



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

JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**6 ŞUBAT KAHRAMANMARAŞ DEPREMLERİNDE HASAR
GÖREN DEMİRYOLU TÜNELİNİN REHABİLİTASYON
ÇALIŞMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih Burak BÜYÜKDEMİRCİ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mustafa Murat KAVURMACI

AKSARAY, 2025

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222302713 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Fatih Burak BÜYÜKDEMİRCİ tarafından hazırlanan “**6 ŞUBAT KAHRAMANMARAŞ DEPREMLERİNDE HASAR GÖREN DEMİRYOLU TUNELİNİN REHABİLİTASYON ÇALIŞMALARI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Murat KAVURMACI

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum..

Üye: Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU

Kapadokya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Prof. Dr. Mehmet SARI

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Savunma Tarihi: 06/05/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Fatih Burak BÜYÜKDEMİRCİ

TEŐEKKÖR

Çalışmalarım süresince her konuda yanımda olan, akademik ve teknik desteklerini esirgemeyen hocam Prof. Dr. Mustafa Murat KAVURMACI' ya, yaptığım çalışmalar boyunca beni yönlendiren ve değerli katkılar sunan hocam Prof. Dr. Candan GÖKÇEOğLU' ya, yüksek lisans eğitim dönemimde her türlü anlayışı gösteren ve kolaylık sağlayan çalışmakta olduğum kurum “Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD)” bünyesindeki birim amirlerime, özellikle tez aşamasında desteklerini esirgemeyen mesai arkadaşlarıma, mesai dışı çalışma süreçlerimde anlayış gösteren ve sürekli destek veren, canım eşim Melike' ye ve biricik oğlum Ömer Kaan' a, beni yetiştiren ve bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan canım anneme sonsuz teşekkür ederim.

Fatih Burak BÜYÜKDEMİRCİ
AKSARAY, 2025

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v-vi-vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Önemi	4
1.2 Çalışma Alanının Tanıtılması.....	5
1.3 Literatür Taraması ve Önceki Çalışmalar	6
1.4 Kullanılan Materyal ve Metodlar	10
2. GENEL JEOLJİ	11
2.1 Bölgesel Jeoloji	11
2.2 Çalışma Alanının Jeolojisi.....	14
2.3 Yapısal Jeoloji	15
3. ARAŞTIRMA ÇALIŞMALARI	20
3.1 T3 Tünelinde Depremde Meydana Gelen Hasarlar	20
3.2 Depremlerin T3 Tüneline Etkilerinin Araştırılması	22
3.2.1 Sondaj çalışmaları	23
3.2.2 Jeofizik etütler	26
3.2.2.1 Tünel üzerinde yapılan jeofizik etütler.....	33
3.2.2.2 Tünel çıkış portal kesiminde yapılan jeofizik etütler	37
3.2.2.3 Jeofizik etütler genel değerlendirme	41
4. TÜNELİN REHABİLİTASYON ÇALIŞMALARI	42
4.1 Heyelan Islah Çalışmaları	42
4.2 T3 Tüneli Rehabilitasyon Çalışmaları.....	49
4.2.1 Tünel üzeri mühendislik çözümleri	49
4.2.1.1 Tünel üzeri enjeksiyon	49
4.2.1.2 Tünel çıkış portal yapısı tasarımı	51
4.2.2 Tünel içi mühendislik çözümleri	71
4.2.2.1 Tünel destek sistemi tasarımı	71
4.2.2.2 Tünel içi kademeli enjeksiyon imalatı.....	95
4.2.2.3 Tünel nihai beton imalatları	99
5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	113

YÜKSEK LİSANS TEZİ

6 ŞUBAT KAHRAMANMARAŞ DEPREMLERİNDE HASAR GÖREN DEMİRYOLU TÜNELİNİN REHABİLİTASYON ÇALIŞMALARI

Fatih Burak BÜYÜKDEMİRCİ

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Murat KAVURMACI

ÖZET

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli meydana gelen depremlerin ardından (Pazarcık Mw:7.7; Elbistan Mw:7.6) Malatya-Narlı konvansiyonel demiryolu hattında deprem yüzey kırığı ile kesişen T3 Tünelinde oluşmuş hasarlar incelenmekte ve demiryolu tünelinin yeniden ulaşım açılabilmesi adına yapılan rehabilitasyon çalışmaları sunulmaktadır.

Kilit taşlı yığma taş kaplama yapıda 1933 yılında inşa edilen T3 Tüneli Adıyaman İli, Gölbaşı İlçesi, Ozan Köyünde bulunmaktadır. Meydana gelen depremlerde Doğu Anadolu Fay Zonunun (DAFZ) segmentlerinden biri olan Erkenek Fayı tarafından kesilen T3 Tüneli üzerinde heyelanlar oluşmuştur. Hem fay tarafından kesilen hem de üzerinde heyelan tetiklenen tünelde deformasyonlar ortaya çıkmış ve tünel içerisinde göçük meydana gelmiştir. Meydana gelen yenilmenin karakterinin ortaya konulması adına ayrıntılı yerinde gözlem çalışmaları, detaylı jeofizik etütler, jeolojik ve jeoteknik araştırmalar yapılmıştır.

Yapılan etütler sonucu elde edilen veriler ışığında tünelin rehabilite edilip tekrar kullanılabilir hale getirilmesi için yapılması gereken imalatlar ve bu imalatların yapım metodolojileri belirlenmiştir. Tünel içinden ve tünel üzerinden olmak üzere iki aşamalı bir tasarım yapılmıştır. Öncelikli olarak tünel üzeri meydana gelen ve hareketine devam eden heyelanların önlenmesi amaçlanmıştır. Daha sonra tünel üzeri konsolidasyon enjeksiyonu yapılarak göçük meydana gelen zemin ve portal bölgesinin güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu imalatların akabinde ise yeni bir portal yapısı tasarımı yapılmış ve tünel kazı destekleme imalatlarının tamamlanarak göçüğün geçilmesi planlanmıştır.

Yapılan tasarım belirlenen imalat aşamalarına uygun şekilde sahada tatbik edilmiş ve devam eden artçı depremlere rağmen 6 ay gibi bir sürede sorunsuz bir şekilde tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu Tüneli, 6 Şubat Depremleri, T3 Tüneli, Doğu Anadolu Fay Zonu, Konsolidasyon Enjeksiyonu, Portal, Heyelan

Mayıs, 2025; 113 sayfa

M. Sc. THESIS

**REHABILITATION ACTIVITIES FOR THE RAILWAY TUNNEL
DAMAGED DURING THE FEBRUARY 6th KAHRAMANMARAŞ
EARTHQUAKES**

Fatih Burak BÜYÜKDEMİRÇİ

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geological Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa Murat KAVURMACI

ABSTRACT

This study examines the damages sustained by the T3 Tunnel on the Malatya-Narlı conventional railway line, intersected by the earthquake surface rupture, following the Kahramanmaraş centered earthquakes on February 6, 2023 (Pazarcık Mw:7.7; Elbistan Mw:7.6) and presents the rehabilitation works carried out to reopen the railway tunnel to transportation.

The T3 Tunnel, constructed in 1933 with a key stone masonry lining structure, is located in Ozan Village, Gölbaşı District, Adıyaman Province. The T3 Tunnel, which was intersected by the Erkenek Fault, one of the segments of the East Anatolian Fault Zone (EAFZ), experienced landslides during the earthquakes. Deformations occurred within the tunnel, which was both intersected by the fault and subjected to landslide triggers, and a collapse occurred inside the tunnel. Detailed in-situ observation studies, detailed geophysical surveys, geological and geotechnical investigations were conducted to determine the nature of the failure.

Based on the geological data obtained from these studies, the necessary works and construction methodologies required for rehabilitating and restoring the tunnel to operational status were identified. A two stage design was developed, including from inside the tunnel and above the tunnel. Primarily, it was aimed to prevent the landslides that occurred and continued to move above the tunnel. Subsequently, it was aimed to strengthen the ground and portal area where the collapse occurred by performing consolidation grouting above the tunnel. Following these measures, a new portal structure was designed, excavation and support works were planned to facilitate passage through the collapsed section.

The design was implemented on-site in accordance with the determined construction stages and was completed without any problems in a period of 6 months, despite the ongoing aftershocks.

Keywords: Railway Tunnel, February 6 Earthquakes, T3 Tunnel, East Anatolian Fault Zone (EAFZ), Landslide, Collapse in the tunnel.

May, 2025; 113 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İnceleme alanı yer bulduru haritası.	5
Şekil 2.1. Kuzeydeki sutur zonundan, güneyde Arap Platformunun kuzeyine, GD Anadolu'daki Arap Plakasının genelleştirilmiş tektono-stratigrafi kesiti (Yılmaz, 1993' den sadeleştirilmiş, Yıldırım vd., 2012, Şekil 3).....	12
Şekil 2.2. 06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Ekinözü (Kahramanmaraş) ile 20 Şubat 2023 Yayladağı (Hatay) depremlerinin ana şoklarının dış merkez üsleri ve bu depremlerde meydana gelen yüzey kırığı haritası (MTA, 2023).....	13
Şekil 2.3. Doğu Anadolu Fay Sistemini oluşturan fay parçalarını gösterir şekil (Harita üzerindeki tektonik hatlar Demirtaş, 2023, Veri AFAD' dan alınmıştır)..	13
Şekil 2.4. Gölbaşı İlçesi Nurdağı-Malatya hattındaki konumu.	14
Şekil 2.5. Ozan Köyü T3 Tüneli-Narlı Malatya demiryolu hattı üzerindeki yeri.....	14
Şekil 2.6. T3 Tüneli-Gölbaşı bölgesi jeolojik haritası (MTA Genel Müdürlüğü Jeolojisi Haritası).....	15
Şekil 3.1.T3 Tüneli geometrisi (tünел çıkış portalı).....	20
Şekil 3.2.T3 Tüneli oluşan göçük giriş ve çıkış kesimlerinden görüntüsü	21
Şekil 3.3 T3 Tüneli çıkış kesiminde raylarda oluşan yükseklik farkı.....	21
Şekil 3.4. T3 Tüneli Google Earth üzerinde fay kırığının konumu ve fayda gelişen atım miktarları.....	22
Şekil 3.5. Tünel üzeri sondaj yerleri	24
Şekil 3.6.TSK-07 kuyusuna ait kumlu çakıllı kil numuneleri	25
Şekil 3.7.TSK-07 kuyusuna ait ayrılmış kilaşı numuneleri.....	25
Şekil 3.8. Yarı sonsuz homojen ortamda akım ve potansiyel çizgilerinin dağılımı (Stummer, 2003; Van Nostran ve Cook, 1966).....	27
Şekil 3.9.Yüzey Dalgasının Çok-Kanallı Analizi (MASW) yönteminin veri toplama uygulaması gösterimi (MASW, b.t)..	31
Şekil 3.10. Çalışma sahasında uygulanan jeofizik etüt profilleri.....	35
Şekil 3.11. Ert-5 profili uydu görüntüsü, sonuç kesiti	35
Şekil 3.12. Ert-6 profili uydu görüntüsü, sonuç kesiti	36
Şekil 3.13. Tünel çıkış portalında gerçekleştirilen jeofizik çalışma lokasyonları uydu görüntüsü	38
Şekil 3.14. ERT-14 profili uydu görüntüsü, sonuç kesiti	38
Şekil 3.15. Sismik-2 profili 2-Boyutlu S Dalgası heyelan bölgesi hız değişim kesiti.....	39
Şekil 3.16. Sismik-2 profili 2-Boyutlu S Dalgası genel hız değişim kesiti	40
Şekil 3.17. ERT ölçüm profilleri ve muhtemel çöküntü alanları.....	41
Şekil 4.1. T3 Tüneli jeolojik kesiti.....	42
Şekil 4.2. Saha çalışmaları ve etütler ile belirlenen olası kayma dairesi	43
Şekil 4.3. Mevcut durum deformasyon davranışı	43
Şekil 4.4. Numerik analize esas alınan kesit.....	44
Şekil 4.5. Tek sıra kazılı tutucu yapı ile toplam deformasyon davranışı.....	45
Şekil 4.6. Çift sıra kazılı tutucu yapı ile toplam deformasyon davranışı.....	45
Şekil 4.7. Üç sıra kazılı tutucu yapı ile toplam deformasyon davranışı	46
Şekil 4.8. Heyelan ıslah kazıkları yerleşim.....	46
Şekil 4.9. Heyelan kazıkları kesiti	47
Şekil 4.10. İnceleme alanının heyelan kazıkları eklenmiş planı	47
Şekil 4.11. Heyelan kazıkları sonrası deformasyon durumu	48

Şekil 4.12. Islah sonrası depremli durum toplam deformasyon davranışı.....	48
Şekil 4.13. Tünel üzeri enjeksiyon kuyuları	50
Şekil 4.14. Tünel üzeri enjeksiyon imalat fotoğrafları	51
Şekil 4.15. T3 Tüneli çıkışı aç-kapa yapısı sondaj lokasyonları....	52
Şekil 4.16. Efektif kohezyon değeri ile drenajsız kayma mukavemeti arasındaki ilişki (Sorensen ve Okkels, 2013).....	53
Şekil 4.17. Plastisite indeksi – efektif/rezidüel içsel sürtünme açısı grafiği, (U.S. Navy, 1971 – Ladd et al. 1977).	53
Şekil 4.18. BST sonuçlarının değerlendirmesi	55
Şekil 4.19. T3 Tüneli çıkış heyelan kesimi jeolojik modeli	56
Şekil 4.20. Aç-kapa yapısı kritik kesitler	57
Şekil 4.21. Kesit-1 model görünümü-kazı sonu.....	58
Şekil 4.22. Kesit-2 model görünümü-kazı sonu.....	58
Şekil 4.23. Kesit-3 model görünümü-kazı sonu.....	59
Şekil 4.24. Kesitlere ait yapısal elemanların özeti	60
Şekil 4.25. Strutlara ait plan gösterimi	61
Şekil 4.26. Kazık eksenlerine göre boy profil ve strut detayları.....	62
Şekil 4.27. Heyalan tutucu kazık imalatları	62
Şekil 4.28. Kazıkların başlık kirişi imatları	63
Şekil 4.29. Birinci kademe strutların montajı	63
Şekil 4.30. İkinci kademe strutların montajı.....	64
Şekil 4.31. Üçüncü kademe strutların montajı ve kuşak kiriş betonlarının dökümü	64
Şekil 4.32. Dördüncü sıra strutların montajı.....	65
Şekil 4.33. Beşinci sıra strutların montajı ve aç-kapa temel betonunun dökülmesi ..	65
Şekil 4.34. SPT-N60 değeri ve hacimsel sıkışma indisi ilişkisi (Stroud 1975)	67
Şekil 4.35. Tünel çıkış kesimine denk gelen kazıkların kırımı.....	69
Şekil 4.36. Çıkış aynası kendinden delgili süren imalatı	69
Şekil 4.37. T3 Tüneli aç-kapa yapısı ve istinat duvarı betonlarının dökülmesi.	70
Şekil 4.38. Aç-kapa yapısı U duvar tip kesiti	70
Şekil 4.39. Aç-kapa yapısı ve istinat duvarı tamamlanmış hali	71
Şekil 4.40. T3 Tüneli mevcut ve yeni tünel geometrisi	72
Şekil 4.41. T3 Tüneli eski-yeni tünel kesitlerinin karşılaştırılmış hali ..	73
Şekil 4.42. Deprem yükü azaltma katsayısı	76
Şekil 4.43. Q sistemine göre destekleme tipleri.....	77
Şekil 4.44. RMR kaya kütle sınıflamasına göre tahkimatsız durma süresi-tavan açıklığı arasındaki ilişki (Bieniawski 1989)	79
Şekil 4.45. RMR kaya sınıflaması puanlama sistemi	80
Şekil 4.46. Q, RMR ve NATM sınıflamalarının karşılaştırması	81
Şekil 4.47. Numerik analizlerde kullanılan modeller	86
Şekil 4.48. Toplam deformasyon miktarları	87
Şekil 4.49. Numerik analiz sonuçları	88
Şekil 4.50. T-3 Tüneli göçük kesiti üst yarı birincil destekleme yük ve kapasite diyagramları.....	89
Şekil 4.51. T-3 Tüneli göçük kesiti üst yarı birincil destekleme deprem durumu yük ve kapasite diyagramları	89
Şekil 4.52. T3 Tüneli kazı destekleme sistemi	90
Şekil 4.53. Tünel giriş bölgesinde ibo bulonlar ile yapılan enjeksiyon paterni	91
Şekil 4.54. T3 Tüneli ayna enjeksiyon paterni	91
Şekil 4.55. T3 Tüneli ilk tarama kazı imalatı.....	92
Şekil 4.56. Kazı esnasında alınan konverjans ölçüm grafikleri	92

Şekil 4.57. T3 Tüneli çıkış kesimi kazı destekleme imalatları	93
Şekil 4.58. T3 Tüneli giriş kesimi kazı destekleme imalatları... ..	93
Şekil 4.59. T3 Tüneli kazı destekleme imalatları ssnasında mevcut taş kaplama tünel	93
Şekil 4.60. T3 Tüneli invert imalatları.....	94
Şekil 4.61. T3 Tüneli göçük meydana gelen-NATM ile açılmış kesim	94
Şekil 4.62. Kesitte enjeksiyon uygulama aşamaları şematik gösterimi	95
Şekil 4.63. Azalan yarı eşit aralık metodu (6 m' lik 1 ano için)	96
Şekil 4.64. Enjeksiyon uygulama kesiti	97
Şekil 4.65. Tünel içi konsolidasyon enjeksiyonu yapılması	98
Şekil 4.66. T3 Tünelinde zeminin enjeksiyon alışıını gösteren grafik.....	99
Şekil 4.67. T3 Tüneli taş kaplama kesimi taban betonarmesi.....	100
Şekil 4.68. T-3 Tüneli taş kaplama kesimi taban betonarmesi sonlu elemanlar analiz modeli	100
Şekil 4.69. T-3 Tüneli nihai kaplama sistemi	101
Şekil 4.70. T-3 Tüneli nihai kaplama kesiti sonlu elemanlar analiz modeli.....	102
Şekil 4.71. Q kaya sınıflama sistemi lif katkılı beton değerlendirmesi	103
Şekil 4.72. T3 Tüneli nihai beton tamamlanmış durum.....	104

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Tünel üzeri ERT ölçümleri lokasyon koordinatları	33
Çizelge 3.2. Tünel üzeri sismik ölçümler lokasyon koordinatları... ..	34
Çizelge 3.3. Tünel çıkış portalı ERT ölçümleri lokasyon koordinatları.....	37
Çizelge 3.4. Tünel çıkış portalı sismik ölçümler lokasyon koordinatları.. ..	37
Çizelge 4.1. Kullanılan zemin-kaya birimlerin mukavemet özellikleri.....	54
Çizelge 4.2. Sondajlarda ölçülen yeraltısuyu seviyeleri	55
Çizelge 4.3. Tüm kesitlere ait inşaat aşamaları.....	59
Çizelge 4.4. Deprem yer hareketi düzeyi.....	75
Çizelge 4.5. Q sistemine göre kaya kütlesi sınıflaması	77
Çizelge 4.6. RMR kaya sınıflaması özet tablosu	78
Çizelge 4.7. RMR'a göre tüneller için destekleme sistemleri (Bieniawski, 1976)....	82
Çizelge 4.8. NATM kaya sınıflaması ile Q ve RMR değerleri karşılaştırması	83
Çizelge 4.9. T3 Tüneli kaya parametreleri.....	84
Çizelge 4.10. Analizlerde kullanılan parametreler	86
Çizelge 4.11. Birincil destekleme sisteminde kullanılan elemanlar	88
Çizelge 4.12. Taban betonarmesi özellikleri.....	101
Çizelge 4.13. Nihai kaplama özellikleri.....	102
Çizelge 4.14. Numuneler ait tokluk ve maksimum yük değerleri tablosu.....	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

Mw	Moment Magnitüdü
Km	Kilometre
NATM	Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu
TBM	Tünel Açma Makinesi
DAF	Doğu Anadolu Fayı
DAFZ	Doğu Anadolu Fay Zonu
TUİK	Türkiye İstatistik Kurumu
Kko	Koçali Karmaşığı
KTg	Germav Formasyonu
Teh	Hoya Formasyonu
ERT	Elektriksel Rezistivite Tomografi
TL-ERT	Time-Lapse Electrical Resistivity
c	kohezyon
Φ	içsel sürtünme açısı
UU	Konsolide edilmemiş Drenajsız üç eksenli deneyi
CU	Konsolidasyonlu Drenajsız üç eksenli deneyi
CD	Konsolidasyonlu Drenajlı üç eksenli deneyi
BST	Basınçlı Su Testi
RMR	Kaya Kütlesi İndeksi
RQD	Kayaç Kalite Katsayısı
Q	Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi
Jn	Çatlak Takım Sayısı
Jr	Çatlak Pürüzlülük Katsayısı
Ja	Çatlak Yüzeyinin Durumu
Jw	Çatlak Suyu Azaltma Faktörü
SRF	Gerilme Değişim Faktörü
PI	Plastisite İndisi

1. GİRİŞ

6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli meydana gelen depremlerde (Pazarcık Mw: 7.7; Elbistan Mw:7.6) Türkiye' nin Güney Doğusunda yer alan 11 il ve yaklaşık 120.000 km²' lik bir alan etkilenmiştir. 50 binin üzerinde can kaybının yaşandığı depremlerde 35 binden fazla bina yıkılmış, 17 binden fazla acil yıkılması gereken ve yaklaşık 180 bin ağır hasarlı bina tespit edilmiştir. Depremlerin ardından yaklaşık 3 bin heyelan kaydedilmiş, şehirlerin altyapıları, karayolu ve demiryolu ulaşım ağları zarar görmüştür (AFAD, 2023).

Adıyaman İli, Gölbaşı İlçesi sınırları içerisinde yer alan T3 Tüneli de bu depremler sonrasında zarar görmüş ve Nurdağı-Malatya demiryolu hattı ulaşımına kapanmıştır. Yerinde yapılan saha çalışmaları sonrasında fay hattının tünelin üzerinden geçtiği, tüneli kestiği kesimde göçük oluştuğu ve çıkış portalı üzerinde heyelan meydana geldiği tespit edilmiştir. Tünel bölgesinde meydana gelen hasarlar yapılan saha çalışmaları ile daha detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur. Yapılan arazi gözlemlerinden sonra sondaj ve jeofizik etütler yapılmasına karar verilmiştir. Bu süreçte çalışma alanının bulunduğu bölge ile ilgili bilgi edinmek adına literatür taramaları yapılmıştır.

Bölgede ilk etapta 8, toplamda yapılan 11 adet jeoteknik sondaj ve jeofizik etütlerden sonra tünel içerisindeki durum, fay-tünel ilişkisi, birim geçişleri ve yeraltı suyu gibi parametreler hakkında sağlıklı veriler elde edilmesi hedeflenmiştir. Yapılan her sondaj atılacak her adımı, imalatın türünü, sırasını ve metodolojiyi belirlemede önemli bir etken olmuştur. Sondaj çalışmalarını desteklemek ve daha ayrıntılı veriler elde etmek için jeofizik etütlerden yararlanılmasına karar verilmiştir. Yapılan laboratuvar deneyleri, sahanın modellenmesi sonrası analizlerde kullanılacak malzeme parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir yardımcı etken olmuştur. Elde edilen tüm veriler doğrultusunda tünelin rehabilite edilmesi adına uygulama yöntemleri ve metodolojiler belirlenmesi ve bunlara uygun şekilde imalatların tamamlanması hedeflenmektedir.

Tünel üzerinde çıkış kesimine yakın var olan göçüğün geçilmesi adına çıkış portalının yeniden tesis edilmesi gerektiği görülmüştür. Portalın yeniden tesis edilmesi esnasında portal üzerinde var olan heyelanın önlenmesi adına da ekstra önlemler alınması kaçınılmaz olmuştur. Etüt çalışmalarından elde edilen bilgilerden hareketle proje aşamasında çıkış portalında kazıklı aç-kapa ve strut imalatlarının yapılmasına karar verilmiştir. Proje çalışmaları tamamlanıp imalatlara başlanıldığı esnada heyelan kesiminde yeni bir hareket meydana gelmiştir. Meydana gelen hareket sonrasında tünelde göçük kesiminde imalatlara başlanılmadan önce, heyelan bölgesinde çalışmalar yapılmasına ve heyelan alanının ıslah edilmesine karar verilmiştir. Heyelanın boyutlarını ortaya koymak, kayma düzlemini belirlemek amacı ile yapılan 8 adet jeoteknik sondaja ek 3 adet daha sondaj yapılmasına karar verilmiştir. Yapılan sondajlar sonucu heyelanın boyutları, yaklaşık kayma düzlemi belirlenmiştir. Var olan hareketin durdurulması adına heyelan kazıkları yapılmasına karar verilmiş ve yapılan analizler sonucunda kazıklar aç-kapa kesimine yakın olan bölgede 3, diğer kesimlerde 2 sıra olacak şekilde tasarlanmıştır. Kazıkların yapılması ve imalatın tamamlanmasından sonra sürekli olarak deformasyon okumaları alınarak heyelanın seyri takip edilmiştir. İmalatların tamamlanmasının akabinde bölgede herhangi bir deformasyon meydana gelmediği ve hareketin durduğu teyit edilmiştir.

Heyelan alanının ıslahı ve kazıklı aç kapa ile strut imalatlarının tamamlanmasından sonra sıra tünelde göçüğün geçilmesi adına yapılacak imalatlara gelmiştir. Tünel içindeki göçüğün geçilebilmesi için yapılacak çalışmalar, tünel üzeri ve tünel içerisinde olmak üzere iki etaba ayrılmıştır. Tünel üzerinde meydana gelen heyelan hareketinin önlenmesinden sonra, göçük meydana gelen kesimde zeminin tünel üzerinden konsolidasyon enjeksiyonu yapılarak güçlendirilmesi planlanmıştır. Bu imalatlar sonrasında yapılan yeni portal yardımı ile tünel aynasına güvenli şekilde ulaşım sağlanarak kazı destekleme imalatlarının tamamlanması ve tünel içerisinde ulaşımın sağlanması amaçlanmıştır.

Bu doğrultuda tünel üzeri çalışmalara başlanmış, tünel üzere konsolidasyon enjeksiyon projeleri hazırlanarak imalatlara başlanılmıştır. Tünel üzeri yaklaşık 100 metrelik kesimi kapsayan enjeksiyon imalatlarında birçok kez boşluk ile karşılaşmış ve enjeksiyon teknik şartnamesine uygun olacak şekilde imalatlar tamamlanmıştır. Çıkış portal yapısında ise fore kazık imalatları bitirildikten sonra projesindeki

metodolojiye uygun şekilde kademeli kazılar yapılarak strutların montajı yapılmıştır. Toplamda 5 kademe şeklinde yapılan imalatlar neticesinde tünel çıkış aynası oluşturulmuştur. Alın kazıklarının kırılması ile de tünel çıkış kesiminde kazı destekleme aşamasına geçilmiştir.

Tünel kazı destekleme imalatlarında ne tür bir destekleme yapılacağına belirlenmesi için birtakım çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle etüt çalışmalarından elde edilen veriler doğrultusunda sahanın modellenmesi yapılmış ve malzeme parametreleri belirlenmiştir. Bu doğrultuda yapılan analiz çalışmalarında göçüğün geçilmesi için kazı destekleme imatları esnasında kullanılacak çelik iksa, çelik hasır tipleri ile püskürtme beton kalınlığı, kullanılacak bulon ve süren tipi ile sayıları belirlenmiştir. Aynı zamanda uygulama metodolojisi de ortaya konulmuş ve imalat adımları belirli bir düzen içerisinde tasarlanmıştır.

Yapılan tasarımın başarılı olabilmesi adına belirlenen imalat adımlarının sahada doğru bir şekilde uygulanması büyük önem arz etmektedir. Bu bilinçle tünelde var olan göçük, projesine uygun şekilde kazı destekleme imatları ile geçilmiş ve tünel giriş çıkışı arasında bağlantı yeniden sağlanmıştır.

Tünel içerisinde kazı destekleme imatlarının tamamlanmasından sonra tünel üzerinde boşluk kalıp kalmadığının kontrol edilmesi, göçük meydana gelen zeminin içerden de konsolide edilmesinin sağlanması adına tünel içi konsolidasyon enjeksiyonu yapılmasına karar verilmiştir. Yapılacak konsolidasyon enjeksiyonun tipi, delgi boyutları, enjeksiyon planları hazırlanarak proje haline getirilmiş ve imatlarda bu projeye uygun olacak şekilde tamamlanmıştır.

Son olarak tünel içi konsolidasyon enjeksiyonlarının da tamamlanması ile tünelde nihai beton imatlarının yapım aşamasına geçilmiştir. Toplamda 650 metre uzunluğa sahip taş kaplama T-3 tüneline çıkış kesimine yakın 170 metrelik bölge Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile açılmış olup tünelin taban betonu ve drenaj projeleri tüm tüneli kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sebeple NATM ile açılmış kesim dışında kalan yerlerde de taban betonu yapılmasına karar verilmiştir. Tüm tünel boyunca tek tip olarak ve drenajı sağlayacak şekilde taban beton projeleri hazırlanmış ve imatları bu şekilde tamamlanmıştır. Taban beton imatlarından sonra sadece NATM ile açılmış 170 metrelik kesimde nihai beton olarak iksalar ve çelik

hasırlar yardımı ile fiberli püskürtme beton yapısı tasarlanmıştır. Yapılan analizler sonucu iksa ve çelik hasır tipleri, adım aralıkları, püskürtme betonda kullanılacak fiber miktarı ve püskürtme beton kalınlıkları gibi imalat adımları belirlenmiştir. Belirlenen adımlara uygun şekilde sahada imalatlar tamamlanmış ve tünel demiryolu üstyapısına hazır hale getirilmiştir.

Tüm bu imalatlar esnasında bölgede çok fazla sayıda artçı sarsıntı meydana gelmiştir. Bu sebeple imalatlar kontrollü şekilde ve sürekli ölçümler alınarak ilerlemiştir. Gerek imalat esnasında gerekse imalatlar tamamlandıktan sonra alınan ölçümlerde herhangi bir olumsuz durum ile karşılaşılmamıştır.

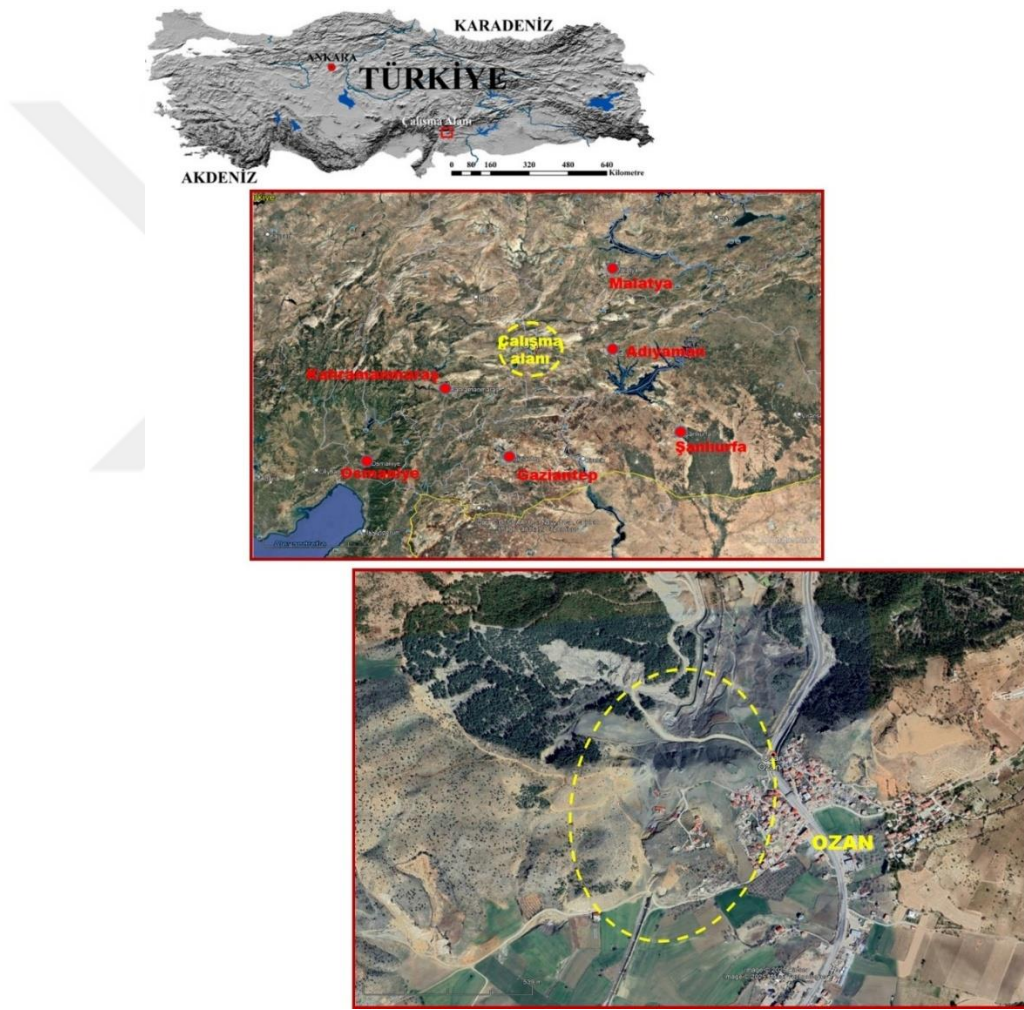
1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Türkiye, 6 Şubat 2023 tarihinde Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) segmentlerinin yırtılması nedeni ile büyüklükleri 7,7 ve 7,6 Mw olan iki ayrı depremi dokuz saat ara ile yaşamıştır. Bu kadar kısa süre içerisinde bu büyüklükte iki depremin yaşanması ülkedeki ulaşım ağları ve şehirlerdeki alt yapılar gibi geniş çaplı birçok alanı etkilemektedir. Etkilenen alanlardan bir tanesi de Narlı-Malatya Konvansiyonel Demiryolu hattı üzerinde yer alan T-3 Tüneli olup, tünelde meydana gelen göçük sonrası ulaşım durmuştur. Söz konusu hat sadece yolcu ve yük taşımacılığından ziyade madenlerden çıkarılan cevherlerin İskenderun Limanı' na taşınması anlamında da kritik bir öneme sahiptir. Cevher hattı olarakta nitelendirilen söz konusu hat ulaşımına kapandığından limana yapılacak lojistik faaliyetler daha uzun bir güzergah üzerinden, daha uzun zaman ve maliyet ile taşınmaktadır.

Literatüre bakıldığında ise depremler ile ilgili yapılan araştırmaların çoğunun dinamik yükleme altında zeminlerin ve yapıların sismik performanslarına odaklandığı görülmekte, fay zonu yırtılmalarından kaynaklı yer altı açıklıklarında meydana gelen hasarlar ve bu hasarların incelenmesi ile ilgili sınırlı sayıda doküman bulunmaktadır. Bu çalışma fay zonunda meydana gelen yırtılma neticesinde bir demiryolu tünelinde oluşan göçüğün incelenmesi, varsa başka etkileyen unsurların bulunması, çözüm yollarının geliştirilmesi ve projelendirilmesi ile sahada tatbik edilmesini içermektedir.

