimum Kesme Kuvveti ( $V=83$  kN)

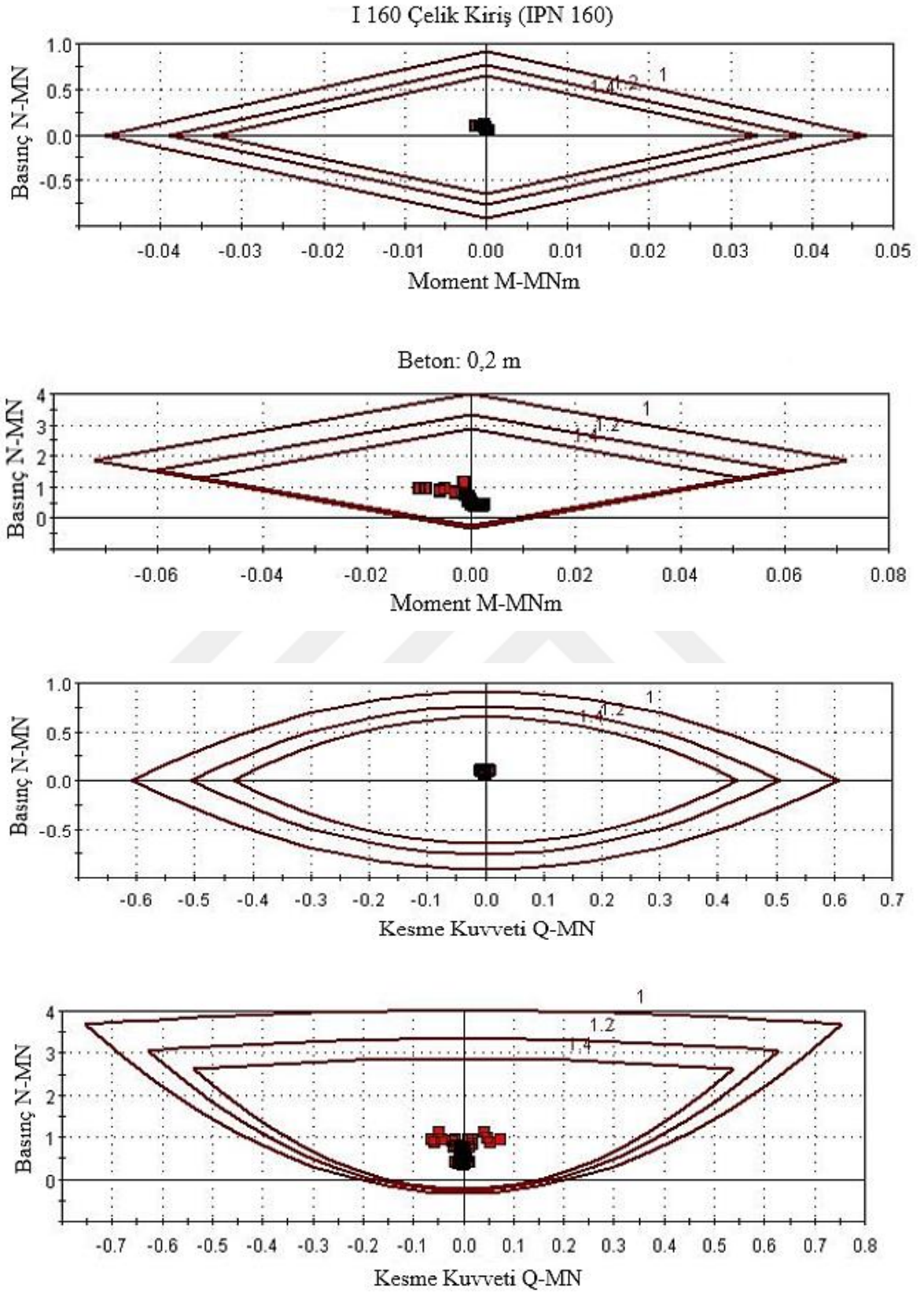
Püskürtme betonu + çelik iksadan oluşan ilk iksa kesitinde, bu tesirlerin tahkiki için çelik iksa ve püskürtme betonunun kapasite diyagramlarına bakılması gerekir.



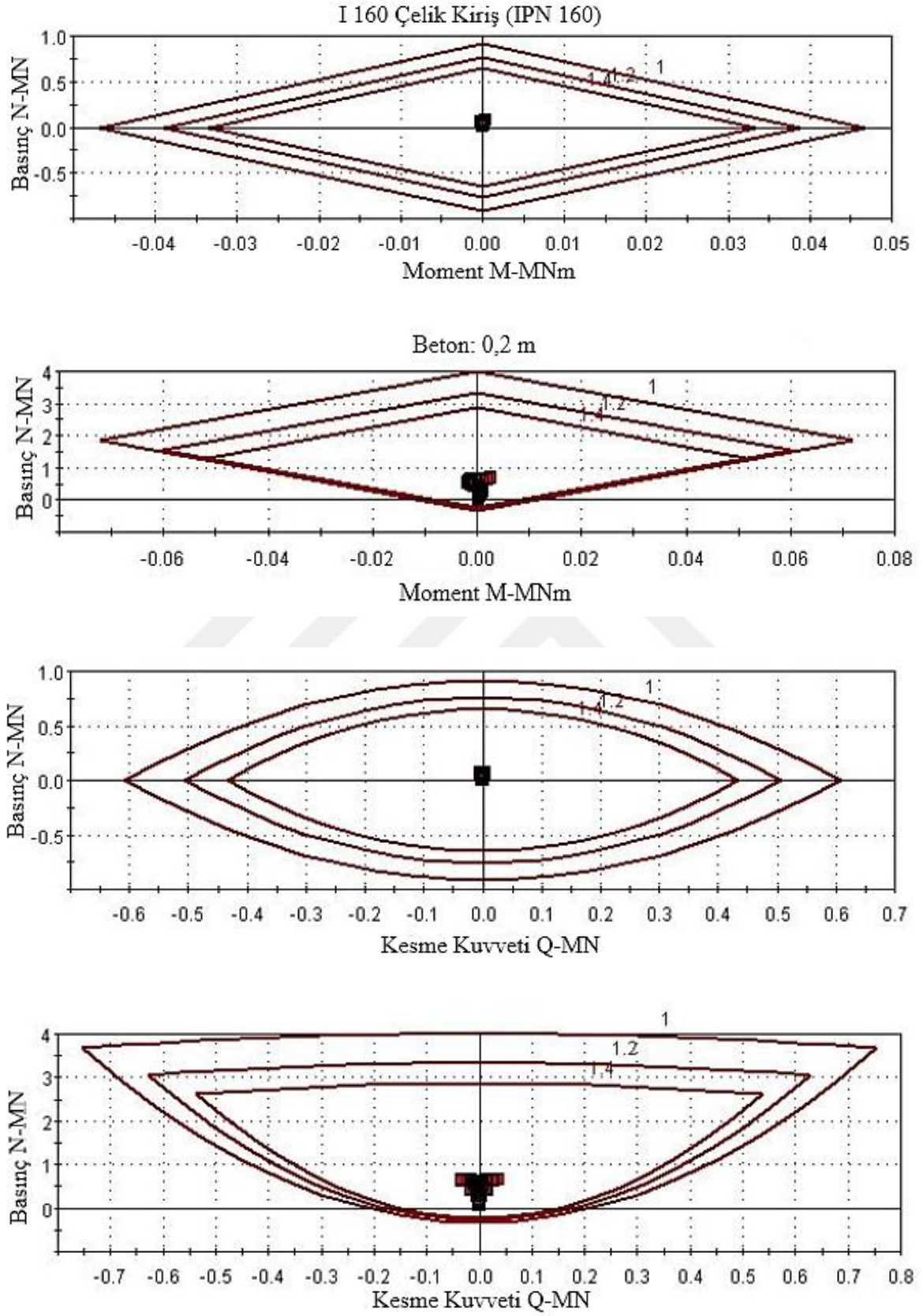
Aşağıda çelik iksa ve püskürtme betonunun destek kapasitesi diyagramları görülebilir. Kapasite diyagramları 1.0, 1.2 ve 1.4 güvenlik sayıları için çizdirilmiştir.



Şekil 80. Çelik İksa ve Püskürtme Beton Destek Kapasite Diyagramı-Üstüarı



Şekil 81. Çelik İksa ve Püskürtme Beton Destek Kapasite Diyagramı-Altyarı

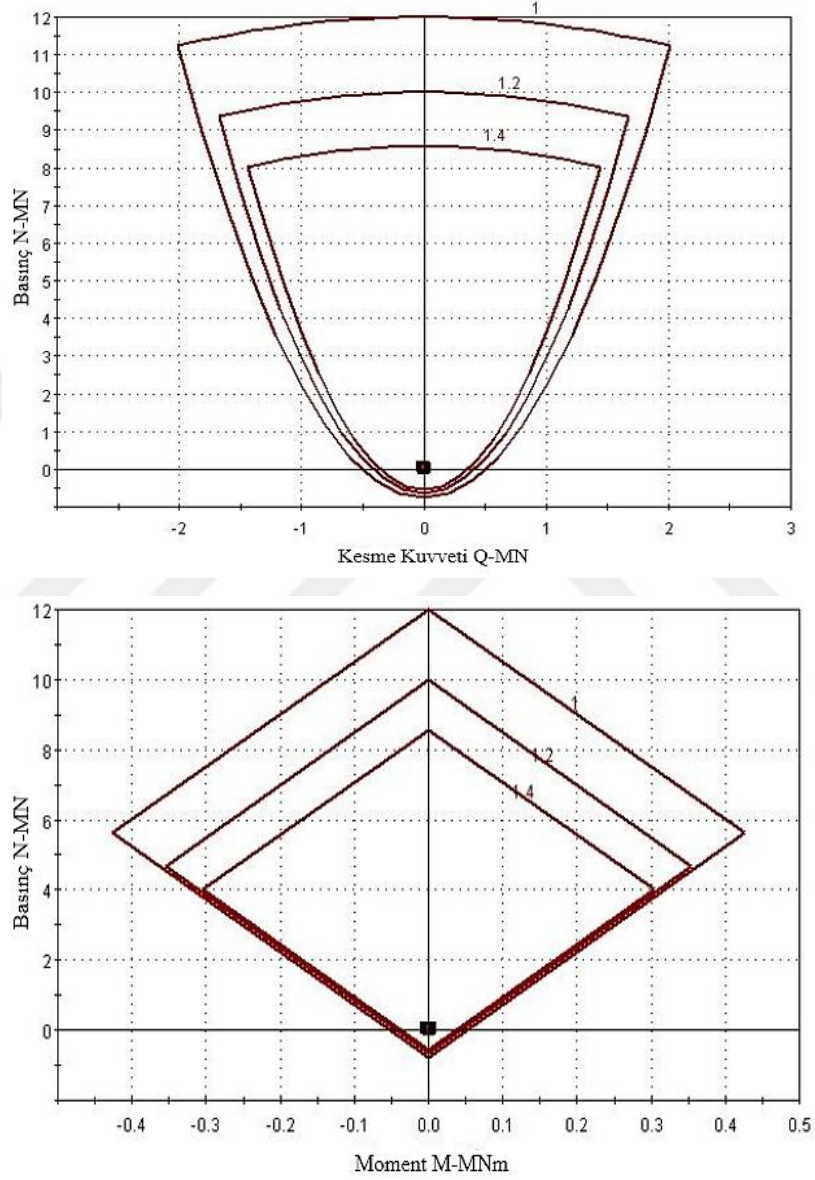


Şekil 82. Çelik İksa ve Püskürtme Beton Destek Kapasite Diyagramı-Taban



Destek kapasite diyagramları incelendiğinde desteklerin üzerlerine gelen yükleri taşıyabildikleri ve güvenlik sayılarının 1.4'ün üzerinde oldukları görülmektedir.

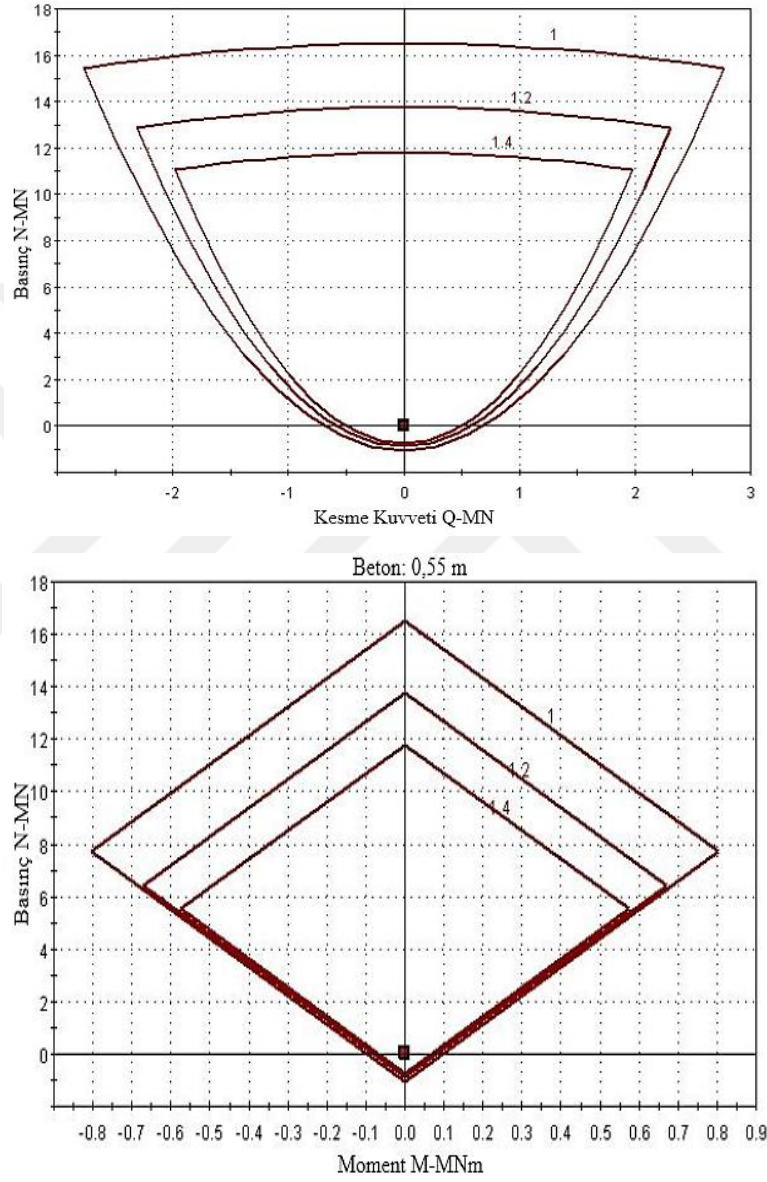
Ayrıca, kemer betonunda donatıya ihtiyaç olup olmadığını görebilmek için de oluşturulan destek kapasite diyagramlarına bakmakta fayda vardır.



Şekil 83. Kemer Betonunun Destek Kapasite Diyagramı

Şekil 83.'deki kemer betonu için verilen kapasite diyagramı incelendiğinde; deprem durumunda kaplamaya etki eden yüklerin taşıma kapasitesini aşmayacağı görülmüş, ancak güvenli tarafta kalmak amacıyla göçük bölgesinde kaplamanın donatılı olarak imal edilmesi uygun görülmüştür.

Bunun yanında aşağıdaki şekilde verilen taban kaplaması kapasite diyagramında kapasitenin yeterli olduğu görülmüştür. Ancak güvenli tarafta kalınarak göçük bölgesinde taban kaplamasında da donatılı beton uygulaması yapılmasının uygun olacağı düşünülmüştür.



Şekil 84. Taban Kaplaması Destek Kapasite Diyagramı

Sonuç olarak; hem toplam yer değiştirmeler hem de destek elemanlarına gelen yükler değerlendirildiğinde, destek elemanlarının kapasitelerinin altında yük taşıdıkları görülmektedir.



Tünelde; en kritik bölge olan km: 45+017 - 45+047 (30 mt) arasında Göçük Islahı Kazı ve Destek Sistemleri – Tip - 2 için önerilmiş olan destek elemanları uygun bulunmuştur.

Analiz neticesinde belirlenen püskürtme betona etkiyen aksel kuvvetler, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri Tablo 76.'da sunulmaktadır.

Tablo 76. Destek Elemanlarına Etkiyen Tesirler

No	Bulon Yüğü (kN)	P.B. Aksel (kN)	P.B. Moment (kNm)	P.B. Kesme (kN)
1	118	1082	12	93

Tablo 77.'de görüleceği üzere, bulonlar için verilen aksel kuvvetler her bir analizdeki maksimum kuvvetlerdir. Maksimum aksel kuvvet ~118 kN olmaktadır. Ø 26 mm çaplı bulonlar için kopma yükü ise ~124 kN dur. Bu durumda tünel geçkisi boyunca bulonlarda herhangi bir akma hareketi beklenmemektedir.

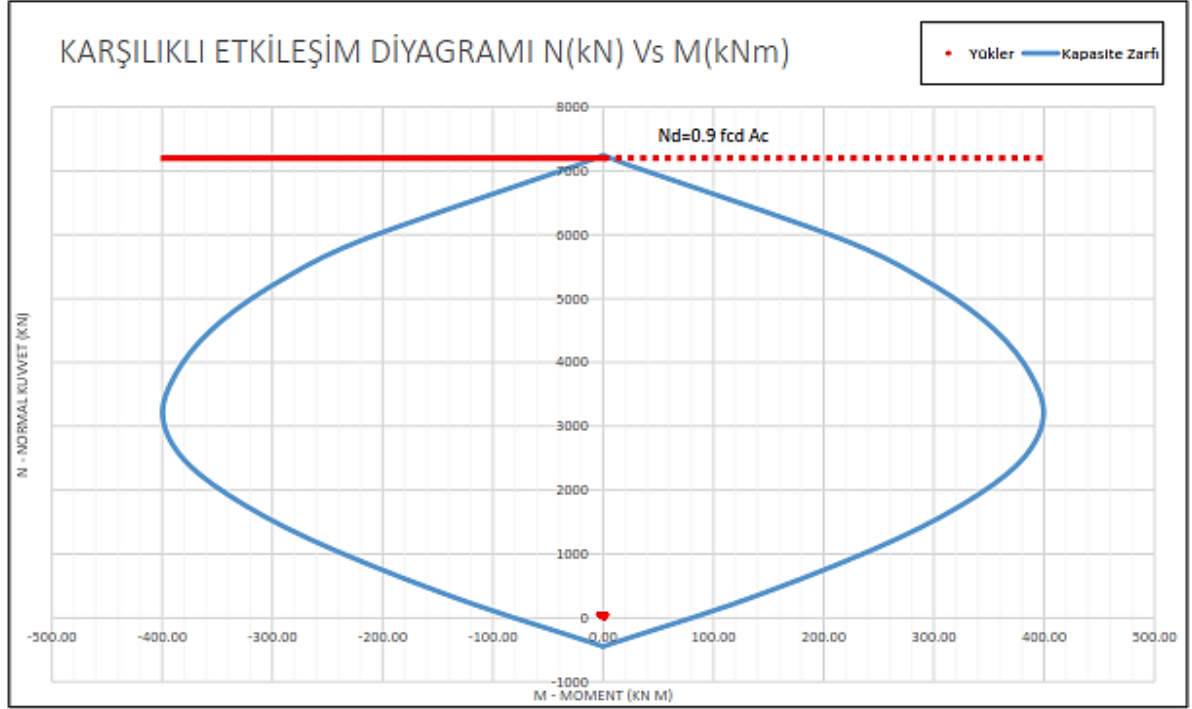
### 5.1.3. Drenaj Sistemi

Enjeksiyon uygulamasının yapılacağı bölgelerde kazı çeperinde mobilize olması muhtemel su yükünü azaltmak amacıyla tünel tavanında ve omuzlarda 5 m'de bir L=10 m boyunda drenaj delgisi yapılacaktır. Bu delgiler ön destekleme sürecinde gerekli drenajı sağlayacak, kemer betonu imalatı sonrasında ise tünel çeperine sızan yeraltı suları membran ile toplanarak yeraltı drenaj borularına iletilecektir.

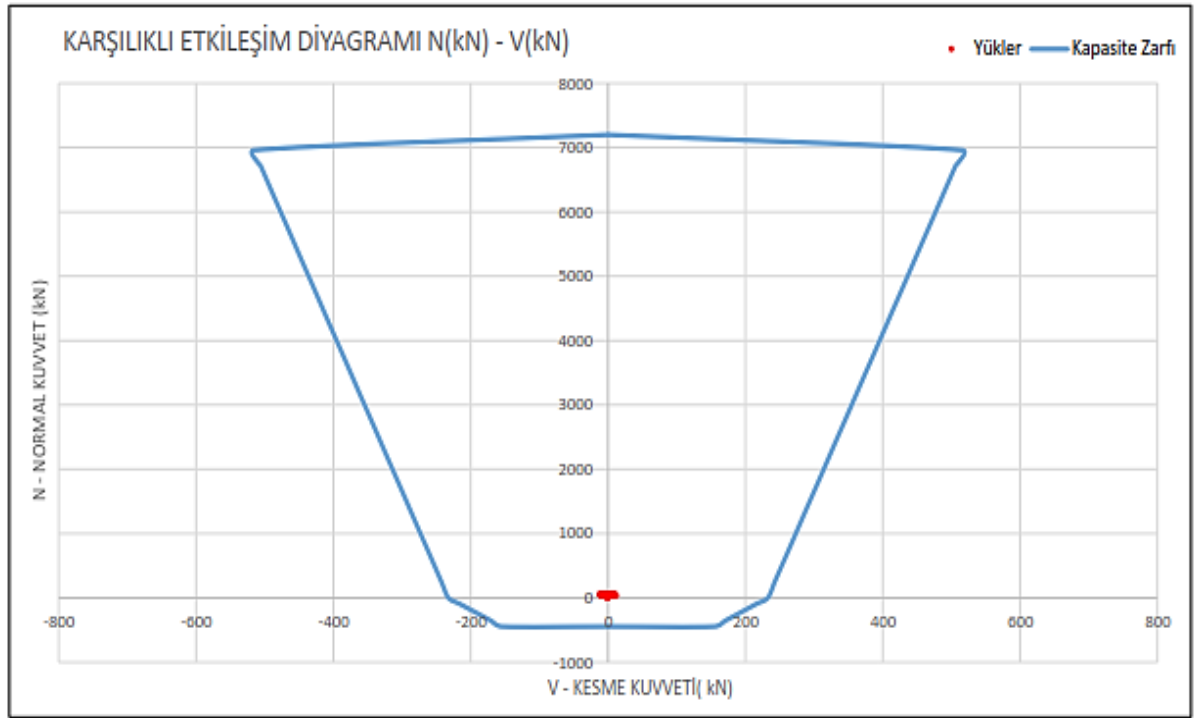
### 5.1.4. Kemer Betonunu ve Taban Kaplaması

Kemer betonu, tünel kazı ve desteklemesi sonrasında, yer değiştirmeler 2 mm/ay'ın altına düştüğü durumda imal edilmeye başlanacaktır. Bu da, normal koşullarda ve statik durumda, kemer betonuna pek yük gelmeyeceği anlamına gelmektedir. Öte yandan, uzun dönemde, kaya bulonlarının korozyona uğrayarak dayanımlarının yitirmesi ve bir deprem durumunda etkiyecek yüklerin kemer betonuna tesir edeceği düşünülebilir. Bu amaçla, sayısal analizlerde, kaplamaya uzun dönemde deprem halinde ve bulonsuz bir durum için etkiyecek tesirler hesaplanmış ve etkileşim diyagramları ilgili analizlerde sunulmuştur.

