



ESKİŞEHİR
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

DEMİRYOLU TÜNELLERİNDE GÜVENLİK
TÜNELLERİNİN DİZAYNI

Şakir UĞUZ
Yüksek Lisans

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Nazile URAL

BİLECİK, 2019
Ref. No:10250750



**ESKİŞEHİR
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ**



**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

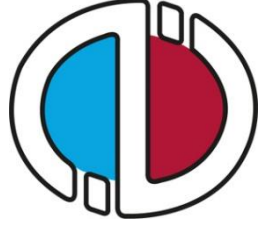
**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**DEMİRYOLU TÜNELLERİNDE GÜVENLİK
TÜNELLERİNİN DİZAYNI**

**Şakir UĞUZ
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Nazile URAL**

BİLECİK, 2019



**ESKİŞEHİR
ANADOLU UNIVERSITY**



**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences
Department of Civil Engineering**

**DESIGN OF SAFETY TUNNELS IN RAILWAY
TUNNELS**

**Şakir UĞUZ
Master's Thesis**

**Thesis Advisor
Assist Prof. Nazile URAL**

BİLECİK, 2019



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS
JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 17/04/2019 tarih ve 23/09...sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 03/05/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Sakir... UĞUZ'ın "Demir yapı tünellerinde güvenlik tünellerinin oluşturmaları" başlıklı tez çalışması İnşaat...Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/ oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN)
(TEZ DANIŞMANI): Doç. Dr. Nispete URAL Nispete Ural
ÜYE: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN Ahmet Tuncan
ÜYE: Doç. Dr. Erten BOL Erten Bol

..... ANABİLİM DALI BAŞKANI:

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
..... tarih ve sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda her türlü ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi, tecrübe ve yönlendirmeleriyle, çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren Hocam Doç. Dr. Sayın Nazile URAL'a sonsuz teőekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Bu çalışmada sahibi oldukları Phase2 V8.014 Sayısal Analiz Programını kullanmama izin veren Fugro Sial Proje Firmasına ve Firma Yetkilisi Sayın Dr. Ebubekir AYGAR'a, yardımları için teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma için gerekli bilgi, ve dokümanları kullanmama izin veren TCDD yetkililerine, Jeoloji Yüksek Mühendisi Evren POŞLUK'a ve iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yüksek Lisans Öğrenimim ve Tez çalıőmalarım boyunca manevi destekleriyle beni yüreklendiren Sevgili Eőim Sevgi UŐUZ'a Kızlarıım őebnem UŐUZ ve Öznur UŐUZ'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

BEYANNAME

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada, tez içindeki tüm verileri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun olarak sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu Üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmada kullanılmadığını beyan ederim.

03/05/2019

Şakir UĞUZ

DEMİRYOLU TÜNELLERİNDE GÜVENLİK TÜNELLERİNİN DİZAYNI

ÖZET

Bu çalışmada Yüksek Hızlı Demiryolu Tünellerinde olası risk, tehlike ve kazalara karşı Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC) tarafından önerilen güvenlik tedbirleri anlatılarak, Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Güzergahı tünellerinde yapılmakta olan Güvenlik (Kaçış) Tünelleri incelenmiştir.

Çalışma alanı olarak Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Hattı Km: 232+031-236+031 arasında bulunan 3255 metre uzunluğundaki T35 tüneline yapılmakta olan T35-GT2 güvenlik tüneli seçilmiştir. T35-GT2 tüneli 224 metre uzunluğunda ve %6 eğimlidir. Güvenlik Tünel kesiti TCDD tarafından acil durumlarda Ambulans ve İtfaiye geçişlerini de sağlamak amacıyla 5 metre yükseklik, 4,5 metre genişlik olacak şekilde belirlenmiştir. Tünel Jeolojik modelini oluşturmak amacıyla 2 adet sondaj kuyusu açılmış olup, bu sondajlardan alınan karotlar ve laboratuvar deneyleri ile kaya parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu parametrelere göre tünel 3 bölgeye ayrılmış ve her bir bölge için öngörülen destek sistemlerinin performansları Phase2 V8.014 bilgisayar programı ile irdelenmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda süreksizlik etkisinin olmadığı ya da az olduğu kaya koşullarının sayısal analizler ile öngörülebilir olduğu ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte süreksizliklerin sondaj ve yüzey gözlemleri ile belirlenemediği durumlarda tünelin sayısal analiz ile öngörülmesinde eksik verilerden dolayı sorunlar yaşandığı görülmüştür. Dolayısıyla tünel imalat çalışmaları sırasında öngörülen saha verilerinin sık sık kontrol edilmesinin ve gerekli olması durumunda destekleme sisteminin yeniden belirlenmesinin önemli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Hızlı Tren; Güvenlik (Kaçış) Tüneli; Sayısal Analiz, Destek Sistemi; Deformasyon

DESIGN OF SAFETY TUNNELS IN RAILWAY TUNNELS

ABSTRACT

In this study, the security escape tunnels being constructed in tunnels located on Ankara-Istanbul High Speed Train Route were examined being explained the security measures suggested by the International Railway Association against possible risks, hazards and accidents in High Speed Railway Tunnels.

The Security Tunnel T-35-GT2 was selected as the study subject, which is being constructed in 3255 meter long Tunnel T35 located on Ankara-Istanbul High Speed Train Line Km: 232+031-236+031. The Safety Tunnel T35-GT2 which is 224 meter long and %6 sloped, The Safety Tunnel section was determined as 5 meter high and 4,5 meter wide by TCDD in order to ensure the ambulance and fire brigade transition in any emergency situation. In order to set the tunnel geological model, two boreholes were drilled and with the cores and the laboratory tests taken from these boreholes, rock parameters were determined. According to these parameters, the tunnel is divided into 3 regions and the performances of the support systems for each zone are examined with the Phase2 V8.014 computer program.

At the conclusion of this study, it is appeared that the rock conditions with a slight or no effect of discontinuity can be estimated by using numerical analysis while in case that the discontinuities couldn't be estimated by drilling and surface observations, some problems caused by deficient data were encountered in the estimation done being used numerical analysis. Thus it is obviously seen that the importance of checking the field data frequently which was estimated during the tunnel construction and revising of the support system, in case of a necessity.

Key Words: High Speed Train; Security (Escape) Tunnel; Numerical Analysis; Support System; Deformation

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEŞEKKÜR.....	
BEYANNAME	
ÖZET.....	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER	III
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR	XII
1. GİRİŞ	1
2. TÜNEL VE TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ	2
2.1. Tünel.....	2
2. 2. Tünel Açma Yöntemleri.....	4
2.2.1. Mekanize kazı yöntemi	4
2.2.2. Delme-patlatma (klasik) kazı yöntemi	5
2.3 Tünellerde İyileştirme Yöntemleri	11
2.4. Tünellerde Jeoteknik Ölçümler	12
2.5. Tünellerde Kazı Yöntemi Tercihi.....	13
3. TÜNEL KAPLAMA TASARIMI.....	15
3.1 Ampirik Yöntemler	15
3.1.1. Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırması.....	17
3.1.2. Kaya Kütle Değeri (RMR)	18
3.1.3. Q sınıflandırma sistemi	21
3.1.4. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI).....	28
3.1.5. Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (ÖNORM-B Sistemi).....	29
3.2. Sayısal yöntemler	31
3.2.1. Matematiksel modelleme	32
3.2.2. Fiziksel modelleme	32
3.2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM) kullanılarak tünel tasarımı	33
4. DEMİRYOLU TÜNELLERİNDE GÜVENLİK.....	37

4.1. Yüksek Hızlı Demiryollarında Güvenlik	38
4.1.1. Demiryolu tünellerinde riskler.....	38
4.1.2. Risk olay tipleri.....	39
4.1.3. Demiryolu tünellerinde risk çözümleri.....	40
4.2. Demiryolu Tünellerinde Yapısal Tedbirler	41
4.2.1. Demiryolu tünellerinde alt yapı tedbirleri	42
4.2.2. Tesisat tedbirleri	44
5. TÜNEL İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	46
5.1. Demiryolu Tünellerinde Güvenlik Çalışmaları	46
5.2. Tünellerde Modelleme Çalışmaları	48
6. ÇALIŞMA ALANININ GENEL ÖZELLİKLERİ	55
6.1. Coğrafik Konum.....	55
6.2. Yerleşim ve Ulaşım	55
6.3. İklim ve Bitki Örtüsü.....	55
6.4. 35 Nolu Tünel Jeolojik Özellikleri.....	56
6.5. 35 Nolu Tünel Güvenlik Tünelleri	56
6.5.1. Güvenlik Tünelleri ve Güzergah özellikleri	56
6.5.2. Güvenlik Tünel Kesiti.....	57
6.4. Depremsellik.....	57
6.5. Önceki Çalışmalar	58
7. TÜNELİN MODELLEMESİ VE ANALİZ SONUÇLARI.....	60
7.1. T35 GT2 Güzergahını Jeolojik modelinin oluşturulması.....	60
7.1.1. Geoteknik veriler	63
7.2. Birinci Bölge Analizleri	66
7.2.1 Tünel çevresinde oluşan gerilmeler.....	68
7.2.2. Tünelde oluşan yer değiştirmeler.....	69
7.2.3. Tünel destekleme elemanlarının tahkiki.....	71
7.3. İkinci Bölge Analizleri	76
7.3.1. Tünel çevresinde oluşan gerilmeler.....	78
7.3.2. Tünelde oluşan yer değiştirmeler.....	79

7.3.3. Tünel destekleme elemanlarının tahkiki	81
7.4. Üçüncü Bölge Analizleri	85
7.4.1. Tünel çevresinde oluşan gerilmeler.....	88
7.4.2. Tünelde oluşan yer değiştirmeler	89
7.4.3. Tünel destekleme elemanlarının tahkiki	92
7.5. Analiz ve Arazi Ölçümleri Değerlendirmesi	96
8. SONUÇLAR	101
KAYNAKLAR	102
ÖZ GEÇMİŞ.....

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. Yeni Avusturya Tünel İnşa metodunun gelişim aşamaları (Whittaker ve Frith 1990).....	3
Çizelge 3.1. Kaya sınıflama sistemleri (Palmström, 2000)	16
Çizelge 3.2. Terzaghi kaya yükü sınıflaması (Karpuz ve Hindistan, 2006).....	18
Çizelge 3.3. RMR sınıflama sistemi (Bieniawski 1989)	19
Çizelge 3.4. Süreksizlik yüzeyi koşulunun puanlandırılması için önerilen kılavuz (Bieniawski 1989)	20
Çizelge 3.5. Değişik koşullara göre RQD değerleri (Deere, 1964)	21
Çizelge 3.6. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem takımı tayin değerleri (Barton vd., 1974).....	22
Çizelge 3.7. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem pürüzlülük sayısı değerleri (Barton vd., 1974).....	23
Çizelge 3.8. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem alterasyon (Ja) sayısı değerleri (Barton vd., 1974).	24
Çizelge 3.9. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem suyu azaltma faktörü (Jw) değerleri (Barton vd., 1974).	25
Çizelge 3.10. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan gerilme azaltma faktörü değerleri (Barton vd., 1974).....	26
Çizelge 3.11. Farklı yeraltı kazıları için orijinal (Barton vd., 1974) ve güncelleştirilmiş (Barton ve Grimstad, 1994) ESR değerleri.	27
Çizelge 3.12. Kaya Sınıflandırma Sistemi.....	31
Çizelge 4.1. Rapor edilen tünel kazaları (Krausmann, 2005).....	37
Çizelge 6.1. Deprem bölgelerine göre etkin yer ivmesi katsayıları (https://deprem.afad.gov.tr/) (Erişim 23.02.2019).....	58
Çizelge 7.1. Tünel bölümleri için RMR sınıflaması (Dosay, 2016).....	64
Çizelge 7.2. Tünel bölümleri için Q sınıflaması (Dosay, 2016).....	65
Çizelge 7.3. Tünel bölümleri için öngörülen parametreler (Dosay, 2016).....	65
Çizelge 7.4. Tünel bölümleri için öngörülen destekleme elemanları	66
Çizelge 7.5. Tünel destekleme elemanları için girdi parametreleri (KTSŞ, 2013).....	66
Çizelge 7.6. Birinci bölge için tünel kazı aşamaları	68

Çizelge 7.7.	İkinci bölge için tünel kazı aşamaları.....	78
Çizelge 7.8.	İkinci bölge için tünel kazı aşamaları.....	87
Çizelge 7.9.	Sayısal analiz ve tünel içi ölçüm sonuçları (Ölçüm değerleri mm'dir)...	97
Çizelge 7.10.	Yönlü süreksizlik eklendiği durumda sayısal analiz ve tünel içi ölçüm sonuçları	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1.	Eski Avusturya tünel açma yöntemi kazı adımları (Köse vd., 2007). 2
Şekil 2.2.	Tünel açma yöntemi sınıflaması (Polat, 2010). 4
Şekil 2.3.	Tünel açma makinesi temel unsurları (Maidl, 2008) (1-Delme ekipmanları, 2-İtki sistemi, 3-Pasa nakil araçları sistemi, 4- Destek sistemi). 5
Şekil 2.4.	Klasik kazı yöntemleri (a-hidrolik kırıcı, b-delme-patlatma) 6
Şekil 2.5.	Deformasyon (u) -İksa Basıncı (P) değişimi (u_r radyal yer değişmeyi P ise çevre basıncını göstermektedir) (Arıoğlu, 2018). 7
Şekil 2.6.	NATM kazı aşamaları (Aksoy vd., 2016) 7
Şekil 2.7.	NATM’de parçalı kazı şekilleri (Selman, 2014). 8
Şekil 2.8.	Tam dairesel olmayan bir tünelde destekleme elemlerinin gösterimi (Aksoy, 2016). 8
Şekil 2.9.	NATM ile kazılan tünelde püskürtme beton uygulaması (Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 19 numaralı tünel, Bilecik). 9
Şekil 2.10.	NATM ile kazılan tünelde kaya bulonu uygulaması (Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 8 numaralı tünel, Adapazarı). 10
Şekil 2.11.	NATM destekleme elemanlarından hasır çelik ve çelik iksa uygulaması (Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 19 numaralı tünel, Bilecik). 10
Şekil 2.12.	NATM ile kazılan tünelde süren uygulaması (Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 2 numaralı tünel, Adapazarı) 11
Şekil 2.13.	Tünelde zemin dondurma yönteminin uygulanması (Arıoğlu, 2018). 12
Şekil 2.14.	Tünel içi şerit ekstansiyometre ölçüm noktaları ve optorigonometrik ölçüm noktaları (Aksoy vd., 2014). 13
Şekil 2.15.	Tünel uzunluğuna göre mekanize kazı ve klasik kazı yöntemi karşılaştırılması (Bilgin, 1989). 14
Şekil 3.1.	Terzaghi kaya yükü kavramı (galeri genişliği (B), kemerleşme alanının genişliği (Bi), örtü kalınlığı (H), tünelin yüksekliği (Ht), kemerleşme yüksekli (Hp) ile ifade edilmiştir (Hoek, 2001)). 17

Şekil 3.2.	Q ve eşdeğer boyut arasındaki ilişki (Barton vd., 1974).....	28
Şekil 3.3.	GSI sınıflama sistemi (Hoek, 1999).	29
Şekil 3.4.	ÖNORM-B sınıflama sistemi Çizelgesi.	30
Şekil 3. 5.	Mohr ve Coulomb yenilme kriteri (Polat, 2010)	33
Şekil 3.6.	İki boyutlu sonlu elemanlar (Tufan ve Tosun, 1994).	35
Şekil 3.7.	Üç boyutlu tipik sonlu elemanlar (Tufan ve Tosun, 1994).	36
Şekil 4.1.	Demiryolu tünellerinde risk ve tedbir akış şeması (TSI, 2008/163/EC). 39	
Şekil 4.2.	Summit Tüneli Yangını Manchester, İngiltere (www.ibt.gov.tr/sites/akom) (Erişim 19.01.2019).....	40
Şekil 4.3.	Yürüme yolu ve serbest bölge (Yüksel, 2004).	42
Şekil 4.4.	Yürüme yolu genişliği (Poşluk vd., 2012).....	43
Şekil 4.5.	Tahliye ve acil durum müdahale tüneli kesiti (Poşluk vd., 2012).	43
Şekil 4.6.	Havalandırma bacaları gösterimi (Poşluk vd., 2012).	44
Şekil 4.7.	Acil durum ışıklandırması ve acil durum çıkışı (Poşluk vd., 2012).	45
Şekil 6.1.	T35-GT2 tüneli giriş portalı (Bozüyük)	55
Şekil 6.2.	T35 ve emniyet tünelleri uydu görüntüsü.....	56
Şekil 6.3.	Demiryolları tarafından uygulanan güvenlik tüneli tip kesiti.....	57
Şekil 6.4.	Bilecik ili depremsellik haritası (https://deprem.afad.gov.tr/).....	58
Şekil 7.1.	T35’de geçilen Porsuk Formasyonu kilaşı, silttaşı birimi (Bozüyük).	61
Şekil 7.2.	Bozüyük Granitoyidi genel görünümü (T35 giriş portalı doğu kesimi). 62	
Şekil 7.3.	35 nolu tünelde geçilen Bozüyük Granatoidi	62
Şekil 7.4.	T35-GT2 Jeolojik boy profili.	63
Şekil 7.5.	T35-GT2 ye ait bölgelendirme.	63
Şekil 7.6.	Birinci bölge jeolojik modelinin Phase 2D programında oluşturulması. 67	
Şekil 7.7.	Birinci bölge için modelde oluşturulan sonlu elemanlar ağı.	67
Şekil 7.8.	Birinci bölge için kazı sonrası oluşan Sigma 1 gerilmesi.....	68
Şekil 7.9.	Birinci bölge için kazı sonrası oluşan Sigma 3 gerilmesi.....	69
Şekil 7.10.	Birinci bölge için yatay yerdeğiştirmeleri.	69
Şekil 7.11.	Birinci bölge için düşey yer değişmeler.	70
Şekil 7.12.	Birinci bölge için toplam yer değişmeler.	70
Şekil 7.13.	Birinci bölge için 2. derece deprem bölgesi depremli durumda toplam yer değiştirmeleri.	71

Şekil 7.14.	Tahkimata etkiyen kuvvetlerin yönleri (Polat, 2010).....	72
Şekil 7.15.	Birinci bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen aksenal kuvvetler.....	72
Şekil 7.16.	Püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen aksenal kuvvet.....	73
Şekil 7.17.	Birinci bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen eğilme momenti.....	73
Şekil 7.18.	Birinci bölge için bulonlara gelen yükler.....	75
Şekil 7.19.	İkinci bölge jeolojik modelinin Phase 2D programında oluşturulması..	76
Şekil 7.20.	İkinci bölge için modelde oluşturulan sonlu elemanlar ağı.....	77
Şekil 7.21.	İkinci bölge kesitinde kazı sonrası oluşan Sigma 1 gerilmesi.....	78
Şekil 7.22.	İkinci bölge kesitinde kazı sonrası oluşan Sigma 3 gerilmesi.....	79
Şekil 7.23.	İkinci bölge için yatay yerdeğiştirmeler.....	80
Şekil 7.24.	İkinci bölge için düşey yer değişmeler.....	80
Şekil 7.25.	İkinci bölge için toplam yer değişmeler.....	81
Şekil 7.26.	İkinci bölge için 2. derece deprem bölgesinde depremlı durumda toplam yer değiştirmeler.....	81
Şekil 7.27.	İkinci bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen aksenal kuvvetler.....	82
Şekil 7.28.	İkinci bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen kesme kuvveti.....	83
Şekil 7.29.	İkinci bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen eğilme momenti.....	83
Şekil 7.30.	İkinci bölge için bulonlara gelen yükler.....	85
Şekil 7.31.	Üçüncü bölge jeolojik modelinin Phase 2D programında oluşturulması	86
Şekil 7.32.	Üçüncü bölge modelinde oluşturulan sonlu elemanlar ağı.....	87
Şekil 7.33.	Üçüncü bölge kesitinde kazı sonrası oluşan Sigma 1 gerilmesi.....	88
Şekil 7.34.	Üçüncü bölge kesitinde kazı sonrası oluşan Sigma 3 gerilmesi.....	89
Şekil 7.35.	Üçüncü bölge için yatay yerdeğiştirmeler.....	90
Şekil 7.36.	Üçüncü bölge için düşey yer değişmeler.....	90
Şekil 7.37.	Üçüncü bölge için toplam yer değişmeler.....	91
Şekil 7.38.	Üçüncü bölge için 2. derece deprem bölgesinde depremlı durumda toplam yer değiştirme.....	91

Şekil 7.39.	Üçüncü bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen aksenal kuvvetler.....	92
Şekil 7.40.	Üçüncü bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen kesme kuvveti.....	93
Şekil 7.41.	Üçüncü bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen eğilme momenti.....	93
Şekil 7.42.	Üçüncü bölge için bulonlara gelen yükler.....	95
Şekil 7. 43.	Tünel içi deformasyon ölçüm noktaları.....	96
Şekil 7. 44.	Bölgeye ait tünel aynası ve jeolojik ayna formu.	98
Şekil 7. 45.	Üçüncü bölge sayısal analizine 2 yönlü çatlak sistemi eklenmiş durum.	99
Şekil 7. 46.	Üçüncü bölge sayısal analiz ile değerlendirilen deformasyon verileri....	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

μ, ν	Poisson oranı
c	Kohezyon
D	Örselenme faktörü
D_e	Eşdeğer boyut
E	Elastisite modülü
E_m	Deformasyon modülü
J_v	Hacimsel eklem sayısı
m_b	Kaya kütlelerine ait malzeme sabiti (boyutsuz)
m_i	Kaya malzemesine ait malzeme sabiti (boyutsuz)
α	İçsel sürtünme açısı
SCR	Süreksizlik yüzey koşulu (puanı)
SR	Yapısal özellik (puanı)
UCS	Kayaç malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı
γ	Birim hacim ağırlık
σ	Basınç direnci
σ_1	En büyük asal gerilme
σ_3	En küçük asal gerilme
σ_c	Tek eksenli basınç direnci
σ_{ci}	Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı

Kısaltmalar

GSI	Jeolojik dayanım indeksi
ISRM	Uluslararası kaya mekaniği derneği
J_a	Eklem ayrışma sayısı
J_n	Eklem takımı sayısı
J_r	Eklem pürüzlülük sayısı
J_v	m_3 'teki toplam eklem sayısı
J_w	Eklem suyu indirgeme sayısı
Km	Kilometre
kNm	KiloNewtonmetre

kW	Kilowatt	
mm	milimetre	
MPa	Megapaskal	
n	porozite	
PR	Anlık ilerleme	
Q	Kaya kütle kalitesiRMR	Kaya kütlesi sınıflaması
RQD	Kaya kalite indisi	
SRF	Gerilme indirgeme faktörüdür	
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları	
UCS	Tek eksenli sıkışma dayanımı	

1. GİRİŞ

Ülkemizde demiryolları, uzun süren sessizliğin ardından, yeniden yapılanma ve modernizasyon çalışmalarına başlamıştır. Bu çalışmaların omurgasını ise hız kavramı oluşturmaktadır. Kabaca 160 km/saat hıza kadar olan hatlar Konvansiyonel, 160-250 km/saat hıza kadar olan hatlar Hızlı, 250-350 km/saat hıza kadar olan hatlar Yüksek Hızlı, 350 km/saatten hızlı hatlar ise Çok Yüksek Hızlı hatlar olarak adlandırılmaktadır (tcdd.gov.tr).

Demiryolu güzergâh özelliklerini seçilen hız, eğim ve kurpları etkilemekte bu da maliyeti arttırmakta veya azaltmaktadır. Ülkemizin topoğrafik koşulları nedeni ile sıklıkla tünel çözümlerine başvurulmaktadır. Tünel güzergâhı belirlendikten sonra ise gerekli etüd çalışmaları yapılmakta ve imalat çalışmalarına başlanmaktadır. Ana hat tünelleri de maliyet ve kazı kolaylığı açısından çoğunlukla çift hatlı tek tüp olarak projelendirilmektedir.

Bu çalışmada, Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC) tarafından önerilen demiryolu tünellerinde alt yapı güvenlik tedbirleri anlatılmaya çalışılmıştır. Ardından ise çift hatlı tek tüp tünel kesitinin uygulandığı Ankara İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesinde yer alan 35 numaralı tünelde kullanılması planlanan GT-2 numaralı güvenlik tüneli incelenmiştir. Projelendirme aşamaları ve yer altı açıklığında uygulanacak olan desteklemelerin belirlenmesinde izlenecek yöntemler irdelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, Tünel güzergahında geoteknik yöntemler ile belirlenmiş kaya yapısının özellikleri kullanılarak sayısal yöntemle analiz yapan bilgisayar programı sonuçları ile tünel imatları sırasında gerçekleşen destek sistemi performansının kıyaslanması ele alınmıştır. Böylelikle güvenlik tüneller için uygulanabilecek optimum destek sistemleri belirlenmeye çalışılmıştır.

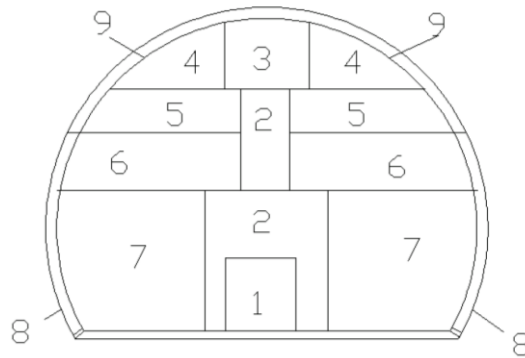
2. TÜNEL VE TÜNEL AÇMA YÖNTEMLERİ

2.1. Tünel

İnsan nüfusunun hızla artması, beraberinde farklı ihtiyaçların doğmasına sebep olmuştur. Bu ihtiyaçların karşılanması amacı ile farklı çözümler üretilmeye çalışılmıştır. Özellikle içme suyu, atık su, sulama suyu, enerji üretimi, ulaşım, saklanma, barınma gibi alanlarda tünel çözümlerine başvurulmuştur.

Tünel yapısını, 30° den küçük eksen eğimi açısına sahip, iki ucu açık ve boyuna göre çapı çok daha küçük olan yeraltı kaya yapıları olarak tanımlayabiliriz (Köse vd., 2007). Önceleri sağlam kayada yavaş ve birkaç insanın yan yana zor geçeceği genişliklerde açılacak da sanayi devriminin ardından gelişen farklı ihtiyaçlar ve teknolojik ilerleme ile farklı boy ve çaplarda tüneller imal edilmiştir.

19. yüzyılla birlikte tünel çalışmaları hız kazanmış ve her ülke kendi fiziki imkanları (jeolojik koşullar ve hammadde kaynakları) doğrultusunda farklı yöntemler geliştirmiştir. Bu yöntemler geliştirildikleri ülkelerin adı ile anılmışlardır. Bu yöntemler; 1800'li yıllarda Alman, Belçika, İngiliz, Eski Avusturya), Amerika ve İtalyan (Şekil 2.1) tünel açma yöntemlerinde geçici destek olarak ahşap, kalıcı destek olarak ise tuğla kullanmışlardır (Vardar, 1985).



Şekil 2.1. Eski Avusturya tünel açma yöntemi kazı adımları (Köse vd., 2007).

Söz konusu eski tünel açma yöntemlerinin her birinin kendi içerisinde avantaj ve dezavantajlar barındırmaktadır. Bu durum yöntemlerin kullanılabilirliğini etkilemekte yöntemlerin performanslarını düşürmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte ahşap tahkimatlar (destekler) yerine çelik iksalar, tuğla yerine ise beton kullanılmaya başlanmıştır.

bu da maliyetleri düşürmüştür. Özellikle hızla priz alan betonun bulunmasından sonra tünel ve tünelcilik çalışmalarında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu süreçte geliştirilen Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) farklı çap ve boylarda farklı koşullarda ekonomik tünel açılmasına imkân sağlaması açısından son derece önemlidir.

Tünelin, açıldığı kaya koşulunun kendi kendini taşıması ihtiyacından çıkan "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)" oldukça fazla kullanılan bir tünel açma yöntemidir. Çevre ortamına göre en ideal kazı ve destek yöntemleri kullanılarak, kazı sırasında ve sonrasında oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonlar yapılan tahkimatlar ile birlikte kayaya taşıtılması istenmektedir. Dolayısıyla boşluğu çevreleyen kayanın yük oluşturan değil yük taşıyan bir malzeme olması sağlanmaktadır (Köse vd., 2007). Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin tarihsel gelişimi Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Yeni Avusturya Tünel metodunun gelişim aşamaları (Whittaker ve Frith 1990).

Yıl	Açıklama
1848-1920	Erken Priz alan harçların geliştirilmesi, Püskürtme Beton pompalarının patentinin alınması, İnşaat ve maden uygulamalarında kullanımına başlanması
1948	Kontrollü kaya deformasyonu kavramının geliştirilmesi Şematik kaya Bulonu içeren kaplama sistemi Rabcewicz tarafından açıklandı
1954	Püskürtme betonunun kaplama elemanı olarak ilk olarak Avusturya'daki HES projesinde Brunner tarafından kullanıldı.
1958	Brunner sıkışan zeminlerdeki tünel inşası için püskürtme beton yöntemi olarak sistemin patentini aldı
1960	Müller tünellerde fazla kaya yüklerinin önlenmesi için yük ve deformasyon ölçümlerinin tasarımın bir parçası olması gerektiğinin farkına vardı. Sistemik ölçümün tasarımın parçası olduğu bir yöntem geliştirdi
1962	Rabcewicz ilk olarak "Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi" terimini Salzburg'da bir toplantıda kullandı.
1964	Rabcewicz'in Water Power dergisinde yayımlanan makalelerinden sonra dünya "Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi" kabul etti. Tasarımında Mueller ve Rabcewicz in yol göstermesiyle yöntemin uygulaması Schvvalkheim Tünelinde yapıldı
1964-...	Yöntem tünelcilikte yaygınlaşarak dünya genelinde birçok tünel inşaatında kullanılmaktadır

2. 2. Tünel Açma Yöntemleri

Tünel açma yöntemlerini tünelin kazılış şekli ve kazılan yüzeyin desteklenmesi belirlemektedir. Tünel ihtiyacının artması, hız, zaman ve maliyet konularında gelişen teknoloji ile birlikte hareket etme zorunluluğu doğurmuştur. Tünel açma yöntemleri Şekil 2.2’de özetlenmiştir.



Şekil 2.2. Tünel açma yöntemi sınıflaması (Polat, 2010).

2.2.1. Mekanize kazı yöntemi

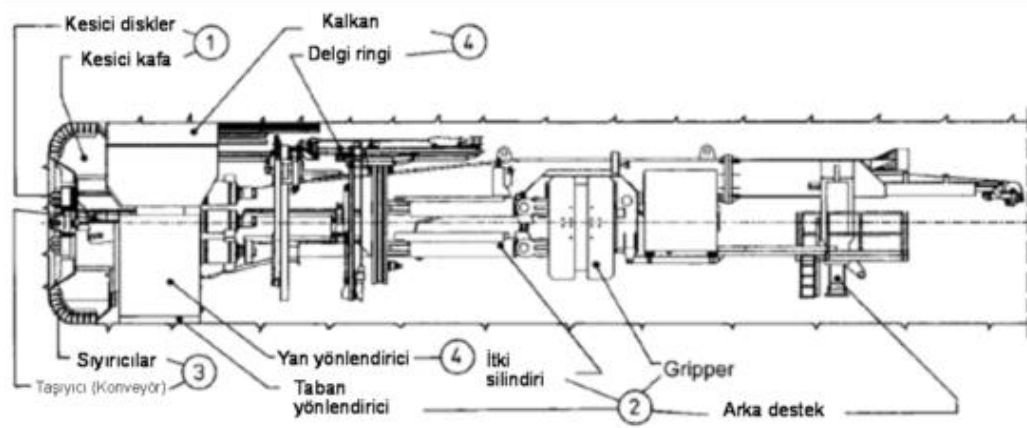
Mekanize kazı, daha hızlı kazı ve imalat yapmak amacı ile makineleşme süreci ardından gelişen bir yöntemdir.

Tünel Makineleri

Tünel açma makineleri, Charles Wilson (1853) tünel açma makinesinden sonra 1950’li yılların başına kadar çok fazla gelişme gösterememiştir. Kalem uçlu kesimler yerine döner diskli kesimlerin James Robbins tarafından kullanılması ile Kanada’daki bir uygulamada 1 günde 38 m’lik tünel açılmıştır. Böylelikle Tünel Açma Makinesi (TBM)’lerin yumuşak ve orta sert kayalarda kullanılabilmesi ve aynı zamanda ekonomik olacağı görülmüştür (Maidl, 2008). Tünel açma makineleri kısmi ve tam kesitli olarak ikiye ayrılır. Kısmi kesitli tünel açma makineleri, tünel kazı kesitinin bir kısmında kazı

yapmayan makinelerdir. Kollu ve kalkanlı makineler en çok bilinenleridir. Tam kesitli tünel açma makinesi (TBM) tünel kazı yüzeyinin tamamında kazı yapabilen makinelerdir. Günümüzde TBM'ler 10 cm -19 m çaplarında olup, sert kayalardan 12 ATM basınca kadar her türlü zemin koşulunda kazı yapabilecek kadar farklılıkta üretilmektedir (Köse vd. 2007).

Tünel açma makinesini, kesici kafa, itme silindiri, yönlendirme silindiri, kesici kafa döndürücü motorlar, beton tahkimat elemanları olarak sıralayabiliriz (Şekil 2.3). Temel bileşenlere ek olarak destek donanımlarını, hidrolik güç ünitelerini, elektrik trafolarını, tavan bulonları için deliciyi, havalandırma fanları, pasa nakliyatı için bant konveyör/vagonları olarak sıralayabiliriz (Şekil 2.3) (Caner, 2010).



Şekil 2.3. Tünel açma makinesi (Maidl, 2008).

2.2.2. Delme-patlatma (klasik) kazı yöntemi

Delme patlatma yöntemi klasik kazı yöntemi olarak da bilinmektedir. En eski tünel kazı yöntemidir. Bu kazı yönteminde kazılmak istenilen ortamın sertlik durumuna göre insan gücü, hidrolik kırıcılar, delme-patlatma vb. yöntemler kullanılarak ortamın parçalanarak kazılması amaçlanmaktadır (Şekil 2.4).



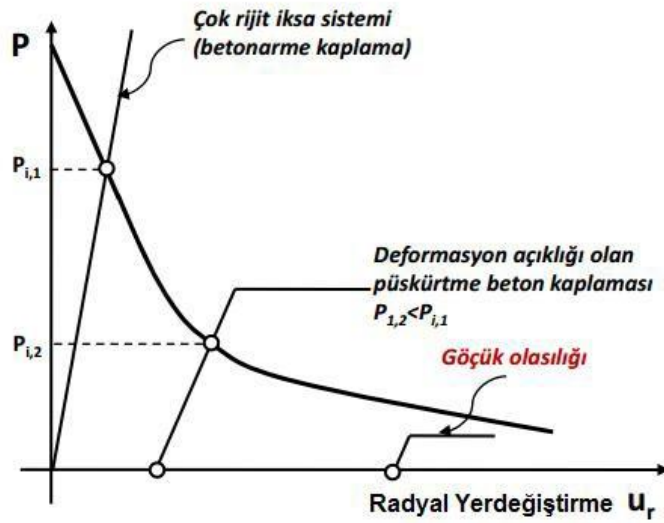
Şekil 2.4. Klasik kazı yöntemleri (a-hidrolik kırıcı, b-delme-patlatma) (Poşluk, 2012).

NATM ile tünel açma

NATM, kazılan yüzeyin kendi kendisini taşıması ilkesine dayanmaktadır. Yöntemin amacı, kazıya hızlı bir destekleyici ile tünel deformasyonlarını kabul edilebilir limit değerinde tutmak ve kalıcı kaplamaya kadar tünel dengesini sağlamaktır. Bu yöntemin temel ilkesi, açılan boşluğu çevreleyen ortamın maruz kaldığı kuvvetlerin kontrol altında tutularak birime en uygun desteğin uygulanmasıdır (Selman, 2014).

Tünel kesitini çevreleyen ortamın sağlamlığının mümkün olduğunca korunarak, tünel etrafındaki ortamın kendini tutarak sağlam durması sağlanmaktadır (Köse vd., 2007). NATM yönteminde kazı aynasından sonra, belirlenen kaya sınıfı için hazırlanan destek sistemi uygulanır. Zemin boşlukları, fay zonları, aşırı kazı vb. durumlarda ilave önlemler alınması gerekmektedir (Selman, 2014).