1.2. Çalışma Alanının Tanıtılması

Çalışmanın ana konusu olan T3 Tüneli, Adıyaman İli, Gölbaşı İlçesi, Ozan Köyü sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 1.1). Güneydoğu Anadolu Bölgesinin Orta Fırat Bölümünde bulunan Adıyaman İli, 2024 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre toplamda 611.037 nüfusa sahip olmakla birlikte, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri arasında köprü görevi görmektedir. Kısmen Akdeniz Bölgesinin özelliklerini de taşıyan Adıyaman bitki örtüsü konusunda da bu üç bölgenin de özelliklerini taşımaktadır (Adıyaman Valiliği, 2025).



Şekil 1.1. İnceleme alanı yer bulduru haritası.

Yüksek rakımlı yerler genelde meşe ağaçları ile kaplanmış olmakla birlikte su ve toprak erozyonu nedeni ile çıplak hale gelmiş arazilerde mevcuttur. Yazların uzun ve kurak olmasından dolayı orman içi bitki örtüsü yok denecek kadar azdır. Tarım

yapılmayan alanlarda çayır, mera, yabani ağaçlar ve makilerle kaplıdır. Rakım yükseldikçe ağaç türleri değişmekte ve kimi bölgelerde meşeliklere rastlanmaktadır. Yüzölçümünün %11'lik kısmına denk gelen Kahta Ovası ile %4'lük kısmına denk gelen Keysun Ovası bulunmaktadır.

Adıyaman İli ekonomisi ise ağırlıklı olarak tarıma dayalı olmakla birlikte son yıllarda özellikle tekstil, gıda ve mermer sektörü yatırımlarında sanayileşme eğilimi görülmektedir. En önemli yer altı zenginliği petrol olan İlde özel sektör üretimleri dahil olmak üzere ülkemiz ham petrolün yaklaşık %20'si üretilmektedir (Adıyaman Valiliği, 2025).

1.3. Literatür Taraması ve Önceki Çalışmalar

Geçmiş depremlerin incelenmesi, sismik titreşimlere kıyasla kalıcı yer şekli değişimlerinin tünel hasarlarının ana nedeni olduğunu göstermektedir (Ghadimi Chermahini & Tahghighi, 2023). Tünellerdeki fay kaynaklı stabilite sorunlarından biri olan fay düzlemi boyunca kaya kayması, fayın kayma dayanımı ile yakından ilişkilidir ve genellikle geri döndürülemez, hatta bazen felaket boyutunda mühendislik sorunlarına yol açar (Liu ve diğerleri, 2023). Bu nedenle tünel mümkün olduğunca fay yer değiştirmesine dayanma yeteneğine sahip olmalı ve yalnızca küçük hasarlar görmelidir (Ghadimi Chermahini & Tahghighi, 2023). Ancak aktif tektonik bir bölgede bir tünelin inşaat süreci boyunca, aktif faylardan kaçınmak mümkün olmayabilir. Aktif faylar, tüneller üzerinde ani fay yer değiştirmesi ve fay zonunda zayıf zemin koşulları olmak üzere iki olumsuz etki yaratır. Bu noktada temel amaç tünelin tamamen kaybı olmaksızın meydana gelecek hasarı lokalize etmektedir (Aygır & Gökçeoğlu, 2021). Aktif fayların tünel yapılarını kesmesinin yol açtığı olumsuz etkilerin etraflica anlaşılması, bu yapıların emniyetli bir şekilde işletilmesi ve inşaat sırasında mühendislik uygulamaları açısından kritik bir öneme sahiptir (Hu ve diğerleri, 2023).

2001 yılında Tayvan'ın orta kesimlerinde meydana gelen Chi-Chi depremi sonrasında 57 adet dağ tüneline yapılan incelemeler neticesinde 49 adet tünelin çeşitli düzeylerde hasarlar gördüğü tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüzey eğimlerine ve portal açıklıklarına yakın olan kesimlerin, kalın bir örtü tabakasına sahip kesimlerden daha fazla hasar gördüğünü ve bu hasarların boyutunu tünelin fay zonlarına göre

konumunun, zemin koşullarının, merkez üssüne olan uzaklık gibi konuların önemli derecede etkilediği görülmüştür (Wang ve diğerleri, 2001).

2008 yılında Çin’de Wenchuan depremi sırasında fay zonunu kesen bir tünelde, portal kesimi ve tünel içinde hafıften ağıra değişik boyutlarda çatlaklar gözlenirken faya yakın kesimlerinde tamamen göçme meydana gelmiştir. Tünelde meydana gelen sismik hasarları değerlendirmek, yatay ve düşey hareketlerin sismik tepki üzerindeki etkisini belirlemek için üç boyutlu dinamik sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen sonuçlar, rapor edilen hasar durumları ile karşılaştırılıp teyit edilmiş ve elde edilen bulgular, yatay deprem hareketlerinin tünel yapısının tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve sismik bölgelerdeki tünel yapılarının tasarımları esnasında dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur (Yu ve diğerleri, 2014).

Bir dağ tünelinin eş sismik faylanmaya maruz kalması sonucu ortaya çıkan sismik tepkisi, iki aşamalı bir süreçle bir fay-yapı sistemi kullanılarak analiz edilmiş ve elde edilen bulgular, kaplama elamanlarındaki azami birim deformasyonun dağılımının, faylanma mekanizmaları tarafından tayin edildiğini ve fay kaymasının büyüklüğünün, tünelin sismik tepkisini kayda değer ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır (Xia ve diğerleri, 2023).

Tünellerin büyük hasarlar görmemesi ve ulaşım ağlarının kesintiye uğramaması adına fay zonu ile tünel arasındaki etkileşimin iyi modellenmesi gerekmektedir. Bu konuda Wang, Q., Chen, G., Guo, E., & Ma, Y. 2023 yılında ters atımlı fay yer değişimi altındaki fay zonunu kesen dağ tünelinin davranışını incelemek için, kaya ile tünel arasındaki etkileşim modeli, sonlu elemanlar prensibi ve sözde-statik yöntem kullanılarak bir model oluşturmuştur. Oluşturulan simülasyonda fay yer değişiminin etkisi, asılı duvar kayasına, yer değiştirme yükü şeklinde etkililmiş ve bu etki 100 adımda uygulanarak fay yer değişimi arttıkça ters fay koşulu altındaki tünelin gerilme durumları analiz edilmiştir (Wang, Q., Chen, G., Guo, E., & Ma, Y. 2023).

Yine yapılan bir çalışma kapsamında bir fay kayma deney düzeneği kullanılmış ve fay yer değişimi esnasından etkinleşen kırık yüzeyindeki kesme-basınç etkileşiminin, tahkimat elemanlarında gözlemlenen ve uzunlamasına devamlılık gösteren çatlakların birincil nedeni olduğu ampirik olarak kanıtlanmıştır (Hu ve diğerleri, 2023).

Fay zonu ile kesişen tünellerde, fay zonu mümkün olduğunca detaylandırılmalı, parametre seçimleri bu duruma göre yapılmalı ve modelleme oluşturulurken sahayı en iyi yansıtacak şekilde oluşturulmalıdır. Fay hareketi etkisi altında olan bir tünelde yapısal elemanlar arasında esnek bağlantı elemanları kullanılarak bir model oluşturulmuş ve fay hareketine maruz bırakılmış, sonuçları sayısal modelleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Fay yer değiştirmesinin tünel davranışları üzerindeki etki alanı, esnek derzin rijitliğine bağlı olarak değişmekle birlikte aşırı değerler genellikle fay zonunun ortasına yakın, fay ile tavan bloğu arasındaki temas bölgeleri ile fay ile taban bloğu arasındaki temas bölgelerine yakın yerlerde ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum söz konusu bölgelerin sismik tasarım için kilit rol oynadığını göstermektedir (Yan ve diğerleri, 2016).

Fayın yer değiştirmesinin tünel eksenine dik ve tünel eksenine paralel olarak iki farklı şekilde modellenmiş ve tahminler üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, teğetsel temas durumunun ve fay genişliğinin tünelin eğilme deformasyonu tepkisini önemli ölçüde etkilediğini, ancak kesişim açısının kayda değer bir etkisi olmadığını göstermektedir. Uzunlamasına çekme-basma deformasyonu ise söz konusu üç parametreye karşıda yüksek hassasiyet sergilemiştir (Xu ve diğerleri, 2021).

Sığ, gömülü kazı tünellerinin ters faylanmaya maruz kaldığı durumlarda, tüneli faylanmadan koruyacak eğimli rijit kayar bir duvar tasarımı önerilmiştir. Önerilen duvar için sayısal modelleme yapılmış ve sonuçlar duvarın, tüneli ters faylanmanın olumsuz etkilerinden korumada etkili olduğunu ortaya koymuştur (Yao ve diğerleri, 2023).

Mevcut analitik modeller doğrusal olmayan tünel-zemin/kaya etkileşiminin veya fay zonu genişliğinin etkisini ihmal etmekte ve gerçekçi olmayan bazı varsayımlar benimsemektedir. Spesifik olarak, normal ve ters faylanma altındaki bir tünel, doğrusal olmayan bir zemin üzerinde çalışan elastik bir kiriş olarak basitleştirilmekte, doğrusal olmayan tünel-zemin/kaya etkileşimi yine bir dizi doğrusal olmayan eksenel ve düşey yay tanımlanarak dikkate alınmakta ve fay zonu genişliği yay rijitliğinin azaltılmasıyla hesaba katılmaktadır. Her iki durum karşılaştırıldığında önerilen modelin mevcut model testleri ve sayısal modellerden elde edilen sonuçlarla uyum gösterdiği ve mevcut analitik modellere göre daha iyi bir doğruluğa sahip olduğunu

göstermektedir (Zhang ve diğerleri, 2020). Ayrıca doğrultu atımlı faylanma altındaki tüneller için fay zonu genişliğinin ve doğrusal olmayan tünel-zemin etkileşiminin etkisini dikkate alan bir mekanik analiz modeli önerilmiş ve önerilen modelin hesaplama sonuçları, model testi ve sayısal simülasyonlardan elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum göstermiş olup doğruluğunun mevcut analitik yöntemlerden daha yüksek olduğu görülmüştür (Zhang ve diğerleri, 2020).

Gerek NATM metodunda gerekse TBM (Tünel Açma Makinesi) yardımıyla tünel açılması esnasında fay zonlarının varlığı ve bunların doğru tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. TBM metodu ile açılan bir tünelde kazı esnasında tünel uzunluğunun %70'ini oluşturan bir alanda kötü ila çok kötü kayaç özelliklerine sahip fay zonlarına rastlanılmış, bu fay zonları TBM kesicisinin sıkışmasına ve tünel güzergahından sapmasına yol açmıştır. Bu durum heterojen koşulların bulunduğu fay zonu bölgesinde özel önlemler alınarak, tünel etki alanı içerisinde kalan kısmın homojen koşullara dönüştürülmesi sayesinde aşılmıştır (Dalgıç, 2003).

Fay hatlarını enine kesen segmentli tünellerin üç boyutlu sayısal modeli oluşturulmuş ve tünelin mekanik tepkini etkileyen faktörler analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, normal fay yer değiştirmesi meydana geldiğinde, segmentli tünel yapısının öncelikle derz bölgelerinde hasar gördüğünü ve bu bölgelerin yüksek çekme deformasyonlarına eğilimli olduğunu göstermiştir. Buna mukabil, eşdeğer yer değiştirme miktarıyla ters faylanmanın gerçekleşmesi durumunda ise segmentli tünel yapısının öncelikle segmentlerin kemer omuzlarında hasar gördüğünü ve boyuna derzlerin deformasyonunun nispeten daha az olduğunu ortaya koymuştur (Li ve diğerleri, 2023).

Tüm bunlara ek olarak fay boyunca gözlemlenen sürünme hareketinin nedenlerini anlamak amacı ile kayaçlar üzerinde yapılan mikroskobik incelemeler neticesinde birincil sürünme mekanizmasının çatlak oluşumu ve sürtünmeli kayma ile birlikte yer değiştirme hareketi ve tane sınırı kayması olduğu ileri sürülmüş, indeks minerali içeriğinin artmasının kaymaya olanak sağladığı ve fay hareketini daha da şiddetlendirdiği görülmüştür. Bu çalışma kaya katmanı kaymasının ölçeğini ve potansiyel fay kaynaklı afetlerin şiddetini tahmin etme esnasında kaya katmanındaki indeks minerallerin (örneğin kalsit, pirit ve kil mineralleri) içeriğinin de önemli bir etken olduğunu ortaya koymuş ve benzer durumlarda gelecekteki altyapı

planlamalarında bu durumun göz ardı edilmemesi gerektiğini hatırlatmıştır (Yan ve diğerleri, 2016).

Tünel inşaatı bağlamında fay stabilitesini değerlendirmek amacıyla yapılan analizde fayın mekanik özellikleri, tünel derinliği, fay açısı, tünel boyutu, fay ile tünel arasındaki mesafe ve çevreleyen kayacın başlangıç gerilme durumu gibi çeşitli parametreler incelenmiş ve elde edilen bulgular bu faktörlerin gerilme dağılımını ve potansiyel fay hareketini önemli ölçüde etkilediğini ve bununda tünel stabilitesinin korunması açısından kritik bir öneme sahip olduğunu göstermiştir. Söz konusu bu değişkenler arasındaki karmaşık etkileşimi nicel olarak değerlendirmek amacı ile bahsi geçen tüm faktörleri bünyesinde bulunduran basitleştirilmiş bir emniyet katsayısı değerlendirme metriği olarak boyutsuz bir parametre geliştirilmiştir. Bahse konu emniyet analizinin uygulanabilirliğini test etmek amacı ile bir vaka analizi de yapılmış olup bu boyutsuz parametre ile hesaplanan emniyet katsayısı arasında yüksek düzeyde bir korelasyon istatistiksel olarak kanıtlanmış ve bu durum minimal bir hata payı ile güvenilir bir analiz metodunun sunulduğunu göstermektedir (Mohamed & Nasr, 2020).

1.4. Kullanılan Materyal ve Metodlar

Bu çalışma kapsamında birçok farklı materyal ve metottan faydalanılmıştır. İlk olarak detaylı saha çalışmaları yapılmış, yapılacak jeoteknik sondajlar adetleri ve yerleri ile jeofizik yöntem, uygulama alanı ve sıklıkları belirlenmiştir. Sondaj çalışmalarında wire-line karotlu sondaj sistemi kullanılmıştır. Jeofizik etütler de ise elektriksel rezistivite (ERT) yöntemi ve 2-Boyutlu sismik kırılma tomografi yöntemi kullanılmıştır. Etütler ile beraber laboratuvar deneyleri birlikte yürütülmüştür. İnceleme alanında sondajlardan elde edilen numunelere ait birimlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesi, analiz çalışmalarında kullanılacak parametrelerin belirlenmesi açısından laboratuvar çalışmaları büyük önem arz etmektedir. Saha, ofis ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler harmanlanarak bir arazi modeli oluşturulmuş ve oluşturulan arazi modeli Phase, Roclab, Midas vb. programlar yardımı ile analizler yapılmıştır.

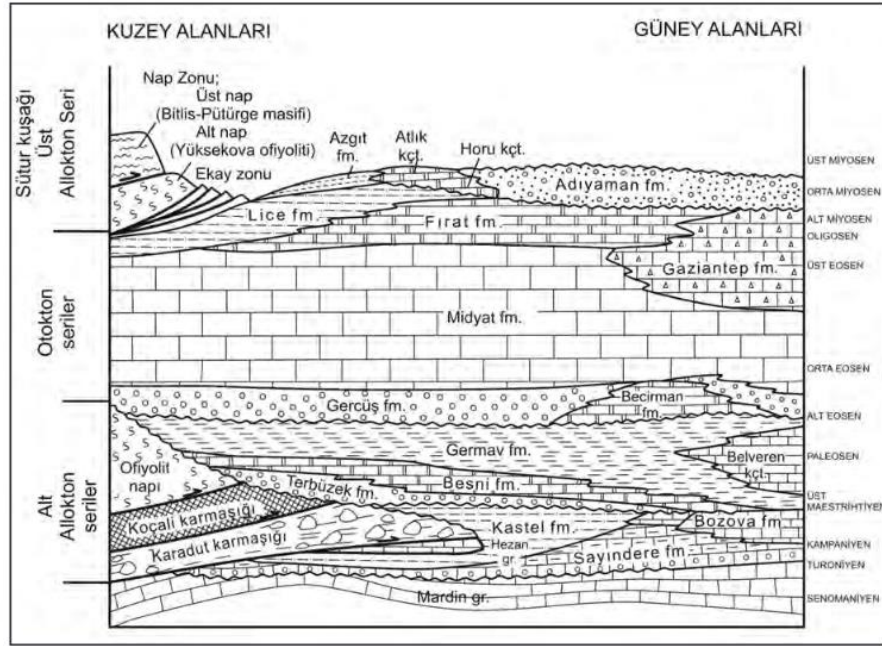
2. GENEL JEOLojİ

2.1. Bölgesel Jeoloji

Bölgenin jeolojisine bakıldığında sıralaması yaşlıdan gence doğru olacak şekilde Koçali Karmaşığı (Kko), Germav Formasyonu (KTg) ve Hoya Formasyonu (Teh) bulunmaktadır. Koçali Karmaşığı 1964' te Rigo de Righi adlandırması yapılmış ve 1974'te Sungurlu tarafından Koçali Karmaşığı olarak tanımlanmıştır. Karniyen-Liyas yaşlı karmaşığın tabanında split, bazalt, diyabaz ve aglomeralar yer alır, üzerinde ise pelajik kireçtaşları, çört, radyolaritler, şeyl ve nadir olarak kumtaşı ara seviyelerini kapsayan volkanitler, değişik boyutlarda dilim halinde ofiyolitler yer alır. Hatay Ofiyolitlerini ve Karadut Karmaşığını tektonik olarak üzerleyen bu Karmaşık, Terbüzek ve Besni Formasyonları tarafından ise açısız uyumsuzlukta örtölür.

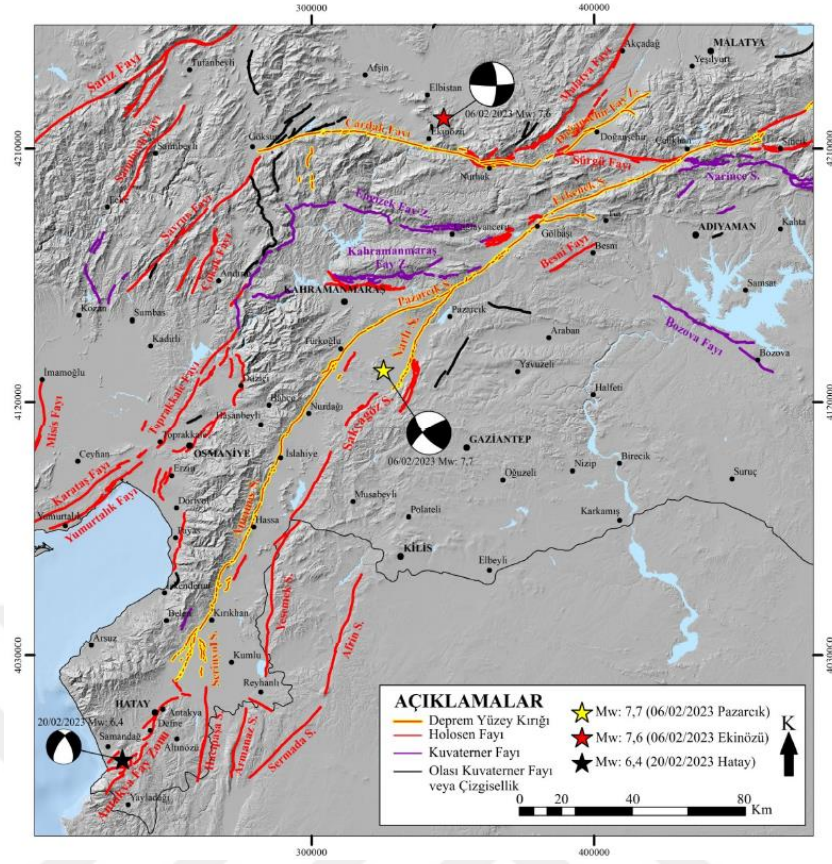
Germav Formasyonu ise gri, yeşil, boz renkli marn, kireçtaşı, kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve şeyl birimleri ile temsil edilmektedir. Marn, kireçtaşı ve kumtaşı seviyeleri orta tabakalanmalı, çatlaklı, kırıklı bir yapıda iken şeyl seviyeleri ise daha ince tabakalı ve yer yer lamina görünümlü, dağılgan, parçalanmış özellikte bulunur. Derin deniz ortamında çökelen formasyonun yaklaşık kalınlığı 150 metre olup üst Maastrichtiyen-Paleosen yaşlıdır. Germav Formasyonu Koçali Karmaşığını açısız bir uyumsuzlukla üzerler.

Hoya Formasyonu ise krem, beyaz renkli kireçtaşı, killi ve tebeşirli kireçtaşı birimleri ile temsil edilmektedir. Orta kalın tabakalanmalı, yer yer erime boşlukları içeren, çatlaklı, kırıklı, orta sert özelliktedir. Sığ deniz ortamında çökelen formasyonun kalınlığı 100-150 metre arasında değişmekte olup Germav Formasyonu üzerine açısız uyumsuzlukla gelmektedir (Şekil 2.1.). Formasyonun yaşı Alt Eosen-Alt Oligosen olarak belirtilmektedir (Duran ve diğ. 1988 ve 1989).

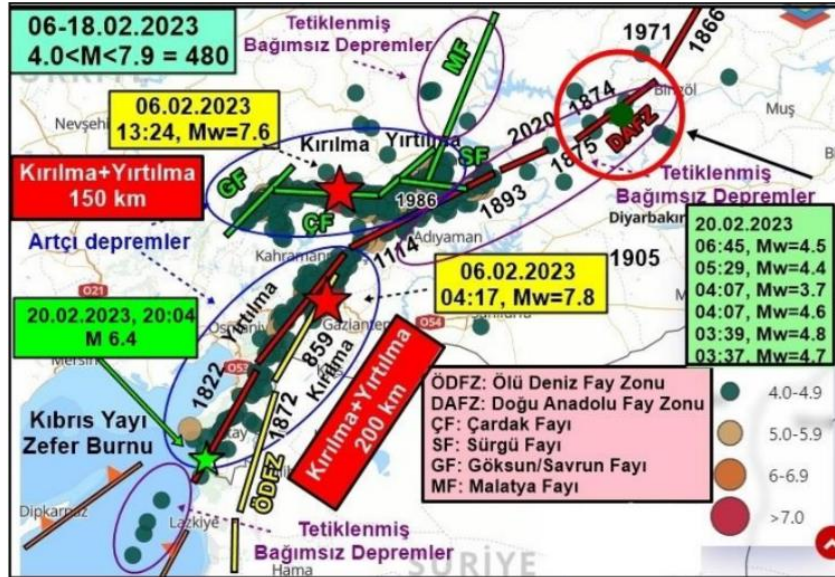


Şekil 2.1. Kuzeydeki sutur zonundan, güneyde Arap Platformunun kuzeyine, GD Anadolu'daki Arap Plakasının genelleştirilmiş tektono-stratigrafi kesiti (Yılmaz, 1993' den sadeleştirilmiş, Yıldırım vd., 2012, Şekil 3).

T3 Tünelinin bulunduğu bölge fay hatlarının da etkisi ile karmaşık bir jeolojik yapıya sahiptir. Türkiye'nin en etkin fay sistemlerinden birisi olan DAFZ Gölbaşı-Türkoğlu (90km) fay parçasında bulunmaktadır. Anadolu Bloğu' nun doğusunu sınırlayan DAFZ, İskenderun Körfezi ile Karlıova arasında uzanan sol yönlü doğrultu atımlı bir fay zonudur. (Yönlü, 2012) DAFZ boyunca toplam sol yanal ötelenme 15-22 km arasında değişmektedir (Arpat 1971, Arpat ve Şaroğlu 1975, Herece 2003). Çeşitli çalışmalar DAFZ üzerindeki kayma hızını yaklaşık 8 ila 10 mm/yıl olarak belirtmektedir (Yönlü, 2012). Tarih boyunca DAFZ üzerinde birçok deprem oluşmuş ve bu depremlerde yüzey kırıkları oluşmuştur. Benzer şekilde 6 Şubat Kahramanmaraş Merkezli depremler (Pazarcık: Mw: 7.7; Elbistan: Mw: 7.6) sonrasında da DAFZ boyunca toplam 571 km yüzey kırığı ölçülmüştür (MTA, 2023, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3). Bu yüzey kırıklarından 10 cm ile 880 cm arasında sol yanal yer değiştirme miktarı ölçülmüştür (MTA, 2023). T3 Tünelinin bulunduğu bölgede en büyük yer ivmesi (PGA) 0.553 g'dir (<http://tdth.afad.gov.tr>).



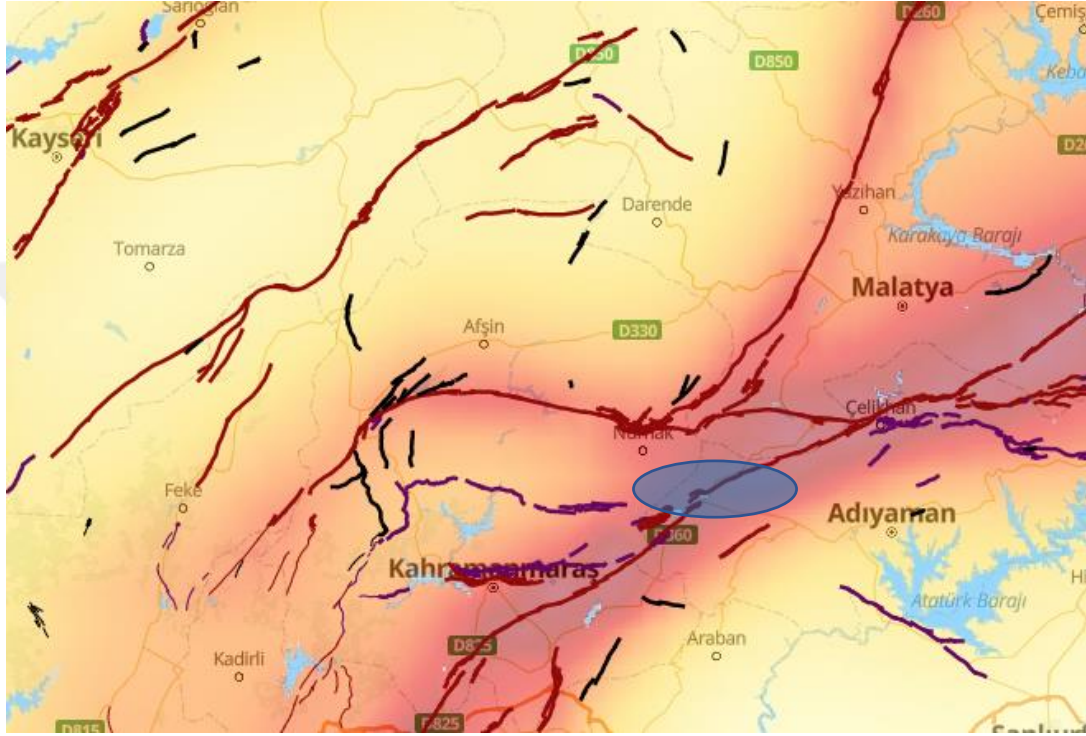
Şekil 2.2. 06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Ekinözü (Kahramanmaraş) ile 20 Şubat 2023 Yayıllardağı (Hatay) depremlerinin ana şoklarının dış merkez üsleri ve bu depremlerde meydana gelen yüzey kırığı haritası (MTA, 2023).



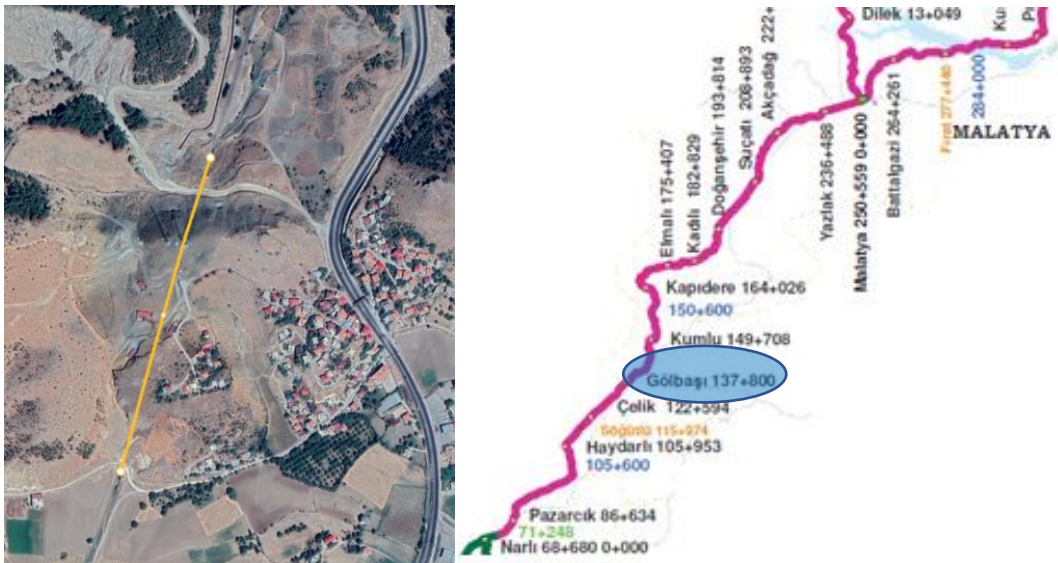
Şekil 2.3. Doğu Anadolu Fay Sistemini oluşturan fay parçalarını gösterir şekil (Harita üzerindeki tektonik hatlar Demirtaş, 2023, Veri AFAD' dan alınmıştır).

2.2. Çalışma Alanının Jeolojisi

Çalışmanın konusu olan T3 Tüneli yapımı 1933 tarihinde tamamlanan tünel kilit taşı yığma taş yöntemi ile inşa edilmiş 650 metre uzunluğunda tek hatlı bir tüneldir. Adıyaman İli, Gölbaşı İlçesi sınırları içerisinde yer almakta olan T3 Tüneli Nurdağı-Malatya Konvansiyonel Hattı üzerinde bulunmaktadır (Şekil 2.4, Şekil 2.5).

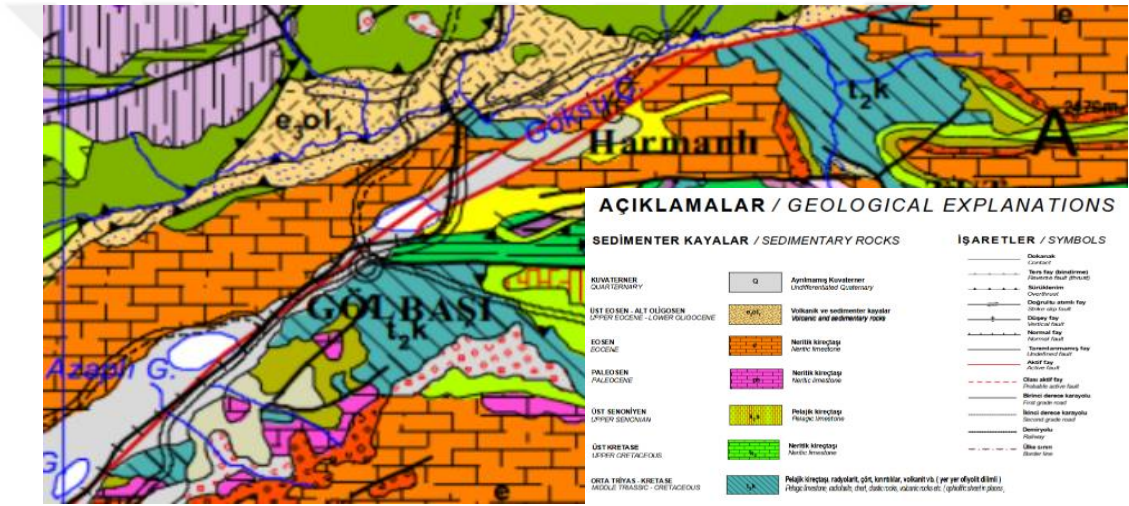


Şekil 2.4. Gölbaşı ilçesi Nurdağı-Malatya hattındaki konumu.



Şekil 2.5. Ozan Köyü T3 Tüneli-Narlı Malatya demiryolu hattı üzerindeki yeri.

Tünelin bulunduğu hat üzerinde en yaşlı birimler çıkış kesiminde yer almaktadır. Bu bölgede planlanan aç-kapa yapısı ve tünel kazıları esnasında Koçalı Karmaşığında ait birimler ile karşılaşılacaktır. Bu karmaşık içerisinde serpantin, şeyl, kiltası birimler bulunmaktadır (Şekil 2.6). Birimler mavimsi gri, gri renkli, çok-tamamen ayrılmış, çok-aşırı derecede zayıf dayanımlı ve parçalanmış olup gözlenebilen süreksizliklerin yüzeyleri düz-kaygan ve kil dolguludur. Tünelin çıkış portalında üst seviyelerde 3.50-12.50 metre arası değişen kalınlıkta kahve-gri-yeşilimsi renklerde, katı-sert kıvamlı, nemli, düşük-yüksek plastisiteli, siltli, ince-iri taneli kumlu, ince-iri taneli, yarı köşeli-köşeli, max 4 cm boyutlarında, kiltası kökenli çakıllı, kumlu, siltli kil/kumlu siltli kil yer almaktadır.



Şekil 2.6. T3 Tüneli-Gölbasi bölgesi jeolojik haritası (MTA Genel Müdürlüğü jeoloji haritası).

2.3. Yapısal Jeoloji

Türkiye, Alpin Orojenez Kuşağı'nın bütününde yer almakta olup, bu orojenik sistemin kuzeyinde konumlanan Rusya ve güneyindeki Arap Platformu arasında kalan Akdeniz Bölgesi'nde jeolojik olarak konumlanmıştır. 1896 ile 1942 yılları arasındaki bilimsel tetkiklerde, Anadolu'nun orojenik kuşakları, Alpler'deki yapısal zonasyona benzer şekilde kuzeyden güneye doğru Pontidler, ara masifler ve Toridler olmak üzere üç temel tektonik üniteye ayrılmıştır. Müteakiben bazı araştırmacılar, Anadolu sıradağlarının daha karmaşık bir yapıya sahip olduğunu ileri sürerek, Türkiye arazisinin tektonik evriminin yapısal sınıflandırılmasına önemli bilimsel katkılar sağlamışlardır (Şengör, 1984). Türkiye arazisinin özellikle Alpin orojenezi sırasındaki

jeolojik gelişimi ve yapısal karakteristiklerini dikkate alan Ketin (1966), tektonik birlik sayısını dört ana kategori altında sınıflandırmıştır. Dağ kuşaklarının orojenik gelişim süreçlerine dayanan bu dörtlü yapısal zonasyon, kuzeyden güneye şu şekilde sıralanmaktadır: Kuzey ve Kuzeybatı Anadolu Sıradağları (geniş anlamda Pontidler), İç Anadolu Sıradağları (dar anlamda Anatolidler), Güney ve Doğu Anadolu Sıradağları (geniş anlamda Toridler) ve Güneydoğu Anadolu Sıradağları (Kenar Kıvrımları Bölgesi) (Şengör ve Yılmaz, 1983). Adıyaman havzası, söz konusu tektonik birlikler sistemi içerisinde Kenar Kıvrımları Kuşağı üzerinde yer almaktadır.