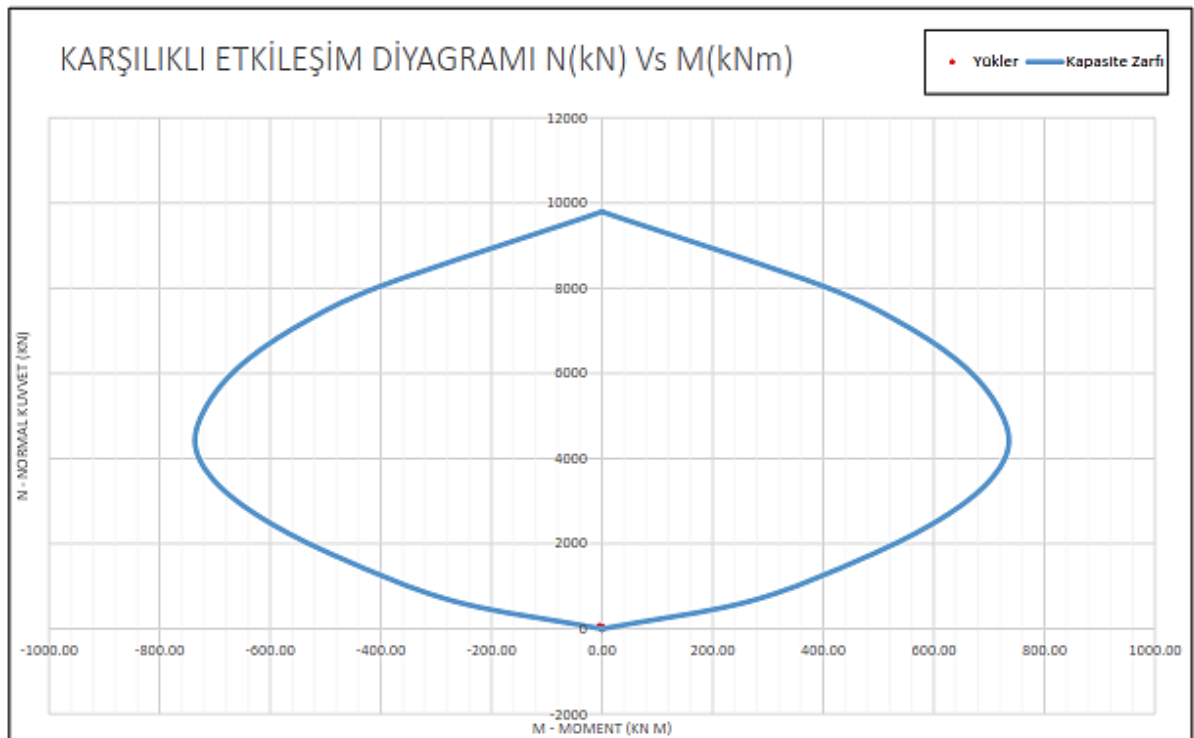
Kemer betonu ve taban kaplaması için sayısal analizler sonucunda elde edilen etkileşim diyagramları incelenmiş, etkiyen yüklerin kapasite diyagramlarını aştığı görülmüştür. Ancak, güvenli tarafta kalmak amacıyla Km: 45+017 – 45+047 arasında göçük bölgesinde kemer betonu ve taban kaplamasının donatılı imal edilmesinin uygun olacağı ön görülmüştür. Donatı olarak tek kat Q513/295 kullanılacaktır.



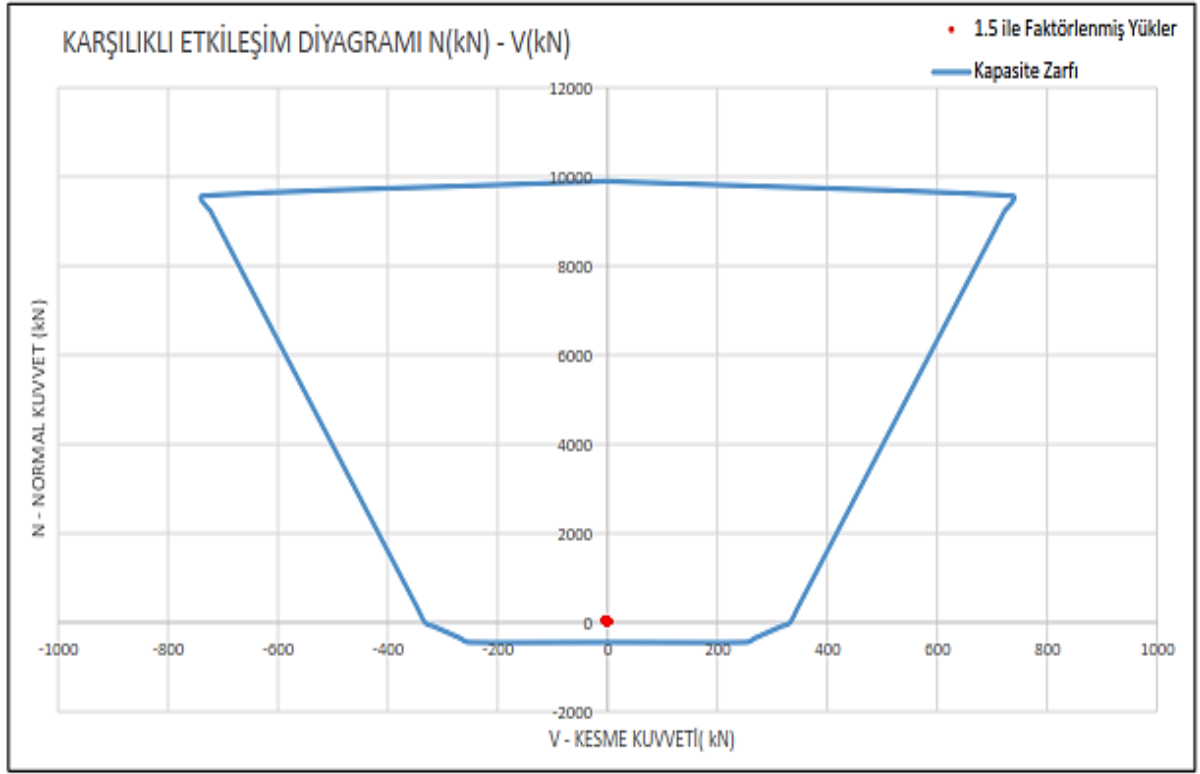
Şekil 85. Kemer Betonu N-M Diyagramı



Şekil 86. Kemer Betonu N-V Diyagramı



Şekil 87. Taban Kaplaması N-M Diyagramı



Şekil 88. Taban Kaplaması N-V Diyagramı

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, Devlet Su İşleri 26. Bölge Müdürlüğü tarafından Artvin-Yusufeli Devlet Karayolunun 44+000-47+000 kilometreleri arasında inşa edilen 2277 m uzunluğundaki Oruçlu Tünelinde oluşan göçük bölgesi için hazırlanan iyileştirme çalışmaları incelenmiştir. NATM'a göre kazı ve desteklemesi yapılan Oruçlu Tünel kazısı, kazı makineleri ve yer yer patlatmalı olarak aşamalı bir şekilde yapılmıştır. Üst yarı, alt yarı şeklinde iki kademeli olarak yapılan kazı çalışmalarının ardından destekleme imalatları yapılmıştır. Ancak tünelin 44+850-45+050 kilometreleri arasında alt yarı kazı çalışmalarının yapılması esnasında 45+040-45+010 arasında meydana gelen göçük ve buna bağlı olarak 45+010-44+850 arası meydana gelen yer değiştirmeler bu kısımda farklı destekleme alternatiflerinin kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, göçük kısmında mevcut arazi yapısının geoteknik özellikleri yeniden gözden geçirilmiştir. Bu incelemelerin sonucunda, göçük bölgesinde Şemsiye Kemer Yönteminin uygulanmasına karar verilmiştir. Bu yöntemin değerlendirilmesi için, göçük bölgesindeki en kritik kesit kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizler yapılmıştır. Bu analizlerde kazının; üst yarı, alt yarı ve taban olmak üzere 3 aşamada yapılması öngörülmüştür. Öncelikle tünelin çevresindeki 9 m'lik kısımda enjeksiyon uygulaması yapılarak zemin iyileştirilmiştir. Ardından tünel aynasında, 0.114 m çapında 9 m boyunda çelik boru uygulaması yapılarak tünel tavanında koruyucu bir plak oluşturulmuştur. Ardından yeni destekleme imalatları yapılarak tünel inşaatı tamamlanmıştır. Yapılan modelleme, arazi incelemeleri ve uygulamalardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Tünelin projelendirme aşamasında yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarıyla tespit edilen jeolojik koşulların, kazı esnasında tünel ayna haritalarına dayanarak oluşturulan kaya kalite sınıflamaları ve destekleme tipi seçimleriyle uyummadığı tespit edilmiştir. Bu durum, projelendirme öncesi yapılan jeolojik formasyonların belirlenmesine yönelik çalışmaların yetersiz olduğunu göstermektedir. Geoteknik incelemenin yetersiz olduğu tünellerde, kaya kalitesinin yanlış belirlenmesine bağlı göçük riski artmaktadır.

Şemsiye Kemer Yöntemi, ön kemerlendirmeli bir yöntem olması nedeniyle kazı aynasında oluşabilecek duraylılık sorunlarının önüne geçerek kazı ortamının başlangıçtaki denge durumunun korunmasını sağlamaktadır. Oruçlu Tüneli göçük bölgesinde uygulanan Şemsiye Kemer Yöntemi, tünelde kemerleşmenin oluşmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla,

tünellerde kemerleşmenin sağlanamadığı durumlarda Şemsiye Kemer Yönteminin kullanılabileceği görülmüştür.

Şemsiye Kemer Yöntemiyle uygulanmasıyla, Oruçlu Tünelinde oluşan tünel içi (konverjans) ve tünel aynasında oluşan yer değiştirmelerin oldukça azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla, bu yöntemin düşük kohezyonlu zeminlerde yer değiştirmelerin önlenmesinde etkili olduğu söylenebilir.

Şemsiye Kemer Yönteminin uygulanmasıyla Oruçlu Tüneli inşaatı esnasında oluşan kaya düşmelerinin ve zemin akımlarının azaldığı tespit edilmiştir. Tünel içerisinde yapılan kazı çalışmalarında, çalışma yapılacak bölgede işçi ve yapım güvenliğini arttırmada Şemsiye Kemer Yöntemi uygulanabilir.

Ülkemizdeki tüneller genellikle dağlık arazilerde yapılması nedeni ile uzun olmaktadır. Uzun tünel güzergâhları ve topoğrafik yapının engebeli olması, tünel güzergâhının her noktasından sondaj yapılmasını mümkün kılmamaktadır. Oruçlu Tünelinde, göçük bölgesinin jeolojik özelliklerinin belirlenmesinde Jeofizik Rezistivite Yönteminin kullanılmış olup, bu yöntemin sondaj yapılamadığı durumlarda alternatif olarak kullanılmasının uygun olacağı ortaya çıkmıştır.

## 7. KAYNAKLAR

- Koçak B., (2006), Yeraltı Kaya Yapılarının Denetimi Ve Yönlendirilmesinde Uzman Sistem Oluşturulması, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vardar M., (2005), Time dependent stability problems in tunnels and time-dependent behavior of the rock mass, ITA / AITES Training course tunnel engineering.
- Théma Larousse, (1993), Tematik Ansiklopedi, cilt 3, s. 442-443, Milliyet Gazetecilik, İstanbul.
- Öztürk H. T., Durmuş A., (2008), “Tünellere Toplu Bir Bakış ve Savunma Tünellerinin Türkiye İçin Önemi”, İMO İstanbul Bülteni, Sayı 96 , s. 11-17.
- Kolymbas D., (2005), Tunnelling and Tunnel Mechanics, Springer, Germany, 437 p.
- Şans G., (2005), Karadeniz Sahil Yolu Projesi Hapan Tünel Güzergahı'nın Mühendislik Jeolojisi ve Jeomekanik Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. [7] Büyük Larousse, (1993), Tematik Ansiklopedi, cilt 23, s. 11793, Milliyet Gazetecilik, İstanbul.
- Schubert W., (2002), Grundlagen der New Austrian Tunnelling Method, Technische Universität Graz Institute für Felsmechanik und Tunnelbau, s. 9-21.
- Ulusay R., Sönmez H.,(2007), Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, Jeoloji Mühendisleri Odası, Yayın No:60, s. 292.
- Karaoğlan H., (2002), Kaya Zeminde Tünel Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kılıç A., (1997), Tarsus Ayrımı-Adana-Gaziantep (TAG) Otoyolu Bahçe Yöresindeki Tünellerin Kaya Sınıflamaları ve Kaya Bulonlarıyla Desteklenmesi, Doktora Tezi, Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yüzer E., Vardar M., (1986), Kaya Mekaniği, İTÜ Vakfı Kitap Yayınları No:11, İTÜ Maden Fakültesi Ofset Atölyesi, 187 s.
- Karpuz C., Hindistan M.A., (2006), Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları, TMMOB Ankara Maden Mühendisleri Odası, 346 s.
- Karagöz S.D., (2007), Kağıthane-Piyalepaşa Tünelleri Mühendislik Jeolojisi Çalışması, Yüksek Lisans, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vardar M., (2004), Kaya Mekaniği Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı.

IACES, (1995), NATM Summer Course, Lecture Notes.

Aygar E., (2000), Bolu Tünelleri'nde Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemine Eleştirel Bir Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Müller L.-Salzburg, Fecker E., (1963), Fundamental Ideas And Principles Of The "New Austrian Tunelling Method", 1-10 p.

Akçelik N., Solak T., Mucukgil R., (1999), NATM Uygulamalı Yer Altı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi ve Tünel Yapımında Karşılaşılan Problemler Semineri, TCK Genel Müdürlüğü, Ankara, 8-12 Kasım, s. 13-21.

Vardar M., (1994), Metro Tünellerinde Duraylılığın Korunması ve Sağlanması, Sağlama-İyileştirme-İyileştirme, Ulaşımında Yer altı Kazıları Sempozyumu, Maden Mühendisleri Odası, İstanbul, s. 41-51.

Özaydın K., (2007), Zeminlerin İyileştirilmesi Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geoteknik Anabilim Dalı.

Özaydın K., (2003), Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, s.261.

Emay Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Tic. Ltd. Şti., (2004), Karadeniz Sahil Yolu Çayeli-Ardeşen-Hopa Devlet Yolu Arhavi Tüneli Kesin Proje Geoteknik Raporu, Üsküdar, İstanbul.

Ergin K., (1992), Yeni Avusturya Tünel İnşa Yönteminde Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Tünel Kaplaması Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Brinkgreve R.B.J., Broere W., (2004), PLAXIS 3D TUNNEL- Version 2 Manuel, Delft University of Technology & Plaxis B.V., The Netherlands.

Yıldırım M., Savaşkan E., (2003), İstanbul Bölgesi Tersiyer Çökellerinin Stratigrafisine Yeni Bir Yaklaşım ve Çökellerin Mühendislik Özellikleri, İstanbul'un Jeolojisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı.

Emay Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Tic. Ltd. Şti., (2004), Karadeniz Sahil Yolu Çayeli-Ardeşen-Hopa Devlet Yolu Arhavi Tüneli Kesin Proje Geoteknik Raporu, Üsküdar, İstanbul.

Emay Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Tic. Ltd. Şti., (2005), Dolmabahçe-Dolapdere-Piyalepaşa-Kağıthane tünelleri inşaatı Piyalepaşa-Kağıthane Tüneli Derin Tünel Kesim, Tünel Hesap Raporu, Üsküdar, İstanbul.

Geo-Fronte Research Association (1994). Technical Report on the Rodin Jet Fore- Pling (RJFP) Method.

Hoek, E., (2001). Big tunnels in bed rock. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, September, 127, No.9, The Thirty-sixth Karl Terzaghi Lecture



- Çeçen, E., İncecik, M., 2008. Metro tünellerinde uygulanan şemsiye kemer yönteminin sayısal analizi. İTÜ Dergisi, 7, 72-82.
- Hoek, E. (2000) "Rock Engineering Course Notes" Rockscience Web Site, [www.rockscience.com](http://www.rockscience.com)
- Y.M.A. Hashash vd. (2001), Sequential Excavation Method, FHWA-NHI-09-010 Road Tunnel Manuel Sayfa 9-46
- Oke J., Vlachopoulos N., Diederichs M.S., (2014), Numerical Analyses In The Design Of Umbrella Arch Systems, GeoEngineering Centre-Canada, 437 p.
- Oke J., Vlachopoulos N., Marinos V. (2014), Umbrella Arch Nomenclature and Selection Methodology For Temporary Support Systems For The Design And Construction Of Tunnels, Geotechnical and Geological Engineering, Volume 32, Issue 1, pp 97-130
- Sargın İnşaat ve Makine Sanayi Ticaret A.Ş., (2017), Artvin-Erzurum Devlet Yolu, Oruçlu Tüneli Hesap Raporu, Artvin
- KGM (2013), Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara
- Doğuş İnşaat ve Ticaret A.Ş., (2016), Artvin-Erzurum Devlet Yolu, Oruçlu Tüneli Jeofizik Rezistivite Etüd Raporu, Artvin
- Doğuş İnşaat ve Ticaret A.Ş., (2015), Artvin-Erzurum Devlet Yolu, Oruçlu Tüneli Jeolojik-Geoteknik Etüt Raporu, Artvin
- Ö-NORM B2203, 1994. Untertagebauarbeiten werkvertragsnorm, Österreichischer Normen, Österreich. Priest S.D. & Hudson J.A., 1976. Discontinuity spacing in rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geo. Abs., vol.13, 135-148.
- Kanık M., Gürocak Z., (2016), Numerical Evaluation of Support Systems Obtained from Q System: Maçka Tunnel (Trabzon/NE Turkey), International Black Sea Mining&Tunnelling Symposium
- URL1, <https://www.milliyet.com.tr/ovit-tuneli-nin-yuzde-88-tamamlandi-ekonomi-2380723> 10.06.2018
- URL2, <https://www.rocksoil.com/index.php/en/research-and-development/29-research-nd-development/105-03-cellular-arch> 22.06.2018

## 8. EKLER

SONDAJ LOGU BORING LOG										Sayfa/Page :1/1		
PROJE ADI / Project Name : SONDAJ YERİ / Boring Location :			ARTVIN-ERZURUM YOLU TUNEL SONDAJI ZEYTLİKLİK MEVKİİ									
Kuyu No / Hole no : SONDAJ DER. / Boring Depth :			SK-1 37,00 m		MUH. BOR. DER. / Casing Depth :		BAS. BIT. TARİHİ / Start-Finish Date :		09.11.2013 487721.794			
SONDAJ KOTU / Elevation :			468,30 m		KOORDİNAT / Coordinate (N-S) :		KOORDİNAT / Coordinate (E-W) :		4553933.375			
VER. ALTI SUYU / Groundwater :												
Sondaj Derinliği (m) Boring Depth (m)	Müretim İyisi mm	Yeraltı Suyu	STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test					JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	Profil Profile	Kant. % Core Recovery	FCR %	RQP %
			DARBE SAYISI Num. Of Blows									
			60	30	15	7,5	N <sub>60</sub>					
2,00												
4,00												
6,00												
8,00												
10,00												
12,00												
14,00												
16,00												
18,00												
20,00												
22,00												
24,00												
26,00												
28,00												
30,00												
32,00												
34,00												
36,00												
38,00												
40,00												
DAYANIMLILIK - Strength			AYRISMA - Weathering				İNCE DANELİ - Fine Grained			KABA DANELİ - Coarse Grained		
I - DAYANIMLI II - ORTA DAYANIMLI III - ORTA ZAYIP IV - ZAYIP V - ÇOK ZAYIP			I - YALN. FRESH II - AZ AYRISMIŞ Slightly W. III - ORTA DER. AYR. Mod. Weath. IV - ÇOK AYR. Highly W. V - TAM AYRISMIŞ Comp. Weathe.				N=0-2 ÇOK YUMUŞAK V. Soft N=3-4 YUMUŞAK Soft N=5-8 ORTA KATI M. Stiff N=9-15 KATI Stiff N=16-30 ÇOK KATI V. Stiff N>30 SIKTI Hard			N=0-4 V. Loose N=5-10 Loose N=11-30 M. Dense N=31-50 Dense N=50 V. Dense		
KAYA KALİTESİ - RQD			KIRIKLANCIĞI - Fractures				ÜRANLAR - Porosity					
RQD 0-25 ÇOK ZAYIP V. Poor RQD 25-50 ZAYIP Poor RQD 50-75 ORTA Fair RQD 75-90 İYİ Good RQD 90-100 ÇOK İYİ Excellent			I - GENİŞ Wide II - ORTA Moderate III - SIK Close IV - ÇOK SIK Intense V - FARKSIZ Cracked				RQD 0-50 Yüksek Little RQD 50-75 Orta Moderate RQD 75-90 İyi Good RQD 90-100 Çok İyi Very					
SPT / STANDART PEN. DENEYİ Standart Penetration Test			SONDOR / Driller				İMZA - Siga		KONTROL MÜHENDİSİ		İMZA - Siga	
D - ORSELENMİŞ NUMUNE Disturbed Sample CD - ORSELENMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample												