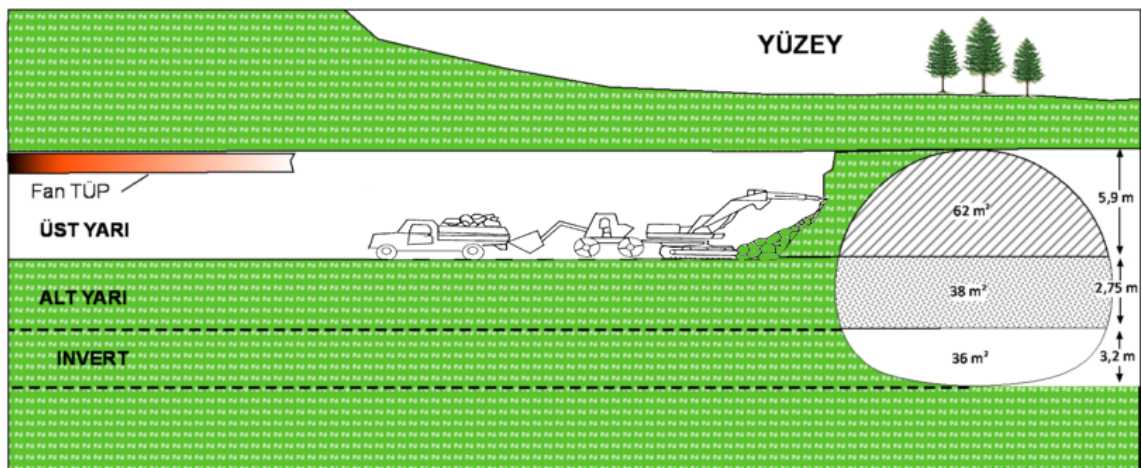
Kazı faaliyeti sonrasında destek sistemine bağlı olarak çevre basıncı (P) ve deformasyonlar değişiklik gösterebilmektedir. Kazı faaliyetler sonrası, çok rijit bir destek sisteminin seçilmesi halinde, çevre basıncı yüksek olur ve bu durum pahalı bir çözümü getirir. Tünelde radyal yer değiştirmenin artmasına izin verecek destek sistemi tercih edildiğinde basınç değeri oldukça düşebilir. Böylelikle üretilen çözüm ekonomik olur. Destek sistemi kazı bölgesine geç yerleştirilirse veya taşıma kapasitesi yetersiz olursa, denge noktası oluşmadığından deformasyonlar ve sonrasında göçükler meydana gelir (Şekil 2.5) (Arnoğlu, 2018).



Şekil 2.5. Deformasyon-İksa Basıncı değişimi (u_r radyal yer değişmeyi P ise çevre basıncını göstermektedir) (Arioğlu, 2018).

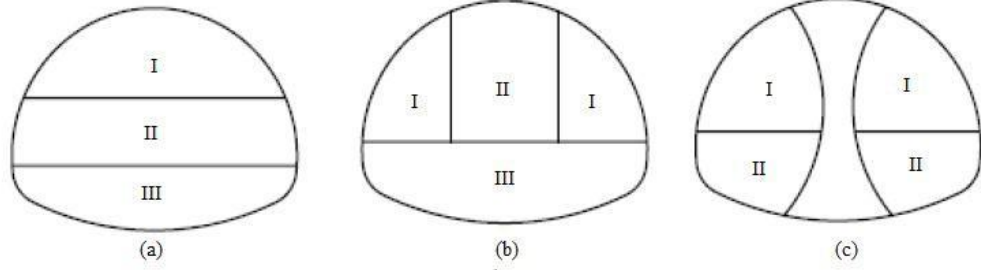
NATM imalat aşamaları

NATM ile imal edilecek bir tünelin kazı şekli, tüneli çevreleyen ortama göre belirlenir. Çevre ortamın durumuna göre seçilen destek sistemi, tünel geometrisi ve tünel güzergahındaki yer üstü yapılarına göre farklılık göstermektedir. Seçilen tünel kesitine göre, tünelde tek seferde kazı yapılabileceği gibi, çok parçalı kazı yapılması da mümkündür (Şekil 2.6). Tünel boyutuna göre tünel üst yarı, alt yarı ve taban kemer olmak üzere birkaç aşamada açılabilir (Şekil 2.7).



Şekil 2.6. NATM kazı aşamaları (Aksoy vd., 2016)

Kazı yapılırken kazı aşamalarında projelerde belirtilen mesafelerde kazı adımlarının izlenmesi gerekir. Bu durum aşırı deformasyonları önleyeceği gibi çalışma kolaylığı da sağlayacaktır.

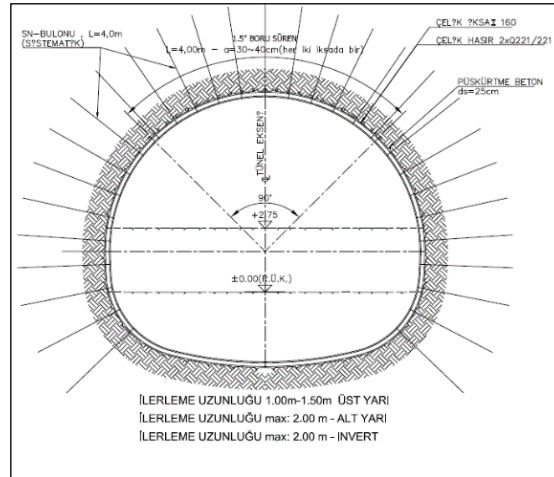


Şekil 2.7. NATM'de parçalı kazı şekilleri (Selman, 2014).

Tünelde kazılacak ortamın durumuna göre (sağlamdan zayıfa) kazı adımları bölümlendirilebilir. Bu durum aynı zamanda tünelde oluşabilecek deformasyonları da sınırlandırma imkanı sağlayacaktır.

NATM iksa elemanları

Tünel kazısında ardından birincil destek sistemi bileşenlerinden ilk olarak olarak püskürtme beton kullanılır. Destek sistemi, püskürtme beton, çelik hasır, çelik iksa ve bulon'dan oluşmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Tam dairesel olmayan bir tünelde destekleme elemanlarının gösterimi (Aksoy, 2016).

NATM ile tünel imalatı sırasında ana taşıyıcı sistem püskürtme beton ile oluşturulan kabuktur. Püskürtme beton, agrega, imento, priz hızlandırıcı karışımlardan oluşan kuru/ıslak olarak elde edilebilen ve istenilen yüzeye püskürtülerek yapıştırılabilen bir hartır (Selman, 2014). Püskürtme beton, tünel kesiti çevresindeki kaya ya da zemin biriminin gevşememesini, kayadaki süreksizlik açıklıklarını doldurarak dökülmeleri önler. Püskürtme beton kabuk aynı zamanda bulon imalat noktaları arasındaki yüzeyin dengelenmesini de sağlar (Selman, 2014) (şekil 2.9).



şekil 2.9. Tünel içinde püskürtme beton uygulaması (Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 19 numaralı tünel, Bilecik).

Destek elemanlarından bir diğeri de bulonlardır. Bulonlar, ekme gerilmelerini karşılamak, ana kayaya iletmek, sürtünme direncini arttırmak ve kayada  eksenli gerilme durumu oluşturmak için bağlanan çubuklardır (Selman, 2014). Çeşitli tipte kaya bulonları vardır (SN, PG, IBO, IBI, Swellex, Kablo vb.) bunların seçimi ihtiyaca göre belirlenir. Tünelde kaya bulonu uygulaması şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Kaya bulonu uygulaması (Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 8 numaralı tünel, Adapazarı).

Destek sisteminin yardımcı elemanlarından bir diğeri de çelik iksalardır (Şekil 2.13). Çelik iksalar, kazı yapılan tünele püskürtme beton ile oluşturulacak kabuk piriz alıncaya kadarki sürede inşanın güvenliğinin sağlanması ve püskürtme betonda yük dağılımına yardımcı olurlar (Selman, 2014). Çelik iksanın tip ve sıklığı zemin durumuna göre belirlenmektedir (Selman, 2014).

Destek sisteminin bir diğeri çelik hasırdır. Çelik hasır, püskürtme betonda püskürtme betonun dayanımını arttırmak amacı ile kullanılmaktadır.



Şekil 2.11. NATM destekleme elemanlarından hasır çelik ve çelik iksa uygulaması (Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi, Bilecik).

Süren (sürgü) ise tünel profilini oluşturan ortamın zayıf ve çok zayıf olması durumunda, öncelikli amacı kazıyı kolaylaştırmak olan destekleme elemanlarına yardımcı bir elemandır (Şekil 2.12). Bu uygulamadaki amaç bir sonraki kazı aynasında tavanda stabilitenin artırılarak dökülme ve sökülmelerin azalmasını sağlamaktır. Boru ya da yassı şekilleri mevcuttur. Tünelde kullanılacak olan sürenin kullanım sıklığı, adetleri, boyları ve tipleri kazı yapılan ortamın durumuna göre değişir (Selman, 2014).



Şekil 2.12. Süren uygulaması (Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 2 numaralı tünel, Adapazarı)

2.3 Tünelde İyileştirme Yöntemleri

Tünel imalatları birbirinden oldukça farklı kaya-zemin ortamlarında yapılabilmektedir. Bu durum farklı zemin ve kaya koşullarda, farklı hızlarda ve önlemler ile ilerleme sonucunu doğurmaktadır. Çok zayıf koşullarda ya da tünel üzeri örtü kalınlığının yeterli olmadığı koşullarda, göçük ve deformasyon problemleri olabilmektedir. Böyle durumlarda kazı öncesi stabilite sağlanması için zemin iyileştirme yöntemlerinden, ön imatlardan (süren, beton şemsiye vb.) ve kazı adımlarını parçlara ayırma yöntemleri kullanılabilir.

Zayıf bir zeminde kazı yapılıyorsa, kazı yapılan birimin gözeneklilik durumuna göre, kazı öncesinde zemine yapılan enjeksiyon veya başka bir metodla (Jet Grout, deep mix, vb.) ile zemin sağlamlaştırılabilir. Eğer akışkan bir birimde kazı yapılacaksa

zemin dondurma veya kimyasal enjeksiyon gibi yöntemlerden yararlanılabilir (Şekil 2.13).

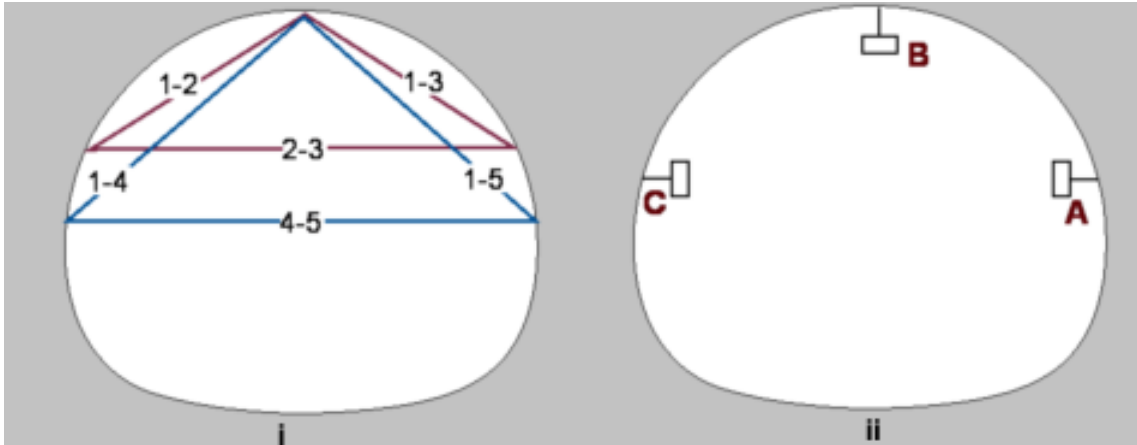


Şekil 2.13. Tünelde zemin dondurma yönteminin uygulanması (Arioğlu, 2018).

2.4. Tünellerde Jeoteknik Ölçümler

Kazı yapılan ortam ile destekleme ilişkisini anlamak amacıyla tünel içerisinde ve tünel yakın çevresinde yüzeyde ölçümler yapılmaktadır. Tünel içi deformasyon okumalarında, varsa yüzeyde bina okumaları ve/veya üstyapılarda ölçülen yüzey deformasyon ölçümleri, tünel içerisinde yük ve basınç ölçerler yerleştirilerek ölçümler yapılmaktadır. Tünel içerisinde kabaca, deformasyon ölçümleri (Şerit ekstansometre ve Opto-trigonometrik) ve inklinometre ölçümleri, basınç hücreleri, tünel aynası jeolojik haritalaması ve jeomekanik özelliklerin ölçümleri yapılmaktadır. Tünel yüzeyinde ve yüzeyine yakın noktalarda ise yüzey oturma ölçümleri (opto-trigonometrik ölçümler), çubuk ekstansometre ve inklinometre ölçümleri yapılmaktadır.

Tünel içi deformasyon ölçümleri, tünelin içi geometrisindeki değişimi ölçmek amacıyla yapılan ölçümlerdir. Bu amaçla tünelin belli noktalarında tünel ile birlikte hareket edebilecek saplamalar (bulon) yerleştirilerek ölçümler alınması esasına dayanmaktadır (Şekil 2.14). Buradaki esas amaç tünelin ilk yapıldığı an ile aradan geçen süre arasındaki hareketi ölçerek anlamlandırmaya çalışmaktır.



Şekil 2.14. Tünel içi şerit ekstansometre ölçüm noktaları ve optorigonometrik ölçüm noktaları (Aksoy vd., 2014).

Çubuk deformasyon ölçerler, tünel içerisinde veya yüzeyde kullanılmaktadır. Farklı çubuk boyları vasıtası ile oluşan deformasyonları belirlemek amaçlanmaktadır. Yüzey ve/veya yapı oturma ölçümleri, yüzeyde ya da yapılarda tünel veya açık kazıların etkisi ile oluşabilecek düşey yönlü hareket ölçümleridir.

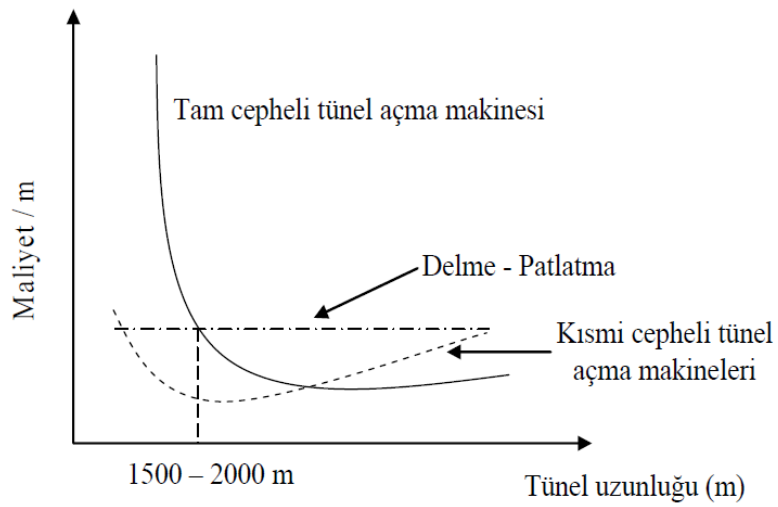
Basınç Hücreleri, püskürtme beton ile oluşturulan kabuk içerisinde oluşan gerilme dağılımını ölçmek için kullanılmaktadırlar. Diskli yük hücresi ise, bulonlarda oluşabilecek gerilme değişikliklerini ölçmektedir. Eğilme ölçerler, tünel/ açık kazılarda yüzeyde veya varsa çevre binalarda oluşabilecek yatay yönlü hareketi ölçmektedir. Gerilme ölçer, tünel kaplamalarındaki beton deformasyonunu ölçmektedir. Çatlak ölçerler, herhangi bir yapıda oluşan çatlak hareketlerin yönlerini ve büyüklüklerini tespit etmek amacı ile kullanılmaktadırlar.

2.5. Tünellerde Kazı Yöntemi Tercihi

Tünel imalatında kazı yöntemi seçimi tünel imalat maliyetinin yönetilebilmesi açısından önemlidir. Bu tercih, tünelin uzunluğu, lojistik koşullar, jeolojik koşullar ve gibi faktörlere bağlı olup her yöntemin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Mekanize kazı yönteminin, pasa boyutunun sabit ve kolay olması, yeryüzü oturmalarının daha az olması, devamlı kazı yapılabilmesi, işçi sayısının daha az olabilmesi, havalandırma ihtiyacının daha az olması ve kazı profil düzeninin oluşturulmasının daha kolay olması bu yöntemin avantajlarını oluşturmaktadır (Bilgin, 1989).

Mekanize kazı yöntemlerinin dezavantajlarını ise; kalifiye eleman ihtiyacının olması, ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, montaj ve demontaj sürelerinin uzun olması ve makine temin süresi olarak sıralayabiliriz.

Mekanize kazının avantaj ve dezavantajları düşünüldüğünde uzun tünellerde, tam mekanize tünel açma yönteminin kullanılmasının maliyet ve süre olarak uygun olduğu görülmektedir (Şekil 2.15) (Bilgin, 1989).



Şekil 2.15. Mekanize ve klasik kazı yönteminin karşılaştırılması (Bilgin, 1989).

3. TÜNEL KAPLAMA TASARIMI

Tünel ve yeraltı yapılarının beton kaplamaları, geçirmezlik, düzgünlük, dayanıklılık, görünüş ve iç yüklerin karşılanması gibi kriterlere göre tasarlanmaktadır (Köse vd. 2001). Tünelin stabilitesi için en önemli eleman tünelin açıldığı kaya kütesidir. Dolayısıyla kazılmış bir boşluğa stabiliteyi sağlamak amacıyla yerleştirilmiş olan kaplama, kendi ağırlığı dışında bir gerilmeye maruz kalmamalıdır. Tünel yapımında püskürtme beton kaplaması, ön zemin desteği sağlamanın yanında tüneli çevreleyen kayayı, erozyondan ve suyun hasar verici etkisinden korumaktadır (Köse vd. 2001). Kaplama tasarımında yeraltı koşullarına uygun kaplama türü belirlenmelidir (Selman, 2014).

Püskürtme beton, yer altı yapılarının en önemli bileşeni olup yalnızca püskürtme betonun kullanıldığı durumlarla az karşılanmaktadır. Genellikle çelik iksa, kaya bulonu ve çelik hasır gibi destekleme elemanlarından biri ya da birkaçı kullanılmaktadır. Bu sebepten püskürtme beton kaplama kalınlığının boyutlandırılması diğer tahkimat elemanlarıyla birlikte yapılmaktadır.

Tünelcilik tasarımlarında taşıyıcı sistem ile ilgili etkenlerin yanı sıra yeraltı açıklığının içinde bulunduğu ortamın jeomekanik ve geometrik koşulları da önem taşımaktadır. Bu ortam koşulların, formasyonun jeomekanik (dayanım, ayrışma, süreksizlik, vb.) özellikleri, jeolojik yapı ve hidrojeolojik durum, formasyonun zamanla gösterdiği davranışlar (şişme, sıkışma, sökülme), gerilme durumu ve anizotropik özelliklerdir (Selman, 2014).

Tünel kaplama tasarımı ya da dizaynı oldukça zor ve farklı parametrelerin birlikte düşünülmesini gerektiren bir süreçtir. Bu süreç ampirik yöntemler ve analitik yöntemler ile yapılmaktadır (Selman, 2014).

3.1 Ampirik Yöntemler

Ampirik yöntemler belli bölgelerde yapılan araştırmaların genele yayılması şeklinde düşünülebilecek çalışmalardır. Bu çalışmalardan, kaya kütlelerinin sınıflama sistemleri doğmuştur. 1946' da ilk çalışma, kaya kütesinin davranışlarını ve karakterini belirlemek amacı ile Terzaghi tarafından yapılmıştır. Çizelge 3.1' de farklı sınıflama sistemleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kaya sınıflama sistemleri (Palmström, 2000).

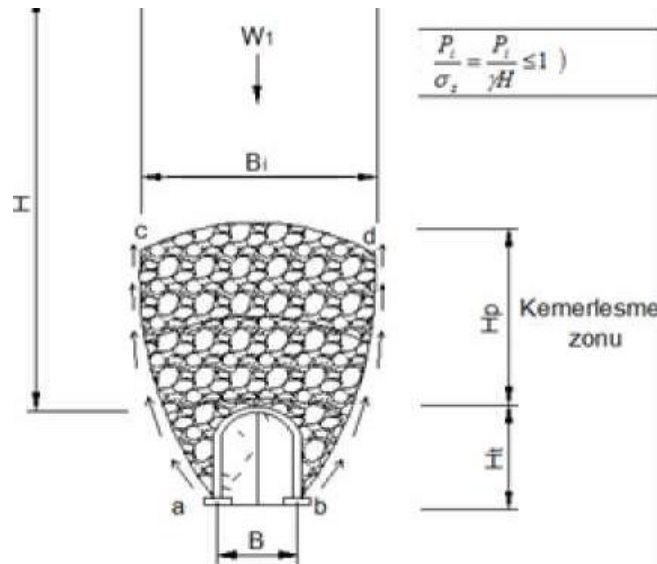
	Sınıflama Sistemi	Biçim ve Tip	Ana Uygulama	Referans
1	Terzaghi kaya yükleme sınıflama sistemi	Tanımlayıcı ve davranışsal biçim	Tünellerdeki çelik tahkimatların tasarımında	Terzaghi, 1946
2	Laufferin desteksiz duruş zamanı sınıflama sistemi	Tanımlayıcı biçim	Tünel tasarımında	Laufer, 1958
3	Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM)	Tanımlayıcı ve davranışsal biçim	Yetersiz (aşırı gerilmiş) zeminlerin tasarımında ve kazıda	Rabcewich, Müller, Pacher, 1958-1964
4	Kaya Mekanik Özellikleri için Kaya Sınıflaması	Tanımlayıcı biçim, genel tip	Kaya mekaniği verileri	Patching ve Coates, 1968
5	Kaya ve Zeminlerin ortak Sınıflaması	Tanımlayıcı biçim	Bağlanım için parçacıklar ve bloklara davalı	Deer vd., 1969
6	Kaya kalite göstergesi (RQD)	Sayısal biçim Yaygın tip	Sondaj loğlarına dayalı: diğer sim flama sistemlerinde kullanılır	Deer vd., 1967
7	Boyut- dayanım sınıflaması	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Kaya dayanımına ve blok çapma dayalı, çoğunlukla madencilikte	Franklin, 1975
8	Kaya yapısı derecesi (RSR)	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Tünellerdeki çelik tahkimatların tasarımında	Wickham vd., 1972
9	Kaya kütle sınıflama sistemi	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Tünel, maden ve tesislerin tasarımında	Bieniawski, 1973
10	Q-sınıflama sistemi	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Yer altı kazılarındaki tahkimatların tasarımında	Barton vd., 1974
11	Biçim sınıflaması	Tanımlayıcı biçim	iletişimde kullanılır	Matula ve Holzer, 1978
12	Onak kaya sınıflama sistemi	Tanımlayıcı biçim	iletişimde kullanılır	Williamson, 1980
13	Basit jeoteknik sınıflama (BGD)	Tanımlayıcı biçim	Yaygın uygulamalar	ISRM, 1981
14	Jeolojik dayanım indeksi	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Yer altı kazılarındaki tahkimatların tasarımında	Hoek, 1994
15	Kaya kütle indeksi sistemi (RMI)	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Genel karakterizasyon. tahkimatın tasarımı. TMB uygulamaları	Palmström, 1995

3.1.1. Terzaghi'nin kaya yükü sınıflandırması

1949'da standartlaştırılan yöntem sonraki yıllarda ASM (American Support Method) - Amerikan Çelik Tahkimat Metodu olarak adlandırıldı (Terzaghi ve Peck, 1948).

Terzaghi (1946) tarafından ortaya koyulan destek basıncı kriterleri, genelde ahşap bloklama ve çelik kirişlere desteklenmiş, demiryolu tünellerindeki gözlemlerine dayanmaktadır. Bu nedenle kendisinin kriterleri iyi nitelikli kayalarda çelik kiriş ve tahta bloklama yerine püskürtme beton ve/veya bulonlama kullanılarak ilk destekleme yapılmasını önerir.

Kemerlenme, kayma gerilmelerinin olduğu hacmin cidarlarında oluşmaktadır. Kemerlenme sonrası tünel tavanında basınç ferahlaması oluşurken, yan cidarlarda ise gerilme yoğunlukları gözlenmektedir. Terzaghi'nin kaya yükü kavramı ve kemerleşme tanımı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Çizelge 3.2'de kaya yükü sınıflandırması verilmektedir (B:galeri genişliği, Bi:kemerleşme alanının genişliği, H:örtü kalınlığı, Ht:tünelin yüksekliği, Hp:kemerleşme yüksekliği). Terzaghi sistemi, teknolojiyle birlikte tercih edilmeyen bir sistem olmuştur. Terzaghi sistemi çok fazla tahkimat önermektedir (Karpuz ve Hindistan, 2006).



Şekil 3.1. Terzaghi kaya yükü kavramı (Hoek, 2001)).

Çizelge 3.2. Terzaghi kaya yükü sınıflaması (Karpuz ve Hindistan, 2006).

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

3.1.2. Kaya Kütle Değeri (RMR)

1972-1973'de RMR, ilk kez Bieniawski (1973) tarafından geliştirilmiştir. Yıllar içerisinde gözlemler ve yeni veriler ile birkaç kez değişikliğe uğrayarak (1974, 1976, 1979, 1989) 1989 yılında son halini almıştır.

RMR sınıflama sisteminde 5 temel parametre kullanılarak sınıflama yapılmaktadır. Bu parametreleri kaya malzemesinin tek eksenli dayanımı, kaya kalite belirteci (RQD), süreksizlik aralığı, süreksizliklerin durumu ve yer altı suyu durumu olarak sıralayabiliriz. Sınıflama sistemi hesap tablosu Çizelge 3.3'de verilmektedir. RMR uygulamasında, Çizelge 3.3'de verilen her parametre için değerler esas alınır. Ayrıca, sistemin son halinde önerilen süreksizliklerin puanlaması Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Cizelge 3.3. RMR sınıflama sistemi (Bieniawski 1989).

A. Sınıflama Parametreleri ve Puanları

1	Kaya malzemesinin dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım			
		Tek eksenli sıkışma dayanımı	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa	
	Puan	15	12	7	4	2	1	0		
2	Kaya kalite göstergesi, RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25			
	Puan		20	17	13	8	3			
3	Süreksizlik Aralığı		> 2 m	0.6-2 m	100-600 mm	60-200 mm	<60 mm			
	Puan		20	15	10	8	5			
4	Süreksizlik Koşulları		Çok kaba yüzeyler Sürekli değil Ayrılma yok Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma < 1mm Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma < 1mm Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu < 5mm veya 1-5 mm açık eklemler, sürekli eklemler	Yumuşak fay dolgusu > 5mm kalınlıkta veya açık eklemler > 5mm devamlı süreksizlikler			
	Puan		30	25	20	10	0			
5	Yeraltı suyu	Tünelin 10 m'lik kısmından gelen su	Yok	10 lt/dk	<25 lt/dk	25-125 lt/dk	>125lt/dk			
		Eklemdaki su basıncı	Oranı	Veya 0	Veya 0.0-0.1	Veya 0.1-0.2	veya 0.2-0.5	Veya >0.5		
		En büyük asal gerileme								
	Genel koşullar	Veya Tamamen kuru	Veya Nemli	Veya Islak	Veya Damlama	Veya Su akışı				
Puan		15	10	7	4	0				

Çizelge 3.4. RMR sınıflama sistemi (Bieniawski 1989) (Devam Ediyor).**Tüneldeki Süreksizlik Eğim ve Doğrultusunun Etkisi**

Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel		Doğrultuya bakılmaksızın, eğim 0°-20° arasında
Eğim yönünde ilerleme		Eğime karşı ilerleme		Doğrultu tünel eksenine paralel		
Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun Değil	Hiç uygun değil	Orta	Orta

B. Süreksizlik Yönelimine Göre Düzeltme

Süreksizliklerin doğrultu ve eğimi		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puan	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

C. Kaya Sınıfları ve Puanları

Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta Kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Puan	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20

D. Kaya Sınıflarının Bazı Özellikleri

Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Ortalama desteksiz kalabilme süresi	15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5m açıklık için 1 hafta	1.5 m açıklık için 10 saat	1m açıklık için 30 dk.
Kaya kütlesi kohezyonu (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Kaya kütlesinin içsel sürtünme açısı	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Çizelge 3.5. Süreksizlik yüzeyi puanlandırılması kılavuzu (Bieniawski 1989)

Parametre	Puanlar				
	< 1 m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)
Devamlılık	Yok (6)	< 0,1 mm (5)	< 0,1-1 mm (4)	1-5 mm (1)	> 5 mm (0)
Açıklık	Çok pürüzlü (6)	Pürüzlü (5)	Az pürüzlü (3)	Düz (1)	Kaygan (0)
Dolgu	Yok (6)	Sert dolgu		Yumuşak dolgu	
		< 5 mm (4)	> 5 mm (2)	< 5 mm (2)	> 5 mm (0)
Bozunma	Bozunmamış (6)	Az bozunmuş (5)	Orta derecede bozunmuş (3)	Bozunmuş (1)	Çok bozunmuş (0)

RMR sınıflama sisteminden; kaya kütlesi kalitesi, kazı yöntemine göre, ön tasarım amacıyla destek türleri ve kaya kütlesinin bazı mühendislik özellikleri elde edilmektedir (Bieniawski 1988).

3.1.3. Q sınıflandırma sistemi

1972-1973 Norveç Jeoteknik Enstitüsünde Q sistemi Barton vd. tarafından geliştirilmiştir. Kaya kütlesinin 6 farklı parametresi ile önerilen bir bağıntı ile hesaplanmaktadır (Barton vd., 1974). Önerdikleri bağıntı formül 3.1'de verilmiştir.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_n} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (3.1)$$

(RQD: Kaya kalite indisi, J_n: Eklem takımı sayısı, J_r: Eklem pürüzlülük sayısı, J_w: Eklem alterasyon sayısı, J_w: Eklem suyu indirgeme sayısı, SRF: Gerilme indirgeme faktörü)

Formül 3.1 ile hesaplanan Q sınıflama sistemi değeri ile geliştirilen abaklarla yeraltı yapıları destekleme tipleri belirlenebilmektedir. Q sınıflama sistemi (sayısal değeri 0.001-1000) çok sıkışabilen kaya, sağlam kaya vb. birçok kaya yapısını tanımlamaktadır.

RQD, Deere (1964) tarafından önerilmiştir. Jeoteknik amaçla yapılan karotlu sondajda bir ilerleme adımında doğal süreksizliklerle ayrılmış, boyu 10 cm ve üzeri olan karot uzunluğunun toplam ilerleme uzunluğuna oranı olarak tarif edilmektedir (Ulusay ve Sönmez, 2002). RQD değerlerinin tanımı Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.6. Değişik koşullara göre RQD değerleri (Deere, 1964).

RQD (%)	Kaya Kalite Göstergesi Tanımı
0 – 25	A. Çok zayıf
25 – 50	B. Zayıf
50 – 75	C. Orta
75 - 90	D. İyi
90 – 100	E. Çok iyi (mükemmel)

RQD <10 Q'nun hesaplanmasında RQD için 10 gibi nominal bir değer kullanılır. RQD için 100, 95, 90... vb. gibi 5 'lik aralıklar yeterlidir.

Sondaj yapılamayacak bir durumda RQD tayini, birim hacimdeki eklem sayısı ile belirlenebilir. Her eklem takımının 1 m³'teki sayısı belirlenmelidir. Kil içermeyen kayalarda bu sayı RQD'ye denklem 3.2 yardımı ile çevrilir:

$$RQD = 115 - 3,3 Jv \frac{Jw}{SRF} \quad (3.2)$$

Jv: m³'teki toplam eklem sayısı

J_n parametresi yapraklanma, şiştozite ve tabakalanma gibi jeolojik süreksizliklerden etkilenir. Belirgin ve birbirine paralel gelişenler bir eklem takımı olarak kabul edilirken, çatlaklar veya az sayıda eklemler varsa, bunlar geliş güzel eklemler olarak ele alınmalıdır. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan parametreler ve değerler Çizelge 3.7'da verilmiştir.

Çizelge 3.7. Q sınıflandırma sistemi eklem takımı (Barton vd., 1974).

Eklem Takımı Sayısı (J_n)	Puan
A. Masif, eklem çok az veya hiç yok	0,5-1
B. Bir eklem takımı	2
C. Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	3
D. İki eklem takımı	4
E. İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	6
F. Üç eklem takımı	9
G. Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	12
H. Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişigüzel çok fazla sayıda, kütüp şeker görünümünde	15
I. Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20

Not: (2) Arakesitler (kesişen tüneller) için (3.0 x J_n) kullanılır.

(3) Tünel girişleri için (2.0 x J_n) kullanılır.

Çizelge 3.8. Q sınıflandırma sistemi eklem pürüzlülük sayısı (Barton vd., 1974).

Eklem Pürüzlülük Sayısı (J_r)	Puan
a-Süreksizlik – kaya dokanağı	
b-10 cm’lik bir makaslamaadan önceki süreksizlik – kaya dokanağı	
A. Süreksiz Eklemler	4
B. Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3
C. Düz, dalgalı	2
D. Kaygan, dalgalı	1,5
E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1,5
F. Düz, düzlemsel	1
G. Kaygan, düzlemsel	0,5
Not: (4) Bu sıralamada tanımlamalar, küçük ve ara ölçekli özellikleri göstermektedir.	
c- Makaslanmış kesimde süreksizlik – kaya dokanağı yok	
H. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon	1
I. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıktaki, çakıllı ya da parçalanmış zon	1
Not (5): İlgili eklem takımının ortalama aralığı 3 m’den büyük ise J_r ’ye 1,0 eklenebilir.	
Not (6): Çizgiselliklerin en düşük dayanımı verecek şekilde yönlmesi koşuluyla, çizgisellik içeren düzlemsel ve kaygan süreksizlik yüzeyleri için $J_r=0,5$ alınabilir.	
Not (7): J_r ve J_a sınıflaması, yönelim ve makaslama dayanımı ($\tau=\sigma_n \tan(J_r/J_a)$) açısından duraylılık için hiç uygun olmayan eklem takımına veya süreksizliklere uygulanır.	

Çizelge 3.9. Q sınıflandırma sistemi eklem alterasyon (J_a) sayısı (Barton vd., 1974).

Eklem Alterasyon Sayısı (J_a)	Puan	ϕ (°)
(a) Kaya - süreksizlik dokanağı (mineral dolgusu yok, sadece yüzey kaplaması)		
A. Yüzeyler sıkı, sert, yumaşamayan geçirimsiz doğu (örn. kuvars veya epidot)	0,75	-
B. Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1	25-35
C. Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri. Yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vb.	2	25-30
D. Siltli veya kumlu kil kaplamaları, çok az ve yumuşamayan kil içeriği	3	20-25
E. Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama (örn. kaolinit veya mika). Ayrıca klonit, talk, jips, grafit vd. ile az miktarda şişen killer	4	25-30
(b) 10 cm'lik makaslama öncesi süreksizlik kaya dokanağı (ince mineral dolguları)		
F. Kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vd.	4	25-30
G. Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm)	6	16-24
H. Orta ve düşük derecede aşırı konsolidasyona maruz kalmış, yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm)	8	12-16
J. Şişen kil mineralleri - örneğin montmorillenit (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm) J_a 'nın değeri şişen kil tane boyutundaki malzemenin miktarına ve su girişine bağlı	8-12	6-12
(c) Makaslama durumunda süreksizlik yüzeylerinin teması yok (kalın mineral dolguları)		
K, L, M. Ayırılmış veya parçalanmış kaya ve kil bantları ya da zonları (kil koşulunun tanımı için G, H ve J'ye bakınız)	6, 8 veya 8-12	6-24
N. Siltli veya kumlu kil bantları veya zonları, çok az kil (yumuşamayan)	5	-

Çizelge 3.10. Q sınıflandırma sistemi eklem suyu azaltma faktörü (J_w) (Barton vd., 1974).

Eklem Suyu Azaltma Faktörü (J_w)	Su basıncı (MPa)	Puan
A. Kısmi kazı veya düşük su geliri (örn. genel olarak <5 l/dk.)	< 0,1	1
B. Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	0,1 – 0,25	0,66
C. Dolgusuz eklemler içeren sağlam kayada aşırı su geliri veya yüksek basınç	0,25 – 1,0	0,5
D. Aşırı su geliri veya yüksek basınç, eklem dolgularının ileri derecede yıkanması	0,25 – 1,0	0,33
E. Çok ileri derecede su geliri veya patlatma sırasında zamanla azalan yüksek su basıncı	>1,0	0,2-0,1
F. Zamanla azalmaksızın devam eden son derecede su geliri veya su basıncı	>1,0	0,1-0,05

Not: (8) C, D, E ve F'deki faktörler kaba tahminlerdir. Eğer drenaja yönelik Önlemler alınırsa, J_w artar.

(9) Buz oluşumundan kaynaklanabilecek Özel sorunlar dikkate alınmamıştır.

Çizelge 3.11. Q sınıflandırma sistemi gerilme azaltma faktörü (Barton vd., 1974).