Türkiye'deki diğer tektonik birliklerin oluşum mekanizmalarında olduğu gibi, Kenar Kıvrımları Kuşağı'nın ortaya çıkışında da Arabistan Bloğu ile Anadolu Levhası arasındaki kıtasal çarpışma temel jeodinamik etkeni teşkil etmiştir. Anatolid-Torid platformunu ve Doğu Anadolu akresyon kompleksini Afrika-Arabistan levhasından ayıran Neotetis Okyanusu'nun güney kolu, Geç Kretase döneminde kapanmaya başlamış ve Arabistan-Avrasya kıtasal çarpışması Orta Miyosen zaman diliminde yalnızca Bitlis-Zagros bölümünde gerçekleşmiştir. Türkiye'de Neotektonik Dönem'in başlangıcı, işte bu bölgesel kapanma olayıyla ilişkilendirilmektedir. Dolayısıyla, Türkiye'deki neotektonik evreyi tetikleyen temel jeolojik süreç Anadolu-Arabistan çarpışmasıdır. Bitlis masifinin güneyinde, Arap Plakasının kuzey-kuzeydoğu yönünde (Avrasya'ya doğru) dalma hareketi sonucu Anadolu Levhası'nın altına itilmesi, Van Gölü bölgesinde bir çarpışma zonunun oluşumuna neden olmuştur. Kuzey-güney yönlü kompresyonel tektonik rejiminin yoğunlaşmasıyla birlikte Güneydoğu Anadolu Bindirme Kuşağı evrimleşmiştir (Ketin, 1959; Şengör, 1980). Türkiye'nin erken dönem tektonik yapılarından biri olan bu bindirme kuşağı, Adıyaman Havzası'nın kuzey sınırını belirlemektedir. Güneydoğu Anadolu Bindirmesi'nin oluşum yaşı Orta Miyosen sonrası olarak kabul edilmekte olup, bu tektonik aktivite Orta Miyosen'de başlamış ve günümüzde de devam etmektedir.

Kızıldeniz ve Atlas Okyanusu'ndan elde edilen paleomanyetik çizgisellik verileri, hem Türk-İran Platosu'nun hem de çevresindeki bölgelerin yüksek sismik aktivitesi ve Türkiye'deki Kenar Kıvrımları ile Zagros kıta sahanlığı serilerinin Pliyosen'den günümüze dek süregelen kıvrımlanma süreçleri, bu bölgede Arabistan-Avrasya yakınsama hareketinin halen etkin olduğunu kanıtlamaktadır. Türkiye'nin doğudan batıya doğru, Doğu Anadolu Sıkışma Provensi, Kuzey Türkiye Provensi, Orta

Anadolu Ova Provensi ve Batı Anadolu Gerilme Provensi gibi neotektonik bölgelere ayrılmasında, Doğu Provensi'nin günümüzde de belirgin bir aktif deformasyon zonu oluşturduğu belirtilmektedir (Şengör, 1980). Birbirine yaklaşan Avrasya ve Arabistan levhalarının etkileşim zonunda yer alan Doğu Anadolu, kuzey ve güney yönlü kompresyonel tektoniğe maruz kalmaya devam ederken, eş zamanlı olarak çeşitli fay sistemleri de gelişmiştir (Şengör ve Yılmaz, 1983). Bu bağlamda, Güneydoğu Anadolu bindirmesiyle birlikte Adıyaman bölgesinde de benzer tektonik hatlara paralel ters faylar ve doğrultu atımlı fayların yanı sıra, mevcut tektonik yapıları yüksek açılarla kesen oblik ve düşey atımlı faylar da oluşmuştur. Adıyaman Fayı örneğinde olduğu gibi, bazı fay zonlarının Pliyo-Kuvaterner, hatta Pleyistosen morfolojisini bile kesmesi, bölgedeki tektonik aktivitenin jeolojik zaman ölçeğinde genç ve halen aktif olduğunu işaret etmektedir.

Adıyaman'ın yapısal morfolojisi, yukarıda özetlenen genel tektonik özellikler ve bölgesel jeolojik gelişimine uygun bir biçimde şekillenmiştir. Kıvrım kuşaklarının yapısal geometrisi de söz konusu tektonizmanın kinematik özellikleriyle uyumluluk göstermektedir. Buna göre, Adıyaman'ın en kuzeyinde bindirme ve örtü (şaryaj) yapıları gözlemlenirken, güneye doğru antiklinaller devrik bir yapı kazanmakta ve antiklinal kanatları arasında ters fayların geliştiği bir kıvrım stili ortaya çıkmaktadır. Daha güney enlemlere inildikçe kıvrımlar Jura tipi olarak adlandırılacak düzenli kıvrım şekillerini almakta ve en güneyde ise geniş açılı kıvrımlar egemen olmaktadır.

Adıyaman ve çevresi, tektonik rejimi ve yapısal özellikleri dikkate alınarak üç farklı tektonik kuşağa ayrılmaktadır (Öğrenmiş, 2001; Kan, 2013): 1. Arap Platformu: Prekambriyen'den Kuvaterner'e kadar olan jeolojik zaman diliminde farklı fasiyeslerde gelişmiş kalın çökel istiflerini içermektedir. Paleozoyik dönem, başlıca sığ denizel ve gelgit ortamlarında oluşmuş kırıntılı kayaç birimleri ve yer yer karbonat çökelimleri ile temsil edilmektedir. Triyas döneminden itibaren bölgede yeni bir çökelme evresi başlamıştır. Riftleşme ile tetiklenen havza açılması süreci, giderek sığ denizel karbonat birimlerinin çökmesine yol açmış ve bölge Mesozoyik'te geniş bir karbonat platformu haline gelmiştir. Maestrihtiyen evresinde bu platform üzerine ilk ofiyolit napları yerleşmiştir. Tektonik açıdan nispeten stabil olan Arap Platformu, havzanın güney kesimlerini kapsamaktadır. 2. Ekay Zonu: Arap Platformu'na ait stratigrafik birimlerin kuzeyinde, yapısal ve litolojik karakteristikleri farklılık gösteren bir alana

geçiş zonudur. Ekay Zonu olarak tanımlanan bu alan, yaklaşık doğu-batı doğrultusunda uzanan ters faylar ve şaryaj dilimlerinden oluşmaktadır. Allohton (yer değiştiren) tektonik birimlerin, yaşlıdan gence doğru sıralanarak birbirleri üzerine itildiği ve paketlenerek doğrudan otokton (yerinde oluşmuş) birimler üzerine ilerlediği bir bindirme zonudur. Adıyaman ilinin hemen kuzeyinden geçen dağ kuşağı bu zon içerisinde yer almaktadır. 3. Nap Alanı: Ekay Zonu'nun kuzey bölümünde yer alan ofiyolitik topluluklar ve metamorfik kayaç birlikleri bu tektonik zonu oluşturmaktadır. Koçali-Sincik çevresi bu kuşak içerisinde bulunmaktadır (Kan, 2013).

Türkiye'nin neotektonik rejimi, Orta Miyosen'de başlayan Arap-Afrika ve Avrasya levhaları arasındaki kıtasal çarpışma ve bunun devamında Anadolu Bloğu'nun batıya doğru yönelen yatay atımlı hareketiyle kontrol edilmektedir. Günümüzde ülkenin en önemli sismik kaynak zonlarını oluşturan ve Anadolu'nun batıya doğru kinematik kaçışını sağlayan Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAF) ve Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAF), bu karmaşık tektonik etkileşim sürecinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. KAF sağ yönlü, DAF ise sol yönlü doğrultu atımlı kıta içi faylardır. DAF, kuzeydoğu ucunda KAF ile birleştiği Karlıova üçlü ekleminden başlayarak, güneybatı ucunda Antakya yöresinde Ölü Deniz Fay Sistemi'ne bağlanmaktadır. DAF, Karlıova-Antakya arasında yaklaşık 580 km uzunluğunda ve genel olarak kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda uzanmaktadır (MTA, 2013). DAF üzerinde gerçekleştirilen çok sayıda bilimsel araştırma, bu fay sisteminin Doğu Akdeniz'in jeodinamik evrimi ve sismisitesinde Ölü Deniz Fay Sistemi ile birlikte önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur. DAF'ın Geç Pliyosen döneminde belirgin bir fay özelliği kazandığı ve toplam yatay atımının 15-20 km civarında olduğu tahmin edilmektedir. Son yıllarda gerçekleştirilen küresel konumlandırma sistemi (GPS) tabanlı jeodezik ölçümler, DAF üzerindeki yıllık ortalama kayma hızının yaklaşık 10 ± 1 mm olduğunu göstermektedir (MTA, 2013). DAF, Karlıova'dan Antakya'ya doğru sıkışmalı veya açılmalı tektonik rejimlerle karakterize edilen sekiz ana alt segmente ayrılmıştır: Karlıova-Bingöl Fayı, Bingöl-Palu Yükselim Alanı, Palu-Hazar Fayı, Hazar Gölü Çöküntü Alanı, Hazar-Sincik Fayı, Sincik-Çelikhan Yükselim Alanı, Çelikhan-Gölbaşı Yükselim Alanı ve Gölbaşı Çöküntü Havzası (MTA, 2013). Ayrıca, DAF ana zonundan ayrılan veya bu zona birleşen çok sayıda aktif ikincil fay bulunmaktadır (MTA, 2013). Yapılan jeolojik ve jeofiziksel çalışmalar, DAF'ın oluşum yaşının Üst Miyosen'in sonlarına tarihlendiğini göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, DAF Kuvaterner döneminden

günümüze kadar sismik olarak aktif bir yapısal unsurdur (MTA, 2013). DAF'ı oluşturan ana segmentlerden Palu-Hazar Gölü Segmenti Elazığ ve çevresini, Hazar Gölü-Sincik Segmenti Malatya ve çevresini, Çelikhan-Erkenek Segmenti Adıyaman ve çevresini, Gölbaşı-Türkoğlu Segmenti ise Kahramanmaraş ve çevresini doğrudan etkileyecek büyük magnitüdlü depremler üretme potansiyeline sahiptir. Söz konusu segmentlerin doğrusal uzanımları ve yanal devamlılıkları dikkate alındığında, $M > 7.0$ büyüklüğünde sismik olaylar üretebilecek kapasitede oldukları anlaşılmaktadır (MTA, 2013). Proje alanları ve yakın çevresindeki sismik aktiviteyi kontrol eden başlıca tektonik yapılar Bitlis Sütur Zonu, Doğu Anadolu Fay Sistemi, Adıyaman Fay Zonu ve Bozova Fayı'dır. Bilindiği üzere bu bölgede tarihsel dönemde çok sayıda yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Proje alanı ve yakın civarındaki en önemli tarihsel depremler 995 Palu, 28 Mayıs 1789 (Ms:7.0 – 7.8) Elazığ, 03 Mayıs 1874 (Ms:7.1) ve 27 Mart 1875 (Ms:6.7) Gezin ve 02 Mart 1893 (Ms:7.1) Doğanyol depremleridir. Aletsel dönemde kaydedilen en önemli depremler ise 25 Mart 1977 (Mw:5.2) Palu, 06 Eylül 1975 (Mw:6.6) Lice, 11 Ağustos 2004 (Mw:5.5) Sivrice, 09 Şubat 2007 (Mw:5.3) Gözeli ve 12 Şubat 2007 (Mw:5.9) Kayapınar (Sivrice) depremleridir (MTA, 2013; Kan, 2013).

3. ARAŞTIRMA ÇALIŞMALARI

3.1. T3 Tünelinde Depremde Meydana Gelen Hasarlar

Narlı-Malatya demiryolu hattı üzerinde yer alan T3 Tünelinde, meydana gelen depremler sonrasında DAFZ Erkenek segmentinin kestiği tünel çıkış portalı kesiminde tahkimatta yenilmeler ve ciddi deformasyonlar ortaya çıkmıştır. 1933 yılında ulaşım açılmış olan T3 Tüneli, Alman tünel açma yöntemleri kullanılan kilit taşlı, taş tahkimatlı bir tüneldir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. T3 tüneli geometrisi (tünel çıkış portalı).

Tünel çıkış portalı kesiminde 145 metrelik bir kesim taş tahkimat yenilerek kapanmıştır. Göçüğün meydana geldiği bölgede her iki tarafında da taş tahkimatta sökülmeler ve izolasyon malzemelerinde dökülmeler görülmüştür (Şekil 3.2). Tünelin çıkış kesiminde göçük bölgesinde yukarıya doğru yaklaşık 5 metrelik bir açılma olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.2. T3 Tüneli oluşan göçük (giriş ve çıkış kesimlerinden).

Raylarda ise Şekil 3.3’ te görüldüğü üzere yer yer 1 metreye varan yükseklik farkı oluşmuştur.



Şekil 3.3. T3 Tüneli çıkış kesiminde raylarda oluşan yükseklik farkı.

3.2. Depremlerin T3 Tüneline Etkilerinin Araştırılması

Kahramanmaraşlı meydana gelen depremlerin T3 Tüneline etkilerinin araştırılması amacıyla ilk olarak saha çalışmaları yapılmıştır. Yapılan saha çalışmalarına bölgenin yüzey haritalamasının çıkarılması ile başlanmıştır. Tünel üzerinde fay kırığı tespit edilmiş ve tüneli km:142+721' de kestiği belirlenmiştir. Tünel üzerinde gözlemlenen KD-GB uzanımlı fay kırıklarında yaklaşık 3,2 m sol yanal atım ve 30 cm' yi bulan düşey atım ölçülmüştür (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. T3 Tüneli Google Earth üzerinde fay kırığının konumu ve fayda gelişen atım miktarları.

T3 Tünel hattı boyunca yapılan araştırma çalışmalarında tünelin çıkış kesiminde farklı uzunluk ve genişliklerde toplamda 4 adet heyelan tespit edilmiştir. Söz konusu tünel kesiminde meydana gelen göçüğün daha iyi analiz edilebilmesi, tünel içerisindeki durumun daha net ortaya konulması, bölgede yeraltı suyu ve birim sınırlarının tespit edilebilmesi ve meydana gelen depremler ile tetiklenen bu heyelanların derinliklerinin belirlenmesi amacı ile sondaj ve jeofizik etütlerin yapılmasına karar verilmiştir. Bu kapsamda tünel üzeri her bölgede farklı amaçlara uygun olacak şekilde bir sondaj ve jeofizik etüt programı hazırlanmış ve hazırlanan programa uygun şekilde etütler yapılmıştır.

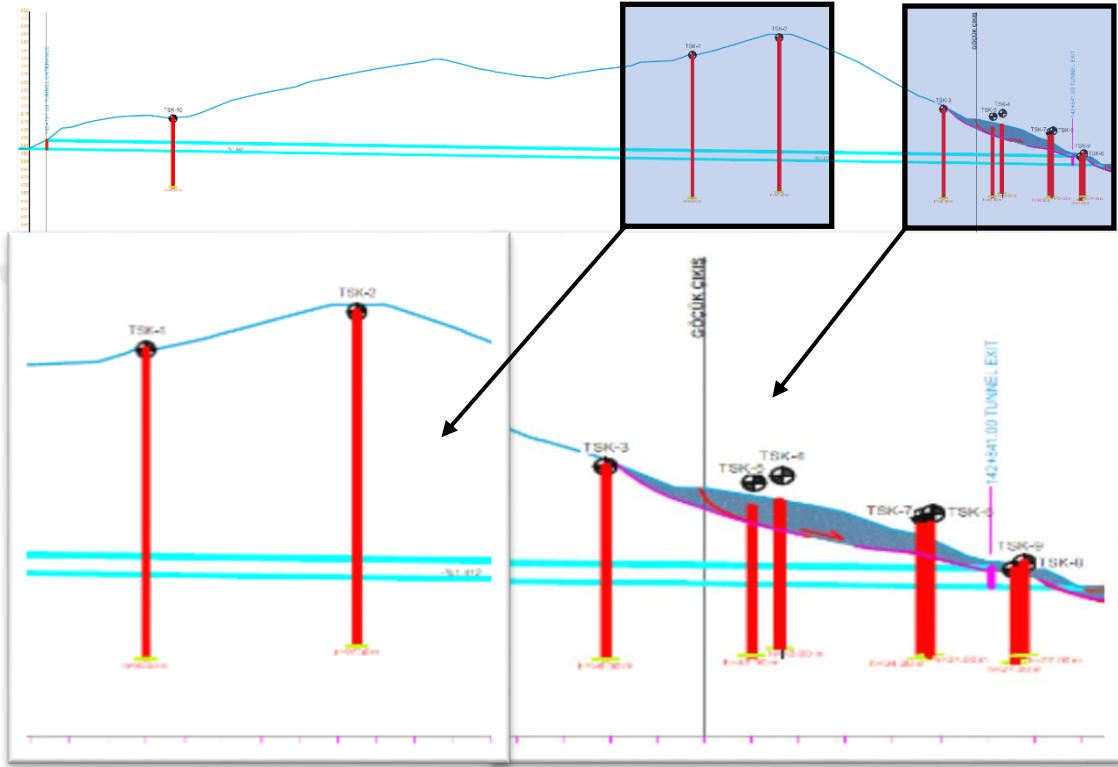
3.2.1. Sondaj çalışmaları

Tünel üzeri mevcut durumun ortaya konulması adına uzunluğu 571 metreyi bulan, giriş kesiminde 3 adet ve çıkış kesiminde 8 adet olmak üzere toplamda 11 adet karotlu sondaj yapılması planlanmıştır (Şekil 3.5). Giriş kesiminin göçükten çok fazla etkilenmemesi ve tünel içerisinde de deformasyon gözlenmemesi sebebi ile bu kesimde sondajlar seyrek tutulmuştur. Göçüğün meydana geldiği, tünel içi deformasyonların gözlemlendiği ve portal kesiminde birçok heyelanın gözlemlendiği çıkış kesiminde ise sondajların daha sık aralıklarla yapılması ve bu bölgede yoğunlaştırılması planlanmıştır.

Yapılacak sondajlar ile bölgenin yeraltı suyu durumu ve birim sınırlarının daha net görülmesi, heyelanın kayma dairesinin belirlenmesi, tünelde meydana gelen göçüğün mekanizmasının daha net ortaya konması amaçlanmıştır. Aynı zamanda yapılan sondaj çalışmaları ile birlikte yürütülecek laboratuvar deneyleri ile de alınan numunenin fiziksel özelliklerinin tayinine yönelik Su içeriği, birim hacim ağırlık, elek analizi, Atterberg limitlerine bakılması, Kayma dayanımı parametrelerinin (c , Φ) tespit edilmesi amacı ile üç eksenli basınç deneyi (ince taneli kil, silt vb. zeminler için), Kısa dönem için UU (Konsolide edilmemiş Drenajsız) deneyi, uzun dönem için CU (Konsolidasyonlu Drenajsız) ve CD (Konsolidasyonlu Drenajlı) deneyleri, Direk kesme deneyi (kum, seyrek ince çakıllı zeminler için), Serbest Basınç Deneyi (suya doymun kil ve silt zeminler için) ve Veyn Deneyi (Suya doymun kil, silt zeminler için) deneyleri ile birimin şişme özelliklerinin tayin edilmesine yönelik gerekmesi durumunda şişme basınç deneyi, şişme yüzdesinin tayini, Tek eksenli basınç deneyi

(kaya birimler için) ve nokta yük dayanım indeksi deneyi (kaya birimler için) yapılması planlanmıştır.

Tüm bu etüt ve laboratuvar çalışmalarından elde edilecek veriler ışığında, tünelin yeniden rehabilitasyonu çalışmaları için oluşturulacak model ve model üzerinde yapılacak analizlerde kullanılacak parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir.

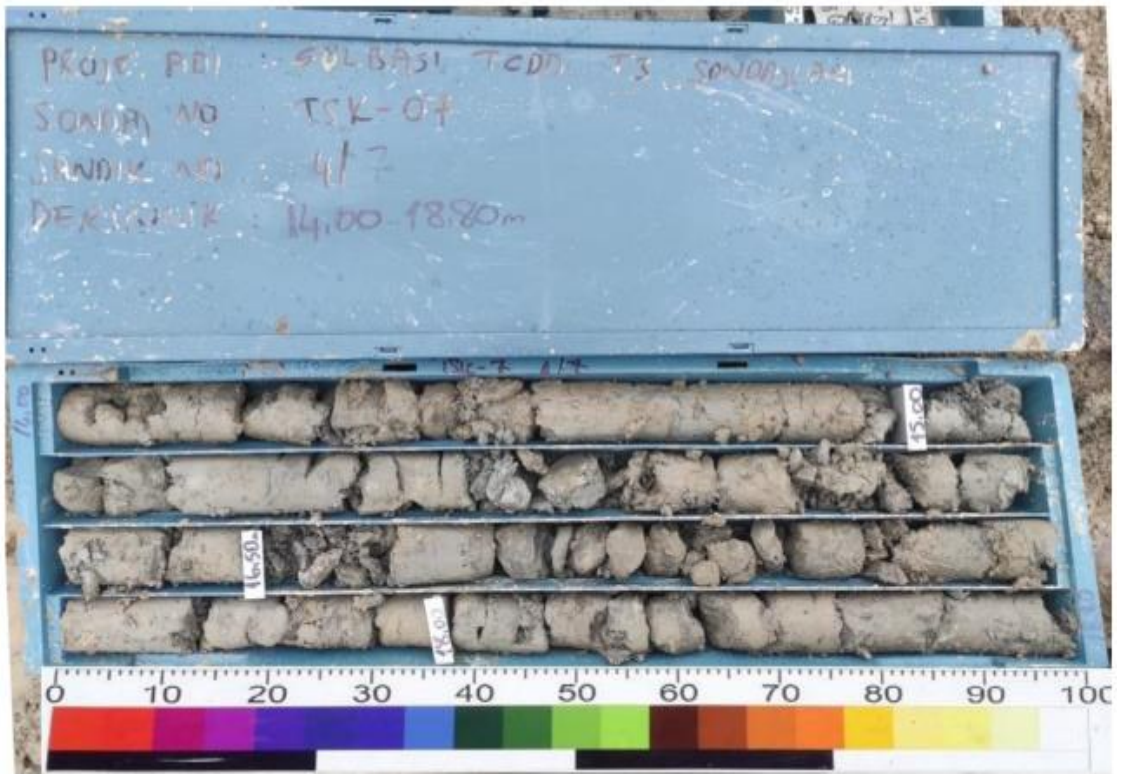


Şekil 3.5. Tünel üzeri sondajların yerleri.

Yapılan sondaj çalışmalarında zeminin ilk 5-6 metrelik kesiminde genelde kumlu kil ve çakıllı kumlu kil bandı gözlenmiştir (Şekil 3.6.). Bu sınırların altında ise tamamen ayrılmış, çok aşırı derecede zayıf dayanımlı, parçalanmış, gözlenebilen süreksizliklerin yüzeyleri düz-kaygan, kil ve kum dolgulu ayrılmış serpantinit şeyl ve kilaşı ardalanması yer almaktadır. Karot fotoğraflarına bakıldığında alt tabakada yer alan kilaşının, tamamen ayrılmış özellikte olduğu ve sert kil olarak değerlendirilebileceği görülmüştür (Şekil 3.7.). Bununla birlikte elde edilen nokta yükleme deney sonuçlarının aşırı derecede düşük olması da bu birimin rezidüel özellikte olduğunu ve kaya sınıfından çok sert kil olarak nitelendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca sahada yapılan sondajlarda zeminin nemli olduğu ancak güçlü bir yeraltı suyu tabakasına ulaşılmadığı rapor edilmiştir.



Şekil 3.6. TSK-07 kuyusuna ait kumlu çakıllı kil numuneleri.



Şekil 3.7. TSK-07 kuyusuna ait ayrılmış kiltası numuneleri.

3.2.2. Jeofizik etütler

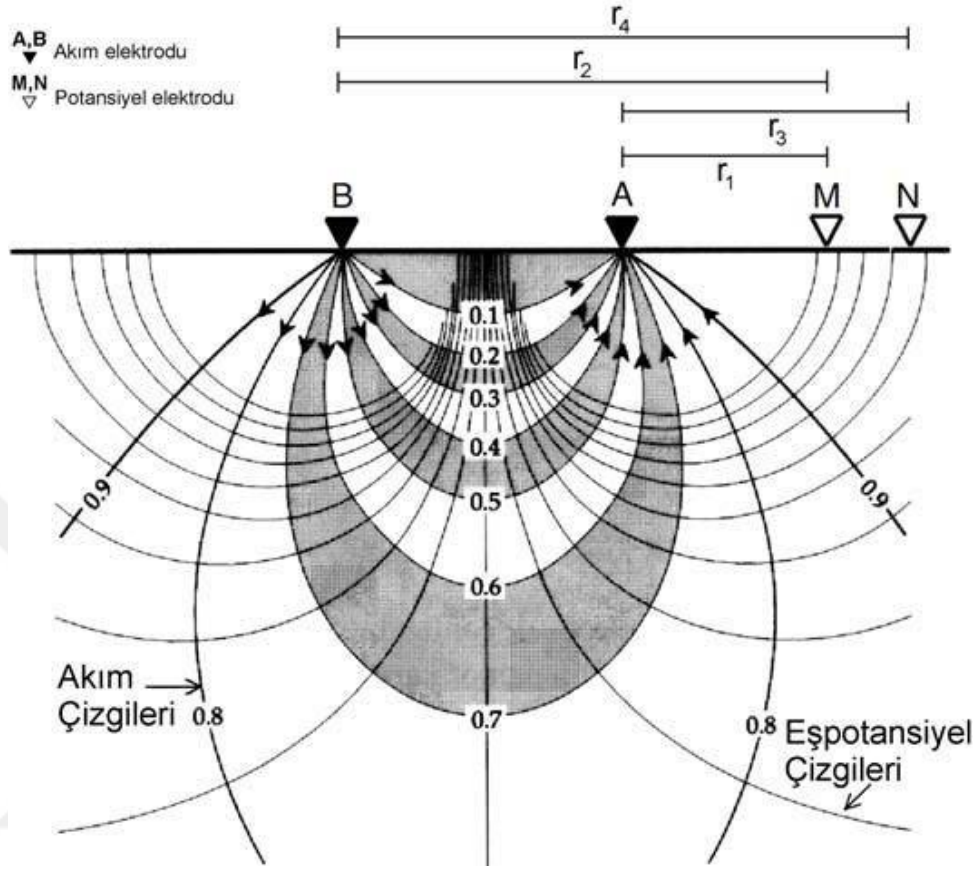
Deprem sonrası oluşan durumun daha detaylı incelenmesi ve yürütülen sondaj çalışmalarına ek veri elde edilmesi amacıyla, bölgede jeofiziksel araştırmalara başlanmıştır. Sondaj çalışmalarında olduğu gibi, tünel giriş kısmının depremlerden daha az etkilenmiş olması nedeniyle bu alanda daha seyrek, çıkış kısmında ise daha yoğun jeofiziksel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen jeofiziksel veriler, sondaj bilgileriyle birlikte değerlendirilerek yeraltının daha tutarlı bir modelinin oluşturulması hedeflenmiştir.

Bu kapsamda yürütülen jeofiziksel çalışmalarda iki temel yöntem uygulanmıştır: Elektrik Özdirenç Tomografisi (ERT) ve 2-Boyutlu Sismik Kırılma Tomografisi-Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW)

Elektrik özdirenç yöntemi, belirli aralıklarla uygulanan bir elektrik rezistivite ölçüm tekniğidir. Özellikle zamana bağlı elektrik rezistivite görüntüleme son yıllarda sığ yeraltı problemlerinin araştırılmasında önemli bir araç haline gelmiştir (Legaz vd., 2009). Bu yöntemde, zemine iki elektrot aracılığıyla elektrik akımı verilir ve bu akımın oluşturduğu potansiyel farkı iki potansiyel elektrot yardımıyla ölçülerek yeraltının rezistivite dağılımı belirlenmeye çalışılır. Doğru akım elektrik özdirenç yöntemi, jeolojik problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan klasik bir tekniktir. Kayaçların yatay ve düşey yöndeki elektriksel iletkenlik farklılıklarından yararlanarak jeolojik yapıların tanımlanması, elektrik özdirenç yöntemlerinin temel amacını oluşturur. Bu yöntem, mühendislik yapılarının zemin etütlerinde, yeraltı suyu ve çevre kirliliği araştırmalarında, yeraltı suyu ve jeotermal enerji aramalarında, maden ve arkeolojik prospeksiyonlarda ve petrol araştırmalarında da uygulama alanı bulmaktadır (Özdemir, 2008).

Yere uygulanan elektrik akımı, yüzey altındaki herhangi bir iletkenlik değişiminden etkilenecek akış düzenini değiştirir ve bu durum elektriksel potansiyel dağılımını etkiler. Potansiyel fark, yeraltının fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki farklılıklara bağlı olarak değişkenlik gösterir. Potansiyel değişimlerini ölçmek için elektrotlar farklı konfigürasyonlarda (dizilim) zemine yerleştirilir. Uygulama esnasında akım elektrotları (A ve B) arasına bağlanan bir ampermetre ile verilen akım değeri, potansiyel elektrotları (M ve N) arasına bağlanan bir voltmetre ile ise oluşan potansiyel

farkı ölçülür (Şekil 3.8). Bu yöntem, özellikle tomografik anlamda değerli sonuçlar sunarak yeraltı yapısının yorumlanmasına önemli katkılar sağlar.



Şekil 3.8. Yarı sonsuz homojen ortamda akım ve potansiyel çizgilerinin dağılımı (Stummer, 2003; Van Nostran ve Cook, 1966).

Son yıllarda geliştirilen hızlı ve yüksek hassasiyetli ölçüm cihazları sayesinde, elektrik rezistivite yönteminde sayısal veri değerlendirme tekniklerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Veri işleme aşamasında sonlu farklar ve sonlu elemanlar gibi nümerik yöntemler kullanılarak 2 ve 3 boyutlu doğru ve ters çözüm modelleri etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede, farklı derinlik seviyelerinden elde edilen ölçümlerle yeraltının iki ve üç boyutlu tomogramları oluşturulabilmektedir. Bu teknik, ortam heterojenitesini basitleştirmeden çözüm sürecine dahil etme avantajı sunarak karmaşık yeraltı yapılarının daha gerçekçi bir şekilde modellenmesine olanak tanır. Özellikle mühendislik ve çevresel problemlerin yanı sıra çeşitli jeolojik sorunların çözümü ve arkeolojik araştırmalarda elektrik rezistivite tomografisinin (ERT) iki boyutlu uygulamaları giderek artmaktadır.

Elektrik rezistivite yönteminde ters çözüm analizleri ile yeraltının gerçeğe yakın rezistivite dağılımı elde edilir. Bu amaçla geliştirilen ters çözüm algoritmaları (deGroot-Hedlin ve Constable, 1990; Sasaki, 1992; Loke ve Barker, 1996a, b; Günther vd., 2006), yeraltının 2 ve 3 boyutlu tomografik görüntülerinin elde edilmesini sağlamıştır. Ters çözüm değerlendirmeleriyle tomografi benzeri sonuçlar elde edilmesi, bu tür uygulamaların elektrik rezistivite tomografisi olarak adlandırılmasına yol açmıştır. ERT ters çözümünde temel amaç, sınırlı sayıdaki görünür rezistivite verisinden yeraltı modelini temsil eden rezistivite dağılımına ulaşmaktır. Bu tür problemlerin çözümü, gözlemlenen ve teorik görünür rezistivite verisi arasındaki farkın yinelemeli bir süreçle minimize edilerek bir başlangıç modelinin iyileştirilmesini gerektirir. Başlangıç modelinden teorik verinin elde edilmesi ve yinelemeler sonucunda model parametrelerinin iyileştirilerek yeni bir teorik veri setinin üretilmesi aşamasında ise doğru çözüm (ileri modelleme) aşamasına ihtiyaç duyulur. Tomografik yaklaşım teknikleri olarak da adlandırılan bu yinelemeli süreç, elektrik rezistivite verilerinin değerlendirilmesinde 1980'lerden itibaren kullanılmaya başlanmıştır (Tripp vd., 1984; Sasaki, 1992; Loke ve Barker, 1996a, 1996b).

Yeraltının homojen bir ortam olarak kabul edildiği ve basit geometrik şekillerdeki yapılar ve süreksizlik sistemleri için analitik yöntemler kullanılabilir. Ancak heterojen bir ortam söz konusu olduğunda, karmaşık bir rezistivite dağılımı ortaya çıkar ve çözüm için sayısal tekniklere başvurulur. Yeraltının belirli sayıda yatay katmanla sınırlandırıldığı tek boyutlu çalışmalarda ise doğrusal süzgeç yöntemleri çözüm elde etmek için kullanılmaktadır (Koefoed, 1979). İki ve üç boyutlu çalışmalarda ise sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri yaygın olarak uygulanmaktadır.

Jeoloji alanında yeraltı araştırmalarında elektrik rezistivite tomografisi günümüzde yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Son yirmi yılda bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler, rezistivite veri toplama sistemlerinin de evrimleşmesine olanak sağlamıştır. Tipik bir sistem; rezistivite ölçüm cihazı, bilgisayar, elektrotları kontrol eden bir anahtar devre, elektrot kabloları, bağlantı elemanları ve elektrotlardan oluşur (Van Overmeeren ve Ritsema, 1988; Griffiths vd., 1990; Griffiths ve Barker, 1993; Dahlin, 2001). Elektrot aralıkları, araştırmanın spesifik hedeflerine göre ayarlanır. Saha çalışmalarında, elektrotların bağlı olduğu kablolar çalışma alanına serildikten sonra elektrotlar zemine çakılır ve kablolar elektrotlara bağlanarak ölçüm sistemi hazır

hale getirilir. Ölçümler, istenilen elektrot dizilimleri için kısa sürede tamamlanır ve ölçüm hattı bir sonraki profile kaydırılır.

Jeofiziksel çalışmalarda, doğru çözüm (ileri modelleme) ve ters çözüm olmak üzere iki temel modelleme yaklaşımı kullanılır. Doğru çözüm modelleme tekniği ile yeraltının varsayılan fiziksel özelliklerine uygun bir model oluşturularak, bu modelin yüzeyde oluşturacağı teorik yanıt belirlenmeye çalışılır. Geometrik ve fiziksel parametrelerden oluşan yeraltı modeli, araştırma hedeflerine göre tanımlanır ve bu parametrelere ek olarak doğru çözüm sürecine dahil edilen başlangıç değerleri ve sınır koşulları ile matematiksel bir fiziksel model oluşturulur (Canitez, 1997). Analitik, integral ve sayısal yöntemler kullanılarak model yanıtı elde edilir ve bu sayede 1, 2 ve 3 boyutlu doğru çözüm modelleri oluşturulabilir. Ölçülen gerçek verilerden yeraltını oluşturan modelin parametrelerine ise ters çözüm yöntemi ile ulaşılır. İki veri seti arasındaki uyumsuzluğu en aza indiren modelin, yeraltını en iyi temsil ettiği varsayılır. Ters çözüm sürecinde, birden fazla teorik modele ait yapay verinin denenmesi gerektiğinden, bu işlemler yinelemeli bir şekilde gerçekleştirilir (Berge, 2011). Başlangıç parametrelerinde tanımlanan yineleme sayısı ve uyum kriterlerine bağlı olarak işlem sonlandırılır.