Ek 1. Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları SK

SONDAJ LOGU										Sayfa/Page :1/1				
BORING LOG														
PROJE ADI / Project Name :					ARTVIN-ERZURUM YOLU TUNEL SONDAJI									
SONDAJ YERİ / Boring Location :					ZEYTİNLİK MEVKİİ									
Kuyu No / Hole no :					TSK-2		MÜH. BOR. DER./Casing Depth :		18-3010.2013					
SONDAJ DER. / Boring Depth :					225.00 m.		BAŞ. BİT. TARİHİ /Start-Finish Date:		48743.013					
SONDAJ KOTU /Elevation :					66.00 m.		KOORDİNAT /Coordinate (N-S) y :		455328.528					
YER ALTI SUYU /Groundwater :							KOORDİNAT /Coordinate (E-W) x :							
Sondaj Derinliği / Boring Depth (m)	Manzarı boyu / (m)	Yer altı Suyu	STANDART PENETRASYON TESTİ							JEOTEKNİK TANIMLAMA	Profil / Profil	Kant % / Core Recovery	SCR %	RQD %
			Standard Penetration Test											
			DARBE SAYISI											
			Num. Of Blows											
			GRAFIK (Graph)											
			0 10 20 30 40 50 60											
160,00											V V V V	66	62	65
164,00											V V V V	58	52	54
168,00											V V V V			
172,00											V V V V	76	64	70
176,00											V V V V	75	66	68
180,00											V V V V			
184,00											V V V V	56	53	51
188,00											V V V V	53	46	48
192,00											V V V V			
196,00											V V V V	78	66	64
200,00											V V V V			
204,00											V V V V			
208,00											V V V V	85	75	66
212,00											V V V V			
216,00											V V V V	82	74	65
220,00											V V V V	98	78	70
224,00											V V V V	98	75	70
228,00											V V V V	98	95	90
232,00											V V V V			
236,00											V V V V			
DAYANIMLIK - Strength			AYRISMA - Weathering			İNCE DANE Lİ - Fine Grained			KABA DANE Lİ - Coarse Grained					
I- ORTA DAYANIMLI			I- AYRISMA			N=0-3 ÇOK YUMUŞAK V. Soft			N=0-4					
II- ORTA DAYANIMLI			II- AYRISMA			N=3-4 YUMUŞAK V. Soft			N=5-10					
III- ORTA ZAYIF			III- ORTA DER. AYR. Mod. Weath.			N=5-9 ORTA KATI			N=11-20					
IV- ZAYIF			IV- ÇOK AYR. Hınlı W.			N=9-15 KATI			N=21-30					
V- ÇOK ZAYIF			V- TAM AYRISMA Comp. Weath.			N=15-30 ÇOK KATI			N=30-60					
						N=30 SEKT.								
KAYA KALİTESİ - RQD			KIRILAR - Fractures			ORANLAR - Properties								
R25-50 ÇOK ZAYIF			I ZAYIF			R25-50			Sihirli					
R50-75 ZAYIF			II ORTA			R50-75			Lirli					
R75-90 ORTA			III SIK			R75-90			Yerv					
R90-100 İYİ			IV ÇOK SIK			R90-100			Kud					
R100-100 ÇOK İYİ			V FARKSIZ			R100-100								
SPT : STANDART PEN. DENEYİ			SONDÖR/Driller			İMZA-Sign			KONTROL MÜHENDİSİ					
D : ORSELENİMS NİHAİNE									İMZA-Sign					
CD : ORSELENİMS NİHAİNE														
Undisturbed Sample														

Ek 2. Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları TSK-2





SONDAJ LOGU BORING LOG										Sayfa/Page :2/2			
PROJE ADI / Project Name : SONDAJ YERİ / Boring Location :				ARTVI-ERZURUM KARAYOLU ZEYFİNLİK MEVKİİ									
Kuyu No / Hole no : SONDAJ DER. / Boring Depth :				TSK4 350.00 m		MÜH. BOR. DER. / Casing Depth :		BAS. BİT. TARİHİ / Start-Finish Date :		26.10.07.11.2013			
SONDAJ KOTU / Elevation :				772.00 m		KOORDİNAT / Coordinate (N-S) y :		486908.343					
YER ALTI SIVI / Groundwater :						KOORDİNAT / Coordinate (E-W) x :		4553556.191					
Sonda Derin. (m) Boring Depth (m)	Mareza İyisi (mm)	Yer altı Suyu	STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test						JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	Fretili Pvg/‰	Kuvvet % Core Recovery	SBR %	RQD %
			DARBE SAYISI Num. Of Blows										
			15-30 cm	30-45 cm	45-60 cm	60-75 cm	75-90 cm	90-105 cm					
320.00								0 10 20 30 40 50 60	320.00-350.00 m açık kahve rengi-koyu gri renkli yüksek yoğunluklu süreksizlik düzlemleri kalsit /kuvars dolgulu fillat/gabro malzemesi	VVVVV	53	-	-
322.00										VVVVV			
324.00										VVVVV	66	60	40
326.00										VVVVV			
328.00										VVVVV	98	93	88
330.00		tünel üst keta								VVVVV	98	90	80
332.00										VVVVV			
334.00										VVVVV	98	79	63
336.00										VVVVV	98	90	83
338.00										VVVVV	98	85	75
340.00		tünel altı keta								VVVVV			
342.00										VVVVV	98	90	85
344.00										VVVVV	98	90	87
346.00										VVVVV			
348.00										VVVVV	98	96	92
350.00									VVVVV	98	97	93	
352.00													
354.00													
356.00													
358.00													
360.00													
DAYANIMLILIK - Strength			AYRISMA-Weathering				İNCİ DANELİ - Fine Grained			KÜB DANELİ - Coarse Grained			
I- DAYANIMLI Strong			I-TAM Fesik				No-2 ÇOK YUMUŞAK V. Soft			No-20 V. Loose			
II- ORTA DAYANIMLI M. Strong			II-AZ AYRISMA Şebekli W.				No-4 YUMUŞAK Soft			No-5-10 Loose			
III- ORTA ZAYIF M. Weak			III-ORTA DEK. AYR. Mod. Weak.				No-8 ORTA KATI M. Stiff			No-11-20 Dense			
IV- ZAYIF Weak			IV-ÇOK AYR. Halklı W.				No-15 KATI Stiff			No-31-50 Dense			
V- ÇOK ZAYIF V. Weak			V-TAM AYRISMA Comp. Weak.				No-18-30 ÇOK KATI V. Stiff			No-50 V. Dense			
KAYA KALİTESİ - RQD			KIRIKLAK-Form-Fractures				ORANLAK - Proportions						
%15-30 ÇOK ZAYIF V. Poor			I ZAYIF Weak				%1 PEK AZ Sığık			%10-20 Sığık			
%30-50 ZAYIF Poor			II ORTA Moderate				%1-5 Az Little			%20-30 Verv			
%50-75 ORTA Fair			III İK Close				%1-5 ÇOK Verv			%30-50 Verv			
%75-90 İYİ Good			IV ÇOK İK Loose				%1-5 VZ Az						
%90-100 ÇOK İYİ Excellent			V PARÇALI Cracked										
SPT : STANDART PEN. DENEYİ Standart Penetration Test			SONDÖR/Driller				İMZA-Sign		KONTROL MÜHENDİSİ		İMZA-Sign		
D : ORSELENMEŞ NUMUNE Disturbed Sample													
UD : ORSELENMEŞ NUMUNE Undisturbed Sample													

Ek 4. Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları TSK-4

				SONDAJ LOGU BORING LOG				Sayfa/Page :1/1					
PROJE ADI / Project Name : SONDAJ YERİ / Boring Location :				ARTVIN-ERZURUM YOLU TUNEL SONDAJI ZEYTİNLİK MEVKİİ									
Kursaj No/Hole no : SONDAJ DER. / Boring Depth : SONDAJ KOTU / Elevation : YER ALTI SUYU / Groundwater :				YSK-5 47,00 m 478,50 m -		MÜH. BOR. DER./Casing Depth : BAŞ. BİT. TARİHİ /Start-Finish Date : KOORDİNAT /Coordinate (N-S) y : KOORDİNAT /Coordinate (E-W) x :		26.30.10.2013 486393.846 4553038.15					
Sondaç Derinliği (m) Boring Depth (m)	Minimum boyu (m)	Verilen boyu	STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test						JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	Profili Profile	Kurt. % Curo Recovery	SQR %	RQD %
			DARBE SAYISI Num. Of Blows										
GRAFIK(Graph)													
0 10 20 30 40 50 60													
2,00									0.00-18.00 m açık kahve rengi-koyu gri renkli yüksek yoğunluklu kırıklı çatlaklı sürekli düzlemleri kalsit/kuars dolgululu fillat/gabromalzemesi	V V V V V	17	-	-
4,00								V V V V V		83	-	-	
6,00								V V V V V		97	-	-	
8,00								V V V V V		85	-	-	
10,00								V V V V V		48	-	-	
12,00								V V V V V		66	-	-	
14,00								V V V V V		33	-	-	
16,00								V V V V V		33	-	-	
18,00								V V V V V		33	-	-	
20,00								V V V V V		33	-	-	
22,00								V V V V V		33	-	-	
24,00								V V V V V		33	-	-	
26,00								V V V V V		33	-	-	
28,00								V V V V V		33	-	-	
30,00								V V V V V		33	-	-	
32,00								V V V V V		33	-	-	
34,00								V V V V V		33	-	-	
36,00								V V V V V		33	-	-	
38,00								V V V V V	33	-	-		
40,00								V V V V V	33	-	-		
DAYANIMLILIK - Strength			AYRISMA - Weathering			İNCE DANELİ - Fine Grained			KURU DANELİ - Coarse Grained				
I - BAVANMISLI II - ORTA DAYANIMLI III - ORTA ZAYIF IV - ZAYIF V - ÇOK ZAYIF			I - TAM Yer II - AZ AYRISMIS Slight W. III - ORTA DER. AYR. Mod. Weath. IV - ÇOK AYR. Highly W. V - TAM AYRISMIS Comp. Weath.			N=0-2 ÇOK YUMUŞAK V. Soft N=3-4 YUMUŞAK Soft N=5-8 ORTA KATI M. Stiff N=9-15 KATI Stiff N=16-30 ÇOK KATI V. Stiff N=30 İYİRT Hard			N=0-4 V. Loose N=5-10 Loose N=11-30 M. Dense N=31-50 Dense N=50 V. Dense				
KAYA KALİTESİ - RQD			KIRIKLAN - Fractures			USANILAN - Proportions							
N=0-15 ÇOK ZAYIF V. Poor N=15-25 ZAYIF Poor N=25-50 ORTA Fair N=50-75 İYİ Good N=75-90 ÇOK İYİ Excellent			I - ZEYREK Wide II - OKTA Moderate III - SIK Close IV - ÇOK SIK Intense V - PARÇALI Cracked			%1 PEK AZ Slightly %2-5 Az Little %6-10 ÇOK Vevy %10-20 VE Aat			%5-20 Slightly %20-30 Little %30-50 Vevy				
SPT STANDARTI PLEN DENETİMİ Standart Penetration Test D - ORSELENMİŞ NUMUNE Disturbed Sample UD - ORSELENMEMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample			SONDÖR/Driller		İMZA-Sign		KONTROL MÜHENDİSİ		İMZA-Sign				

Ek 5. Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları TSK-5

SONDAJ LOGU										Sayfa/Page :2/2																		
BORING LOG																												
PROJE ADI / Project Name : SONDAJ YERİ / Boring Location :					ARTVIN-ERZURUM YOLU TUNEL SONDAJI																							
Kuyu No/Hole no : SONDAJ DER. / Boring Depth : SONDAJ KOTU / Elevation : YER ALTI SUYU / Groundwater :					YSK-5 47.00 m 478.50 m -		MÜH. BOR. DER. / Casing Depth : BAŞ. BİT. TARİHİ / Start-Finish Date : KOORDİNAT / Coordinate (N-S) y : KOORDİNAT / Coordinate (E-W) x :		26.30.10.2013 486393.846 4553038.15																			
Sonda Derini (m) Boring Depth (m)	Münare boyu m	Yer altı suyu	STANDART PENETRASYON TESTİ Standart Penetration Test										JEOTEKNİK TANIMLAMA Geotechnical Description	İrrel Profile	Kırıntı Grain Size	SPT %	RQD %											
			DARBE SAYISI Num. Of Blows					GRAFİK/Graph																				
			N15	N30	N45	N60	N75	N90	N105	N120	N135	N150	0	10	20	30	40	50	60									
42,00																												
44,00																												
46,00																												
48,00																												
50,00																												
52,00																												
54,00																												
56,00																												
58,00																												
60,00																												
62,00																												
64,00																												
66,00																												
68,00																												
70,00																												
72,00																												
74,00																												
76,00																												
78,00																												
80,00																												
DAYANIMLILIK - Strength			AYRISMA - Weathering					İNCE DANELİ - Fine Grained					İRİ DANELİ - Coarse Grained															
I - DAYANIMLI II - ORTA DAYANIMLI III - ORTA ZAVIF IV - ZAVIF V - ÇOK ZAVIF			I - AZ AYRISMIŞ II - ORTA DFR. AYR. Mod Weath. III - ORTA DFR. AYR. Mod Weath. IV - ÇOK AYR. Birkir II. V - TAM AYRISMIŞ Comp. Weath.					N=0-3 ÇOK YUMUŞAK V. Soft N=4-8 YUMUŞAK Soft N=9-15 ORTA KATI M. Stiff N=16-30 ÇOK KATI V. Stiff N=31-50 SERT Hard					N=0-2 N=3-10 N=11-30 N=31-50 N=50															
KAYA KALİTESİ - RQD			KIRIKLAR - Jctm - Fractures					ORANLAR - Proportions																				
%0-15 ÇOK ZAVIF %16-50 ZAVIF %51-75 ORTA %76-90 İYİ %91-100 ÇOK İYİ			I ZEYNEK Wide II ORTA Moderate III SIK Close IV ÇOK SIK Intense V PARÇALI Cracked					%0 - PEKAL Sıkıçık %1 - AZ Little %2 - ÇOK Very %3 - VE Aad					%0 - Sıkıçık %1 - 10 Little %10 - 50 Very															
SPT : STANDART PEN. DENEYİ Standart Penetration Test D : ORSELENMİŞ NUMUNE Disturbed Sample UD : ORSELENMİŞ NUMUNE Undisturbed Sample			SONDÖR - Driller					İMZA - Signa					KONTROL MÜHENDİSİ İMZA - Signa															

Ek 6. Tünel Güzergâhına Ait Sondaj Logları TSK-5



Ek Tablo 1. Tünel Araştırma Sondajları Karot Numuneleri Tek Eksenli Basınç Deneyi

KIRIM TARİHİ	SONDAJ NO	ÖRNEK NO	NUMUNENİN ALINDIĞI DERİNLİK ( m )	KAROT Dxl ( mm )	BİRİM AĞIRLIK ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	BASINÇ DAYANIMI ( kN )	BASINÇ DAYANIMI MPa ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Elastisite Modülü $E_i$ [MPa]	Poisson Oranı $\nu$	Litoloji
20.06.2014	TSK-1	OK-1-1	22,00-22,75	47x94	2,827	39,68	22,9	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-1	OK-1-2	23,00-23,50	47x94	2,864	104,15	60,0	8526,0	0,26	Gabro
20.06.2014	TSK-1	OK-1-3	25,25-25,50	47x94	2,827	80,72	46,5	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-1	OK-1-4	33,00-33,25	47x94	2,873	76,95	44,4	7077,0	0,23	Gabro
20.06.2014	TSK-1	OK-1-5	33,50-34,00	47x94	2,910	-	-	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-1	OK-1-6	34,50-34,75	47x94	2,903	66,93	38,6	4908,0	0,31	Gabro
20.06.2014	TSK-1	OK-1-7	36,50-37,00	47x94	2,902	-	-	-	-	Gabro

Ek Tablo 2. Tünel Araştırma Sondajları Karot Numuneleri Tek Eksenli Basınç Deneyi

KIRIM TARİHİ	SONDAJ NO	ÖRNEK NO	NUMUNENİN ALINDIĞI DERİNLİK ( m )	KAROT Dxl ( mm )	BİRİM AĞIRLIK ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	BASINÇ DAYANIMI ( kN )	BASINÇ DAYANIMI MPa ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Elastisite Modülü $E_i$ [MPa]	Poisson Oranı $\nu$	Litoloji
20.06.2014	TSK-2	OK-2-1	202,30-202,50	47x94	2,729	53,16	30,6	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-2	203,15-203,35	47x94	2,762	110,83	63,9	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-3	203,75-204,00	47x94	2,750	168,50	97,1	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-4	205,00-205,25	47x94	2,737	154,90	89,3	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-5	207,50-208,00	47x94	2,827	-	-	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-6	208,50-208,75	47x94	2,775	196,67	113,4	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-7	209,00-209,25	47x94	2,761	142,52	82,1	12700,0	0,25	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-8	209,75-210,00	47x94	2,772	140,82	81,2	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-9	212,00-212,40	47x94	2,746	-	-	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-10	212,80-212,90	47x94	2,756	149,07	85,9	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-11	215,20-215,40	47x94	2,816	316,86	182,6	10657,0	0,25	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-12	216,50-216,75	47x94	2,740	138,75	80,0	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-13	218,20-218,40	47x94	2,739	162,55	93,7	12432,0	0,22	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-14	219,00-219,25	47x94	2,769	159,39	91,9	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-15	219,25-220,00	47x94	2,756	265,51	153,0	15965,0	0,30	Gabro
20.06.2014	TSK-2	OK-2-16	223,80-223,90	47x94	2,761	164,61	94,9	-	-	Gabro



Ek Tablo 3. Tünel Araştırma Sondajları Karot Numuneleri Tek Eksenli Basınç Deneyi

KIRIM TARİHİ	SONDAJ NO	ÖRNEK NO	NUMUNENİN ALINDIĞI DERİNLİK ( m )	KAROT Dxl. ( mm )	BİRİM AĞIRLIK ( $\rho$ / cm <sup>3</sup> )	BASINÇ DAYANIMI ( kN )	BASINÇ DAYANIMI MPa ( N/ mm <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü Ei [MPa]	Poisson Oranı u	Litoloji
20.06.2014	TSK-3	OK-3-1	300,50-301,00	47x94	0,000	-	-	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-3	OK-3-2	315,00-315,25	63x63	2,724	74,65	34,4	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-3	OK-3-3	326,50-326,75	47x94	2,718	221,07	127,4	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-3	OK-3-4	328,50-328,75	47x94	2,720	106,58	61,4	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-3	OK-3-5	329,25-329,50	47x94	2,751	184,28	106,2	8586,0	0,26	Gabro
20.06.2014	TSK-3	OK-3-6	331,75-332,00	47x94	2,758	178,70	103,0	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-3	OK-3-7	336,50-336,75	47x94	2,718	112,75	65,0	12821,0	0,21	Gabro
20.06.2014	TSK-3	OK-3-8	339,75-339,90	47x63	2,691	141,54	76,8	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-3	OK-3-9	344,25-344,50	47x94	2,708	232,00	133,7	11296,0	0,24	Gabro
20.06.2014	TSK-3	OK-3-10	344,75-344,00	47x94	2,731	126,25	72,8	-	-	Gabro

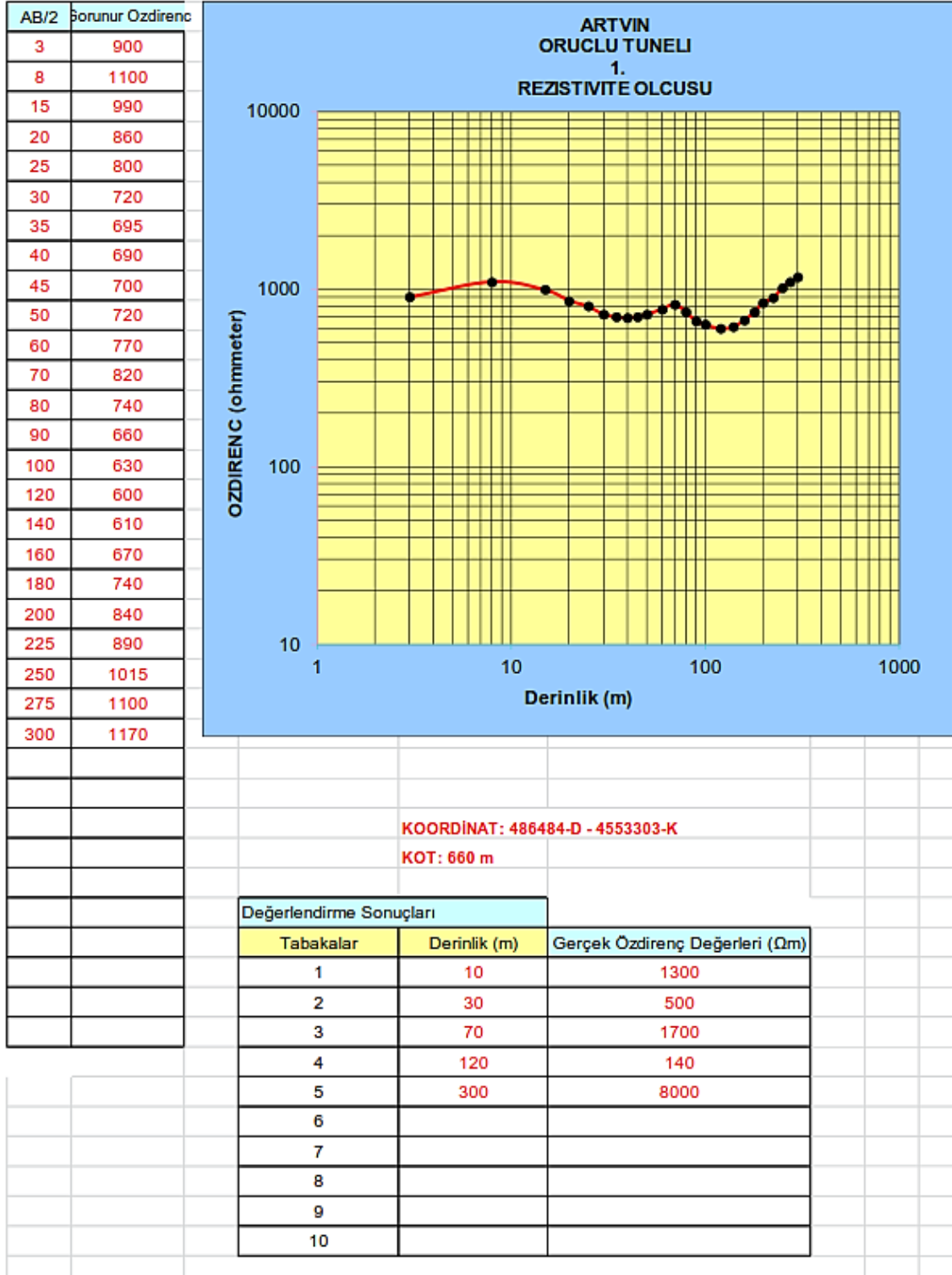
Ek Tablo 4. Tünel Araştırma Sondajları Karot Numuneleri Tek Eksenli Basınç Deneyi

KIRIM TARİHİ	SONDAJ NO	ÖRNEK NO	NUMUNENİN ALINDIĞI DERİNLİK ( m )	KAROT Dxl. ( mm )	BİRİM AĞIRLIK ( $\rho$ / cm <sup>3</sup> )	BASINÇ DAYANIMI ( kN )	BASINÇ DAYANIMI MPa ( N/ mm <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü Ei [MPa]	Poisson Oranı u	Litoloji
20.06.2014	TSK-4	OK-4-1	263,50-263,75	47x64	2,644	120,42	65,5	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-4	OK-4-2	264,25-264,75	47x94	2,666	-	-	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-4	OK-4-3	266,15-266,30	47x94	2,655	202,37	116,6	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-4	OK-4-4	267,50-267,75	47x94	2,812	149,19	86,0	11614,0	0,21	Gabro
20.06.2014	TSK-4	OK-4-5	268,50-268,75	47x94	2,761	94,32	-	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-4	OK-4-6	270,00-270,50	47x94	2,612	172,63	99,5	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-4	OK-4-7	273,50-273,70	47x94	2,766	255,55	147,3	8962,0	0,24	Gabro
20.06.2014	TSK-4	OK-4-8	275,00-275,25	47x94	2,773	291,85	168,2	-	-	Gabro
20.06.2014	TSK-4	OK-4-9	278,75-278,90	47x94	-	-	-	9756,0	0,25	Gabro
20.06.2014	TSK-4	OK-4-10	279,25-279,50	47x94	2,731	135,11	77,9	-	-	Gabro

