

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SURUÇ SU TÜNELİNDEKİ GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR

Serkan ERTÜRK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2014**

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SURUÇ SU TÜNELİNDEKİ GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR

Serkan ERTÜRK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2014**

Yrd. Doç. Dr. Celal AĞAN danışmanlığında, Serkan ERTÜRK'ün hazırladığı “**Suruç Su Tünelindeki Geoteknik Çalışmalar**” konulu bu çalışma 13/06/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Celal AĞAN

Üye : Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER

Üye : Doç. Dr. Halil Murat ALGIN

Bu Tezin İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Prof. Dr. Sinan UYANIK
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
SİMGELER DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ	1
2. TÜNELLER ve KAZI YÖNTEMLERİ	4
2.1. Tüneller	4
2.2. Tünel Kazı Yöntemleri	5
2.2.1. Aç-Kapa Tünel Açma Yöntemi	5
2.2.2. Delme Ve Patlatma Yöntemi İle Tünel Açımı	6
2.2.3. Makine İle Kazı	6
2.2.3.1. Yarım Kesit Kazı Makineleri	6
2.2.3.2. Tam Kesit Kazı Makineleri	7
3. METODOLOJİ	9
4. SURUÇ TUNELİNDE YAPILAN GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR	10
4.1. Tünel Jeolojisi	10
4.2. Sondaj	12
4.3. Geçirgenlik Testleri	12
4.4. Laboratuvar Testleri	13
4.5. Kinematik Analizler	14
4.6. Kaya Kütlesi Karakterizasyonu	15
4.7. Kaya Kütlesi Parametreleri	20
4.7.1. Kaya Kütlesine ait Hoek-Brown Sabitleri	20
4.7.2. Kaya Kütlesinin Mukavemeti	23
4.7.3. Kaya Kütlesinin Deformasyon Modülü	25
5. TUNEL DESTEK BASINCI ve TASARIMI	28
5.1. Görgül Yöntemler	28
5.2. Çözümlemeli Yöntem	29
5.3. Sayısal Yöntem	33
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	37
KAYNAKLAR	38
ÖZGEÇMİŞ	41

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SURUÇ SU TÜNELİNDEKİ GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR

Serkan ERTÜRK

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Celal AĞAN
Yıl:2014, Sayfa:53

Bu çalışma Suruç ovasının sulanması amacıyla inşa edilen Şanlıurfa tüneli güzergahındaki geoteknik çalışmaları ve tünel destek tasarımını kapsamaktadır. Suruç tüneli (7.88 m kazı çapı), Türkiye'nin birinci dünyanın ise beşinci en uzun sulama tüneli olacaktır (17.2 km). tünel kireçtaşı ve marn birimlerinden geçmektedir. Saha çalışmaları sondaj, numune alımı, geçirgenlik testleri, laboratuvar testleri, kaya kütlesi karakterize edilmesi (RMR, Q ve GSI Sistemleriyle), süreksizlik ölçümleri ve kinematik analizleri kapsamaktadır. Tünel basınçları, yenilme zonu sınırları ve destek tasarımları görgül, analitik ve sayısal yöntemlerle belirlenmiş, doğrulukları convergence-confinement yöntemiyle ve plaxis 8,2 yazılımı ile sınıanmıştır. En küçük deformasyonlar ön döküm beton destek elemanlarıyla elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Suruç tüneli, Kaya kütlesi sınıflama yöntemleri, Hoek-Brown yenilme kriteri, Convergence-confinement yöntemi, Tünel destek tasarımı,

ABSTRACT

MSc Thesis

GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS IN SURUC WATER TUNNEL

Serkan ERTÜRK

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Celal AGAN
Year: 2014, Page: 53**

This research is concerned with the results of geotechnical investigations and tunnel support designs along the Suruç tunnel (the Turkey's 1st and the World's 5th long irrigation tunnel) western of Şanlıurfa, Turkey. The Suruç tunnel will be used for irrigation of the Suruç Plain. The tunnel runs mainly through formations of limestone and marl. Field studies include rock mass characterization (by using RMR, Q and GSI systems), discontinuity surveying and kinematically analyzes, core drilling, permeability tests and sampling for laboratory testing. Support requirements were determined accordingly in terms of the rock mass classification systems. Recommended support systems by empirical methods were also evaluated by the Convergence-confinement method as analytically and plaxis 8.2 as numerically. The minimum deformations were obtained by precast concrete lining segments.

Keywords: Suruc tunnel, Rock mass classification system, Hoek-Brown failure criterion, Convergence-confinement method, Tunnel support design,

TEŞEKKÜR

Hazırlamıő olduğum bu tez çalıőmamda bilgi ve birikimi ile bana yol gösteren, bu tezin oluőmasında yaptığı yardım ve katkılarında dolayđ tez danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Celal AĞAN'a teşekkür ederim. nerileriyle tezimin daha iyi bir seviyeye gelmesini sağlayan değerli jüri üyelerine teşekkür ederim. Tez alıőması için yaptığım araőtırmalarda bana yardım eden ve bilgi akıőı sırasında her türlü kolaylığı sağlayan DSİ çalıőanlarına ve İlci Holding Yetkililerine teşekkür ederim. Bugüne kadar benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme de teőekkürü bir borç bilirim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Şanlıurfa suruç tüneli ve tünel delme makinesi (TBM)	2
Şekil 1.2. Suruç tünelinin haritadaki yeri (Bar-Su and Geotecna Progetti, 2010).....	3
Şekil 4.1. Tünel güzergahındaki boyuna jeolojik kesit ve sondaj kuyularının yerleri.....	11
Şekil 4.2. Kinematik analizler (a) kazı şevlerinde ve (b) tünel girişi ve çıkışında	15
Şekil 4.3. GSI değerleri ve aralıkları (Sonmez ve Ulusay, 2002)	19
Şekil 5.1. Teogt bölgesindeki tünel için gerilmeler, yer değiştirmeler ve yenilme bölgesi	34
Şekil 5.2. Teogm bölgesindeki tünel için gerilmeler, yer değiştirmeler ve yenilme bölgesi	35

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Suruç tüneline kullanılan TBM hakkında gelen bilgiler	2
Çizelge 4.1. Sondajlardan elde edilen geoteknik parametreler	13
Çizelge 4.2. Laboratuvar test sonuçları (Bar-Su and Geotecna progetti, 2010).....	14
Çizelge 4.3. RMR çalışmasının girdileri ve sonuçları.....	16
Çizelge 4.4. Q çalışmasının girdileri ve sonuçları	17
Çizelge 4.5. GSI çalışmasının girdileri ve sonuçları.....	18
Çizelge 4.6. Tünel güzergahı boyunca hesaplanan kaya kütleli parametreleri.....	27
Çizelge 5.1. Suruç tüneli için destek basıncı hesapları (MPa).....	28
Çizelge 5.2. Kritik destek basıncı plastik bölgenin alanı, azami deformasyon ve gerilme değerleri ...	31
Çizelge 5.3. Deformasyon geoteknik problemler ve destek tipleri arasındaki ilişki	32
Çizelge 5.4. Kaya kütleli sınıflama sistemi tarafından önerilen suruç tüneline destek sistemi	33
Çizelge 5.5. Yenilme zonunun yarıçapı, en büyük deformasyon ve Plaxis destek basıncı.....	36

SİMGELER DİZİNİ

a	Kaya kütlesinin yüzey pürüzlülük katsayısı
ASTM	American Society for Testing and materials
CL	Düşük plastiseli kil
ML	Düşük plastiseli Silt
D	Kazı metoduna bağlı olarak kaya kütlesi örselenme katsayısı
D_e	Eşdeğer boyut
DSİ	Devlet Su İşleri
$E_{(Kütle)}$	Kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü
E_i	Bozulmamış kaya elastik modülü
ESR	Kazı destek oranı
GAP	Güneydoğu anadolu projesi
GSI	Jeolojik dayanım indisi
G_{mm}	Kaya kütlesinin kayma modülü
H	Örtü kalınlığı
Ha	Hektar
J_p	Kaya kütlesinin eklemleme parametresi
J_n	Çatlak seti sayısı
J_a	Eklem değişiklikleri
J_r	Çatlak pürüzlülük
J_v	Hacimsel eklem seti
J_w	Çatlak su indirgeme faktörü
KB-GD	Kuzeybatı – Güneydoğu
KDO	Kazı destek oranı
Km	Kilometre
Km^2	Kilometrekare
m	Metre
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
mak	Maksimum
min	Minimum
m_i	Sağlam kayacın petrografik katsayısı.
m_b	m_i katsayısının indirgenmiş hali
mm	Milimetre
ort	Ortalama
p_i^{cr}	Kritik destek basıncı
p_i^{cr}	Ölçekli kritik destek basıncı
Pi	Destek basıncını
P_E	Tünel girişi
P_O	Tünel çıkışı
Q	Barton kaya kütle sınıflama sistemi
RMR	Kaya kütlesi puanı
RQD	Kaya kalite göstergesi
Rr	Pürüzlülük derecesi
Rw	Bozunma derecesi
Rf	Dolgu derecesi
R_{pl}	Kırık bölgenin yarıçapı
S	Tabakalaşma
s	Taneler arası tutunma derecesi
S_0	Ölçekli gerilme alanı
SCR	Yüzey koşulları derecesi
Sx	x yönünde süreksizlik sayısı
Sy	y yönünde süreksizlik sayısı
Sz	z yönünde süreksizlik sayısı
SR	Yapısal derece
SK	Sondaj kuyusu

SRF	Gerilme indirgeme faktörü
SP	Kötü derecelendirilmiş kum
SW	İyi derecelendirilmiş kum
TBM	Tunnel boring machine (tünel delme makinesi)
TCR	Toplam karot verimi
Teogt	Gaziantep Birimi kireçtaşı üyesi
Teogm	Gaziantep Birimi marn üyesi
TKV	Karot verimi yüzdesi
UCS	Tek eksenli basınç dayanımı
U_r^{el}	Elastik yer değiştirme
YASS	Yer altı su seviyesi
\emptyset_M	İçsel sürtünme açısı (Marn)
\emptyset_L	İçsel sürtünme açısı (Kireçtaşı)
ν	Poisson oranı
σ'_1	Etkili büyük asal gerilme
σ'_3	Etkili küçük gerilme
$\sigma_{c(kütle)}$	Kaya kütlelerinin basınç dayanımı
σ_{ci}	Bozulmamış kaya tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
γ	Kaya kütlelerinin birim hacim ağırlığı

1.GİRİŞ

Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP), Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu bölgesinde yaşayan 9 milyon kişinin (2005) sürdürülebilir kalkınması kavramına dayanan çok sektörlü bütünleşmiş bir bölgesel kalkınma projesidir. GAP'ın temel hedefleri tarım, sulama, hidroelektrik enerji üretimi, kentsel ve kırsal altyapı, ormancılık, eğitim ve sağlıktır. GAP'ın tamamlanmasıyla 1.82 milyon hektar alan sulamaya açılacaktır. GAP kapsamında 22 baraj ve 19 hidroelektrik santralleri ve sulama şebekeleri planlanmaktadır. GAP'ın belkemiği olan Atatürk Barajı, 84.5 milyon m³ dolgu hacmine ve temelden 169 m yüksekliğe sahip olup, dolgu hacmi bakımından dünyanın en büyük altıncı barajıdır. 1.2 milyon m³ enjeksiyon perdesine sahip dünyadaki en büyük yapıdır. Atatürk barajında iki adet 26.5 km uzunluğunda, 7.62 m çapında sulama tüneli (Şanlıurfa tünelleri) bulunur. Şanlıurfa tünelleri 1995 yılından beri çalışmakta olup amacı Urfa, Harran ve Ceylanpınar ovalarını (toplam 4 763.7 km²) sulamaktır. Bu sulama tünellerinin bir benzeri de Suruç ve Bozova ilçelerinin sulanması amacıyla yapılmaktadır. Bu proje ile ekonomisi daha çok tarıma dayılı olan ve 1980'li yıllara kadar bereketli bir bölge olan Suruç ve Bozova ilçe merkezlerine bağlı 105 yerleşim yerine ait toplam 94 814 ha bereketli tarım arazisi suya kavuşacaktır.

Suruç tüneli GAP kapsamında 17.2 km uzunluğunda, 7 m çapında (kazı kesiti 7.88 m) ve tam kesitli TBM yöntemiyle açılan Türkiye'nin en büyük dünyanın ise 5. uzun sulama tünelidir. Tünel giriş ve çıkış yükseklikleri sırasıyla 580 m ve 570 m'dir. DSİ kontrolündeki Suruç tüneli Bar-Su ve Geotecna Progetti Srl Mühendislik Şirketleri (2010) tarafından tasarlanmış ve İlci İnşaat şirketi tarafından kazılmaktadır.