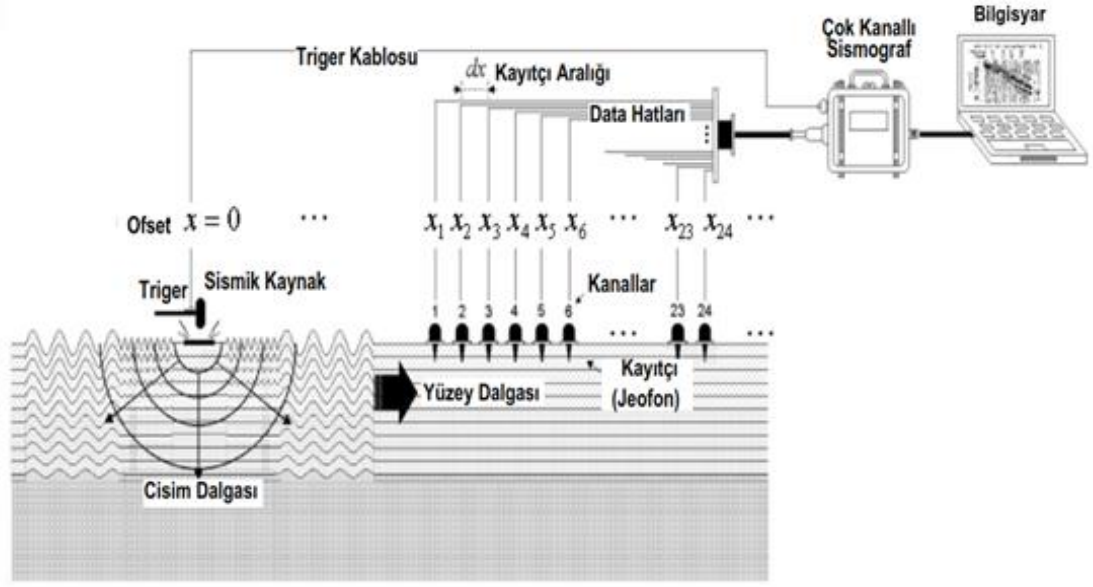
Elektrik rezistivite ters çözüm teknikleri, yinelemeli bir şekilde mevcut görünür rezistivite verisi ile hesaplanan görünür rezistivite verisi arasındaki bir ölçüt olan veri RMS uyumsuzluk değerini minimize ederek, verilen bir başlangıç modelini iyileştirmeye çalışır. Hesaplanan ve ölçülen görünür rezistivite verileri arasındaki farkları en aza indirmek için gerçekleştirilen yineleme sayısı, başlangıç tahminlerinin doğruluğu ve verinin içerdiği gürültü seviyesi ile ilişkilidir. Ters çözüm sonucunda farklı yeraltı modellerinin benzer model tepkileri üretebilmesi (çözümün tekil olmaması), model seçimi veya başlangıç tahminlerinin gerçeğe yakın olmaması, kullanılan farklı ters çözüm parametreleri (çözüm tekniği, sönüm faktörü vb.) gibi nedenlerle çözümden uzaklaşılabilir (gerçek yeraltı modeline yaklaşıp duruma). Bu nedenle, jeolojik koşullar dikkate alınarak kabul edilebilir bir çözümün elde edilmesi ve yeraltının gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi için model seçimi kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, sentetik yeraltı modelleri oluşturularak, bu modellerin doğru çözüm hesaplaması sonucu elde edilen görünür rezistivite verilerinin ters çözüm

işlemine girdi olarak verilmesi ve işlem sonuçlarının tasarlanan sentetik model ile karşılaştırılarak uygun çözümün belirlenmesi gereklidir.

Yöntemin farklı algoritmalar ve yeraltı modelleri için test edilmesi ve farklı elektrot dizilimlerinin probleme yaklaşımı üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır (Sasaki, 1992; Olayinka ve Yaramancı, 2000; Candansayar ve Başokur, 2001; Dahlin ve Zhou, 2004; Drahor vd., 2004, 2005).

T3 Tüneli üzerinde 13 profil ve Çıkış Portali heyelan bölgesinde 1 profil olmak üzere toplam 14 profilde Elektrik Rezistivite Tomografisi (ERT) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

T3 Tünel hattında uygulanan bir diğer jeofiziksel etüt yöntemi ise 2-Boyutlu Sismik Kırılma Tomografisi-Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) yöntemidir (Şekil 3.9). Deprem dalgalarının kaydedilmesiyle ortaya çıkan iki ana sismik dalga türü bulunmaktadır: cisim dalgaları ve yüzey dalgaları. Sismograflara ilk ulaşan cisim dalgaları, ardından ise yüzey dalgalarıdır. Cisim dalgaları, kendi içinde P (Primer veya Basınç) ve S (Sekonder veya Kayma) dalgaları olmak üzere ikiye ayrılır. Yayınım doğrultusunda küresel olarak hareket eden ve uzak mesafelere ulaşabilen P dalgası, ilksel bir dalgadır. P dalgasını izleyen S dalgası ise hareket doğrultusuna dik yönde titreşim yapar ve paralel polarize olmuş dalgalardır. S dalgaları sıvı ortamlarda yayılmazlar. Yüzey dalgaları da Love ve Rayleigh dalgaları olmak üzere ikiye ayrılır. Love dalgaları, kesme dalgasının yatay bileşeninin (SH) hava-yer arayüzeyinde oluşur ve yayılma doğrultusuna dik ve yatay yönde titreşim hareketi yapar. Rayleigh dalgaları ise yerin serbest yüzeyi boyunca hareket eder ve sıkışma (P) ve düşey kayma (SV) dalgalarının girişimiyle oluşarak elips şeklinde, hareket yönünün tersine ve yayılım doğrultusunda hareket eder (Xia vd., 2004).



Şekil 3.9. Yüzey Dalgasının Çok-Kanallı Analizi (MASW) yönteminin veri toplama uygulaması gösterimi (MASW, b.t).

Yüzey dalgalarının genliklerinin cisim dalgalarının genliklerinden daha büyük olması, enerjilerinin daha hızlı kaybolmasına neden olur (Bullen, 1985). Yüzey dalgalarının bir diğer önemli özelliği ise tabakalı ortamlarda dispersiyona uğramalarıdır. Bu durum, dalga hızının periyoda bağlı olarak değişmesi anlamına gelir.

Aktif kaynaklı sismik yöntemler, enerji kaynağının kullanıcı tarafından kontrol edildiği tekniklerdir. Bu yöntemler Durağan Rayleigh Dalgası Yöntemi (SSRW), Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi Yöntemi (SASW) ve Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi Yöntemi (MASW) olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Yüzey dalgasının çok kanallı analizi (MASW) yöntemi, Park vd. (1999) tarafından geliştirilmiş olup, günümüzde özellikle jeoteknik ve mikrobölgeleme araştırmalarında yaygın olarak kullanılan bir sismik yöntemdir. Bu yöntem, yeraltına bir kaynaktan gönderilen akustik dalgaların, yeraltındaki jeolojik formasyonlar arasındaki ara yüzeylerde (süreksizlikler) oluşan yansıma ve kırılmalarının (iletimlerinin) yeryüzünde zamana bağlı olarak kaydedilmesi ve bu sismik hızlardan ortamın hız dağılımlarının belirlenmesi prensibine dayanır. Snell yasası, optikte olduğu gibi sismik dalga yayılımında da geçerlidir ve farklı iki ortamın ara yüzeyine gelen bir ışının yansıyan ve kırılan olmak üzere iki farklı davranış sergilediğini ifade eder.

Yüzey dalgalarının çok kanallı analizinde, farklı ortam ara yüzeylerinden yansıyan dalgalar kullanılarak yeraltı modellemesi yapılır. Yapay bir kaynak kullanılarak, deprem enerjisinin oluşturduğu akustik dalgaya benzer bir enerji üretilir. Bu amaçla darbe, ağırlık düşürme, patlatma veya sarsıntı (vibro) gibi sistemler kullanılabilir. Yüzey dalgalarının yer içerisindeki yayılımı frekansa, faz hızına ve ortam yoğunluğuna bağlıdır. Bu üç faktör, dispersiyon eğrisinin belirlenmesinde doğrudan ilişkilidir ve kayma dalgası hızının (V_s) tespitinde önemli bir rol oynar (Xia vd., 1999).

Basit bir ölçüm sistemi alıcı (jeofon), verici (kaynak) ve bir kayıtçıdan (sismograf) oluşur. MASW çalışmalarında, yeryüzüne belirli aralıklarla yerleştirilen düşey jeofonlar (genellikle 4,5-10 Hz), çok kanallı bir sismograf ve bir balyoz (kaynak olarak) kullanılır. Ölçümler sırasında, sismografa bağlı bir bilgisayar aracılığıyla ölçüme uygun giriş parametreleri ayarlanabilir ve vuruş sonrasında kayıt kalitesi anında incelenebilir. Elde edilen kayıtlar zaman-derinlik ekseninde görselleştirilir. MASW yöntemiyle yüzey dalgalarından elde edilen veriler üzerinden dispersiyon eğrisi belirlenir ve ters çözüm tekniği uygulanarak yeraltının kesme dalgası hızı (V_s) dağılım kesiti elde edilir. Derinliğe bağlı sismik hız kesitleri oluşturmak amacıyla farklı dalga boylarında kaydedilen yüzey dalgaları analiz edilir.

T3 Tüneli üzerinde 21 profil ve Çıkış Portali heyelan bölgesinde 11 profil olmak üzere toplam 32 profilde 2-Boyutlu Sismik Kırılma-Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) çalışması gerçekleştirilmiştir.

Yapılan arazi çalışmalarında, Elektrik Rezistivite Tomografisi ölçümleri için serilimler 6 ofset ile 3 metre jeofon aralığında, sismik ölçümler için serilimler ise 10 ofset ile 5 metre jeofon aralığında yapılmış ve sismik kaynak olarak 10 kg ağırlığında bir balyoz kullanılmıştır. Her bir serimde veri kalitesini artırmak ve taban topografyasını daha iyi belirlemek amacıyla, ters-düz ve orta atışlar olmak üzere çeşitli kayıtlar alınmıştır.

3.2.2.1 Tünel üzerinde yapılan jeofizik etütler

Tünel üzerinde ERT metodu ile yapılan jeofizik ölçümlere ait koordinat listesi ve detay bilgiler aşağıda verilmiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Tünel üzeri ERT ölçümleri lokasyon koordinatları (WGS-84 6°).

Profil No	Başlangıç		Bitiş		Elektrot Sayısı	Elektrot Aralığı	Profil Uzunluğu
	Kuzey	Doğu	Kuzey	Doğu			
ERT-1	4186724	383354	4187065	383452	72	5	355
ERT-2	4187014	383300	4187007	383542	48	5	235
ERT-3	4186977	383297	4186965	383530	48	5	235
ERT-4	4186735	383301	4187070	383418	72	5	355
ERT-5	4186481	383243	4186930	383381	48	10	470
ERT-6	4186472	383265	4186916	383411	48	10	470
ERT-7	4186541	383019	4186404	383474	48	10	470
ERT-8	4186628	383088	4186465	383524	48	10	470
ERT-9	4186741	383067	4186630	383512	48	10	470
ERT-10	4186839	383080	4186742	383525	48	10	470
ERT-11	4186906	383126	4186824	383581	48	10	470
ERT-12	4187013	383160	4186887	383616	48	10	470
ERT-13	4186501	383213	4186943	383355	48	10	470

Tünel üzerinde 2-Boyutlu Sismik Kırılma metodu ile yapılan jeofizik ölçümlere ait koordinat listesi ve detay bilgiler aşağıda verilmiştir (Çizelge 3.2).

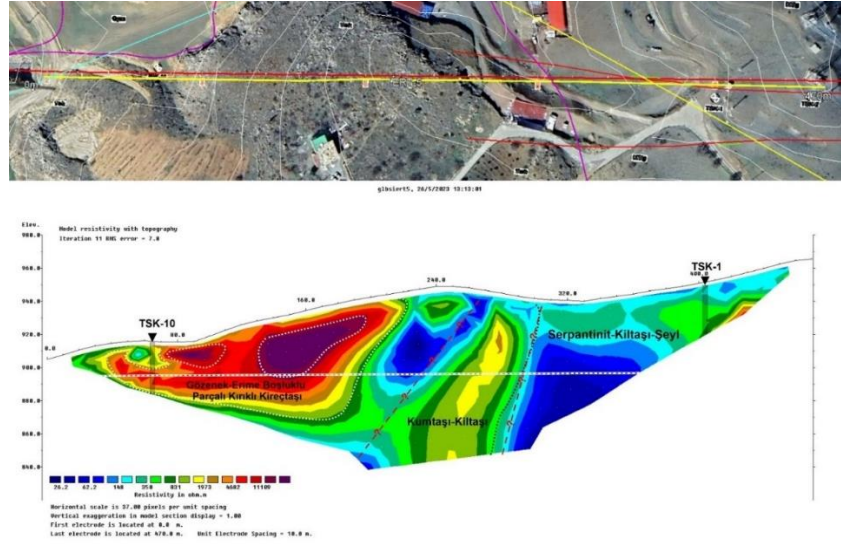
Çizelge 3.2. Tünel üzeri sismik ölçümler lokasyon koordinatları (WGS-84 6°).

Nokta Adı	Başlangıç		Bitiş		Jeofon Sayısı	Jeofon Aralığı	Serim Boy	Ofset
	Kuzey	Doğu	Kuzey	Doğu				
SİS-1	4186488	383175	4186463	383284	24	5	115	10
SİS -2	4186527	383202	4186490	383310	24	5	115	10
SİS -3	4186562	383207	4186517	383320	24	5	115	10
SİS -4	4186575	383210	4186543	383324	24	5	115	10
SİS -5	4186594	383218	4186564	383326	24	5	115	10
SİS -6	4186606	383271	4186591	383379	24	5	115	10
SİS -7	4186629	383256	4186613	383358	24	5	115	10
SİS-8	4186663	383249	4186653	383356	24	5	115	10
SİS-9	4186689	383264	4186687	383378	24	5	115	10
SİS-10	4186717	383316	4186679	383425	24	5	115	10
SİS -11	4186760	383278	4186704	383370	24	5	115	10
SİS -12	4186784	383319	4186697	383387	24	5	115	10
SİS -13	4186826	383258	4186786	383360	24	5	115	10
SİS-14	4186836	383285	4186808	383394	24	5	115	10
SİS -15	4186857	383300	4186834	383409	24	5	115	10
SİS -16	4186872	383405	4186908	383303	24	5	115	10
SİS -17	4186922	383316	4186901	383413	24	5	115	10
SİS -18	4186938	383317	4186929	383370	24	5	115	10
SİS-19	4186488	383162	4186480	383275	24	5	115	10
SİS-20	4186567	383205	4186535	383318	24	5	115	10
SİS-21	4186616	383280	4186593	383393	24	5	115	10

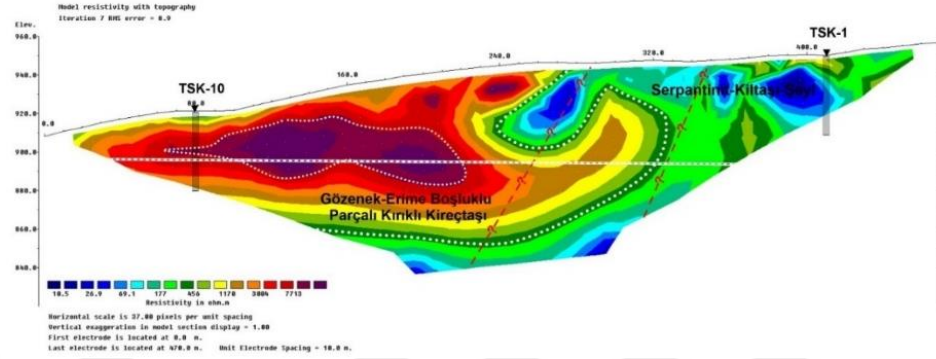
Tünel eksenine paralel olarak serimi yapılan ERT-5 ile ERT-13 profillerinde 48 adet elektrot kullanılmış, elektrot aralıkları 10 metre olmak üzere profil uzunluğu 470 metre ve hedef derinlik yaklaşık 90 metredir (Şekil 3.10). Ölçümün değerlendirilmesi sonucu elde edilen 2-Boyutlu elektrik öz direnç yapı kesiti aşağıda verilmiştir. Yaklaşık tünel kotu kesite beyaz çizgi ile işlenmiştir. Elektrik öz direnç tomografi çalışması; kendisine en yakın TSK-1, TSK-2 ve TSK-10 sondaj logları, arazi gözlemleri ve diğer jeofizik yöntemler göz önüne alınarak yorumlanmıştır. Kesit üzerinde öz direnç değişimlerinin belirgin olduğu kesimler birim geçişi olarak yorumlanmış ve siyah kesikli çizgiler ile ayrılmıştır (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12).



Şekil 3.10. Çalışma sahasında uygulanan jeofizik etüt profilleri (sarı çizgiler ERT, mavi çizgiler sismik yansıma, kırmızı çizgiler heyelanları, pembe çizgiler birim sınırlarını göstermektedir).



Şekil 3.11. Ert-5 profili uydu görüntüsü, sonuç kesiti.



Şekil 3.12. Ert-6 profili uydu görüntüsü, sonuç kesitleri.

Yapı kesiti incelendiğinde Kırmızı-Turuncu renk tonlarında gösterilen yüksek özdirençli kesimin Gözenek-Erime Boşluklu Parçalı Kırıklı Kireçtaşı birimine ait olduğu ancak aynı birim içerisinde çok daha yüksek özdirence sahip (koyu kırmızı renkli) kesitte beyaz noktalı çizgiler ile ayrılmış kesimleri erime boşluğu ve/veya çok fazla gözenekli kesimler olduğu, Sağ tarafta Sarı-Yeşil renk tonlarında gösterilen kesimlerin Kumtaş-Kiltaş-Şeyl birimine ait olduğu, Mavi-Yeşil renk tonlarında gösterilmiş düşük özdirençli kesimlerin Serpantin-Kiltaş-Şeyl birimine ait olduğu düşünülmektedir. Kesit üzerinde 120-180 m aralıklarında ani özellik değişimleri gözlenmiş, bu ani özellik değişiminin olduğu kesimler bölgedeki aktif tektonik yapıya bağlı olarak gelişmiş oluşabilecek fay yapıları olduğu düşünülmektedir. Bu fay kesit üzerinde kırmızı kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

Tünel eksenine paralel olarak alınan ERT-5 ve ERT-6 ölçümlerinde fay yapılarına bağlı olarak birim dokanakları gözlenmiştir. Eksene en yakın Ert-5 profilinin 0 m'si tünelin yaklaşık 142+200 km sine denk gelmektedir. Kesitin yaklaşık 140 metresinde (Km:142+340) çok yüksek özdirençli birimlerin olmasından dolayı bu km'den itibaren yaklaşık 60 m lik kesimde olası tünel tavanında olası erime boşlukları yapıların olabileceği, kesitin yaklaşık 190-310 m leri (Km:142+390-142+510) arasında fay yapılarına bağlı olduğu düşünülen birim dokanakları tespit edilmiştir.

3.2.2.2 Tünel çıkış portalı üzerinde yapılan jeofizik etütler

Tünel üzerinde yapılan serimlere ek olarak çıkış portal kesiminde var olan heyelanın tanımlanabilmesi adına 1 adet profilde ERT ölçümleri, 11 adet profilde ise sismik ölçümler yapılmıştır. Yapılan ERT ölçümlerine ait lokasyon koordinatları aşağıda verilmiştir (Çizelge 3.3). Ölçümün yapıldığı bölgenin uygu görüntüsü Şekil 3.13' te gösterilmiştir.

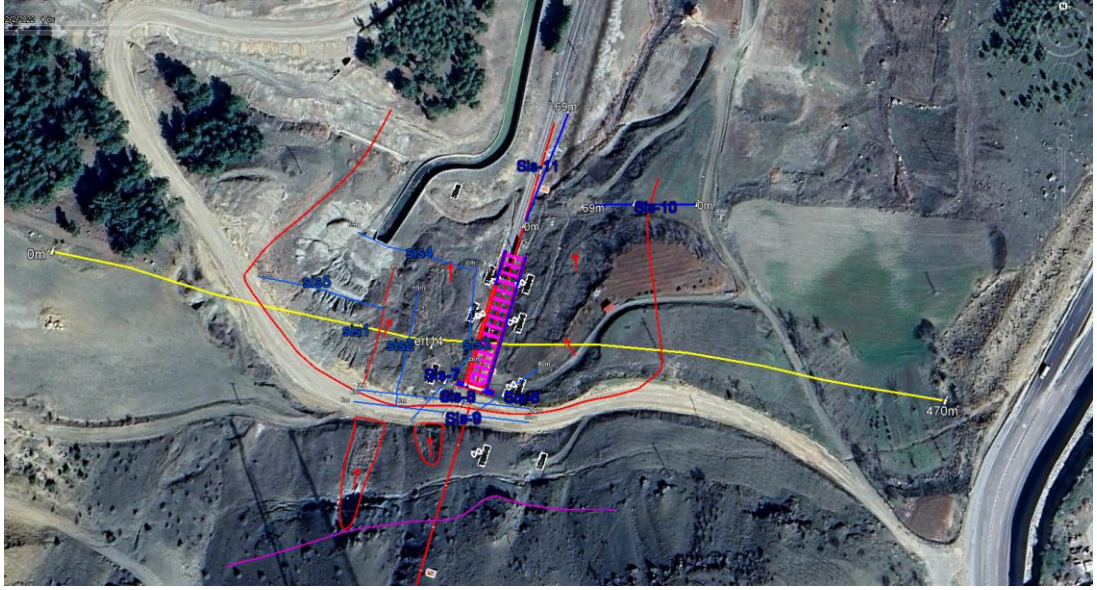
Çizelge 3.3. Tünel çıkış portalı ERT ölçümleri lokasyon koordinatları (WGS-84 6°).

Profil No	Başlangıç		Bitiş	
	Kuzey	Doğu	Kuzey	Doğu
ERT-14	4187130	383198	4187041	383660

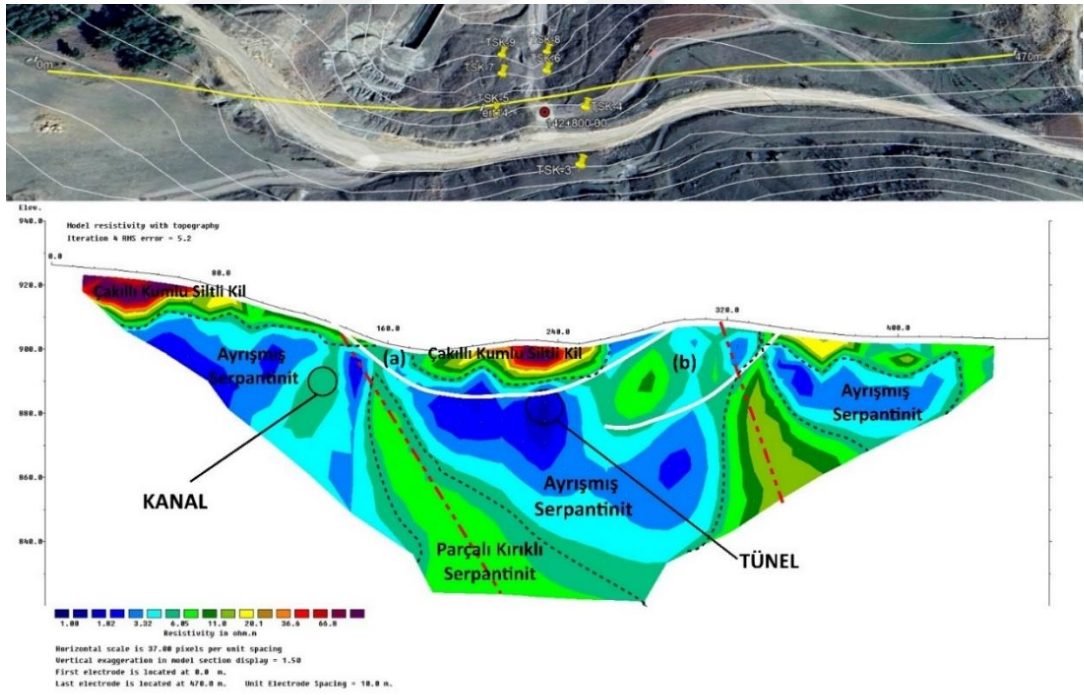
Yapılan 2 Boyutlu Sismik Kırılma yöntemine ait lokasyon koordinatları aşağıda verilmiştir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Tünel çıkış portalı sismik ölçümler lokasyon koordinatları (WGS-84 6°).

Nokta Adı	Başlangıç		Bitiş		Jeofon Sayısı	Jeofon Aralığı	Serim Boy	Ofset
	Kuzey	Doğu	Kuzey	Doğu				
SİS-1	4187052	383356	4187113	383370	24	3	69	6
SİS -2	4187044	383374	4187102	383384	24	3	69	6
SİS -3	4187047	383413	4187113	383416	24	3	69	6
SİS -4	4187114	383412	4187135	383354	24	3	69	6
SİS -5	4187093	383366	4187109	383303	24	3	69	6
SİS -6	4187036	383407	4187061	383446	24	3	69	6
SİS -7	4187036	383381	4187068	383410	24	3	69	6
SİS-8	4187052	383353	4187041	383442	24	3	69	6
SİS-9	4187048	383350	4187036	383442	24	3	69	6
SİS-10	4187147	383534	4187147	383472	24	3	69	6
SİS-11	4187136	383440	4187198	383465	24	3	69	6



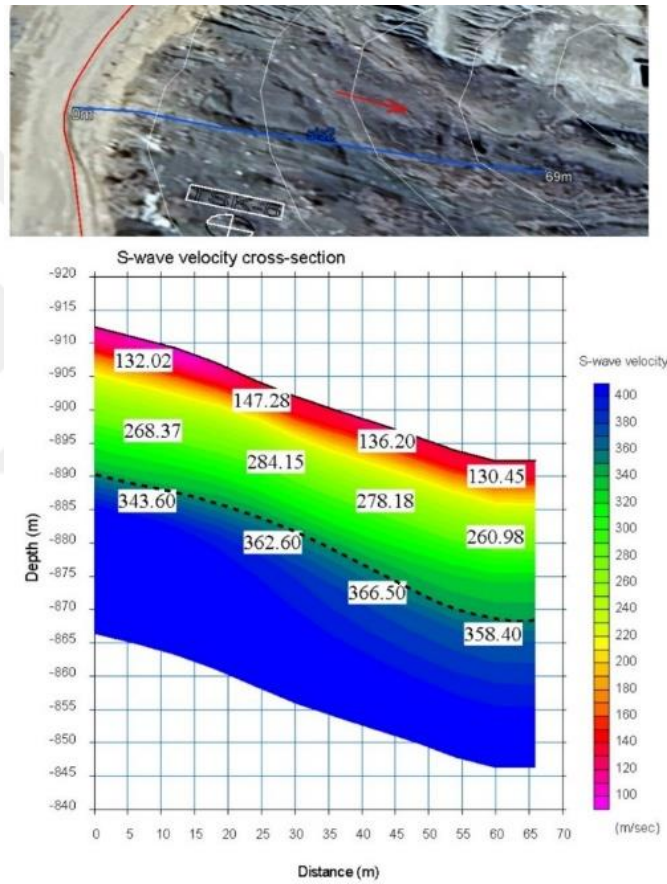
Şekil 3.13. Tünel çıkış portalında gerçekleştirilen jeofizik çalışma lokasyonları uydu görüntüsü.



Şekil 3.14. ERT-14 profili uydu görüntüsü, sonuç kesiti.

Tünel çıkış portal kesiminde ERT-14 olarak adlandırılan Kuzeybatı-Güneydoğu uzantılı profilde öz direnç değişimlerinin belirgin olduğu kesimler birim geçişi olarak yorumlanmış ve siyah kesikli çizgiler ile ayrılmıştır (Şekil 3.14). Yapı kesiti

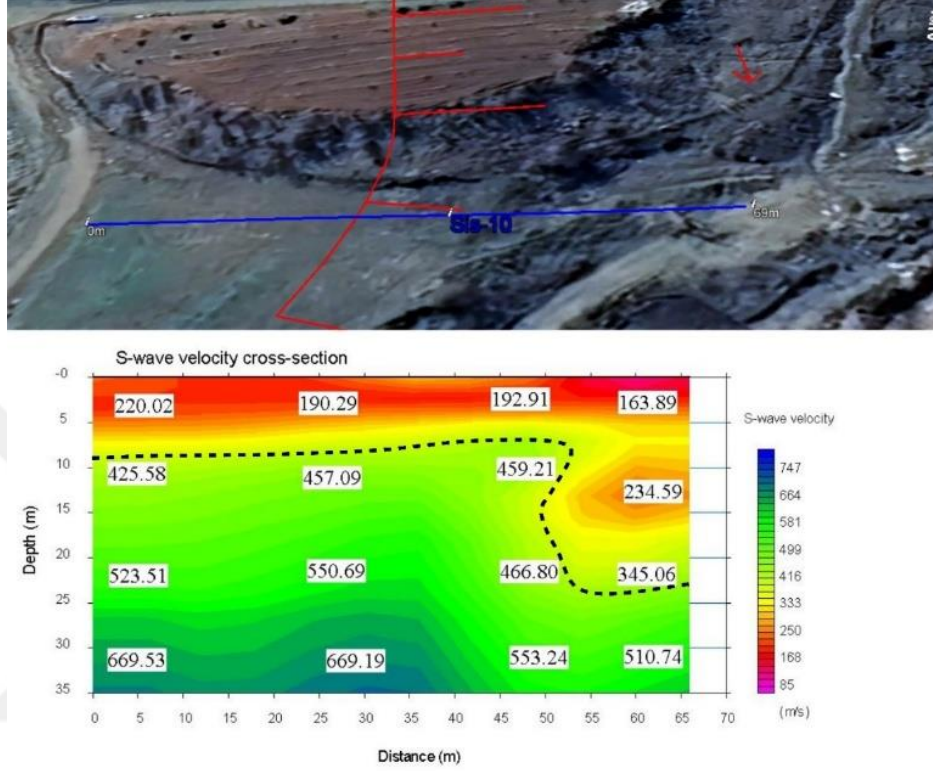
incelendiğinde, Yüzeyde Kırmızı-Mor renk tonlarında gözlenen yüksek öz dirençli kesimlerin Çakıllı Kumlu Siltli Kil birimine ait olduğu, Mavi renk tonlarında gözlenen düşük öz dirençli kesimlerin Ayrışmış Serpantinit, Yeşil renk tonlarında gözlenen kesimlerin ise Parçalı Kırıklı Serpantinit birimine ait olabileceği düşünülmüştür. Kesit üzerinde Beyaz çizgilerle ayrılan kısımların muhtemel Birincil Kayma Yüzeyi ya da İkincil Hareket olma ihtimali bulunduran kesimler olduğu değerlendirilmektedir. Kesitte 130-220 m ve 310-350 m aralıklarında kırmızı kesikli çizgilerle gösterilen kesimlerin muhtemel fay yapıları ait olduğu düşünülmekte olup mevcut ve muhtemel heyelan hareketlerinin bu faylar nedeniyle meydana geldiği ve gelebileceği öngörülmektedir.



Şekil 3.15. Sismik-2 profili 2-Boyutlu S Dalgası heyelan bölgesi hız değişim kesiti.

Sismik tomografi ölçümünün değerlendirilmiş 2-Boyutlu S dalgası hız (V_s) kesiti yukarıda verilmiştir (Şekil 3.15). Sismik-2 Kesiti arazi gözlemleri ve sondaj logları ile birlikte değerlendirilmiştir. Olası kayma yüzeyi kesit üzerinde siyah kesikli çizgilerle belirtilmiştir. Kesitler üzerinde kırmızı- turuncu renklerle gösterilen düşük hızlara sahip (100-210 m/sn) kesimlerin Çakıllı Kumlu Siltli Kil (Yamaç Molozu) birimine, bu birim altında kalan ve Yeşil-Sarı renk tonları ile gösterilen yaklaşık V_s : 210-360

m/sn arasında hızlara sahip birimlerin Ayrılmış Serpantinit birimine, bu birim altında yüzeyden yaklaşık 20 m derinlikten itibaren Mavi renk tonlarında gözlenen daha yüksek hızlı kesimlerin Vs: 360-400 ise Parçalı Kırıklı Serpantinit birimi olduğu düşünülmektedir.

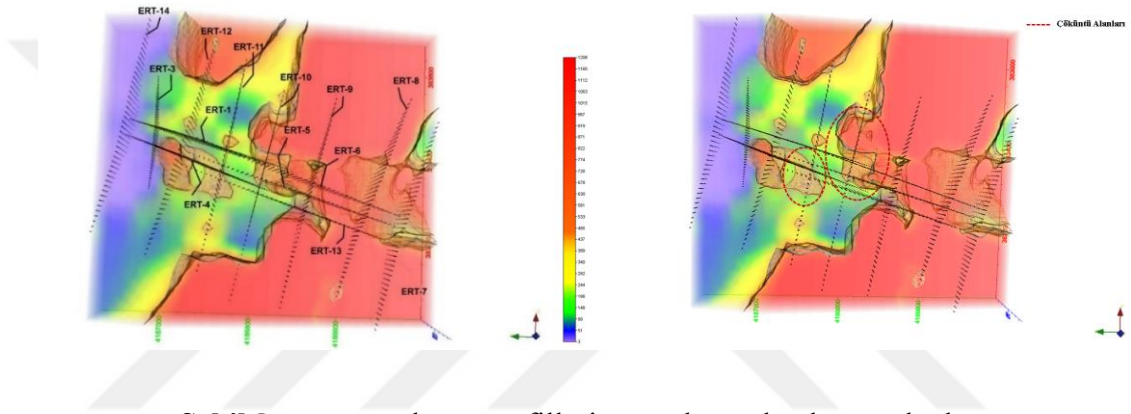


Şekil 3.16. Sismik-2 profili 2-Boyutlu S Dalgası genel hız değişim kesiti.

Sismik tomografi ölçümünün değerlendirilmiş 2-Boyutlu S dalgası hız (V_s) kesiti yukarıda verilmiştir (Şekil 3.16). Sismik-10 Kesiti arazi gözlemleri ve sondaj logları ile birlikte değerlendirilmiştir. Olası kayma yüzeyi kesit üzerinde siyah kesikli çizgilerle belirtilmiştir. Kesitler üzerinde kırmızı- turuncu renklerle gösterilen düşük hızlara sahip kesimlerin Çakıllı Kumlu Siltli Kil (Yamaç Molozu) birimine, bu birim altında kalan ve Sarı renk tonları ile gösterilen birimlerin Ayrılmış Serpantinit birimine, bu birim altında yüzeyden yaklaşık 30 m derinlikten itibaren Mavi-Yeşil renk tonlarında gözlenen daha yüksek hızlı kesimlerin Parçalı Kırıklı Serpantinit birimi olduğu düşünülmektedir. Kesitte 50 metre boyunca yaklaşık 10 m derinlikte gözlenen kayma yüzeyinin 50-69 m aralıklarında yaklaşık 25 m derinliğe kadar indiği görülmektedir.

3.2.2.3 Jeofizik etütler genel değerlendirme

Yapılan tüm bu jeofizik etütler neticesinde elde edilen veriler ışığında modellemenin doğru bir şekilde yapılabilmesi amacı ile profil üzerindeki kot değişimleri işlenerek değerlendirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan her bir serim kendi içerisinde analiz edilmiş ve değerlendirmeler sonucu 2-Boyutlu elektrik öz direnç yapı kesitleri çıkartılmıştır (Şekil 3.17). Elektrik öz direnç tomografi çalışmalarında ise sondaj logları, arazi gözlemleri ve diğer jeofizik etüt sonuçları göz önüne alınarak yorumlanmıştır. ERT ölçümlerine ait birleştirilmiş 3-D görünümleri detaylı olarak çıkarılmıştır.