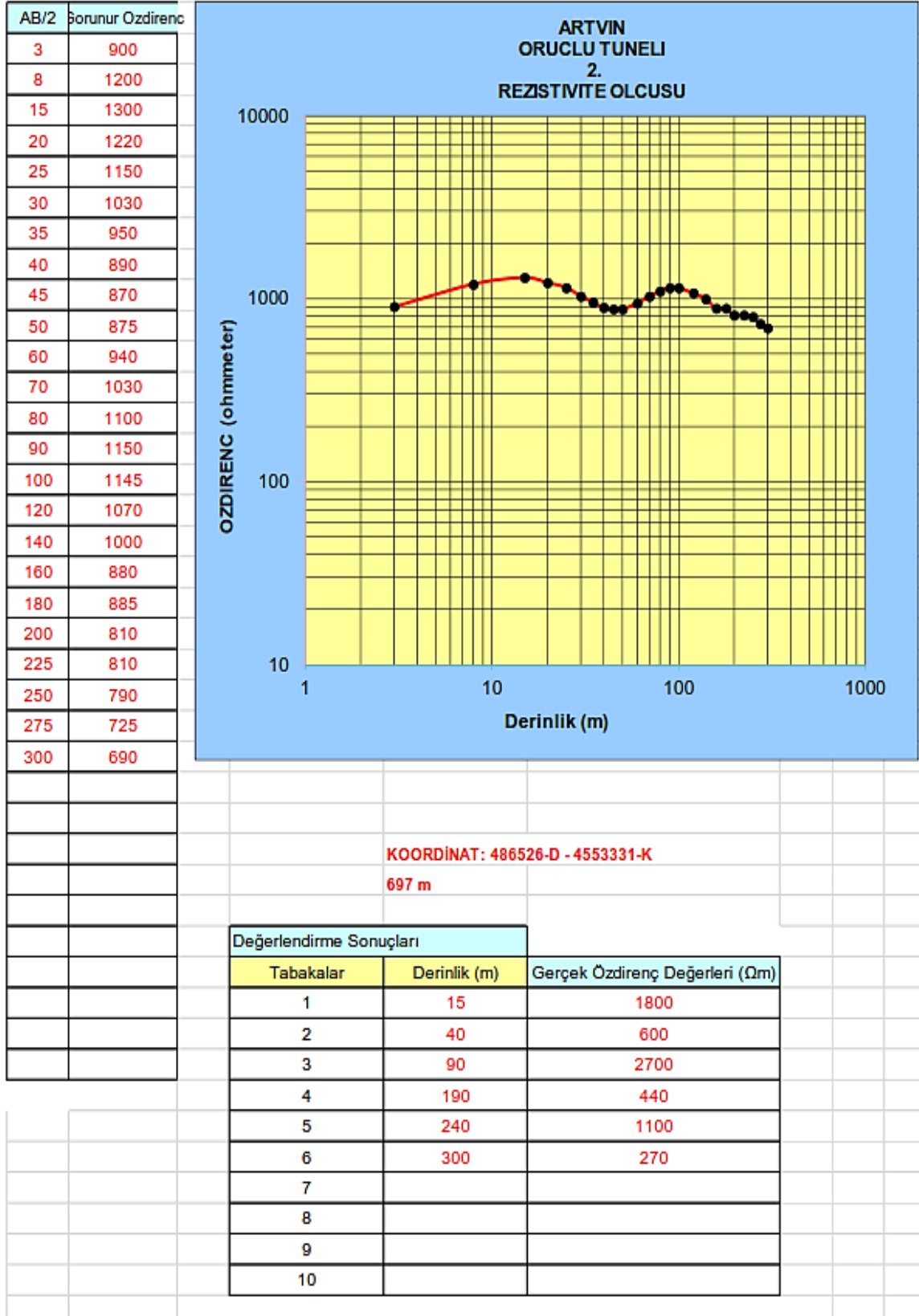
Ek Tablo 5. Tünel Araştırma Sondajları Karot Numuneleri Tek Eksenli Basınç Deneyi

KIRIM TARİHİ	SONDAJ NO	ÖRNEK NO	NUMUNENİN ALINDIĞI DERİNLİK ( m )	KAROT Dxl ( mm )	BİRİM AĞIRLIK ( $\gamma$ / cm <sup>3</sup> )	BASINÇ DAYANIMI ( kN )	BASINÇ DAYANIMI MPa ( N/ mm <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü E <sub>i</sub> [MPa]	Poisson Oranı $\nu$	Litoloji
20.06.2014	TSK-5	OK-5-1	263,50-263,75	47x59	2,861	120,42	64,6			
20.06.2014	TSK-5	OK-5-2	264,25-264,75	47x94	2,801	140,69	81,1			
20.06.2014	TSK-5	OK-5-3	266,15-266,30	47x94	2,981	59,96	34,6			
20.06.2014	TSK-5	OK-5-4	267,50-267,75	47x94	2,706	149,19	86,0			

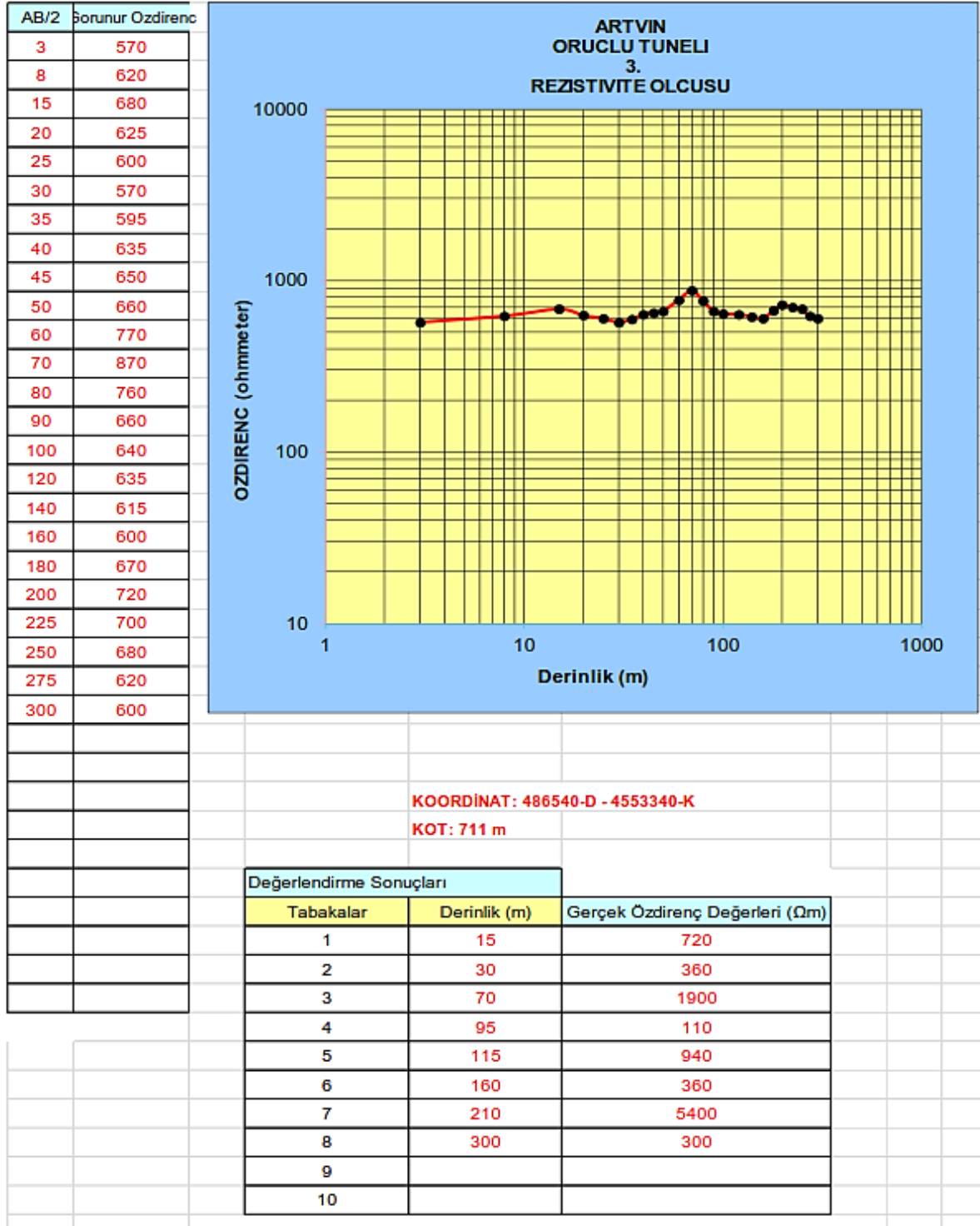




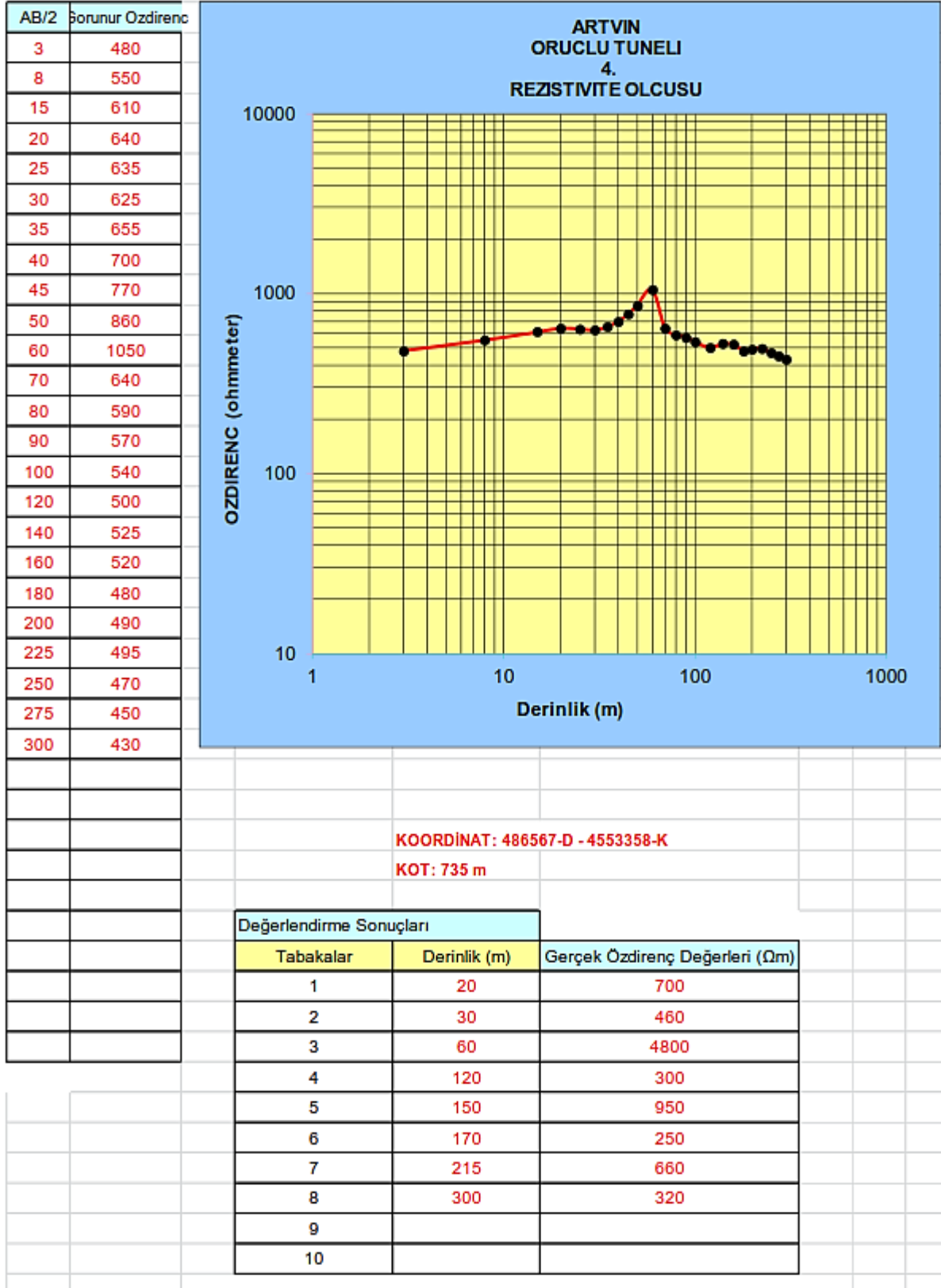
Ek 7. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:660 m



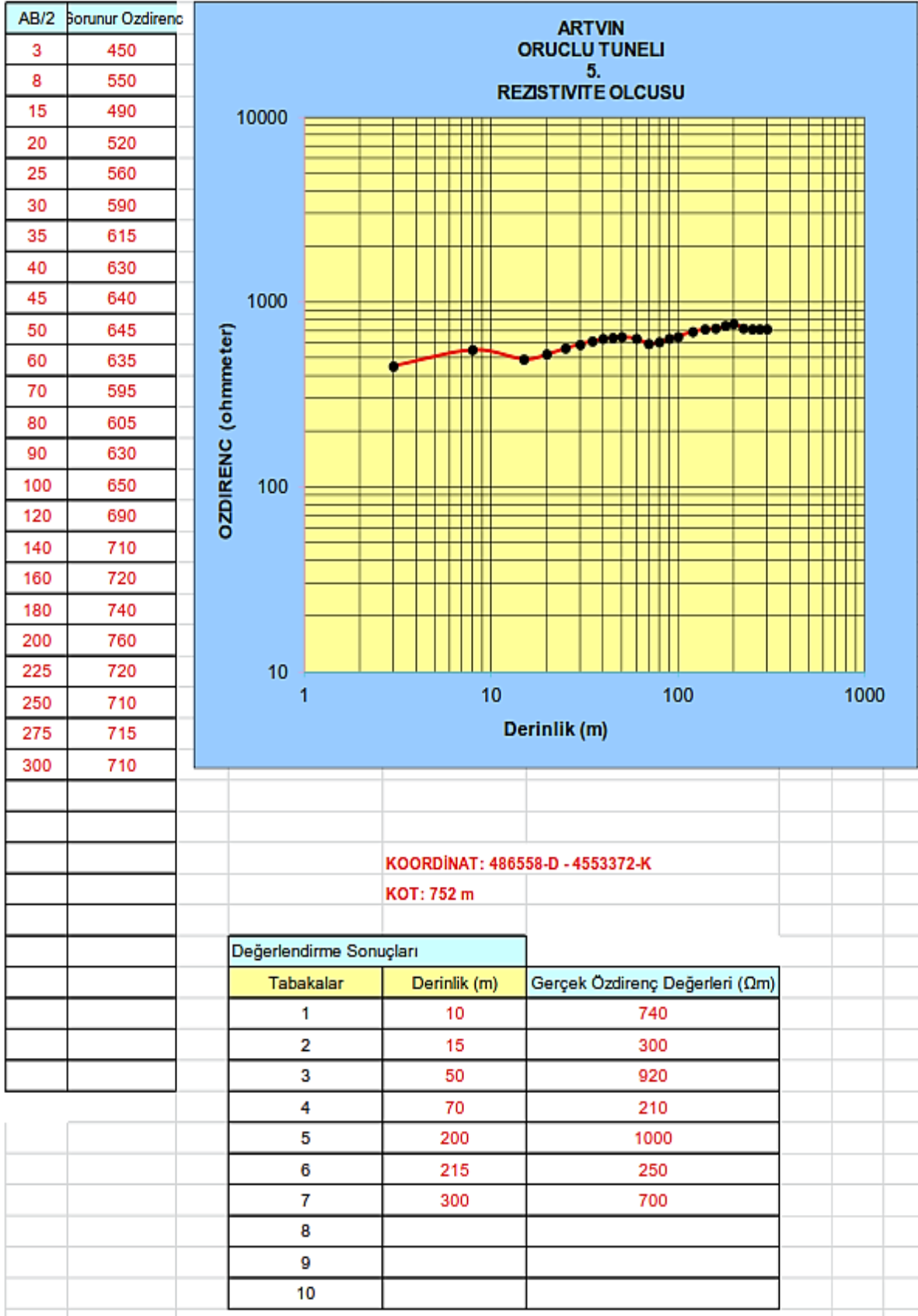
Ek 8. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:697 m



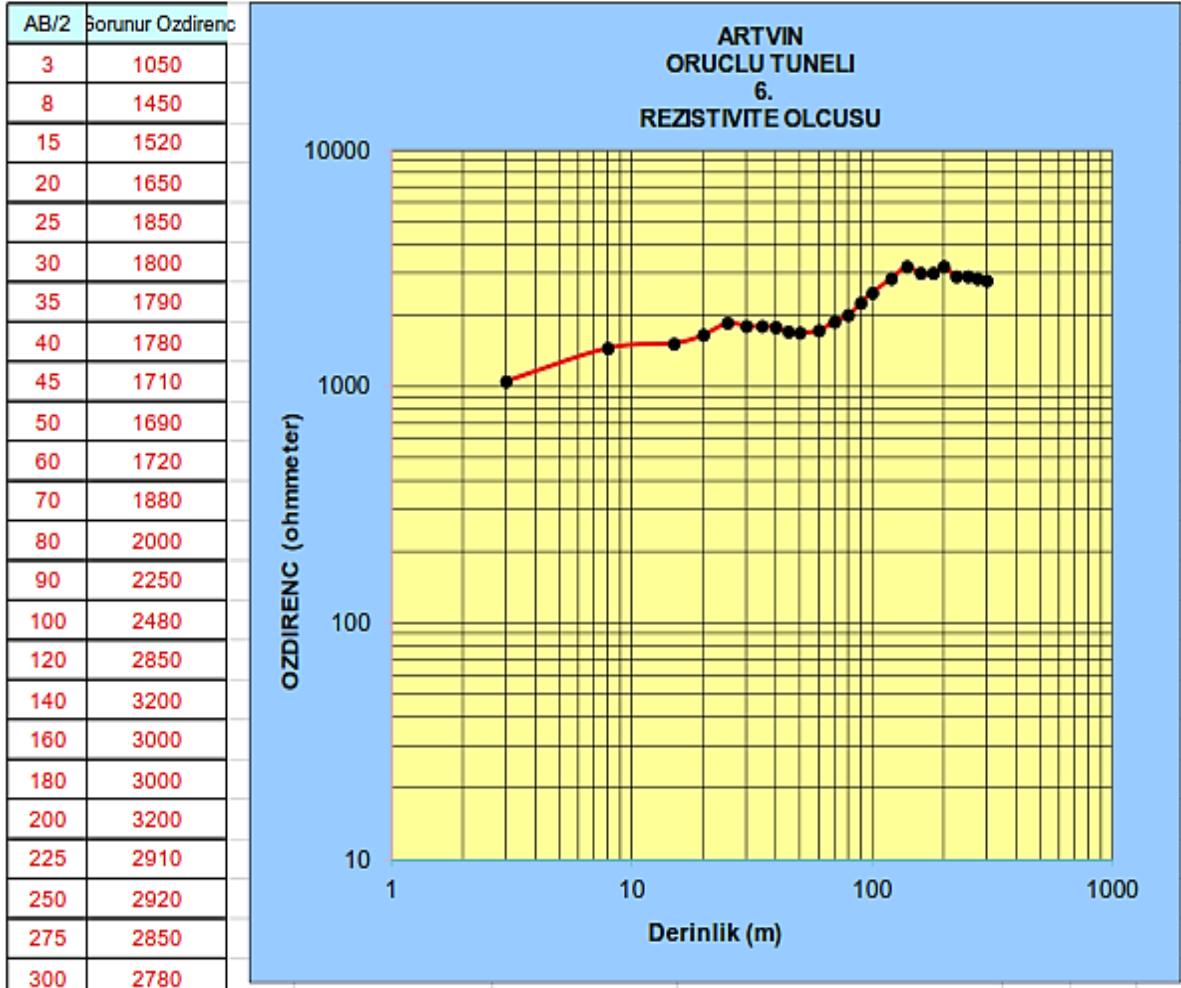
Ek 9. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:711 m



Ek 10. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:735 m



Ek 11. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:752 m



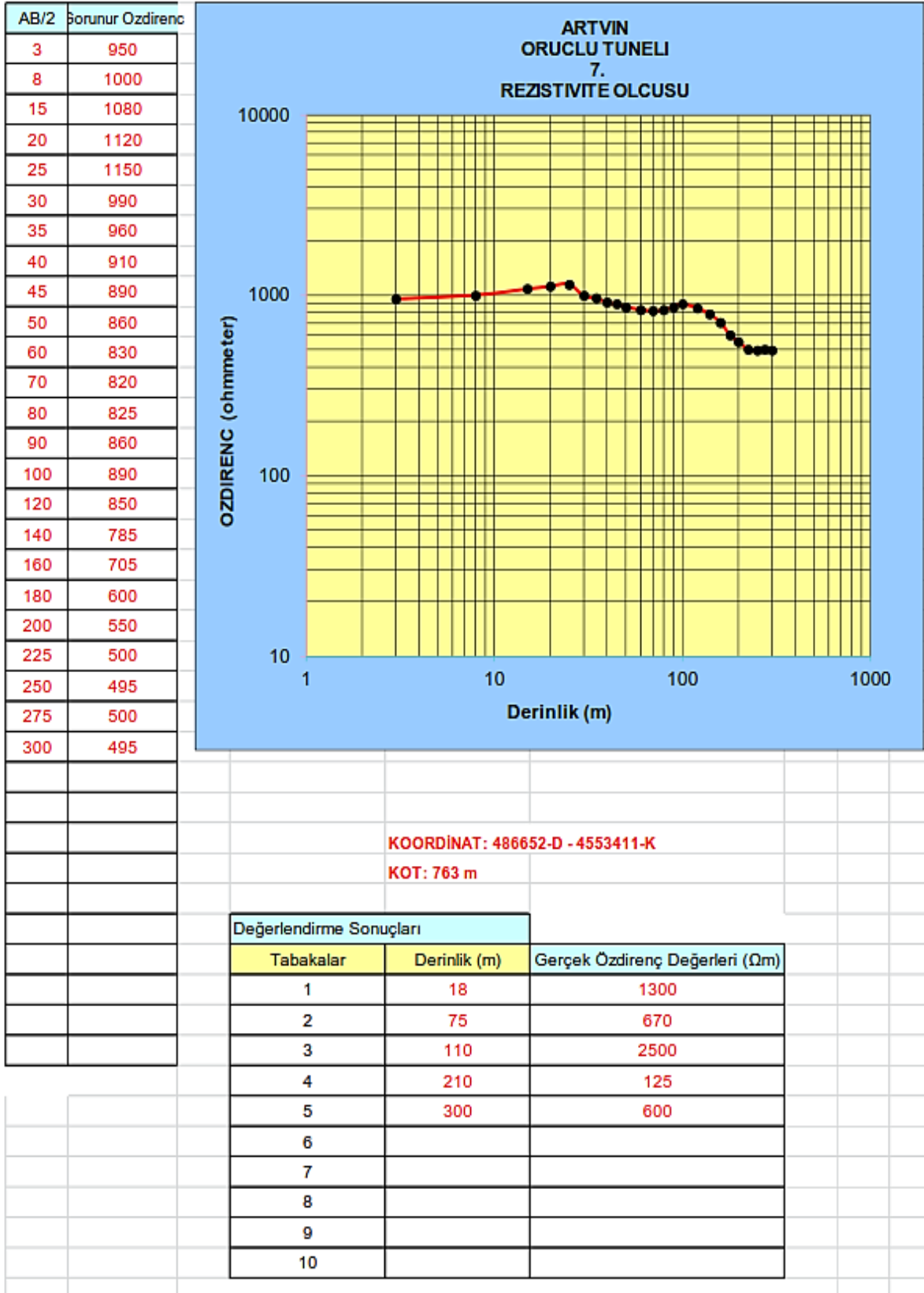
KOORDINAT: 486610-D - 4553385-K

KOT: 755 m

Değerlendirme Sonuçları		
Tabakalar	Derinlik (m)	Gerçek Özdirenç Değerleri (Ωm)
1	10	2200
2	15	1200
3	25	7000
4	55	1300
5	140	14000
6	175	100
7	195	600
8	215	1300
9	250	3700
10	300	1650