Gerilme Azaltma Faktörü (SRF)	σ_{ci}/σ_1	σ_0/σ_{ci}	Puan
(a) Tünel açılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek kazıyı kesen zayıf zonlar			
A. Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren zayıflık zonları, çok gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)			10
B. Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği ≤ 50 m)			5
C. Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği > 50 m)			2,5
D. Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)			7,5
E. Kil içermeyen dayanıklı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği ≤ 50 m)			5
F. Kil içermeyen dayanıklı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği > 50 m)			2,5
G. Gevşek ve açık eklemler, ileri derecede eklemler "küp şeker" görünümüne (herhangi bir derinlikte)			5
(b) Dayanıklı kaya, kaya gerilmesi sorunları			
H. Düşük gerilme, yüzeyeyakın açık eklemler	>200	$<0,01$	2,5
J. Orta derecede gerilme, uygun gerilme koşulları	200 – 10	0,01 – 0,3	1
K. Yüksek gerilme, çok sıkı yapı, genellikle duraylı, yan duvarlar açısından uygun olmayabilir	10 – 5	0,3 – 0,4	0,5 – 2
L. Masif kayada 1 saatlik bir süre sonrasında orta derecede dilimlenme	5 – 3	0,5 – 0,65	5 – 50
M. Masif kayada birkaç dakika sonra dilimlenme ve kaya patlaması	3 – 2	0,65 – 1	50 – 200
N. Masif kayada aşırı kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon	<2	>1	200 – 400

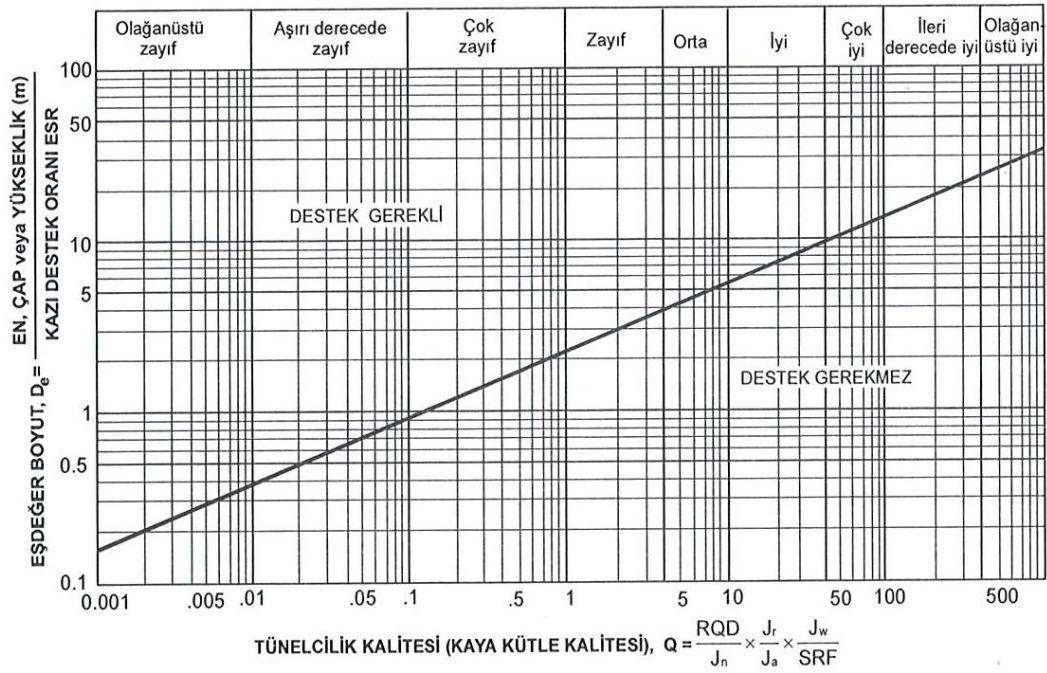
Çizelge 3.12. Q sınıflandırma sistemi gerilme azaltma faktörü (Barton vd., 1974). (Devam Ediyor)

Oldukça anizotrop bakir gerilme alanı (ölçülebilirse) $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ koşulunda σ_c 0,75 σ_c 'ye, $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ ise 0,5 σ_c 'ye düşürülür. Burada σ_c ; tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_1 ve σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilmeler, σ_θ en büyük teğetsel gerilmedir (elastik kuramdan tahmin edilen).			
Tavan yüksekliğinin genişliğinden az olduğu durumlarla ilgili birkaç vaka kaydı mevcuttur. Bu gibi durumlar için SRF'nin 2,5'tan 5'e arttırılması önerilir (H maddesine bakınız).			
(c) Sıkışan kaya: Yüksek kaya basıncının etkisiyle düşük dayanımlı kayada plastik akma			
O. Az sıkıştıran kaya basıncı		1 – 5	5 – 10
P. Aşırı sıkıştıran kaya basıncı		>5	10 – 20
Sıkışan kaya vakaları $H > Q^{1/3}$ derinlik koşulunda meydana gelebilir (Singh vd., 1993). Kaya kütlelerinin sıkışma dayanımı $q = 0,7\gamma Q^{1/3}$ (MPa) eşitliğinden tahmin edilebilir. Burada γ kayanın birim hacim ağırlığıdır. (kN/m ³) (Singh, 1993)			
(d) Şişen kaya: Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme etkinliği			
R. Düşük şişme basıncı			5 – 10
S. Çok yüksek şişme basıncı			10 – 15

Çizelge 3.13. Farklı yeraltı kazıları için ESR değerleri.

KAZI TİPİ	Orijinal ESR	Güncelleştirilmiş ESR
A. Kısa süreli (geçici) maden kazıları vd.	3-5	2-5
B. Uzun süreli (kalıcı) maden kazılan, su tünelleri, büyük kazılar için açılan pilot tüneller, geniş yeraltı kazılan	1.6	1.6-2.0
C. Geniş yeraltı depolama odaları, su arıtma tesisleri, küçük karayolu ve demiryolu tünelleri, yaklaşım tünelleri	1.3	1.2-1.3
D. Enerji santralleri, büyük (ana) karayolu ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, tünel girişleri ve yeraltında birbirini kesen açıklıkların kesişme bölgeleri	1	0.9-1.1
E. Yeraltı nükleer enerji santralleri, demiryolu istasyonları, spor ve kamu tesisleri, fabrikalar, gaz nakil tünelleri	0.8	0.5-0.8

Q sistemi parametreleri için Çizelge 3.8'deki değerler kullanılarak, denklem 3.1'den elde edilen Q değerleri 0.001 -1000 arasındadır. Bu değerlere göre, olağanüstü iyiden, olağanüstü zayıf kayaya değişen dokuz farklı kaya kütle sınıfı mevcuttur. Q sistemiyle ilgili kaya kütle sınıfları ve Q ile D_e arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Q ve D_e ilişkisi (Barton vd., 1974).

3.1.4. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Hoek vd (1995) Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index, GSI) önermişler ve GSI sınıflama abağı yardımıyla kaya kütle dayanımı belirlenmeye çalışılmıştır (Şekil 3.3). GSI, farklı jeolojik koşullar altında kaya kütle dayanımını tahmin etmeyi sağlayan bir sistemdir. Hoek ve Brown (1980), tarafından meydana çıkarılan ve Hoek vd. (1995) tarafından güncelleştirilen denklem 3.5'de verilmiştir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left[m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right]^a \quad (3.5)$$

(σ'_1 ve σ'_3 : en büyük ve en küçük asal gerilmeler, σ_{ci} : kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı, m_b : kaya kütlelerine ait boyutsuz malzeme sabiti, s: Hoek –

Brown yenilme ölçütü boyutsuz malzeme sabiti, a : kaya kütlelerinin jeomekanik özelliklerine bağlı bir üssel ifade)

JEOLOJİK DAYANIM İNDEKSİ		SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULLU	
Kaya kütlelerinin yapısını ve yüzey koşullarını tanımlayan harf kodları belirlenerek uygun kutu seçilir ve ortalama Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'nin değeri abaktaki konturlardan tayin edilir.		AZALAN YÜZEY KALİTESİ	
YAPI		ÇOK İYİ Çok pürüzlü, fazla ayrılmamış yüzeyler	İYİ Düz, çok az ayrılmış, demir oksit sıvımalı yüzeyler
		ORTA Düz, orta derecede ayrılmış yüzeyler	ZAYIF Kırılgan, sert veya köşeli parçalar içeren, dolguya sahip, çok ayrılmış yüzeyler
		ÇOK ZAYIF Kırılgan, yumuşak kil dolulu, çok ayrılmış yüzeyler	
	SAĞLAM VEYA MASİF- Kaya malzemesi veya geniş aralıklı birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütleleri	90	UYGULANMAZ
	BLOKLU- 3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütleleri	80	
	ÇOK BLOKLU- Dört veya daha fazla sayıda süreksizlik takımlarının kesişmesiyle oluşmuş çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren, kısmen örselenmiş kaya kütleleri	70	
	BLOKLU/ÖRSELENMİŞ- Birbirini kesen çok sayıda süreksizliğin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütleleri	60	
	PARÇALANMIŞ- Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütleleri	50	
	FOLİYASYONLU-LAMİNALİ-MAKASLANMIŞ İnce laminali veya foliyasyonlu ve makaslanmış zayıf kayalar. Diğer süreksizlik takımlarına oranla daha egemen olan sık aralıklı şistozite yüzeyleri kayada bloklanmanın gelişmesini önlemiştir.	40	
		30	
		20	
		10	
		UYGULANMAZ	

Şekil 3.3. Jeolojik dayanım (Hoek, 1999).

3.1.5. Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (ÖNORM-B Sistemi)

Bu metodun temelleri Rabcewicz (1963) ve Rabcewicz (1964) tarafından atılmış, Müller (1978) tarafından geliştirilmiştir. Temeli tünel kazısı sırasında yapılacak jeolojik-jeoteknik gözlemlere ve alınacak deformasyon ölçümlerinin takibine dayalıdır. Rabcewicz (1964), NATM yöntemini, tünel kazısı ardından yerleştirilen geçici desteklemelerle, deformasyonlara izin verilmesiyle kaya basıncının düşürülmesi ve tünele gelen yüklerin kazı etrafındaki kayaya aktarılması ilkesi olarak tanımlamaktadır.

Şekil 3.4’de Karayolları Teknik Şartnamesi’nde (KTŞ) bulunan NATM Kaya Sınıflama Sistemi verilmiştir. Çizelge 3.13’ de kaya sınıflandırma sistemi verilmiştir.

Q KAYA KÜTLE SINIFLAMASI (Barton vd., 1974)	NATM KAYA KÜTLE SINIFLAMASI (Ö NORM B 2203, 1994)	RMR KAYA KÜTLE SINIFLAMASI (Bieniawski, 1989)
1000 SON DERECE SAĞLAM	A1 SAĞLAM	100 ÇOK İYİ
400 ÇOK FAZLA SAĞLAM		
100 70.4 ÇOK SAĞLAM	A2 ZAMANLA KIRILGAN	80 İYİ
40 SAĞLAM		
10 ORTA	B1 KIRILGAN	65 60
4 ZAYIF	B2 ÇOK KIRILGAN	58 ORTA
1.47 1 ÇOK ZAYIF	B3 DÖKÜNTÜLÜ	47 40
0.11 0.1 ÇOK FAZLA ZAYIF		29 ZAYIF
0.03 0.016 0.01 0.008 ÇOK DERECE ZAYIF	C1 KAYA PATLAMALI	20
	C2 BASKILI	15
	C3 ÇOK BASKILI	10
	C4 AKICI	5
0.002 0.001	C5 ŞİŞEN-KABARAN	2.5

Şekil 3.4. ÖNORM-B sınıflama sistemi çizelgesi.

Çizelge 3.13. Kaya sınıflandırma sistemi

	ÖNORM B2203		ÖNORM B2203	
	Ekim 1994 ve Sonrası		Ekim 1994 Öncesi	
A	A1	Stabil	A1	Stabil
	A2	Sonradan Az Sökülen	A2	Hafif Aşırı Sökülen
B	B1	Gevrek	B1	Gevrek
	B2	Çok Gevrek	B2	Çok Gevrek
	B3	Taneli		
C	C1	Dağ Atma	C1	Baskılı
	C2	Baskılı		
	C3	Çok Baskılı	C2	Çok Baskılı
	C4	Akıcı	L2	Gevşek Zemin
				Düşük Kohezyon
C5	Şişen	L1	Gevşek Zemin	
			Yüksek Kohezyon	

3.2. Sayısal yöntemler

Sayısal yöntemler (analitik yöntemler), tünelticilikte karşılaşılan sorunları küçük parçalara bölerek her bir parça için denklemler aracılığıyla çözümler üreten bir analiz yöntemidir.

Tünel destek elemanları hesaplanırken en önemli unsur, tünel kazısının etrafındaki bölgedeki gelişen gerilme dağılımının ve yer değiştirmelerin belirlenmesidir. Sayısal yöntemler ile yer değiştirmeler ve gerilme durumları ile tünel kaplamasına gelen gerilme ve momentler bulunabilir.

Sayısal yöntemler, yeraltı yapılarının tasarımında karşılaşılan problemlerin matematiksel çözümünü içine almaktadır. Bu yöntemde, ikincil gerilme durumları belirlenerek, yapı stabilitesi oluşturulmak istenmektedir (Ergin, 1992).

3.2.1. Matematiksel modelleme

Sayısal modellemede kaya kütlesinin devamlı ve devamsız yaklaşımı vardır. Bunlar yatay düzlemler ve süreksizlik (çatlak, eklem ve faylarda) yapılarının tanınması amacıyla belirlenmişlerdir.

Devamlı yaklaşım modeli diferansiyel modeller ve integral modeller olarak iki kısımda incelenebilir. Diferansiyel modeller, sonlu fark ve sonlu eleman yöntemlerini içine alırken, kazının yapıldığı ortamın tanımlanmasında kullanılmaktadırlar. Sonlu eleman yöntemi, sıvı akışını ve ısı transferini de içine alan karmaşık modellerin elde edilmesinde kullanılır.

İntegral veya sonlu eleman yönteminde, iç ve dış sınırlar boyunca devamsızlık vardır. Devamsız modeller, blok ve parçaların hareketlerinin eşitliklerini tanımlarken, devamsız modellemede bağımsız kaya blok hareketlerinin tanımlanması gerekmektedir (Karaoğlan, 2002).

3.2.2. Fiziksel modelleme

Vardar (1986) yatayla 30° açı yönelimli, birçok kırıklar modellemiştir. Araştırmacı, tavan tabakalarının kalınlıkları tavanın üst kısımlarında bulunan zayıf kısımların davranışları ve tünel açıklığının stabilitesini etkileyen eklemlerin davranış şekillerini belirlemiştir. Sonuçta, bu değerlere ulaşmak için Temel Sürtünme Tekniği' ni kullanmıştır.

Kaya Kütlesi Yenilme kriterleri

Gerilme durumları 3 boyutlu uzayda $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmeleridir. Herhangi bir yenilme durumu için denklem 3.6'da olduğu gibi malzemeye bağlı bir ilişki bulunmaktadır. Kayaya etkiyen gerilmelerin, kayanın basınç veya çekme dayanımını geçmesi en büyük normal gerilme ile oluşur.

$$CT_1 = f(\sigma_2, CT_3) \quad (3.6)$$

Coulomb ve Mohr kriteri

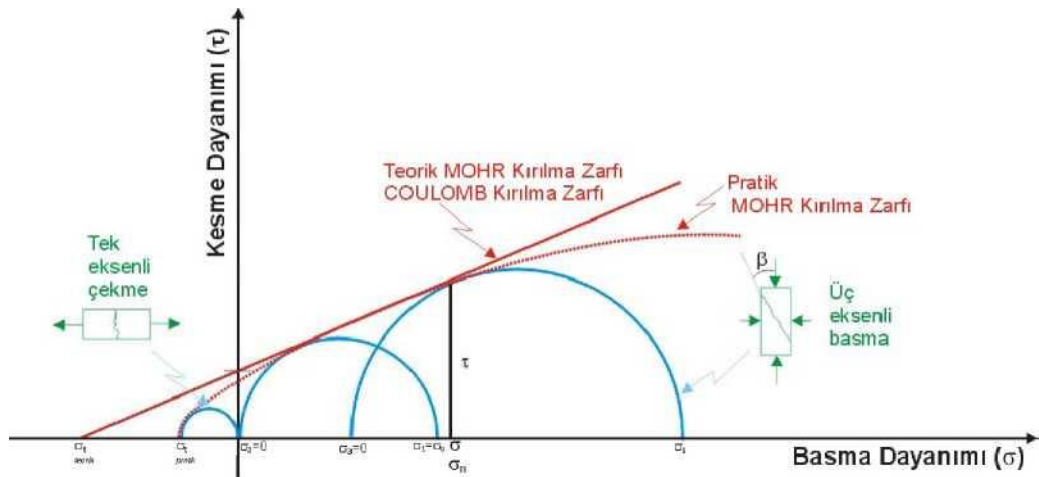
Bu hipoteze göre, yüzeye etkiyen gerilmeler denklem 3.7, 3.8 ve 3.9'da olduğu gibi kesme gerilmesinin (T), normal gerilmelerin (σ) bir fonksiyonudur. Bu fonksiyona göre yenilme en büyük normal gerilme veya en küçük gerilme değerleri kayma emniyet

gerilmesini aştığında olmaktadır. Şekil 3.5’de yükleme durumları Mohr daireleri ile verilmiştir.

$$T = f(\sigma_n) \quad (3.7)$$

$$T_o > S_o + \sigma_n \cdot \tan \theta + c \quad (3.8)$$

$$\sigma_3 > -c r_t \quad (3.9)$$



Şekil 3. 5. Mohr ve Coulomb yenilme kriteri (Polat, 2010).

Kaya Kütle Kırılma Kriteri

Kayalarda, kaya kazılarının planlanmasında bazı deneysel kuvvet kriterleri kullanılır.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \left(m \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

(σ_1 : kırıldaki büyük asal gerilme, σ_3 : örneğe uygulanan küçük asal gerilme, σ_c : bozulmamış kayanın aksenal olmayan sıkışma kuvveti, m ve s ampirik sabitler)

3.2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM) kullanılarak tünel tasarımı

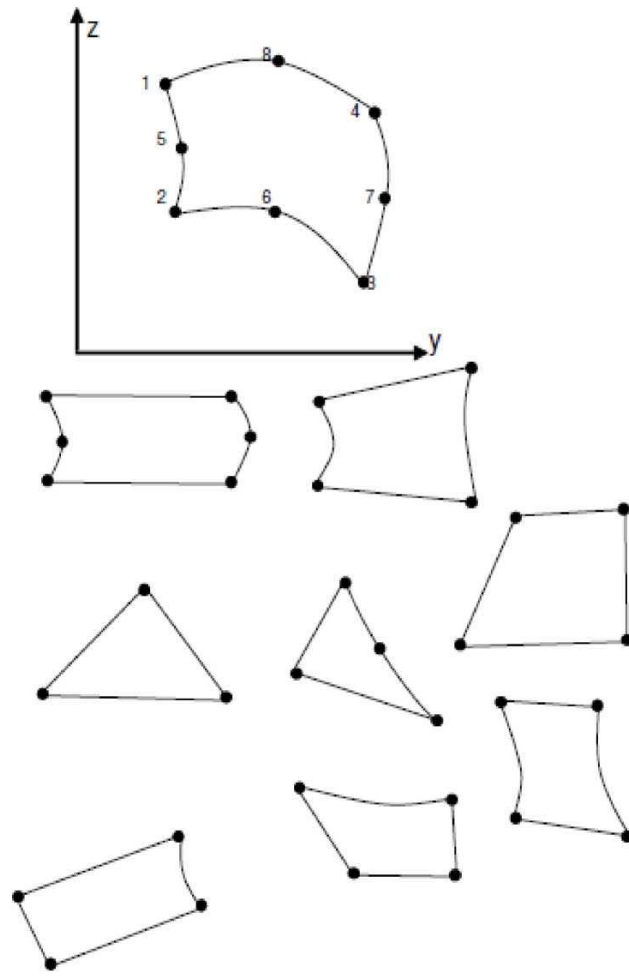
Sonlu elemanlar yöntemi, bilgisayarların mühendislik uygulamalarındaki gittikçe artan kullanımı ile birlikte hızla artmıştır. Yapısal analizler için geliştirilen yöntem, günümüzde dayandığı teori ve prensipler nedeniyle birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır.

Bu yöntemde, sürekli ortam ve yapı sonlu eleman parçalara bölünmektedir. Elemanlar birbirlerine düğüm noktalarından bağlanmaktadır. Sonlu eleman içindeki gerçek yer değiştirme miktarı düğüm noktalarındaki değerler cinsinden tanımlanmaktadır. Düğüm noktalarındaki ve yer değiştirme bileşenlerine, serbestlik derecesi denilmektedir.

Öncelikli olarak bir eleman için, davranış denklemleriyle düğüm noktalarının yer değiştirmesi hesaplanmaktadır. Tüm yapının denklemleri, yapı elemanı denge denklemlerinin, elemanlar arasındaki yer değiştirme sürekliliğini sağlayacak şekilde toplanmasıyla saptanmaktadır. Bu denklemler bilinen yer değiştirme sınır şartlarını sağlayacak şekilde değiştirildikten sonra, bilinmeyen değişkenleri yer değiştirme olarak bir lineer cebirsel denklem takımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Denklem takımının çözümüyle düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler hesaplanmış olmaktadır. Yapıdaki şekil değiştirme ve gerilmeler, hesaplanan yer değiştirme değerlerinden, türev alınarak hesaplanır. Sonlu eleman metodlarının yaygınlaşmasıyla, günümüzde birçok mühendislik uygulamalarında kullanılan bilgisayar programları vardır.

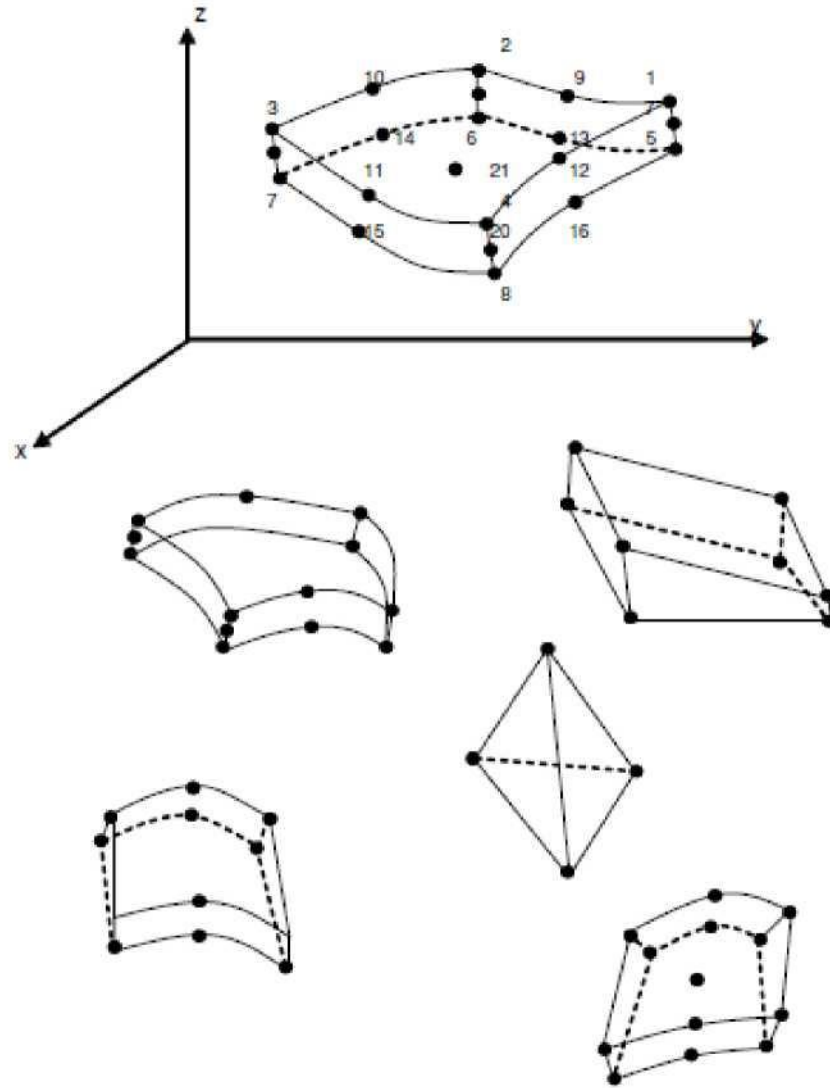
SEM'in gerilme analizleri ve yer değiştirmelerin bulunmasında; yer değiştirme yöntemi ve denge yöntemi uygulanmaktadır. Tünel yapımında minimum enerji ilkesine dayanan yer değiştirme yöntemi kullanılmaktadır (Desai, 1972).

İzotropik kaya ortamında modellenecek iki boyutlu bir tünel modelinde tasarım parametreleri, poisson oranı (ν), elastisite modülü (E), birim kalınlığı (t) ve malzeme yoğunluğudur (γ)' dur. İzotropik şartlardaki 3 boyutlu sürekli elemanlar için malzemenin belirlenmesinde, kayma modülünde ise (G) gereklidir. Tünel ortamı için sondaj ve laboratuvar deneyleri ile elde edilen geoteknik veriler tüneli çevreleyen ortamın modellemesini kolaylaştıracak homojen alt bölmelere ayrılır. Genel olarak, iki boyutlu elemanlar ile modellemede üç veya dört kenarlı sonlu elemanlar tercih edilmektedir. Düzlem-gerilme, düzlem- birim deformasyon ve eksen simetrik analizler için İki boyutlu sonlu elemanlar tercih edilmektedir (Tufan ve Tosun, 1994). Şekil 3.6'da iki boyutlu sonlu elemanlar ağı verilmiştir.



Şekil 3.6. İki boyutlu sonlu elemanlar (Tufan ve Tosun, 1994).

Tünel yapımında kesişimler ve doğrusal olmayan tünellerin modellemesinde üç boyutlu elemanlar kullanılmaktadırlar. Şekil 3.7’de üç boyutlu sonlu elemanlar ağı verilmiştir (Tufan ve Tosun, 1994).



Şekil 3.7. Üç boyutlu sonlu elemanlar (Tufan ve Tosun, 1994).

SEM analizlerinin, doğru sonuç vermesi için yüklemelerin gerçek değerlerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Modele etkiyen yüklemeler, kayanın kendi ağırlığından ve taşıyıcı çerperlerinden oluşan yüklemelerdir. Ancak örtü kalınlığının yüksek olduğu tünellerde, örtü yükü sebebiyle oluşan süreksizlikler ve yapılanmalar ile bunların dinamik yönü etkin olmaktadır (Ak, 2005).

4. DEMİRYOLU TÜNELLERİNDE GÜVENLİK

Bugüne kadar meydana gelen kazalarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi tünel güvenliği konusunda yapılabileceklerin ortaya konması açısından çok önemlidir. Tünel kaza raporlarının incelenmesi ile tünelin özellikleri, kazanın neden olduğu gibi sorulara cevap alınabilir. Tünel kazalarının istatistiksel olarak değerlendirilebilmesi için gerekli verileri Tünel profili ve kazanım profili olarak ikiye ayırabiliriz.

Tünel profilinden, tünelin yeri, uzunluğu, mevcut güvenlik sistemleri vb. veriler elde edilmektedir. Kazanın profilinden ise kazanın meydana gelmesine yol açan durum, sonuçlar ve alınan güvenlik önlemleri, kazanın adım adım nasıl meydana geldiğinin anlaşılmasını sağlayacak tüm veriler ve bu tür bir kazanın tekrarlamasının önlenmesi için gereken tüm veriler elde edilmektedir.

Günümüze kadar tutulmuş düzenli bir kaza veri bankası olmadığından tarihi kaza verilerine ulaşılmasında birçok sorunla karşılaşılmaktadır. Bu yüzden elde edilen veriler tam bir istatistiksel analiz yapmaya uygun değildir.

Çizelge 4.1. Rapor edilen tünel kazaları (Krausmann, 2005).

Ulaşım Şekli	Kaza Sayısı	Zaman Aralığı		Sonuçları	
				Ölü	Yaralı
Karayolu	88	13.05.1949	22.06.2004	532	312
Demiryolu	38	06.01.1942	03.08.2004	1354	2658
Metro	49	08.10.1903	02.06.2004	798	1610

Rapor edilen kaza sayıları incelendiğinde karayolu tünellerinde demiryolu ve metro tünellerine göre daha çok kazanın olduğu göze çarpmaktadır (Çizelge 4.1). Yüzde olarak değerlendirildiğinde meydana gelen kazaların %50'sinin karayolu tünellerinde, kaza başına ölü ve yaralı sayıları incelendiğinde meydana gelen kaza sayısı en yüksek olan karayolu tünellerinde kaza başına ölü ve yaralı sayısının en düşük olduğu görülmektedir (Çizelge 4.1). Bunun sebebi demiryolu ve metro ile bir defada taşınan yolcu sayısının karayolunda taşınandan çok daha fazla olmasıdır. Örneğin 1842'de sadece Mendon demiryolu tüneli (Fransa) kazasında kayıtlara 150 kişinin öldüğü kaydedilmiştir (Krausmann, 2005).

Yüksek standartlı demir yollarında, 11 Eylül 2008’de en ciddi tünel kazası Manş Tünelinde (İngiltere-Fransa) olmuştur. Toksik fenol yüklü bir kamyonunda patlama olması sebebiyle kaza gerçekleşmiştir. Bu kazada trende bulunan 12 kişi hayatını kaybetmiştir (Amundsen vd. 1997).

4.1. Yüksek Hızlı Demiryollarında Güvenlik

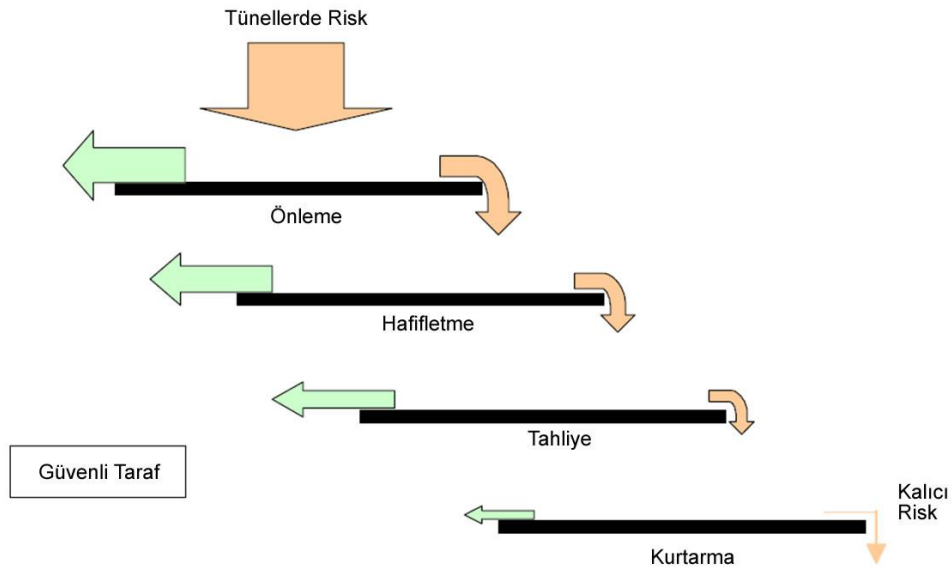
Yüksek hızlı demiryollarında güvenlik kavramı, insan ve demiryolu hatları üzerinde meydana getireceği etkilerini azaltarak, kaza risklerini ya da meydana gelecek kazaları en aza indirme prensibine dayanır.

Dünyada yüksek hızlı demiryolları yatırımlarının hızla artması, Avrupa’da yaygınlaşması ve yeni projelerin hazırlanması bu konu ile ilgili standartların gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Kullanılan standartlar aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Avrupa ülkeleri arası konvansiyonel ve Yüksek Hızlı Demiryolu Sistemlerinde Tünellerde Güvenlik üzerine İnteroperability Teknik Spesifikasyon (TSI, 2008/163/EC),
- IGP-4.4: Platform proje tünellerinde güvenlik önlemlerinin dahil edilmesi için kılavuz (Demiryolu Tünellerinde Korunma Tekniği ve Güvenlik Kılavuzu),
- UIC CODE 779-9 Safety in railway tunnels,
- EN 50126 no’lu yönetmelik,
- Instruction Technique Interministerielle Relative a la Sécurité dans les Tunnels Ferroviaires NFPA-130.

4.1.1. Demiryolu tünellerinde riskler

Risk analizlerinin, demiryolu tünellerinin tasarım aşamasından başlayarak imalat ve işletme aşamasını da kapsayacak şekilde yapılması gerekmektedir. Tünellerde risk değerlendirmesi yapılırken öncelikle tünelde sorun oluşmadan önce öngörülerde bulunarak bu riski önlemeye ya da riski, en aza olacak şekilde atlatma yoluna gidilmelidir. Tünelde öngörülemeyen durumlar meydana geldiğinde risk analizlerine göre önceden oluşturulan tahliye sistem ve yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir. Bu sistem ve yöntemler insanların güvenliğini sağlayarak canlarını kurtaracaktır. Son olarak tahliye işlemi yapılmasına rağmen hala risk devam ediyorsa, yolcular kurtarma operasyonları ile kurtarılmaktadır (Şekil 4.1).



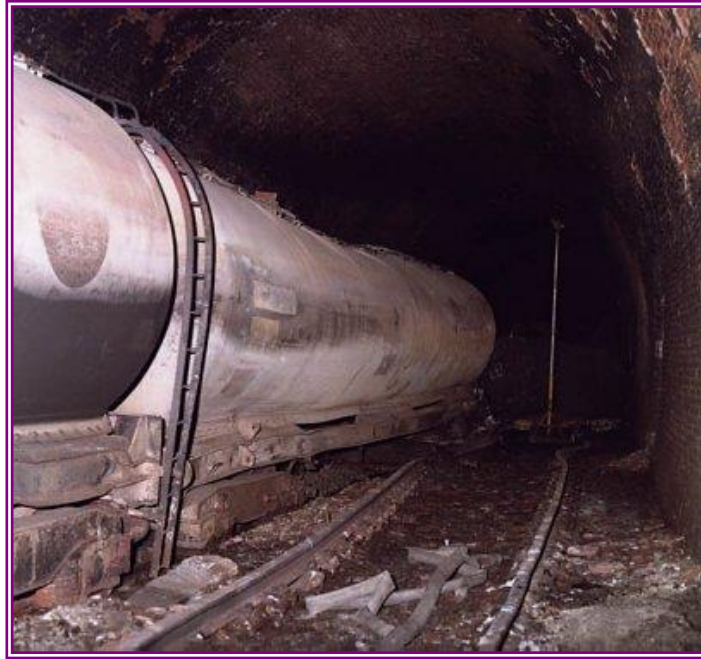
Şekil 4.1. Demiryolu tünellerinde risk ve tedbir akış şeması (TSI, 2008/163/EC).

4.1.2. Risk olay tipleri

Demiryolu tünellerinde risk oluşturabilecek konular Sıcaklık yaratan olaylar, soğuk olaylar ve uzun durmalar olarak sıralayabiliriz.

Sıcaklık yaratan olaylar

Demiryolu tünellerinde en büyük risk işletme sırasında oluşabilecek yangınlardır (Şekil 4.2). Tünellerde oluşan yangınlar sırasında görüş mesafesi azalmakta, duman ve toksik gazlar tünel boyunca yayılmakta, ısı hızla yükselmekte ve havadaki oksijen seviyesi hızla düşmektedir. Bunun sonucunda tünel içinde bulunanlar zarar görmektedir. Yangınlar tünel altyapısına, araçlara ve ulaşım sistemine zarar verebilir. Tünellerde meydana gelen yangınların büyük bir kısmı elektrik arızaları ve aracın alev almasına yol açan diğer problemler arasındadır (UIC 779-9,2003). Sık olmamasına rağmen karşılaşılan diğer nedenler ise çarpışmalar, tünel ekipmanlarındaki teknik sorunlar ve tünellerde devam eden bakım çalışmaları (UIC 779-9,2003) olarak görülmektedir.



Şekil 4.2. Summit Tüneli Yangını Manchester, İngiltere (www.ibb.gov.tr/sites/akom).

Soğuk olaylar

Risk analizi kapsamında demiryolu tünellerinde yaşanan soğuk olaylar, çarpışma ve hattan çıkma olayları olarak sıralanabilir. Bu tür kazalar sonucu yangın veya duman oluşmazken, bu tür olaylar genellikle insan hataları ve iletişim bozukluğundan kaynaklanmaktadır. Bunların dışında yapısal kusurlar da soğuk olayların oluşmasına sebep olmaktadır.

Uzun durma

Demir yolu tünellerinde içerisinde oluşabilecek risklerden biride trenlerin tünel içerisinde uzun süre beklemesidir. Hat veya trende meydana gelebilecek arızalar kaynaklı bu uzun süreli beklemeler zarfında yolcuların tahliye edilmesi gerekebilir.

4.1.3. Demiryolu tünellerinde risk çözümleri

Tünellerde yaşanan risklerin (kaza ve olaylar) giderilmesi yada en aza indirilmesi amacıyla tünelde tedbirler alınmalıdır. Bu tedbirler;

1. Yangın ve duman çıkışı olduğunda şayet tren hareket ediyorsa, mümkün olan en kısa sürede tren tünelden çıkarılmalıdır. Uzun tünellerde yangın trende ise tren

durdurulmalı, yolcular güvenli bir yere tahliye edilmez. Bunun yanında yüksek duman çıkışı olduğunda havalandırma sistemleri devreye sokulmalıdır.

2. Çarpışma ve hattan çıkma olduğunda, tünel içerisinde trenlerin çarpışması veya trenin veya vagonlardan birinin hattan çıkması tünel içerisinde yolcuların tahliye edilmesini ve imdat personelinin müdahale etmesini gerektirmektedir. Bunun yanında acil servis için erişimin olması gerekmektedir.