Suruç tüneline 'çift kalkanlı' TBM makinesi kullanılmıştır. Kullanılan tünel açma makinesi 152 m uzunluğunda ve 1080 ton ağırlığındadır. Tünel açma makinesi ile 7.88 m çapında kazı yapılarak tünel 6 adet beton parça ile kaplanmaktadır. Ayrıca TBM 1.6 m uzunluğundaki pistonları kullanarak hareket etmektedir.

Beton kaplandıktan sonra tünel iç çapı 7 m kalmaktadır. TBM ile kazılan zemin lokomotifler tarafından çekilen pasa vagonlarına konveyör bantlarla doldurularak tünel dışına çıkarılıp boşaltılır. Boşalan lokomotif katarları tünele giderken segmentleri (prekast betonları) ve ihtiyaç malzemelerini (ray, fan tüp, su borusu, personel, vb.) götürmektedir.

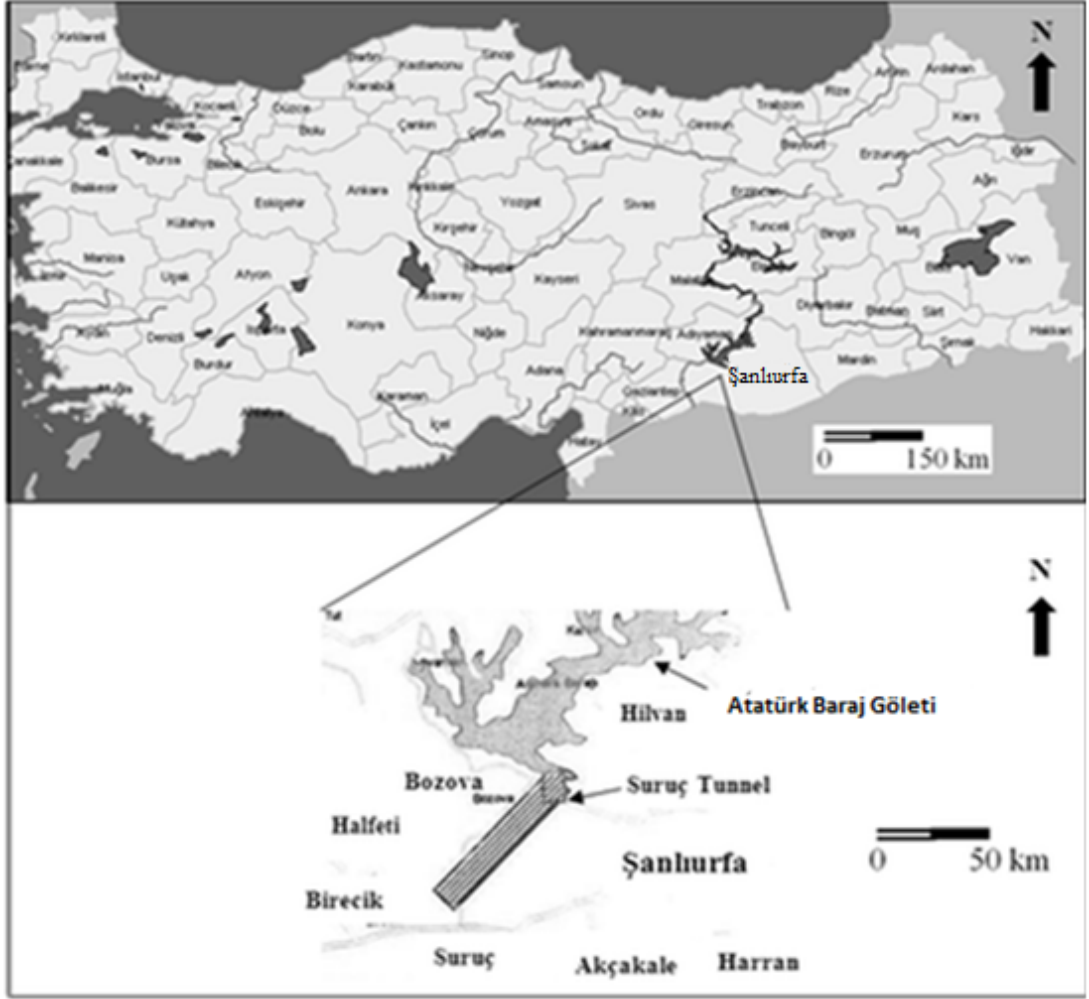
Çizelge 1.1 Suruç tüneline kullanılan TBM hakkında gelen bilgiler (Bar-Su and Geotecna Progetti, 2010)

Tünel uzunluğu, L	17 km
Tünel kazı çapı, D	7.88 m
Tünel çapı	7.00 m
Makinenin çapı	7.8 m
Makinenin uzunluğu	152 m
Kesici disk sayısı	41 adet tekli disk keski 2 adet ikiz disk keski ve 1 adet de 4'lü disk keski olmak üzere 49 adet disk kullanılmıştır.
Kesici kafanın dönme momenti (Torku)	3.500 kNm
TBM ağırlığı:	1080 ton
Ort. İlerleme hızı	20 m/gün
Beton segmentin boyu	1.6 m
Beton segmentin ağırlığı	6.5 ton



Şekil 1.1 Şanlıurfa Suruç tüneli ve tünel delme makinesi (TBM)

Çalışma alanı, MTA'nın Şanlıurfa Bölgesindeki 1/25000 ölçekli topografik haritası içerisinde (N41-A1, N40-B2, N40-B3, N40-B4, N40-C1, N40-C2 ve N40-C3 planları). Tünelin girişi, Asya 84 ile Avrupa E90 karayolu üzerinde kalan Şanlıurfa-Gaziantep 0-52 yolunda olup, Şanlıurfa'nın kuzeybatısının 40. km'sindedir.



Şekil 1.2 Suruç tünelinin haritadaki yeri (Bar-Su and Geotecna Progetti, 2010)

Bu çalışmanın amacı Suruç tüneli güzergahındaki kaya kütlesi parametreleri ve geoteknik özelliklerini incelemek, tünel girişlerinin ve şev kesitlerinin şev duraylılığını incelemek ve tünel için uygun destek elemanları önermektir.

2. TÜNELLER ve KAZI YÖNTEMLERİ

Bu bölümde tünellere ait genel tanımlar ve kazı yöntemleri kısaca tanıtılacaktır.

2.1 Tüneller

Tünel, uluslararası literatürde mutabakat sağlanmış bir tanımı olmamakla birlikte, genel anlamıyla yer altından kazı yapılmak suretiyle oluşturulan, bir girişi ve bir çıkışı olan geçitlerdir. Ana kullanım amaçları motorlu taşıt, metro ve demiryolu ulaşımı ve su iletimini sağlamaktır.

Türkiye'nin en uzun tüneli, GAP kapsamında yapımına Eylül 1981 de başlanıp, 19 yılda tamamlanan Şanlıurfa tünelleridir. Bunlar Atatürk barajı rezervuarından, Şanlıurfa'nın 5 km kuzeydoğusuna kadar uzanan, toplam uzunluğu 26.4 km olan ve birbirine paralel inşa edilen iki tünelden oluşmaktadır.

Türkiye'nin en uzun motorlu taşıt tüneli Ordu'daki Nefise Akçelik (Hapan) tüneldir. 29 Aralık 2006 tarihinde karayolu ulaşımına hizmet vermek üzere açılan bu tünel 3 825 m boyundadır.

Türkiye'nin en uzun sulama tüneli Şanlıurfa Suruç tüneldir. GAP kapsamında 17.2 km uzunluğunda ve 7 m çapında inşa edilen (kazı kesiti 7.88 m) tünel, aynı zamanda dünyanın 5. büyük sulama tüneldir.

Türkiye'nin en uzun su iletim tüneli Ankara İçme Suyu Gerede Sistemi su iletim tüneldir. Açılışı 29 Nisan 2011 tarihinde yapılarak çalışmalarına başlanan tünelin toplam uzunluğu 31 580 m'dir. Tünelin Aralık 2014' de bitirilmesi planlanmaktadır.

Tüneller, ulaşımı zor olan veya daha ekonomik ulaşım sağlamak amacıyla inşa edilen mühendislik yapılarıdır. Bu yapılar doğal risklerden çok fazla etkilenirler bu

acıdan risklerin en aza indirilebilmesi için proje yapım ve uygulama sürecinde geoteknik araştırmalara ihtiyaç vardır.

Kaya kütlesi sınıflaması sistemlerinin (RMR, Q ve GSI sistemleri) kullanımında çok fazla özen gösterilmelidir. Bu sistemler tünel tasarımları, destek sistemleri ve kazı ilerleme hızının belirlenmesinde kolaylıklar sağlamaktadır.

Ayrıca Tünel kazı yönteminin belirlenmesi için kaya kütlesi sınıflama sistemlerine (RMR, Q ve GSI sistemleri), geoteknik araştırmalara ve tünelin faaliyet alanının bilinmesine ihtiyaç vardır.

2.2 Tünel Kazı Yöntemleri

2.2.1 Aç-Kapa Tünel Açma Yöntemi

Bu yöntem genellikle yüzeye yakın veya kısa tünellerde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca farklı tip tünel açma yöntemi kullanıldığı zamanlarda da istenilen zemin seviyesine ulaşmak için bu tünel açma yöntemi kullanılmaktadır.

Bu yöntemde önce kazı boşluğunun yanları betonarme kazık veya beton duvar perdesi ile desteklendikten sonra, yüzeyden hendek şeklinde kazılarak açılmaktadır. Yeraltı suları yüzeye yakınsa yeraltı su seviyesi düşürülür veya su derin kuyularla drene edilir. Kenar ayakları örülür. Tavanın oluşturulmasında eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik varsa bir kemer oluşturulur. Bu kemer de açık havada oluşturulduğundan fazla güçlükle karşılaşmaz. Eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik yoksa betonarme bir tavan oluşturulabilir. Yerleşim alanları içerisinde yapılan kazı çalışmaları, gürültü ve trafiğin engellenmesi gibi sorunları nedeniyle pek tercih sebebi değildir. Trafik gidişatını engellemek için seyyar köprüler kullanılabilir.

Aç-kapa tünel açma yönteminin diğer yöntemlerden farkı tavanda tasman oluşmamasıdır. Böylece çevredeki yapılara zarar vermeden geçilebilir. Ayrıca diğer

yöntemlerle yeteri kadar yapılamayan yalıtım işlemi bu yöntemle kolaylıkla yapılabilmektedir.

2.2.2 Delme ve Patlatma Yöntemi ile Tünel Açımı

Bu yöntemin kullanılmasının nedeni tünel koşullarının sık sık değişmesi, her türlü kaya şartlarında uygulanabilmesi, gerekli ilk malzemenin ve teçhizatının ucuzluğu, uzun yıllardır uygulanıyor olmasının verdiği tecrübedir.

Bu yöntemde önce kayalar delinir ve önceden belirlenmiş cins ve miktardaki patlayıcılar yerleştirilir ve kurulan ateşleme mekanizmasıyla patlatma yapılır.

Delme ve patlatma yöntemi ile tünel açmanın dezavantajları tünel açmanın uzun zaman alması ve ilerlemenin yavaş olması, tünel çapını ve şeklini korumanın zor olması, kaya deformasyonlarının fazla olmasıdır.

2.2.3 Makine ile Kazı

Bu yöntem daha az yıkıcı ve bozucu olduğundan daha az destek isteyen daha duraylı tünel koşulları sağlar. Günümüzde makine ile kazılar tam kesit makine ve yarım kesit makine kullanılarak yapılmaktadır.