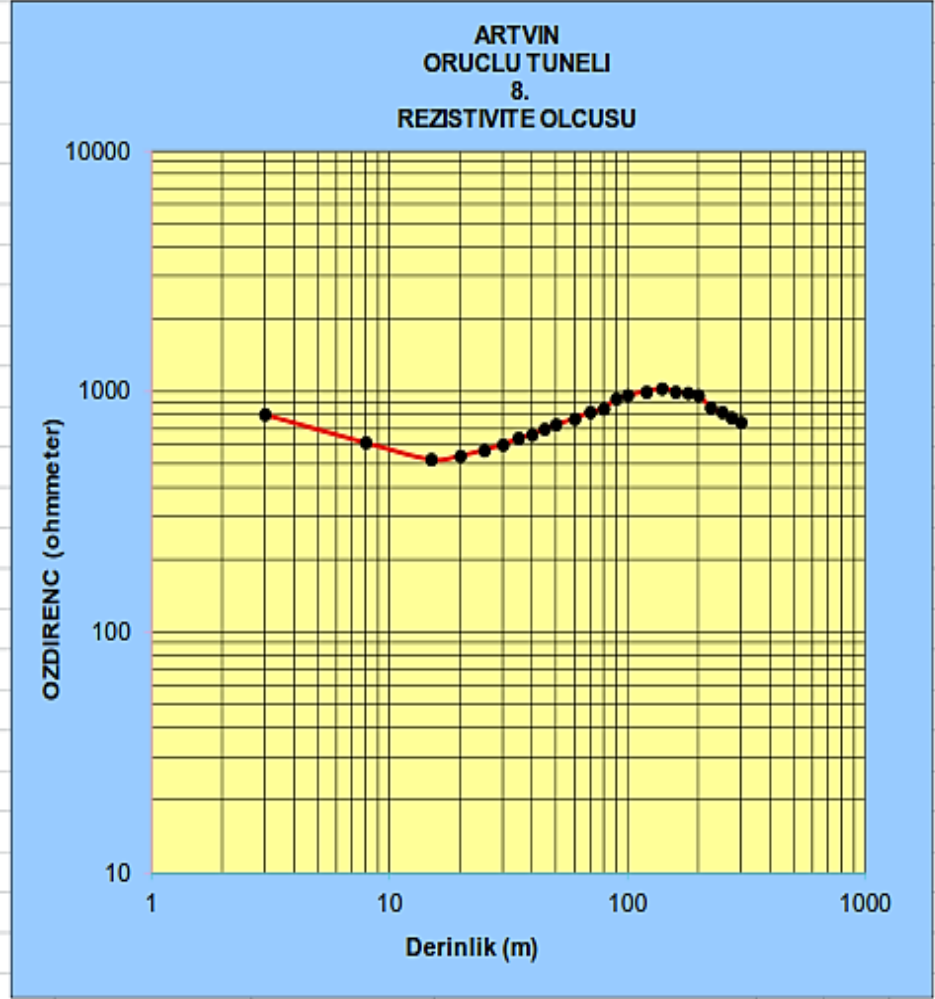
Ek 12. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:755 m





Ek 13. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:763 m

AB/2	Ölçülen Özdirenç
3	800
8	610
15	520
20	540
25	570
30	600
35	640
40	660
45	700
50	725
60	770
70	820
80	850
90	930
100	960
120	1000
140	1030
160	1000
180	980
200	960
225	860
250	820
275	780
300	740

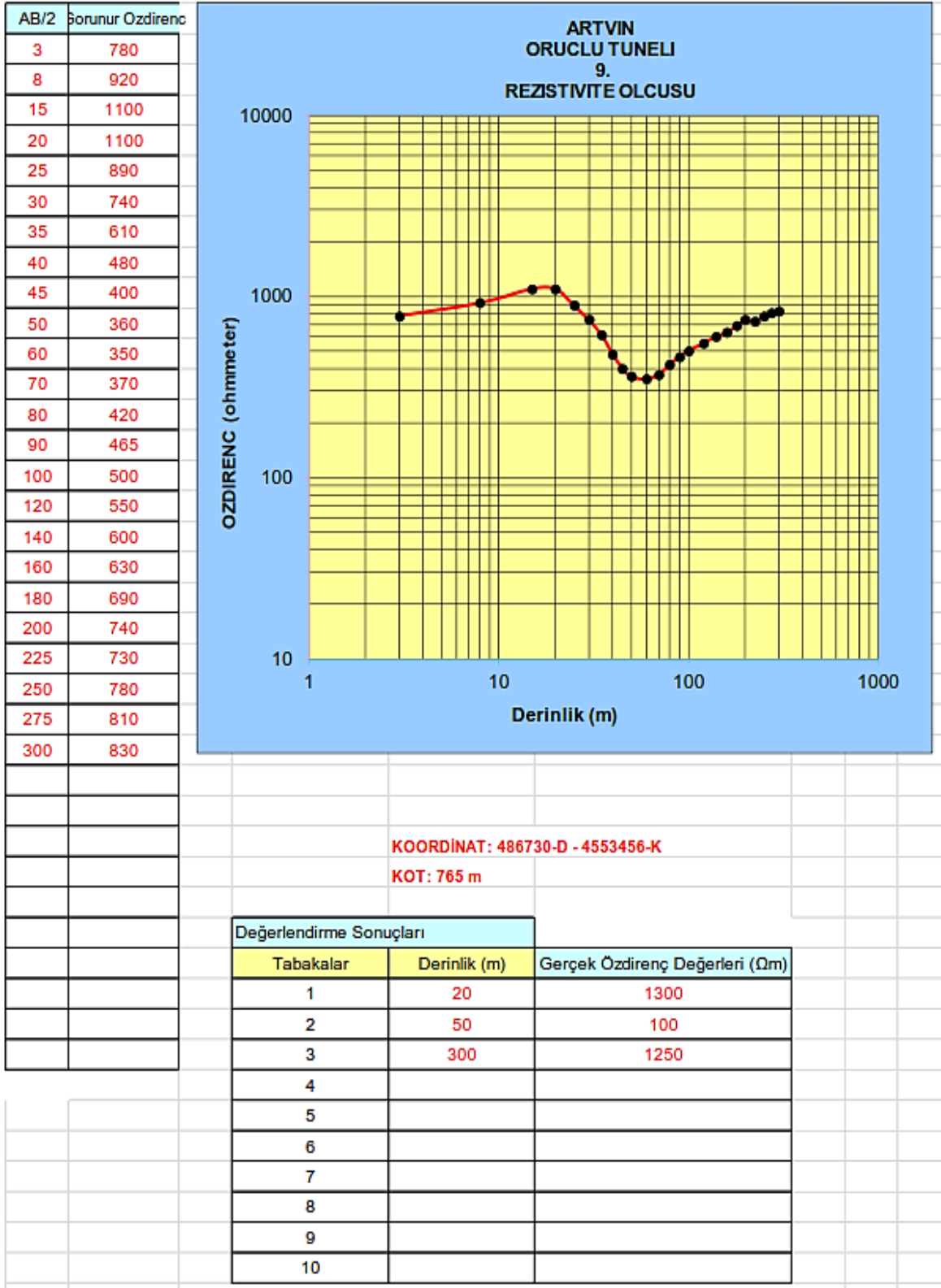


KOORDİNAT: 486695-D - 4553436-K

KOT: 758 m

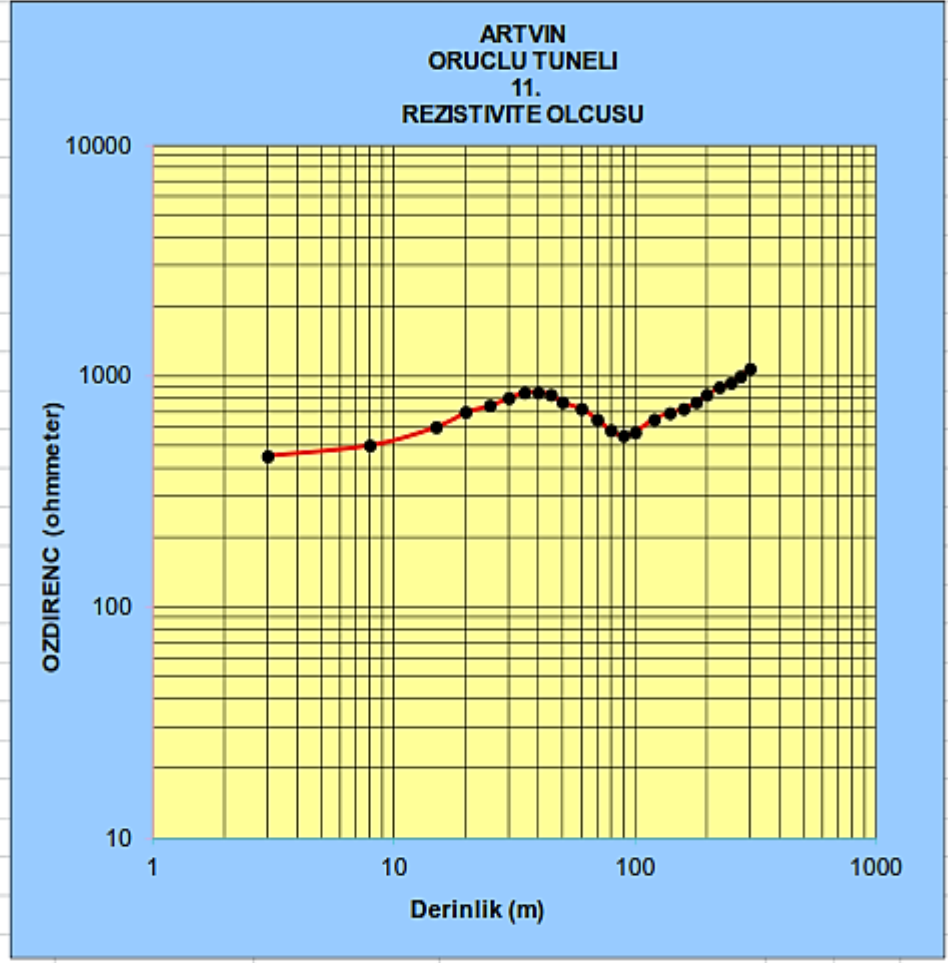
Değerlendirme Sonuçları		
Tabakalar	Derinlik (m)	Gerçek Özdirenç Değerleri (Ωm)
1	18	500
2	170	1300
3	300	500
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Ek 14. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:758 m



Ek 15. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:765 m

AB/2	Sonunur Ozdirenc
3	450
8	500
15	600
20	695
25	740
30	800
35	850
40	850
45	830
50	770
60	720
70	650
80	580
90	550
100	570
120	650
140	690
160	720
180	770
200	830
225	890
250	930
275	1000
300	1070



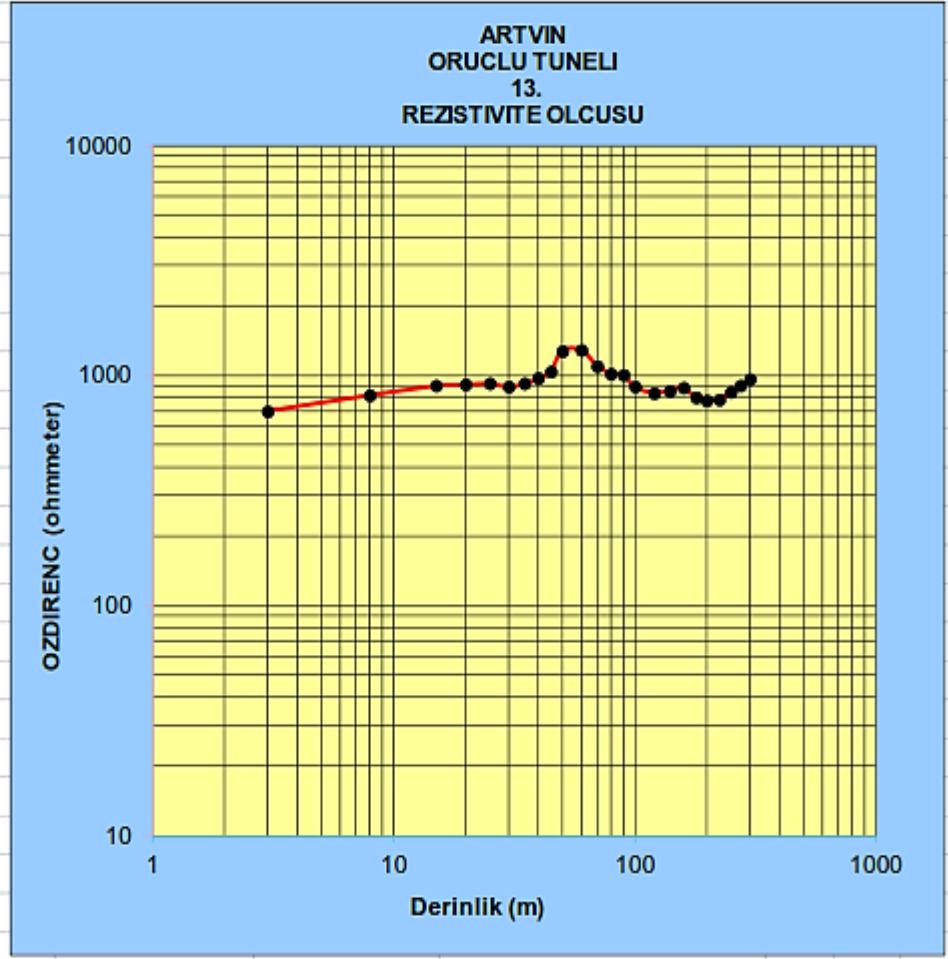
**KOORDİNAT: 486694-D - 4553389-K**

**KOT: 734 m**

Değerlendirme Sonuçları		
Tabakalar	Derinlik (m)	Gerçek Özdirenç Değerleri ( $\Omega$ m)
1	40	1100
2	85	280
3	300	1850
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

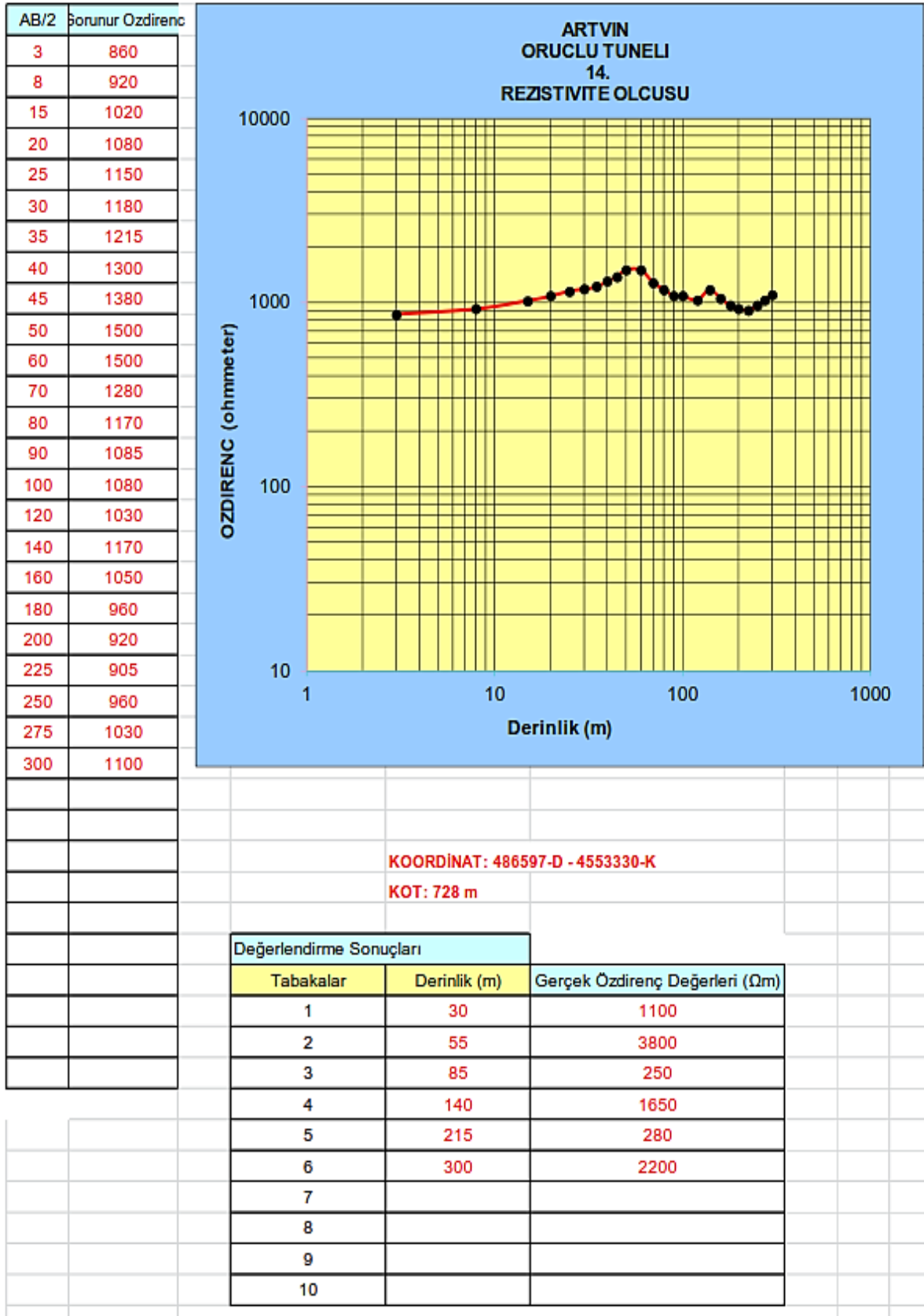
Ek 16. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:734 m

AB/2	Borunur Ozdirenc
3	700
8	820
15	900
20	910
25	920
30	890
35	920
40	970
45	1040
50	1280
60	1290
70	1100
80	1020
90	1005
100	890
120	840
140	860
160	880
180	800
200	780
225	785
250	850
275	900
300	960

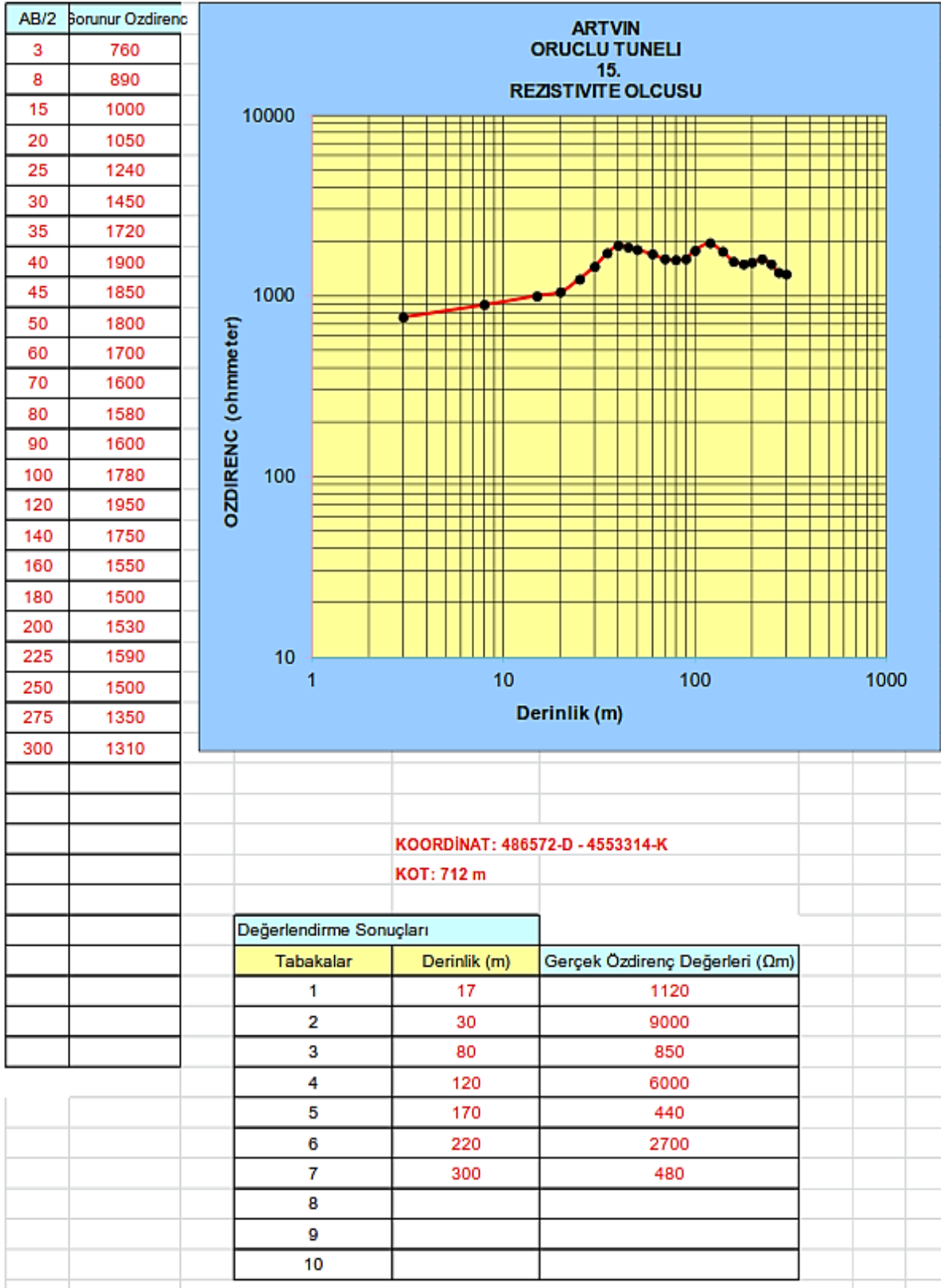


Değerlendirme Sonuçları		
Tabakalar	Derinlik (m)	Gerçek Özdirenc Değerleri ( $\Omega$ m)
1	20	1000
2	30	660
3	60	5600
4	115	440
5	160	1600
6	210	250
7	300	5000
8		
9		
10		