3. Tünelde uzun durma olduğunda, yolcularda kapalı ortamda panik oluşur. Bu panik ise kontrolsüz ve geliş güzel tahliyeyi doğurur. Kendi kendini tahliye olarak adlandırabileceğimiz bu tahliyeyi yönlendirmek için megafon, bilgilendirme işaretleri, ışıklandırma vb. kullanılabilir.

4.2. Demiryolu Tünellerinde Yapısal Tedbirler

Güvenlik konusunda yapılan çalışmalar sonucunda çeşitli standartlar geliştirilmiştir. Bu standartlar yolcuların olası bir risk durumunda riskli bölgeden güvenli bir şekilde tahliye edilerek riskin daha az olduğu bölgelere uzaklaştırılması ilkelerini kapsamaktadır (TSI, 2008/163/EC).

Demiryolu tünellerinde alınacak olan güvenlik tedbirleri alt yapı ve tesisat tedbirleri olarak incelenebilir. Burada alt yapı güvenlik tedbirleri, tünelin içindeki yolcuların en yakın çıkışa sevk edilmesi, sorunsuz bir şekilde çıkışa ilerlemeleri ve çıkış yapılması olarak sıralanabilir.

Tünel uzunluğuna ve tünel tipine göre (tek ya da çift tüp) kaçış tüneli çeşiti değişmektedir. Tek tüp tünellerde 1000 m'den uzun tüneller risk kapsamında değerlendirilmektedir (UIC 779-9,2003). Birbirini takip eden tüneller arasında 500 m.'den az mesafeye sahip iki tünel tek tünel gibi değerlendirilmeli ve risk analizleri buna göre belirlenmelidir (UIC 779-9,2003).

Uzunluğu 18'km'den daha fazla tüneller özel tasarım ve planlama gerektirmektedir (UIC 779-9,2003). Diamantidis vd. 1999 yılında yayımladıkları makalede uzunluğu 5000 m fazla tünellerde güvenlik açısından tek tüp yerine çift tüp tercih edilmesi gerektiğini söylemişlerdir.

4.2.1. Demiryolu tünellerinde alt yapı tedbirleri

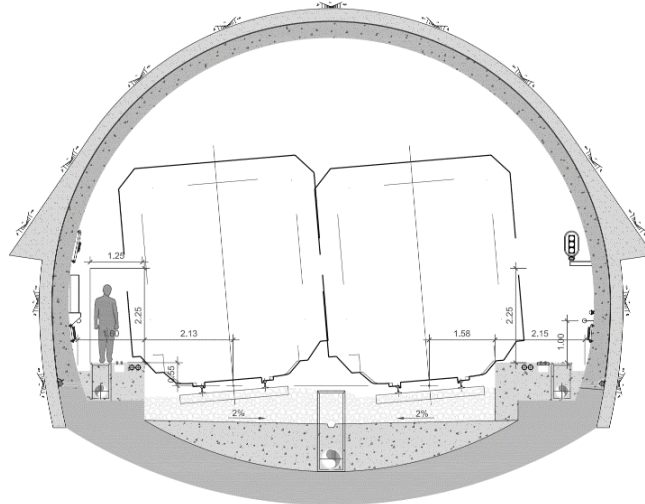
Olası risklere karşı demiryolu tünellerinde proje ve imalat aşamasında risk analizlerine göre yolcuları güvenle tahliye edebilmek için alınması gereken yapısal tedbirlerdir.

Tünelde serbest kısım

Tünel içerisinde herhangi bir sorun olduğunda yolcuların serbest bir şekilde hareket etmelerini, yürüyerek tahliye edilebilmeleri ya da kendi kendine tahliye için ayrılmış bölgeler olarak düşünülebilir. Tünellerde serbest kısım olarak değerlendirilebilecek bölgeler tahliye kaldırımları, tahliye yolları, güvenlik tesisleri, aerodinamik etkiler olarak sayılabilir (UIC 779-9, 2003).

Tünelde tahliye kaldırımları

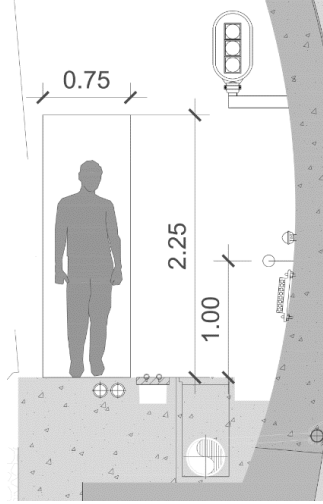
Tünel içerisinde oluşabilecek acil bir durumda yayaların tahliye koridorlarına rahat bir şekilde ulaştırılması temel amaçtır. Tahliye kaldırımlarında yayalara en az 85 m²'lik serbest bölge oluşturulmalıdır (UIC 779-9, 2003) (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Yürüme yolu ve serbest bölge (Yüksel, 2004).

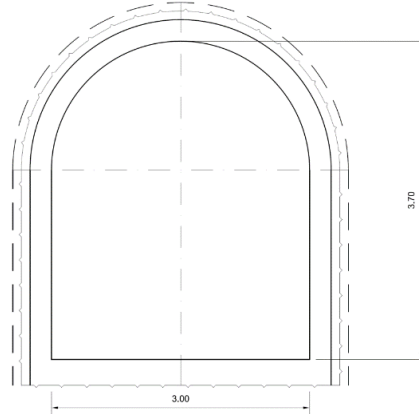
Tünelde Tahliye koridorları

Tünellerde oluşturulması gereken yaya tahliye koridorlarının amacı yolcuların sorunsuz bir şekilde tünelden uzaklaştırılmasıdır. Tünel içi tahliye koridorlarında yürüme yolu genişliği 75 cm, yüksekliği ise 2,25 m. olmalıdır (UIC 779-9, 2003) (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Yürüme yolu genişliği (Poşluk vd., 2012).

Tünel içerisinden riskli bölgeden riskin bulunmadığı alana yayaların ulaşımı için gerekli unsurlardan biriside tahliye alanlarıdır. Bu noktalar tünelde en fazla 1000 m’de bir olmalı ve yaklaşım tüneli şeklinde planlananlar tüneller ise 1000 metreden daha uzun olmamalıdır. Yaklaşım tünelleri sadece yolcu çıkışı için planlanıyorsa 1,50 m genişliğinde ve 2,25 m yüksekliğinde olmalı, kurtarma hizmetleri de düşünülüyorsa 2,25 m genişlik 2,25 m yüksekliği olmalıdır (Şekil 4.5) (UIC 779-9, 2003).



Şekil 4.5. Tahliye ve acil durum müdahale tüneli kesiti (Poşluk vd., 2012).

Çift tüp şeklinde yapılmış tünellerde, acil durumlarda kullanılması için tüneller arası bağlantı tünelleri yapılmalıdır. Bu tüneller en fazla 500 m’de bir yapılmalı ve en az 1,5 m ye 2,25 m olmalıdır. Yaklaşım tünelinin yapılamadığı yerlerde ise diklemesine acil

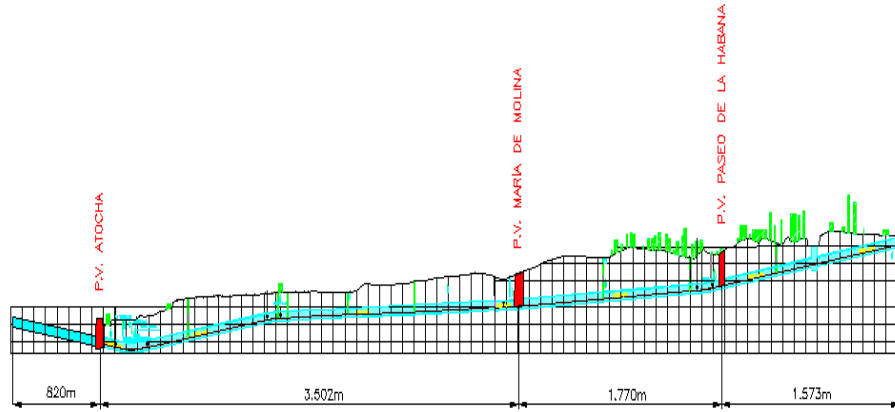
çıkışlar yapılmaktadır. Burada önemli olan nokta tahliye bacasının 30 m'den uzun olmamasıdır. Merdivenler ise minimum 1,2 m genişliğinde olmalıdır.

Tünelde Güvenlik tesisleri

Tünel içerisinde oluşabilecek acil bir durumda, tünel dışarısında kurulacak güvenlik bölgeleri ile olaya ve kazazedelere yardım amacı ile ayrılan bölgelerdir. Bu bölgelerin genişliği en az 500 m² ve ana tünele en fazla 1000 m uzaklıkta olmalıdır. Ek olarak kurulacak olan bölgelerin kara yoluna ulaşımı sağlanmalıdır.

Tünelde Aerodinamik etkiler

Tünelde, trenin geçişi sırasında geçici karakterde olmak üzere indüklenmiş bir hava akımı oluşur. Bu durum hat yakınlarında bulunan nesne ve insanlar üzerinde önemli güç etkisi yaratır. Bu etki konfor ve sağlık için gerekli olan tünel kesitini hesaplaması zorunluluğunu doğurur. Buna ek olarak çeken ve çekilen araçlarda aerodinamik dizaynın iyi planlanarak yapılması, yüksek dinamik sızdırmazlık önlemlerinin alınması, alt yapı inşaatı sırasında bacalar yardımıyla tünelde oluşacak türbülansın azaltılması, gözenekli duvarların yapılması ve ağızda konik şekil verilmesi olarak sıralayabiliriz (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Havalandırma bacaları gösterimi (Poşluk vd., 2012).

4.2.2. Tesisat tedbirleri

Tünel güvenliği, alt yapı tedbirleri ile birlikte güvenlik ve işletme sırasında devamlılığı sağlamak amacı ile tesisat tedbirleri alınmalıdır. Tesisat tedbirlerini gereken ve tavsiye edilen olarak 2 başlık altında incelemek mümkündür. EN 50126'ya göre tünel içerisinde gereken tedbirlerini, acil durum ışıklandırması (500 m'den Uzun tünellerde),

taahliye sinyalizasyonu, su tedariki, CIL iletişim sistemi (UIC 779-9, 2003) olarak sıralayabiliriz (şekil 4.7)



şekil 4.7. Acil durum ışıklandırması ve acil durum ıkışı (Poşluk vd., 2012).

Ek olarak alınması gereken zorunlu önlemlerin yanında, tavsiye niteliğinde olan tünel içi tesisat önlemleri de bulunmaktadır. Bunları havalandırma, enerji tedariği (5000 metreden uzun tünellerde), saldırı tespit, erişimlerin kontrolü, video izleme, yangın ve gaz tespiti, elektrik gücünün yüksek kullanılabilirliği, hava hattının segmentasyonu, tesisatların monitörle gözlenme ve uzaktan kumandası (UIC 779-9, 2003) olarak sıralayabiliriz.

5. TÜNEL İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

5.1. Demiryolu Tünellerinde Güvenlik Çalışmaları

Eisner ve Stoop (1992), çalışmalarında İngiltere ve Fransa arasında yapılan kanal tüneli içinde olası; raydan çıkma, tehlikeli madde (patlayıcı- toksik madde) taşınması, deprem, terörizm gibi tehlikeleri ve bu tehlikelere karşı geliştirilen güvenlik tedbirlerini incelemiştir. Tünelin bağlandığı iki ülke (Fransa-İngiltere) arasında büyük bir gizlilikle uygulanan çalışmalar esnasında yaşanan gelişmeleri ve buna göre alınabilecek güvenlik önlemlerini anlatmışlardır. Çalışmada alınması düşünülen önlemlerden en önemlisi yangın emniyetinin sağlanması olmuştur. Yapılan araştırmalara göre en büyük tehlikelerden birinin yolcu trenlerinin lokomotiflerinde bulunan yakıt (çoğunlukla petrol ürünü) depolarından kaynaklandığı, çift katlı vagonlarda yakıt miktarının kişi başına 20 litre civarında olduğu varsayılarak bu yakıt miktarının çok büyük bir tehlike olduğu vurgulanmış, olası bir tehlike anında büyük can kayıpları yaşanabileceği düşünülerek yangın için gerekli önlemler alınmıştır. Daha önce yaşanan tünel yangın olaylarında yolcuların vagonları terketmediği görülerek, halojen içeren otomatik yangın sistemlerinin vagonlara eklenmesi bir önlem olarak düşünülmüştür. Alınacak önlemlerden bir diğeri ise yine yolcuların vagonlardan ayrılmaması sebebiyle yapılması gereken servis tünelleri ve çapraz geçişlerin sayısını azaltılması, böylelikle tünelin yapım ve güvenlik maliyetinin düşürülebileceği olmuştur.

Odgart vd. (1994), çalışmalarında Danimarka sınırları içerisinde bulunan Zealand ve Funen adaları arasında yapılan 8 km. uzunluğundaki çift tüplü Storebaelt tünelinin yapım ve tasarım ilkelerini incelemiştir. Çalışma kapsamında Storebaelt tüneli tasarımı için 2 önemli özellik vurgulanmıştır. Bunlardan birincisi hem ana tünelin hem de iki tüp arasında yapılacak olan güvenlik (kaçış) tünellerinin imalatını kolaylaştırmak amacıyla su sızdırmazlığını sağlamak diğeri ise yapının eskime, gerilme ve korozyon risklerine karşı korunması olarak vurgulanmıştır. Çalışmada tünel segmentlerinde oluşabilecek korozyonu önlemek amacıyla segmentlerin klorürlerin aşındırıcı özelliklerine karşı özel geliştirilmiş korozyon hücreleri ile donatılması gerektiği vurgulanmıştır. Su sızdırmazlığını sağlayabilmek amacıyla tünel boyunca bir drenaj sisteminin kurulması, dalgıç pompalar ile suyun tünelden uzaklaştırılması, su basıncını kontrol etmek amacıyla piezometre kullanılarak ölçüm istasyonlarının kurulması gerektiğini söylemişlerdir.

Diamantidis vd. (1999), çalışmalarında tünel tasarımlarında güvenlik konusunun da düşünülerek yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. Kaza ve olayların meydana gelme olasılığı düşük olsa da bu tür olayların sonuçlarının felaketle sonlanacağı düşünülerek, risk analizleri ve güvenlik prosedürlerinin tartışılarak, risk azaltma ve gerekli güvenlik önlemlerinin alınması gerektiği anlatılmıştır. Çalışma kapsamında dünyanın en uzun tünelleri güvenlik açısından incelenerek risk analizlerine göre tünellerde alınabilecek güvenlik önlemleri; olayları önleme, olayları azaltma önlemleri, kişisel kurtarma önlemleri, kurtarma ve ilk yardım önlemleri olarak dört kategoriye ayrılarak fayda ve maliyet hususları göze alınarak incelenmiş, alınması gereken önlemler sıralanmıştır. Olayları önleme kapsamında 5 km'den uzun tünellerin çift tüp olarak dizayn edilmesi, otomatik tren kontrol sistemi kurulması, olay meydana geldiğinde trenleri otomatik olarak durdurabilecek otomatik fren sistemlerinin kurulması, yangın dedektörlerinin konulması önerilmiştir. Azaltma önlemleri olarak; tünel içinde olay anında acil frenleme sistemlerinin devre dışı bırakılarak trenin tünelden yavaş bir şekilde çıkarılması, yangına dayanıklı (en az 30 dk.) gaz sızdırmayan vagonların yapılması, trende ve tünelde yangın söndürme ekipmanlarının bulundurulması, dikey veya yatay havalandırma bacaları ya da vantilatörler ile havalandırma sistemlerinin kurulması gerektiği vurgulanmıştır. Kendini kurtarma önlemleri olarak, uygun kaçış yolları yapılması, tünel içerisinde acil durum telefonlarının bulundurulması, her 50 m.de bir aydınlatıcı çıkış işaretlerinin konulması, acil durum çıkışlarının yapılması belirlenmiştir. İlk yardım önlemleri olarak ise tren personelinin eğitilmesi, acil çıkış noktalarında helikopter pistlerinin yapılması, toplanma alanları ve bağlantı yollarının yapılması ve acil kurtarma araçlarının bulundurulması önerilmiştir.

UIC-e779x9 Standardı (2003), ile demiryolu tünellerinde güvenliği arttırmak için gerekli olan önlemler anlatılmıştır. Bu standartta tüm önlemler maliyet etkinlikleri de dahil olmak üzere ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Bu standart uzunluğu 1000m.'den daha uzun tüneller ile yolcu ve yük trafiği günde 200 trenden az olan hatlarda alınacak önlemleri kapsamakta olup, kentsel alanlardaki yeraltı platformlarını ve metroları kapsamamaktadır. Bu standartta esas alınan prensip; kazaları önleme, kaza etkilerini azaltma ve kendini kurtarma adımlarını izlemek üzerine kurulmuştur.

TSI 163/EC, (2008), bu standart ile dünya genelindeki demiryolu tünelleri için standart oluşturulmuştur. Standartın amacı, altyapı, enerji, komut kontrolü için tutarlı bir

dizi önlem tanımlamaktır. Bu standartta uzunluğu 1 km'den fazla 20 km'den az tüneller için alınacak önlemler sıralanmış, 20 km'den daha uzun tüneller için daha spesifik önlemler alınması gerektiği belirtilmiştir. Birbirini takip eden tünellerde ise 500m'den daha fazla açık hava bulunması durumunda tünellerin tek tünel olarak kabul edilmemesi gerektiği belirtilmiştir.

Standartta yangın güvenliği kategorilere ayrılarak, uzunluğu 5 km'ye kadar olan ve yandan tahliye imkanı bulunan tüneller A kategorisi olarak belirlenirken, demiryolu araçları ve vagonlar ile tünellerde alınan diğer önlem uygulamaları B kategorisi olarak belirtilmiştir. Terörizm nedeniyle oluşabilecek olaylar, tünellerde bakım işlerinde çalışan personelin sağlığı, tünel içindeki trenlerin aerodinamik etkilerinden doğan güvenlik sorunları ve raydan çıkan trenlerin tünel yapısı üzerindeki etkileri bu standart kapsamında tutulmuştur.

Poşluk vd. (2012), çalışmalarında Ankara İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesinde yer alan 36 numaralı tünel için alınabilecek güvenlik önlemlerini incelemiştir. Bu çalışmada tünellerde güvenlik sorunu doğurabilecek olaylar 3 kategoride sınıflandırılarak, tünellerde alınabilecek yapısal önlemler incelenmiştir. Araştırmacılar T36 tüneline güvenlik önlemi olarak paralel tünel yapılmasının yüksek maliyetli uzun zaman alacağı, yaklaşım tüneli ve kaçış bacaları yapılması durumunda ise daha ekonomik ve kısa süreli olacağı sonucunu ortaya koymuşlardır.

Poşluk ve Korkanç (2017), çalışmalarında farklı güvenlik tüneli modellerini karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar çalışma konusu tünelde; paralel tünel yapılması, yaklaşım tüneli ve kaçış bacası yapılması ve ray altı güvenlik tüneli yapılması alternatiflerini maliyet ve süre faktörlerine göre yaptıkları değerlendirmelerde, ray altı ekipmanların rijit seçilmesi kaydıyla uygulanması en ekonomik, hızlı ve uygulanabilir altyapı tünel güvenlik önerisinin ray altı kaçış tüneli olduğu sonucuna varmışlardır.

5.2. Tünellerde Modelleme Çalışmaları

Özsan (1991), çalışmasında, Alaköprü- Ilısu kuvvet, tüneli boyunca bulunan kaya birimlerinin mühendislik jeolojisi ve jeoteknik açıdan inceleyerek kaya kütle kalitesinin saptanması ve en uygun destek sisteminin bulunmasını ele almıştır. Araştırmacı tünel zeminlerini RSR sınıflama sistemine göre sınıflandırmış olup destek sistemlerini bu sınıflandırmaya göre belirlemiştir. Yapılan sınıflamalar sonucunda bulunan RSR değerleri abaklar ve tablolarda bu değerlere karşılık gelen karşılık gelen iksa, bulon ve

püskürtme betonundan oluşan destek sistemlerini açıklamıştır. Buna göre RSR değeri 52 olarak belirlenen tünel bölümünde; 1 m. Aralıklı bulonlar ve 75 mm. kalınlığında püskürtme betonu veya 1,2 m. Aralıklı çelik kafes (3H20 ebadında), RSR değeri 57 olarak belirlenen bölümde; 1,5 m. Aralıklı bulonlar ve 57 mm. Kalınlığında püskürtme betonu, RSR değeri 40 olan bölümde ise 80 cm. aralıklı bulonlar ile 120 mm. Kalınlığında püskürtme betonu veya 63 cm. aralıklı çelik kafes (6H20) desteleme sistemi olarak önerilmiştir.

Singh ve Goal (1999), kaya mekaniği sınıflama sistemlerinin felsefesini ve gelişim süreçlerini detaylarıyla anlatarak özellikle mühendislik uygulamalarındaki kullanım şekilleri üzerinde durmaktadırlar. Özellikle tünel tasarımında kaya mekaniği sınıflama sistemlerinden ne şekilde yararlandığı konusunda ayrıntılı bilgi vermektedirler.

Kılıç ve Anıl (2000), çalışmalarında Tarsus Ayrımı- Adana- Gaziantep Otoyolu'nun Bahçe (Osmaniye) yöresinde bulunan 550 metre uzunluğundaki T2 (Ayran) tüneline, kaya kütleli sınıflarına bağlı olarak yapılan kazı çalışmaları ve sağlamlaştırma yöntemlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemine (NATM) göre 3 farklı kaya sınıfı belirleyerek tünel kazı ve destekleme sistemlerini buna göre seçmişlerdir. Kazı ve destekleme sistemlerinin uygun seçilmesi sonucunda aşırı sökümler ve deformasyonların önlendiğini ve püskürtme beton kaybını azaldığını tespit etmişlerdir.

Jupp (2000), tünelleri teknik yönleri ile ele alarak tünel yapımı hakkında bilgiler vermiş ve neden tünel yapılması gerektiğine ışık tutmaya çalışmıştır. Tünel açmanın zorluklarını anlatarak, bu zorlukları bertaraf etmek için mühendislik çalışmaları ve çözüm önerilerini sunmuş ve tünellerin terimlerini açıklamıştır.

Koçkar ve Akgün (2003), çalışmalarında Antalya-Alanya Karayolu üzerinde bulunan Ilıksu 1 ve Ilıksu 2 adı verilen iki adet otoyol tüneli projesi boyunca kaya kütleli mühendislik jeolojisi özelliklerini değerlendirerek ve uygun destek önerileri sunmuşlardır. Tünel giriş ve çıkış portallarında şev stabilitesi Slope/W (Slope international 1999) bilgisayar programında Bishop yöntemine göre analiz edilerek, şev destekleme sistemlerini belirlemişlerdir. Tünellerin kazı ve destekleme sistemleri ise Phase 2 bilgisayar programında sonlu elemanlar yöntemi (SEM) ile analiz edilerek tespit

edilmiş olup, destek elemanlarının yerlerine konulmasından sonra ikincil yer değiştirmelerin büyük ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Park (2004), çalışmasında tünellerin açıldığı zemini tahmin etmek için elastik çözümler sunmaktadır. Çalışmada yumuşak zeminlerde, oval şekilli zemin deformasyon modelinin etrafındaki yer değiştirmenin sınır koşulu olarak uygulanmasıyla tünel açılması ön görülerek, dairesel şekilli sığ ve derin yumuşak (Kil) zeminde açılan tüneller için, dairesel şekilli yer değiştirme (deformasyon) şablonu sunulmuştur. Beş farklı vaka üzerinde yapılan çalışma sonrasında analitik çözümler ile arazi gözlemlerinin uygunluk içinde olduğu belirtilmiştir.

Ayhan ve Topal (2005), çalışmalarında, Dicle-Kralkızı su tüneli, (Türkiye) tasarımının yapımı ve desteği sırasında kazanılan deneyimler aktarılmaktadır. Yapılan çalışmada aşırı sökümler ve yüzey çökmesi de dahil olmak üzere tünel stabilite problemleri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde yüzeysel (sığ) tünellerde ve zayıf kaya sistemlerinde tünel kazı (%27,23) ve destek (34,51) zamanlarının fazla olduğu, güçlü kaya formasyonlarında ise kazı (%24) ve destek (%25) zamanlarının azaldığı görülmüştür.

Singh vd. (2006), tünel ve tünelcilik çalışmalarına ait kaya kütle sınıflandırma yaklaşımları, farklı tünel açma yöntemleri (NATM, TBM), kazı ve destek sistemleri hakkında bilgi vermişlerdir.

Gestao vd. (2006), Portekiz’de 16-16 Nisan 2004 tarihlerinde açılan “Kaya Tünellerinde Jeoteknik Risk (Course on Geotechnical Risk in Rock Tunnels)” kursuna katılan farklı ülkelerden ünlü tünelcilik uzmanlarının konu ile ilgili çalışma ve önerilerini anlatmışlardır. Burada bu kursun ana hedefinin tünel açma konusunda rehberlik etmek ve tünel açma aşamalarında izlenecek prosedürleri ortaya koyarak, tünel açma risklerini en aza indirmek olduğu vurgulanmıştır.

Ulusay ve Sönmez (2007), Kaya kütlelerinin tanımlanmasında kullanılan özellikleri ISRM standartları çerçevesinde inceleyerek, kaya kütle sınıflama sistemleri ve bu sistemlerin mühendislik çalışmalarındaki kullanım şekillerini anlatmışlardır. Çalışmada kaya mühendisliği bilim dalının önemi vurgulanmış olup, bu kitap mühendislik öğrenimi ve uygulamalarında bir kaynak olarak kullanılmaktadır.

Satır (2007), çalışmasında Trabzon 2 ve Arhavi” tünellerinde oluşan deformasyonları, Trabzon 2 tüneline Sonlu Eleman Yöntemleri ve 2 boyutlu

modellemeler ile Arhavi tünelindeki deformasyonları ise jeodezik ölçüler ve sonlu elemanlar yöntemiyle 3 boyutlu olarak belirlemiştir. Uygulanan farklı yöntemlerden belirlenen sonuçlar karşılaştırılarak deformasyonların daha gerçekçi yorumlanması yapılmıştır. Sonuç olarak büyük mühendislik yapılarında deformasyonların belirlenmesi için, jeodezik, geoteknik ve sonlu elmanlar yöntemlerinin beraber kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Romero vd. (2007), çalışmalarında geniş killi seviyeleri sunan volkanik kökenli kaya oluşumlarında kazılan Trasvasur tünellerinde (Kanarya Adaları, İspanya) yapılanlar anlatılmıştır. Zeminin genleşmesinden (şişmesinden) kaynaklanan sorunlar nedeniyle uzun yıllar önce terkedilen tüneller, yapılan jeoteknik uygulamalar ile açılabilmiştir. Bu çalışmada killi zeminlerde tünel yapılırken dairesel kesitlerin kullanılması ve kazı yüzeylerinin en kısa sürede kapatılması gerektiği önerilmektedir.

Yağcı (2008), çalışmasında, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu hakkında bilgiler verilerek, Kocatepe ve Kaletepe tünellerinin genel özelliklerinden ve yapım aşamalarından bahsedilmiştir. Tünel yapımında gerçekleşen imalatlar olan kazı, iksa, bulon, püskürtme beton miktarları belirtilerek, tünel nihai kaplamasının donatısız olarak tasarlandığı vurgulanmıştır.

Köse vd. (2008), kaya kütle sınıflamaları, kaya tahkimat şekilleri, kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri gibi temel konular hakkında bilgiler verilerek tünel ve saft gibi yapıların imalat adımları belirtilmiş ayrıca kuyu açma yöntemleri ve kuyu tahkimat sistemleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Kolymbas (2008), tünel ve tünencilikle ilgili tüm bilgileri kronolojik bir biçimde vermektedir. Kitapta tünel modellemesi ve tünel imalatından sonra tünelin izlenmesine yönelik bilgiler sunulmakta olup tünel açmayı kolaylaştırıcı bilgiler verilmekte ayrıca kaya mekaniği ve zemin mekaniği disiplininin ilkeleri anlatılarak bu ilkelerin destek yapıları ile etkileşiminin önemine vurgu yapılmaktadır.

Idris vd. (2008), çalışmalarında, yığma taş kaplama ile desteklenen eski bir tünelin Evrensel Farklı Eleman Kodu (UDEEC) tarafından geliştirilen iki sayısal modelleme ile incelenmesini anlatmışlardır. Çalışmada tonoz ve taş kaplamalar ile ilgili önceki çalışmaları inceleyerek, yığma taş yapılar için; ayrıntılı mikro-modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olmak üzere 3 modelleme stratejisi belirlemişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmada “basitleştirilmiş mikro Modelleme”

stratejisini kullanarak tonozlu taş yapılarda çekme dayanımı faktörünün etkili olmadığını, bu tür yapıların sıkıştırma ile yüklendiğini belirleyerek, yaptıkları simülasyonda yeraltı suyu ve elastik modül parametre değerlerinin hangi miktarda olursa olsun duvarın yapısını bozmadığını gözlemlemişlerdir.

Polat (2010), çalışmasında NATM metodu hakkında geniş bilgi verilerek, NATM metodu kullanılarak yapılan ve Karadeniz sahil yolunda yer alan Arhavi tüneli verileri, sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Plaxis 8.2 programı ile modellenerek analiz edilmiştir. Yapılan analiz ile tünel kazısı esnasında oluşabilecek gerilme yönelimi ve kırılma noktaları belirlenerek, kazı esnasında özel dikkat gerektiren yerler ortaya çıkarılmıştır. Yapılan analiz sonucunda Arhavi Tünel güzergahında öngörülen tahkimat sisteminin yeterli olduğu ve tünelin güvenli bir şekilde açılacağı belirlenmiştir.

Kun (2010), çalışmasında, zayıf kaya ortamları ve fay zonlarında tünel açma, tasarım ve yapım gereksinimleri, ampirik, analitik, gözlemsel ve sayıl modelleme teknikleri kullanılarak araştırmıştır. Yapılan araştırma sonucunda İzmir Metrosu II. aşama Üçyol-Fahrettin Altay güzergahı ele alınarak, zayıf kayalarda ve fay zonlarında tünel açımında, hangi parametrelerin değerlendirilmesi gerektiği, ampirik, analitik ya da sayısal modellemeler kullanılarak elde edilen verilerin hangisinin ya da hangilerinin daha iyi sonuç verdiği, değerlendirilmiştir. Çalışmada ayrıca hat güzergahı üzerinde ve fay zonu içeren bölgede yeryüzü deformasyonlarının sayısal değerleri incelenmiştir. Yapılan değerlendirmede deformasyon değerlerinin zamana bağlı olarak değişiklik gösterdiği ve 261 günlük bir süre sonunda 4,63 mm.lik deformasyon kaydedildiğini, bu deformasyon miktarının literatürde belirtilen 10 mm.lik sınırın altında kaldığı vurgulanmıştır.

Huang vd. (2010), çalışmalarında iki boyutlu, deformasyonel yer değiştirmenin, öteleme ve dönme yer değiştirmesinden ayırt edilmesi için bir yöntem sunmuşlardır. Araştırmacılar yaptıkları çalışma ile hareketliliğin profilini ölçebilmek için geliştirdikleri bu yöntemde; profilin lazerle aydınlatılmış görüntüsünü profil noktalarındaki koordinatlara dönüştürerek hızlı ve basit bir şekilde ölçüm yapılabileceğini ortaya koymuşlardır. Bu yöntemle dayanarak, çeşitli yükleme koşulları altında bir profilin net deformasyonlu yer değiştirmelerinin elde edildiğini söylemişlerdir.

Sakız (2012), çalışmasında, sığ tünellerin Phase2 bilgisayarlı analiz programında modellenmesi yapılarak bu tür tünellerde duraylılığı etkileyen faktörler araştırılmış ve bu tip yapılarda karşılaşılan yenilme mekanizmaları incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda

kaya kütlesi kalitesinin düşük olduğu durumlarda duraysızlık potansiyelinin arttığı ve sığ tünellerde derinliğin artmasıyla duraylılığın azaldığı gözlemlenmiştir.

Kaya (2012), çalışmasında, Hopa-Borçka karayolunun 7+980-13+208 kilometreleri arasında çift tüp olarak inşa edilmesi planlanan Cankurtaran (Hopa-Artvin) Tüneli'nin proje güzergahında ve çevresinde yer alan birimler, jeoteknik açıdan incelenerek bu birimler RMR, Q, R_{Mi}, NATM ve GSI sistemlerine göre sınıflandırılmış ve tünel için ampirik ön destek elemanları belirlenmiştir. Tünel farklı bölümlere ayrılarak, "Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)"ne göre her bölüm için farklı desteklemeler ile sayısal analizleri yapılmıştır. Yapılan sayısal analizler sonucunda, ampirik ön destek tasarımının derin yeraltı kazılarında deformasyonları azaltmada yeterli olmadığı ve sayısal analizlerle desteklenmesi gerektiği saptanmıştır. Ayrıca, sayısal analizler için kullanılan girdi parametrelerinin, açılan az sayıdaki temel sondajlarından ve mostra ölçümlerinden elde edildiği ve kaya kütle özelliklerinin tünel kotunda daha iyi olabileceğinin göz ardı edilmemesi gerektiği vurgulanmıştır.

Selman (2014), çalışmasında, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ile kazılmış geniş gabarili bir makas tünelinin açılması esnasında oluşabilecek oturmaları belirlemek amacıyla Plaxis bilgisayarlı analiz programında sonlu elemanlar yöntemine modelleme yapılarak gerekli analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda tünel kazısı nedeniyle zeminde meydana gelebilecek oturmalar ve zemin davranışı belirlenerek, bu durumun kazı etki alanı içerisindeki mevcut yapılara olan etkisi incelenmiştir. İnceleme sonucunda zeminde %0,1'lik bir hacim kaybı yaşandığında yüzeysel oturma miktarının 6 mm. civarında olacağı, bu miktardaki bir oturmanın binalara zarar vermeyeceği, %0,5'lik hacim kaybında oturma miktarının 28 mm. olacağı, bu miktarın yüzeydeki binalarda hafif hasara sebep olabileceği, kötü bir senaryo ile hacim kaybının %1 olması halinde oturma miktarının 57 mm'lik bir oturmanın söz konusu olacağı, bu durumun yüzeydeki binalarda ağır hasara yol açacağı belirlenmiştir. Oturmaların izlenebilmesi için çevredeki binalara okuma noktalarının kurularak, bina hareketlerinin izlenmesinin gerektiği vurgulanmıştır.

Satıcı ve Topal (2015), çalışmalarında, tünel tasarımında yaygın olarak kullanılan tünel açma yöntemlerinin, uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflama sistemleri ve sayısal modeller ile olan ilişkisi ve uygulamada yaşanan sorunlar otaya konulmuştur. Bu çalışmada; kaya kütle sınıflamalarından tünel kazı ve destek sınıflamalarına geçiş, bunların sayısal modellemelere yansıtılması, yapılan kabuller ve özellikle sayısal

modelleme sırasında yazılımların dayandığı kabullerden kaynaklanan mühendislik jeolojisi modelleme hataları ve doğru tasarım için dikkatli bir çalışma yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmada sayısal modellemelerden elde edilen sonuçların tünel kazısı esnasındaki gerçek ayna, kazı ve deformasyon kayıtları ile sürekli karşılaştırılması gerektiği, proje öngörülerine göre sapma olan yerlerde revizyonların yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Taz (2016), çalışmasında, Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünellerinin kaya birimleri, uygulanan kazı-destek sistemleri ve gelişen problemler dikkate alınarak tüneller için sonlu elemanlar yöntemine göre iki boyutta sayısal analiz yapmıştır. Yapılan analizler ile tünel içerisinde gelişen problemlerin nedenleri ortaya konmaya çalışılmış, özellikle aşırı sökülme ve deformasyonların olduğu alanlardaki jeo-mühendislik anlamdaki sınır koşullar tariflenmeye çalışılmıştır. Bunun yanında, ön çalışmalar sırasında önerilen jeo-mühendislik parametrelerinin karşılaşılan kaya özellikleri ile uyummadığı vurgulanmıştır.

Yılmaz (2017), çalışmasında, Ordu Çevre Yolu Projesinde yapılan Boztepe Tünelinde meydana gelen aşırı sökümleri incelemiştir. Kazı çalışmaları sırasında oluşan aşırı sökümler, süreksizlik düzlemlerinin etkileri kinematik ve analitik analizler yoluyla değerlendirilmiş geriye dönük analiz yoluyla bu sökümlerin sebepleri araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda süreksizlik düzlemlerinin özellikleri ve yenilme parametreleri ile süreksizlik konumunun tünel eksenine ile olan ilişkisinin önceden belirlenmesinin tünel imalatlarında ilerleme hızı ve güvenliğini artırarak, tünel açma maliyetlerinin düşüreceği vurgulanmıştır.

Hiçyılmaz (2017), çalışmasında, Ankara – Sivas Demiryolu T5 tüneli güzergahı boyunca her bir yapısal bölge için kazı yönteminin belirlenmesini anlatmıştır. Çalışmada kazı yönteminin belirlenebilmesi için, kaya kütlesi tipi, süreksizliklerin tipi, kayanın bozuşma derecesi gibi bilgiler kullanılarak kaya tipinin 3 ana gruptan A (Duraylı), B (Gevşek), C (Baskılı) hangisine girdiğinin belirlenmesi gerektiği, belirlenen bu kazı sınıflarına göre destek sistemlerinin (İksa, bulon, püskürtme beton) seçilmesinin gerektiği vurgulanmıştır.