2.2.3.1 Yarım Kesit Kazı Makineleri

Yarım kesit tünel açma makineleri aynanın bir kısmını kazarlar. Manevra kabiliyetleri daha fazladır. Tünel içinde kolayca hareket edebilir ve patlamalar için emniyet arz edecek bir mesafeye çekilebilirler. Bu makineler, dayanımları düşük ve aşındırma özelliği az kayalarda kazı yapabilirler. Masif ve yüksek dayanımlı kayalarda çalışmazlar. Bu makinelere kollu tünel açma makineleri de denilmektedir. Kollu tünel açma makineleri kullanılırken yeterli bir ilerleme hızı için pasa yükleme, taşıma kapasitesi, tozları yatıştırmak için su püskürtme sistemi ve havalandırma sisteminin uygun olmasının yanında gerekli su ve enerjinin kesintisiz sağlanması

önemlidir. Bu makinelerde verimlilik tünel çapına, destek sıklığına, kaya mukavemetine ve kayanın diğer özelliklerine bağlıdır. Makinelerin kayayı kesebilme dereceleri, kayanın basınç mukavemetinin yanında, kaya mukavemetine, basınç ve kayma mukavemetleri arasındaki ilişkiye, minerallerin dizilişine, özellikle kuvars gibi aşındırıcı tanelerin yüzdesine, tane boyutuna, tabakalanma ve eklemlenmeye bağlıdır. Bu makinelerde, makine ile ayna arasının temizlenmiş olması gerekmektedir. Ancak bu şekilde kesici kafa ve kazı malzemesini kaldıran sistem çalışabilir. Destek gerekiyorsa aynanın 2 m gerisinden takip edilecek şekilde yapılması gerekmektedir. Genel olarak kayada kullanılan kollu tünel açma makineleri, yumuşak zeminde de kullanılmaktadır. Yarım kesit kazı makineleri, iri bloklar içeren yumuşak malzemede, bir destek gerektirmeyecek kadar duyarlı olan malzemeye ulaşıncaya kadar hemen her türlü zemin şartlarında kullanılabilir. Yumuşak zemin şartlarında, ilerleme hızı esas olarak daha yavaş olduğundan tam kesit açma makineleri kadar ekonomik olmayabilir. Çoğu durumlarda yumuşak zeminde çalışırken, kollu tünel açma makineleri bir kalkanın içine yerleştirilmiş olarak kullanılır. Zemin şartlarına göre ekskavatör, hidrolik kırıcı, tek tamburlu ve çift tamburlu TBM vb. değişik tipte yarım kesit kazıcılar vardır.

2.2.3.2 Tam Kesit Kazı Makineleri

Tam kesit kazı makineleri günümüzde birçok tünel şartlarında ekonomik olarak kazı yapabilmektedir. Fakat bu makinelerin satın alınması, kurulması, çalışılacak sahaya getirilmesi, pahalıdır. Eğer tünel uzunluğu 1 km'den fazla ise tam kesit makine ile kazı yöntemi olumlu sonuçlar verir.

Eğer tünel zemini koşulları güzergah boyunca sıkça değişiyorsa patlatma, makine kazısına oranla daha ekonomik bir yöntemdir. Kesici başlar ve ekipmanı, itme kapasiteleri ve kalkan koruyucuları, yumuşak zeminlerin delinmesinde olumlu sonuçlar verirken, sert kayalarda aynı durum söz konusu değildir. Sorunlar olduğu zaman, tam kesit TBM tamamen sökülmeden tünelden çıkarılabilir. Açık kesici baş, geri çekilme özelliğinden dolayı ön tarafta çalışma yapılmasına olanak verir. Fakat kapalı başlı olan makinelerde, ön tarafta çalışma ancak kazı etrafının boşaltılması ile

mümkündür. Ayrıca, patlatma kazılabilir tünel zeminine rastlayıncaya kadar devam edebilir. Birçok tam kesit TBM, dairesel bir kesite sahiptir ve dönmeli kesicilere sahip başın çapı tünel çapı ile aynıdır.

3. METODOLOJİ

Bu çalışmada Suruç tüneli güzergahındaki kaya kütlesi parametreleri, geoteknik özellikler, tünel girişlerinin ve kazı kesitlerinin şev duraylılığı, tünele gelen destek basıncı ve uygun tünel destek tasarımları belirlenmiştir.

Bu amaçla, uygun görülen yerlere 10 adet ve toplam 525 m sondaj açılmış, sondaj kuyularında karotlu ilerleme yapılmış, tünel üst seviyesi ile tünel tabanından 5 m alt kota kadar her iki metrede bir basınçlı su testleri (BST) yapılmıştır. Sondajlar ve laboratuvar deneyleri Efol Jeoteknik Hizmetler Ltd. Şti. zemin mekaniği ve malzeme laboratuvarları tarafından yapılmıştır.

Tünel güzergahı boyunca eklem yapıları incelenmiş ve kinematik analizlerde kullanılmak üzere süreksizlik ölçümleri alınmıştır. Tünel girişi ve kazı şevlerinde olası duyarsızlık problemlerini önceden belirlemek amacıyla Dips v.5 (Diederichs ve Hoek, 1989) yazılımı kullanılarak kinematik analizler gerçekleştirilmiştir.

Yüzlek ve kazı şevleri yüzeylelerinde RMR, Q ve GSI sistemlerine göre kaya kütlesi sınıflaması gerçekleştirilmiştir. Kaya kütlesi parametreleri ve mukavemet özellikleri farklı araştırmalar tarafından önerilen RMR, Q ve GSI değerlerine dayalı görgül bağıntılar ile hesaplanmıştır. Ayrıca Q sistemi, destek gereksinimlerini tanımlamak için de kullanılmıştır.

Deformasyonlar, gerilme konsantrasyonları ve tünel etrafında plastik bölgenin kalınlığı ise görgül olarak (ampirik) Q sistemi ile, çözümlemeli olarak (analitik) convergence-confinement metodu ile ve sayısal (nümerik) olarak da Plaxis 8.2 programı kullanılarak belirlenmiştir.

Son olarak, tünel üzerine gelecek yükleri karşılayabilecek destek önerileri yapılmış ve hangi yöntemin daha az deformasyon sağladığı sayısal analizlerle belirlenmiştir.

4. SURUÇ TÜNELİNDE YAPILAN GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR

Bu bölümde Suruç tüneli güzergahı boyunca yapılan arazi çalışmaları ve geoteknik araştırmalar sunulmaktadır.

4.1 Tünel Jeolojisi

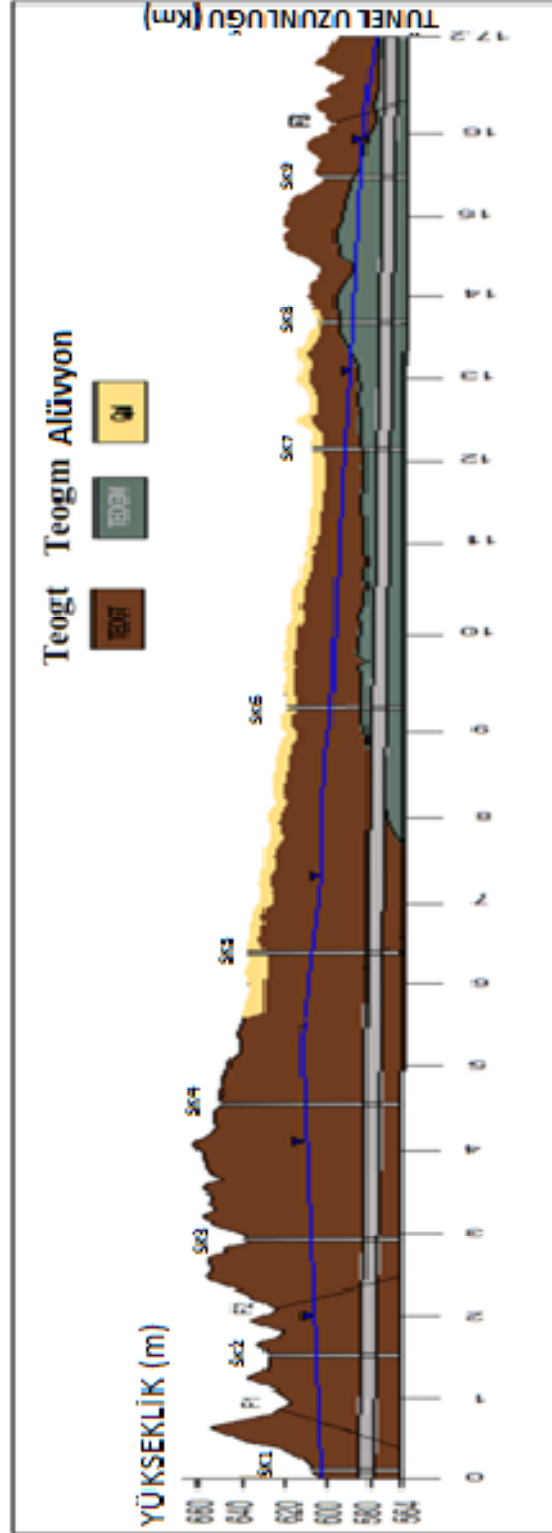
Tünel jeolojik koşullarının bilinmesi kazı yöntemi, destek tipi, inşaat için uygun malzeme ve ekipmanın belirlenmesi açısından önemlidir. Ayrıca jeolojik koşulların aydınlatılmadığı yerlerde ki bazı projelerin inşaat maliyeti ve iyileştirme maliyeti orijinal bütçeyi aşmaktadır.

Suruç tüneli kireçtaşı (Teogt), marn (Teogm) birimlerinden oluşan Gaziantep biriminden geçmektedir. Suruç tüneli 17.2 km uzunluğunda olup tünel iki farklı birimden geçmektedir; bu güzergahın 8.1 km'si Teogt ve 9.1 km'si Teogm birimlerinden oluşur. Gaziantep birimi, ince-orta tabakalı, yer yer kalın tabakalı, açık gri, bej, beyaz, açık kahve renklerde kırılğan, yer yer marn ara seviyeli killi kireçtaşlarından oluşur. Suruç tüneline en fazla örtü kalınlığı Teogm ve Teogt birimlerinde 80 ve 50 m'dir.

Kuvaterner çökelleri alüvyon ve yamaç molozundan oluşmuştur. Alüvyon, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi ASTM D2487-11 (1984)'e göre SW-SP olarak sınıflandırılır ve çakıl, kum, silt ve kil ve düzgün taneli malzemelerden oluşur. En fazla alüvyonun kalınlığı sondaj sonuçlarına göre yaklaşık 10 m'dir. Yamaç molozu CL-ML olarak sınıflandırılır ve çakıl, kum ve siltli kilden oluşur ve ince tanelidir. En fazla yamaç molozu kalınlığı sondaj sonuçlarına göre 2 m'dir.

Çalışma alanında üç KB-GD doğrultulu fay gözlenmiştir. Arap plakasının Anadolu plakasını itmesiyle oluşan ve 580 km uzunluğuyla Doğu Anadolu fay zone Türkiye'nin en önemli tektonik hareketlerinden biridir. Faylar Suruç tüneline 0.3

km, 2.1 km ve 16.2 km'lerinden geçmektedir. Birinci ve üçüncü faylar normal fay, ikinci fay ise ters faydır.



Şekil 4.1 Tünel güzergahındaki boyuna Jeolojik kesit ve sondaj kuyularının yerleri

Bu bölge Türk Afet İşleri Genel Müdürlüğü'nün Deprem Araştırma Dairesi tarafından hazırlanan (1996) Türk deprem bölgeleri haritasına göre kısmen 3. ve kısmen 4. derece deprem bölgesi içinde yer almaktadır.

4.2 Sondaj

Tünel projesi için DSİ tarafından sırasıyla, litolojik yapının belirlenmesi, temel koşullarının doğrulanması, zemin su seviyesinin ölçülmesi ve geçirgenliğin belirlenmesi amacıyla BST (Lugeon) testleri ve laboratuvar testleri yapılmıştır. Bu testlerde kullanmak amacıyla tünel boyunca 530 m uzunluğunda toplam 10 adet sondaj kuyusu açılmıştır (SK-1, SK-2, SK-3... SK-10) ve buralardan kaya örnekleri alınmıştır (Şekil 4.1). Derinlik, litolojik yapı, yeraltı su seviyesi (YASS), kaya kalitesi göstergesi (RQD, 10 cm veya daha fazla uzunluklarda sondaj karot yüzdesi), toplam karot verimi (TCR, sondaj deliği karot verimi yüzdesi) ve jeolojik birimlerin geçirgenlik değerleri her bir sondaj kuyusu için belirlenmiş ve Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

4.3 Geçirgenlik Testleri

Geçirgenlik bir tünel projesinin tasarımındaki en önemli girdilerinden biridir. Sondaj sırasında toplam 51 adet basınçlı su testi yapılmış ve bu birimlerin geçirgenlikleri Lugeon değerleri olarak (Çizelge 4.1)'de gösterilmiştir.