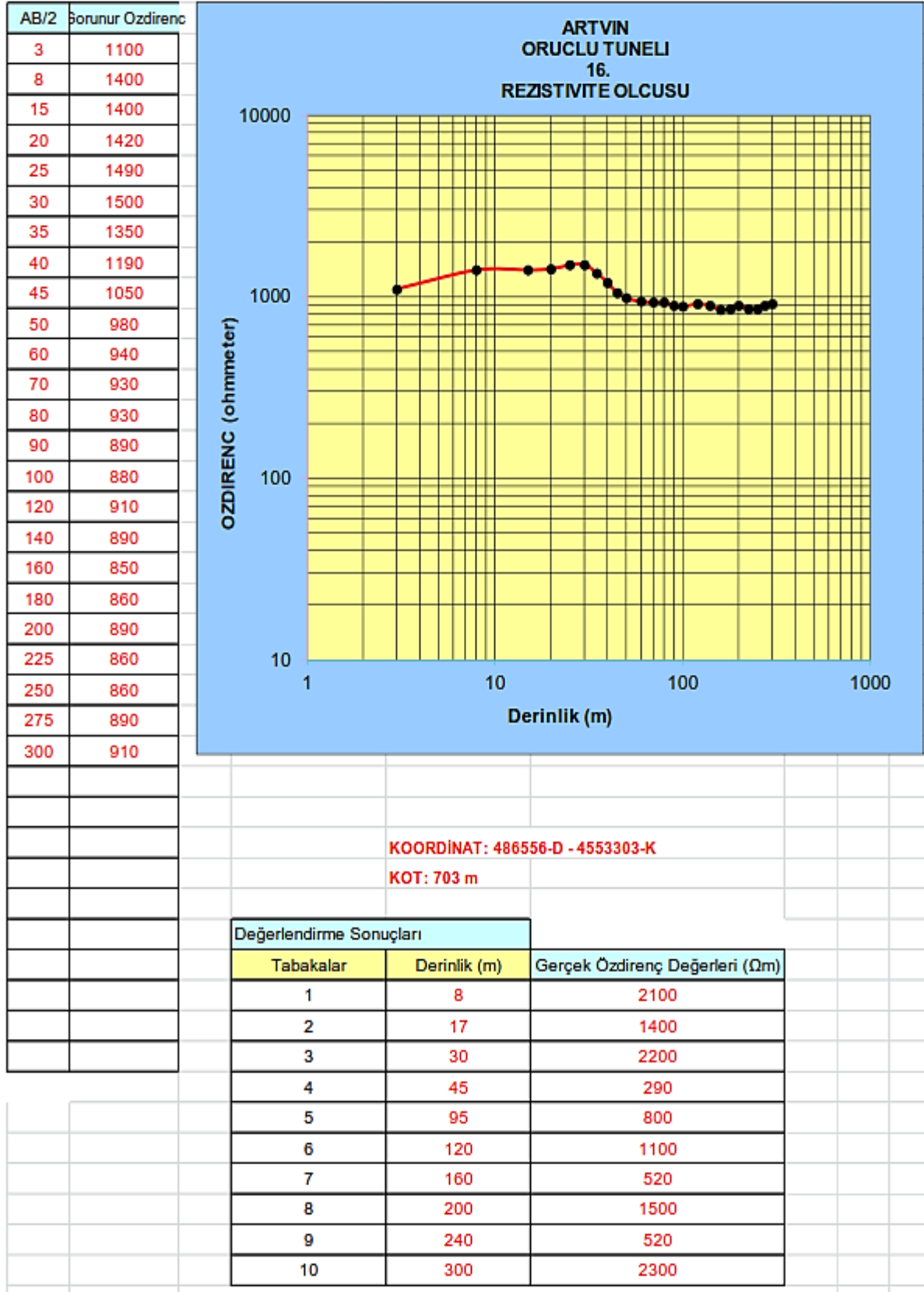
Ek 17. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:733 m



Ek 18. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:728 m

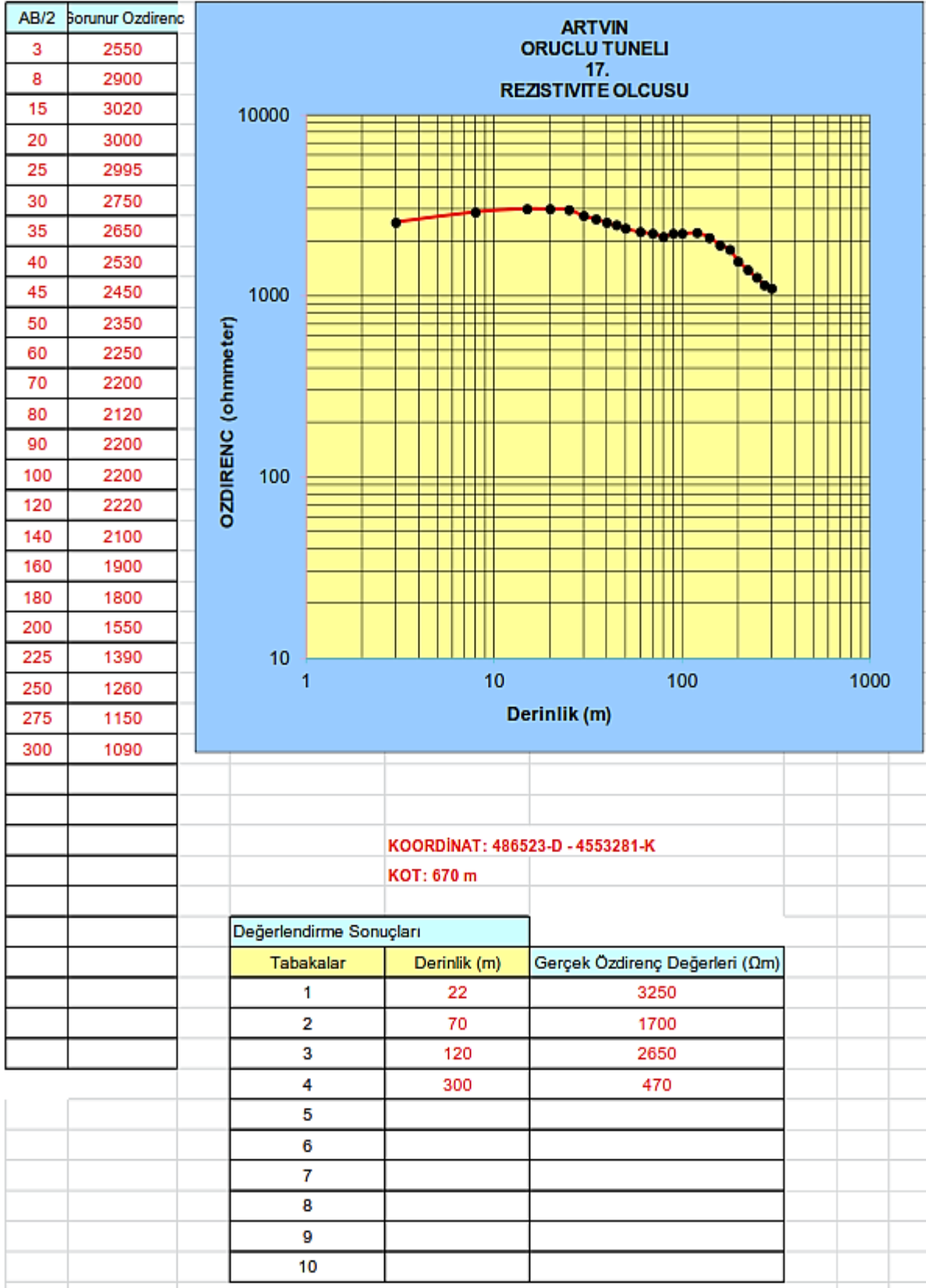


Ek 19. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:712 m

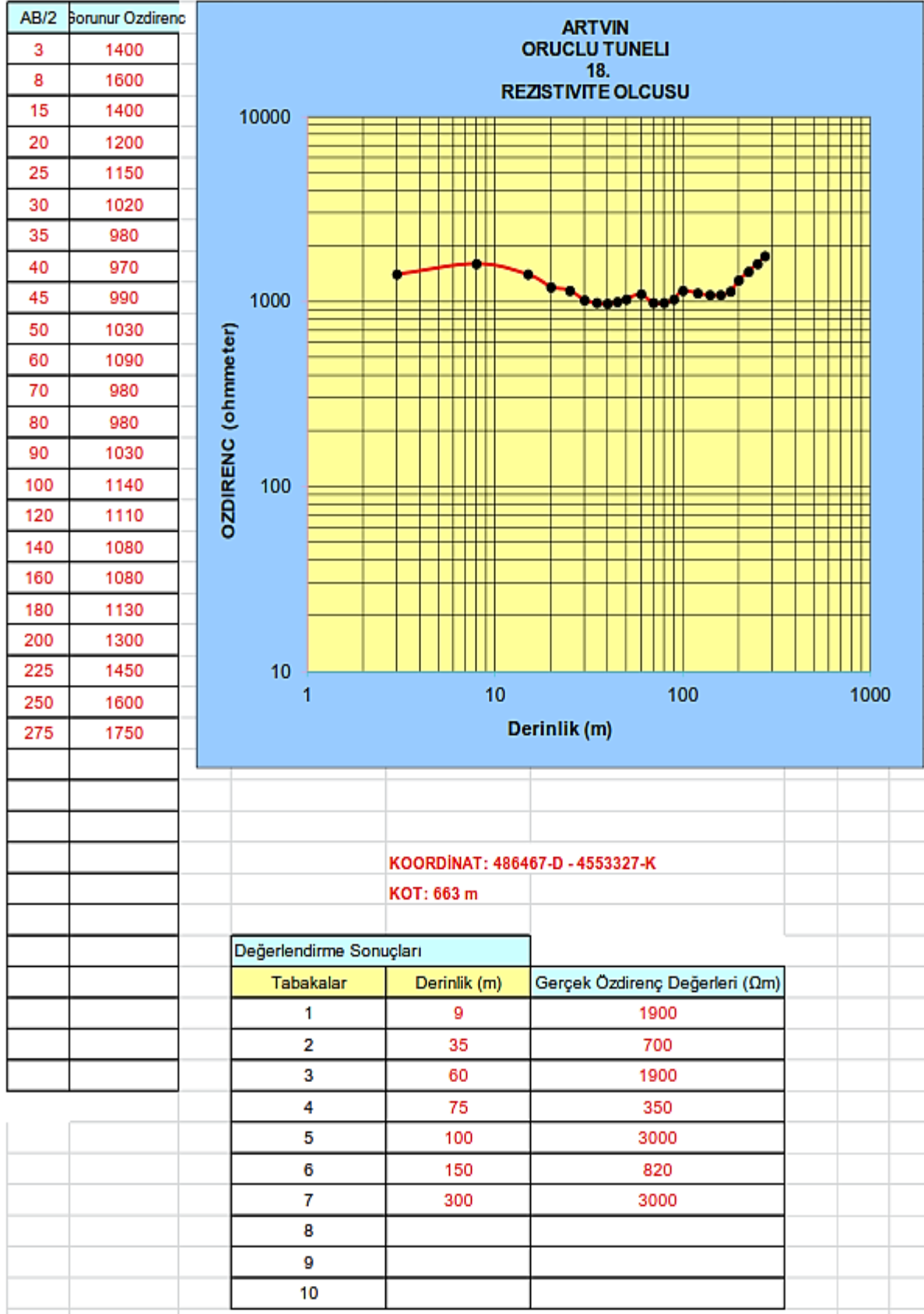


Ek 20. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:703 m

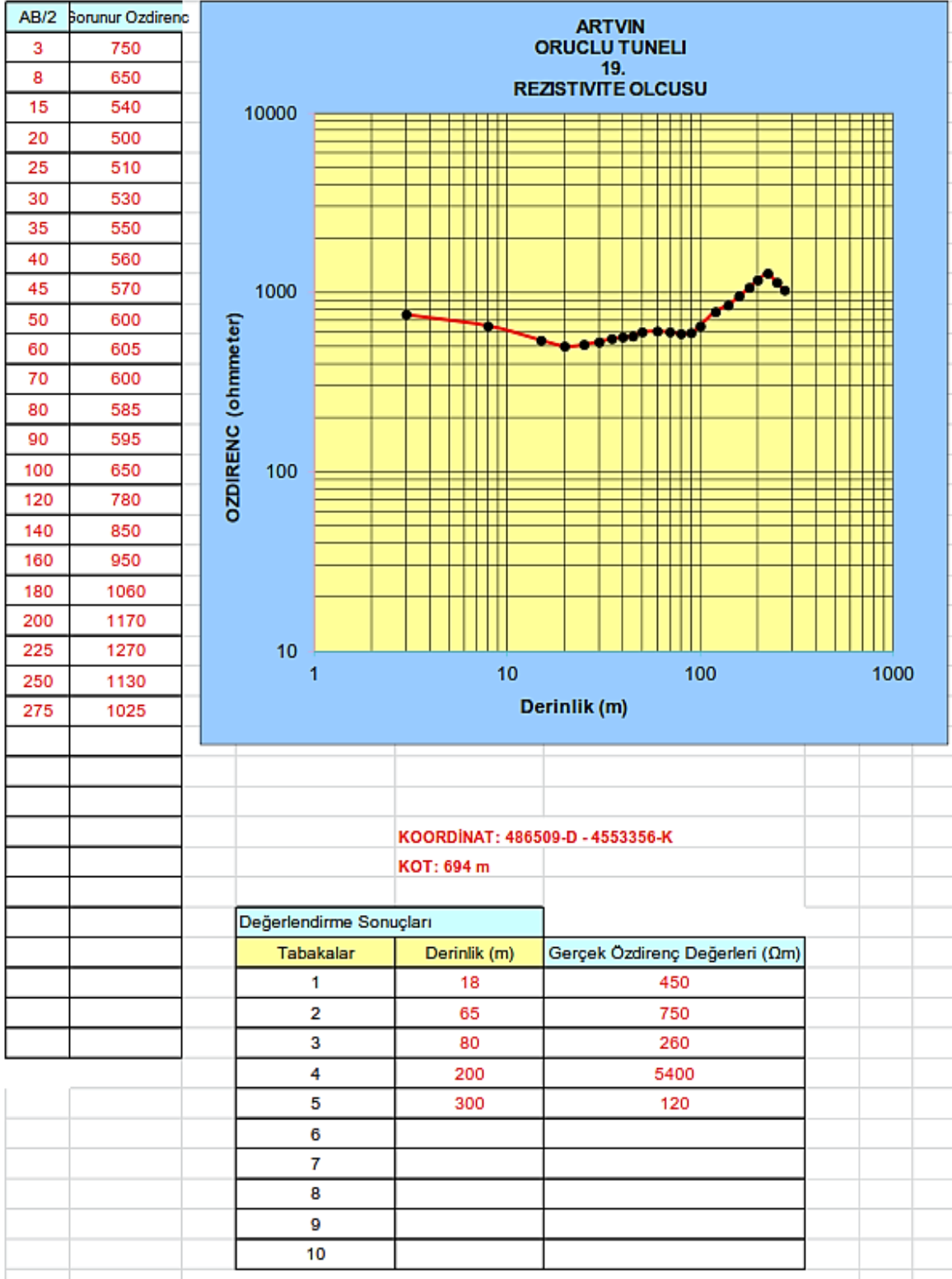




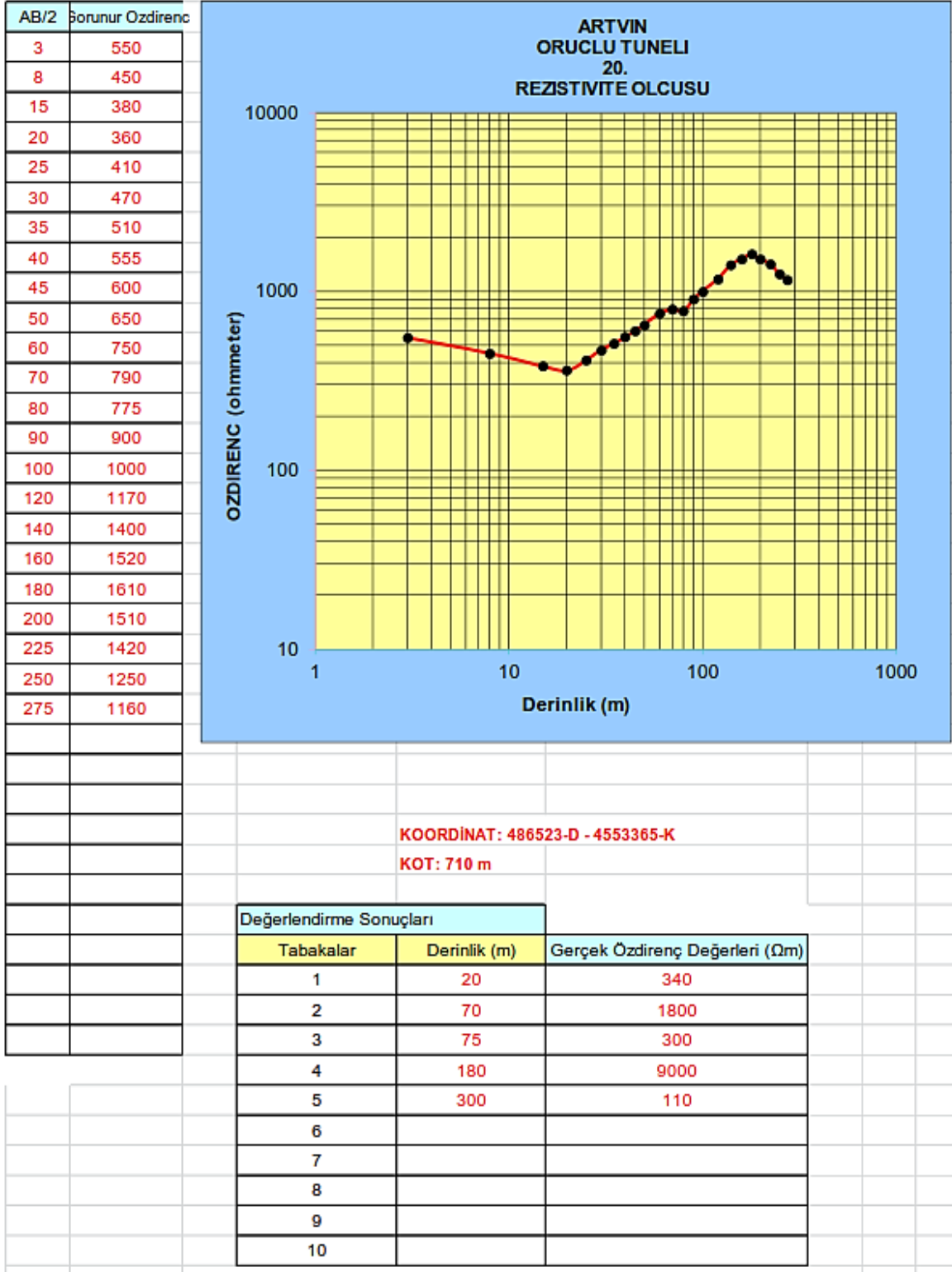
Ek 21. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:670 m



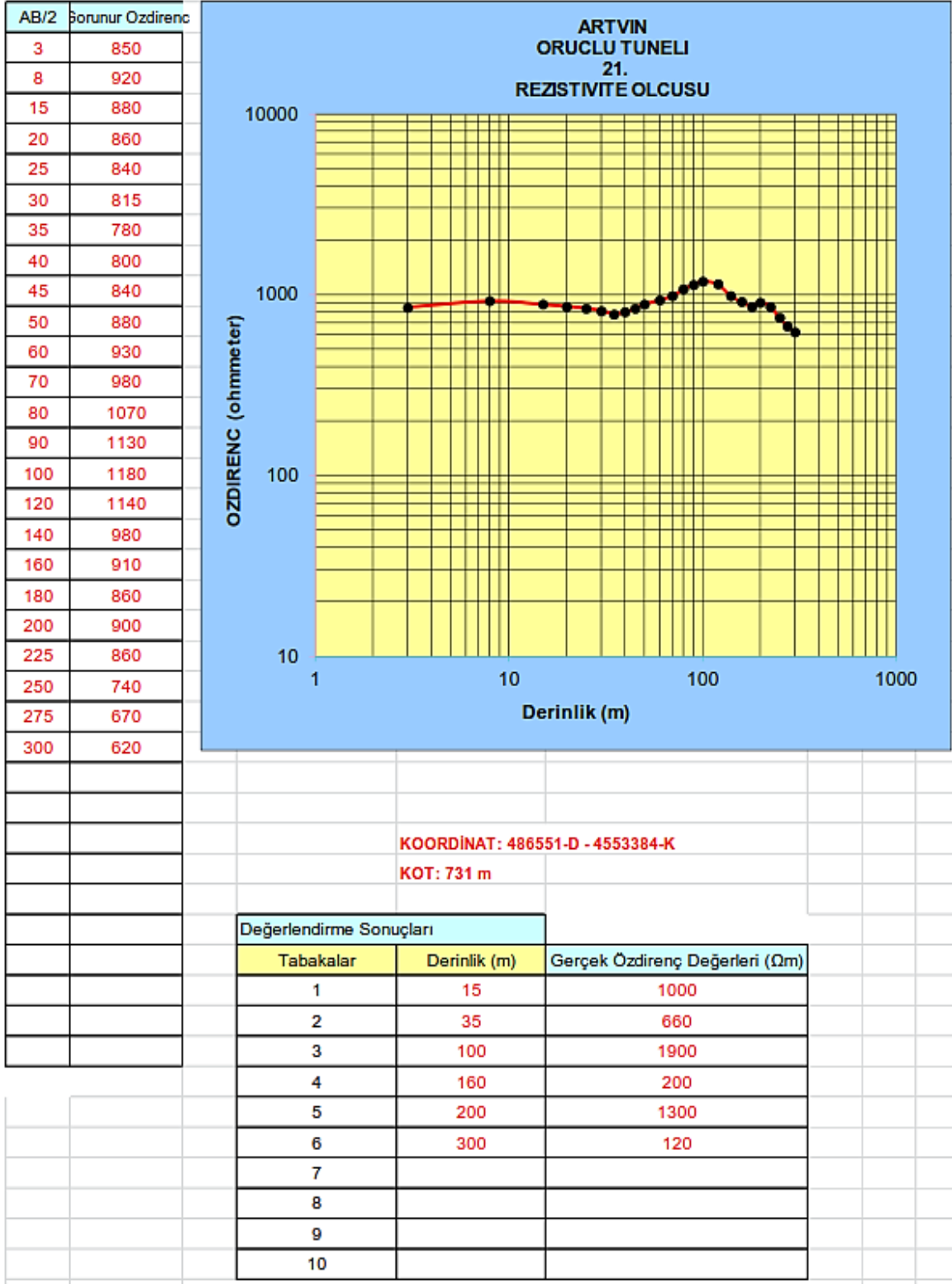
Ek 22. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:663 m