6. ÇALIŞMA ALANININ GENEL ÖZELLİKLERİ

6.1. Coğrafi Konum

35 nolu tünel, Bozüyük ilçesi ve İnönü ilçesi arasında, Bozüyük'ün 1 km batı-güneybatısında yer almaktadır. Çok yüksek engebeli olmayan bir güzergahtan geçen tünel güzergahında örtü kalınlığı 10 ile 86 m arasında değişmektedir.

6.2. Yerleşim ve Ulaşım

Çalışma alanı kalabalık bir nüfus barındıran Bozüyük şehir merkezinin güneyinde bulunmaktadır. Bozüyük çevre yoluna komşudur. Ana tünelin çıkış kısmı Toplu Konut İdaresi (TOKİ) tarafından yaptırılan yerleşim bölgesinde bulunmaktadır. Güvenlik Tüneli 2 ise Sarar Alışveriş merkezi arkasında yer almakta olup, ulaşım oldukça rahattır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. T35-GT2 tüneli giriş portalı (Bozüyük)

6.3. İklim ve Bitki Örtüsü

Koçman (1993) bu tez çalışması alanını içine alan bölgenin iklim tipi ve ilkim bölgeleri sınıflandırması ile ilgili çalışmıştır. Araştırmacı, bölgenin yarı kurak İç Anadolu iklimi ile yarı nemli Marmara iklimi arasında bir geçiş iklimi hâkim olduğunu, en yüksek sıcaklığın temmuz ayında olduğunu (41,5 derece), en soğuk ayın ise Şubat olduğunu söylemiştir (-14,5 derece). Ayrıca bölgenin, ülke ortalamasının üzerinde yağış aldığını söylemiştir (<http://www.dmi.gov.tr>).

6.4. 35 Nolu Tünel Jeolojik Özellikleri

35 nolu tünel 3255 metre uzunluğundadır. Tünel güzergahının giriş kısmında, grimsi koyu yeşil-gri renkte Bözüyük Granitoyidi yüzeylemektedir. Çıkış kısmında ise Miyosen yaşlı Porsuk formasyonu ve bunun da üzerine uyumlu gelen Akpınar formasyonu bulunmaktadır.

6.5. 35 Nolu Tünel Güvenlik Tünelleri

6.5.1. Güvenlik Tünelleri ve Güzergah özellikleri

3255 metre uzunluğundaki 35 numaralı tünelin güvenliğinin sağlanabilmesi amacı ile alt yapı güvenlik tedbirleri kapsamında 2 çıkış noktası arası maksimum 1000 metre olacak şekilde 3 adet güvenlik tüneli projelendirilmiştir. Söz konusu güvenlik tünelleri ise Bozüyük çevre yolunda ve yaklaşık kuzey-güney şeklinde ana tünelleri kesmektedir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. T35 ve emniyet tünelleri uydu görüntüsü.

290 metre uzunluğunda olan T35-G1 tüneli, 35 nolu tüneli Km: 233+520'da kesmektedir. T35-GT1 tüneli taban kotu 778 m'de başlamakta, tünel boyunca %7,5 eğim ile 35 nolu tüneli 758 m kotunda kesmektedir. Tünel üzeri maksimum örtü kalınlığı 45 metredir.

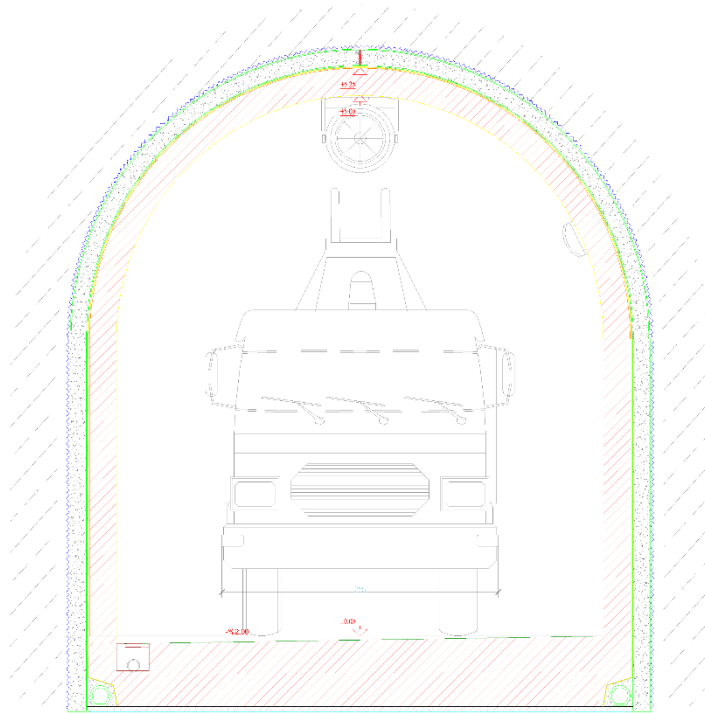
T35-G2 tüneli 224 m uzunluğundadır ve T 35 nolu tüneline Km: 234+365'de kesmektedir. T35-GT2 tüneli taban kotu 780 m'de başlamakta, tünel boyunca %6 eğim

ile 35 nolu tüneli 769 m kotunda kesmektedir. Tünel üzeri maksimum örtü kalınlığı 67 metredir.

181 metre uzunluğundaki T35-G3 tüneli 35 nolu tüneli km: 235+210,00'da kesmektedir. T35-GT3 tüneli taban kotu 791 m'de başlamakta, tünel boyunca %7,5 eğim ile 35 nolu tüneli 780 m kotunda kesmektedir. Tünel üzeri maksimum örtü kalınlığı 44 metredir.

6.5.2. Güvenlik Tünel Kesiti

Demiryolları tarafından uygulanan güvenlik tüneli kesiti acil durumlarda itfaiye geçişleri de düşünülerek 4,5 metre genişlik ve 5 metre yükseklik olacak şekilde seçilmiştir. Şekil 6.3'de de görüleceği gibi at nalı kesit ile imalatlar yapılmaktadır.



Şekil 6.3. Demiryolları tarafından uygulanan güvenlik tüneli tip kesiti.

6.4. Depremsellik

Çalışma alanı, Deprem Bölgeleri Haritası verilerine göre 2. Derece Deprem Bölgesi'nde bulunmaktadır. Bu bölgeler için etkin yer ivmesi katsayısı; $a_0=0.30$ olarak verilmektedir (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1. Deprem bölgelerine göre etkin yer ivmesi katsayıları (<https://deprem.afad.gov.tr/>).

Deprem Bölgesi	Etkin Yer İvmesi (A _o)
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10



Şekil 6.4. Bilecik ili depremsellik haritası (<https://deprem.afad.gov.tr/>).

6.5. Önceki Çalışmalar

Önceki araştırmacılar tarafından bölgenin jeolojisi hakkında farklı çalışmalar yürütülmüş olup bu bölümde detaya girilmeden genel hatlarıyla bu çalışmalar özetlenmeye çalışılmıştır.

Okay (1981), Tavşanlı bölgesinin kuzey doğusunda yaptığı çalışmada, bu bölgedeki ofiyolitli melanj birimlerinin yüksek basınç/düşük sıcaklık koşullarında mavişist fasiyesinde metamorfizma geçirmiş olduklarını ifade eder.

Gözler vd. (1985), "Eskişehir ve civarının jeolojisi sıcak su kaynakları" isimli makalelerinde Eskişehir ili çevresi ve kuzey bölümünde bulunan birimleri ayrıntılı olarak çalışmışlardır.

Koçyiğit vd. (1991), "İnegöl-Bilecik-Bozüyük Arasında Kalan Alanın Jeolojik Etüdü" isimli TPAO Proje çalışmalarında, bölgede bulunan jeolojik birimler ayrıntılı olarak incelenmişlerdir.

Yüksel Proje (2009), "Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi" bölgede yer alan yüksek hızlı demiryolu güzergâh jeolojisi çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalarda bölgede yapılan araştırma sondajlarından da yararlanılarak güzergâh jeolojisi ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Apaydın Poşluk (2013), yüksek lisans tezinde bölgede bulunan jeolojik birimlerin yapısal ve jeolojik özelliklerini ortaya koymaktadır.

7. TÜNELİN MODELLEMESİ VE ANALİZ SONUÇLARI

Ülkemizde 23 Eylül 1856 İzmir-Aydın Demiryolu hattının imtiyaz anlaşması ile başlayan demiryolu serüveni, Osmanlı döneminde farklı imtiyazlar ve kısmen de devlet işletmeciliğiyle devam etmiş, Cumhuriyet dönemi sonrasında hız kazanmış, ancak 1950'lerden itibaren geri plana atılmıştır. Özellikle yeni hat ve bakım alanında giderek gerileyen demiryolları farklı projelerle gündeme gelse de bu projeler tamamlanamamıştır.

Yüksek hızlı demir yollarında çeşitli kurp ve eğim toleransları sebebi ile imalatında sıklıkla sanat yapısı kullanımını zorunlu kılmakta buda ilk yatırım maliyetinin yüksek oluşu sonucunu doğurmaktadır. Özellikle yüksek (250 km/s) ve çok yüksek (350 km/s) hızlı demiryollarında gerek alt gerekse üstyapıda oldukça yüksek standartlar kullanılmakta buda yüksek maliyetleri beraberinde getirmektedir.

Çalışmanın yapıldığı Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren hattında farklı uzunluklarda (200 m-6100 m arasında değişen) 36 adet tünel bulunmaktadır. Ana tünellerin emniyetle işletilebilmesi amacı ile öngörülen Güvenlik tünellerine odaklandığımız bu çalışmada, Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesinde yer alan 35 nolu tünel için projelendirilen Güvenlik Tüneli 2 incelenmiştir. Öncelikli olarak geçilecek olan birimlerin geoteknik incelemesi yapılmış birimlere ait kayaç parametreleri belirlendikten sonra sonlu elemanlar yöntemi kullanan Phase V.8 programından yararlanılarak öngörülen destek sisteminin duraylılığı analiz edilmiştir.

7.1. T35 GT2 Güzergahını Jeolojik modelinin oluşturulması

35 numaralı tünelin jeolojik modelinin oluşturulabilmesi amacı ile güzergâh boyunca 2 adet (T35-GT2-SK1 ve T35-GT2-SK2) geoteknik amaçlı sondaj kuyusu açılmış olup bu kuyulardan çıkan karot numuneleri ile jeolojik profil oluşturulmuştur (Şekil 7.1). Buna göre T35-GT2 tüneli giriş kısmında miyosen yaşlı Porsuk Formasyonu birimleri içerisinden geçilecektir (Şekil 7.2). Bozüyük Granitoyidi üzerine açılı uyumsuzluk ile gelen Porsuk formasyonu, çakıl, kum, kil son derece zayıf dayanımlı bir istiflenme sunmaktadır. Bu birim üzerinde killi-kumlu kireçtaşlarından kurulu Akpınar formasyonu gelmektedir.



Şekil 7.1. T35’de geçilen Porsuk Formasyonu kıltaşı, silttaşı birimi (Bozüyük).

Kahve-yeşil-alacalı renkli çimentolanmamış çakıl-kum-aşırı konsolide sert kil, son derece zayıf dayanımlı çakıltaşı-kumtaşı-kıltaşı seviyelerine rastlanılmıştır. Saha gözlemlerine göre, örgülü akarsu ortamında çökelmiş, çakıl-kum seviyeleri ile kil düzeyleri, yanal ve değişken kalınlıklarla geçişler sunmaktadır. Yapılan sondajların tünel seviyesindeki litolojileri incelendiğinde, kaba kırıntılılar (çakıl-kum) ile kil düzeylerinin eşit oranda olduğu görülmektedir.

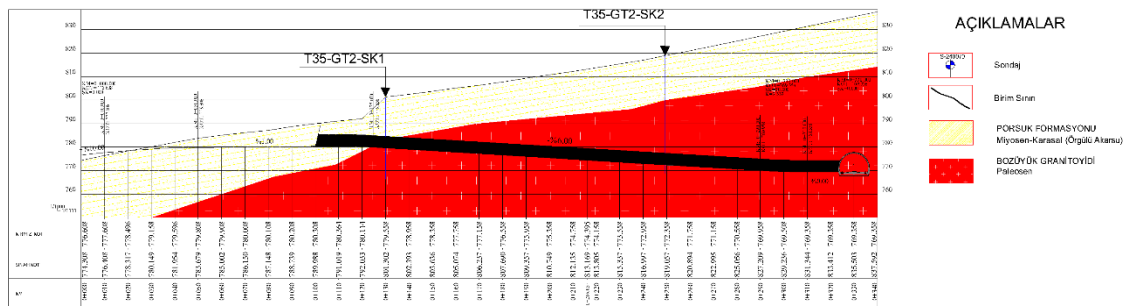
Porsuk formasyonundan sonra “Bozüyük Granitoyidi” birimleri kesilecektir. Bozüyük Granitoyidi yeşilimsi gri-gri renkli, ileri derecede kimyasal ayrışma ile “arena” özelliği kazanmış kesimleri yanı sıra tünel kotlarında genellikle orta-az ayrışmış, zayıf-orta derecede sağlam kaya durumundadır. Etkin foliasyonlu yapısı ve kataklastik görüntüsü ile belirgindir. Ek olarak yaygın olan özelliği, farklı kalınlık (10 cm ile >10 m) ve konumlarda hidrotermal kuvars damarları ile kesilmiştir. Kuvars damarları kirli beyaz renkli orta derece sağlam yer yer sağlam dayanıma sahiptir. Milonitik, kırıklı-ezikli yapılı yerleri de vardır. Granitoyid içerisinde çatlak açıklığı 2 – 5 mm arasında değişmektedir. Çatlak aralığı ise 5 – 60 cm arasında değişmektedir (Dosay, 2016) (Şekil 7.2 ve Şekil 7.3).



Şekil 7.2. Bozüyük Granitoyidi genel görünümü (T35 giriş portalı doğu kesimi).



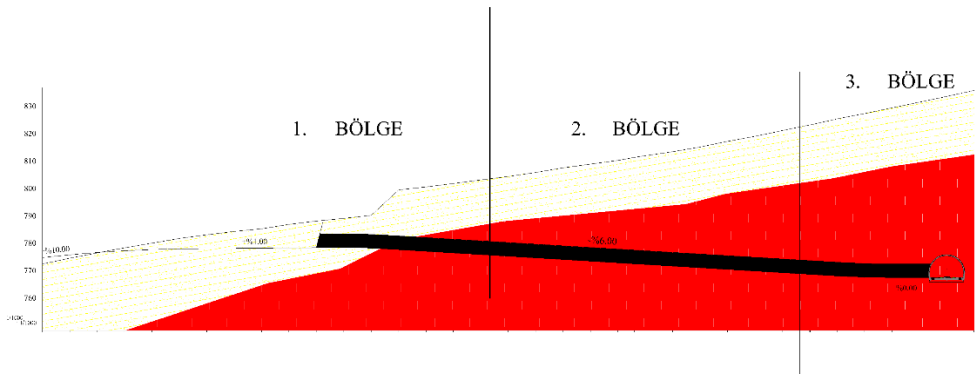
Şekil 7.3. 35 nolu tünelde geçilen Bozüyük Granatoidi.



Şekil 7.4. T35-GT2 Jeolojik boy profili.

7.1.1. Geoteknik veriler

Gerek yüzey gözlemleri gerekse de sondajlardan alınan veriler ile oluşturulan jeolojik modelde kritik 3 bölge belirlenmiştir (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. T35-GT2 ye ait bölgelendirme.

Öncelikle ayrımı yapılan her bölge için kaya mekaniği sınıflama sistemleri uygulanmış olup bu değerler Çizelge 7.1 ve 7.2'de verilmiştir. Ardından söz konusu bölgelerdeki hakim kayaç yapısı değerlendirilerek geoteknik ve geomekanik özellikler ve laboratuvar verilerinden yararlanılarak Sonlu Elamanlar Yönteminde (SEM) kullanılacak olan parametreler belirlenmiştir (Çizelge 7.1).

Çizelge 7.1. Tünel bölümleri için RMR sınıflaması (Dosay, 2016).

	Parametre	1. Bölge		2. Bölge		3. Bölge	
		Min. Değer/Tanım	Puan	Min. Değer/Tanım	Puan	Min. Değer/Tanım	Puan
1	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	35	4	35	8	35	13
2	Kaya Kalite Göstergesi RQD (%)	10	3	30	4	50	4
3	Süreksizlik Aralığı (mm)	43983	10	43983	10	43983	10
4	Süreksizliklerin Durumu						
	Devamlılık (m)	10-20m	1	3-10m	1	3-10m	2
	Açıklık (mm)	>5 mm	1	<5 mm	1	<5 mm	1
	Pürüzlülük	Pürüzsüz	3	Az pürüzlü	3	pürüzlü	5
	Dolgu	Sert<5mm	4	Sert<5mm	4	Sert<5mm	4
	Bozunma	Orta Derecede	3	Orta Derecede	3	Az	5
5	Yeraltı Suyu	nemli	10	Nemli	10	Nemli	10
	Temel RMR		30		44		54
	Süreksizlik Yönelimi		-10		-5		-5
	Nihai RMR		20		39		49

Çizelge 7.2. Tünel bölümleri için Q sınıflaması (Dosay, 2016).

Q PARAMETRE	1. BÖLGE	2. BÖLGE	3. BÖLGE
RQD	10	35	50
Jn(Eklem Takım Sayısı)	9x3=27	9	9
Jr(Eklem Pürüzlülük Sayısı)	1	1,5	2
Ja(Eklem Yüzeyi Araştırma Sayısı)	3	3	2
Jw(Eklem Su Azaltma Faktörü)	1	1	1
SRF (Gerilim Azaltma Faktörü)	5	5	5
ESR (Kazı Destekleme Oranı)	1	1	1
Q = (RQD/Jn)x(Jr/Ja)x(Jw/SRF)	0,025	0,333	1,111

Çizelge 7.3. Tünel bölümleri için öngörülen parametreler (Dosay, 2016).

	Bölüm 1	Bölüm 2	Bölüm 3
Jeolojik Birim	Porsuk Formasyonu	Granadiyoid	Granadiyoid
Birim Hacim Ağırlık (kN/m³)	22	23	22
Elastisite Modülü (mPa)	400	5000	2500
Poisson Oranı	0,3	0,3	0,3
İçsel Sürtünme Açısı	46,21	36,3	30,76
Kohezyon (kPa)	44,49	125,11	57,5

Yapılan incelemeler sonucunda belirlenen NATM sınıflamalarına göre tünel destekleme elemanları önerilmiştir (KGM, 2005). Çizelge 7.2’de tünel destekleme elemanları için önerilen destek elemanları verilmiştir (Çizelge 7.2). KTŞ 2013’e göre destek sistemi parametreleri Çizelge 7.3’deki gibidir.

Çizelge 7.4. Tünel bölümleri için öngörülen destekleme elemanları

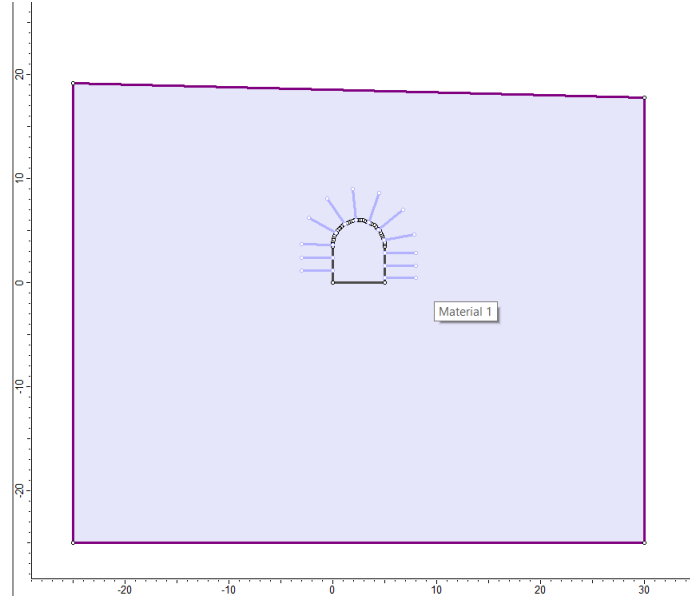
	Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3
Püskürtme Beton Tipi ve Kalınlığı	C20 25 cm	C20 20 cm	C20 15 cm
Çelik Hasır Tipi ve Adedi	Q221x221 2adet	221x221 2adet	221x221 1adet
Çelik İksa Tipi	I 160	I 140	-
Kaya Bulonu Tipi ve Adedi	SN 12 adet	SN 9 adet	SN 7 adet

Çizelge 7.5. Tünel destekleme elemanları için girdi parametreleri (KTŞ, 2013).

Özellikler	Püskürtme beton	Kaya bulonu	Çelik iksa	Çelik Hasır
Elastisite modülü. E (GPa)	20	200	200	200
Poisson oranı, ν	0.20	-	0.35	0.35
Tek eksenli basıncı dayanımı, (MPa)	20	-	400	500
Artık tek eksenli basıncı dayanımı, (MPa)	3.5	-	-	-
Çekme dayanımı, (MPa)	3.1	-	500	500
Artık çekme dayanımı, (MPa)	0	-	-	-
Çekme kapasitesi (MN)	-	0.25	-	-
Artık çekme kapasitesi (MN)	-	0.025	-	-
Tür	-	28 mm SN bulonu	I profil.	06.5 mm

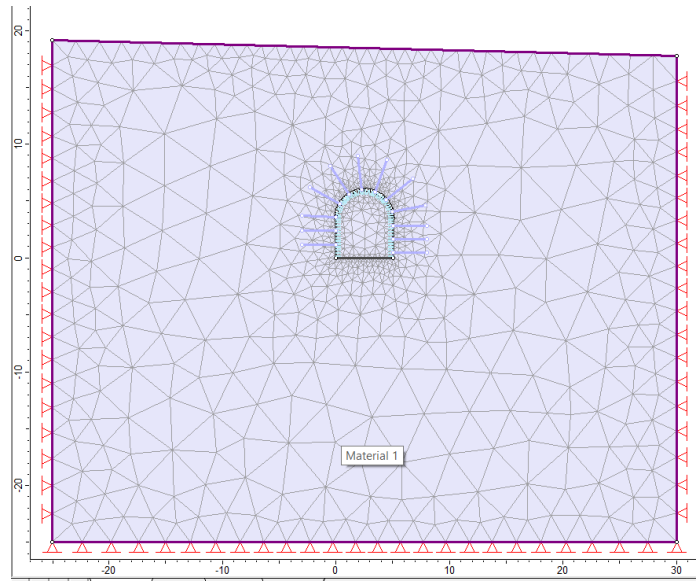
7.2. Birinci Bölge Analizleri

Tünel, Porsuk Formasyonu birimlerinde açılacak olup yapılan sondajlar ile tünelde yer altı suyu ile karşılaşılması beklenmemektedir. Modellenen tünel kesiti, tünel güzergahının bu birimde geçilecek olan noktaların ortalamasını oluşturacak şekilde seçilmiştir. Sığ bir bölgede geçilecek olan bu bölge için örtü kalınlığı 12,57 m olarak alınmıştır. Sistemin Phase 2D programında modellenmesi Şekil 7.6'da görüldüğü gibidir. Tünel geometrik modeli, tünel ekseninin 0- 30 m kotta bulunan yeryüzü seviyesi arasındadır (Şekil 7.6).



Şekil 7.6. Birinci bölge jeolojik modelinin Phase 2D programında oluşturulması.

Programda oluşturulan modele malzeme özellikleri girilmesinden sonra sonlu elemanlar ağ modeli 3 noktalı üçgen modeli olarak tanımlanmıştır (Şekil 7.7).



Şekil 7.7. Birinci bölge için modelde oluşturulan sonlu elemanlar ağı.

Sonlu elemanlar ağının oluşturulmasının ardından her bir kazı adımının tanımlanması gerekmektedir. Her kazı adımında tünel kaplamasına gelen asal normal gerilmeler, deformasyon bölgeleri ve yüzeyde oluşan oturmalar farklıdır. Bunların tespiti amacı ile her bir kazı adamı ayrı ayrı değerlendirilmiş olup analizde kullanılan

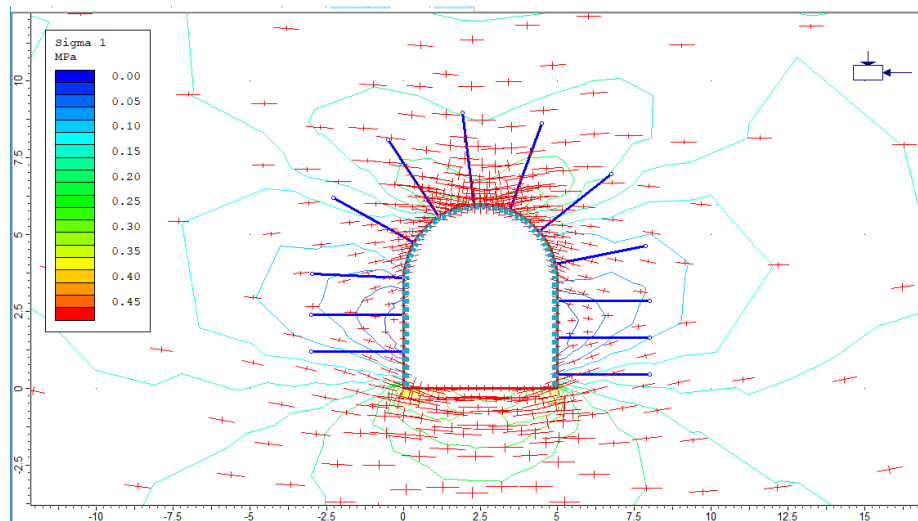
basamaklar Çizelge 7.4’de verilmiştir. Tünel kazı-destek aşamaları programa tanımlandıktan sonra plastik hesap yöntemi ve Mohr-Coulomb kırılma kriteri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 7.6. Birinci bölge için tünel kazı aşamaları.

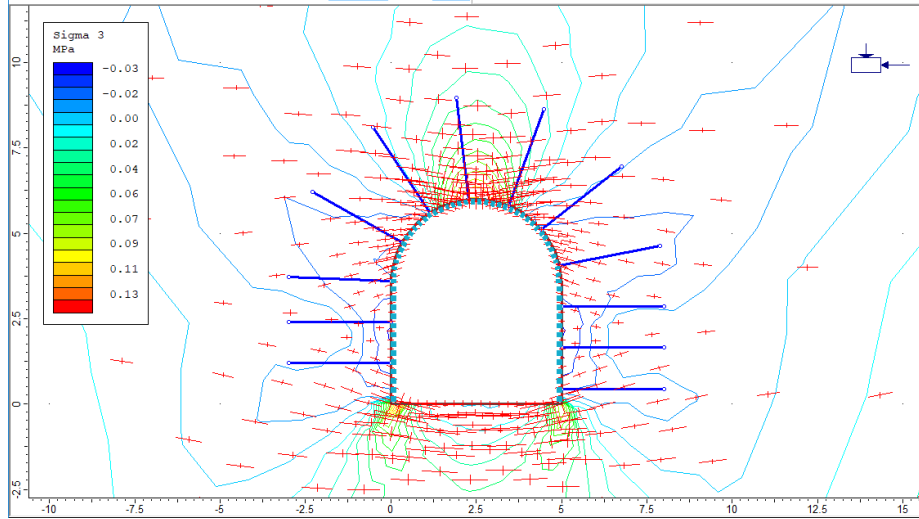
Aşama adımı	Aşama Tanımı
1	Kazı öncesi durum
2	Tünel kazısının yapılması.
3	Tünel destek elemanlarının yerleştirilmesi
4	Tünel deprem ivmesi durumu

7.2.1 Tünel çevresinde oluşan gerilmeler

Tünel kazısı ve destekleme elemanlarının yerleştirilmesinden sonra ikincil gerilme ve deformasyon durumları belirlenmektedir. Şekil 7.8’de tünel kazısı sonrasında oluşan efektif asal normal gerilmelerin yönelimi verilmiştir. Tünel kazısı sonrası, tünelin tavanında ve tabanında asal gerilmelerin yoğunlaştığı görülmektedir (basınç gerilmeleri (-), çekme gerilmeleri ise (+) ile gösterilmektedir). Tünelde maksimum gerilmeler yan duvarlarda oluşmaktadır. Analizlerden maksimum Sigma 1 değeri $+450 \text{ kN/m}^2$ olarak okunmaktadır (Şekil 7.8). Maksimum Sigma değerinin ise 3 ise $+150 \text{ kN/m}^2$ olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 7.9).



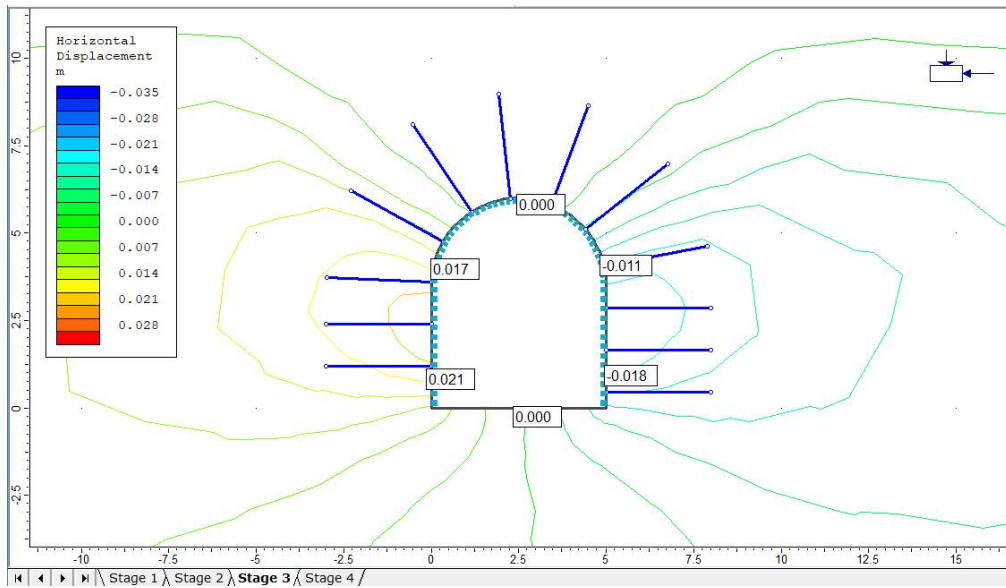
Şekil 7.8. Birinci bölge için kazı sonrası oluşan Sigma 1 gerilmesi.



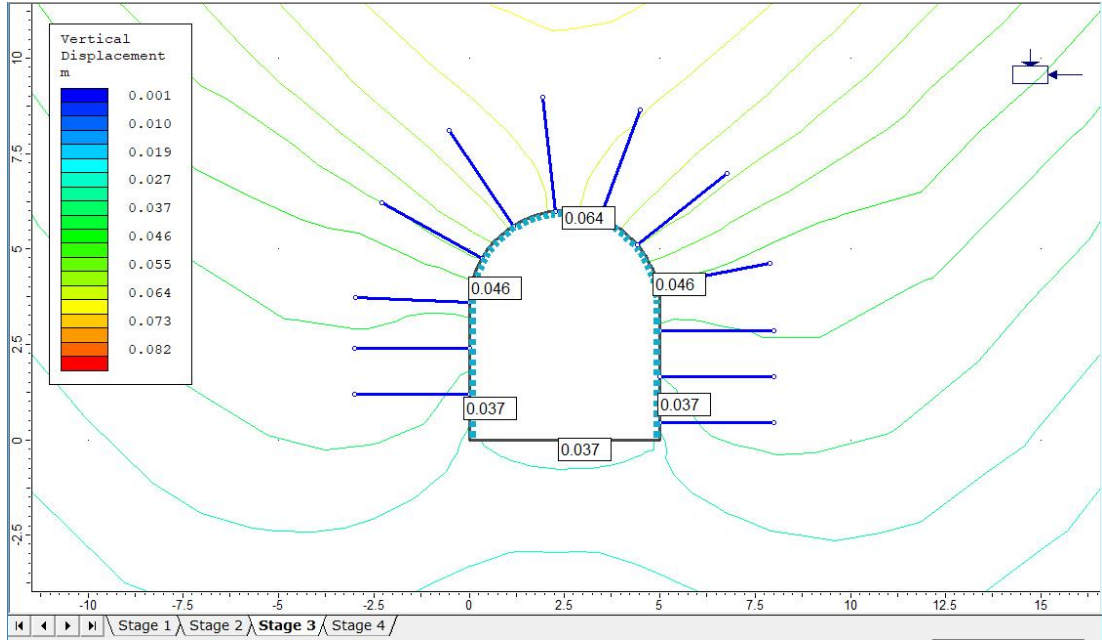
Şekil 7.9. Birinci bölge için kazı sonrası oluşan Sigma 3 gerilmesi.

7.2.2. Tünelde oluşan yer değiştirmeler

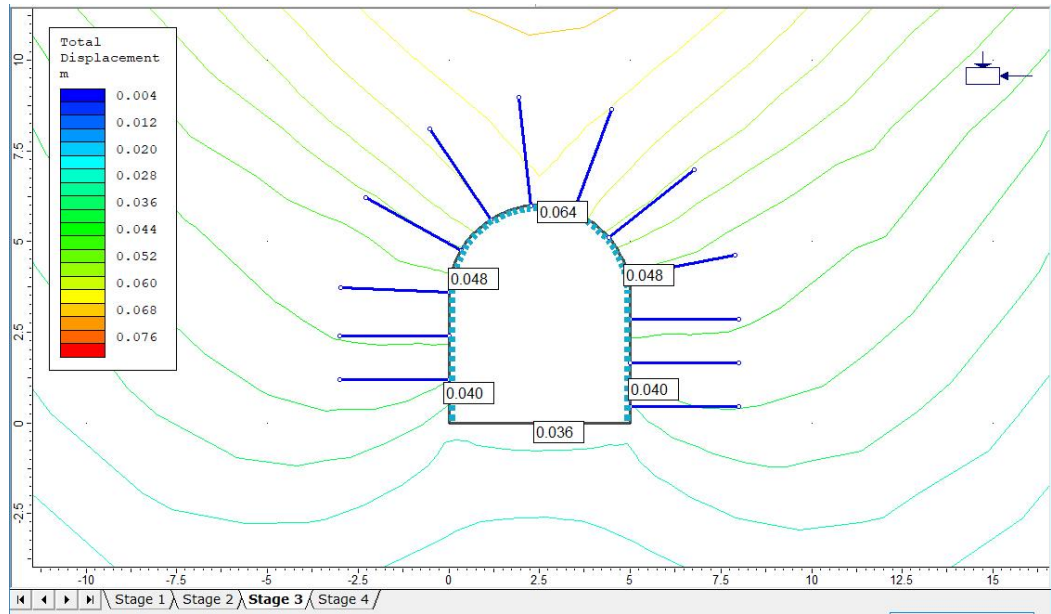
Tünel yapım aşamalarında tüneldeki hareketlerin izlenmesi son derece önemlidir. Özellikle ayna kazısından başlayarak geriye doğru hareketler artmakta ve bu artışın öngörülebilir olması istenmektedir. Yapılan analiz sonucunda en yüksek düşey yer değiştirme 64 mm, en yüksek yatay yer değiştirme ise tünel yan duvarlarında 21 mm dir. Oluşan toplam yer değiştirmeler incelendiğinde tünel tavan sağ ve sol duvarlarında 40 mm omuz bölgesinde 48 mm eksende 64 mm dir (Şekil 7.10, 11, 12, 13)



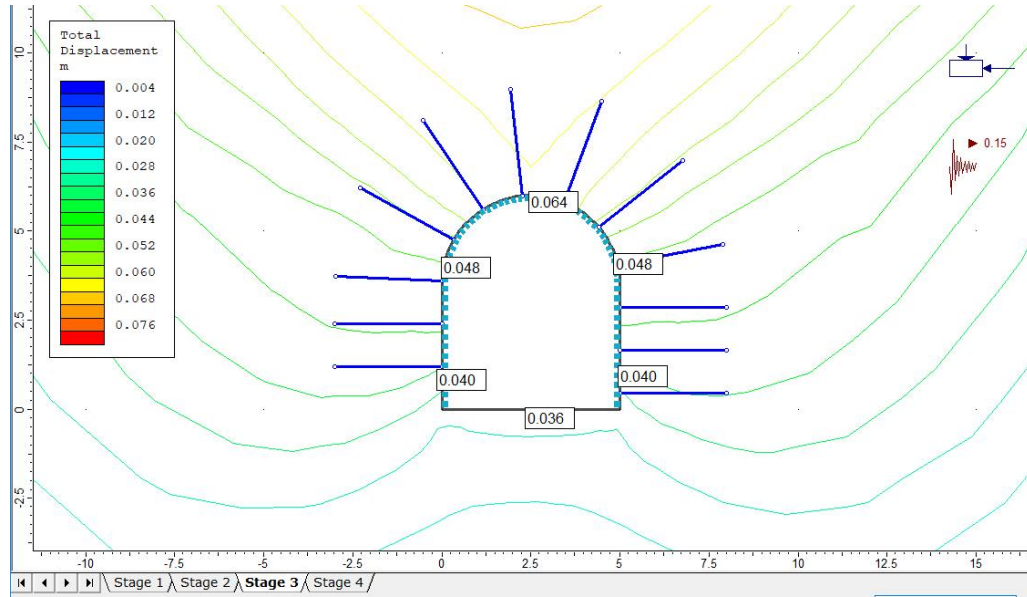
Şekil 7.10. Birinci bölge için yatay yerdeğiştirmeleri.