Değerlendirilen veriler, düşük kaya kalitesi ile geçirgenliğin arttığını göstermiştir. Geçirgenlik ve derinlik arasında ise hiç bir bağlantı tespit edilmemiştir. Lugeon ölçeğinde ölçülen kaya birimlerinin geçirgenliğine göre Teogt kaya kütlesi orta geçirgen-geçirgen, Teogm kaya kütlesi ise geçirimsiz olarak sınıflandırılmıştır. Tünelin Teogt içerisinde kazılacak kısımlarımda, tünel duvarlarından sızıntıyı önlemek için enjeksiyon önerilmektedir.

Çizelge 4.1 Sondajlardan elde edilen geoteknik parametreler (Bar-Su and Geotecna Progetti, 2010)

Sondaj No	Derinlik (m)	Birim	YSS (m)	RQD (%)			TCR (%)			Geçirgenlik (Lugeon)		
				min	maks	ort	min	maks	ort	min	maks	ort
SK-1	38	Teogt	-	0	95	30	60	100	85	1.23	3.43	2.03
SK-2	58	Teogt	-	0	85	29	30	100	70	2.48	7.80	4.77
SK-3	70	Teogt	32	15	85	50	60	100	87	2.32	2.82	2.57
SK-4	81	Teogt	38	0	85	55	35	100	85	2.10	3.61	2.63
SK-5	70	Teogt	32	0	90	22	15	100	71	4.61	8.34	6.19
SK-6	53	36 m	23	0	43	9	30	65	48	-	-	-
		Teogt 17 m Teogm		10	90	33	45	95	70	0.13	0.68	0.33
SK-7	43	26 m	17	15	70	41	65	100	80	-	-	-
		Teogt 17 m Teogm		10	85	48	65	95	82	0.12	1.29	0.54
SK-8	42	11 m	16	0	0	0	15	50	33	-	-	-
		Teogt 31 m Teogm		0	90	60	40	100	84	0.09	0.26	0.16
SK-9	42	16 m	16	10	30	16	33	75	59	-	-	-
		Teogt 26 m Teogm		50	85	70	90	100	97	0.13	0.52	0.31
SK-10	31	10 m	14	0	17	10	25	70	54	-	-	-
		Teogt 21 m Teogm		0	95	30	25	100	66	0.16	0.77	0.49

4.4 Laboratuvar Testleri

Birim hacim ağırlığı, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), Elastisite modülü, Poisson oranı, kohezyon ve kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısını belirlemek amacıyla, alınan 77 sondaj numunesi üzerinde ISRM (2007)'ye uygun olarak DSİ laboratuvarlarında testler yapılmıştır. Ayrıca, sayısal analizlerin giriş verileri içinde bu parametrelere ihtiyaç vardır. Sonuçlar Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 Laboratuvar test sonuçları (Bar-Su and Geotecna Progetti, 2010)

Parametreler	Kireçtaşı (Teogt)			Marn (Teogm)		
	min	ort	maks	min	ort	maks
Kohezyon (MPa)	2.3	4.0	5.2	3.1	3.5	3.9
İçsel sürtünme açısı (°)	25	30	36	15	22	30
Birim ağırlık (kN/m ³)	19.8	23.0	24.2	19.3	23.1	24.9
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	4.1	20.0	44.0	2.0	8.1	13.5
Elastisite modülü (GPa)	2.5	9.0	15.1	1.0	3.2	5.7
Poison oranı	0.15	0.20	0.25	0.24	0.30	0.38

4.5. Kinematik Analizler

Kinematik analize göre eklemlerin boşluğu, devamlılığı, dolgu, dışa açıklık derecesi gibi özellikleri kaya kütesinin özelliklerini doğrudan etkiler. Bu süreksizliklerin özellikleri ISRM (2007)'ye uygun olarak yerinde tespit edilmiştir. Tünel güzergahında 75 ölçüm sonucunda 1 hakim süreksizlik seti belirlenmiştir. Ayrıca, tünel girişlerinin ve tabakalaşmalarının doğrultu ve eğimleri de ölçülmüştür.

Hakim süreksizlik seti;

D: N45W / 80NE

Tabakalama;

S: N30E / 12SE

Giriş ve çıkışlar;

P_E: N75W / 55NE

P_O: N75W / 55SW

Sağ ve sol şev kesitleri;

C_L: N15E / 55NW

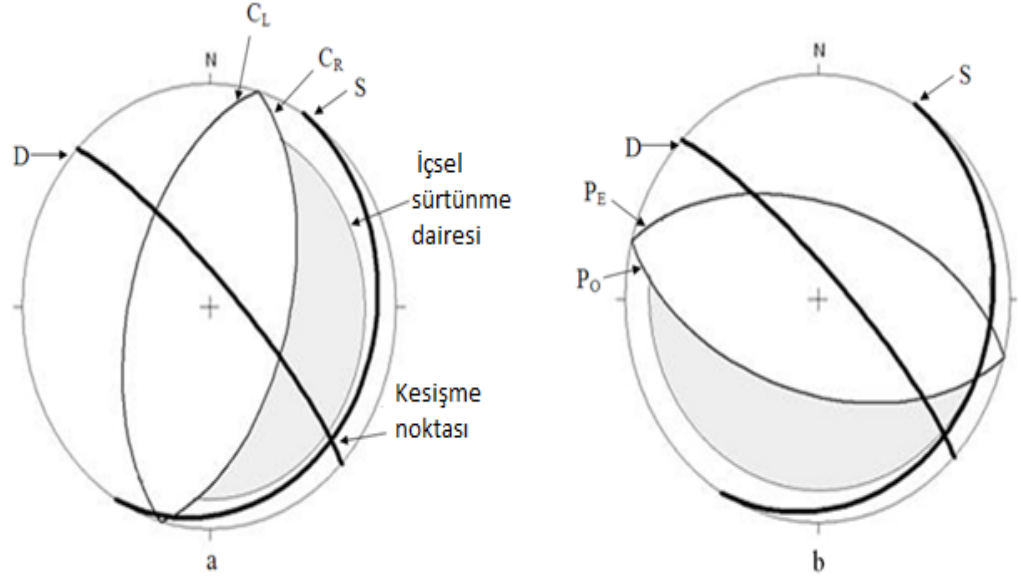
C_R: N15E / 55SE

Tünel güzergahındaki marn (\emptyset_M) ve kireçtaşlarının (\emptyset_L) içsel sürtünme açılarının artık değerleri;

$\emptyset_L : 25^\circ$

$\emptyset_M : 15^\circ$

Bu ölçümler (Diederichs ve Hoek, 1989) ve eşit alanlı stereografik projeksiyona dayalı, bilgisayar programı ile değerlendirilmiştir. Kazı şevlerinde, tünel giriş ve çıkışında herhangi bir düzlemsel ve kama tipi kayma riski tespit edilmemiştir. Bu nedenle detaylı şev duraylılık analizlerine gerek görülmemiştir.



Şekil 4.2. Kinematik analizler (a) kazı şevlerinde ve (b) tünel giriş ve çıkışında

4.6. KAYA KÜTLESİ KARAKTERİZASYONU

Kaya kütlelerinin karakterize edilmesi tünel destek tasarımı ve inşası (uygun destek türü ve kazı yöntemini belirlemek) için önemli bir jeolojik faktördür. Kaya kütleleri karakterize etme çalışmaları sondajlarla birlikte mevcut yüzlelerde ve yamaçlarındaki kaya yüzeylerinde yapılmıştır.

Günümüze kadar pek çok araştırmacı tarafından birçok kaya kütleleri sınıflandırma sistemleri geliştirilmiştir (Ulusay ve Sönmez, 2002). Ancak, Teogt ve Teogm birimlerinde kaya kütleleri karakterize etme çalışmaları için en çok bilinen yöntemler olan, RQD (Deere, 1968) , RMR (Bieniawski, 1973) , Q (Barton ve ark. 1974) ve GSI (Hoek ve Brown, 1997) yöntemleri kullanılmıştır. RMR (Bieniawski, 1989), Q (Grimstad ve Barton, 1993), ve GSI (Hoek ve ark. 1998, Sonmez ve

Ulusay, 1999, 2002) yöntemlerinin yenilenmiş versiyonları kullanılmıştır. Sınıflandırma sistemlerinin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri belirlenmiştir.

UCS, RQD, çatlak veya süreksizlik aralığı, süreksizlik koşulları, yeraltı suyu koşulları ve çatlak yönelimi RMR sisteminin girdileridir. RMR tahminlerin özeti Çizelge 4.3'de sunulmuştur.

Çizelge 4.3 RMR çalışmasının girdileri ve sonuçları

YER		UCS (MPa)	RQD (%)	Süreksizlik aralığı (mm)	Süreksizlik yüzeylerinin durumu	Yeraltı suyu durumu	Ekleme oryantasyonu için derecelendirme ayarı	RMR değerleri
Teogt	min	4.1	0	60				34(kötü)
	ort	20.0	40	200	Hafif pürüzlü yüzeyler,	10-25 litre/min		43(orta)
	mak	44.0	95	2000	ayrı ayrı <1 mm, çok yıpranmış duvarlar		olumlu	69 (iyi)
Teogm	min	2.0	0	60				37(kötü)
	ort	8.1	65	500				49(orta)
	mak	13.5	95	2000		<10 litre/min		71(iyi)
Fay		1.0	0	10			Çok olumsuz	15(çok kötü)

RMR sistemi gerilme parametrelerinden yoksun olduğundan, kaya kütlelerini karakterize etme çalışmaları Q sistemiyle de yapılmıştır. RQD, eklem seti sayısı (J_n), çatlak pürüzlülük (J_r), eklem değişiklikleri (J_a), çatlak su indirgeme faktörü (J_w) ve gerilme indirgeme faktörü (SRF) Q sisteminin girdileridir.

Birimlerin Q değerlerini hesaplamak için kaya kütlelerin ortalama değerleri aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi dikkate alınmıştır.

$$Q = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) \cdot (J_w / SRF) \quad (1)$$

Tünel içi destek basınçlarını hesaplamak için Q aşağıdaki eşitlikte ifade edildiği gibi Q'nun gerilme serbest formu, Q_N , Goel ve ark. (1995)'de tanımlanmış bir parametredir. Q_N hesaplamak için SRF'nin 1 olduğu varsayılmıştır.

$$Q_N = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) \cdot (J_w) \quad (2)$$

Aşağıdaki eşitlikte de ifade edildiği gibi güncellenen tünel kalite indeksi, Q' , Hoek ve ark. (1995)'de tanımlanmış bir parametredir. Q' hesaplamak amacıyla, J_w 'nin 1 olduğu varsayılmıştır.

$$Q' = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) \quad (3)$$

Son olarak, Barton (2002)Q sistemin de tanımlanan bir parametre olan Q_C 'yi güncellemiştir. Aşağıdaki eşitlikte ifade edildiği gibi yeni bir parametre mühendislik parametreleri arasındaki yeni bağıntıların belirlenmesi amacıyla önerilmiştir.

$$Q_C = Q \cdot (\sigma_{ci} / 100) \quad (4)$$

σ_{ci} , bozulmamış kayanın MPa cinsinden tek eksenli basınç dayanımıdır. Q tahminlerinin özeti Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4 Q çalışmasının girdileri ve sonuçları

Birim	σ_{ci} (MPa)	RQD (%)	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	Q_N	Q'	Q_C
Teogt	20	40	6	3	2	0.66	5	1.3 (kötü)	6.6	9.8	0.26
Teogm	8.1	65	6	3	6	1	5	1.1 (kötü)	5.4	5.5	0.09
Fay	1.0	15	6	0.5	8	0.33	10	0.0052 (çok kötü)	0.05	0.2	0.00005

Ayrıca, geliştirilen en son sistemlerden olması nedeniyle, kaya kütlelerinin karakteri GSI tarafından da incelenmiştir. Bu çalışmada, Sönmez ve Ulusay (1999) önerileri R_r , R_w , R_f , SCR , S_x , S_y , S_z , J_v ve S_R parametrelerinin seçimi için takip edilmiştir. Çünkü özellikle üç eksenli yüzler ile J_v değerlerinin belirlenmesi için bazı uygun yüzlekler bulunmuştur.

Son olarak, Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından yakın zamanda güncellenmiş GSI grafiği, GSI değerlerinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır. GSI tahminlerinin bir özeti Çizelge 4.5'de sunulmuştur.