Şekil 3.17. ERT ölçüm profilleri ve muhtemel çöküntü alanları.

Çıkış portalı heyelan bölgesinde yapılan sismik çalışmalar sonucunda heyelanın batı kesiminde yüzeyden yaklaşık 15-30 metre derinliklerden itibaren gözlenen daha yüksek hıza sahip kesimler ile daha düşük hıza sahip parçalı kırıklı serpantinit birimi sınırının heyelanın kayma yüzeyi olduğu değerlendirilmektedir. Bu birim sınırları üzerinde oluşturulan ve muhtemel kayma dairelerini gösterir 3D haritalar oluşturulmuştur. Bu haritalara göre tünel portalında bulunan ve geniş yayılım gösteren heyelanın yaklaşık 160 metre boyunca, 211 metre genişliğinde ve 13 ile 27 metre arasında değişen derinlikte olduğu anlaşılmıştır.

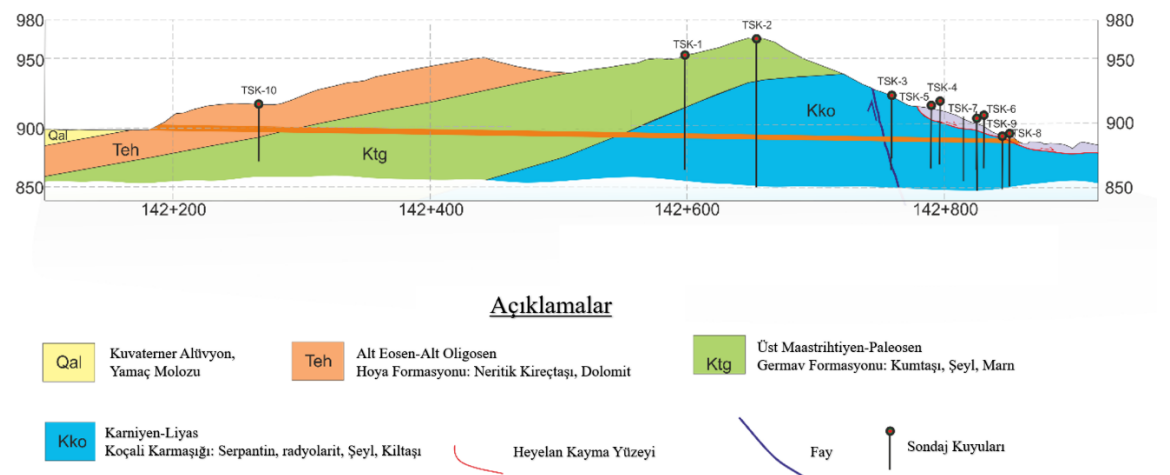
4.TÜNELİN REHABİLİTASYON ÇALIŞMALARI

Yapılan saha çalışmaları, karotlu sondajlar ve jeofizik etütler neticesinde T3 Tüneli ile ilgili imalatlarından önce ilk aşamada depremler tarafından tetiklenen ve T3 Tünelini de içine alan heyelanın ıslahı planlanmış ardından T3 Tünelinin yeniden rehabilitasyonu çalışmalarının yapılmasına karar verilmiştir.

4.1 Heyelan Islah Çalışmaları

Arazi çalışmaları sırasında tünel girişinde iç içe geçmiş 4 adet heyelan tespit edilmiştir. Bu heyelanların geometrisinin belirlenmesi amacıyla 8 adet karotlu sondaj yapılmış bunlardan 3 tanesine inklonometre yerleştirilmiştir ancak inklonometre kuyularında göçme ve kopma olduğundan ölçüm alınamamıştır. Bu nedenle heyelan geometrileri jeofizik yöntemlerden ve sondaj verilerinden yararlanılarak belirlenmiştir.

İnceleme alanında yer alan birimlerin, fiziksel ve mekanik özelliklerinin ve proje çalışmalarında kullanılacak parametrelerin belirlenmesine yönelik olarak jeolojik çalışmalar, temel sondajları, yerinde (in-situ) deneyleri ve jeofizik çalışmalar yapılmıştır. Tüm bu etütlerden elde edilen veriler ışığında proje alanında jeolojik model çalışmaları gerçekleştirilmiş, sondajlardan yararlanılarak jeolojik birimler belirlenmiştir. Bunun sonucunda zemin ve kaya birimlere ait litolojik ve jeoteknik özellikler incelenerek jeolojik-jeoteknik profil oluşturulmuştur (Şekil 4.1).

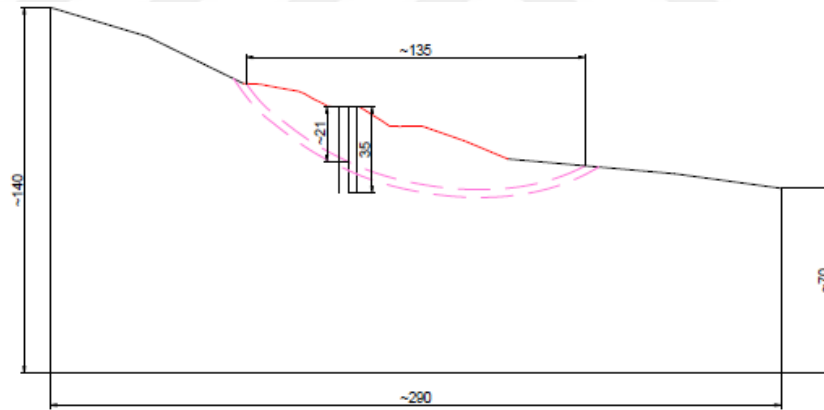


Şekil 4.1. T3 tüneli jeolojik kesiti.

aralıklarla olacak şekilde oluşturulan kazıklı sistemler ile analizler gerçekleştirilmiştir. 2 sıra ve 3 sıra kazık bulunan kazıklı sistem durumlarında kazıkların kesitteki aralıkları 3,6 metre seçilmiştir. Buna göre bu sistem üzerinden hareket ederek kazıklı tutucu yapıların davranışı değerlendirilmiş ve nihai duruma bu şekilde karar verilmiştir.

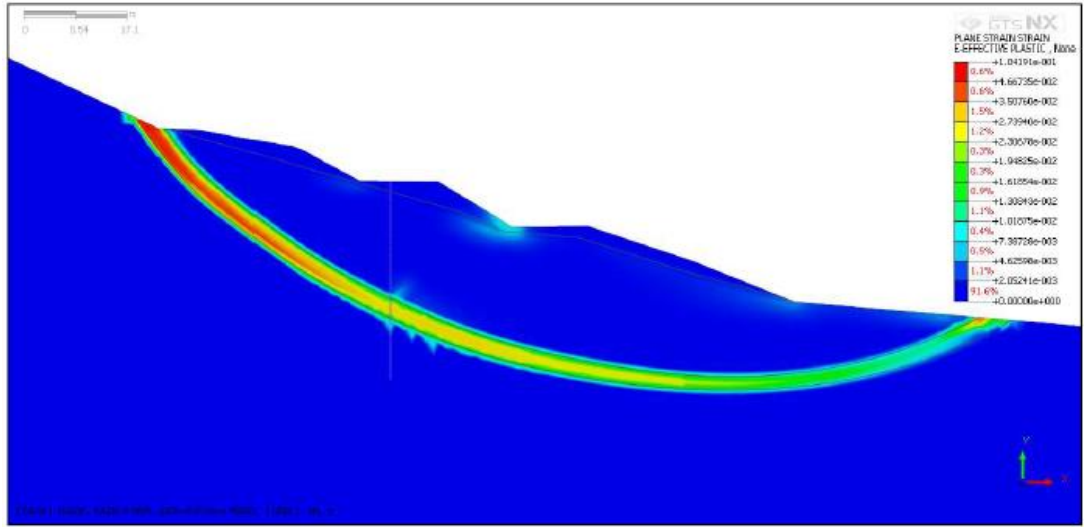
Olası kayma dairesinin olduğu kesim heyelan zonu olarak değerlendirilmiş ve bu heyelan zonu 3 metrelik bir zayıf zemin tabakası olarak modellenmiştir. Bu aşamada öngörülen kayma dairesi esas alınarak yapılan geri analiz ile kaymanın gerçekleştiği yenilme zonunun dayanım parametreleri elde edilmiştir. Tasarlanan kazıklar bu heyelan zonunun 7-10 metre altına indirilmiş ve kazıklı sistemin stabilitesi kontrol edilmiştir.

Oluşturulan jeolojik modeller (Şekil 4.4) 2 Boyutlu sonlu eleman yöntemiyle analizler gerçekleştirilmiş, heyelan stabilitesinin sağlanabilmesi amacıyla tek sıra, çift sıra ve 3 sıralı fore kazık çözümleriyle analizler yapılmış, artçı depremlerin devam ettiği bölgede uygulanabilecek optimum tasarım belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Numerik analize esas alınan kesit.

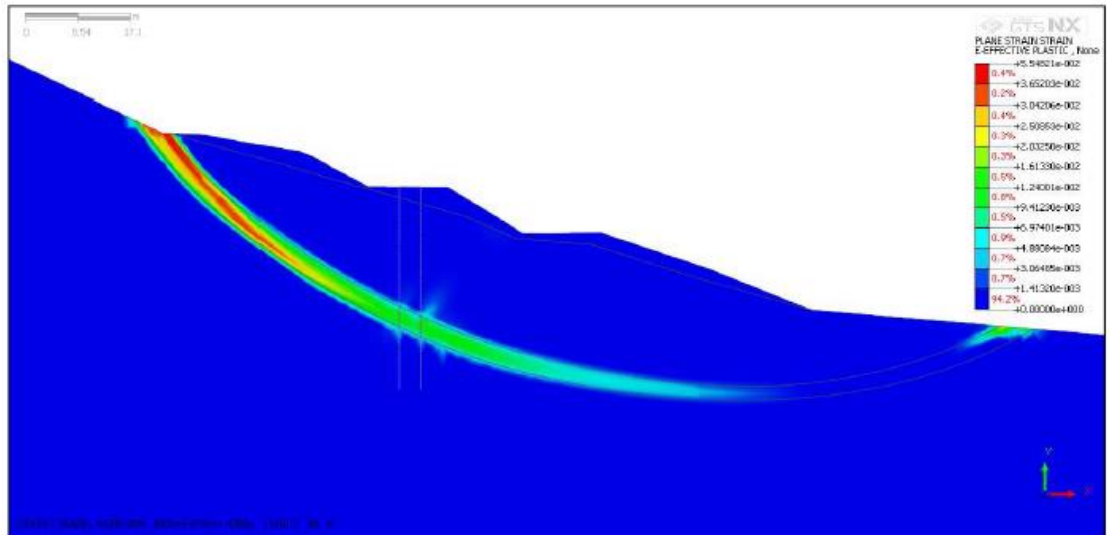
Sahada yapılan ölçümler ve topografya alımına göre heyelan bölgesinde oluşan taç noktasından heyelan yönünde yaklaşık 30 metre uzakta yerleştirilen 1 sıra, 120 cm çapında ve merkezden merkeze 140cm mesafeli kazıklar ile oluşturulan sistemin kaymaya karşı kontrolü yapılmıştır. Heyelan bölgesinde tek sıra kazık yapılması durumunda kazıklı sistemin stabil olmadığı ve zemin ile birlikte hareket edeceği görülmektedir (Şekil 4.5).



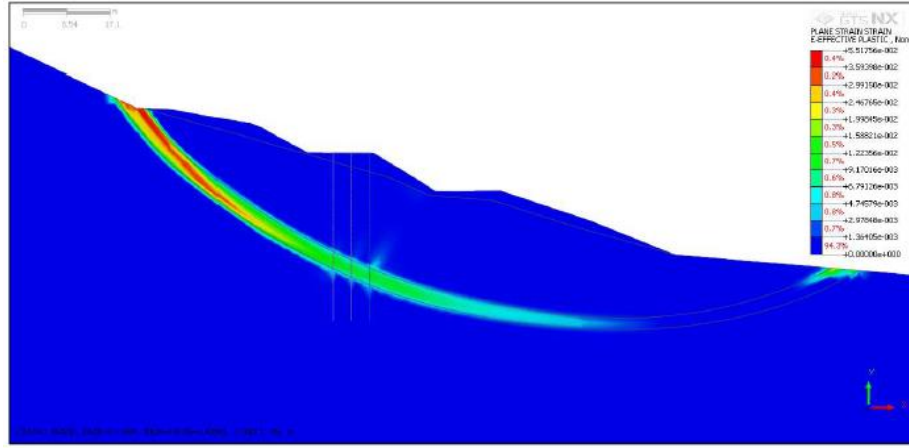
Şekil 4.5. Tek sıra kazıklı tutucu yapı ile toplam deformasyon davranışı.

Tek sıra kazıklı sistemde kayma zonundaki plastikleşen alanın fazlalığı sistemin zayıf stabiliteli olduğunu göstermektedir. Ayrıca buradan elde edilen kazık tesirlerine bakıldığında kullanılması gereken donatı miktarının da %2' nin üzerine çıktığı görülmektedir.

Çift sıra (Şekil 4.6) ve üç sıra (Şekil 4.7) kazıklı tutucu sistem yapılması durumları da ayrı ayrı analiz edilmiştir.

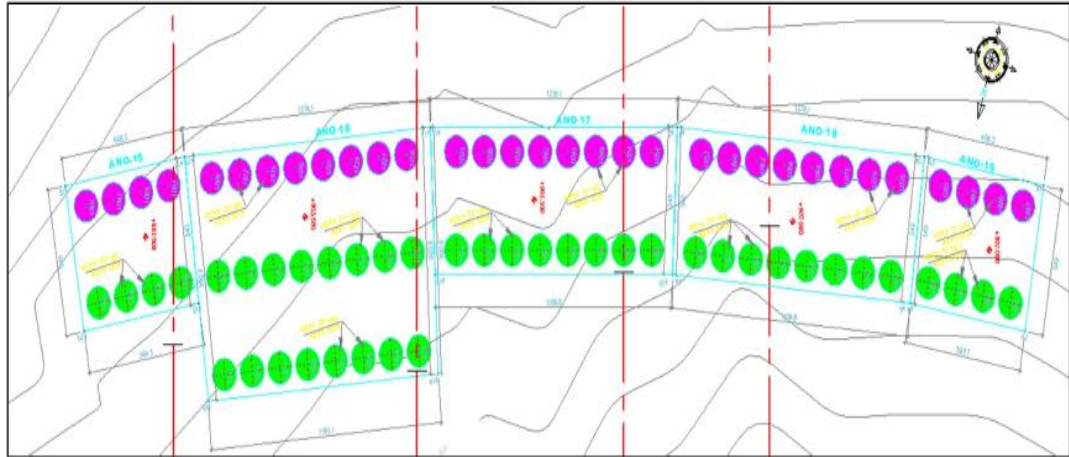


Şekil 4.6. Çift sıra kazıklı tutucu yapı ile toplam deformasyon davranışı.



Şekil 4.7. Üç sıra kazıklı tutucu yapı ile toplam deformasyon davranışı.

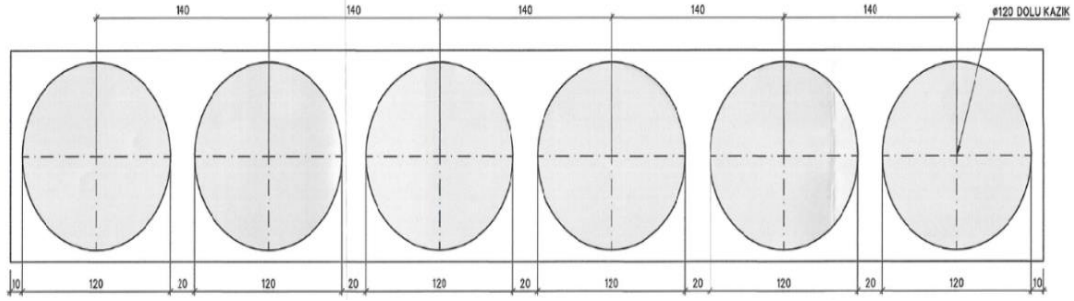
Üç sıra kazıklı sistemin çift sıra kazıklı sisteme kıyasla daha stabil olduğu görülmekle birlikte her iki sisteminde deformasyon davranışları benzerdir. Bu durum çift sıra kazıklı sistemin üç sıra kazıklı sisteme nazaran daha optimum sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu durumda bölgede depremlerin devam ediyor olması sebebi ile güvenli tarafta kalınarak, tünel çıkış portalı kesimine yakın olan bölgede fore kazıkların üç sıra, geri kalan kesimlerde çift sıra olacak şekilde ve toplamda 5 ano, 72 adet ve 35 metre boyunda projelendirilmesine karar verilmiştir (Şekil 4.8).



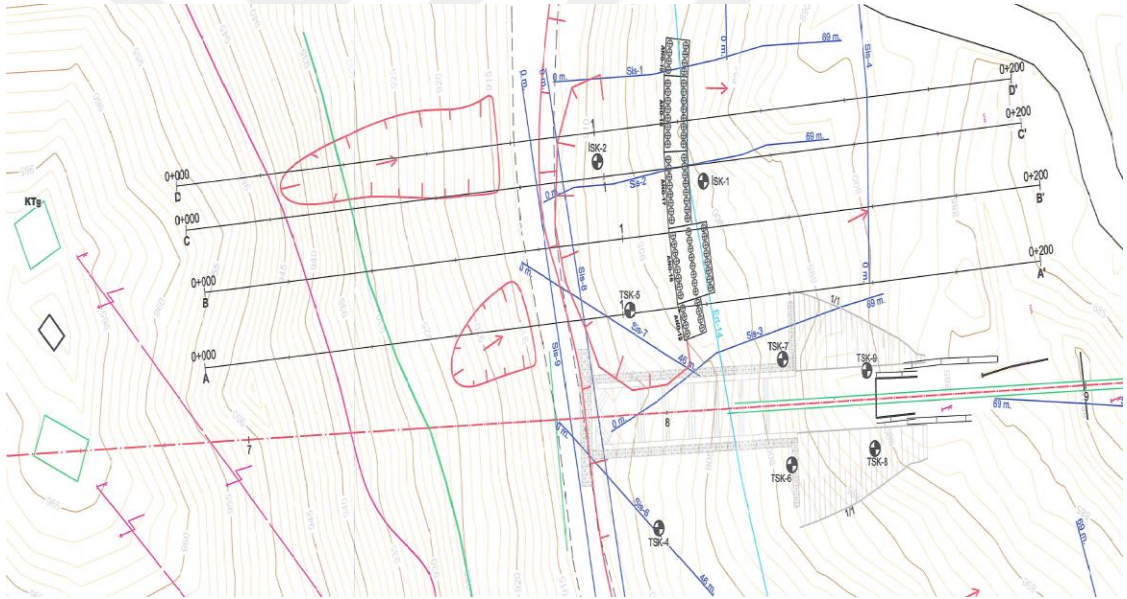
Şekil 4.8. Heyelan ıslah kazıkları yerleşim planı.

Kazıklar hareket doğrultusunda merkezden merkeze 3.6 metre aralıklı, heyelan hareketine dik yönde ise merkezden merkeze 1.4 metre aralıklarla yerleştirilerek, kazık sisteminin heyelan hareketinin önüne duvar niteliğinde destek olması hedeflenmiştir.

Kazıklar birbirine 1.5 metre kalınlığında radye başlık ile bağlı olacak şekilde tasarımı yapılmıştır (şekil 4.9). İnceleme alanına ait heyelan kazıkları eklenmiş planı aşağıda yer almaktadır (şekil 4.10).

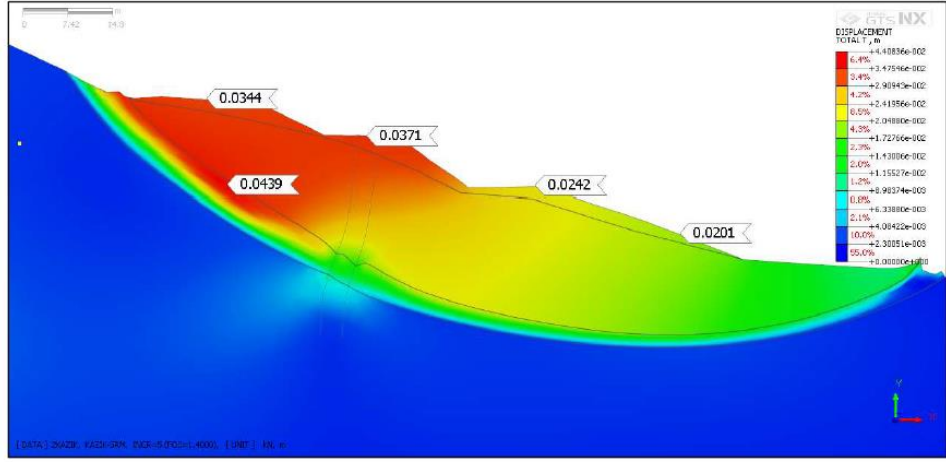


şekil 4.9. Heyelan kazıkları kesiti.



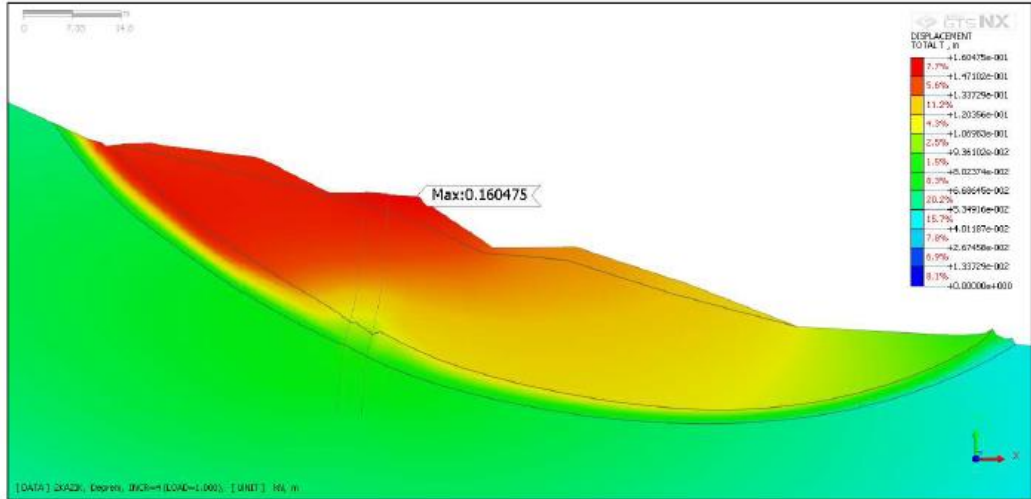
şekil 4.10. İnceleme alanının heyelan kazıkları eklenmiş planı.

Kazıklı sistemin heyelan mekanizmasını durdurmaya yönelik çalıştığı, kazıklar üzerinde oluşan tesirlerin davranışından da anlaşılmaktadır. Heyelan yönüne doğru bakıldığında ilk sıra kazıklar basınca karşı daha az çalışırken, ikinci sıra kazıkların basınca daha çok çalıştığı görülmüştür (şekil 4.11).



Şekil 4.11. Heyelan kazıkları sonrası deformasyon durumu.

Bu durum beklenen ve istenen bir durumdur. Çift sıra kazıklı tutucu yapı her ne kadar geçici olarak tasarlanacak olsa da bölgenin depremselliği ele alındığında depremli durumun da değerlendirilmesine karar verilmiştir. Bu durumda yüzeyde oluşan deformasyonların 16 cm seviyelerine ulaştığı görülmüştür (Şekil 4.12). Bu değer kabul edilebilir limitler içerisinde yer almaktadır.



Şekil 4.12. İslah sonrası depremli durum toplam deformasyon davranışı.

Sahada imalatlar projesinde belirtilen şekilde sorunsuz bir şekilde tamamlanmıştır. Gerek imalatlar esnasında gerekse imalatlar sonrasında deformasyon okumaları ile sürekli takip edilmiş herhangi bir olumsuzluk ile karşılaşılmamıştır.

4.2 T3 Tüneli Rehabilitasyon Çalışmaları

Kahramanmaraş depremlerinin ardından T3 Tünelinin fay hattı tarafından kesilmesiyle oluşan göçük ve deformasyonlu bölgenin geçilerek demiryolu hattının ulaşımına açılması amacıyla 3 aşamalı bir yol izlenmiştir. İlk aşamada göçük ile gevşeyen ve stabilitesini kaybeden bölge yüzeyden enjeksiyon ile güçlendirilmiş, ardından heyelanlı bir bölgede kalan tünel çıkış portalı imalatları tamamlanmış ardından ise tünel imalatlarına başlanmıştır.

4.2.1 Tünel üzeri mühendislik çözümleri

Tünelde göçüğün geçilmesi adına oluşturulan bu üç aşamalı planda öncelik tünel üzerinden imalatların yapılarak tünel içerisinde yapılacak çalışmaların daha sağlıklı şekilde yürütülmesidir. Bu kapsamda yapılacak çalışmalar tünel üzeri ve tünel içinde olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmıştır. Tünel üzerinden yapılacak enjeksiyon imalatı ile gevşeyen ve stabilitesini kaybeden bölgenin güçlendirilmesi, yapılacak kazıklı aç-kapa ve portal yapısı ile de oluşabilecek heyelanın önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

4.2.1.1 Tünel üzeri enjeksiyon

Beton enjeksiyonu tünelcilikte yaşanan sorunların ardından sıklıkla başvurulmuş bir iyileştirme yöntemidir (Tacim ve diğ., 2023). Amaç belli bir basınç ile çimento bazlı karışımlarla zeminin güçlendirilmesi ve varsa boşlukların doldurulmasıdır.

T3 Tünelinde DAFZ tarafından kesilerek göçüğün yaşandığı bölgede oluşan boşluklarının doldurularak kıltaşı, silttaşı aralanmalı birimin konsolidasyonunun sağlanması amacıyla enjeksiyon planı oluşturulmuştur (Şekil 4.13). Eğimli bir arazide yapılacak olan yüzey enjeksiyonları 1.5 m aralıklarla, tünel taban kotunun altına inecek şekilde 30-47 m arasında değişen 5 kademede toplamda 318 adet kuyu için planlanmıştır (Şekil). Oluşturulan enjeksiyon modelinde enjeksiyon dalgileri kilit önem taşımaktadır. Bu nedenle delgi sırasında boşlukla karşılaşılmazsa 1/1 (çimento/su) oranında olacak şekilde planlanmıştır. Hedef basınç 10 bardır. Bu orana ulaşılmazsa 7/5 (çimento/su) oranına geçilmesi planlanmıştır. Şayet enjeksiyon dalgileri sırasında boşlukla karşılaşılırsa %50 kum+7/5 (çimento/su) karışıma

[illegible]

Şekil 4.13. Tünel üzeri enjeksiyon kuyuları.

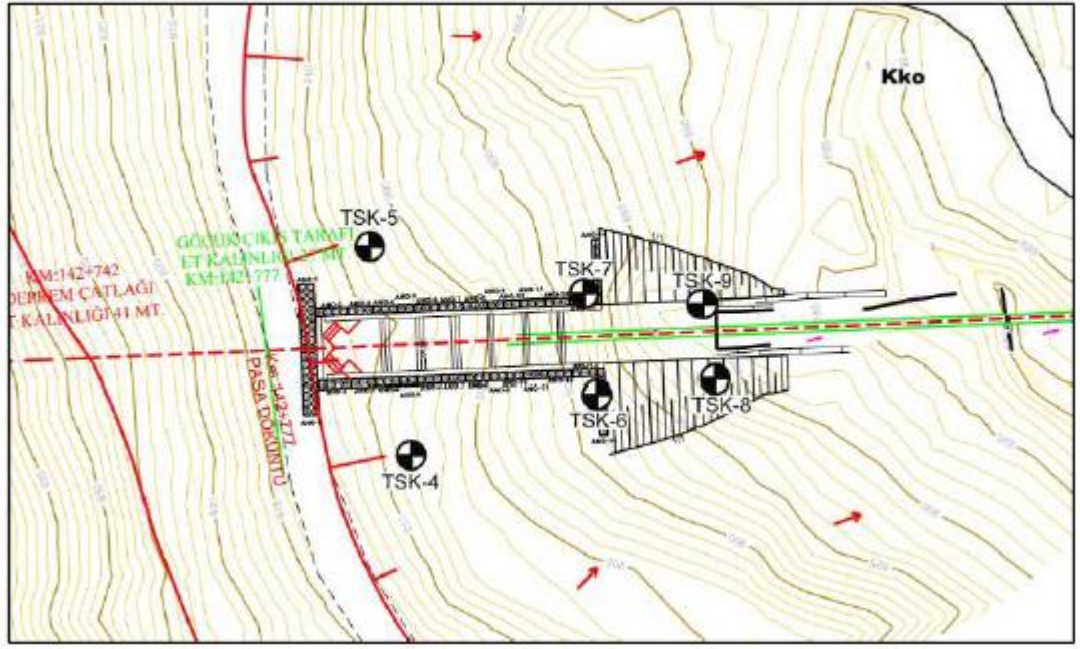
50



Şekil 4.14. Tünel üzeri enjeksiyon imalat fotoğrafları.

4.2.1.2 Tünel çıkış portal yapısı tasarımı

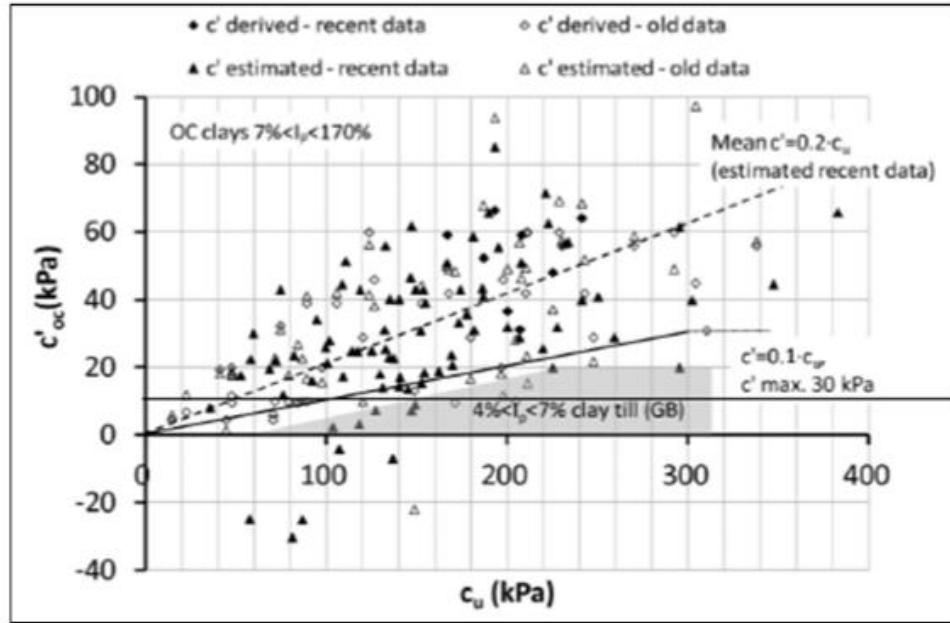
T3 Tüneli çıkış portal kesimine yakın bölgede meydana gelen göçük, portal üzerinde var olan heyelan durumları da değerlendirildiğinde, tünel çıkış portal yapısının aç-kapa ile uzatılmasına karar verilmiştir. Jeolojik ve jeoteknik çalışmalar kapsamında ise öncelikle saha gözlemlerine dayalı olarak jeolojik plan oluşturulmuştur. Daha sonra tünel çıkış portal bölgesinde açılmış sondajlar (Şekil 4.15) yardımı ile çıkış portal kesiminde yapımı planlanan aç-kapa yapısına ait kritik bölgelerin jeolojik enkesitleri çıkarılmıştır. Saha ve laboratuvar çalışmalarının sonucunda elde edilen veriler, kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında ve de dayanım parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 4.15. T3 Tüneli çıkışı aç-kapa yapısı sondaj lokasyonları.

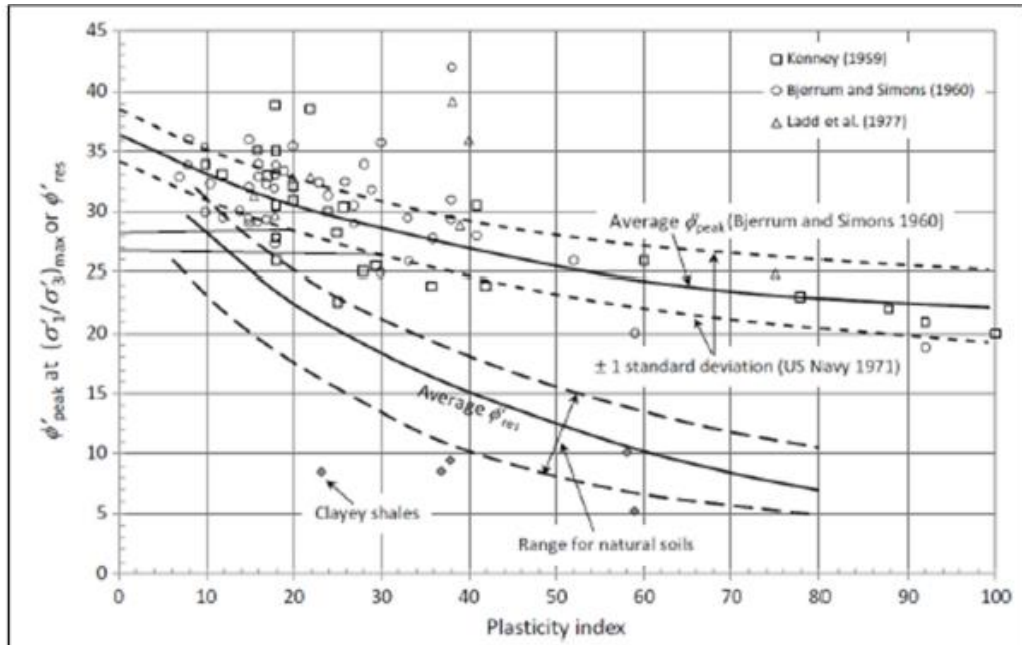
Muhtemel aç-kapa yapısı düşünülerek yapılan sondajlardan elde edilen veriler doğrultusunda aç-kapa kazıları yapılacak kesimde serpantin, şeyl ve kilaş birimler bulunduğu görülmektedir. Bu birimler mavimsi gri-gri renkli, çok-tamamen ayrılmış, çok aşırı derecede zayıf dayanımlı ve parçalanmış olup gözlenebilen süreksizliklerin yüzeyleri düz-kaygan, kil dolguludur. Üst seviyelerde 3.50-12.50 metreler arası değişen kalınlıkta kahve-gri-yeşilimsi renklerde, katı-sert kıvamlı, nemli, düşük-yüksek plastisiteli, siltli, ince-iri taneli kumlu, yarı köşeli-köşeli, maksimum 4 cm boyutlarında, kilaş kökenli çakıllı, kumlu, siltli kil yer almaktadır.