Şekil 7.11. Birinci bölge için düşey yer değişmeler.



Şekil 7.12. Birinci bölge için toplam yer değişmeler.



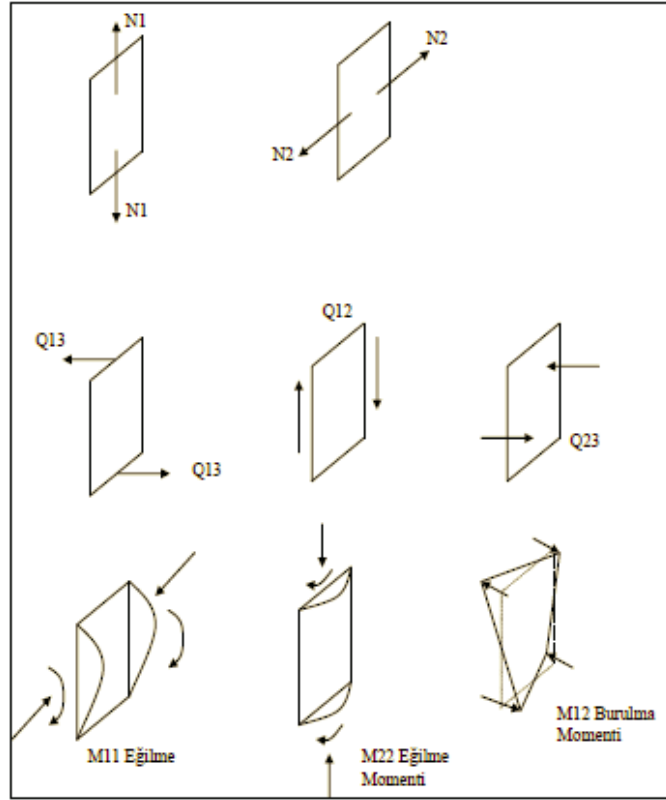
Şekil 7.13. Birinci bölge için 2. derece deprem bölgesi depremlili durumda toplam yer değişirmeler.

7.2.3. Tünel destekleme elemanlarının tahkiki

Tünel desteklemesi amacı ile öngörülen destek sistemleri Phase programına 2 ayrı katman olarak girilmiştir. Bunlar püskürtme beton ve çelik iksadan oluşan kabuk hattı ve 28 mm çapında nervürlü çelik ile oluşturulan 3 metre uzunluğundaki bulonlardır. Bu nedenle tünel destek elemanlarının tahkiki 2 ayrı başlık altında incelenecektir.

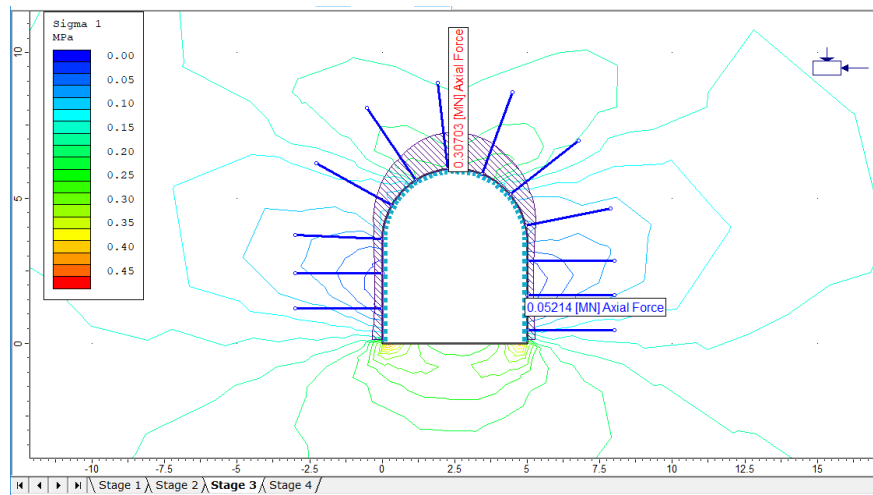
Püskürtme betonu ve çelik iksa tahkiki

Tünellerde kullanılan destekleme sistemlerinin bileşenleri olan, püskürtme beton ve çelik iksa üzerinde gelişen, aksenal kuvvet ve moment büyüklükleri program yardımı ile hesaplanmıştır. Tünel destek elemanları için yapılacak olan kesit tahkiklerinde Aksenal kuvvetler N_{11} ve N_{22} , kesme kuvvetleri Q_{13} , Q_{12} ve Q_{23} şeklinde, eğilme momentleri M_{11} ve M_{22} şeklinde iç kuvvetler kullanılacaktır. Ek olarak burulma momenti ise M_{12} ile gösterilmiştir. Bu kuvvetlerin şekil ve yönleri Şekil 7.14'de gösterilmiştir.

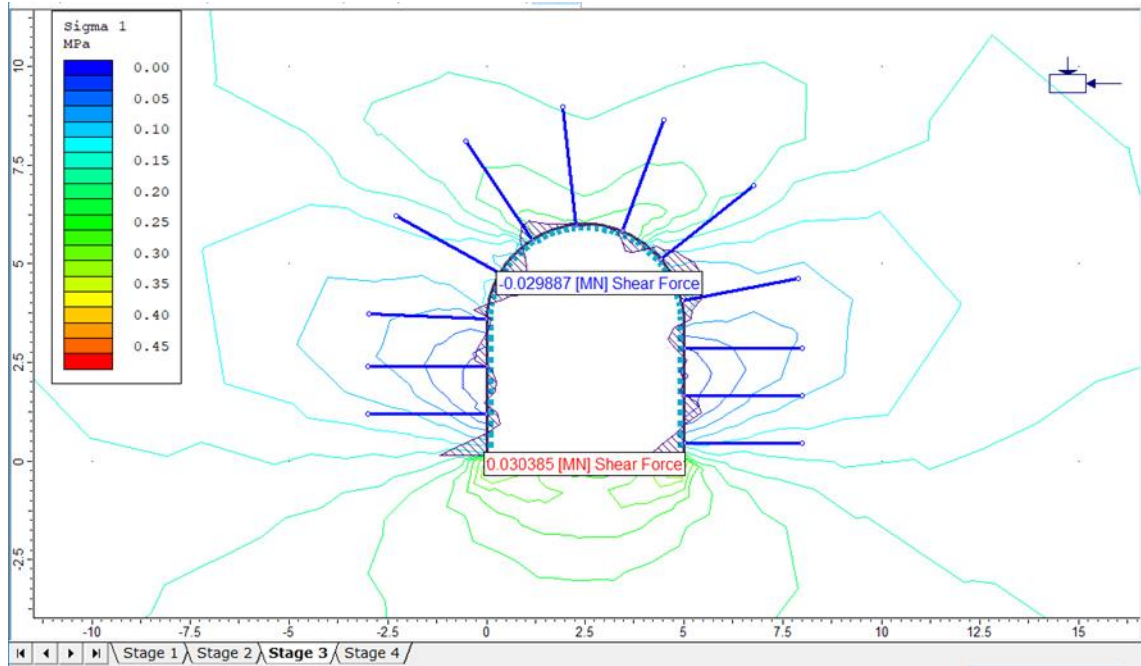


Şekil 7.14. Tahkimata etkiyen kuvvetlerin yönleri (Polat, 2010).

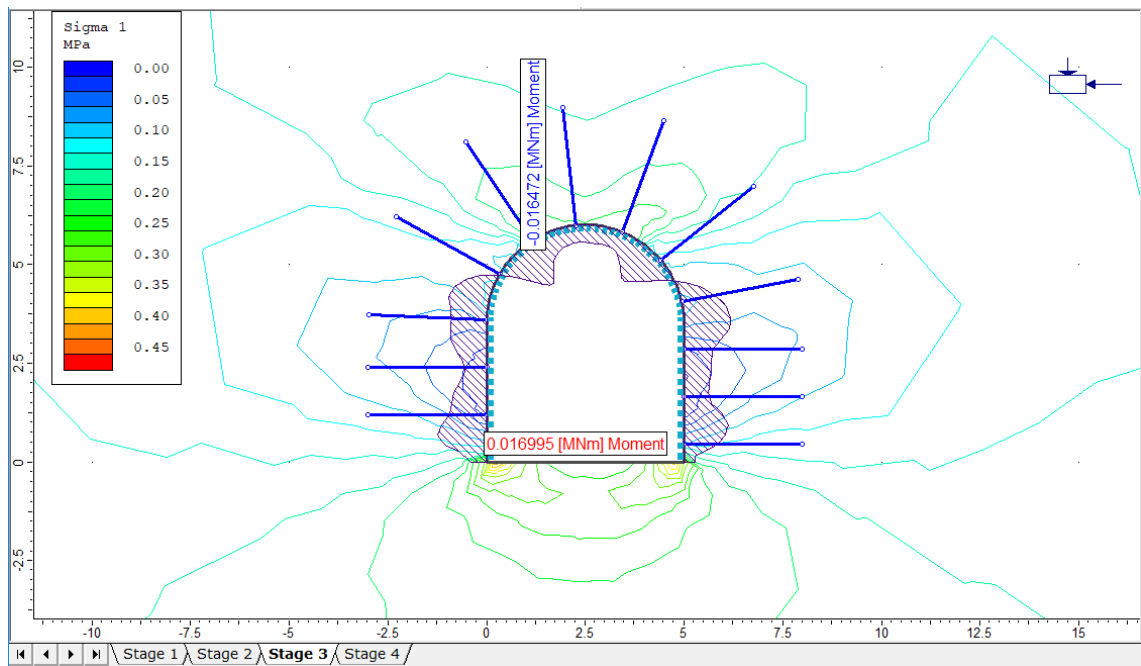
Püskürtme beton ve çelik iksa ile oluşturulan destekleme elemanlarına etkiyen N_{11} aksiyel kuvveti, Q_{13} kesme kuvveti ve M_{11} eğilme momenti dağılımları Şekil 7.15, 16, 17’de verilmiştir.



Şekil 7.15. Birinci bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen aksiyel kuvvetler.



Şekil 7.16. Püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen aksenal kuvvet.



Şekil 7.17. Birinci bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen eğilme momenti.

Hesaplarda kullanılacak maksimum iç kuvvetler sırasıyla;

$$N_{11} = 307,08 \text{ kN/m}$$

$$Q_{13} = 30,38 \text{ kN/m}$$

$$M_{11} = 16,99 \text{ kNm/m}$$

Destekleme elemanları için yapılan kesit tahkiki AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) yönetmeliğine uygun olarak formül 7.1'e göre yapılmıştır (Hung vd. 2009).

Moment taşıma kapasitesi;

$$M_d = \phi 0.85 f_c W \quad (7.1)$$

W: püskürtme betonu mukavemet momenti

f_c : betonun 28 günlük basınç dayanımı (C20 için 13000 kN/m²)

ϕ : güvenlik katsayısı (0.90 donatılı betonlar için)

Eksenel kuvvet taşıma kapasitesi

$$N_d = \phi 0.60 f_c A \quad (7.2)$$

A (püskürtme betonun birim genişliği alanı)

Kesme kuvveti taşıma kapasitesi:

$$V_d = \phi 1.33 \sqrt{f_c} A \quad (7.3)$$

Hesaplama;

$$M_d = 0.85 * 13000 * \frac{0.25^2}{6} = 115.10 \text{ kN/m}$$

$$N_d = 0.60 * 13000 * 0.25 * 1 = 1950 \text{ kN/m}$$

$$V_d = 1.33 \sqrt{13000} * 1 * 0.25 = 37.91 \text{ kN/m}$$

Şeklinde gerçekleşir.

Bulunan sonuçlar hesaplanan iç kuvvetler ile karşılaştırılarak kesit yeterliliği formül 7.4'e göre tayin edilir

$$\frac{M_{11}}{M_d} + \frac{N_{11}}{N_d} < 1 \quad (7.4)$$

$$Q_{13} < V_d$$

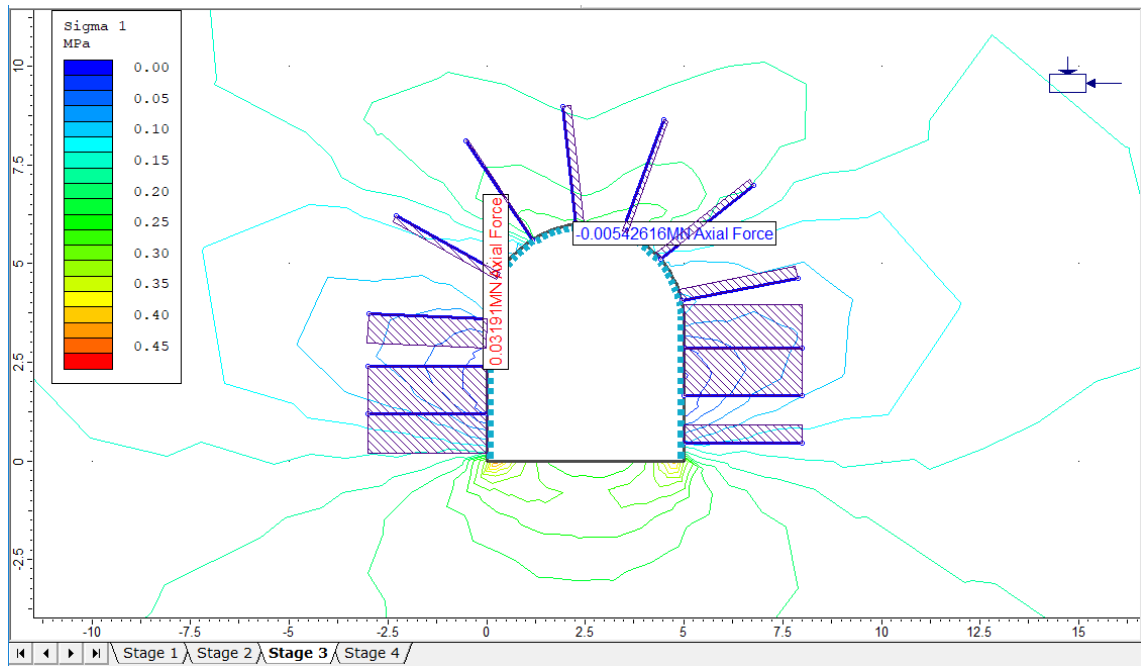
$$\frac{16,99}{115,10} + \frac{307,03}{1950} = 0,305$$

$$30,38 < 37,91$$

Sonuç olarak, güzergahının 1. bölge analizi ve hesaplamaları sonuçlarına göre, seçilen püskürtme beton ve çelik iksa elemanları üzerine gelen iç kuvvetler, söz konusu destekleme elemanlarının taşıma kapasitesinin altında kaldığı görülmüştür.

Bulon tahkiki

Bulon sistemine etkiyen max. Normal kuvvet (N_{11}) değeri, program aracılığı ile hesaplanmıştır. Şekil 7.18’de maksimum normal kuvvet verilmiştir. Şekil’ den 1 bulona gelen maksimum normal kuvvet değeri; 31,91 kN olduğu görülmüştür.



Şekil 7.18. Birinci bölge için bulonlara gelen yükler.

Bulonun çekme dayanımı;

$$\sigma = \frac{N_{11}}{A} < \sigma_{guv} \quad (7.5)$$

$\sigma_{guv} = 36.5 \text{ kN/cm}^2$ (28 mm çapındaki bulonun dayanma kuvveti)

$$\sigma = \frac{31.91}{\frac{3.14 \times 2.8^2}{4}} < 5.182 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma < \sigma_{guv}$$

Beton enjeksiyon dayanımı;

$$\tau = \frac{N_{11}}{\pi * \phi * l} < f_{cta} \quad (7.6)$$

Formül 7.6’da yer alan τ kayma gerilmesi, f_{ctd} betonun çekme dayanımı, \emptyset bulon yarıçapı ve l bulon boyudur.

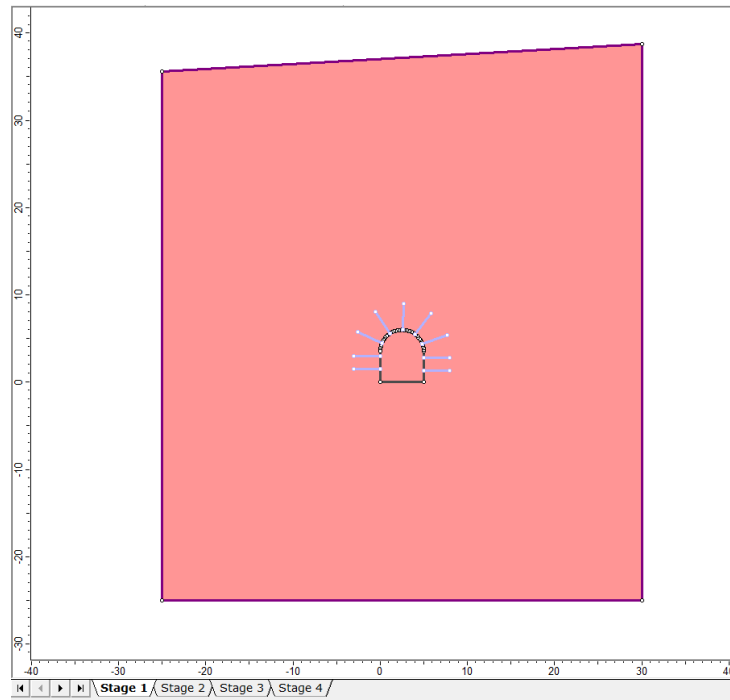
$$f_{ctd} = 0.1 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = \frac{31.91}{3.14 \times 2.8 \times 300} = 0.012 < f_{ctd}$$

Yapılan tahkik sonucunda bulonların emniyetli sınırlar içinde kaldığı anlaşılmaktadır.

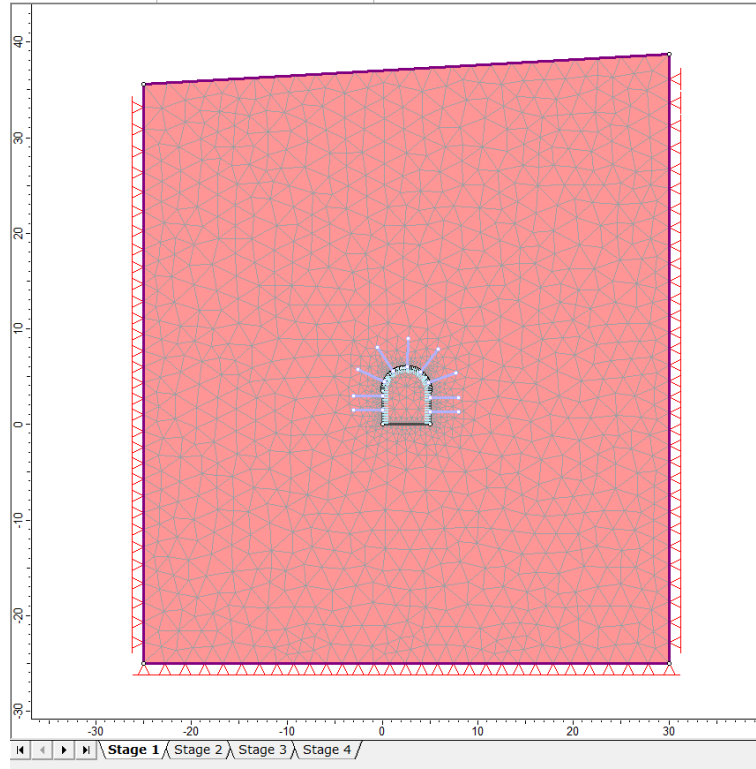
7.3. İkinci Bölge Analizleri

Tünel, Bozüyük Granatoidi birimlerinde açılacak olup yapılan sondajlar ile tünelde yer altı suyu ile karşılaşılması beklenmemektedir. Modellenen tünel kesiti, tünel güzergahının bu birimde geçilecek olan noktaların ortalamasını oluşturacak şekilde seçilmiştir. Bu bölge için örtü kalınlığı 37 m olarak seçilmiştir. Sistemin Phase 2D programında modellenmesi Şekil 7.19’da görüldüğü gibidir. Sayısal analiz için oluşturulan geometrik model tünel ekseninin oturduğu 0 kotu ile 37 m yükseklikteki yeryüzü seviyesi arasında oluşturulmuştur.



Şekil 7.19. İkinci bölge jeolojik modelinin Phase 2D programında oluşturulması.

Programda oluşturulan modele malzeme özellikleri girilmesinden sonra sonlu elemanlar ağ modeli 3 noktalı üçgen modeli olarak tanımlanmıştır (Şekil 7.20).



Şekil 7.20. İkinci bölge için modelde oluşturulan sonlu elemanlar ağı.

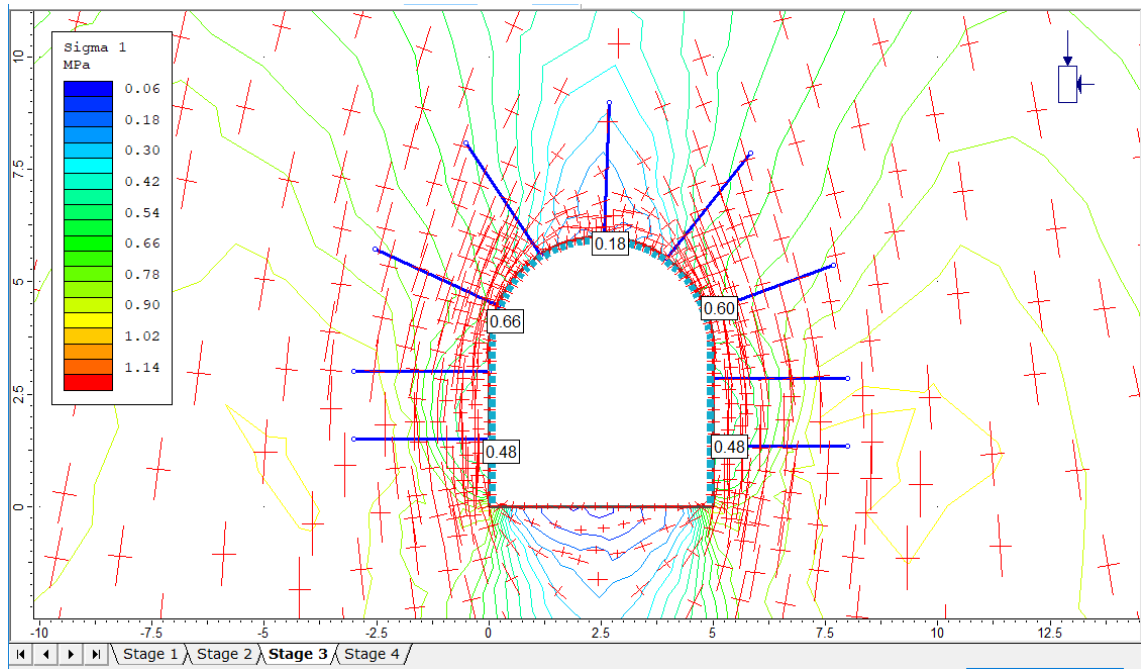
Sonlu elemanlar ağının oluşturulmasının ardından her bir kazı adımının tanımlanması gerekmektedir. Her kazı adımında tünel kaplamasına gelen asal normal gerilmeler, deformasyon bölgeleri ve yüzeyde oluşan oturmalar farklıdır. Bunların tespiti amacı ile her bir kazı adımı ayrı ayrı değerlendirilmiş olup analizde kullanılan basamaklar Çizelge 7.5’de verilmiştir. Tünel kazı-destek aşamaları programa tanımlandıktan sonra plastik hesap yöntemi ve Mohr-Coulomb kırılma kriteri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 7.7. İkinci bölge için tünel kazı aşamaları.

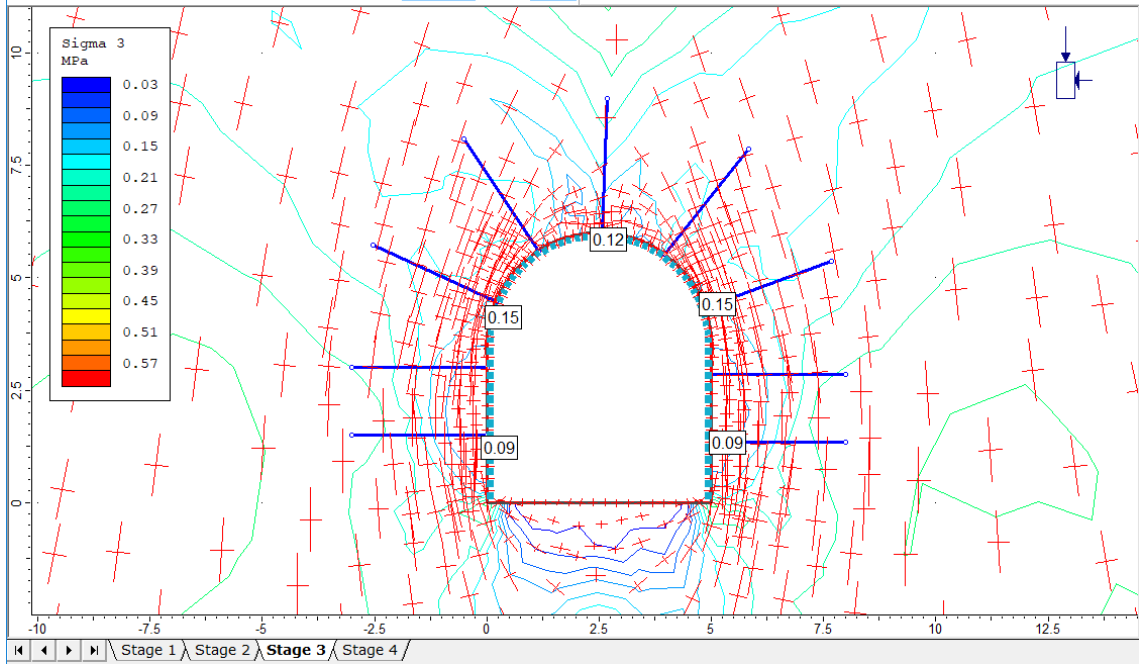
Aşama adımı	Aşama Tamını
1	Kazı öncesi durum
2	Tünel kazısının yapılması.
3	Tünel destek elemanlarının yerleştirilmesi
4	Tünel deprem ivmesi durum

7.3.1. Tünel çevresinde oluşan gerilmeler

Tünel kazısı ve destekleme elemanlarının yerleştirilmesinden sonra, ikincil gerilme ve deformasyon durumları hesaplanacaktır. Şekil 7.21’de tünel kazısı sonrasında oluşan efektif asal normal gerilmelerin yönelimi verilmiştir. Tünel kazısından sonra tünelin tavanında ve tabanında asal gerilmelerin yoğunlaştığı görülmektedir (basınç gerilmeleri (-), çekme gerilmeleri ise (+) ile gösterilmektedir). Tünelde maksimum gerilmeler yan duvarlarda oluşmaktadır. Analizlerden maksimum Sigma 1 değeri $+660 \text{ kN/m}^2$ olarak okunmaktadır (Şekil 7.22). Maksimum Sigma değerinin ise 3 ise $+150 \text{ kN/m}^2$ olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 7.22).



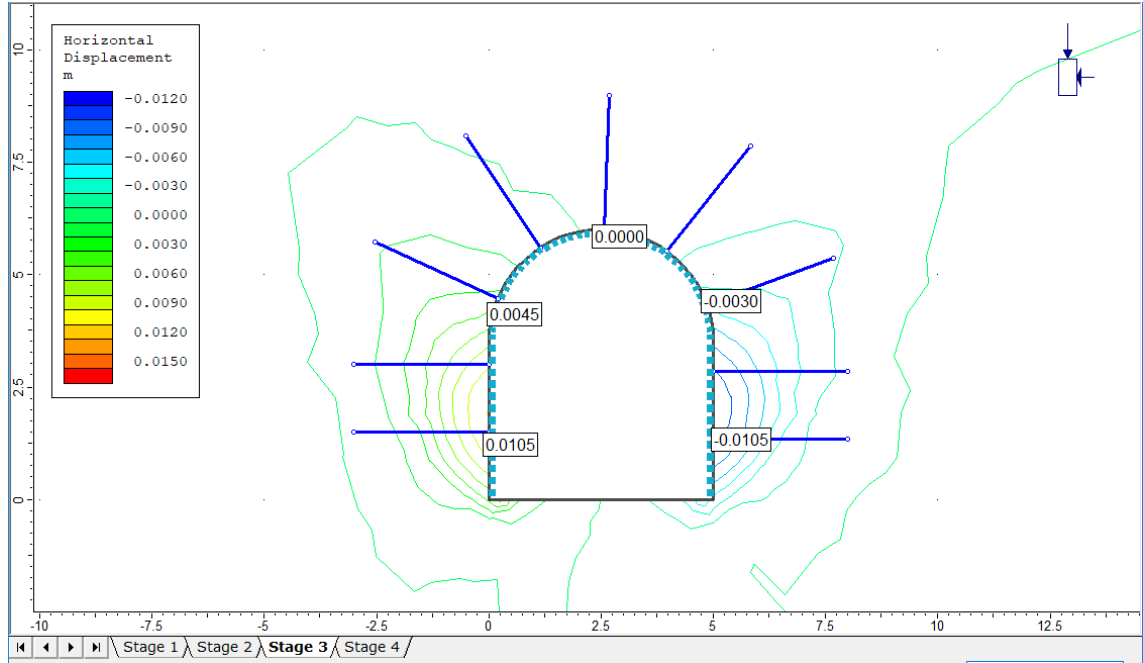
Şekil 7.21. İkinci bölge kesitinde kazı sonrası oluşan Sigma 1 gerilmesi.



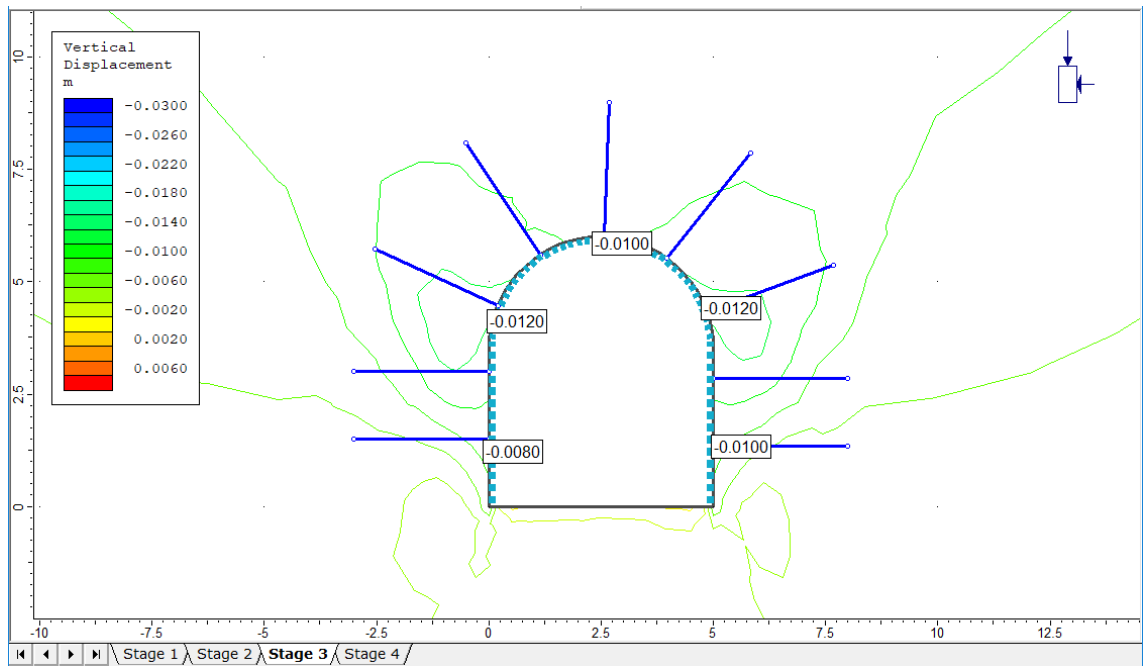
Şekil 7.22. İkinci bölge kesitinde kazı sonrası oluşan Sigma 3 gerilmesi.

7.3.2. Tünelde oluşan yer değiştirmeler

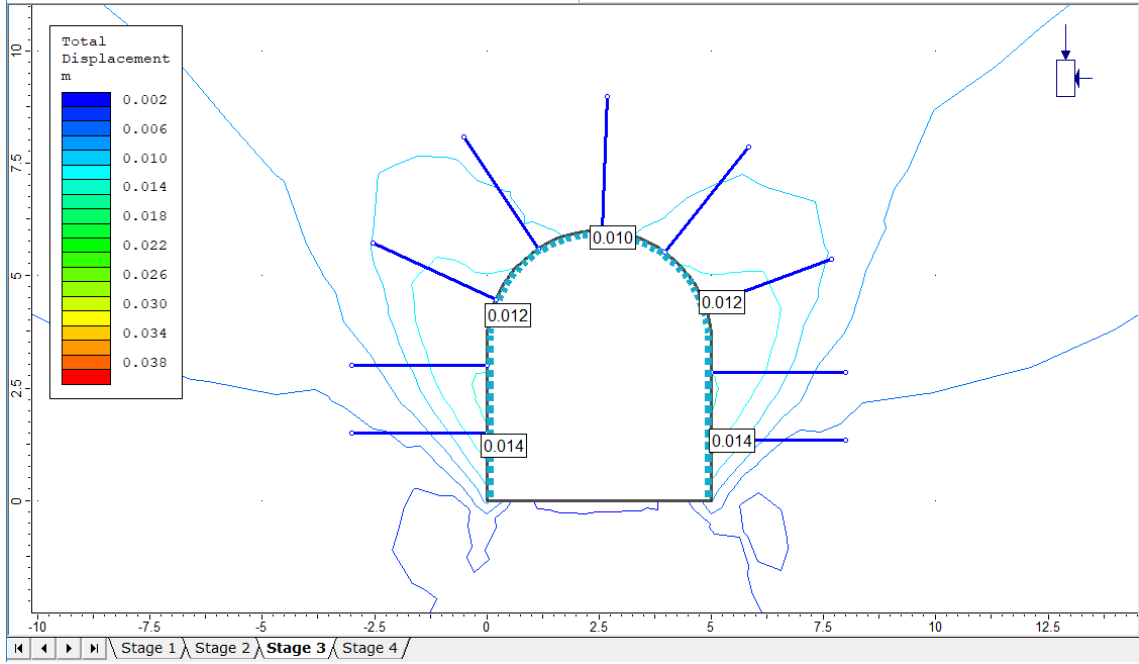
Tünel yapım aşamalarında tüneldeki hareketlerin izlenmesi son derece önemlidir. Özellikle ayna kazısından başlayarak geriye doğru hareketler artmakta ve bu artışın öngörülebilir olması istenmektedir. Yapılan analiz sonucunda en yüksek düşey yer değiştirme 12 mm en yüksek yatay yer değiştirme ise tünel sol ayak bölgesinde 12 mm dir. Oluşan toplam yer değiştirmeler incelendiğinde tünel sol ayak ve omuz bölgesinde 16 mm eksen bölgesinde 10 mm omuz ve ayakta 12 mm'dir (Şekil 7.23-7.26).



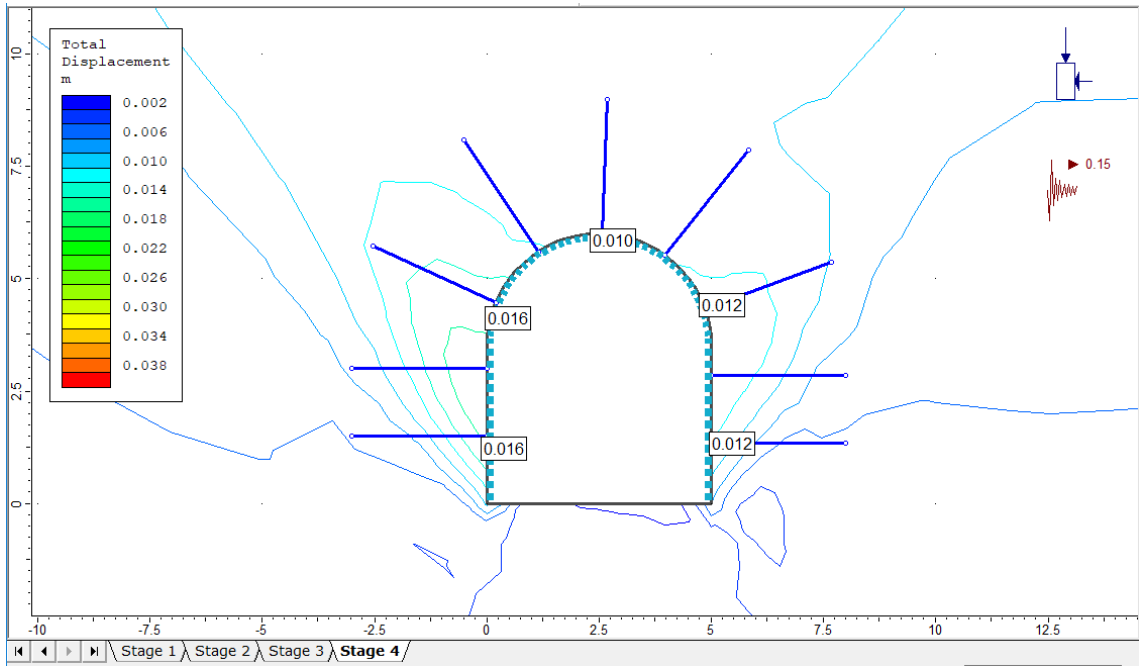
Şekil 7.23. İkinci bölge için yatay yerdeğışirmeler.