Çizelge 4.5 GSI çalışmasının girdileri ve sonuçları

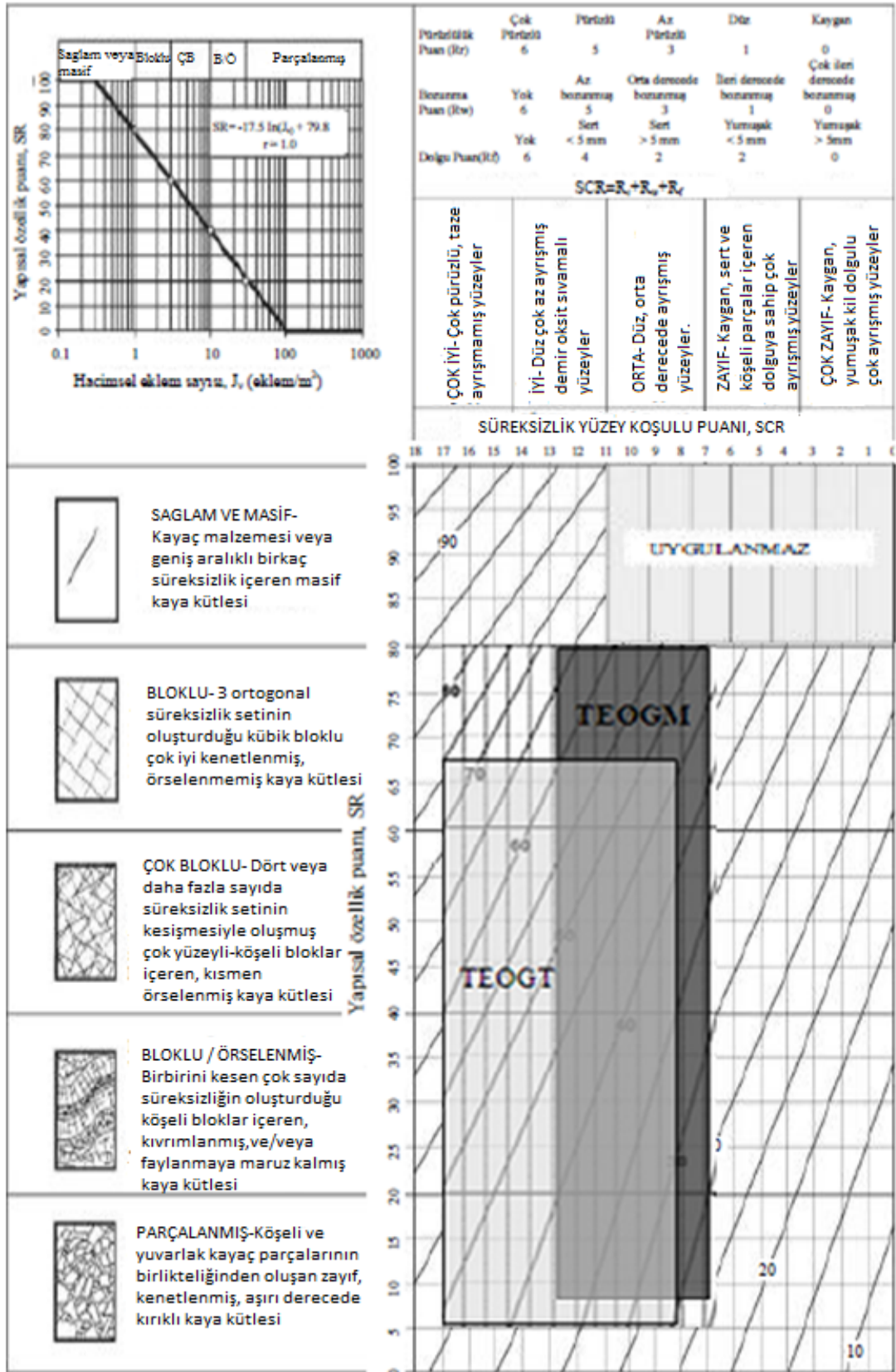
Birim		R _r	R _w	R _f	SCR	S _x , S _y , S _z (cm)	J _v	S _R	GSI değerleri
Teogt	min	1	3	2	6	2, 20, 25	1000	5	23 (kötü)
	ort	3	5	4	12	15, 40, 100	17	18	42 (orta-iyi)
	mak	5	6	6	17	50, 60, 200	2	66	74 (çok iyi)
Teogm	min	1	2	2	5	2, 20, 35	715	8	22 (kötü)
	ort	1	3	2	6	15, 50, 150	9	52	39 (orta-iyi)
	mak	3	5	4	12	100, 100, 200	1	80	68 (çok iyi)
Fay		1	1	2	4	2, 5, 10	10000	0	16 (çok kötü)

* süreksizlik aralığı x, y, z eksenlerinde

GSI değerlerinin aralıkları Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından niceliksel olarak GSI grafiğine işlenmiş ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

GSI değerlerinin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri birbirine yakın bulunmuştur. Bütün gölgelendirilmiş GSI değerleri 25-62 arasında kesişmiştir. Bu 25 ve 62 arasında değişen GSI değerlerinin bütün tünel hattını temsil edebileceği yönünde yorumlanmıştır.

Sonuçlar birbirine yakın olmasına rağmen, RMR sisteminin sonucuna göre kıyaslandığında Teogt birimi Teogm birimine göre daha kaliteli kaya kütesine sahiptir (Çizelge 4.3). Ancak, Q ve GSI sistemlerinin sonuçlarına göre ise, durum tam tersidir (Çizelge 4.4 ve 4.5). Bu uyumsuzluğun, her üç sistemdeki benzer parametrelerin farklı puanlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.3 GSI değerleri ve aralıkları (Sonmez ve Ulusay, 2002)

4.7. KAYA KÜTLESİ PARAMETRELERİ

Suruç tünel güzergahındaki kaya kütlelerinin dayanım özellikleri Hoek-Brown'un yenilme ölçütü (Hoek ve ark. 1995) ve RMR, Q, GSI ve UCS değerleri kullanarak ifade edilmiştir. Ayrıca, geomekanik kalite göstergeleri olan RMR, Q ve GSI değerleri kullanılarak, Teogt ve Teogm birimlerine ait deformasyon modülleri de dolaylı olarak belirlenmiştir.

4.7.1 Kaya Kütesine Ait Hoek-Brown Sabitleri

Kaya kütle sabitleri " m_i ", " m_b ", " s " ve " a " aşağıda verilen formüller (Hoek ve ark. 1995) kullanılarak GSI değerlerinden tespit edilmiştir. Buradan sağlam kaya sabiti " m_i " Teogt için 10 ve Teogm için 8 seçilmiştir. D kaya kütesinin kazısının örselenme faktörü olarak ifade edilmektedir. Tam kesit TBM ile kazıda çok az örselenmeye neden olduğundan " D " bu çalışmada sıfır olarak kabul edilmiştir. Ayrıca bu parametrelere convergence-confinement yöntemiyle tünel basınçlarını hesaplarken de ihtiyaç duyulacaktır.

$$m_b / m_i = \exp [(GSI - 100) / (28 - 14.D)] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &\text{Eğer, } GSI < 25 \\ &s = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$a = 0.65 - (GSI / 200) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &\text{Eğer, } GSI > 25 \\ &s = \exp [(GSI - 100) / 9] \end{aligned} \quad (8)$$

$$a = 0.5 \quad (9)$$

Singh ve ark.(1997) tünel için m_b ve s sabitlerini hesaplamaya 10 numaralı eşitliği önermiştir.

$$m_b / m_i = 0.135 \cdot (Q_N)^{1/3} \quad (10)$$

$$s = 0.002 \cdot Q_N \quad (11)$$

Palmstrom (2000)'de m_b ve s sabitlerini hesaplamak için aşağıdaki yaklaşımlar yapılmıştır. Bu çalışmada Palmstrom (1996)'da belirtilen kaya kütlelerinin ekleme parametresi olan J_p sırasıyla Teogt için 0.2 ve Teogm için 0.3 olarak hesaplanmıştır.

$$m_b = m_i \cdot (J_p)^{0.64} \quad (\text{Örselenmiş kayalar için}) \quad (12)$$

$$m_b = m_i \cdot (J_p)^{0.875} \quad (\text{Örselenmemiş kayalar için}) \quad (13)$$

$$s = (J_p)^2 \quad (14)$$

Hesaplanan kaya kütleleri sabitleri olan m_b , m_i , a ve s değerleri Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

4.7.2 Kaya Kütlesinin Mukavemeti

Ramamurty (1986), kayanın $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için bir eşitlik önermiştir ve bu eşitlikteki σ_{ci} bozulmamış kayanın UCS değeridir (MPa).

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot \exp[7.65 \cdot (RMR - 100) / 18.75] \quad (\text{MPa}) \quad (15)$$

Goel (1994), $\sigma_{c(kütle)}$ 'yi hesaplamak için bir eşitlik önermiştir. Burada Bm cinsinden tünel genişliği, γ ise t/m³ cinsinden kaya kütlesinin yoğunluğudur.

$$\sigma_{c(kütle)} = [5.5 \cdot \gamma \cdot (Q_N)^{1/3}] / [\sigma_{ci} \cdot (B)^{0.1}] \quad (\text{MPa}) \quad (16)$$

Kalamaris ve Bieniawski (1995) aşağıdaki gibi kayaçların $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için bir eşitlik önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot \exp[(RMR - 100) / 24] \quad (\text{MPa}) \quad (17)$$

Palmstrom (1995) aşağıdaki gibi, kayaçların $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için bir eşitlik önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot J_p \quad (\text{MPa}) \quad (18)$$

Hoek ve ark. (1995) aşağıdaki gibi, genelleştirilmiş yenilme kriteri önermiştir;

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot [m_b \cdot (\sigma'_3 / \sigma_{ci}) + s]^a \quad (\text{MPa}) \quad (19)$$

Burada σ'_1 etkili en büyük asal gerilme ve σ'_3 etkili en küçük asal gerilmedir. Kaya kütlesinin UCS'sini belirlerken, σ'_3 sıfır olarak kabul edilir ve σ_c ise laboratuvar testlerden elde edilir. Böylece, eşitlik 12 eşitlik 13'e dönüştürülüp σ'_1 hesaplanmış olur. Kaya kütlesinin $\sigma_{c(kütle)}$ değeri ise UCS'si haline gelir.

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot S^a \quad (\text{MPa}) \quad (20)$$

Bhasin ve Grimstad (1996) $Q > 10$ olduğu durumlarda sert kayaçların $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = (\sigma_{ci}/100) \cdot 7 \cdot \gamma \cdot (Q)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (21)$$

Daha sonra, Singh ve ark. (1997)'de $Q < 10$ ve $\sigma_{ci} > 2$ olduğu durumlarda eşitlik 21 aşağıdaki gibi değiştirilmiştir.

$$\sigma_{c(kütle)} = 7 \cdot \gamma \cdot (Q)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (22)$$

Aydan ve ark. (1997) kayaçların $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = 0,0016 \cdot (\text{RMR})^{2.5} \quad (\text{MPa}) \quad (23)$$

Sheorey (1997) aşağıdaki gibi kayaçların $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için bir eşitlik önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot \exp[(\text{RMR} - 100) / 20] \quad (\text{MPa}) \quad (24)$$

Trueman (1998) kaya kütlelerinin RMR değerlerini kullanarak $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = 0.5 \cdot \exp(0.06 \cdot \text{RMR}) \quad (\text{MPa}) \quad (25)$$

Aydan ve Dalgic (1998) kayaçların $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot [\text{RMR} / (\text{RMR} + 6 \cdot (100 - \text{RMR}))] \quad (\text{MPa}) \quad (26)$$

Barton (2000) kaya kütlelerinin Q değerlerini kullanarak $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = 5 \cdot \gamma \cdot [Q \cdot (\sigma_{ci}/100)]^{1/2} \quad (\text{MPa}) \quad (27)$$

Barton (2002) ayrıca kaya kütlelerinin Q_C değerlerini kullanarak $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = 5 \cdot \gamma \cdot (Q_C)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (28)$$

Hesaplanan $\sigma_{c(kütle)}$ değerleri Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

4.7.3 Kaya Kütlelerinin Deformasyon Modülü

Kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü olan $E_{kütle}$ 'yi RMR, Q, GSI ve UCS değerleri kullanarak dolaylı olarak tahmin edebilecek bazı önermeler literatürde vardır.