Zeminin 5-6 metre seviyelerinde kumlu-çakıllı kil özelliğinin olduğu görülmektedir. Burada gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde plastisite indis değerinin 25-35% arasında değiştiği görülmüştür. Buna ek olarak TSK-4 kuyusunda alınan UD-1 numunesi ile gerçekleştirilen Üç Eksenli UU deneyinde Kumlu Kil zeminin mukavemet parametreleri $c=66\text{kPa}$, $\Phi = 2^\circ$ ölçülmüştür. Drenajlı değerler hesaplandığında ise $c=6\text{kPa}$, $f=27^\circ$ (Sorensen and Okkels, (2013)) bulunmaktadır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Efektif kohezyon değeri ile drenajsız kayma mukavemeti arasındaki ilişki (Sorensen ve Okkels, 2013).

Buradan Elastisite modülü ise $E_u = 30000 \text{ kPa}$ (Butler (1975), Poulos ve Small, (2000)) hesaplanmaktadır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Plastisite indeksi – efektif/rezidüel içsel sürtünme açısı grafiği (U.S. Navy, 1971 – Ladd et al. 1977).

Yapılan zemin sondajları neticesinde 5-6 metre seviyelerinden daha derinlerde aşırı ayrıışmış kıltaşı tabakası ile karşılaşılmasıdır. Yukarıda gösterilen sondaj karot sandıklarındaki numunelerden de anlaşılaçağı üzere numunelerin aşırı ayrıışmışlık nedeni ile kısmen killeştığı görülmektedir. Bu nedenle zeminin mukavemet parametreleri hesaplanırken hem kil hem de kıltaşı olarak ele alınması gerekmektedir. Tamamen ayrıışmış kıltaşı için laboratuvar deneyleri ve karot fotoğraflarından yararlanılarak Roclab yazılımı ile kaya parametreleri belirlenmiştir.

Zeminin GSI değeri 15, mi değeri 8 alınmıştır. Ei değerinin ise literatür araştırması neticesinde 5000Mpa alınmasına karar verilmiştir. Buna göre $c=35\text{kPa}$, $\Phi'=29$ olarak elde edilmiştir. Elastisite modülü ise (Daoud et al. (2017)) ve Hoek Brown sınıflaması ortalaması ile $E_u=95000\text{kPa}$ bulunmuştur.

Sonuç olarak numerik modeller hazırlanırken kullanılacak zemin-kaya birimler ve yapısal elemanlar aşağıda listelenmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Kullanılan zemin-kaya birimlerin mukavemet özellikleri.

	Heyelan Malzemesi	Kumlu-Çakıllı Kil	Kıltaşı
Elastisite Modülü, MPa	3	30	195
Kohezyon, c' , kPa	0	6	35
İçsel Sürtünme Açısı, Φ' , °	25	27	45
Birim Ağırlık, γ , kN/m ³	19	19	22

Bölgede yer alan Koçali Karmaşığına (Kko) ait birimler süreksizlik sıklığına bağlı olarak az geçirimli özelliktedir. Standart drenaj önlemleri alındığında yeraltı suyundan kaynaklı önemli bir problemle karşılaşılması beklenmemektedir. Söz konusu kesimde yapılan 6 adet sondaj kuyusundan ölçülen yeraltı suyu seviyeleri 1.00-6.30 metreler arasında değişmektedir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Sondajlarda ölçülen yeraltı suyu seviyeleri.

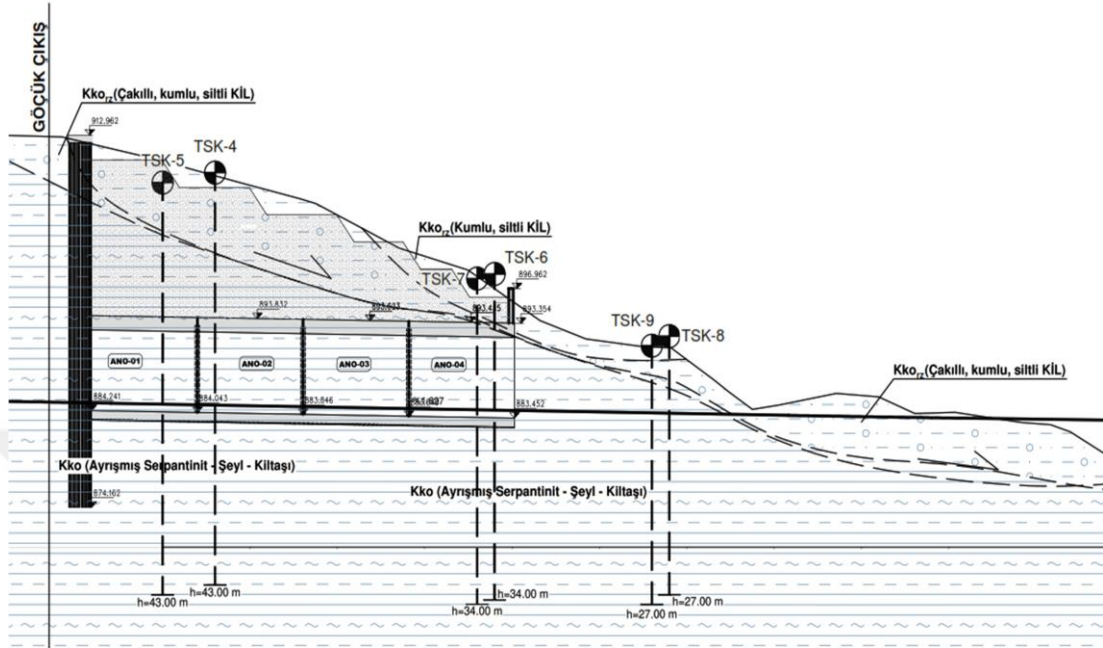
Sondaj No	Derinlik (m)	YASS (m)
TSK-4	43.00	3.40
TSK-5	43.00	1.00
TSK-6	34.00	2.15
TSK-7	34.00	2.28
TSK-8	27.00	6.30
TSK-9	27.00	5.00

Tünel aç-kapa yapısı üzerinde açılan TSK-4 ve TSK-5 nolu sondaj kuyularında tünel seviyesini de içine alan 30 metrelik kesimde, her iki metrede bir adet olacak şekilde, Basınçlı Su Testleri (BST) yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde elde edilen Lugeon değerlerinin tamamı 1,59 ile 4,23 arasında değişmekle birlikte birimlerin genel olarak az geçirimli oldukları görülmüştür (Şekil 4.18)

LUGEON	TANIM
<1	Geçirimsiz
1-5	Az Geçirimli
5-25	Geçirimli
>25	Çok Geçirimli

Şekil 4.18. BST sonuçları değerlendirilmesi.

Sondajlardan elde edilen veriler ışığında T3 Tüneli Çıkış kesimi yaklaşık olarak modellenmeye çalışmıştır (Şekil 4.19).



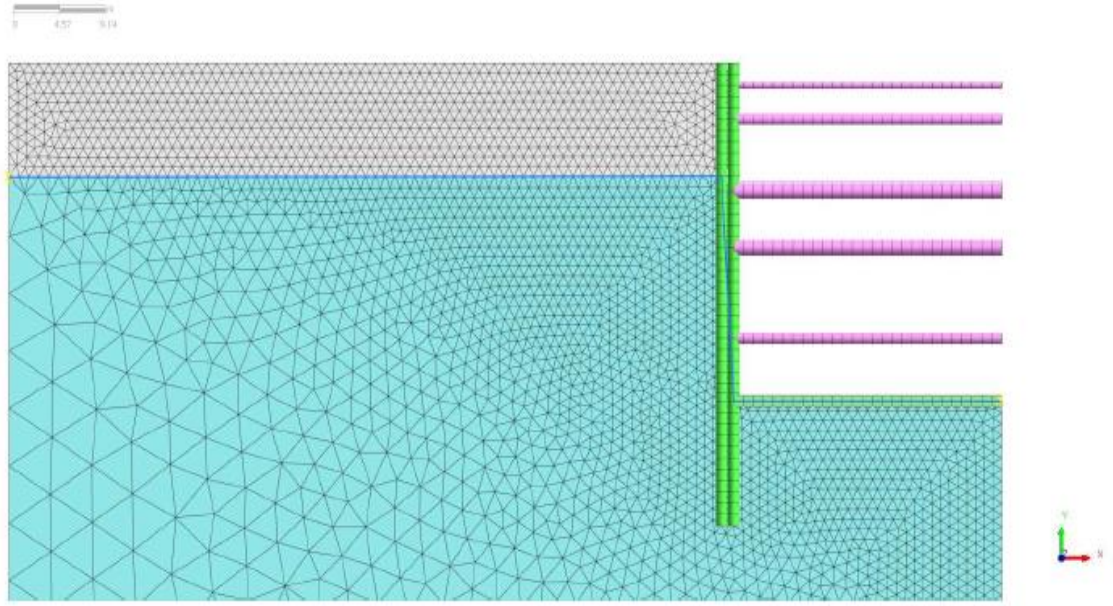
Şekil 4.19. T3 tüneli çıkışı heyelan kesimi jeolojik modeli.

Tünel imalatlarında giriş yapılarında genel bir yaklaşımla 1.5 çap tünel üzeri örtü kalınlığı istenmektedir. Bunu sağlamak için oluşturulan yapılar ise portal ya da giriş/çıkış yapısı olarak nitelendirilmektedir. Normalde tünel girişinde basamaklı bir şev tasarımıyla tünel portal yapısı oluşturulur ancak T3 Tüneli çıkışında Kahramanmaraş depremlerinin ardından tetiklenen paleo heyelanlar nedeniyle bölgenin yeniden tasarlanması zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu amaçla yaklaşık 48 m uzunluğundaki bölge 22.5 ile 38 metre arasında değişen derinliklerde 120 cm çapında fore kazıklarla desteklenmiştir. Fore kazık boyları hesaplanırken şeyl ve kilitaşı birimine oturması amaçlanmıştır.

Aç-kapa yapısı mevcut yüzey topografyası ele alınarak farklı ve seçilen kritik kesitler üzerinden tahkik edilmiştir (Şekil 4.20). Aşağıdaki plan görüntüsü uyarınca kritik kesitler aç-kapa yapısının aynası olarak ve aynanın önündeki strut kesimi olarak seçilmiştir. Bunlara ek olarak iksanın sonlandığı bölgede oluşturulacak şevin nedeniyle imal edilecek kazıkların arka kısmının boşalmasını engellemek üzere konsol

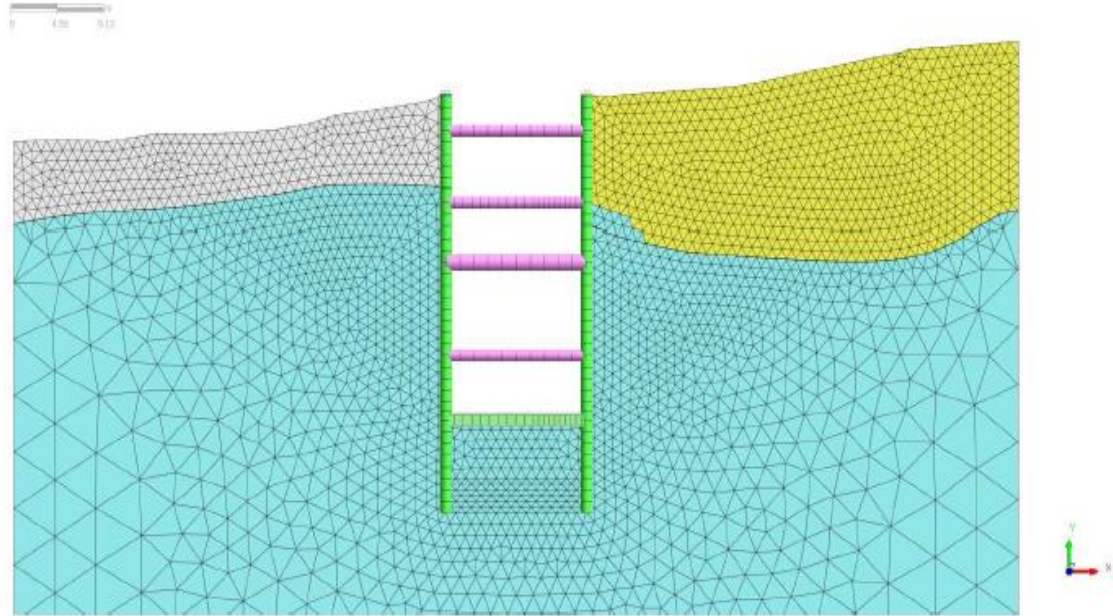
kazıklar tasarlanmıştır. Bu bölge de ayrı bir kesit olarak KESİT-3 adı ile analiz edilerek tasarlanmıştır.

Şekil 4.20. Aç-kapa yapısı kritik kesitler.



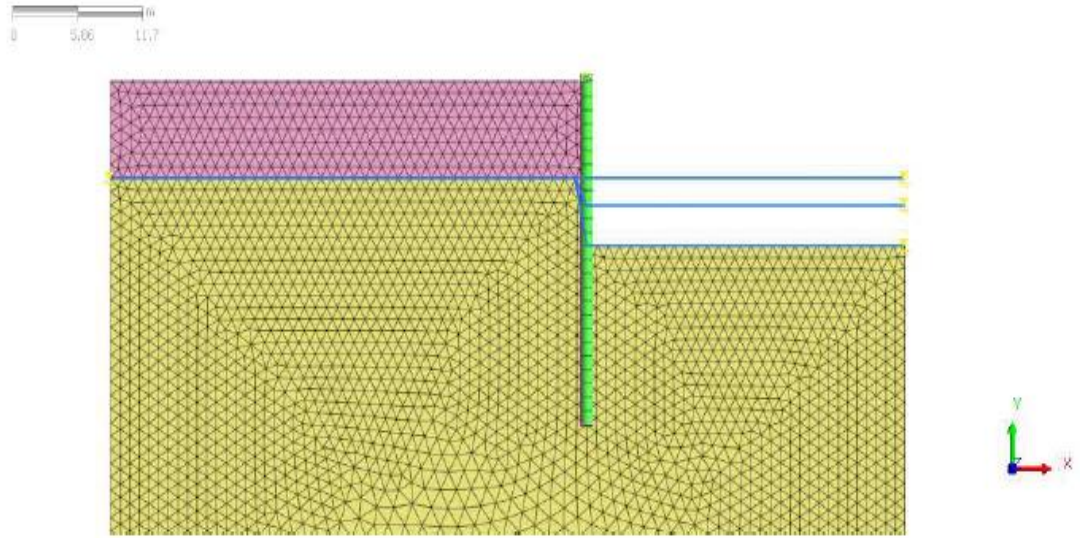
Şekil 4.21. Kesit-1 model görünümü – kazı sonu.

Kesit-2 kesiti aç-kapa yapısının son strut sırasından alınan kesittir. Burada kazıklar karşılıklı olarak modellenmiştir (Şekil 4.22). Tek sıra kazık kullanılacak olup, strutlar kazıklara göğüsleme kirişleri yardımı ile sabitlenecektir.



Şekil 4.22. Kesit-2 model görünümü – kazı sonu.

Kesit-3 kesiti aç-kapa yapısının son strut sırasından alınan kesittir. Bu kazık sırasının önündeki zemin şevli olarak şekillenecek olup, en yüksek konsol boyu en baştaki kazık için uygulanacaktır (Şekil 4.23). Sonrasındaki kazıklarda şev eğimine göre konsol boyu azalacaktır.



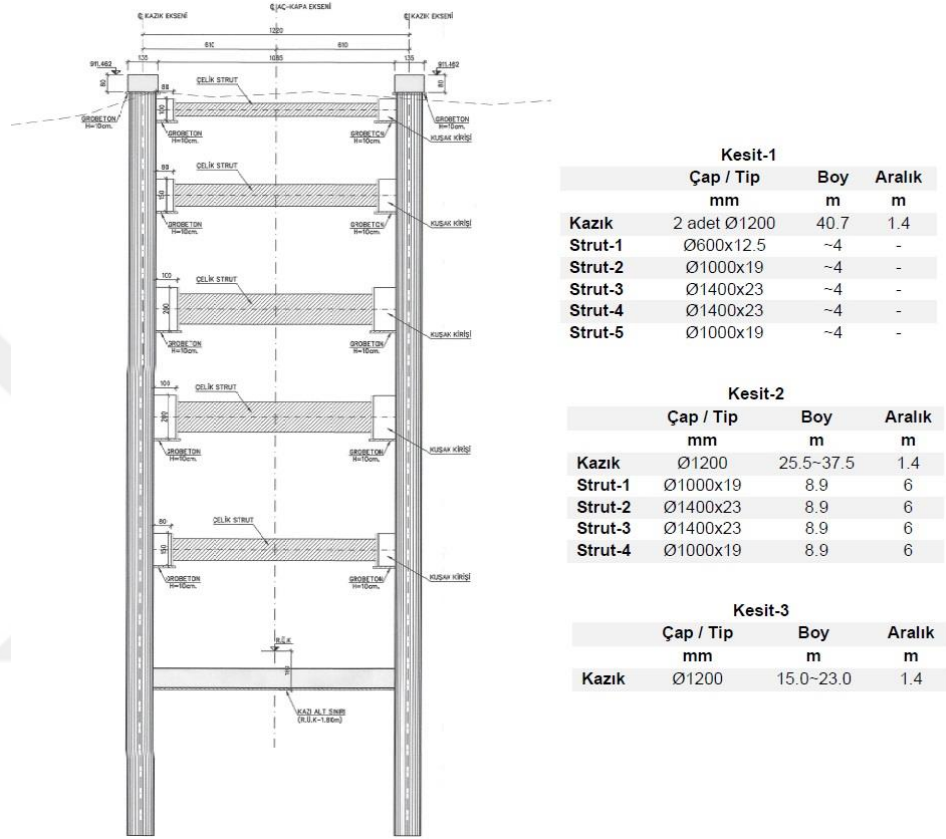
Şekil 4.23. Kesit-3 model görünümü – kazı sonu.

Yapılacak olan kazı aşamaları ve sonrasında iksa sistemi için her bir kesitte farklı inşaat aşamaları uygulanacaktır. Uygulanacak imalat aşamaları aşağıda yer alan Çizelge 4.3’ te verilmektedir. Buradaki amaç kesitlerde yükleme durumlarının en doğru şekilde uygulanmasıdır.

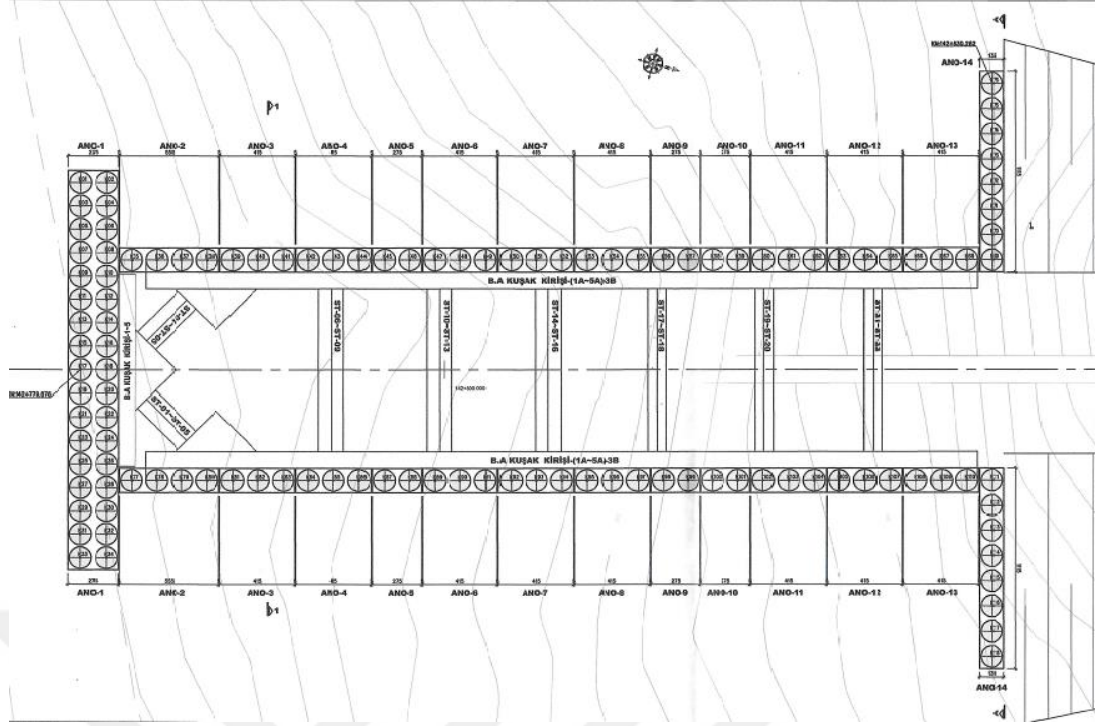
Çizelge 4.3. Tüm kesitlere ait inşaat aşamaları.

KESİT-1		KESİT-2		KESİT-3	
İnşaat Aşaması	Detay	İnşaat Aşaması	Detay	İnşaat Aşaması	Detay
S1	İlk Durum	S1	İlk Durum	S1	İlk Durum
S2	Kazık İmalatı	S2	Kazık İmalatı	S2	Kazık İmalatı
S3	Kazı	S3-S6	Kazı	S3-S14	Kazı
S4	Kazı + Strut – 1	S7	Kazı + Strut – 1		
S5-S6	Kazı	S8-S12	Kazı		
S7	Kazı + Strut – 2	S13	Kazı + Strut – 2		
S8-S12	Kazı	S14-S17	Kazı		
S13	Kazı + Strut – 3	S18	Kazı + Strut – 3		
S14-S17	Kazı	S19-S25	Kazı		
S18	Kazı + Strut – 4	S26	Kazı + Strut – 4		
S19-S25	Kazı	S27-S29	Kazı		
S26	Kazı + Strut – 5	S30	Kazı + Temel		
S27-S29	Kazı	S31	Strut – 4 Kaldırılması		
S30	Kazı + Temel				

Yukarıda verilen kesit ve inşaat aşamaları uyarınca proje kapsamında iksa analizleri gerçekleştirilmiştir. Her üç kesit içinde inşaat aşaması modellemesi yapılmış ve sonuçlar yine bu aşamalara göre elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kullanılacak strut boyları, adetleri ve çapları belirlenmiştir (Şekil 4.24). Strutlara ait palan gösterimi aşağıda verilmiştir (Şekil 4.25).

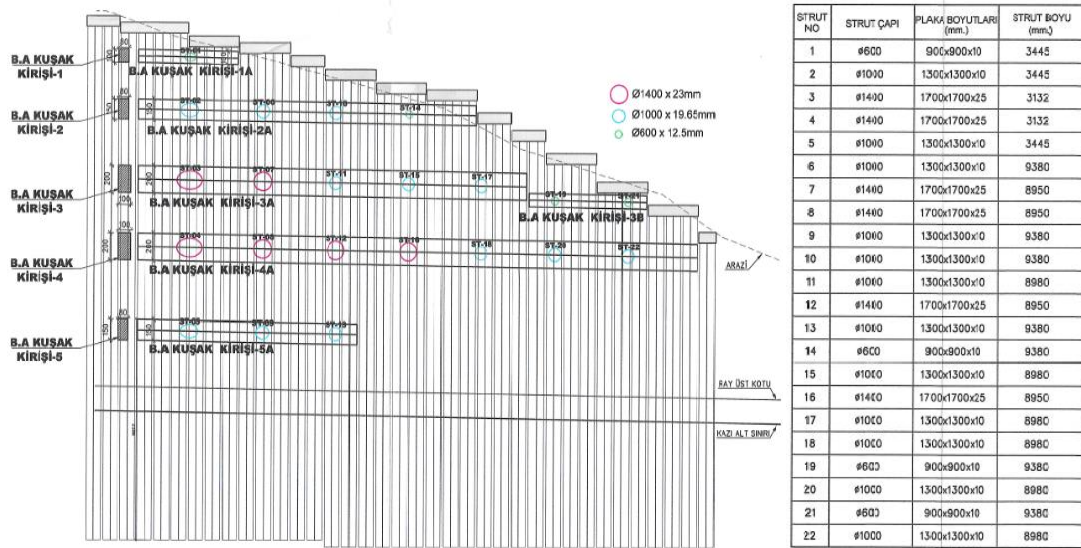


Şekil 4.24. Kesitlere ait yapısal elemanların özeti.



Şekil 4.25. Strutlara ait plan gösterimi.

Buna göre Aç-kapa yapısının sonundaki tünel aynasını oluşturacak bölüm en yüksek kazı bölgesini içermekte olup yaklaşık 30 metrelik kazı derinliğine sahiptir ve toplamda 5 strut ile desteklenmesi gerekmektedir. Ayna bölgesinin kazı sonunda tünelin açılması için kırılacak olması sebebi ile strutlar kenarlardan 45° açı ile bağlanacaktır. Kesit-2 olarak tariflenen bölge aç-kapa yapısının koridor kısmından alınmış en yüksek kesittir. Buradaki kazı yüksekliği ise 28 metre olup 1 tanesi geçici olmak kaydıyla toplam 4 strut ile desteklenmesi planlanmıştır. Kesit-3 bölgesi en sıkı bölge olup kazılacak derinlik 4,5 metre ile 12 metre arasındadır.



Şekil 4.26. Kazık eksenlerine göre boy profil ve strut detayları.

Yukarıda detaylı şekilde verilen portal yapısı aç-kapa imalatları, projesine uygun şekilde fore kazıkların yapımı ile imalatlara başlanılmıştır (Şekil 4.26). Kazık imalatları esnasında kazık yapılacak bölgede düzgün bir platformun oluşturulması ve yüzeyin tesviye edilmesi gerekmektedir. İmalatlar esnasında yeraltı suyu sebebi ile kuyularda göçme olması durumunda muhafaza borusu kullanılması da önem arz etmektedir. Tüm bu hususlar dikkate alınarak sahada heyelan önleme amaçlı fore kazık imalatlarına başlanılmıştır (Şekil 4.27).



Şekil 4.27. Heyelan tutucu kazık imalatları.

Heyelan tutucu kazık imalatlarının tamamlanmasından sonra başlık kirişleri dökülmüştür (Şekil 4.28).



Şekil 4.28. Kazıkların başlık kiriş imalatları.

Başlık kirişlerinin tamamlanmasından sonra ise birinci kademe aç-kapa kazısına başlanılmış ve ilk sıra strut montajları tamamlanmıştır (Şekil 4.29). Her strut imalatı öncesinde strut seviyesinin 1 metre altına kadar kazıya devam edilmiş, sonrasında ise strut ve kuşak kirişi imalatları tamamlanmıştır.



Şekil 4.29. Birinci kademe strutların montajı.

Birinci kademe strut montajlarının tamamlanmasından sonra yeninde kazıya başlanılmış ve kazı tamamlandıktan sonra ikinci kademe strut montajları gerçekleştirilmiştir. Montajı takiben kuşak kiriş betonları dökülmüştür (Şekil 4.30).



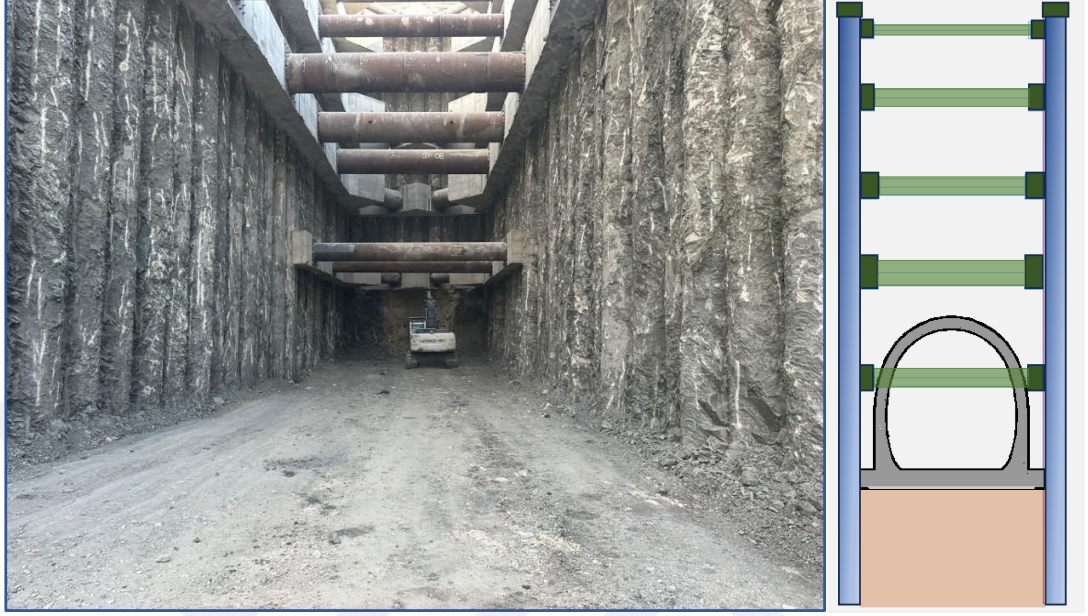
Şekil 4.30. İkinci kademe strutların montajı.

İkinci kademede yer alan strutların montajlarının da tamamlanması ile yine aç-kapa kazısına girilmiş ve kazının tamamlanması ile birlikte üçüncü kademe strut montajları başlamıştır. Montaj sonrası kuşak kiriş betonları dökülmüştür (Şekil 4.31).



Şekil 4.31. Üçüncü kademe strutların montajı ve kuşak kiriş betonlarının dökümü.

Üçüncü kademe strut montajları ve kuşak kiriş betonları da döküldükten sonra yeniden kazı imalatına girilmiş ve kazı imalatının tamamlanmasından sonra dördüncü sıra imalatlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.32).



Şekil 4.32. Dördüncü sıra strutların montajı.

Dördüncü kademe imalatların tamamlanması ile beşinci ve son kademe, aynı zamanda tünel çıkış aynasını da içine alan bu kademede de strut montajları tamamlanarak kuşak kiriş betonları dökülmüştür (Şekil 4.33).



Şekil 4.33. Beşinci sıra strutların montajı ve aç-kapa temel betonunun dökülmesi.

Beşinci kademe strut montajları ve kuşak kiriş betonlarının dökülmesinden sonra tabana grobeton dökülerek aç-kapa donatıları bağlanmış ve akabinde aç-kapa temel betonu dökülmüştür (Şekil 4.33).

T3 Tüneli portal aç-kapa yapısı için belirlenen parametrelere göre zemin yapısı, zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği açısından yapının temel sistemi, taşıma gücü, oturma vb. yönleri değerlendirilmiş ve temel tasarımı yapılmıştır.

Zemine oturan yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi hesaplanırken Mayerhof Taşıma Gücü Teorisi kullanılmıştır. Temel boyutları B=11.0 metre, L=12.1 metredir. Yapı boyunca gömülme derinliği değişmekte olup maksimum Df=29 metre, minimum Df=13 metredir. B=11.0 metre enindeki yüzeysel temele etkiyecek yükler, temel altından 2B=22.0 metre derinlik tarafından karşılanacaktır. Jeolojik profil incelendiğinde portal temel yapısı zemininin ayrışmış kıltaşı birime oturduğu görülmektedir. İlgili derinlikte ayrışmış kıltaşı birime göre yapılan yüzeysel temel için taşıma gücü hesaplarında kısa dönem zeminin emniyetli taşıma gücü 1003,7 kPa, uzun dönem zeminin emniyetli taşıma gücü (Statik Durumda) 2307,0 kPa ve uzun dönem zeminin emniyetli taşıma gücü (Sismik Durumda) 3460,5 kPa olarak bulunmuştur. Hesaplanan bu taşıma gücü değerleri statik durumda kısa ve uzun dönem için 416 kPa, deprem durumu içinse 723 kPa değerinin üzerinde olması nedeniyle taşıma gücü problemi beklenmemektedir.

Aç-kapa yapısı konsolidasyon oturma hesaplarında ise hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

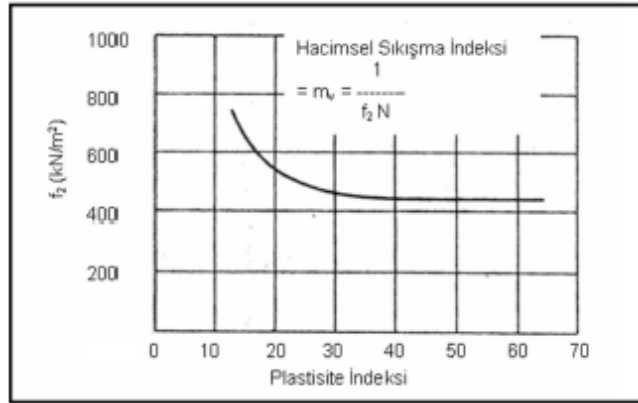
$$S_c = m_v \times H \times \Delta\sigma' \quad (4.1)$$

m_v = Hacimsel sıkışma katsayısı,

H = Sıkışabilir tabaka kalınlığı,

$\Delta\sigma'$ = Tabaka üzerindeki efektif gerilme artışı.

Burada m_v değeri tahmini için Stroud (1974) tarafından önerilen ve PI ile SPT- N_{60} değerleri cinsinden verilmiş olan ampirik ilişki kullanılmıştır (Şekil 4.34).



Şekil 4.34. SPT- N_{60} değeri ve hacimsel sıkışma indisi ilişkisi (Stroud 1975).

Aç-kapa yapısı temelinin oturduğu ayrılmış kilaşı birimlerde SPT- N değerleri refü olarak tanımlandığından temel tabanında konsolidasyon oturması beklenmemektedir.

Temelin taşıma gücü ve oturma açısından değerlendirilmesinden sonra bir diğer önemli husus sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesidir. Bilindiği üzere sıvılaşmanın oluşması için belli şartların sağlanması gerekir. Sıvılaşan zeminler incelendiğinde temiz kumların potansiyel olarak sıvılaşabilir olduğu uzun zamandan beri bilinmektedir. İri daneli ve çakıllı zeminlerin davranışı tekrarlı sismik yükler altında, kumların bu yükler altındaki davranışından çok fazla farklılık göstermez ve potansiyel olarak sıvılaşabilirler. Ancak bu tip zeminler daha ince daneli kumlu zeminler ile karşılaştırıldığında davranış olarak iki önemli farklılık gösterirler. Bunlardan ilki daha geçirimli olduklarından sismik yükleme sırasında oluşan tekrarlı boşluk suyu basıncı daha çabuk dağılabilmektedir. İkincisi ise oluşumları sırasında iri ve ağır kütleli danelerinden dolayı çok nadiren gevşek depozitlenme karakteri göstermektedirler. Söz konusu temel yapısı için yapılacak sıvılaşma analizlerinde sıvılaşma kriterleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'de belirtilmiş olan aşağıdaki şartlara göre belirlenmiştir.

-Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak tanımlanmaktadır (TBDY 2018),

-Yeraltı su seviyesi > numune derinliği olması durumunda sıvılaşma potansiyeli yok,

-Düzeltilmiş SPT vuruş sayısının ($N_{1,60}$) 30 darbe / 30 cm değerinden büyük olduğu durumlarda zemin sıvılaşma potansiyeli yok,

-PI >12 olması durumunda sıvılaşma potansiyeli yok,

-Kil içeriği %20'den fazla ve plastisite indisinin %10'dan yüksek olduğu kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyeli yok,

-İnce dane yüzdesinin %35'den fazla olması ve düzeltilmiş SPT vuruş sayısının ($N_{1,60}$) 20 darbe/30 cm yüksek olduğu kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyeli yok.

Belirtilen şartlar doğrultusunda, yapılan arazi etüt ve gözlemleri ile laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler incelendiğinde, kil birimler için $PI > 12$ ve ayrıışmış kiltası birimler için $SPT-N_{60} > 30$ olduğundan dolayı sıvılaşma potansiyeli bulunmamaktadır.