Şekil 7.24. İkinci bölge için düşey yer değışirmeler.



Şekil 7.25. İkinci bölge için toplam yer değiştirmeler.



Şekil 7.26. İkinci bölge için 2. derece deprem bölgesinde depremli durumda toplam yer değiştirmeler.

7.3.3. Tünel destekleme elemanlarının tahkiki

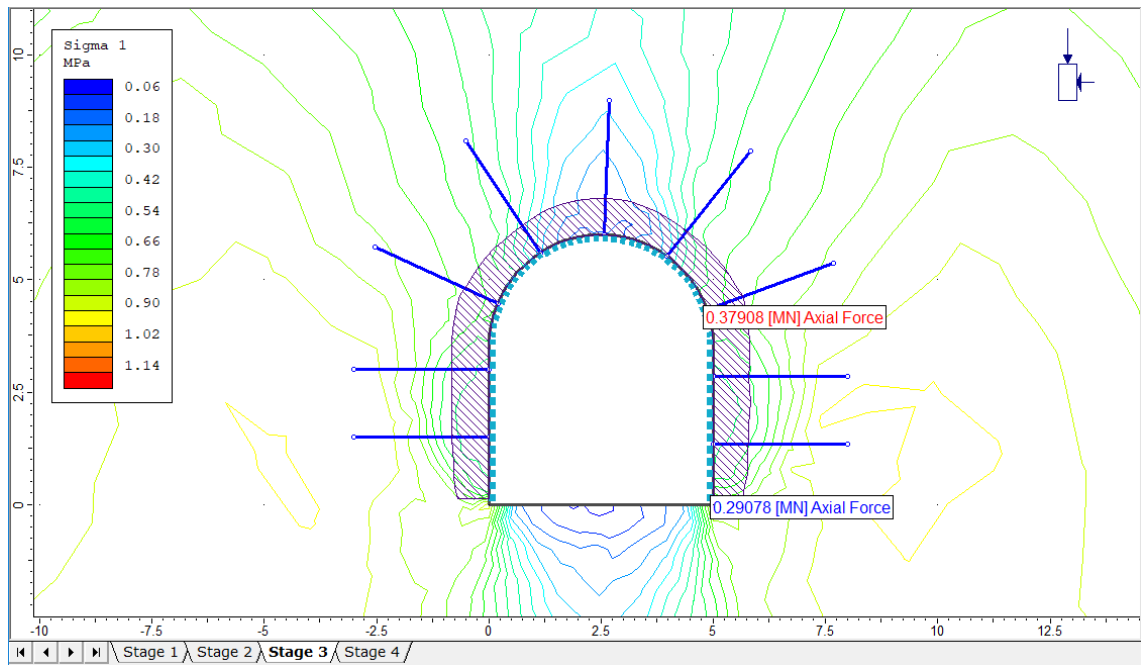
Tünel desteklemesi amacı ile öngörülen destek sistemleri Phase programına 2 ayrı katman olarak girilmiştir. Bunlar püskürtme beton ve çelik iksadan oluşan kabuk hattı ve

28 mm çapında nervürlü çelik ile oluşturulan 3 metre uzunluğundaki bulonlardır. Bu nedenle tünel destek elemanlarının tahkiki 2 ayrı başlık altında incelenecektir.

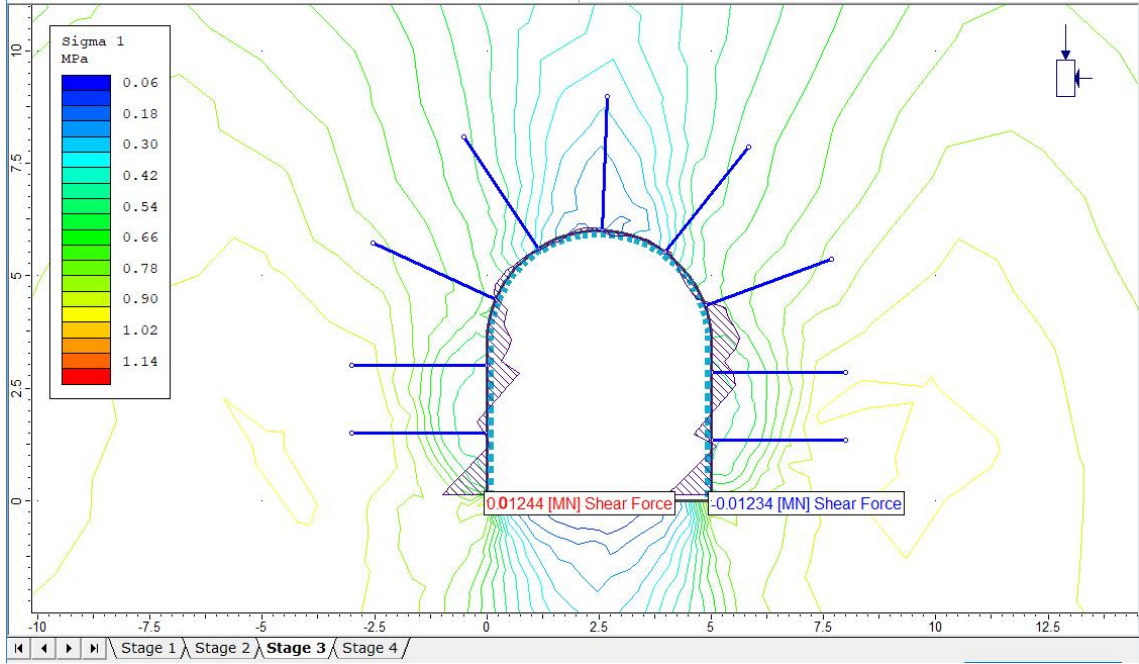
Püskürtme betonu ve çelik iksa tahkiki

Tünellerde kullanılan destekleme sistemlerinin bileşenleri olan, püskürtme beton ve çelik iksa üzerinde gelişen, aksenal kuvvet ve moment büyüklükleri program yardımı ile hesaplanmıştır. (Şekil 7.27 ve 7.29).

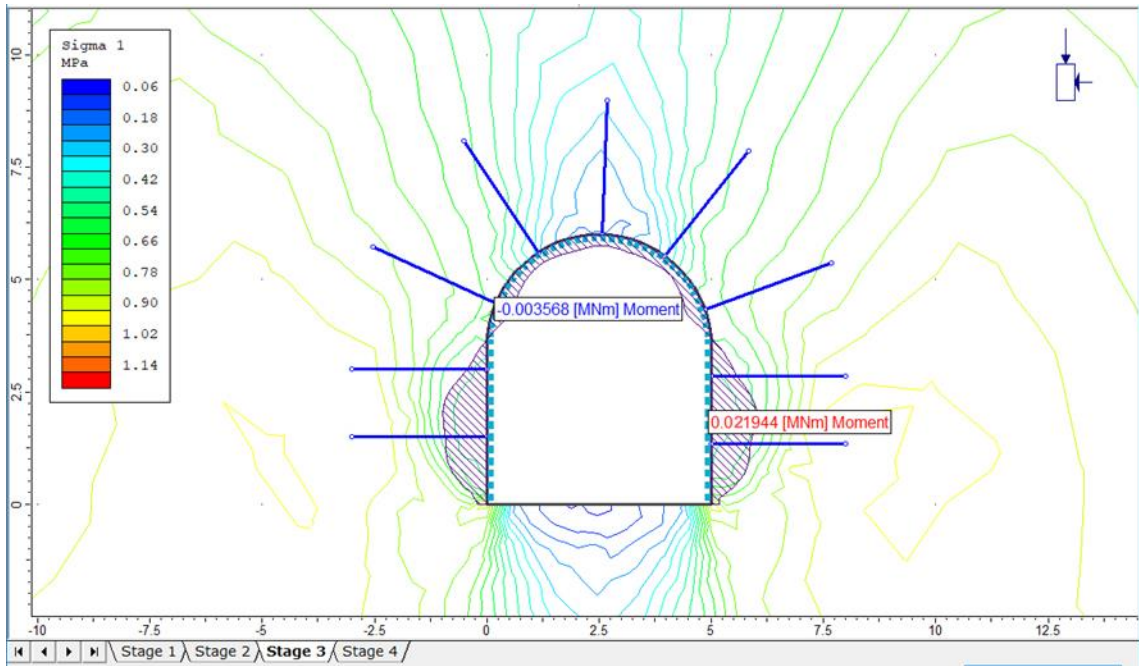
Püskürtme beton ve çelik iksa ile oluşturulan destekleme elemanlarına etkiyen N_{11} aksenal kuvveti, Q_{13} kesme kuvveti ve M_{11} eğilme momenti dağılımları Şekil 7.27, 7.28 ve 7.29'da verilmiştir.



Şekil 7.27. İkinci bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen aksenal kuvvetler.



Şekil 7.28. İkinci bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen kesme kuvveti.



Şekil 7.29. İkinci bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen eğilme momenti.

Hesaplarda kullanılacak maksimum iç kuvvetler sırasıyla;

$$N_{11} = 379,08 \text{ kN/m}$$

$$Q_{13} = 11,2 \text{ kN/m}$$

$$M_{11} = 21,91 \text{ kNm/m}$$

Hesap;

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

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

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

Şeklinde gerçekleşir.

$$Q_{13} < V_d$$

Burada veriler yerine konulduğunda

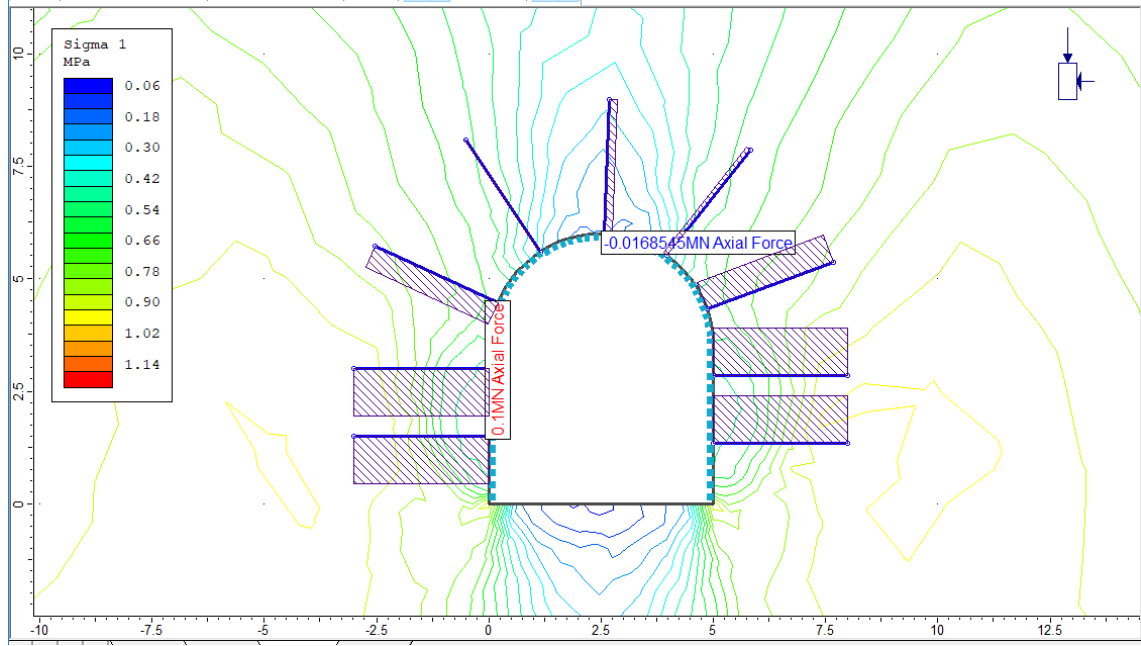
$$\frac{33.56}{73.66} + \frac{379.08}{1560} = 0,69$$

$$21,91 < 30,32$$

Sonuç olarak, güzergahının 2. bölge analizi ve hesaplamaları sonuçlarına göre, seçilen püskürtme beton ve çelik iksa elemanları üzerine gelen iç kuvvetler, söz konusu destekleme elemanlarının taşıma kapasitesinin altında kaldığı görülmüştür.

Bulon tahkiki

Bulon sistemine etkiyen maksimum normal kuvvet (N_{11}) değeri, program yardımıyla ile hesaplanmıştır. Şekil 7.30'da maksimum normal kuvvet diyagramı görülmektedir. Şekil 7.18'den de anlaşılacağı gibi 1 bulona gelen maksimum normal kuvvet değeri; 31,91 kN'dur.



Şekil 7.30. İkinci bölge için bulonlara gelen yükler.

Bulonun çekme dayanımı;

$$\sigma = \frac{N_{11}}{A} < \sigma_{guv}$$

$\sigma_{guv} = 36.5 \text{ kN/cm}^2$ (28 mm çapındaki bulonun dayanma kuvveti)

$$\sigma = \frac{100}{\frac{3.14 \times 2.8^2}{4}} < 16.24 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma < \sigma_{guv}$$

Beton enjeksiyonunda dayanım;

$$\tau = \frac{N_{11}}{\pi * \phi * l} < f_{ctd}$$

$$f_{ctd} = 0.1 \text{ kN/cm}^2$$

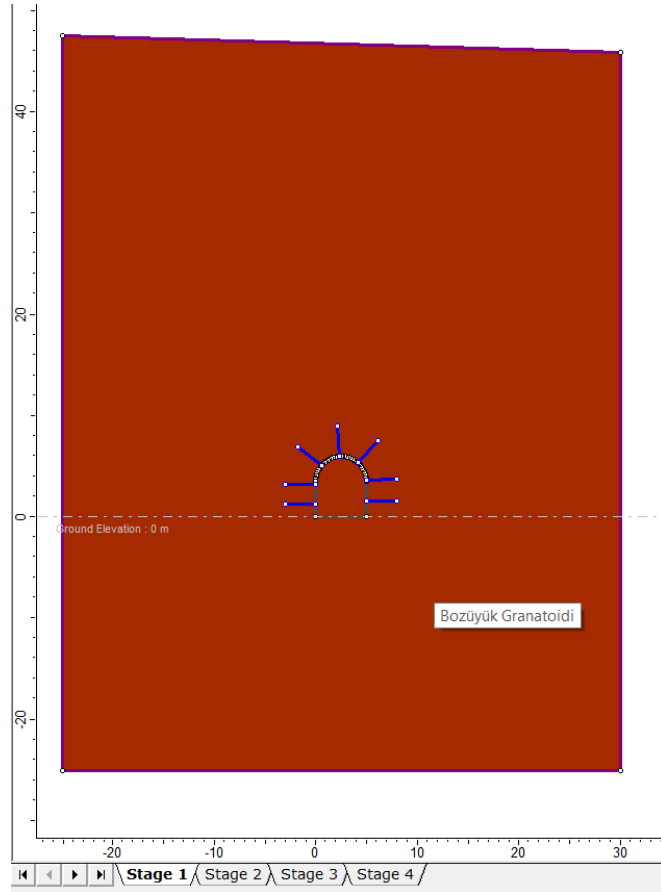
$$\tau = \frac{100}{3.14 \times 2.8 \times 300} = 0.037 < f_{ctd}$$

Yapılan tahkik sonucunda bulonların emniyetli sınırlar içinde kaldığı anlaşılmaktadır.

7.4. Üçüncü Bölge Analizleri

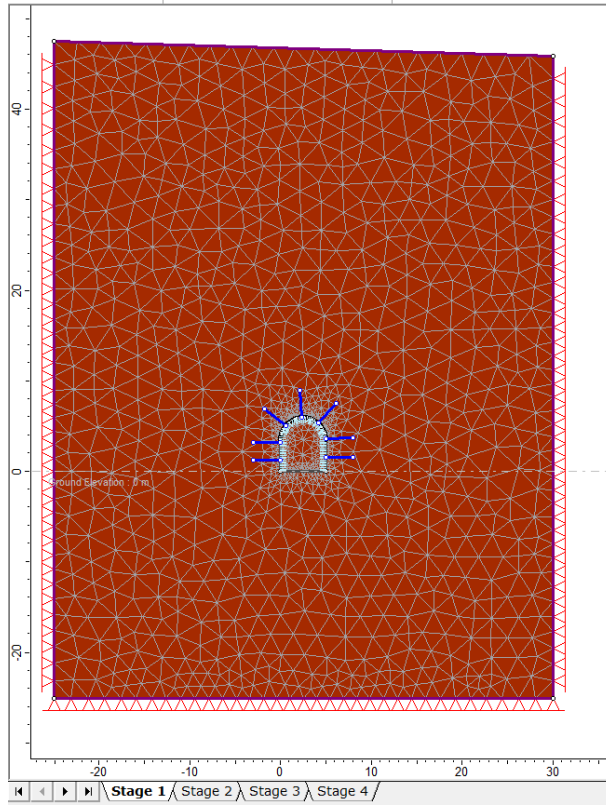
Tünel, Bozüyük Granatoidi birimlerinde açılacak olup yapılan sondajlar ile tünelde yer altı suyu ile karşılaşılması beklenmemektedir. Modellenen tünel kesiti, tünel güzergahının bu birimde geçilecek olan noktaların ortalamasını oluşturacak şekilde

seçilmiştir. Bu bölge için örtü kalınlığı 50 m olarak seçilmiştir. Sistemin Phase 2D programında modellenmesi Şekil 7.31’de görüldüğü gibidir. Sayısal analiz için oluşturulan geometrik model tünel ekseninin oturduğu 0 kotu ile 37m yükseklikteki yeryüzü seviyesi arasında oluşturulmuştur.



Şekil 7.31. Üçüncü bölge jeolojik modelinin Phase 2D programında oluşturulması.

Programda oluşturulan modele malzeme özellikleri girilmesinden sonra sonlu elemanlar ağ modeli 3 noktalı üçgen modeli olarak tanımlanmıştır (Şekil 7.32).



Şekil 7.32. Üçüncü bölge modelinde oluşturulan sonlu elemanlar ağı.

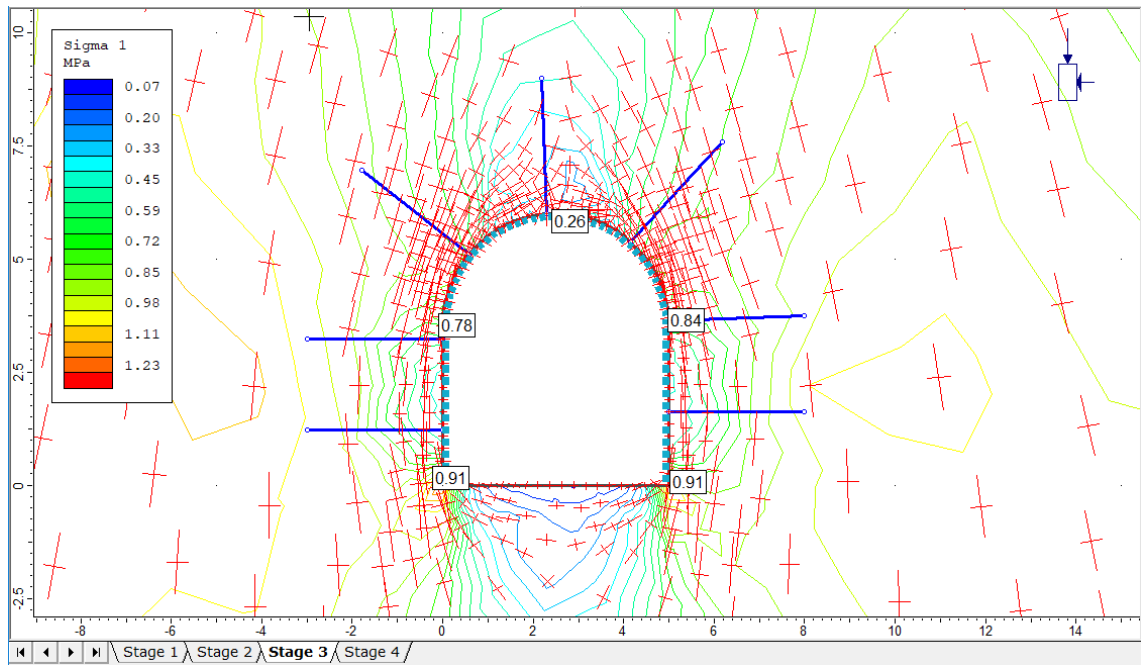
Sonlu elemanlar ağının oluşturulmasının ardından her bir kazı adımının tanımlanması gerekmektedir. Her kazı adımında tünel kaplamasına gelen asal normal gerilmeler, deformasyon bölgeleri ve yüzeyde oluşan oturmalar farklıdır. Bunların tespiti amacı ile her bir kazı adımı ayrı ayrı değerlendirilmiş olup analizde kullanılan basamaklar Çizelge 7.6’da verilmiştir. Tünel kazı-destek aşamaları programa tanımlandıktan sonra plastik hesap yöntemi ve Mohr-Coulomb kırılma kriteri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 7.8. İkinci bölge için tünel kazı aşamaları.

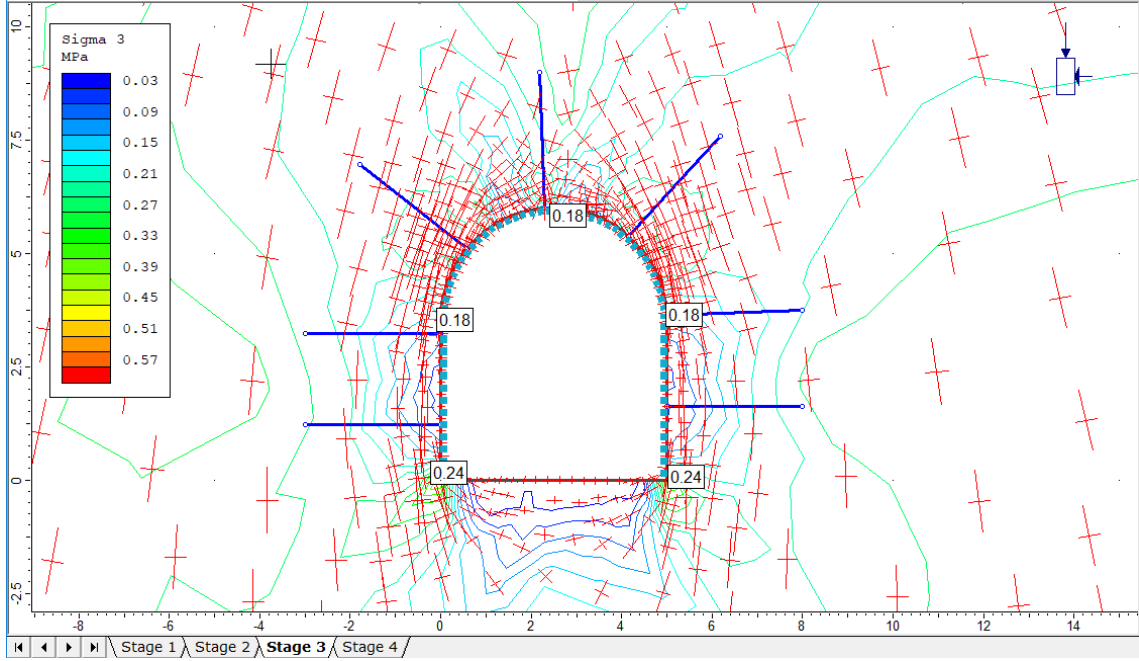
Aşama adımı	Aşama Tanımı
1	Kazı öncesi durum
2	Tünel kazısının yapılması.
3	Tünel destek elemanlarının yerleştirilmesi
4	Tünel deprem ivmesi durum

7.4.1. Tünel çevresinde oluşan gerilmeler

Tünel kazısı ve destekleme elemanlarının yerleştirilmesinden sonra oluşan, ikincil gerilme ve deformasyon durumları maksimum değerler incelenerek belirlenecektir. Şekil 7.23'de tünel kazısı sonrasında oluşan efektif asal normal gerilmelerin yönü verilmiştir. Tünel kazısının yapılmasının ardından tünelin tavanında ve tabanında asal gerilmelerin yoğunlaştığı görülmektedir (basınç gerilmeleri (-), çekme gerilmeleri ise (+) ile gösterilmektedir). Tünelde maksimum gerilmeler yan duvarlarda oluşmaktadır. Analizlerden maksimum Sigma 1 değeri $+910 \text{ kN/m}^2$ olarak okunmaktadır (Şekil 7.33). Maksimum Sigma değerinin ise 3 ise $+240 \text{ kN/m}^2$ olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 7.34).



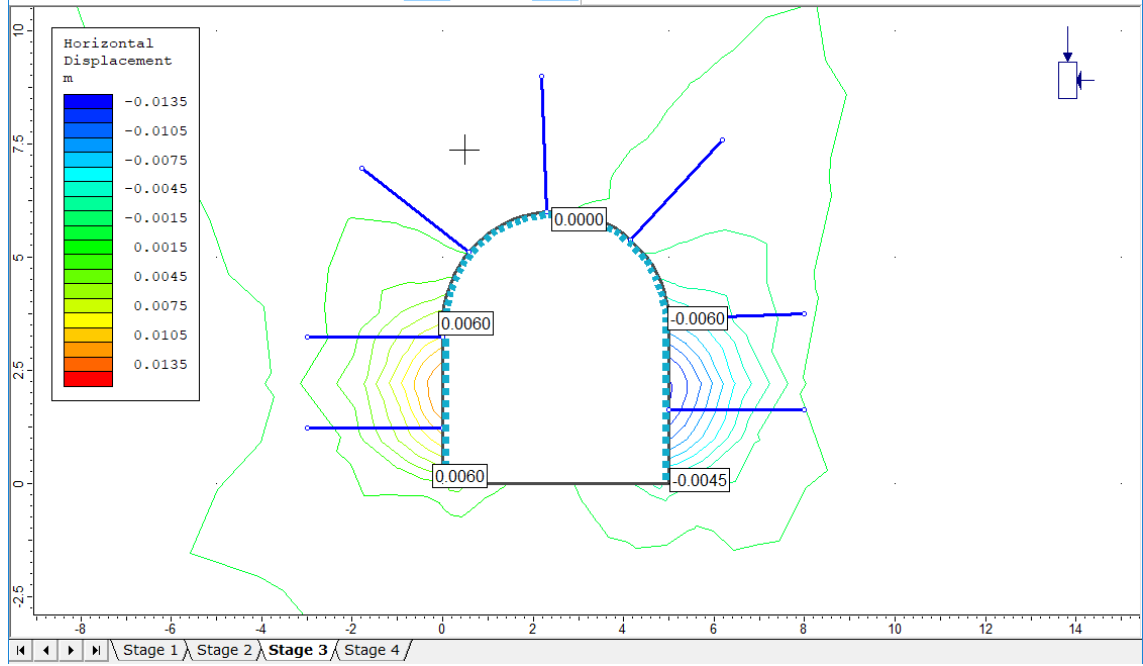
Şekil 7.33. Üçüncü bölge kesitinde kazı sonrası oluşan Sigma 1 gerilmesi.



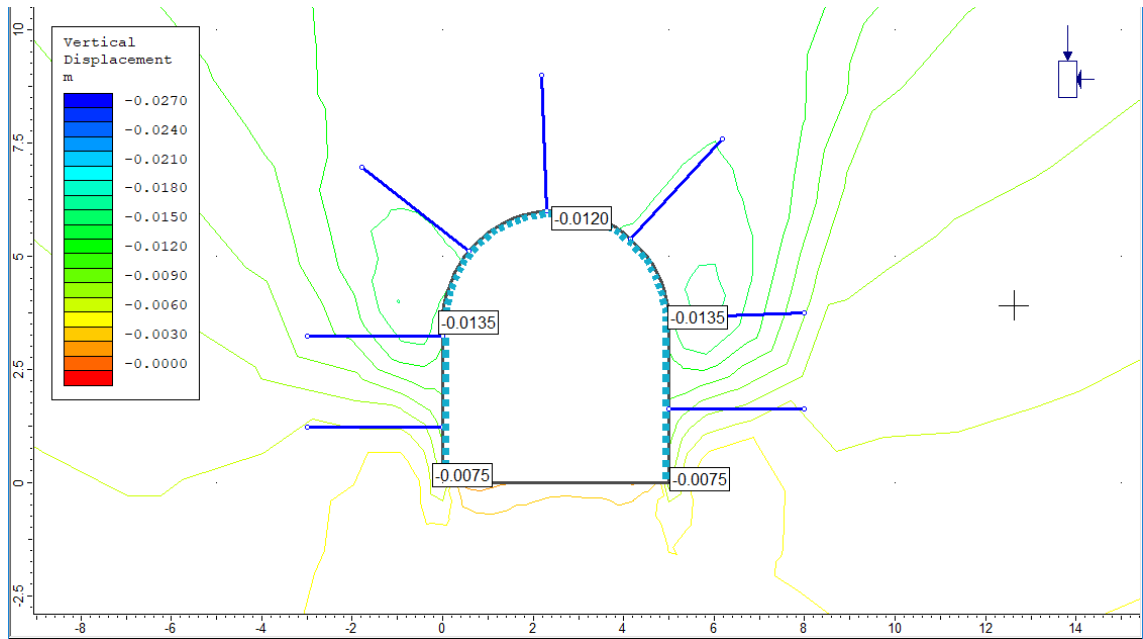
Şekil 7.34. Üçüncü bölge kesitinde kazı sonrası oluşan Sigma 3 gerilmesi.

7.4.2. Tünelde oluşan yer değiştirmeler

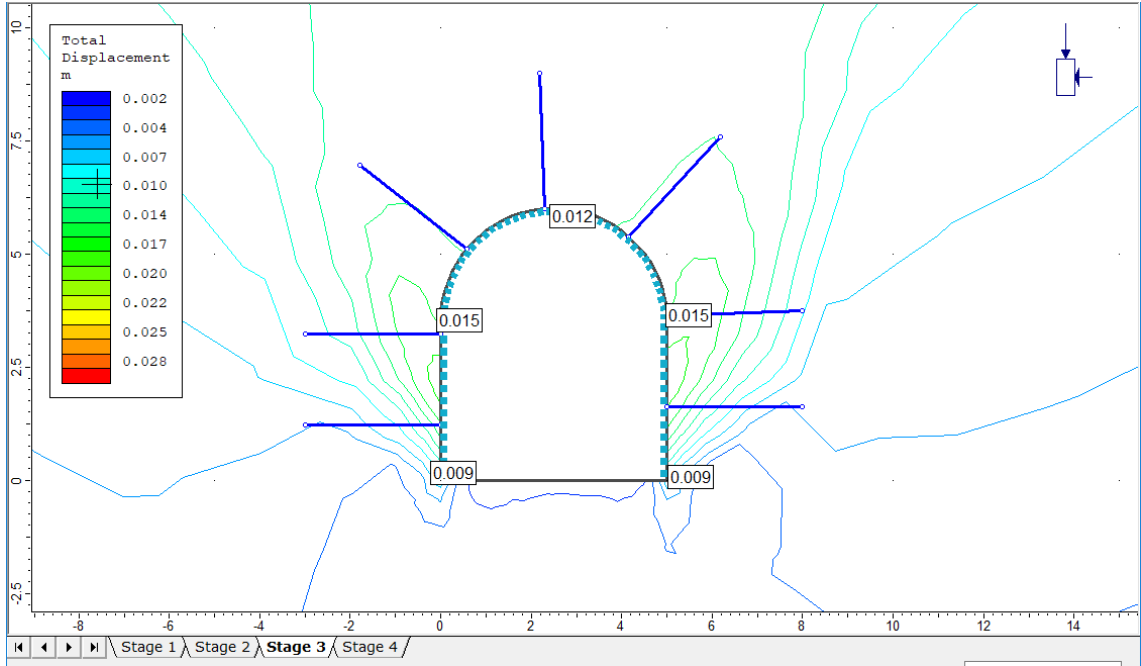
Tünel inşaa aşamalarında tüneldeki hareketlerin izlenmesi son derece önemlidir. Özellikle ayna kazısından başlayarak geriye doğru hareketler artmakta ve bu artışın öngörülebilir olması istenmektedir. Yapılan analiz sonucunda en yüksek düşey yer değiştirme 13 mm en yüksek yatay yer değiştirme ise tünel sol ayak bölgesinde 8 mm dir. Oluşan toplam yer değiştirmeler incelendiğinde tünel sol ve sağ ayak bölgesinde 7,5 mm sağ ve ve sol omuz bölgesinde 13,5 mm eksen bölgesinde 12 mm dir (Şekil7.35-7.38).



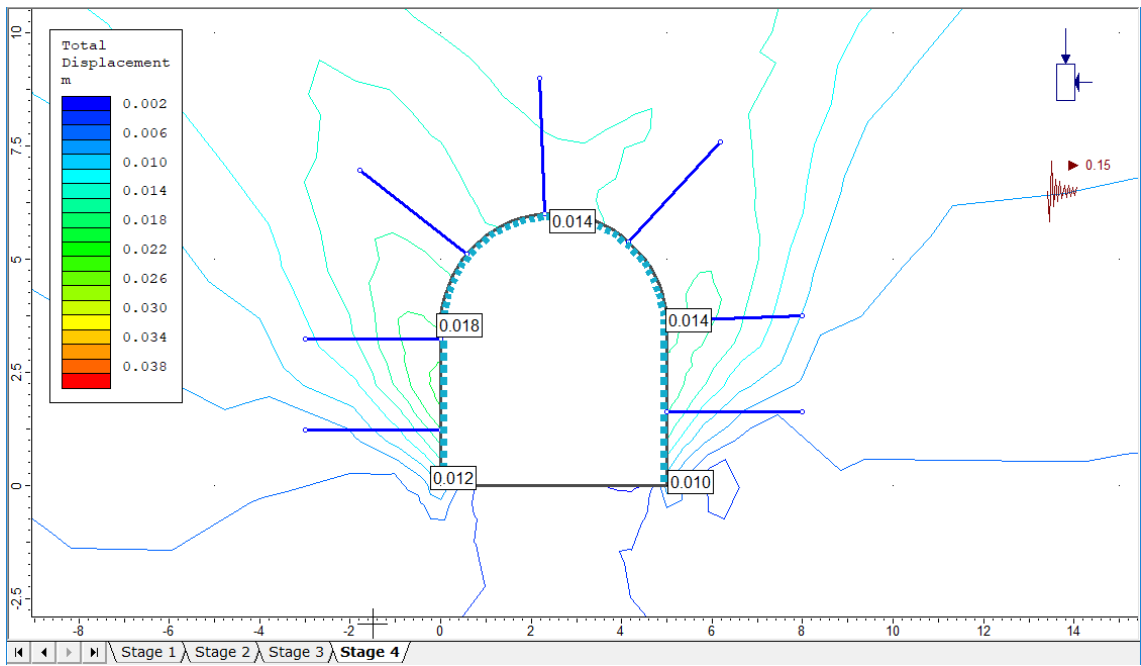
Şekil 7.35. Üçüncü bölge için yatay yerdeğıştirmeler.



Şekil 7.36. Üçüncü bölge için düşey yer değışmeler.



Şekil 7.37. Üçüncü bölge için toplam yer değişmeler.



Şekil 7.38. Üçüncü bölge için 2. derece deprem bölgesinde depremlili durumda toplam yer değiştirme.

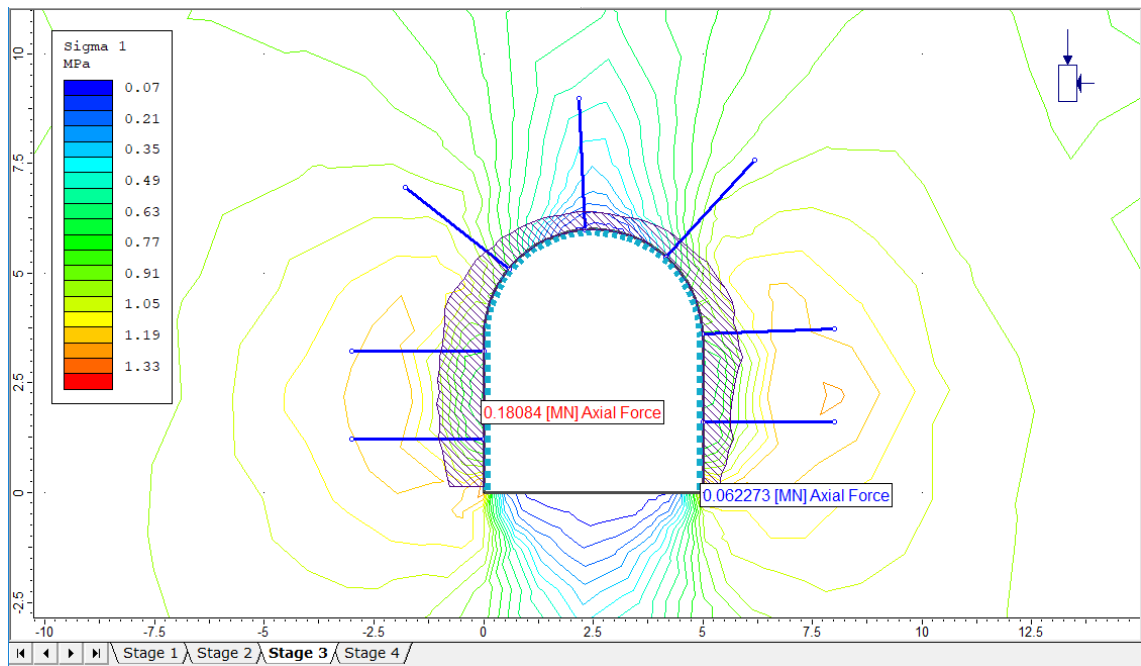
7.4.3. Tünel destekleme elemanlarının tahkiki

Tünel desteklemesi amacı ile öngörülen destek sistemleri Phase programına 2 ayrı katman olarak girilmiştir. Bunlar püskürtme beton ve çelik iksadan oluşan kabuk hattı ve 28 mm çapında nervürlü çelik ile oluşturulan 3 metre uzunluğundaki bulonlardır. Bu nedenle tünel destek elemanlarının tahkiki 2 ayrı başlık altında incelenecektir.