Bieniawski (1978) $RMR > 50$ olan kaya kütlelerinin RMR değerleri kullanılarak $E_{(kütle)}$ 'yi hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(kütle)} = 2 \cdot RMR - 100 \quad (\text{GPa}) \quad (29)$$

Serafım ve Pereira (1983) $RMR \leq 50$ olan kaya kütlelerinin RMR değerleri kullanılarak $E_{(kütle)}$ değerini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(kütle)} = 10^{(RMR - 10) / 40} \quad (\text{GPa}) \quad (30)$$

Nicholson ve Bieniawski (1990) kaya kütlelerinin E_i ve R_F değerlerini kullanılarak $E_{(kütle)}$ değerini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(kütle)} = E_i \cdot R_F \quad (\text{GPa}) \quad (31)$$

E_i bozulmamış kayanın elastik modülü ve R_F ise Nicholson ve Bieniawski (1990) tarafından ifade edilen yüzde olarak azalma faktörü olup aşağıdaki gibidir;

$$R_F = 0.0028 \cdot RMR^2 + 0.9 \cdot \exp(RMR / 22.82) \quad (32)$$

Verman (1993) zayıf kayalardaki 50 m den derin tüneller için $E_{(küttele)}$ değerini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(küttele)} = 0.3 \cdot H^{\alpha} \cdot 10^{(RMR-20)/38} \quad (\text{GPa}) \quad (33)$$

Burada H tünel derinliğidir ve α (çok zayıf kayalar için 0.30 ile çok sert kayalar için 0.16 arasında) bir faktördür.

Bu çalışmada, Suruç tünelineki en fazla örtü kalınlığı (H) 80 m, α ise 0.2 olarak seçilmiştir.

Grimstad ve Barton (1993) $Q>1$ olan kaya kütlelerinin $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(küttele)} = 25 \cdot \log Q \quad (\text{GPa}) \quad (34)$$

Mitri ve ark. (1994) kayaların $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(küttele)} = E_i \cdot 0.5 \cdot [1 - \cos \pi (RMR / 100)] \quad (\text{GPa}) \quad (35)$$

Aydan ve ark. (1997) kayaların $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(küttele)} = 0.0097 \cdot (RMR)^{3.54} \quad (\text{MPa}) \quad (36)$$

Hoek ve Brown (1998) $\sigma_{ci}<100$ MPa olan zayıf kayaların GSI değerini kullanarak $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(küttele)} = (\sigma_{ci} / 100)^{0.5} \cdot 10^{(GSI - 10) / 40} \quad (\text{GPa}) \quad (37)$$

Read ve ark. (1999) kayaların RMR değerini kullanarak $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e})} = 0.1. (RMR / 10)^3 \quad (\text{GPa}) \quad (38)$$

Palmstrom (1995) RMI>0.1 olan kayaçların $E_{(k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e})}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e})} = 5.6 . (RMI)^{0.375} \quad (\text{GPa}) \quad (39)$$

Barton (2002) kaya kütlelerinin Q_c değerini kullanarak $E_{(k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e})}$ 'yi hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e})} = 10 . (Q_c)^{1/3} \quad (\text{GPa}) \quad (40)$$

Son olarak Hoek ve Diederichs (2006) kayaçların E_i ve D değerini kullanarak $E_{(k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e})}$ 'yi hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e})} = E_i . \{0.02 + [1 - (D/2)]/[1 + \exp((60 + 15.D - GSI) / 11)]\} \quad (\text{GPa}) \quad (41)$$

Tünel güzergâhından elde edilen kaya kütlesi sabitleri (m_i , m_b , s ve a), kaya kütlesi dayanımı σ_c ($k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e}$) ve kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü $E_{(k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e})}$ Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 Tünel güzergahı boyunca hesaplanan kaya kütlesi parametreleri

Parametre	Eşitlik no	Teogt			Teogm		
		min.	ort.	maks.	min.	ort.	maks.
m_i		10	10	10	8	8	8
m_b	5	0.64	1.26	3.95	0.49	0.91	2.55
	10	-	2.38	-	-	2.18	-
	12	-	3.56	-	-	3.70	-
Ortalama			2.40		2.26		
s	8	-	0.0016	0.056	-	0.0011	0.029
	6	0	-	-	0	-	-
	11	-	0.013	-	-	0.011	-
	14	-	0.04	-	-	0.09	-
Ortalama			0.018		0.034		
a	9	-	0.5	0.5	-	0.5	0.5
	7	0.53	-	-	0.54	-	-
Ortalama			0.5		0.5		
σ_c (küttele) (MPa)	16	-	0.97	-	-	2.25	-
	17	0.26	1.86	12.09	0.14	0.97	4.03
	18	0.82	4.0	8.8	0.6	2.43	4.05
	20(denk.11 ve 8'den s)	0	0.81	10.4	0	0.27	2.29
	20(denk.11'den s)	-	2.28	-	-	0.85	-
	22	-	17.57	-	-	16.69	-
	23	10.78	19.39	63.27	13.32	26.89	67.96
	24	0.15	1.15	9.33	0.08	0.63	3.17
	25	3.84	6.59	31.40	4.61	9.45	35.40
	26	0.32	2.23	11.9	0.18	1.12	3.91
Ortalama			5.07		4.32		
E (küttele) (GPa)	29	-	-	38	-	-	42
	30	3.98	6.68	-	4.73	9.44	-
	31	2.32	8.01	10.29	0.91	2.73	3.74
	33	1.68	2.91	14.03	2.01	4.18	15.84
	34	-	2.84	-	-	1.03	-
	35	1.67	6.43	12.75	0.68	2.38	4.87
	36	2.56	5.88	31.35	3.45	9.33	34.69
	37	0.42	2.82	26.41	0.28	1.51	10.36
	38	3.93	7.95	32.85	5.06	11.76	35.79
	40	-	6.38	-	-	4.48	-
	41	0.13	1.64	12.09	0.05	0.48	3.96
Ortalama			5.15		4.73		

5. TÜNEL DESTEK BASINCI ve TASARIMI

Kaya kütle sınıflandırma sistemleri, destek basıncı ve ihtiyaçların belirlenmesi üzerinde başarılı olmasına rağmen, tüneli çevreleyen kaya kütlesi ile destekler arasındaki etkileşimleri öngörmede yoksundurlar. Bu eksikliği ortadan kaldırmak amacıyla, hem görgül, analitik ve hem de sayısal yöntemler güvenli tünel destek tasarımı için incelenmiştir.

5.1 Görgül Yöntemler

Barton ve ark. (1974) kaya kütlelerinin Q değerleri kullanarak destek basıncını (P_i) hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$P_i = 0.2 \cdot Q^{-1/3} / J_r \quad (\text{MPa}) \quad (42)$$

Goel ve ark. (1995) 50 m'den derin tüneldeki kaya kütlelerinin RMR, B ve H (tünel derinliği) değerlerini kullanarak destek basıncını (P_i) hesaplamak için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir;

$$P_i = (7.5 \cdot B^{0.1} \cdot H^{0.5} - \text{RMR}) / 20 \cdot \text{RMR} \quad (\text{MPa}) \quad (43)$$

Tünel güzergahındaki Teogt ve Teogm jeolojik birimlerinin destek basınç miktarları hesaplanmıştır (Çizelge 5.1.).

Çizelge 5.1 Suruç tüneli için destek basıncı hesapları (MPa)

Eşitlik no	Teogt	Teogm	Fay zonu
42	0.06	0.07	2.31
43	0.05	0.09	0.22

Daha sonra, RMR ve Q sistemlerine dayanarak tünel destek sistemi seçilmiştir. Teogt ve Teogm için ortalama RMR değerleri sırasıyla, 43 ve 49'dur. Her iki birimde III. sınıf kaya kütlesi sınıfındadır. III. sınıf kaya kütlesi için RMR sistemi 4 m uzunluğunda sistematik saplamanın bir modeli, duvarlarda ve taç kısmında 1.5-2 m aralıklı tel örgü, taçlarda 50-100 mm, duvarda 30 mm kalınlığında püskürtme betonu önermiştir.

Barton ve ark. (1974) önerdiği bir parametre olan D_e , eşdeğer boyut olarak isimlendirilen bir parametredir;

$$D_e = \text{Kazı açıklığı, çap veya yükseklik (m)} / \text{Kazı Destek oranı, ESR} \quad (44)$$

Suruç tünelinin kazı açıklığı 7 m ve ESR 1.6 olarak kabul edilmiş, D_e 4.37 olarak hesaplanmıştır.

Barton ve ark. (1974) ve Grimstad ve Barton (1993) D_e ve Q değerlerine göre bazı destek grafikleri önermektedir. Bunlarda Teogt birimi için D_e değeri 4.37 ve Q değeri de 1.3 olduğunda, 1.8 m aralığında ve 3.7 m uzunluğunda kaya bulonunun ve 4.5 cm kalınlıkta çelik lif takviyeli püskürtme betonunun uygun olduğunu önermiştir. Teogm için, D_e değeri 4.37 ve Q değeri de 1.1 olduğunda 1.7 m aralığında ve 3.7 m uzunluğunda kaya bulonları ve 5 cm kalınlıkta çelik lif takviyeli püskürtme betonunun uygun olduğunu önermiştir.

5.2 Çözümlemeli Yöntem

Destek ihtiyacı analitik olarak convergence-confinement ile belirlenmiştir. Bu yöntem ilk olarak Fenner (1938) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde zeminin ve uygulanacak desteğin deformasyon karakterlerine ihtiyacı vardır, böylece bir destek üzerine tahmini yükler uygulanabilir. Convergence-confinement yöntemi Hoek-Brown kriterini karşılayan kaya kütleleri için uygun olup, ilk olarak Carranza-Torres ve Fairhurst (1999, 2000); Basarir ve ark. (2005); Basarir (2006) tarafından uygulanmıştır.

Tünel yarıçapı (R) , yarıçapa bağlı düzgün gerilme alanı (σ_0) ve iç basıncı (p_i) varsayarsak kritik destek basıncı olan p_i^{cr} aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$p_i^{cr} = [P_i^{cr} - (s / m_b^2)] \cdot m_b \cdot \sigma_{ci} \quad (\text{MPa}) \quad (45)$$

burada P_i^{cr} aşağıdaki formül ile verilen ölçekli kritik basınçtır.

$$P_i^{cr} = 0.0625 \cdot [1 - (1 + 16 \cdot S_0)^{0.5}]^2 \quad (\text{MPa}) \quad (46)$$

Burada S_0 aşağıdaki formül ile verilen ölçekli gerilme alanıdır.

$$S_0 = (\sigma_0 / m_b \cdot \sigma_{ci}) + (s / m_b^2) \quad (\text{MPa}) \quad (47)$$

Eğer $p_i > p_i^{cr}$ 'den büyükse yenilme beklenmez. Bu durumda, kaya kütlelerinin çevresi elastik davranış gösterir. Aşağıdaki eşitlik ise, tünel duvarlarındaki içe doğru elastik yer değiştirmeyi verir.

$$u_r^{el} = R \cdot (\sigma_0 - p_i) / (2 \cdot G_{rm}) \quad (\text{mm}) \quad (48)$$

Kaya kütlelerinin kayma modülüne G_{rm} denir.

Eğer $p_i < p_i^{cr}$ 'den düşük ise yenilme beklenir. Kırık bölgenin yarıçapı, R_{pl} aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$R_{pl} = R \cdot \exp[2 \cdot (P_i^{cr} - (P_i)^{0.5})^{0.5}] \quad (\text{m}) \quad (49)$$

Hoek ve Brown (1997) bazı durumlarda plastik hacmin değişmediğini varsaymanın daha uygun olabileceğini belirtmiştir. Bu durumda, toplam içe doğru plastik deformasyon aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$u_r^{pl} = \left[\frac{(\sigma_0 - p_i^{cr})}{(2 \cdot R \cdot G_{rm})} \right] * \left\{ \left[\frac{(1-2 \cdot \nu)}{2} \right] * \left[\frac{(p_i^{cr})^{0.5}}{(S_0 - p_i^{cr})} \right] + 1 \right\} * \left(\frac{R_{pl}}{R} \right) + \left\{ \frac{(1-2 \cdot \nu)}{[4 \cdot (S_0 - p_i^{cr})]} \right\} * \left[\ln \left(\frac{R_{pl}}{R} \right) \right]^2 - \left[\frac{1-2 \cdot \nu}{2} \right] * [(p_i^{cr})^{0.5} / (S_0 - p_i^{cr})] \quad (\text{mm}) \quad (50)$$

Burada ν Poison oranıdır. Bu çalışmada, parametrelerin hesaplanması için Carranza-Torres ve Fairhurst (2000)'in önerileri izlenmiştir. Suruç tüneli için, R ve σ_0 değerleri Teogt ve Teogm birimlerinin her ikisi içinde benzerdir ve bunlar sırasıyla 7 m ve 1.84 MPa olarak alınmıştır. İçsel destek basıncı p_i , tünelin desteklenmeyen parçaları için sıfır kabul edilmiştir. Kritik destek basıncı, desteklenmeyen tünel için en fazla deformasyonlar, yenilme bölgelerinin yarıçapı ve gerilme değerleri Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2 Kritik destek basıncı yenilme bölgesinin alanı, azami deformasyon ve gerilme değerleri

Birim	Kritik destek basıncı p_{cr} , MPa	Yenilme zon. bölgesi R_{pl} , m	Yüksek deformasyon u_{max} , mm	Gerilme, %
Teogt	0.023	4.7	18.7	0.27
Teogm	0.009	4.0	16.4	0.24

Çizelge 5.3'de görüldüğü gibi, Hoek ve Marinos (2000) gerilmeler, geoteknik sorunlar ve destek türleri arasında bazı ilişkileri önermiştir.