Tüm bu hususlar dikkate alınarak aç-kapa temel yapısının tasarımı belirlenmiş ve projesi hazırlanmıştır. Ortaya konulan tasarım sonrası imalat aşamalarında da başlıca dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. Ortaya konulmuş model ne kadar doğru olursa olsun imalat esnasında metodolojiye dikkat edilmemesi durumunda sahada istenmeyen olaylarla karşılaşılması kaçınılmazdır. Kesit-1 bölgesinde temel imalatı yapıldıktan sonra tünel ayna kesimine denk gelen kazıkların üzerinden tünel hizasına kadar dolgu yapıp tek sıra kazıklar kırılmalı (Şekil 4.35), sonrasında kendinden delgili sürenler çakılmalı (Şekil 4.36) ve sürenlerin çakılmasından sonra aynada yer alan 2. sıra kazıkların kırılımı yapılarak tünel imalatlarına bu şekilde başlanılmalıdır. Tüm bu adımlar sahada özenle uygulanmış ve tünel imalatlarına sorunsuz bir şekilde başlanılmıştır.



Şekil 4.35. Tünel çıkış kesimine denk gelen kazıkların kırımı.

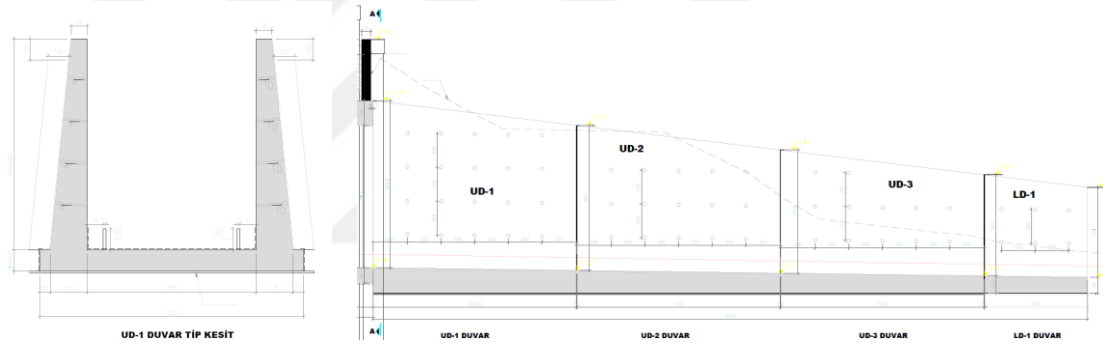


Şekil 4.36. Çıkış aynası kendinden delgili süren imalatı.

Tünel kazı destekleme imalatlarının tamamlanmasından sonra bu kesimde aç-kapa betonlarının dökülmesi planlanmıştır (Şekil 4.37). Kazı destekleme imalatları tamamlanır tamamlanmaz aç-kapa betonları dökülmüş, her iki yandan istinat duvarları uzatılmış (Şekil 4.38) ve tünel çıkış portalı imalatlar tamamlanarak daha güvenli hale getirilmiştir (Şekil 4.39).



Şekil 4.37. T3 tüneli aç-kapa yapısı ve istinat duvarı betonlarının dökülmesi.



Şekil 4.38. Aç-Kapa yapısı U duvar tip kesiti.



Şekil 4.39. Aç-Kapa yapısı ve istinat duvarı tamamlanmış hali.

4.2.2 Tünel içi mühendislik çözümleri

Tünelde göçüğün geçilmesi adına oluşturulan planlamada tünel üzeri imalatların tamamlanmasından sonra sıra tünel içerisinden yapılacak imalatlara gelmiştir. Bu kapsamda göçüğün geçilmesi esnasında kullanılacak olan tünel destek sisteminin tasarımı yapılmış ve akabinde imalatlara başlanılmıştır.

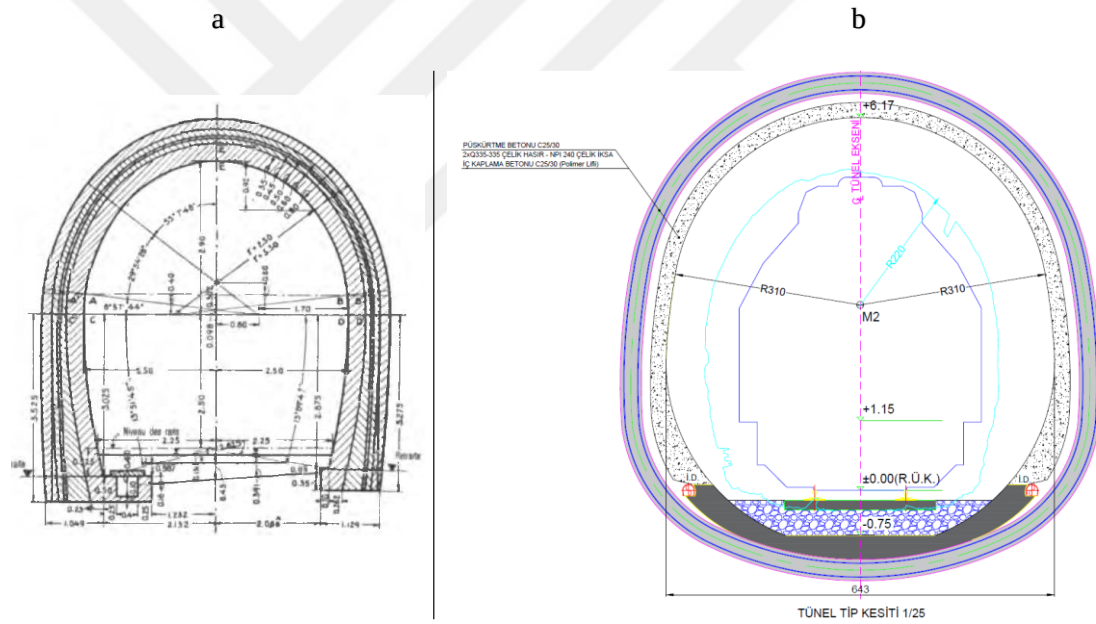
4.2.2.1 Tünel destek sistemi tasarımı

Tünel imalatlarında jeolojik koşullarında etkisi ile yüksek deformasyonlar veya tahkimatta yenilmeler neticesinde göçüklerin yaşanması olağan bir durumdur. Oluşan göçüğün geçilmesi ve tünelin yeniden açılabilmesi için göçük mekanizmasının iyi anlaşılması ve modellenmesi büyük önem arz etmektedir. Tam anlamıyla ortaya çıkarılamayan göçük mekanizması ya da sahayı temsil etmeyen bir modellemeye göre

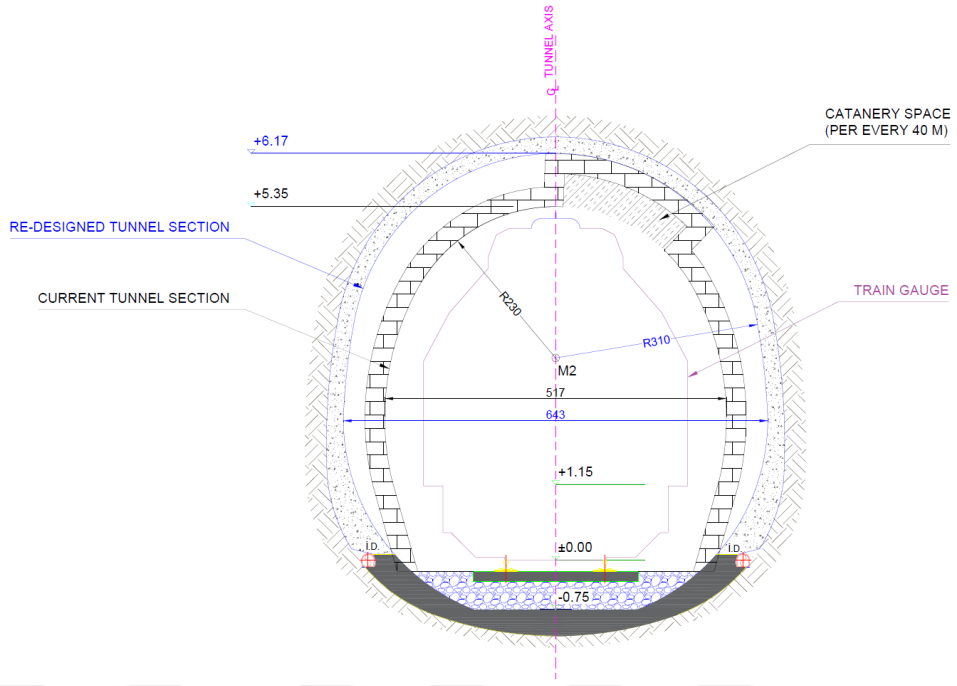
özüm yapılması ve tasarım belirlenmesi yine aynı sorunların ortaya çıkmasına sebebiyet vermesi kuvvetle muhtemeldir.

T3 Tünelinde meydana gelen göçük sonrası yapılan tüm araştırma ve etüt çalışmaları ile göçük mekanizması ortaya konulmuş, çalışılacak model tam anlamıyla sahayı temsil edecek şekilde oluşturulmuş ve tasarım bu hususlara dikkat edilerek yapılmıştır. Göçük ile kapanan demiryolu hattının yeniden demiryolu standartlarına uygun şekilde, uygun kesit boyutlarına ve geometriye getirilmesi gerekmektedir.

T3 Tünelinde, Tünelin geometrisi tasarlanırken mevcut tünel kesitlerinde iyileştirmeye gidilerek tünel yarıçapı arttırılmıştır (Şekil 4.40). Eski tünel kesiti ile yeni tünel kesitinin çakıştırılmış halinde de görüleceğı üzere tünel (Şekil 4.41) genişliğı 5.17 cm ‘ den 6.43 cm’ e, yüksekliğı ise 5.35 cm’ den 6.17 cm’ e revize edilmiştir.



Şekil 4.40. T3 Tüneli mevcut (a) ve yeni (b) tünel geometrisi.



Şekil 4.41. T3 tüneli eski-yeni tünel kesitlerinin çakıştırılmış hali.

Tünel destek sistemlerinin belirlenmesinde ampirik yöntemler, analitik yöntemler ve sayısal yöntemler olmak üzere temel olarak 3 ana yaklaşım vardır. Ampirik yöntemler kaya kütlesi sınıflandırma sistemlerini içerir. Terzaghi'nin kaya yük faktörü sınıflandırmasını içeren öncü çalışmasından bu yana çeşitli kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri geliştirilmiştir. Kaya kütlesi derecelendirmesi (RMR) ve NGI tünel açma kalite indeksi (Q) dünya çapında en çok uygulanan ve kabul edilen sistemlerdir. RMR sınıflandırması 1973 yılında eklemlili kaya kütlesi sınıflandırma sistemi olarak önerilmiş ve 1989 ve 2014 yıllarında büyük revizyonlar yapılmıştır. Q-sistemi 1974'te geliştirildi ve karakterizasyon ve sınıflandırmada büyük değişiklikler 1993 ve 2002'de önerildi. Q sistemi, sert ve eklemlili kaya kütleleri için tünel açma senaryolarına dayanarak geliştirilmiştir. Her iki sınıflandırma sistemi de yüksek gerilimli eklemlili kaya kütlelerindeki tünel destek tasarımı için uygun değildir ve bu, bu sistemlerin dayandığı verilerin sınırlılığıdır. Analitik yöntemler çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Analitik yöntemlerde ortamın homojen ve izotrop olduğu kabul edilir. Başka bir deyişle, tüm çalışmalar idealleştirilmiş bir ortamda gerçekleştirilmektedir. Ancak uygulama aşamasında tünelin içinden geçtiği birimler izotrop ve homojen değildir. Bu nedenle analitik çözümlerin sınırlamaları vardır.

Sayısal analiz yöntemleri tünel destek sistemlerinin belirlenmesinde kullanılan başlıca yöntemlerdir. Destek sistemlerinin belirlenmesinde uygulamaya ve tecrübeye dayalı kararlar esastır ve sayısal analizler pratik kararlara yol gösterici olarak değerlendirilebilir. Bazı sayısal modelleme yöntemleri sonlu elemanlar yöntemi, ayrık elemanlar yöntemi ve sonlu farklar yöntemidir. Bu yöntemler arasında sonlu elemanlar yöntemi anizotropik ve doğrusal olmayan ortamlar için en başarılı yöntemlerden biridir.

Sayısal analizlerde 2 farklı kritik kesit belirlenmiştir. Göçüğün bulunduğu ve en yüksek örtü kalınlığının olduğu kilometre seçilmiş, arazi çalışmaları, sondajlar ve jeofizik etütler kullanılarak jeolojik model oluşturulmuştur. Tünelin bulunduğu bölgenin göçük bölgesi olması nedeniyle güçlü bir destekleme öngörülmüştür.

Afet Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nın 18 Mart 2018 Resmi Gazete' de yayınlanan "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği" esasları dikkate alınmıştır. Yönetmeliğin 16.4 numaralı bölümünde verilen zemin sınıflandırma sistemine göre incelenecek bölgenin enlem ve boylamında kısa periyot için 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan spektral ivme (g)- S_{DS} belirlenerek D2 deprem düzeyi için eşdeğer deprem ivmesi katsayısı k_h elde edilmiştir. Ayrıca D1 deprem düzeyi içinde hesaplamalar yapılmıştır.

$$k_h = 0.5 (0.4)S_T \quad (4.2)$$

Burada S_{DS} değeri kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı olarak ifade edilir ve hazırlanacak bu proje kapsamında bölgenin zemin sınıfı, enlem ve boylam değeri belirlenerek <http://tdth.afad.gov.tr> adresinden elde edilmiştir. S_T ise topoğrafik büyütme katsayısını göstermektedir ve yönetmeliğin 16.13.10 numaralı bölümünde tanımlanmıştır. Tünel yapısı için topoğrafik büyütme katsayısı $S_T=1$ olarak değerlendirilmiştir. Yatay yönde alınan eşdeğer ivme katsayısıyla birlikte düşey yönde yataya göre 1/2 oranında ivme değeri hesaplanmıştır.

$$k_v = 1/2 k_h \quad (4.3)$$

2020 Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliğine göre (Çizelge 4.4);

Çizelge 4.4. Deprem yer hareketi düzeyi.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi	Normal Risk Sınıfı (RS-1)		Yüksek Risk Sınıfı (RS-2)	
	Performans Hedefi	Hesap/Tasarım Yöntemi	Performans Hedefi	Hesap/Tasarım Yöntemi
DD-2a (144 yıl)	Kesintisiz Kullanım	A-Tipi	-	-
DD-2 (475 yıl)	-	-	Kesintisiz Kullanım	B-Tipi
DD-1 (2475 yıl)	Kontrollü Hasar	B-Tipi	Sınırlı Hasar	C-Tipi

Deprem verilerinin yanı sıra proje bölgesinin aktif faylara uzaklığı ve arazi eğim durumuna göre deprem yüklerinde artırımı gidilmektedir.

Faya uzaklık durumu belirlenirken;

$$\delta_F = 1.2 \quad L_F \leq 15km \quad (4.4)$$

$$\delta_F = 1.2 - 0.02(L_F - 15) \quad 15km < L_F \leq 25km \quad (4.5)$$

Denklemleri kullanılmıştır. Burada L_F fay düzlemine olan dik mesafeyi (km) göstermektedir. Söz konusu proje kapsamında yapılan analizlerde faya olan dik mesafe 15 km olarak ölçülmüş olup bu durumda $\delta_F = 1,20$ bulunmuştur. Elde edilen veriler $k_h = 0.5 (0.4S_{DS})S_T$ denkleminde kullanıldığında $k_h = 0,691$ olarak bulunmuştur. Kullanılan deprem sismik yükleri ITA sismik tasarım kılavuzunda belirtilen örtü yüklerine karşılık gelen çarpan ile azaltıldığı durumda (Şekil 4.42);

$$k_h = 0.691 \times 0.8 = 0.553$$

$$k_v = 0.227 \text{ olarak bulunmaktadır.}$$

Tünel Derinliği (m)	Tünel Derinliğine Göre Zemin Hareketinin Yüzeye oranı
≤6	1.0
6-15	0.9
15-30	0.8
>30	0.7

Şekil 4.42. Deprem yükü azaltma katsayıları.

Kaya sınıflama sistemlerinden olan Q veya NGI (Norwegian Geotechnical Institute) sistemi olarak bilinen bu sistem, Barton vd. (1974) tarafından geliştirilmiştir. Sistem uzun yıllar kullanıldıktan sonra, sistemin, destek sistemlerinin seçimine yönelik bölümü, Grimstad ve Barton (1993) tarafından revize edilmiştir (Ulusay, 2001). Buna göre hesaplanması gereken Q değeri için aşağıda verilmiş 6 parametrenin saptanması gereklidir. Bu parametreler;

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

Q Kaya Kütlesi değeri, bu parametrelerin sayısal karşılıklarının belirlenmesinden sonra aşağıdaki formülde yerlerine konularak hesaplanır.

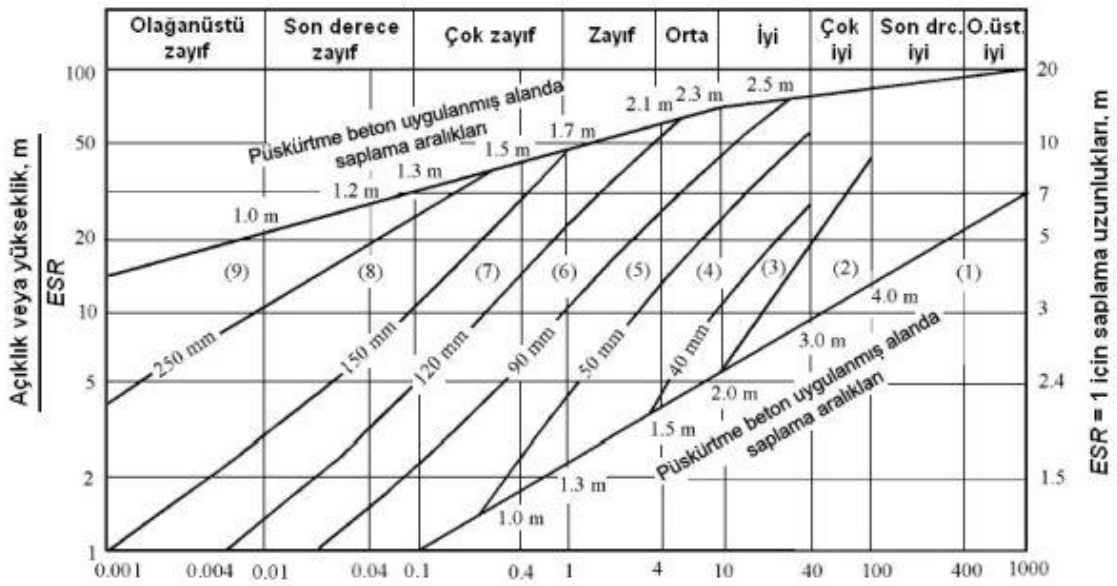
$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (4.6)$$

Bu eşitlikte, (RQD/J_n) oranı göreceli (relatif) olarak kaya bloklarının boyutlarını, (J_r/J_a) oranı göreceli olarak sürtünme dayanımını, (J_w/SRF) oranı ise göre olarak suyun, fayların, dayanım-gerilim oranının, sıkışma ve şişmenin (kabarmanın) etkisini temsil etmektedir. Barton ve diğerleri (1974) tarafından verilen Q kaya kütlesi tanımlama sisteminde Q değerlerine bağlı olarak 9 kaya kütlesi tanımlanmıştır (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. Q sistemine göre kaya kütlesi sınıflaması.

Olağanüstü İyi Kayaç	Q=400-1000	A1
Son Derece İyi Kayaç	Q=100-400	A2
Çok İyi Kayaç	Q=40-100	A3
İyi Kayaç	Q=10-40	B
Orta Kayaç	Q=4-10	C
Zayıf Kayaç	Q=1-4	D
Çok Zayıf Kayaç	Q=0.1-1	E
Son Derece Zayıf Kayaç	Q=0.01-0.1	F
Olağanüstü Zayıf Kayaç	Q=0.001-0.01	G

Yine aynı şekilde Q sınıflama sistemi için 9 farklı destekleme türü tanımlanmıştır (Şekil 4.43).



- ## DESTEK TİPLERİ

- 1) Tahkimatsız
- 2) Lokal bulonlama
- 3) Sistematik bulonlama
- 4) 40-100 mm desteksiz püskürtme beton
- 5) Lifiyle güçlendirilmiş püskürtme beton, 50-90 mm, saplama
- 6) Lifiyle güçlendirilmiş püskürtme beton, 90-120 mm, saplama
- 7) Lifiyle güçlendirilmiş püskürtme beton, 120-150 mm, saplama
- 8) Lifiyle güçlendirilmiş püskürtme beton, >150-90 mm, püskürtme beton ve saplama ile desteklenmiş
- 9) Dökme beton kaplama

Şekil 4.43. Q sistemine göre destekleme tipleri.

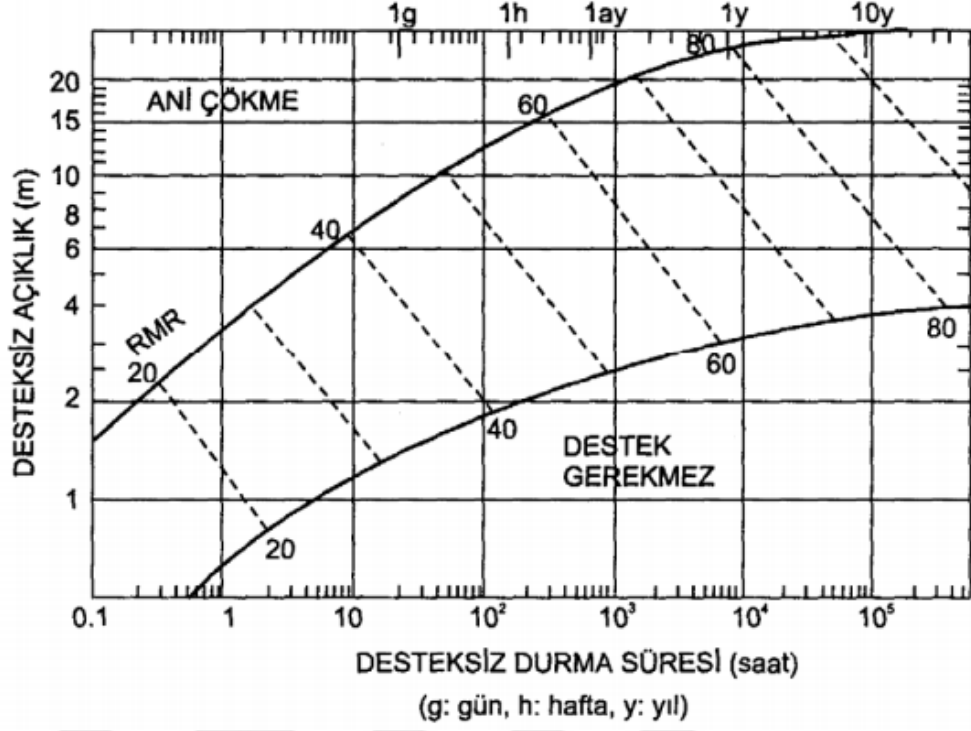
Q kaya sınıflandırma sisteminde, destek elemanlarının Q değeri aralığına bağlı olarak verilen açıklıklarda uygulanmasını öngörmekle birlikte tünelin desteksiz durma süresine ilişkin ayrıntılı veri içermemektedir. Tünel tasarımlarında Q ve RMR kaya sınıflama sistemlerini birbirini bütünler bir şekilde kullanılmaktadır. RMR sınıflama sistemi, başta tünel, galeri, yeraltı odaları gibi yeraltı açıklıklarının kazısı olmak üzere çok sayıda alanda uygulanmaktadır. Bu kaya kütlesi sınıflama sisteminden başlıca üç önemli veri elde edilmektedir (Sönmez ve Ulusay, 2002).

1-Tüm jeolojik parametrelerin ortak etkilerinin yansıtıldığı ve kaya kütlesinin genel koşullarıyla ilişkili “kaya kütlesi kalitesi” elde edilen verilerin başında gelmektedir. Bu veri çalışılan alan genelinde kaya kütlesi koşullarının karşılaştırılmasına veya kaya kütlelerinin çok iyi kayadan çok zayıf kayaya kadar tanımlanarak farklı kalitedeki kütlelerin sınıflarının belirlenmesini sağlamaktadır (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. RMR kaya sınıflaması özet tablosu.

RMR KAYA SINIFI BELİRLENMESİ					
RMR Değeri	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 21
Sınıf No	I	II	III	IV	V
Nitel Tanım	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Kaya Kütlesinin Kohezyonu (KPa)	> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
Kaya Kütlesinin İçsel Sürtünme Açısı ϕ	> 45	35 – 45	25 – 35	15 – 25	< 15

2- Bu sınıflama sisteminden elde edilen diğer önemli bir veride, bir kılavuzdan yararlanılarak kaya kütlesi kalitesi ve kazı yöntemine göre ön tasarım amacıyla destek türlerinin seçimidir. Sistem, bu kılavuzla birlikte her kaya sınıfı için; kaya yükü, desteksiz kalma süresi, desteksiz açıklık boyutu vb. gibi parametrelerin tahminine olanak sağlar (Şekil 4.44).



Şekil 4.44. RMR kaya kütle sınıflamasına göre tahkimatsız durma süresi-tavan açıklığı arasındaki ilişki (Bieniawski 1989).

3-RMR sisteminin sağladığı olanaklardan bir diğeri de RMR puanının kullanılarak kaya kütesinin bazı mühendislik özelliklerinin tahmin edilebilmesidir (Şekil 4.45).

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE DEĞERLENDİRMELERİ									
Parametre			Değer Aralığı						
1	Som Kayanın Dayanımı	Nokta Yük Dayanımı	> 10 MPa	4 - 10 Mpa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Bu aralıkta tek eksenli basınç dayanımı yeğlenir.		
		Tek Eksenli Basınç Dayanımı	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Değerlendirme		15	12	7	4	2	1	0
2	Sondaj Karot Niteliği (RQD) Değerlendirme		90% - 100% 20	75% - 90% 17	50% - 75% 13	25% - 50% 8	< 25% 3		
3	Eklem Aralıkları Değerlendirme		> 2 m 20	0.6 - 2 m 15	200 - 600 mm 10	60 - 200 mm 8	< 60 mm 5		
4	Süreksizliklerin Durumu (Bkz E)		Çok Pürüzlü Süreksiz Kapalı Taze Eklem Yüzü	Az Pürüzlü Açıklık <1mm Az Ayrışmalı Eklem Yüzü	Az Pürüzlü Açıklık <1mm Çok Ayrışmalı Eklem Yüzü	Cıralı Yüzler veya Dolgu < 5mm veya Açıklık 1-5mm Sürekli	Yumuşak dolgu >5mm veya Açıklık >5mm Sürekli		
	Değerlendirme		30	25	20	10	0		
5	Yeraltısu	Tünelin Her 10m' si için su akımı (l / dk)	Yok	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Eklem Suyu Basıncı) / (Asal Gerilim)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Genel Durumlar	Bütünüyle Kuru	Nemli	Islak	Damlama-Sızıntı	Akıntı		
	Değerlendirme		15	10	7	4	0		
B. SÜREKSİZLİKLERİN KONUMU İÇİN DEĞER DÜZELTME									
Eklemlerin Doğrultu ve Eğimi			Çok Uygun	Uygun	Orta	Olumsuz	Çok Olumsuz		
Değerlendirme	Tüneller		0	-2	-5	-10	-12		
	Temeller		0	-2	-7	-15	-25		
	Şevler		0	-5	-25	-50	-60		
C. TOPLAM DEĞERLENDİRMEDE KAYA SINIFI BELİRLENMESİ									
Değerlendirme			100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21		
Sınıf No			I	II	III	IV	V		
Nitel Tanım			Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya		
D. KAYA SINIFLARININ NİCELİK ANLAMI									
Sınıf No			I	II	III	IV	V		
Ortalama Kendini Tutma Süresi			15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	2.5 m açıklık için 10 sa.	1 m açıklık için 10 dak.		
Kaya Kütlesinin Kohezyonu (KPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Kaya Kütlesinin İçsel Sürtünme Açısı			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. SÜREKSİZLİKLERİN DURUMUNA ÖZGÜ SINIFLAMA KILAVUZU									
Süreksizlik Uzunluğu			< 1m 6	1 - 3m 4	3 - 10m 2	10 - 20m 1	> 20m 0		
Açıklık			Yok 6	< 0.1mm 5	0.1 - 1.0mm 4	1 - 5mm 1	> 5mm 0		
Pürüzlülük			Çok Pürüzlü 6	Pürüzlü 5	Az Pürüzlü 3	Pürüzsüz 1	Cıralı Yüzlü 0		
Dolgu			Yok 6	Sert Dolgu<5mm 4	Sert Dolgu>5mm 2	Yumuşak D.<5mm 2	Yumuşak D.>5mm 0		
Ayrışma			Taze 6	Az Ayrışmalı 5	Orta Ayrışmalı 3	Çok Ayrışmalı 1	Bütünüyle Ayrışmalı 0		
F. SÜREKSİZLİKLERİN DOĞRULTU VE DALİMİNİN TÜNEL AÇIMINA ETKİLERİ									
Doğrultu Tünel Eksenine Dik					Doğrultu Tünel Eksenine Paralel				
Dalım Yönünde İlerleme Dalım 45-90°			Dalım Yönünde İlerleme Dalım 20-45°		Dalım 45-90°		Dalım 20-45°		
Çok Uygun			Uygun		Çok Uygun		Orta		
Dalıma Karşı İlerleme Dalım 45-90°			Dalıma Karşı İlerleme Dalım 20-45°		Doğrultudan Bağımsız Dalım 0-20°				
Orta			Olumsuz		Orta				

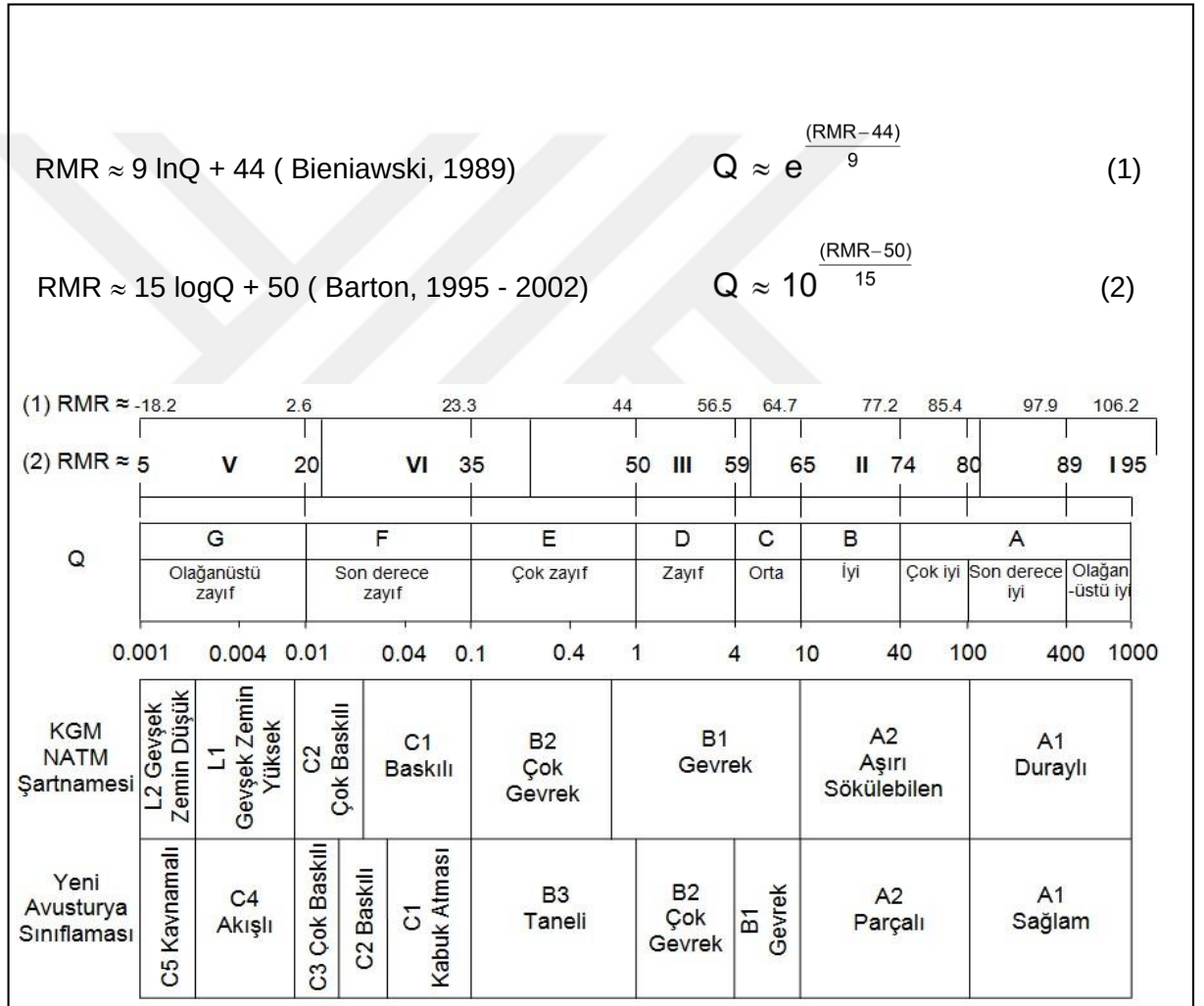
Şekil 4.45. RMR kaya sınıflaması puanlama sistemi.

Q ve RMR değerleri arasında Bieniawski (1989) ve Barton (1995) tarafından ayrı ayrı ilişki belirlenmiştir. Bu ilişkiler ve bu ilişkilerin karşılaştırması aşağıda verilmiştir (Şekil 4.46).

$$RMR \approx 9 \ln Q + 44 \text{ (Bieniawski 1989)} \quad Q \approx e^{\frac{(RMR-44)}{9}} \quad (4.7)$$

$$RMR \approx 15 \log Q + 50 \text{ (Barton 1995)} \quad Q \approx 10^{\frac{(RMR-50)}{15}} \quad (4.8)$$

şeklindedir.



Şekil 4.46. Q, RMR ve NATM sınıflandırmalarının karşılaştırması.

Bieniawski (1989) tarafından geliştirilen RMR sisteminde tüneller için iki önemli sınırlama vardır. Bunlar, tünel yüksekliğinin en fazla 10 metre ve tünel şeklinin at nalı olmasıdır (Çizelge 4.7). Ancak birçok araştırmacı, bu sınıflama sistemini dairesel kesitli tünellere de uygulamışlardır.

Çizelge 4.7. RMR’ a göre tüneller için destekleme sistemleri (Bieniawski, 1976).