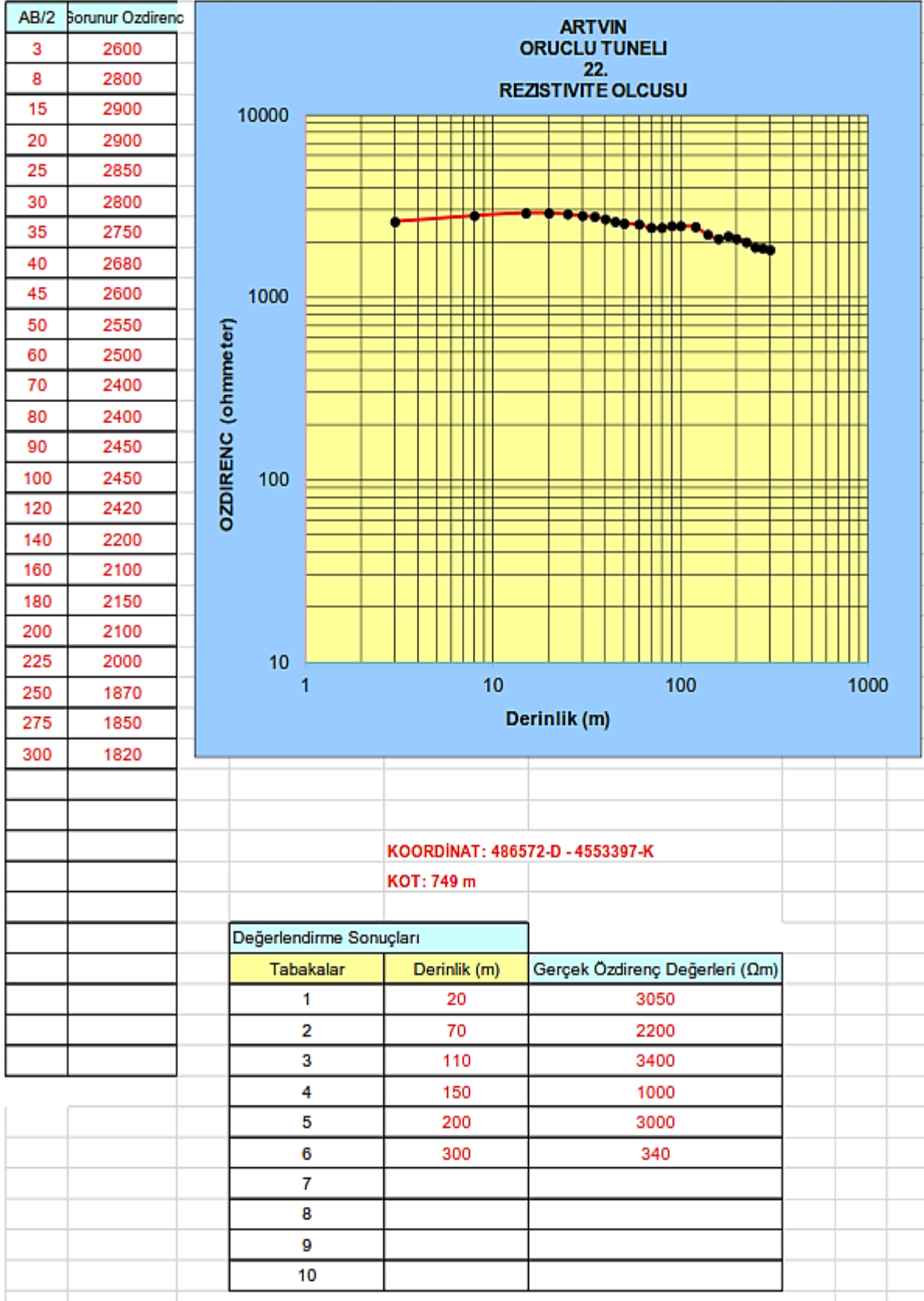
Ek 23. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:694 m



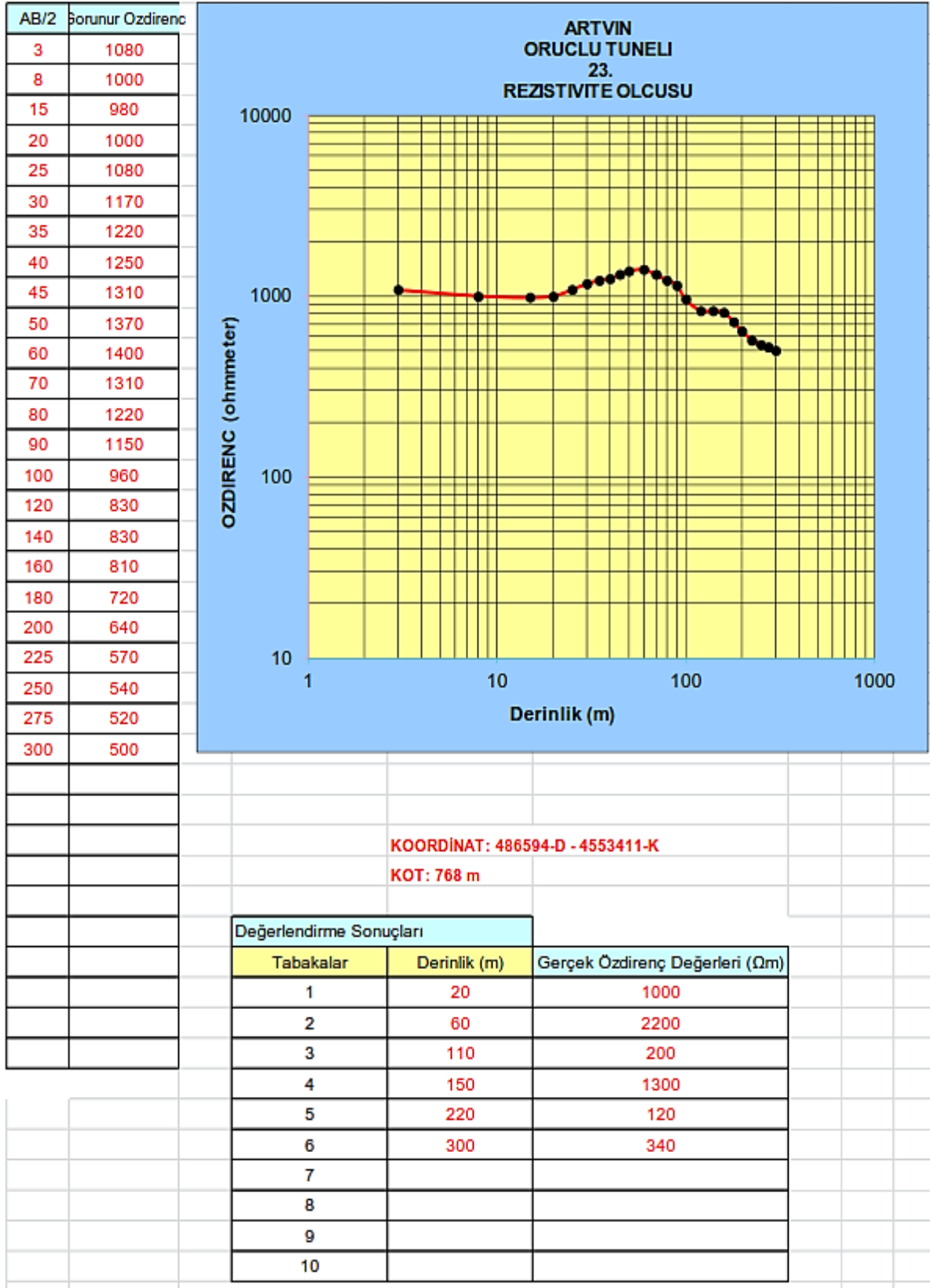
Ek 24. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:710 m



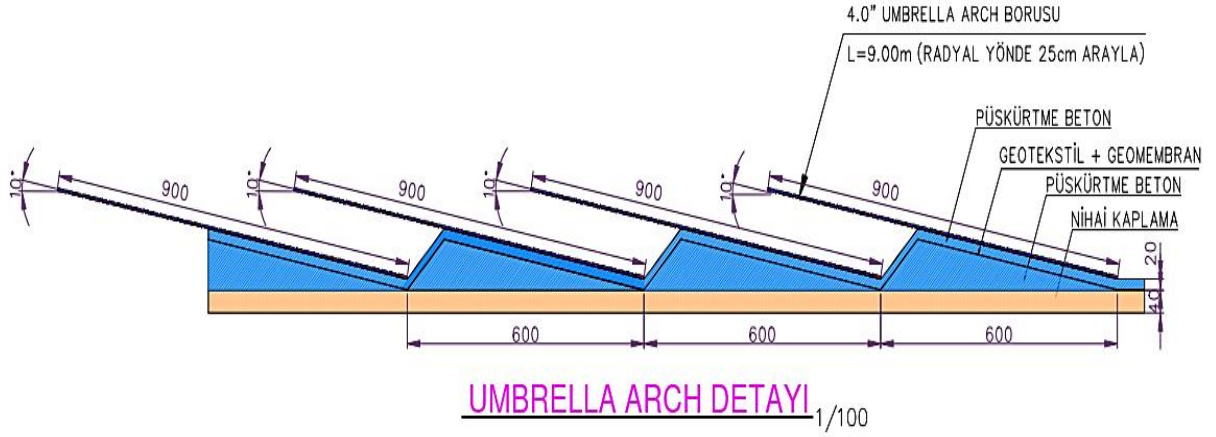
Ek 25. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:731 m



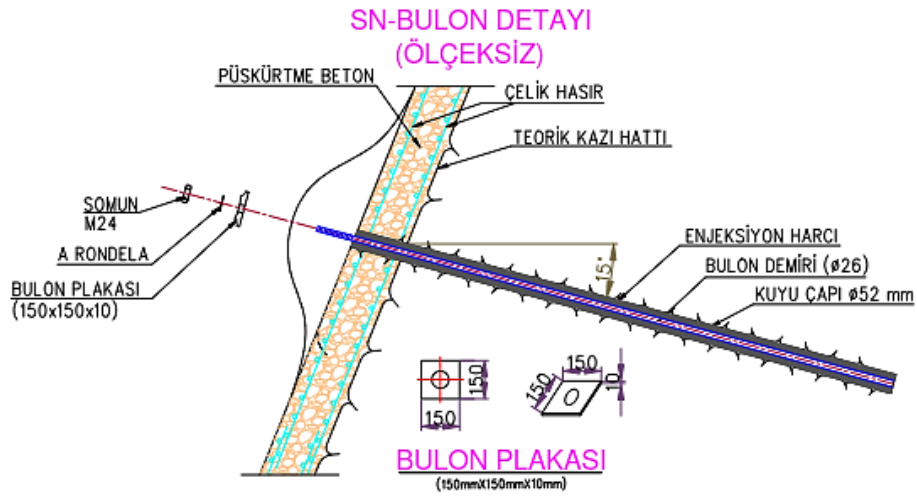
Ek 26. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:749 m



Ek 27. Oruçlu Tüneli Rezistivite Eğriler Kot:768 m



Ek 28. Şemsiye Kemer Detayı L=9 m

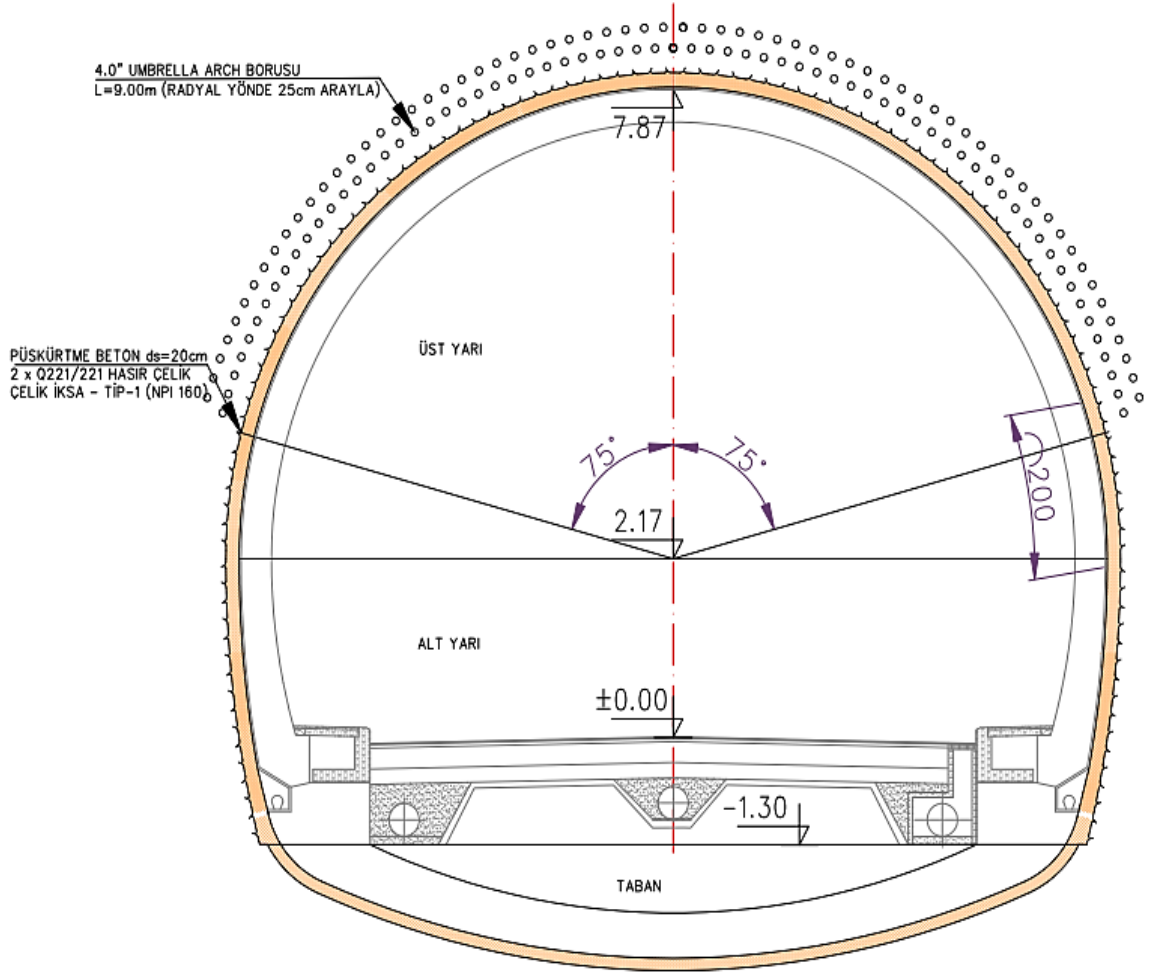


SN-BULONU YAPIM İŞLEM SIRASI :

1. BULON KUYULARININ DELİNMESİ.
  2. BULON KUYUSUNA PLASTİK KIVAMLI ENJEKSİYON HARCİ DOLDURULMASI
  3. BULON DEMİRİNİN KUYUYA SÜRÜLMESİ.
  4. ENJEKSİYON HARCİNİN PRİZ ALMASINDAN SONRA (8-12 SAAT ARASI)  
BULON PLAKASI, PUL VE SOMUNUN TAKILARAK TORK İŞLEMİNİN YAPILMASI.
- KULLANIM:** TÜNELLERDE NORMAL KOŞULLARDAKİ UYGULAMALARDA GENEL KULLANIM İÇİNDİR.