Çizelge 5.3 Deformasyon, geoteknik problemler ve destek tipleri arasındaki ilişki (Hoek ve Marinos, 2000)

	Deformasyon ϵ %	Geoteknik problemler	Destek tipi
A	< 1	Çok basit tünel destek tasarım yöntemleri ve biraz duraylılık sorunları olabilir. Tünel destek önerilerini temel alan kaya kütleli sınıflama sistemi tasarım için uygun bir dayanak oluşturuyor	Çok basit tünel koşulları, az yoğunluklu tavan saplamaları ve püskürtme beton.
B	1 - 2.5	Convergence-confinement yöntemi bölgenin aşamalı gelişiminin, farklı destek türleri arasındaki etkileşimin ve tüneldeki kaya kütleli çevreleyen yenilme zonunun oluşumunu öngörmek için kullanılır.	Tavan saplamaları ile püskürtme beton kaplama. Bazı durumlarda çelik bağlar gerekebilir.
C	2.5 -5	Sıkışmanın düzeyi daha belirgindir. Genellikle kazının 'arın duraylılığı' önemli bir sorun oluşturmaz	İksanın hızlı bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Püskürtme beton kaplaması içinde ağır profilli çelik bağların yerleştirilmesi gerebilir.
D	5- 10	Tünel tasarımında iki boyutlu sonlu analizler kullanılmakta iken arın duraylılık problemleri yoğunlaşmaktadır.	Çok ciddi sıkışma ve arın duraylılık sorunları olmaktadır. Püskürtme beton ile birlikte çelik bağlar yerleştirilmesi ve hızlı bir şekilde destek sisteminin yerleştirilmesi gerekmektedir.
E	> 10	Şiddetli arın duraylılık sorunuyla beraber sıkışma olmaktadır.	Aşırı sıkışma nedeniyle tavanda önsüren ve arında güçlendirme gerekmektedir. Sıkışmanın denetimi açısından püskürtme beton kaplaması içinde esnek çelik bağ kullanımı tercih edilebilir.

Çizelge 5.2 ve 5.3'de görüldüğü gibi, Teogt ve Teogm birimlerinin her ikisinin de gerilme değerleri %1'den azdır. Burada bazı duraylılık problemleri beklenmektedir ve bu yüzden burada kaya kütleli sınıflama sistemleri tarafından tavsiye edilen destek sistemlerinin (Çizelge 5.4) uygulanmaları önerilmektedir.

Çizelge 5.4 Kaya kütlesi sınıflama sistemleri tarafından önerilen destek sistemleri

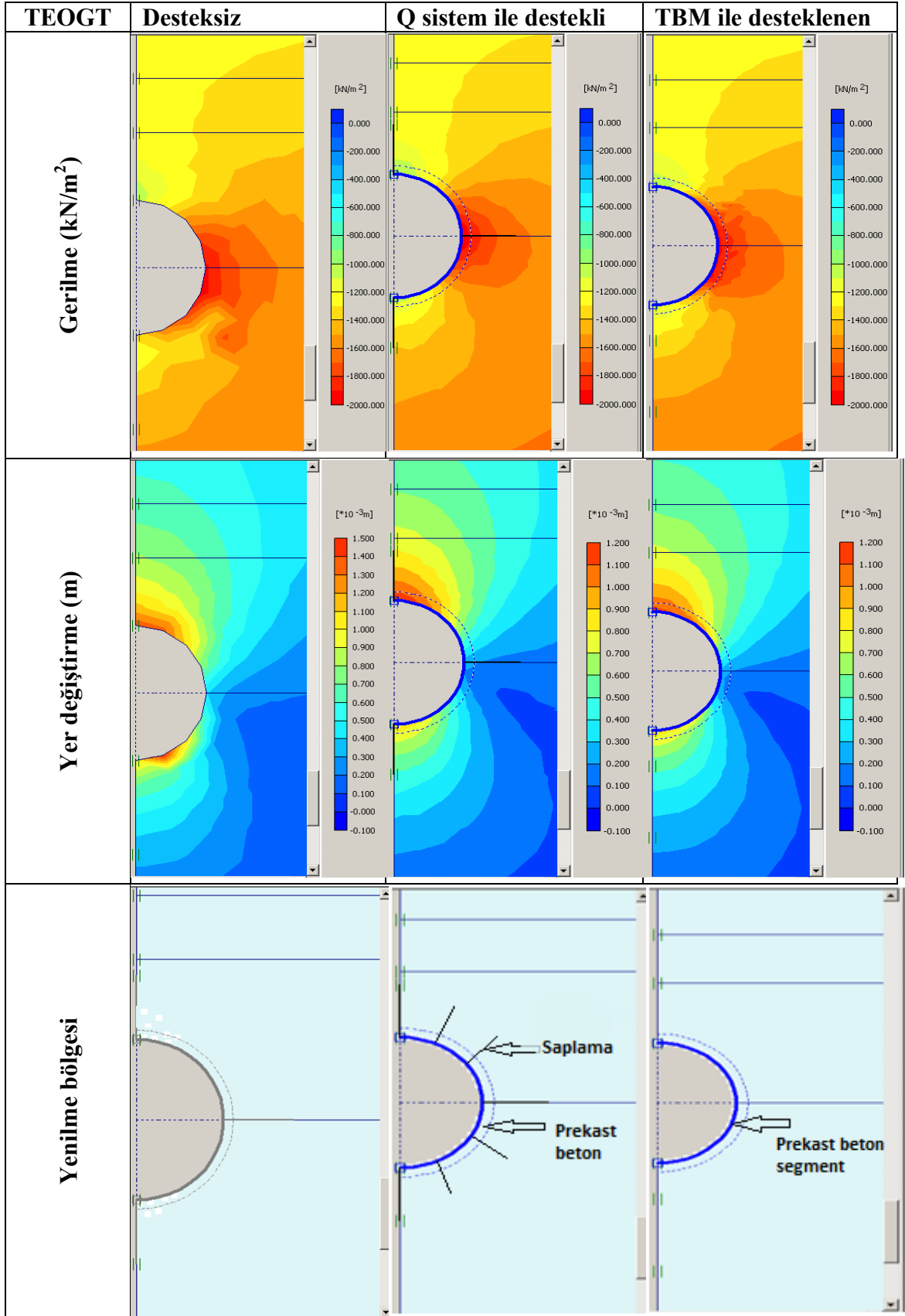
Sistem	Birim	Teogt	Teogm	Fay
Q	Q	1.3	1.1	0.0052
	Açıklık/ESR Destek	4.37 2 m uzunluğunda sistematiik bulon, 1.8 m aralıklı, 4.5 cm liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton	4.37 2 m uzunluğunda sistematiik bulon, 1.7 m aralıklı, 5 cm liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton	4.37 2 m uzunluğunda sistematiik bulon, 0.8 m aralıklı, 20 cm liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton
RMR	RMR Destek	43 4 m uzunluğunda sistematiik bulon, taç kısmında tel kafes ile duvar ve taç kısımlarında 1.5-2 m aralıklı. Püskürtme beton taç kısmında 5-10 cm, kenarda 3 cm	49 4 m uzunluğunda sistematiik bulon, taç kısmında tel kafes ile 1.5-2 m aralıklı. Püskürtme beton taç kısmında 5-10 cm, kenarlarda 3 cm	15 5-6 m uzunluğunda sistematiik bulon, 1-1.5 m aralıklı tel kafes ile duvar taç ve taban kısmında kaya saplaması. 15-20 cm püskürtme beton, kenarda 15 cm, ve yüzeyde 5 cm.

5.3 Sayısal Yöntem

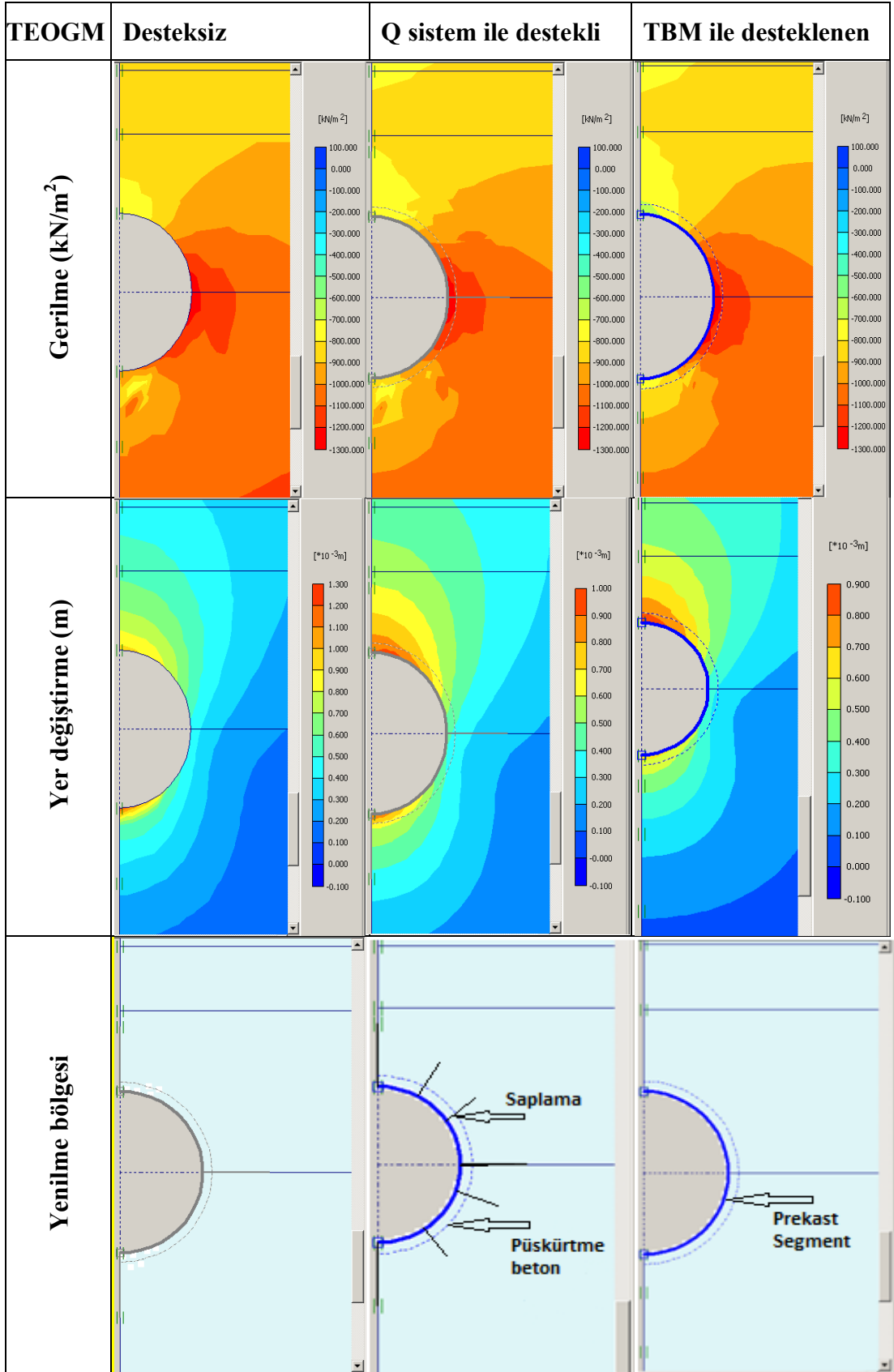
Gerilmeleri, deformasyonları ve destek basınçlarını modellemek amacıyla Plaxis 8.2 yazılımı kullanılmıştır. Buradaki girdi parametreleri birim hacim ağırlık, Young Modülü, Poisson oranı ve içsel sürtünme açısıdır.