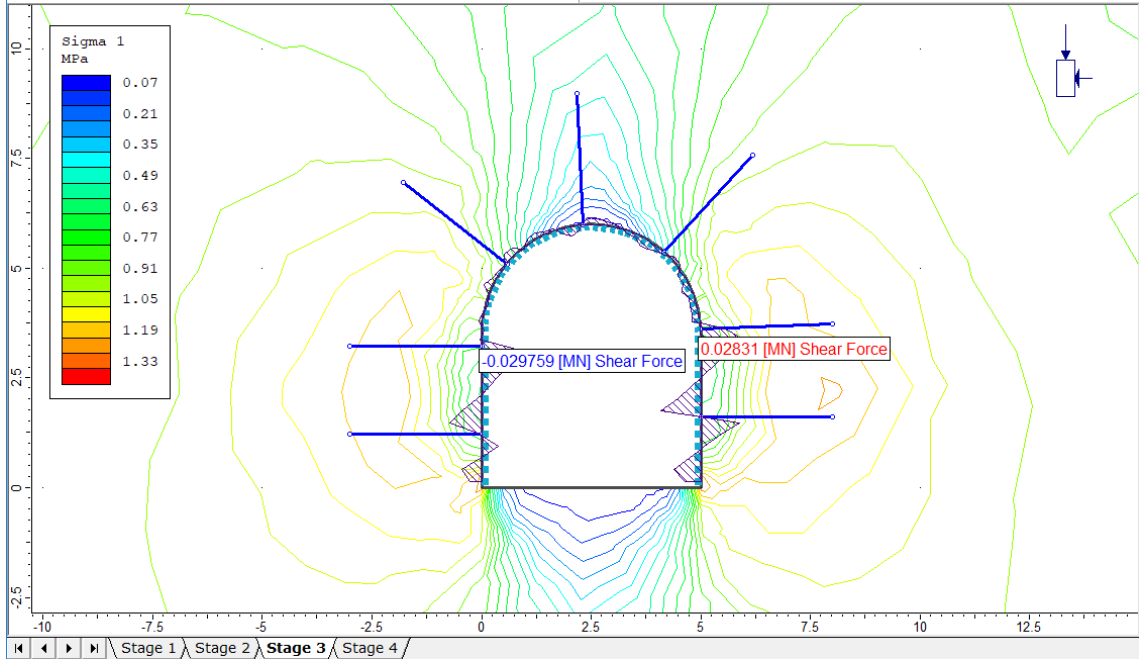
Püskürtme betonu ve çelik iksa tahkiki

Tünellerde kullanılan destekleme sistemlerinin bileşenleri olan, püskürtme beton ve çelik iksa üzerinde gelişen, aksenal kuvvet ve moment büyüklükleri program yardımı ile hesaplanmıştır. (Şekil 7.39).

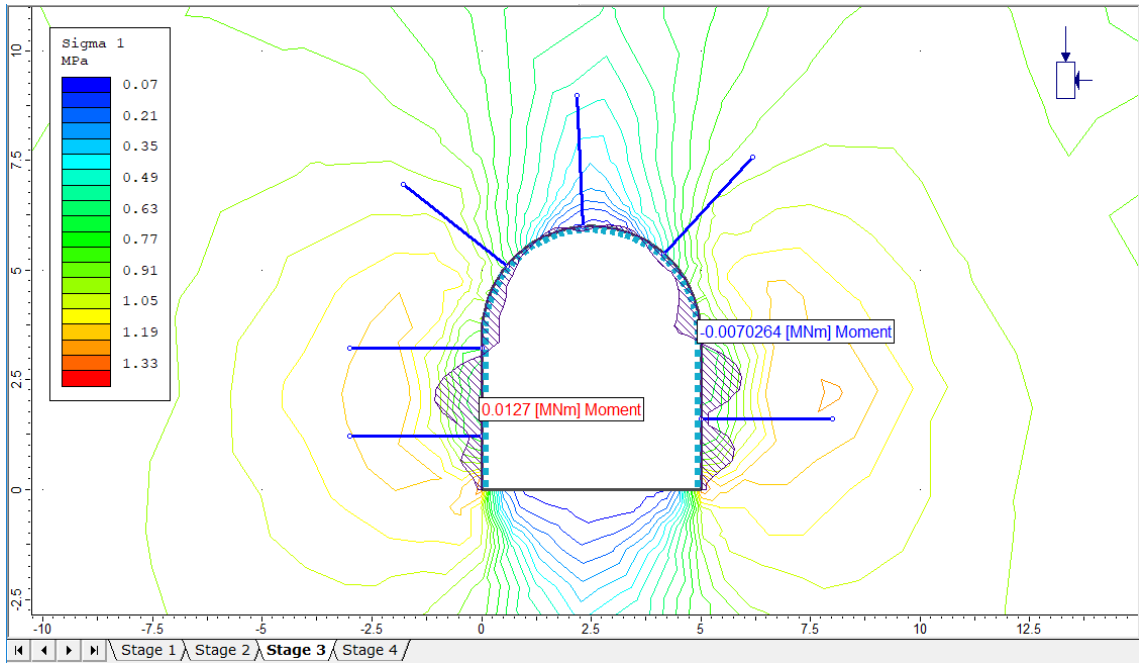
Püskürtme beton ve çelik iksa ile oluşturulan destekleme elemanlarına etkiyen N_{11} aksenal kuvveti, Q_{13} kesme kuvveti ve M_{11} eğilme momenti dağılımları Şekil 7.40 ve 41’de verilmiştir.



Şekil 7.39. Üçüncü bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen aksenal kuvvetler.



Şekil 7.40. Üçüncü bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen kesme kuvveti.



Şekil 7.41. Üçüncü bölge için püskürtme beton ve çelik iksa kabuğuna gelen eğilme momenti.

Hesaplarda kullanılacak maksimum iç kuvvetler aşağıda sıralanmıştır;

$$N_{11} = 180.84 \text{ kN/m}$$

$$Q_{13} = 12.83 \text{ kN/m}$$

$$M_{11} = 12.70 \text{ kNm/m}$$

Hesap;

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

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

$$V_d = 1.33 \sqrt{13000} * 1 * 0.15 = 22,74 \text{ kN/m}$$

Şeklinde gerçekleşir.

$$Q_{13} < V_d$$

Burada veriler yerine konulduğunda,

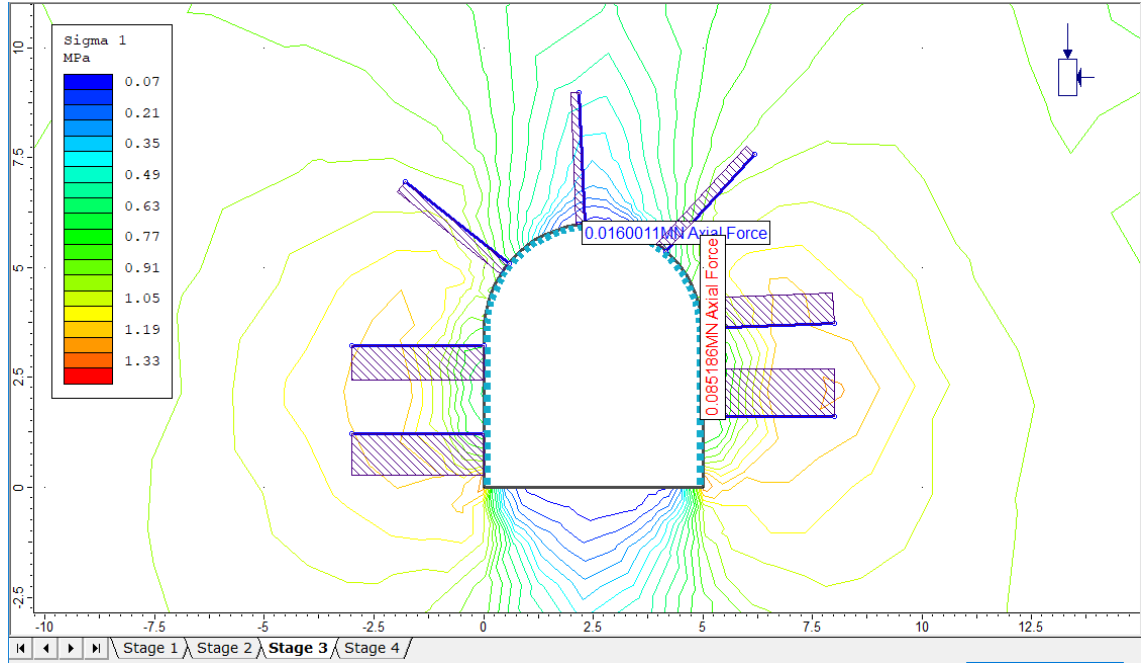
$$\frac{12,70}{41,43} + \frac{180,84}{1170} = 0,46$$

$$12,70 < 22,74$$

Sonuç olarak, güzergahının 3. bölge analizi ve hesaplamaları sonuçlarına göre, seçilen püskürtme beton ve çelik iksa elemanları üzerine gelen iç kuvvetler, söz konusu destekleme elemanlarının taşıma kapasitesinin altında kaldığı görülmüştür.

Bulon tahkiki

Bulon sistemine etkiyen maksimum normal kuvvet (N_{11}) değeri, program yardımıyla ile hesaplanmıştır. Şekil 7.42'da maksimum normal kuvvet diyagramı görülmektedir. Şekil 7.42'den de anlaşılacağı gibi 1 bulona gelen maksimum normal kuvvet değeri; 31,91 kN'dur.



Şekil 7.42. Üçüncü bölge için bulonlara gelen yükler.

Bulonun çekme dayanımı;

$$\sigma = \frac{N_{11}}{A} < \sigma_{guv}$$

$\sigma_{guv} = 36.5 \text{ kN/cm}^2$ (28 mm çapındaki bulonun dayanma kuvveti)

$$\sigma = \frac{85.1}{\frac{3.14 \times 2.8^2}{4}} < 13.82 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma < \sigma_{guv}$$

Beton enjeksiyonunda dayanım;

$$\tau = \frac{N_{11}}{\pi * \phi * l} < f_{ctd}$$

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

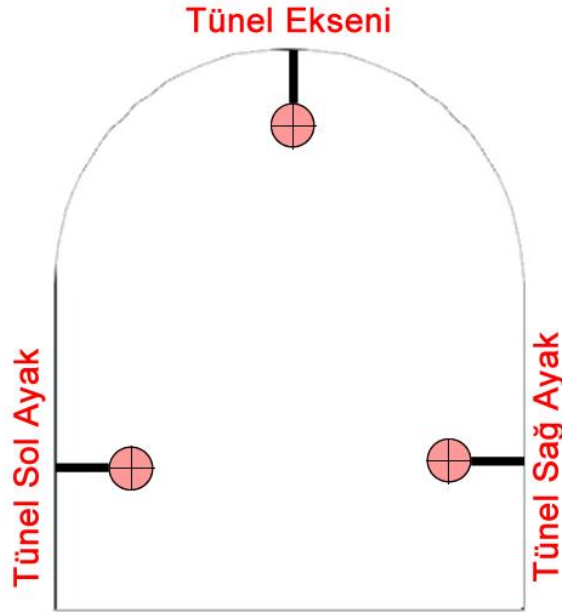
$$f_{ctd} = 0.1 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = \frac{85.1}{3.14 \times 2.8 \times 300} = 0.032 < f_{ctd}$$

Yapılan tahkik sonucunda bulonların emniyetli sınırlar içinde kaldığı anlaşılmaktadır.

7.5. Analiz ve Arazi Ölçümleri Değerlendirmesi

Tünel imalatları sırasında, tünellerde hareketliliği belirlemek amacıyla belirli aralıklarla destekleme elemanları ile bağıdaşık konverjans noktaları belirlenmektedir. Bunun en önemli nedeni tünellerde konverjans ölçümlerinin tünel destekleme elemanlarının denge durumuna ulaşp ulaşmadığını anlamaktır. Ayrıca bu veriler ile yapılan sayısal analiz performansı değerlendirilmiştir. Bu ölçümler, destekleme elemanları üzerine yerleştirilen noktaların hareketlerinin takibi esasına göre yapılmaktadır (Kovari, 1993). Tünel içerisindeki yer değıştirmeler opto-trigonometrik yöntem ile ölçülmüştür. Bu yöntemin esası tünel destekleme elemanları ile bütünleşik sabit bir noktanın jeodezik yöntemler ile x, y, z kordinatının mm hassasiyetinde ölçülmesi ve bu ölçümün ilk ölçüm verisine oranla hareketin yönünün tespitine dayanmaktadır. Opto-trigonometrik yöntem ile tünel içerisinde yapılan bu ölçümler eksen, sol ve sağ ayak şeklinde 3 noktada gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.1).



Şekil 7. 43. Tünel içi deformasyon ölçüm noktaları.

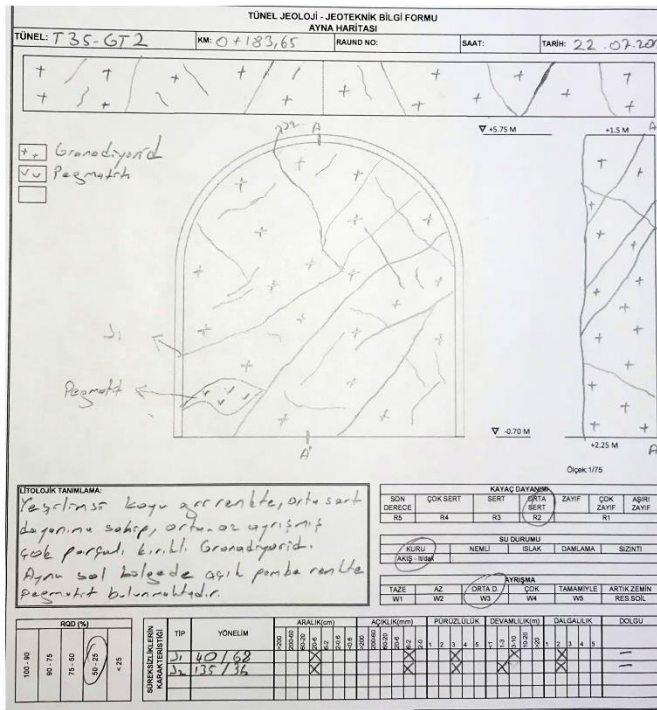
Sayısal analiz ile elde edilen deformasyon verileri ile tünel içerisinde gerçekleşen deformasyon verileri Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.9. Sayısal analiz ve tünel içi ölçüm sonuçları (Ölçüm değerleri mm'dir).

		Sayısal analiz Sonuçları (mm)			Tünel içi Ölçüm Sonuçları (mm)		
		Eksen	Sol Ayak	Sağ Ayak	Eksen	Sol Ayak	Sağ Ayak
1. Bölge	Yatay	0	21	-18	0,7	21,5	-14
	Düşey	64	37	37	61,4	30,7	33,7
	Toplam	64	40	40	67,58	42,15	38,15
2. Bölge	Yatay	0	10,5	-10,5	3	24	24
	Düşey	-10	-12	-10	-15	-19	-19
	Toplam	10	14	14	17	30	26
3. Bölge	Yatay	0	6	-6	0	3	3
	Düşey	-12	-7,5	-7,5	-11	-6	-8,2
	Toplam	12	9	9	11	6	8

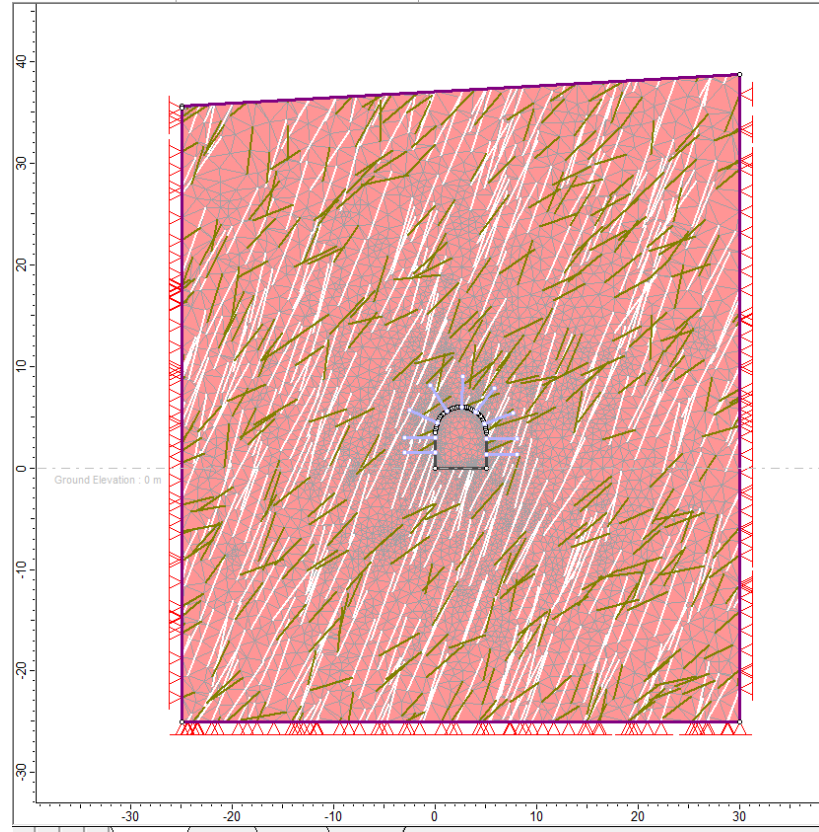
Ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde; 1. ve 3. bölgede sayısal analiz ile tünel içi ölçüm sonuçlarının birbiri ile paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Düşey ve yatay deformasyonlardaki mm mertebesindeki farklar deformasyon noktasının tünel içerisine tesisi ile ilk okumanın alınması arasında geçen süreden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Toplam deformasyon verisindeki farklılıklar ise 2 boyutlu analiz yapan Phase programı ile 3 boyutlu tünel içi ölçümlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 1. ve 2. bölgede sayısal analiz ile tünel içi ölçüm sonuçlarının ön görüldüğü gibi gerçekleşmiş olup bu bölgelerde herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır.

2. Bölgede ise durum daha farklıdır. Bu bölgede sayısal analiz ile tünel içi ölçümler farklılık göstermektedir. Tünel içi ölçümler cm mertebesinde daha büyük ölçülmektedir. Bu durumun anlaşılabilmesi amacı tünel imalatları sırasında her kazı adımında tutulan tünel jeolojik ayna formları incelenmiş ve uygulamada tünelde öngörülme 2 yönlü çatlak sistemlerinin bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.44).

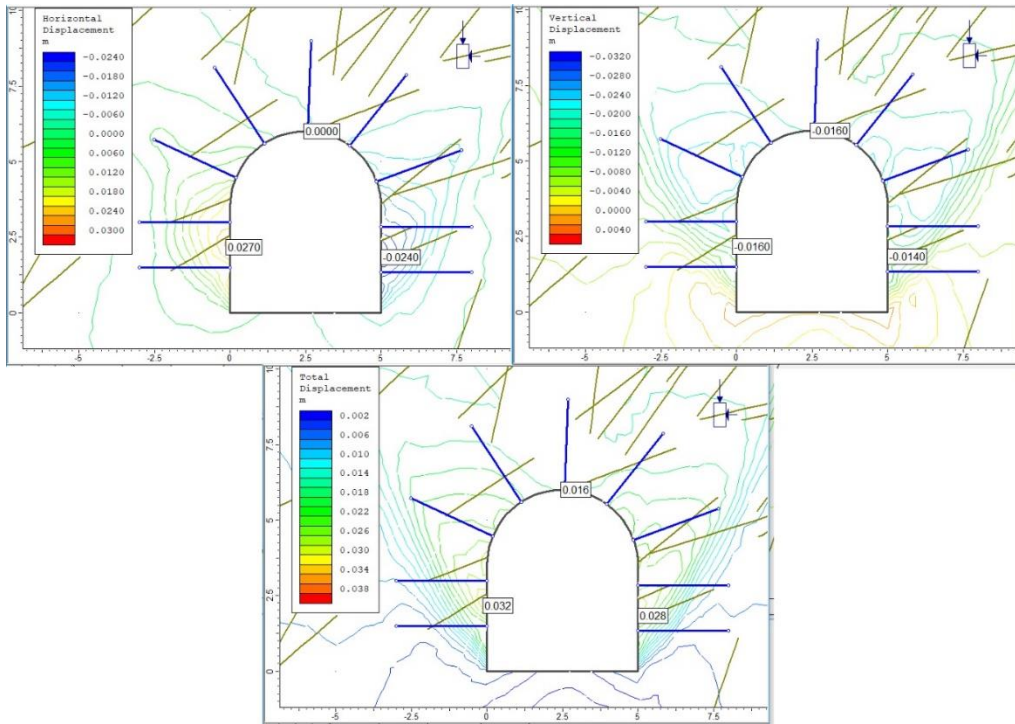


Şekil 7. 44. Bölgeye ait tünel aynası ve jeolojik ayna formu.

Jeolojik ayna formunda tespit edilip işlenen 2 süreksizlik takımı ile analizler tekrarlanmıştır. Bu analizlerde 1. Süreksizlik takımı için 40/68 çatlak duruşu 7 metre süreksizlik devamlılığı, çatlaklar arası dolgusuzdur. 2. Süreksizlik takımı için ise 135/36 çatlak duruşu 3 metre süreksizlik devamlılığı ve dolgusuz olarak programa girilerek analizler tekrarlanmıştır (Şekil 7.45 ve Şekil 7.46). Analiz sonuçları Çizelge 7.10'da özetlenmiştir.



Şekil 7. 45. Üçüncü bölge sayısal analizine 2 yönlü çatlak sistemi eklenmiş durum.



Şekil 7. 46. Üçüncü bölge sayısal analiz ile değerlendirilen deformasyon verileri.

Çizelge 7.10. Yönlü süreksizlik eklendiği durumda sayısal analiz ve tünel içi ölçüm sonuçları.

		Yeni Sayısal analiz Sonuçları (mm)			Tünel içi Ölçümler (mm)		
		Eksen	Sol Ayak	Sağ Ayak	Eksen	Sol Ayak	Sağ Ayak
2. Bölge	Yatay	0	27	24	3	24	24
	Düşey	-16	-16	-14	-15	-19	-19
	Toplam	16	32	28	17	30	26

Öngörülemeyen süreksizlikler hesaba dahil edildiğinde ölçüm sonuçları ile sayısal analiz verileri birbiri ile paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

8. SONUÇLAR

Bilgisayar temelli modellemeler, mühendislik alanında son yıllarda sıklıkla kendine yer bulmaktadır. Farklı parametrelerin hâkim olduğu tünel uygulamalarında kazı-desteklemelerin öngörülebilir olması imalat çalışmaları sırasında beklenmeyen koşulların önüne geçilmesini sağlamaktadır. Bu amaçla tünel güzergâhı boyunca karşılaşılabilecek jeolojik birimler için ayrı ayrı birim hacim ağırlık, poisson oranı, elastisite modülü, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri programa tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) kullanılarak, Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesinde yer alan 35 Numaralı tünel için önerilen 2 Numaralı Güvenlik tüneli jeolojik modeli oluşturulmuştur. Tünelin güzergahı boyunca karşılaşılabilecek jeolojik ve geoteknik koşullar değerlendirilerek tünel 3 farklı bölgeye ayrılmıştır. Her bölge için jeolojik-geoteknik model oluşturularak analizler bu modeller üzerinden yapılmıştır. Oluşturulan model sayısal analiz yapılabilmesi amacı ile Phase 2D V.8 paket programına aktarılmıştır. Phase programı, Geoteknik Mühendisliğinde, yer altı yapılarının, yarmaların, dolguların, derin temellerin ve kazıkların deformasyon ve stabilite analizleri için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Çalışma konusu olan Tünel 35 Güvenlik Tüneli 2'nin jeolojik ve geoteknik verileri önceki çalışmalardan alınarak programda modellenmiştir. Seçilen desteklemeler ile kazı-destek aşamaları programa tanıtılarak, kazı-destek aşamalarında oluşabilecek durumlar da incelenmiştir. Analizlerde efektif asal gerilmelerin dağılımı, düşey, yatay ve toplam deformasyonların bölgesel dağılımı ve desteklemelere etkiyen kuvvetler ile kesit tahkikleri yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları ile tünel imalat çalışmaları sırasında elde edilen deformasyon verileri karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak süreksizlik etkisinin olmadığı ya da az olduğu kaya koşullarının sayısal analizler ile öngörülebilir olduğu anlaşılmıştır. Buna karşın süreksizliklerin gerek sondaj gerekse de yüzey gözlemleri ile belirlenemediği durumlarda tünelin sayısal analiz ile öngörülmesinde eksik verilerden dolayı sorunlar yaşandığı anlaşılmıştır. Bu durum NATM yöntemi prensiplerine uygun olarak tünel imalat çalışmaları sırasında sıklıkla öngörülerin saha verileri ile kontrol edilmesi ve gerekmesi durumunda destekleme sisteminin revizyon edilmesi gerektiğini bir kez daha göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Ak, E. (2005). *Tünel Tasarımında Sonlu Eleman Metodu ile Gerilme ve Deformasyon Analizleri-Destek Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Aksoy, C.O., Oğul, K., Topal İ., Poşluk, E., Gicir, A., Kucuk, K. & Uyar Aldas, G. (2014). Reducing deformation effect of tunnel with Non-Deformable Support System by Jointed Rock Mass Model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 218-227.
- Aksoy, C.O., Uyar Aldas, G., Poşluk, E., Oğul, K., Topal İ. & Kucuk, K. (2016). Non-deformable support system application at Tunnel-34 of Ankara-Istanbul High Speed Railway Project, *Structural Engineering and Mechanics*, 58, No. 5, 869-886.
- Altaş N, T. (2009). *Bozüyük Kent Coğrafyası*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum.
- Amundsen, F.H., Melvear, P. & Ronnes, P. (1997). Studies on Norwegian Road Tunnels, an analysis of traffic accident and car fires in road tunnels. *Norwegian Public Roads Administration, TTS 15 Report, Oslo*, 14-16.
- Apaydın Poşluk, E. (2013). *Bozüyük (Bilecik) Güneydoğusu Tersiyer İstifi Stratigrafisi Ve Yapısal Özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arioğlu, E., (2018). Tünel Ders Notları. Yıldız Teknik Üniversitesi, <http://www.inm.yildiz.edu.tr/anabilimdallari/ulastirmatr/tunel.htm>.
- Ayhan, M., & Topal, E. (2005). Excavation and support design of the Dicle–Kıralkızı water tunnel: an overview. *Tunnelling and underground space technology*, 20(1), 81-87.
- Barton, N. & Grimstad, E. (1994). The Q-system following twenty years of application in NTM support selection. *Felsbau*, 12 (6), 428-36.
- Barton, N. R., Lien, R. & Lunde, L. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mechanics*, 6 (4), 189-239.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. John Wiley and Sons, USA.
- Bilgin, N. (1989). *İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği*, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- BS EN 50126 (1999). *Railway applications. The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*, England.
- Caner, E. (2010). *Sıkışan Zeminlerde Tam Cepheli Tünel Açma Makinelerinin Performans Analizi Ve Uluabat Kuvvet Tüneli Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- David G. (1994). Bridges and Steen Rostam. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 9(3) 293-307.
- Deere, D. U. (1964). Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1, 17-22.
- Desai, C. S. (1972). Theory and application of the finite element method in geotechnical engineering, *Symposium on the applications of the finite element method in geotechnical engineering*. Mississippi, 3-8.
- Diamantidis D., Zuccarellib F. & Westha A. (2000). Safety of long railway tunnels. *Reliability Engineering and System Safety* 67, 135-145.
- Dosay S. (2016). *Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 35 Numaralı Tünel Güvenlik Tüneli Projesi*, Uygulama Projesi, Bozüyük.
- Eisner, H. S., & Stoop, J. A. A. M. (1992). Incorporating fire safety in the Channel Tunnel design. *Safety science*, 15(2), 119-136.
- en.structurae.de/structures/data/, (Erişim Tarihi: 12.07.2018)
- Ergin, K., (1992). *Yeni Avusturya tünel inşa yönteminde sonlu elemanlar yöntemiyle tünel kaplaması hesabı*. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gözler, M. Z., Cevher, F., & Küçükayman, A. (1985). Eskişehir civarınının jeolojisi ve sıcak su kaynakları. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 103(103,104).
- Hoek, E. (1995). Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16.
- Hoek, E. (1999). Putting numbers to geology-an engineer's viewport. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, 1-19.
- Hoek, E., (2001). Big Tunnels in Bad Rock. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 726-740.
- <http://www.dmi.gov.tr>, (Erişim Tarihi: 21.10.2018)
- <http://www.tcdd.gov.tr>, (Erişim Tarihi: 10.09.2018).
- <https://deprem.afad.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 21.10.2018)
- Huang, K. P., Wang, T. T., Huang, T. H., & Jeng, F. S. (2010). Profile deformation of a circular tunnel induced by ambient stress changes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(3), 266-278.
- Hung, C.J., Monsees, J., Munfah, N. & Wisniewski, J. (2009). *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels*. Civil Elements, FHWA, New York.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Idris, J., Verdel, T., & Al-Heib, M. (2008). Numerical modelling and mechanical behaviour analysis of ancient tunnel masonry structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), 251-263.
- JUPP, E. W. (2003). *Tunnel Watching*. Intellect Books, Bristol, 52.
- Karaoğlan, H. (2002). *Kaya zeminde tünel tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karpuz, C. & Hindistan, M. A. (2006). *Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları*. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.
- Kaya, A. (2012). Cankurtaran (Hopa-Artvin) tünel güzergahının ve çevresinin jeoteknik açıdan incelenmesi. Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon*.
- KGM, (2005). *NATM uygulamalı yeraltı tünel işleri teknik şartnamesi*. T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kılıç, A. & Mesut A. N. I. L.. "Tarsus Ayrımı-Adana-Gaziantep Otoyolu T2 (Ayran) tüneline kaya sınıflarına bağlı kazı ve tahkimat uygulamaları. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 39 (2), 3-10.
- Koçman A. (1993). *Türkiye İklimi*. Ege Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Yayınları, No:72, İzmir.
- Koçyiğit, A., Kaymakçı, N., Rojay, B., Özcan, E., Dirik, K. & Özçelik, Y. (1991). *İnegöl-Bilecik-Bozüyük arasında kalan alanın jeoloji etüdü*, TPAO Raporu, Ankara.
- Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling*. Springer, Berlin 438.
- Köse, H., Gürgen, S., Onargan T., Yenice, H. & Aksoy, O. C. (2007). *Tünel Ve Kuyu Açma Genişletilmiş 3. Baskı*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayını, Yayın No: 145, İzmir, 301.
- Krausmann E. & Mushtag F. (2005). *Analysis of tunnel-accident data and recommendations for data collection and accident investigation*. EU SafeT Project D4.5 Report, Turin,
- KTŞ (2013). *Karayolları Teknik Şartnamesi*. KGM Yayını, Ankara.
- Kun, M. (2010). *Zayıf kayalarda ve faylı zonlarda tünel açma tasarım ve yapım gereksinmelerinin araştırılması ve çözümlenmesi*. Doktora Tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W. & Herrenknecht, M. (2008). *Hardrock Tunnel Boring Machines, Gmbh & Co.KG*, Berlin.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Özsan A. (1991). Alaköprü - Ilısu Kuvvet Tünelindeki (GB Kuramım) En uygun İksanın RSR Yöntemiyle Seçimi. *Jeoloji Mühendisliği*, 38, 68-74.
- Palmström, A. (2000). On classification systems, Proceedings of Workshop on Reliability of Classification Systems a Part of the International Conference, *GeoEng-2000*, Melbourne.
- Park, K. H. (2005). Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays. *Tunnelling and underground space technology*, 20(3), 249-261.
- Polat, D. (2010). *NATM Metodu Kullanılarak Tünel Tasarımı Ve Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Poşluk, E. & Korkanç, M. (2017). Yüksek Hızlı Demiryolu Tünellerinde Güvenlik Tüneli Modellemeleri: Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 26 Numaralı Tünel Örneği, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 642-652.
- Poşluk, E. (2012), *Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 26 Nolu Tünelin TBM Kazı Performansının Q_{TBM} Metodu İle Tahmini*. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Poşluk, E., Korkanç M., Gıncır, A. & Oğul, K. (2012). Yüksek hızlı tren tünellerinde alt yapı güvenlik önerileri, *1. Uluslar arası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı (IWRSE'12)*, 11-13 Ekim 2012, Karabük, 186-194.
- Rocscience (2010). *Phase2 V 8.0 Finite Element Analysis for Excavations and Slopes*, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Satıcı, Ö. & Topal, T. (2015). Tünel Açma Yöntemlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Sınıflama Sistemleri ile Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 39(1), 45-57.
- Satır, B. (2007). *Tünel Deformasyonlarının Jeodezik. Geoteknik ve Sonlu Eleman Yöntemleri ile Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Selman, H. G. (2014). *Tünel Kazısı Sebebiyle Meydana Gelen Zemin Oturmaları Ve Mevcut Yapılara Olan Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Singh, B., & Goel, R. K. (1999). *Rock mass classification: a practical approach in civil engineering*. Elsevier, London, 260.
- Singh, T. D., & Singh, B. (2006). *Tunnelling In Weak Rocks*. Elsevier, London, 481.
- Taz, F., Ündül, Ö., & Denek, H. (2018). Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünellerinin Yapım Aşamalarında Karşılaşılan Sorunların Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 42(1), 49-76.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil Mechanics In Engineering Practice*. John Wiley & Sons,
- TSI, 2008/163/EC (2008). *Concerning the technical specification of interoperability relating to 'safety in railway tunnels' in the trans-European conventional and high-speed rail system*. Standard, France.
- Turfan, M. & Tosun, H. (1994). Basınçlı su tünellerinde kaya kütleleri jeomekanik özelliklerinin destek sistemlerine etkisi ve DSİ uygulamaları, *Su ve Toprak Kaynakları Gelistirme Konferansı*, Ankara, 2, 719-729,.
- UIC Code 779-9 (2003). *Safety in railway tunnels*, Standard, France.
- Ulusay, R. & Sönmez, H. (2002). Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri. Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.
- Vardar, M. (1985). Sürtünmeli Çelik Bağların Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde NATM kullanılabilir Olanakları, *Kaya Mekaniği Bülteni, İstanbul*, 3, 35-44.
- Vardar, M. (1986). Doğal gerilme durumlarının ve süreksizliklerin yer altı kaya yapılarının deformasyonuna etkisi. *Tünellerin Projelendirilmesi ve İnşası Sempozyumu*, 1, 1-4, Adana.
- Whittaker, B. N. & Frith, R., C. (1990). *Tunnelling, Design, Stability and Construction*, Institution of Mining and Metallurgy. London W1N 4BR, England, 463.
- Yüksel proje Uluslar arası A.Ş (2004). *Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi (Köseköy-İnönü)*. Proje Raporu, Ankara.
- Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. (2009). *Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi Ripajları*, Uygulama proje raporu, Ankara.

ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Şakir Uğuz
Doğum Yeri ve Tarihi : 01.05.1965



Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi 2015
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce (Az)
Bilimsel Faaliyetleri : Uğuz, Ş., Ural, N. (2016). The Importance of Safety (Escape) Tunnels in Railway Tunnels. International Black Sea Mining & Tunnelling Symposium, 2-4 November 2016, Trabzon, Turkey, 142-146.

İş Deneyimi

Stajlar : 1. Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 2. Etap, Gar ve Teknik bina inşaatları
2. Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi Doğançay Ripajı İlk Kısım (Alifuatpaşa – Doğançay arası km 132+560 – 143+661)
Projeler : 1. Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 2. Etap Çalışmaları
Çalıştığı Kurumlar : TCDD

İletişim

Adres : Kırmızıtoprak Mahallesi, Ercan Sokağı, No: 86/3 Eskişehir
E-Posta Adresi : sakiruguz26@hotmail.com

Akademik Çalışmaları

–

Tarih:03/05/2019