Ek 29. SN Bulon Detayı

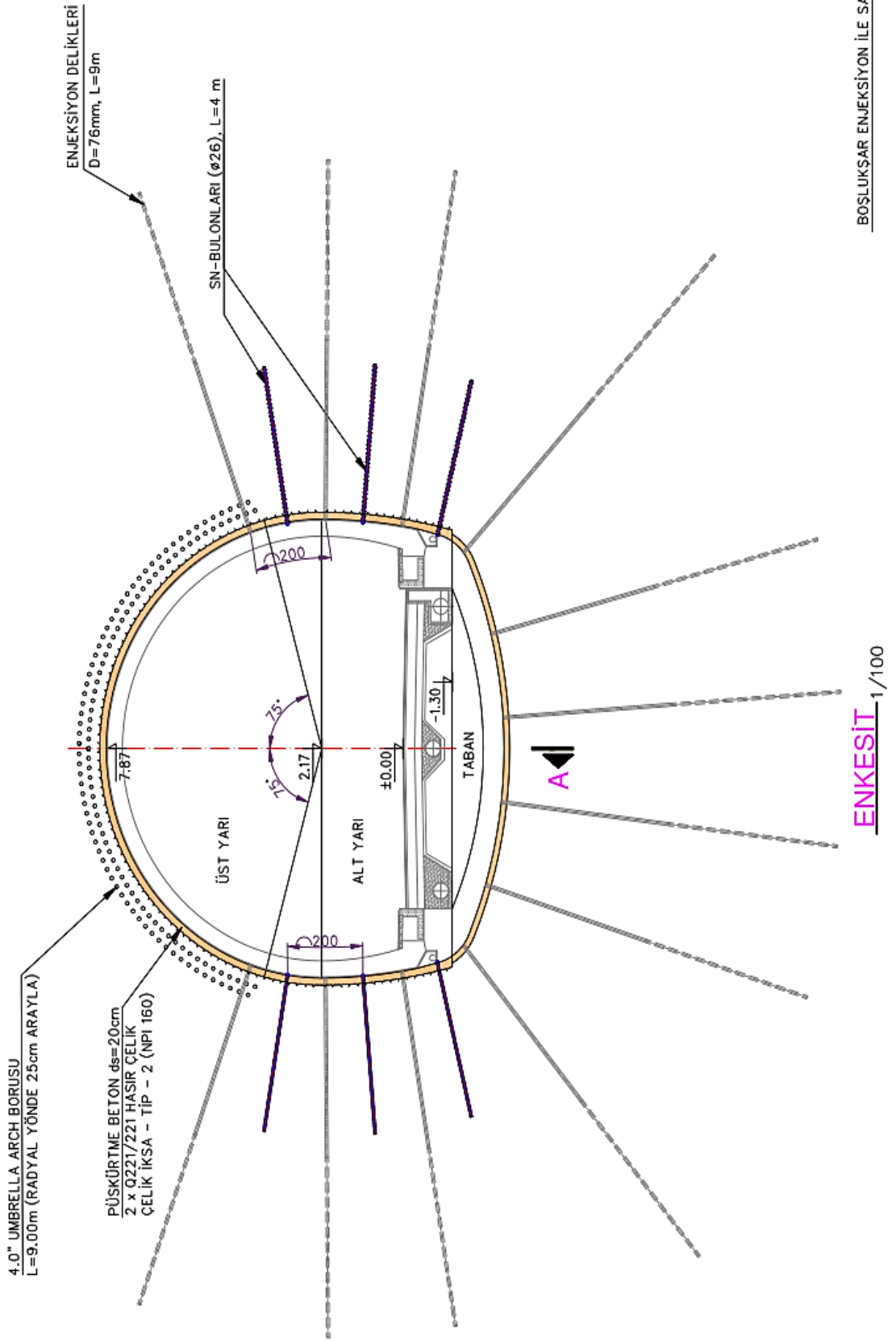




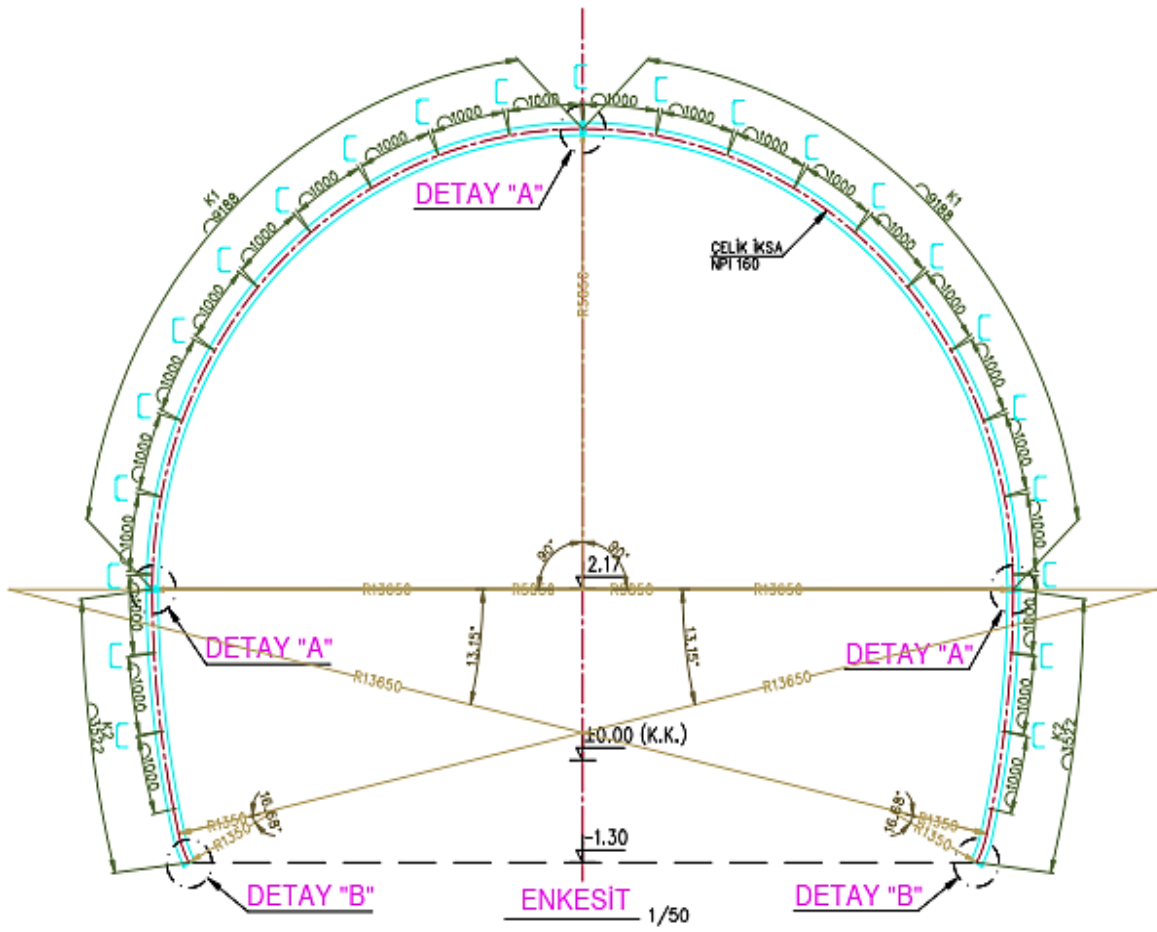
**TİP-2 DETAYI** 1/50

ÇİFT SIRA 133 ADET 9 M BOYUNDA TOPLAMDA 1197 M/RİNG  
4.0" UMBRELLA ARCH BORUSU ET KALINLIĞI 4.5 MM

Ek 30. Tip-2 Tünel Kesiti

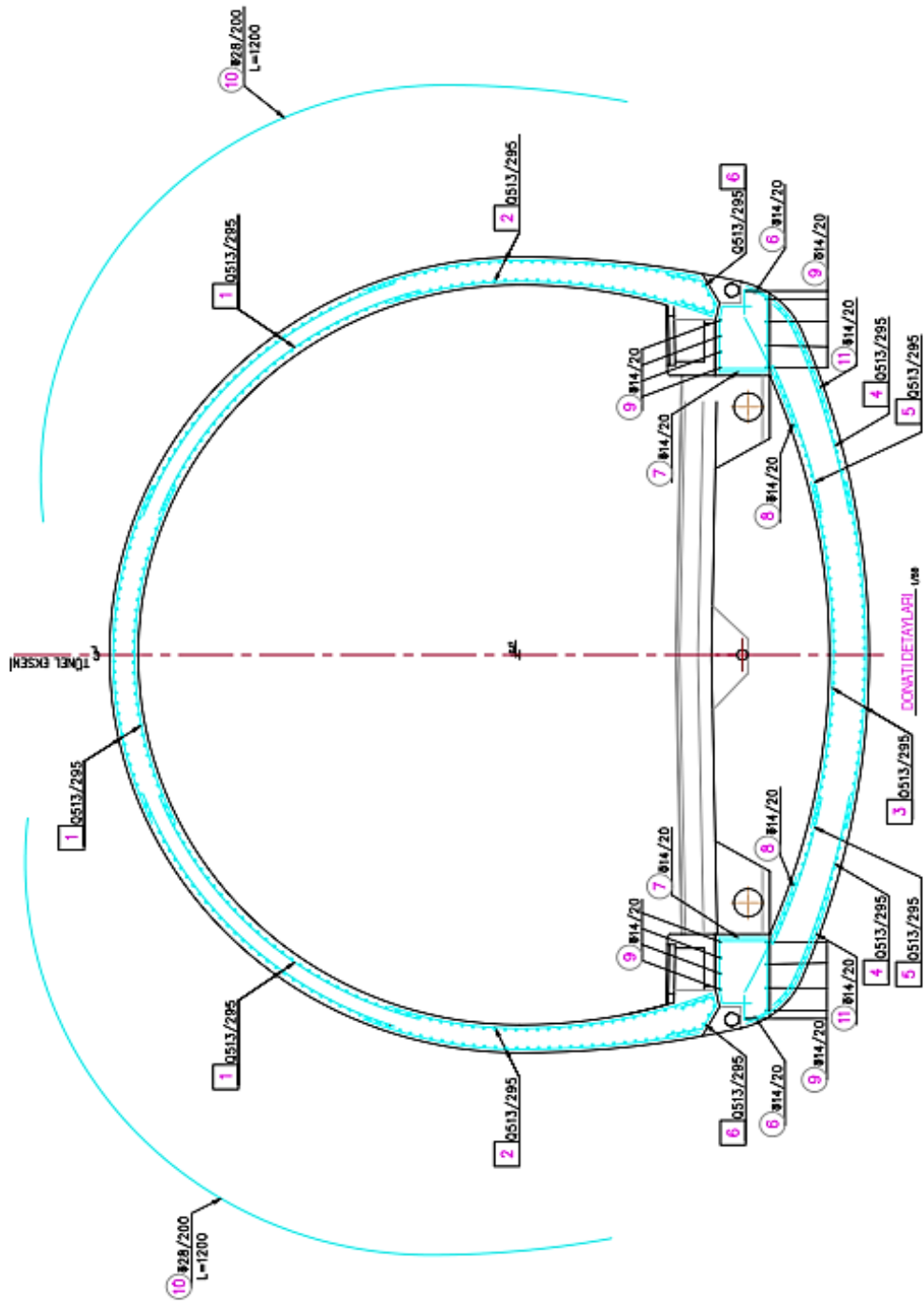


Ek 31. Enjeksiyon Tip Kesiti

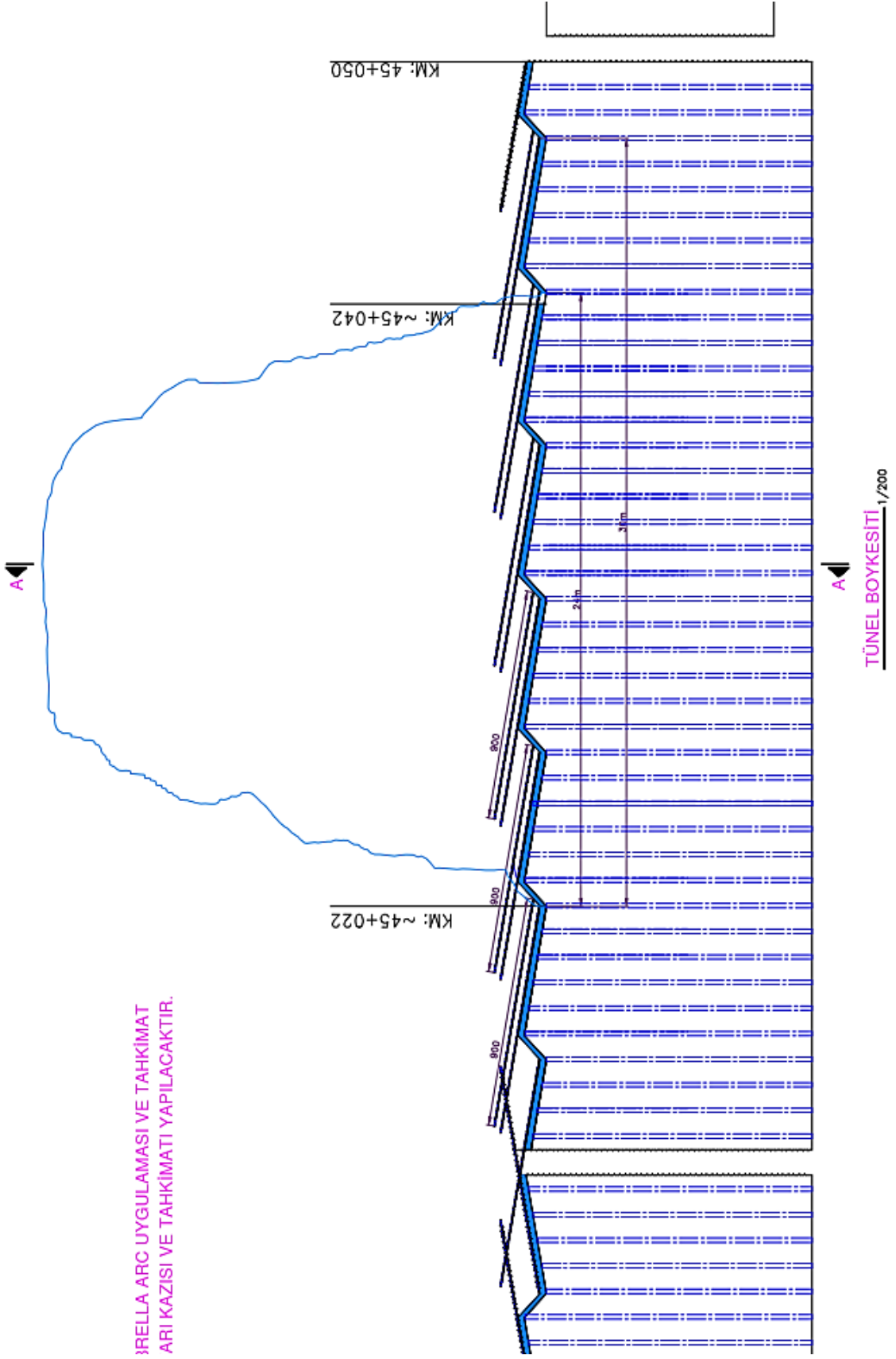


PARÇALAR		ÇELİK İKSA TİP U1 - NPI 160					
ADET	KADEME	BÖLÜM NO.	PROFİL	AĞIRLIK kg/m	UZUNLUK mm	BÖLÜM AĞIRLIĞI kg	TOPLAM AĞIRLIK kg
2	----	K1	NPI 160	17.90	9188	164.465	328.930
2	----	K2	NPI 160	17.90	3522	63.043	126.087
10	----	A	PL 180X94X12	----	----	1.594	15.94
2	----	B	PL 180X94X12	----	----	1.594	3.19
48	----	BAĞ ÇUBUĞU KULAKÇIĞI	L 50x50x3	----	----	0.189	9.07
20	----	BULON, PUL	M 20x55	----	----	0.318	6.36
24	----	BAĞ ÇUBUĞU	R00 # 20	2.488	1786*	4.40	105.60
ÇELİK İKSA NPI 160 TOPLAM AĞIRLIĞI							595.18

Ek 32. Çelik İksa Kesiti



Ek 33. Donatı Detayı



Ek 34. Tünel Boykesiti





Ek 35. Tünel Göçük Bölgesi



Ek 36. Tünel Göçük Bölgesi Püskürtme Beton Atılması





Ek 37. Tünel Göçük Bölgesi Çift Sıra Şemsiye Kemer Sırası



Ek 38. Tünel Göçük Bölgesi Kazı Çalışması





Ek 39. Tünel Göçük Bölgesi Enjeksiyon Yapılması



Ek 40. Tünel Göçük Bölgesi Enjeksiyon Delgisi Yapılırken





Ek 41. Tünel Göçük Bölgesi Şemsiye Kemer Borusu Sürerken



Ek 42. Tünel Göçük Bölgesi Çift Sıra Şemsiye Kemer Aynası





Ek 43. Tünel Göçük Bölgesi



Ek 44. Tünel Göçük Bölgesi Şemsiye Kemer Delgisi Yapılırken

Ek 45.

## ***Phase2 Analysis Information***

### ***Project1***

#### ***Project Summary***

---

- File Name: 45+030
- Last saved with Phase2 version: 8.022
- Project Title: Project1

#### ***General Settings***

---

- Number of Stages: 14
- Analysis Type: Plane Strain
- Solver Type: Gaussian Elimination
- Units: Metric, stress as MPa

#### ***Analysis Options***

---

- Maximum Number of Iterations: 500
- Tolerance: 0.001
- Number of Load Steps: Automatic
- Convergence Type: Square Root Energy
- Tensile Failure: Reduces Shear Strength
- Joint tension reduces joint stiffness by a factor of 0.01

#### ***Field Stress***

---

- Field stress: gravity
- Ground surface elevation: 258 m
- Unit weight of overburden: 0.028 MN/m<sup>3</sup>
- Effective stress ratio (horizontal/vertical in-plane): 0.54
- Effective stress ratio (horizontal/vertical out-of-plane): 0.54
- Locked-in horizontal stress (in-plane): 0
- Locked-in horizontal stress (out-of-plane): 0

#### ***Seismic Loading***

---


- Horizontal seismic load coefficient: 0.07 (positive to the right)
- Vertical seismic load coefficient: -0.05 (positive up)
- Seismic load applied in: Stage 14

### ***Reset Displacements***


- 
- Displacements reset after: Stage 1

### ***Material Properties***

#### **Material: PzTRd (D=0.0)**

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	0.028 MN/m <sup>3</sup>
Elastic type	isotropic
Young's modulus	4527 MPa
Young's modulus (resid)	1621.3 MPa
Poisson's ratio	0.25
Failure Criterion	Generalized Hoek-Brown
Material type	Plastic
Dilation Parameter	0
Compressive strength	96 MPa
mb parameter	5.22252
s parameter	0.006029
a parameter	0.504342
GSI parameter	54
mi parameter	27
D parameter	0
Residual mb parameter	2.15624
Residual s parameter	0.001273
Residual a parameter	0.504342
Piezo to use	None
Ru value	0.1


#### **Material: PzTRd (D=0.7)**

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	0.028 MN/m <sup>3</sup>
Elastic type	isotropic




Young's modulus	1621.3 MPa
Young's modulus (resid)	1621.3 MPa
Poisson's ratio	0.25
Failure Criterion	Generalized Hoek-Brown
Material type	Plastic
Dilation Parameter	0
Compressive strength	96 MPa
mb parameter	2.15624
s parameter	0.001273
a parameter	0.504342
Residual mb parameter	2.15624
Residual s parameter	0.001273
Residual a parameter	0.504342
Piezo to use	None
Ru value	0.1

### Material: GMalzemesi


Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	0.025 MN/m <sup>3</sup>
Elastic type	isotropic
Young's modulus	10 MPa
Young's modulus (resid)	10 MPa
Poisson's ratio	0.25
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Peak tensile strength	0 MPa
Residual tensile strength	0 MPa
Peak friction angle	20 degrees
Peak cohesion	0.005 MPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	20 degrees
Residual Cohesion	0.005 MPa
Piezo to use	None
Ru value	0.1

### Material: Enjeksiyon\_PzTRd


Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	0.028 MN/m <sup>3</sup>
Elastic type	isotropic

Young's modulus	8573.9 MPa
Young's modulus (resid)	5117.9 MPa
Poisson's ratio	0.25
Failure Criterion	Generalized Hoek-Brown
Material type	Plastic
Dilation Parameter	0
Compressive strength	96 MPa
mb parameter	9.24801
s parameter	0.035674
a parameter	0.501355
GSI parameter	70
mi parameter	27
D parameter	0
Residual mb parameter	6.47058
Residual s parameter	0.018316
Residual a parameter	0.501355
Residual GSI parameter	70
Residual mi parameter	27
Residual D parameter	0.5
Piezo to use	None
Ru value	0.1


### Material: Enjeksiyon\_G

Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	0.025 MN/m <sup>3</sup>
Elastic type	isotropic
Young's modulus	500 MPa
Young's modulus (resid)	500 MPa
Poisson's ratio	0.25
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Peak tensile strength	0 MPa
Residual tensile strength	0 MPa
Peak friction angle	30 degrees
Peak cohesion	0.1 MPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	30 degrees
Residual Cohesion	0.1 MPa
Piezo to use	None
Ru value	0.1

### Material: Enjeksiyon


Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	0.024 MN/m <sup>3</sup>
Elastic type	isotropic
Young's modulus	5000 MPa
Young's modulus (resid)	5000 MPa
Poisson's ratio	0.2
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Peak tensile strength	0 MPa
Residual tensile strength	0 MPa
Peak friction angle	35 degrees
Peak cohesion	5 MPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	35 degrees
Residual Cohesion	5 MPa
Piezo to use	None
Ru value	0

### Material: Umbrella Arch


Color	
Initial element loading	field stress & body force
Unit weight	0.028 MN/m <sup>3</sup>
Elastic type	isotropic
Young's modulus	8573.9 MPa
Young's modulus (resid)	5117.9 MPa
Poisson's ratio	0.25
Failure Criterion	Generalized Hoek-Brown
Material type	Plastic
Dilation Parameter	0
Compressive strength	96 MPa
mb parameter	9.24801
s parameter	0.035674
a parameter	0.501355
GSI parameter	70
mi parameter	27
D parameter	0
Residual mb parameter	6.47058
Residual s parameter	0.018316
Residual a parameter	0.501355
Residual GSI parameter	70
Residual mi parameter	27
Residual D parameter	0.5

Piezo to use	None
Ru value	0.1

### Material: GMalzemesi\_Soft

Color	
Initial element loading	No initial element loading
Elastic type	isotropic
Young's modulus	10 MPa
Young's modulus (resid)	100 MPa
Poisson's ratio	0.25
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Peak tensile strength	0 MPa
Residual tensile strength	0 MPa
Peak friction angle	20 degrees
Peak cohesion	0.005 MPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	20 degrees
Residual Cohesion	0.005 MPa
Piezo to use	None
Ru value	0.1

### Material: Enjeksiyon\_G\_Soft


Color	
Initial element loading	No initial element loading
Elastic type	isotropic
Young's modulus	200 MPa
Young's modulus (resid)	200 MPa
Poisson's ratio	0.25
Failure criterion	Mohr-Coulomb
Peak tensile strength	0 MPa
Residual tensile strength	0 MPa
Peak friction angle	30 degrees
Peak cohesion	0.1 MPa
Material type	Plastic
Dilation Angle	0 degrees
Residual Friction Angle	30 degrees
Residual Cohesion	0.1 MPa
Piezo to use	None
Ru value	0.1



## Liner Properties

---

Liner:  tyar

Color	
Liner Type	Reinforced Concrete
Equivalent Young's modulus	2707.26 MPa
Equivalent thickness	0.218142 m
Poisson ratio	0

### Reinforcement Properties

Type	I-beam(IPN Europe): IPN 160
Spacing	1 m
Section Depth	0.16 m
Area	0.00228 m <sup>2</sup>
Moment of inertia	9.35e-006 m <sup>4</sup>
Young's modulus	200000 MPa
Poisson ratio	0.25
Compressive strength	400 MPa
Tensile strength	400 MPa

### Concrete Properties

Thickness	0.2 m
Young's modulus	500 MPa
Poisson ratio	0.2
Compressive strength	1 MPa
Tensile strength	0.1 MPa


### Properties changed in Stage 5

- Young's modulus: 5000 MPa (factor = 10)
- Compressive strength: 10 MPa (factor = 10)
- Tensile strength: 1 MPa (factor = 10)

### Properties changed in Stage 12

- Young's modulus: 22500 MPa (factor = 45)
- Compressive strength: 20 MPa (factor = 20)
- Tensile strength: 1.6 MPa (factor = 16)

**Liner: Altyar**

Color	
Liner Type	Reinforced Concrete
Equivalent Young's modulus	2707.26 MPa
Equivalent thickness	0.218142 m
Poisson ratio	0

**Reinforcement Properties**

Type	I-beam(IPN Europe): IPN 160
Spacing	1 m
Section Depth	0.16 m
Area	0.00228 m <sup>2</sup>
Moment of inertia	9.35e-006 m <sup>4</sup>
Young's modulus	200000 MPa
Poisson ratio	0.25
Compressive strength	400 MPa
Tensile strength	400 MPa

**Concrete Properties**

Thickness	0.2 m
Young's modulus	500 MPa
Poisson ratio	0.2
Compressive strength	1 MPa
Tensile strength	0.1 MPa


**Properties changed in Stage 8**

- Young's modulus: 5000 MPa (factor = 10)
- Compressive strength: 10 MPa (factor = 10)
- Tensile strength: 1 MPa (factor = 10)

**Properties changed in Stage 12**

- Young's modulus: 22500 MPa (factor = 45)
- Compressive strength: 20 MPa (factor = 20)
- Tensile strength: 1.6 MPa (factor = 16)

**Liner: Taban**

Color	
Liner Type	Reinforced Concrete
Equivalent Young's modulus	779.058 MPa
Equivalent thickness	0.131225 m
Poisson ratio	0

### Reinforcement Properties

Type	Wire Mesh(Canada): #12 (diameter=12mm)
Spacing	1 m
Section Depth	0.012 m
Area	0.000113 m <sup>2</sup>
Moment of inertia	1.02e-009 m <sup>4</sup>
Young's modulus	200000 MPa
Poisson ratio	0.25
Compressive strength	400 MPa
Tensile strength	400 MPa

### Concrete Properties

Thickness	0.15 m
Young's modulus	500 MPa
Poisson ratio	0.2
Compressive strength	1 MPa
Tensile strength	0.1 MPa


### Properties changed in Stage 11

- Young's modulus: 5000 MPa (factor = 10)
- Compressive strength: 10 MPa (factor = 10)
- Tensile strength: 1 MPa (factor = 10)

### Properties changed in Stage 12

- Young's modulus: 22500 MPa (factor = 45)
- Compressive strength: 20 MPa (factor = 20)
- Tensile strength: 1.6 MPa (factor = 16)

### Liner: Nihal Kaplama


Color	
Liner Type	Reinforced Concrete
Equivalent Young's modulus	31250 MPa

Equivalent thickness	0.4 m
Poisson ratio	0

### Concrete Properties

Thickness	0.4 m
Young's modulus	30000 MPa
Poisson ratio	0.2
Compressive strength	30 MPa
Tensile strength	1.9 MPa
Unit weight	0.024 MN/m <sup>3</sup>

### Liner: Taban Kemerli

Color	
Liner Type	Reinforced Concrete
Equivalent Young's modulus	31250 MPa
Equivalent thickness	0.55 m
Poisson ratio	0

### Concrete Properties


Thickness	0.55 m
Young's modulus	30000 MPa
Poisson ratio	0.2
Compressive strength	30 MPa
Tensile strength	1.9 MPa
Unit weight	0.024 MN/m <sup>3</sup>

### Composite Liner Properties

- 
- Composite name: □tyar
  - Layer 1: □tyar
  - Layer 2: Nihai Kaplama with 9 stage delay
  - Composite name: Altyar
  - Layer 1: Altyar
  - Layer 2: Nihai Kaplama with 6 stage delay
  - Composite name: Taban
  - Layer 1: Taban
  - Layer 2: Taban Kemerli with 3 stage delay

### Bolt Properties

---

Bolt name	SN Bulon
Color	
Bolt Type	End anchored bolt
Diameter	26 mm
Young's modulus	200000 MPa
Tensile capacity	0.124 MN
Residual Tensile capacity	0.01 MN
Pre-tensioning	0 MN
Pre-tensioning force	Constant in install stage
Out-of-plane spacing	1 m



## ÖZGEÇMİŞ

Sinan DEĞİRMENCİ 1985 yılında Trabzon'da doğdu. İlköğrenimini Namık KEMAL İlköğretim Okulu, orta öğrenimini Zehra KİTAPÇIOĞLU ORTAOKULU'nda, lise öğrenimini ise TRABZON LİSE (YDA) (TRABZON FEN LİSESİ)'nde tamamladı. 2004-2005 eğitim öğretim yılında, Celal BAYAR Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2008 yılında lisans öğrenimini başarıyla tamamladıktan sonra, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik bilim dalı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazanan Sinan DEĞİRMENCİ, aynı zamanda Anadolu Üniversite Açık Öğretim Fakültesi Adalet ön lisans bölümünü tamamlamıştır. Ayrıca halen Karadeniz Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği bölümü II. Öğretim 3. sınıf öğrencisidir. 10 yıldır Artvin Devlet Su İşleri 26. Bölge Müdürlüğünde İnşaat Mühendisi olarak çalışmaktayken Eylül 2018 tarihinde Trabzon Devlet Su İşleri 22. Bölge Müdürlüğü emrine tayin olmuştur. Evli ve 2 çocuk babasıdır.