Teogt ve Teogm için tünel kazı derinliği sırasıyla 80 m ve 50 m olarak varsayılmıştır. Kaya kütlesinin giriş parametreleri olarak Bölüm 4'te verilen tahmini değerler seçilmiştir.

Analiz üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Desteksiz, Q sistemiyle destekli ve tam kesit TBM segmentleriyle destekli koşullar incelenmiştir. Teogt ve Teogm için gerilmeler, yer değiştirmeler ve yenilme bölgesi Şekil 5.1. ve 7'de sunulmuştur.



Şekil 5.1 Teogt bölgesindeki tüneller için gerilmeler, yer değiştirmeler ve yenilme bölgesi



Şekil 5.2 Teogm bölgesindeki tünel için gerilmeler, yer değiştirmeler ve yenilme bölgesi

Desteklenmiş ve desteklenmemiş durumlar için plastik bölgenin ölçütü, tüneline formasyonları, gerilmeleri incelemiş ve sonuçlar Çizelge 5.5'de sıralanmıştır.

Çizelge 5.5'de görüldüğü gibi deformasyonlar çok küçük olmasına rağmen plastik bölgenin ölçütü Te_{ogt} ve Te_{ogm} birimlerinden geçen fay zonları ve tünelin desteklenmeyen kısımlarında bazı sorunlar olacağı anlamına gelmektedir.

Çizelge 5.5 Yenilme zonu yarıçapı, en büyük deformasyon ve destek basınçları

		Te_{ogt}	Te_{ogm}
Yenilme zonu yarıçapı, R_{pl} , m	Desteksiz	4.6	4.1
	Q sistemi ile desteklenmiş	3.6	3.6
	TBM kaplaması ile destekleme	3.6	3.6
En fazla deformasyon, $u_{kütlet}$, mm	Desteksiz	1.47	1.22
	Q sistemi ile desteklenmiş	1.18	0.99
	TBM kaplaması ile destekleme	1.15	0.90
Destek basıncı, MPa		1.95	1.25

Deformasyonlar ve plastik bölgenin kapsamı, TBM sistemindeki destek kaplamaları ve Q sisteminin destek elemanları tarafından en aza indirgenmiştir. Bunlar önerilen desteklerin yeterli olduğu anlamına gelse de, fay zonlarında daha fazla destek unsurları gerekebilir. Fay zonlarından laboratuvar testlerine uygun numune alınmadığından burada sayısal analiz gerçekleştirilememiştir.

Çizelge 5.2 ve 5.5'den görüldüğü gibi, analitik ve sayısal analizlerle belirlenen plastik bölgenin yarıçapları birbirine yakın olsa da, deformasyonlar analitik analizde daha büyüktür. Ancak, bazı sonlu elemanlar programlarının çok küçük gerilmelerde ve sayısal modelde sonlu ayrışmaların yol açtığı küçük farklılaşmalara uygun olmayabilecekleri unutulmamalıdır. Bu yüzden Başarır (2006)'ın belirttiği gibi, yenilmenin büyüklüğünden ziyade, plastik zonu yayılımının tespit edilmesi çok daha önemlidir.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada Türkiye'nin en uzun dünyanın beşinci en uzun sulama tüneli olan Suruç tünelinin kaya kütleleri, RMR, Q ve GSI kaya kütlesi sınıflama sistemleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Kayaların mekanik özellikleri ise laboratuvar deneyleri ile tespit edilmiştir. Süreksizliklerin niceliksel açıklamaları, doğrultuları ve eğimleri yerinde tespit edilmiş ve kinematik analizler yapılmıştır. Son olarak, muhtemel deformasyonlar ve uygun destek sistemleri belirlenmiştir.

Bu çalışmanın sonuçlarına göre Teogt, Teogm ve fây zonu için bazı duraylılık sorunları olacaktır. Çözümlemeli ve sayısal yöntemlerle deformasyonlar ve tünelin desteksiz yerlerindeki plastik alanlar belirlenmiştir. Görgül yöntemlere göre destek sistemleri olarak kaya saplaması ve püskürtme beton önerilmiştir. Ayrıca, Suruç tüneli tam kesit TBM ile kazıldığı için prekast beton kaplamalarda destek sistemi olarak incelenmiştir. Analizlerin sonuçlarına göre, önerilen destek sistemleri sayesinde yer değiştirmeler ve yenilme bölgesinin sınırı azaltılmıştır. Yer değiştirmelerde ve plastik zonunun yayılımında en fazla azalma prekast beton kaplama destek sistemi ile elde edilmiştir.

Görgül, çözümlemeli ve sayısal analiz sonuçlarına göre, bu analizlerin tünel destek tasarımı projesiyle birlikte kullanılması önerilmektedir. Gerek kazı işlerinin tam kesit TBM ile yapılmış olması gerekse şantiye çalışmalarını aksatmamak adına gerçek deformasyon ölçümlerini yapmak üzere tünelin çeşitli bölgelerinde teçhizatlandırma işlemi için çalışma izni alınamamıştır. Ayrıca, tünel destek sistemlerinin doğruluğunun kazı çalışmaları sırasında yerinde deformasyon ölçümleri ile kontrol edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- ASTM D2487-11. 1984. "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes, Unified Soil Classification System (USCS). ASTM International, USA
- EMIROĞLU, A., 2010. İstanbul (4. Levent-Hacıosman arası) metro tünelineki mühendislik uygulamaları. Ç.Ü. –Yüksek Lisans Tezi, s.5-9
- AYDAN, O., ULUSAY, R. AND KAWAMOTO, T. 1997. Assessment of rock mass strength for underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 34 (3/4): 777-786
- AYDAN, O., DALGIC, S. 1998. Prediction of deformation behavior of 3 lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anatolian Fault Zone (NAFZ). *Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, Taipei*, 228–233
- BAR-SU AND GEOTECNA PROGETTİ SRL. ENGINEERING COMPANIES., 2010. Suruç tunnel report
- BARTON, N. 2000. TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. Rotterdam, Balkema, 169s.
- BARTON, N. 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39 (1): 185– 216
- BARTON, N. R., LIEN, R., LUNDE, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* 4: 189– 239
- BASARIR, H., OZSAN, A., KARAKUS, M. 2005. Analysis of support requirements for a shallow diversion tunnel at Guledar dam site, Turkey. *Eng. Geol.* 81: 131–145
- BASARIR, H. 2006. Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey. *Eng. Geol.* 86: 225–237
- BHASIN, R., GRIMSTAD, E. 1996. The use of stress–strength relationships in the assessment of tunnel stability. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 11 (1): 93–98
- BIENIAWSKI, Z. T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng.* 15: 335-344
- BIENIAWSKI, Z. T. 1978. Determining rock mass deformability: experience from case histories. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech Abstr.* 15: 237–247
- BIENIAWSKI, Z. T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York. pp 251
- CARRANZA-TORRES, C., FAIRHURST, C. 1999. The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36: 777-809
- CARRANZA-TORRES, C., FAIRHURST, C. 2000. Application of the convergence–confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 15 (2): 187– 213
- DEERE, D. U. : Geological consideration. In 1968. Stagg, K.G., Zienkiewicz, O. C. (Eds.), *Rock Mechanics in Engineering Practice*. Wiley, London

- DIEDERICHS, M. S., HOEK, E. 1989. DIPS 2.2. Advanced Version Computer Programme, Rock Engineering Group, Department of Civil Engineering, University of Toronto
- ERD (Earthquake Research Department) 1996. <http://www.deprem.gov.tr>,
- FENNER, R. 1938. Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdruckes. Gluckauf, 74: 681–695 and 705–715
- GOEL, R. K. 1994. Correlations for predicting support pressures and closures in tunnels. PhD Thesis, Nagpur University, Nagpur, India, 308s.
- GOEL, R. K., JETHWA, J. L., PAITHANKAR, A. G. 1995. Indian experiences with Q and RMR systems. Tunn. Undergr. Space Technol. 10 (1): 97– 109
- GRIMSTAD, E., BARTON, N. 1993. Updating the Q-system for NMT. Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete, Fagernes, Norway, Norwegian Concrete Association, Oslo, 20s.
- HOEK, E., KAISER, P. K., BAWDEN, W.F. 1995. Support of underground excavations in hard rock. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 213s.
- HOEK, E., BROWN, E. T. 1997. Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 27 (3): 227– 229
- HOEK, E., BROWN, E. T. 1998. Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 34 (8): 1165– 1186
- HOEK, E., MARINOS, P., BENISSI, M. 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: the case of the Athens schist formation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 57: 151-160
- HOEK, E., MARINOS, P. 2000. Predicting tunnel squeezing. Tunnels and Tunnelling International. Part 1 -November 2000, Part 2 December 2000
- HOEK, E., DIEDERICHS, M. S. 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 43 (2): 203– 215
- ICHIKAWA, K. 1999. Geological investigation of dams. Proc. of 2nd Asian Symposium on Engineering Geology and the Environment. Malaysian National Group, Bangi, Malaysia, 1-57
- ISRM (International Society for Rock Mechanics) 2007. The complete ISRM suggested methods rock characterization, testing and monitoring : 1974-2006, Editors: R. Ulusay, J. A. Hudson, ISBN: 978-975-93675-4-1, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, 613s.
- KALAMARIS, G. S., BIENIAWSKI, Z. T. 1995. A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time. Proceedings of the Eighth International Congress on Rock Mechanics, vol. 1. Balkema, Rotterdam, 295–302
- MITRI, H. S., EDRISSI, R., HENNING, J. 1994. Finite element modeling of cable-bolted slopes in hard rock underground mines. SME Annual Meeting 14–17 February, New Mexico. SME, Albuquerque, 94–116
- NICHOLSON, G. A., BIENIAWSKI, Z. T. 1990. A non-linear deformation modulus based on rock mass classification. Int. J. Mining and Geological Engineering 8: 181-202
- PALMSTROM, A. 1995. Rmi - a rock mass characterization system for rock engineering purposes. PhD Thesis, Oslo University, Norway. 400s.

- PALMSTROM, A. 1996. Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass Index (RMI). *Tunn. Undergr. Space Technol.* 11 (2): 175-188
- PALMSTROM, A. 2000. Recent developments in rock support estimates by the RMI. *J. Rock Mech. Tunn. Technol.* 6 (1): 1-19
- PLAXIS B. V. 2000. User manual for Plaxis 8. 2. Computerlaan 14, 2628 XK Delft, The Netherlands
- RAMAMURTHY, T. 1986. Stability of rock mass *Indian Geotechnical Journal*, 1-74
- READ, S. A. L., RICHARDS, L. R., PERRIN, N. D. 1999. Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. *Proceeding 9th International Society for Rock Mechanics Congress, Paris*, vol. 2: 655-660
- SERAFIM, J. L., PEREIRA, J. P. 1983. Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski. *Proceedings International Symposium Engineering Geology and Underground Construction*, vol. 1. Balkema, Rotterdam, 1133-1142
- SHEOREY, P. R. (1997). *Empirical Rock Failure Criteria*. Balkema, Rotterdam
- SINGH, B., VILADKAR, M. N., SAMADHIYA, N. K., MEHROTA, V. K. 1997. Rock mass strength parameters mobilized in tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 12 (1): 47-54
- SONMEZ, H., ULUSAY, R. 1999. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36 (6): 219-233
- SONMEZ, H., ULUSAY, R. 2002. A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri* 26: 77-99
- TRUEMAN, R. 1998. An evaluation of strata support techniques in dual life gateroads. PhD Thesis, University of Wales, Cardiff. In Read, S.A.L., Richards, L.R., and Perrin, N.D., 1999. Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. *Proceeding 9th International Society for Rock Mechanics Congress, Paris*, 2: 655-660
- UNAL, E. 1983. Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs. Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University (Reference Bieniawski, Z. T., 1984, *Rock Mechanics in Mining and Tunnelling*, Rotterdam: A. A. Balkema, 113s.
- ULUSAY, R., SONMEZ, H. 2002. Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri (in Turkish), TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, No: 60, Ankara
- VERMAN, M. K. 1993. Rock mass-tunnel support interaction analysis, PhD Thesis, University of Roorkee, Roorkee, India

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Serkan ERTÜRK
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Şanlıurfa
Telefon : 0 506 254 04 00
Faks :
e-mail : ser_erturk@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Özel Murat Lisesi	2001
Üniversite	: Çukurova Üniversitesi	2008

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2012-...	Harran Üniversitesi	İnşaat Mühendisi