DESTEK (TAHKİMAT)				
KAYA KÜTLE Sİ SINIFI	Kazı	Kaya saplamaları (*) (10,00 m genişlikteki tünel için uzunluk)	Püskürtme beton	Çelik Destek
I	Tam kesit, 3 m ilerleme			
II	Tam kesit, 1,0 – 1,5 m ilerleme, komple destek, Aynaya 20 m mesafede	Kemerin her 2 – 3 m' sinde yer yer saplama, tel kafeslerle 2 - 2,5 m aralıklı	Gerektiğinde tavan kemerinde 50 mm	Yok
III	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme Tavandan 1,5 – 3 m ilerleme, Komple destek, Aynaya 10 m mesafeye kadar gerekli	3 – 4 m uzunlukta sistematik saplamalar, kemerde tel kafesli duvarlar ve kemerde 1,5 – 2 m aralıklı	Tavan kemerinde 50 – 100 mm, yan duvarlarda 30 mm	Yok
IV	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme, Tavandan 1,0 – 1,5 m ilerleme, kazıya uygun şekilde aynaya 10'm mesafeye kadar gerekli destek	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1 - 1,5 m aralıklı, 4 - 5 m uzunlukta sistematik saplama	Tavan kemerinde 100 – 150 mm ve yan duvarlarda 100 mm	Gereken yerde 1,5 m aralıklı yer yer hafif profiller
V	Tavan ve tabanda birlikte ilerleme, Tavandan 0,5 – 1 m ilerleme, kazıyla birlikte destek yerleştirilmeli, Patlatmadan hemen sonra püskürtme beton uygulanmalı	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1 - 1,5 m aralıklı, 5 m uzunlukta sistematik saplama	Tavan kemerinde 150 – 200 mm, yan duvarlarda 150 mm, aynada 50 mm	Çelik iksalı, 0,75 m aralıklı orta – ağır profiller
(*) 20 mm çaplı tamamen reçine dolgulu				
Tünel şekli: At nalı , İnşaat : Delme ve patlatma, Genişlik 10 m, Düşey gerilim < 25 MPa				

NATM Kaya Sınıflandırma Sistemi ise bütünüyle tünel açımı sırasında yapılacak gözlem ve deplasman ölçümlerine dayanır dolayısı ile bu anlamda bir yapım aşamasının sınıflamasıdır. NATM sınıflamasının yapıma yönelik niteliklerini, tasarım aşamasında kullanmak için, görelî düzlemde yapılan kaya sınıflamalarının (Q-RMR) karşılaştırması aşağıda Çizelge 4.8’ de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. NATM kaya sınıflaması ile Q ve RMR değerleri karşılaştırması.

NATM Sınıflandırması	Kaya Türü ve Açıklamalar	NATM Sistemine Karşılık Gelen Q Değer Aralığı	NATM Sistemine Karşılık Gelen RMR Değer Aralığı
A1	A- DURAYLI – SONRADAN AZ SÖKÜLEN KAYA KÜTLELERİ: Bu sınıfta yer alan kaya kütleleri genellikle duraylı olup, elastik davranış gösterirler. Yersel iksa uygulanmaması durumunda, yerçekimi nedeniyle, yer yer sığ göçükler oluşabilir. Göçükler genellikle izole olmuş, önemsiz eklem yapıları nedeniyle oluşur. Elastik deplasmanlar hızla azalır.	1000 – 70,4	100 – 80
A2		70,4 – 10,0	80 – 65
B1	B- GEVREK KAYA KÜTLELERİ: Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin davranışları, yapısal kenetlenme ve/vaya çekme dayanımı azlığından dolayı, hızlı ve gevşemeye ve ayrılmaya yatkındır. Hemen hemen tüm çevrede, boşluk çevresinde ikincil gerilmeler, kaya kütlelerinin dayanımını biraz aşmakta, bununla beraber bu zayıflık içerilere ulaşmamaktadır. İksa yapımının gecikmesi halinde artan çökmeler oluşur.	10,0 – 4,0	65 – 58
B2		4,0 – 1,47	58 – 47
B3		1,47 – 0,11	47 – 29
C1	C- BASKILI KAYA KÜTLELERİ: Bu sınıfta yer alan kaya kütlelerinin davranışları genellikle, kaya basıncının yeniden dağılım süreci ve /veya deplasman sınırlamaları sonucunda oluşan gerilmelerin kaya dayanımından daha büyük olduğunu gösterir. Kaya kütleleri aşırı gerilme altında kalmasından dolayı, kabuk atma, burulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zayıflık mekanizmaları oluşur. Çatlamaya veya dökülmeye eğimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenlere sahip kaya kütleleri bu gruba girer. Bu gruba giren kaya kütleleri, davranış ve kendini tutma süreleri, su sızıntılarından olumsuz yönde önemli ölçüde etkilenir.	0,11 – 0,03	29 – 20
C2		0,03 – 0,016	20 – 15
C3		0,016 – 0,008	15 – 10
C4		0,008 – 0,002	10 – 5
C5		0,002 – 0,001	5 – 2,5

Yeraltında açılan bir boşluğun çevresindeki kaya ortamı, kazı yüzeyine uygulanacak göreceli olarak hafif bir destekleme ile oldukça etkili bir şekilde yük taşıyabilir bir eleman haline dönüştürülebilir. Bu husustan yola çıkarak bir tünel kazısının, çevresindeki kaya ortamı tarafından maksimum derecede desteklenecek şekilde gerçekleştirilmesi NATM yönteminin en önemli prensiplerinden biridir. Aynı zamanda kazı sonrası uygulanacak geçici destekleme sistemlerinin de tünel kazısı çevresindeki kaya ortamının elastik deformasyonlarına izin verecek ancak gevşemesine izin vermeyecek şekilde tasarlanması önemli bir diğer unsurdur. Bu hususların gerçekleştirilmesinden sonra tasarlanan ve uygulanan destekleme sistemlerinin amaca uygun olup olmadığının saha ölçümleri yardımıyla takip edilmesi, deformasyon durumlarına göre destekleme sistemlerinin revize edilmesi, deformasyon miktarlarının istenen seviyeye gelmesinin akabinde ise iç kaplama betonlarının yapımına geçilmesi büyük önem arz etmektedir. Tüm bu maddeleri hayata geçirebilmek, bu prensiplere uygun tasarımlar yapabilmek, uygulama sonrası bu hususlara dikkat ederek ilerleyebilmek için yeraltında yapılan bir kazının çevresindeki kaya ortamının davranışını irdelemek ve öğrenmek gerekmektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan gözlemler, deneyler ve analitik çalışmalardan bilindiği üzere yeraltı kazıları etrafındaki deformasyon ve gerilme dağılımları üç boyutlu bir karaktere sahiptir. Kaya ortamdaki deformasyonlar ilerlemekte olan bir tünelin aynasından 1-1.5 tünel çapı kadar ileriden başlar, tünel aynasında maksimum deformasyon değerinin yaklaşık üçte birine ulaşır, tünel aynasının yine 1-1.5 tünel çapı kadar gerisinde ise maksimum deformasyon seviyesine ulaşır.

T-3 Tüneli için kaya parametrelerinin belirlenmesinde sondajlardan ve laboratuvar sonuçlarından elde edilen veriler literatür ve saha gözlemleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu kapsamda kaya/zemin özellikleri, RocLab programında irdelenmiş ve kaya parametreleri elde edilmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. T-3 tüneli kaya parametreleri.

Tünel	Jeolojik Birim	GSI	σ_{ci}	mi	D	E (Mpa)	v
T-3	Ana Kaya	30	10	6	0	478,96	0.30

Elde edilen kaya parametreleri sonrasında sonlu elemanlar metodu ile nümerik analizler yapılmıştır. Oluşturulan modeller “Düzlem Birim Deformasyon (Plane Strain)” ile modellenmektedir. Modelleme esnasında sınır koşullarının deformasyon ve gerilmeleri doğru yansıtacak biçimde seçilmesine dikkat edilmiştir. Aynı zamanda kaya/zemin kütlelerinin homojen ve izotropik (her yönde aynı mekanik özelliklere sahip) olduğu kabul edilmiştir. Analiz yapılacak kesitler göçük bölgesinin en kritik olduğu düşünülen kesitinden alınmıştır. Analizlerde kaya birimleri Hoek-Brown ve zemin birimleri Mohr-Coulomb yenilme kriterine tabi elasto-plastik malzemeler olarak kabul edilip ilgili parametreler literatürden, jeolojik ve jeoteknik çalışmalardan ve saha gözlemleri ile belirlenmiştir. Çalışmada kazı ve destekleme aşamaları bir şekilde modellenmiş ve söz konusu aşamalar arasındaki etkileşimin uygun şekilde simüle edilmesine özen gösterilmiştir. Yapım aşamalarının gerçeğe en uygun şekilde modellenmesi amacıyla püskürtme betonun mukavemeti aşamalı olarak arttırılmış, bu sayede beton karakteristik mukavemetine ulaşana kadar gerçekleşecek olan deformasyonlara da izin verilmiştir. Bu amaçla C25/30 püskürtme betonun elastisite modülü ilk aşamada 0.3, daha sonra 0.9 kapasite değerlerinde modellenmiştir. Aynı şekilde basınç dayanımı ve çekme dayanımı da 0.3 ve 0.9 kapasitede olacak şekilde aşamalı arttırılmıştır.

Sayısal analizlerde bir diğer önemli husus da yerinde gerilme oranı k (yatay gerilme/düşey gerilme)’nin doğru belirlenmesidir. Yerinde gerilme tahmini bir yapının genel davranışını anlamayı amaçlayan daha kapsamlı bir ölçüm serisinin bir parçasıdır (Fairhurst, 2003). Mühendislik çalışmalarında yerinde gerilmeleri doğrudan ölçmek, maliyet ve uygulama zorluğundan dolayı çoğunlukla kaçınılan bir işlemdir. Bu amaçla Sheorey (2001) formülü kullanılmıştır ve hesaplanan k değeri sayısal analizlerde kullanılmıştır.

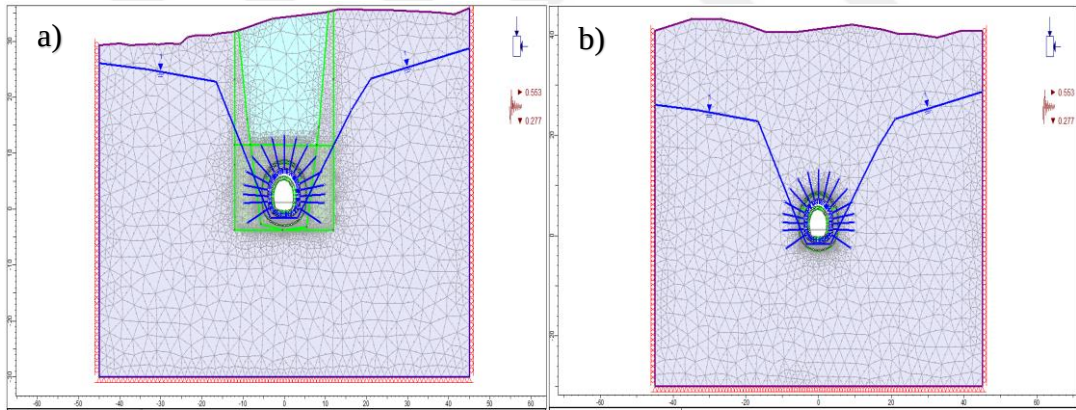
$$k = k_H/k_v = 0,33 + 9,50 \times E_m \text{ (GPa)} \times (0,001 + (1 / h)) \quad (4.9)$$

Yatay ve düşey yük oranı zemin/ayırışmış kaya ortamlarından 0,50-1,00 aralığında değişim gösterdiği literatürde verildiğinden, hesaplamalarda k değeri 0,50 olarak kabul edilmiştir.

Tünelde analizler yapılırken en kritik olarak düşünülen kesitler belirlenmiş ve bu kritik kesitler üzerinde nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Kaya birimleri Hoek-Brown, zemin birimler ve fay zonları ise Mohr-Coulomb yenilme kriterine tabi elasto-plastik malzemeler olarak kabul edilmiş ve malzeme parametreleri de buna göre belirlenmiştir (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10. Analizlerde kullanılan parametreler.

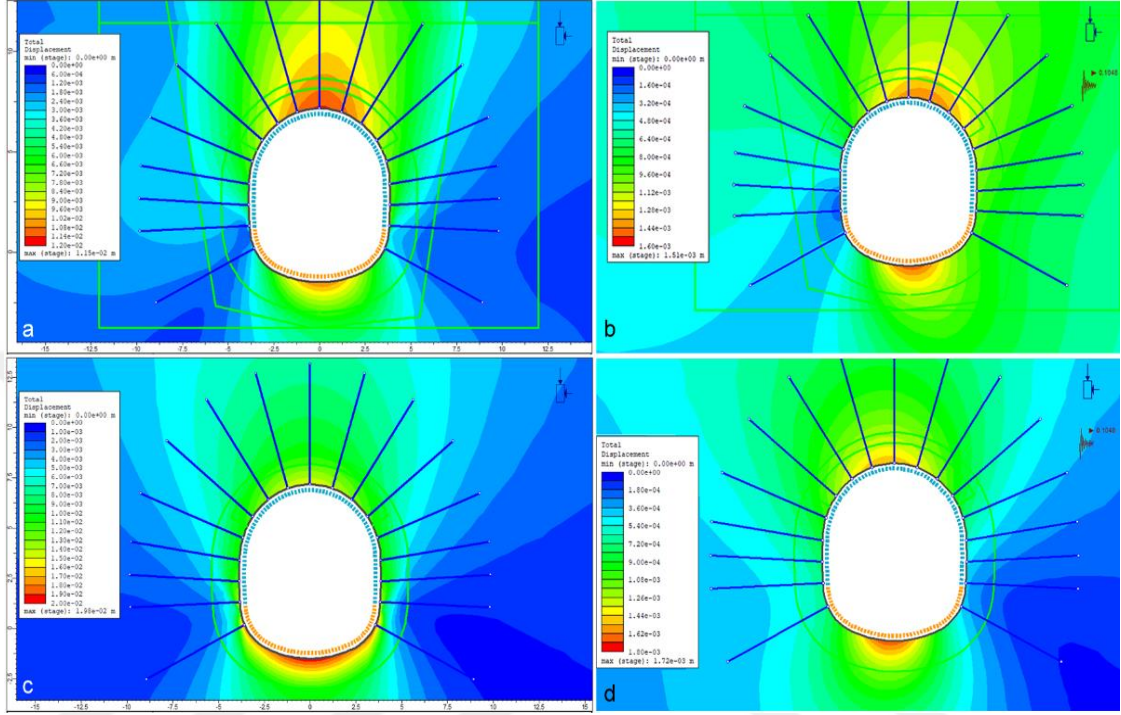
	Gravelly sandy clay	Claystone	Pile	Strut-1	Strut-2	Strut-3
Modulus of elasticity (MPa)	30	95	28.500	200.000	200.000	200.000
Cohesion, c (kPa)	6	35	—	—	—	—
Internal friction angle (°)	27	28	—	—	—	—
Unit weight (kN/m ³)	19	22	—	—	—	—
Diameter (m)	—	—	1.2	1.4	1	0.6
Space (mm)	—	—	—	23	19.65	12.5
Thickness (m)	—	—	1.4	6	6	6
Material	—	—	C25 Concrete	S235 Steel	S235 Steel	S235 Steel



Şekil 4.47. a) Km:142+721 ve b) Km:142+780 kritik kesitlerine ait nümerik analizlerde kullanılan model.

2D Sayısal analizler sonlu eleman yöntemi kullanan Rocscience Phase 2D V11 programıyla yapılmıştır (Şekil 4.47). Sayısal analizler 9 aşamaya ayrılarak yapılmıştır. İlk aşamada yerinde gerilmeler yüklenmiş, ardından üst yarıda kendinden delen sürenler yerleştirilmiştir. 3. Aşamada kazı yapılmış, 4. Aşamada destek sistemleri (püskürtme beton E0.3 olacak şekilde) programa girilmiştir. 5. Aşamada invert kazısı, 6. Aşamada invert desteklemeleri (püskürtme beton E0.3 olacak şekilde) 7. Aşamada

tüm destekleme analizi (püskürtme beton E0.9 olacak şekilde) 8. Aşamada iç kaplama eklenmiş durum ve son aşamada depremli durum analizleri yapılmıştır. Depremli durum analizlerinde bölge için 0.553 yatay ve 0.277 düşey (+-) ivme değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.48. Toplam deformasyon miktarları (a) km: 142+721 ilk destekleme, (b) km: 142+721 DD3 analiz, (c) km 142+780 ilk destekleme ve (d) km 142+780 ilk analiz DD3 (Karahan, vd.,2025).

Yapılan analizler sonucu her iki kritik kesitte toplam yer değiştirmelerin kabul edilebilir sınır değerleri içerisinde kaldığı görülmüştür (Şekil 4.48). Analizlere ait diğer tüm sonuçlar Şekil 4.49’ da verilmiştir. Kazı destekleme imalatlarına analizlerde değerlendirilen, Çizelge 4.11’ de yer alan tahkimat sistemi ile başlanılmasına, deformasyon okumalarının sürekli olarak yapılarak sistemin kontrol edilmesine ve deformasyon durumuna göre yerinde müdahale edilerek ilerlenmesine karar verilmiştir.

Phase 2D analiz kesitleri	2D analiz kesit-1			2D analiz kesit-2		
Bölüm (km)	Göçük kesimi			Rehabilitasyon		
İmalat/Analiz Aşaması	İnşaat Sourası (NATM kazı statik koşulları)	Deprem Durumu DD1 (Kalıcı Kaplama)	Deprem Durumu DD3 (Kalıcı Kaplama)	İnşaat Sourası (NATM kazı statik Koşulları)	Deprem Durumu (Kalıcı kaplama sourası deprem durumu)	Deprem Durumu DD3 (Kalıcı Kaplama)
Tünel Tavan Yer değiştirmesi dy^a (mm)	11	35	14	8,9	30	16
Tünel taban yer değiştirmesi dy (mm)	11	1	12	11	1	20
Tünel geçici kaplama yer değiştirmesi (mm)	12	35	10	11	27	20
Tünel geçici kaplama yer değiştirmesi x^c (mm)	7	35	11	9	22	18
Tünel geçici kaplama max. moment, M (kNm/m)	61,195	138,55	61,216	60,63	157,35	121,695
Tünel geçici kaplaması max. Kesme kuvveti Q^b (kN/m)	198,36	165,03	196,89	124,88	203,47	321,26
Kaya bulunuş yükü (kN)	220,719	287,37	226,435	220,71	224,96	337,951
Tünel kalıcı kaplama yer değiştirmesi dy^d (mm)	11	34	-	9	22	-
Tünel kalıcı kaplama yer değiştirmesi dx^d (mm)	7	44	-	11	27	-
Tünel kalıcı kaplaması max. moment, M (kNm/m)	60,904	138,55	-	60,34	157,35	-
Tünel kalıcı kaplaması max. Kesme kuvveti, Q (kN/m)	198,47	163,03	-	124,75	203,47	-

^a(-) dy değerler oturmaz, (+) dy değerler şişmeyi gösterir.

^b(+) dx değerleri tünel yönündeki konverjans değerleridir

^cİki boyutlu analizlerde statik koşul için elde edilen yüksek değerler, destek bölgesinin pik değerleridir.

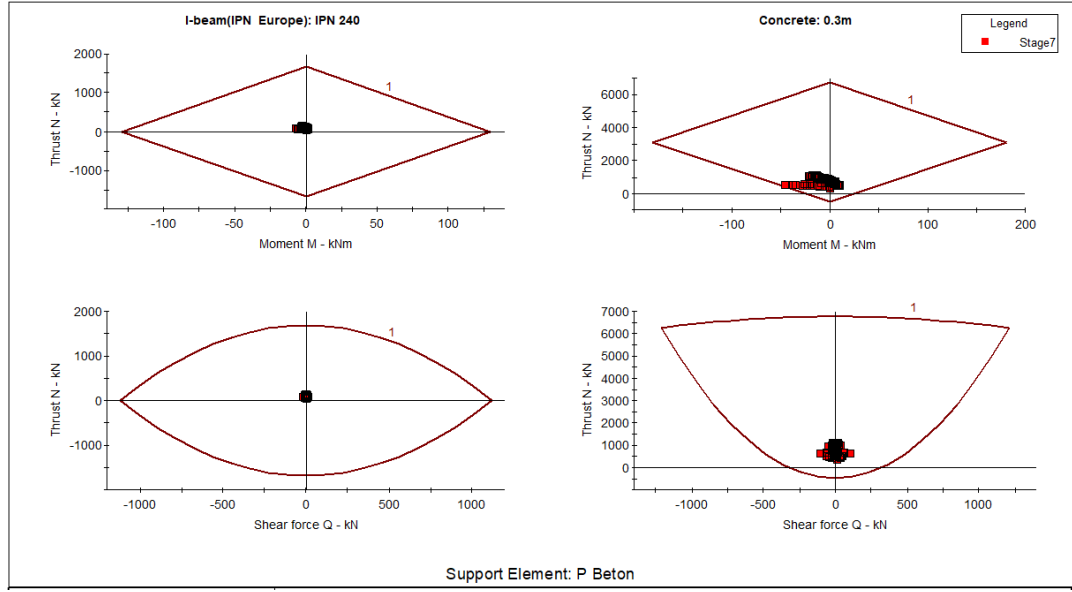
^dNATM kazı çalışmasının ardından tamamlanan kalıcı kaplama aşamasında, deprem etkilerinin görülebilmesi için deformasyonlar durdurulmuştur.

Şekil 4.49. Nümerik analiz sonuçları.

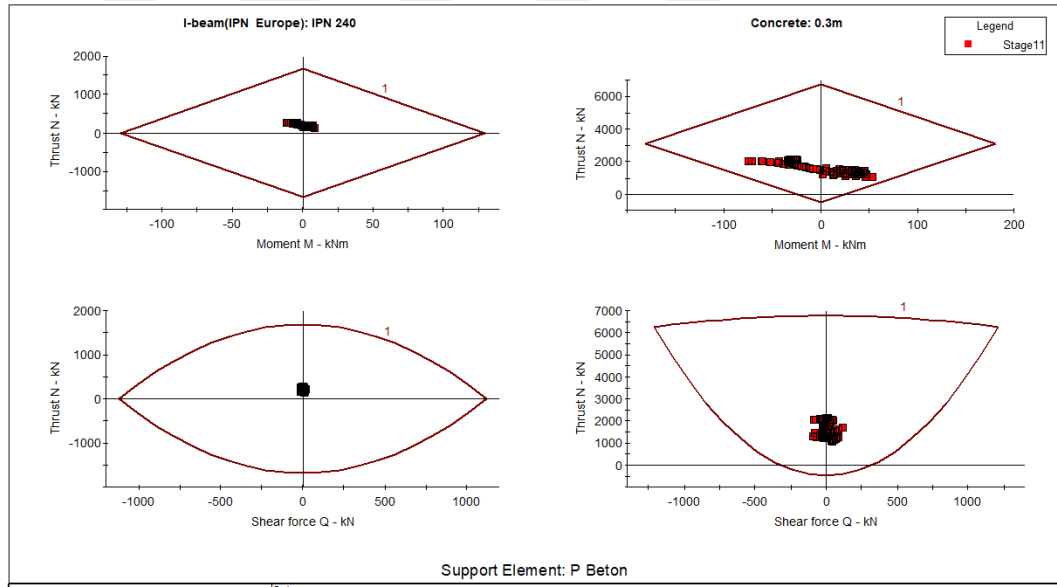
Çizelge 4.11. Birincil destekleme sisteminde kullanılan elemanlar.

Püskürtme Beton (cm)	30,00
Donatı	İç ve Dış
Çelik İksa	NPI 240 / 80 cm
Beton Sınıfı	C 25/30
Nihai Kaplama (cm)	25,00
Polimer Lif Katkılı	700-1000 Joule
Beton Sınıfı	C 25/30

Yapılan destekleme analizlerine ek olarak tünelde kazının tamamlanmasından sonra nihai kaplama yapılacağından, yapılacak nihai kaplamanın özelliklerinin değerlendirilmesi ve çıkan sonuçlara göre projelendirilmesi için de analizler yapılmıştır. Ayrıca üst yarı ve alt yarıda birincil destekleme imalatları için yük ve kapasite diyagramları hem normal durumda hem deprem durumunda ayrı ayrı kontrol edilmiş ve herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır (Şekil 4.50, Şekil 4.51).

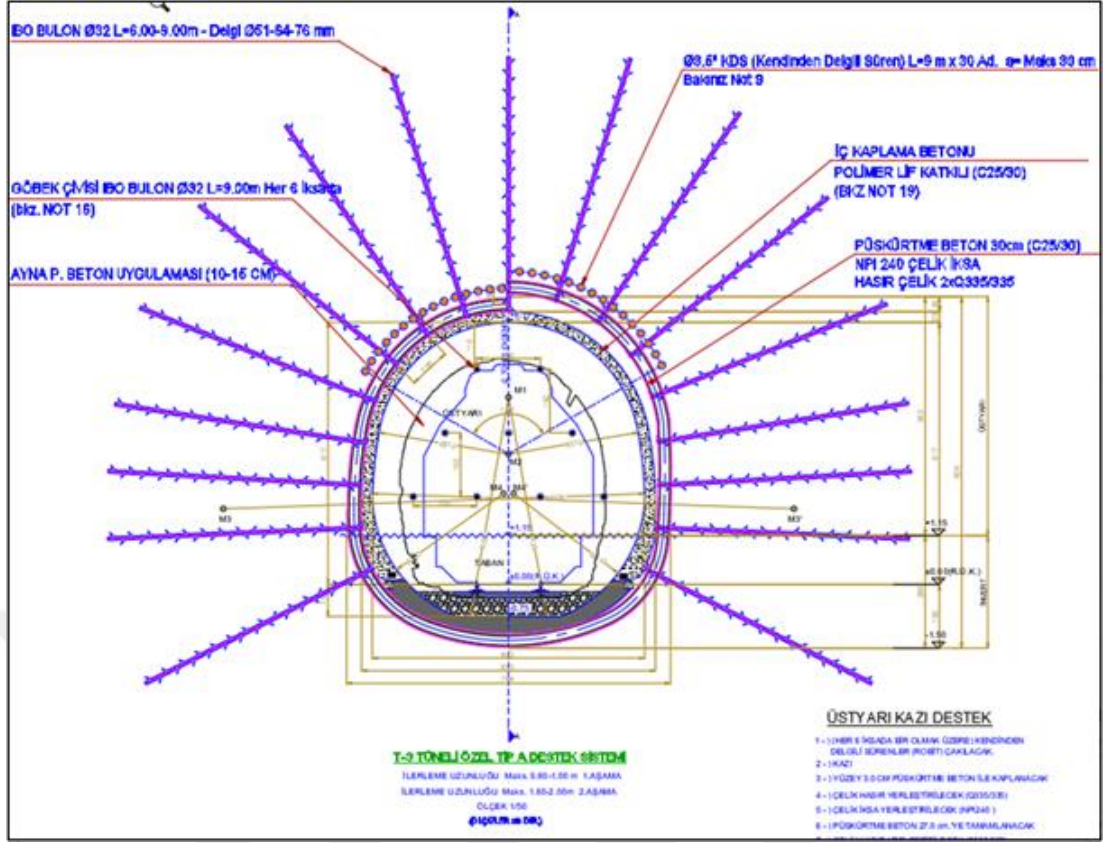


Şekil 4.50. T-3 tüneli göçük kesiti üst yarı birincil destekleme yük ve kapasite diyagramları.



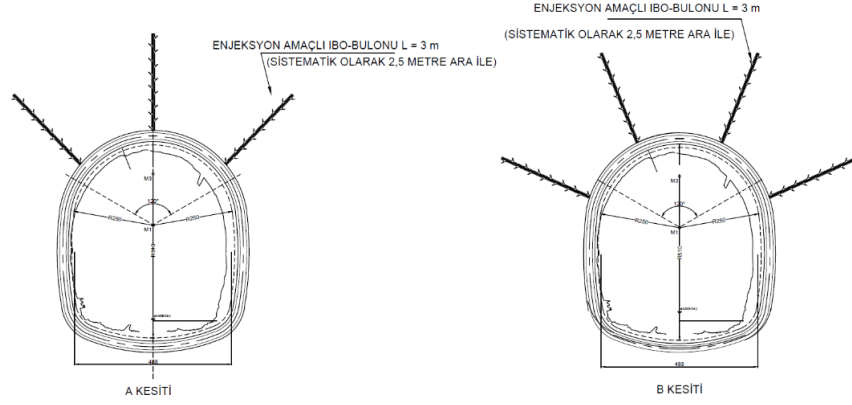
Şekil 4.51. T-3 tüneli göçük kesiti üst yarı birincil destekleme deprem durumu yük ve kapasite diyagramları.

Tüm bu analiz sonuçlarına göre imalata başlanacak tünel destek sistemine ait pafta Şekil 4.52' de verilmiştir.



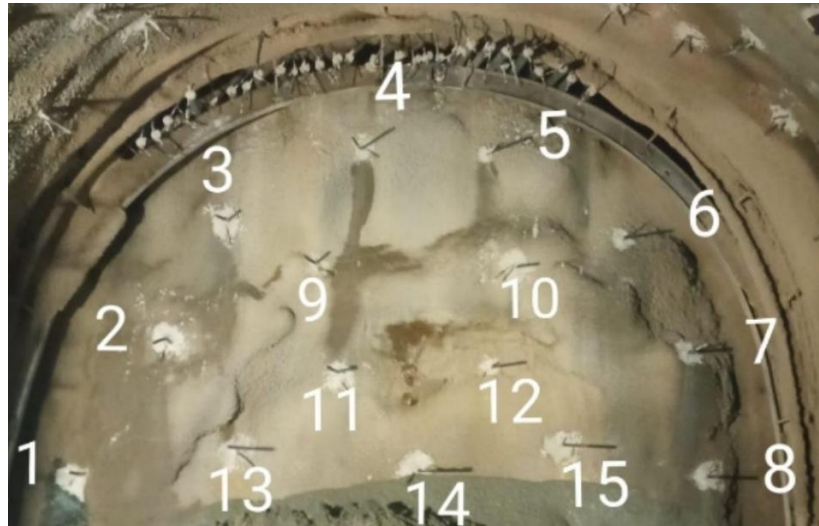
Şekil 4.52. T3 tüneli kazı-destekleme sistemi.

T3 Tünelinde kazı destekleme projelerinin hazırlanması aşamasında tünelin giriş ve çıkış kesimlerinde deformasyon noktaları tesis edilmiş, düzenli okumalar ile tünel takip edilmiştir. Buna ek olarak tünel tarama kesitleri de alınarak her iki tarafta da göçük bölgesinin gerisinde tünel gabari kesiti içerisine giren kesimler olup olmadığı kontrol edilmiştir. Tünelin giriş kesiminde yaklaşık 25 metrelik bir kesimde gabari kesitine girdiği görülmüştür. Bunun üzerine NATM ile tarama imalatları yapılacak kesim 25 metre geriye çekilmiş ve giriş kesiminde kesite giren yere kadar tünel içi doldurulmuştur. Doldurulan bölgede hasır çelik ve püskürtme beton vasıtası ile bir ayna oluşturulmuştur. Oluşturulan aynadan ibo bulon delgileri ile enjeksiyon imalatları yapılmıştır. Bölgede yapılan jeofizik etütlerde giriş kesiminde bulunan göçük bölgesinden tünel ağzına doğru olan yaklaşık 100 metrelik kesimde kireçtaşlarının kırıklı, çatlaklı bir yapıda olduğu, boşluk olma ihtimali bulunması üzerine söz konusu bu 100 metrelik kesimde ibo bulonlar kullanılarak enjeksiyon imalatları yapılmıştır (Şekil 4.53).



Şekil 4.53. Tünel giriş bölgesinde ibo bulonlar ile yapılan enjeksiyon paterni.

Hem aynada hem de geriye dönük yapılan enjeksiyon imalatlarının tamamlanmasından sonra tünelde kazı destekleme imalatlarına başlanmaya hazır hale gelmiştir. Kazı destekleme projelerinin de bu süreçte hazırlanmasının akabinde kazı destekleme imalatlarına başlanılmıştır. Tünelin hem giriş hem de çıkış ağzlarından çalışmalar yapılmıştır. Her sette 30 adet $L=9,0$ metre uzunluğunda kendinden delgi sürenler çakılmış ve Tip-1' den Tip-6' ya kadar kademeli yükselen iksalar kullanılmıştır. Her sette kazıya girilmeden önce yerinde belirlenen patern ile ibo bulonlar yardımı ile aynada destekleme yapılmış ve enjeksiyon verilmiştir (Şekil 4.54).



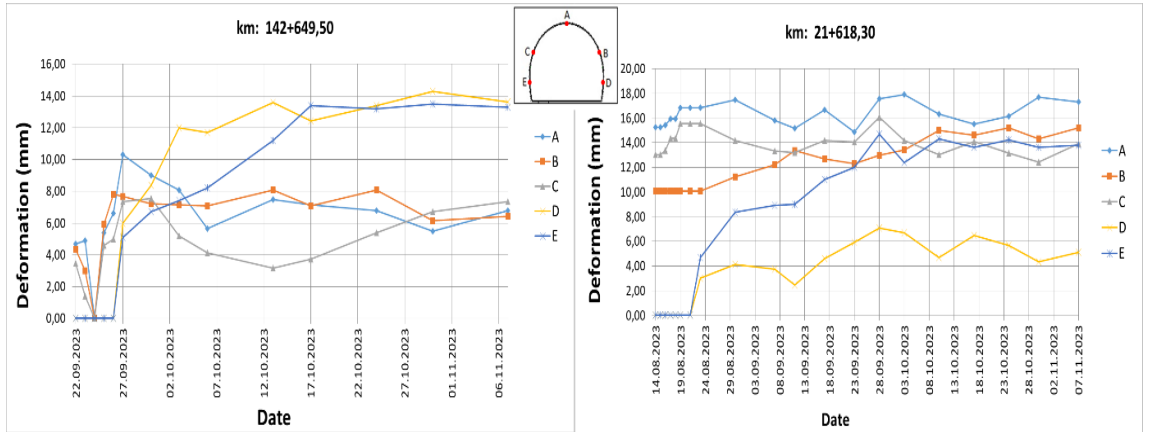
Şekil 4.54. T3 tüneli ayna enjeksiyonu paterni.

Aynadan yapılan enjeksiyonlar sonrası kazı imalatlarına başlanılmış ve her sette bu şekilde tekrar edilmiştir (Şekil 4.55).



Şekil 4.55. T3 tüneli ilk tarama kazı imalatı.

Her iki ayna da tarama imalatları projesine uygun şekilde devam etmiştir. Deformasyon ölçümleri ve tarama kesitleri devamlı tekrarlanmış, tünel sürekli kontrol edilmiştir (Şekil 4.56). Belirlenen imalat adımlarının dışına çıkılmadan, herhangi bir deformasyon yaşanmadan, ek imalat yapılmadan tünelde kazı destekleme imalatları tamamlanmıştır.



Şekil 4.56. Kazı esnasında alınan konverjans ölçüm grafikleri (Karahana vd., 2025).

Tünelde aç-kapa içerisinde başlanarak devam eden kazı destekleme çalışmaları (Şekil 4.57) ile giriş aynasından devam eden kazı destekleme imalatlarına (Şekil 4.58) ve giriş aynasında görünen yığma taş kaplama tünele ait fotoğraflar (Şekil 4.59) aşağıda yer almaktadır.



Şekil 4.57. T3 tüneli çıkış kesimi kazı destekleme imalatları.



Şekil 4.58. T3 tüneli giriş kesimi kazı destekleme imalatları.



Şekil 4.59. T3 tüneli kazı destekleme imalatları esnasında mevcut taş kaplama tünel.

Proje aşamasında T3 Tüneli invertli olacak şekilde tasarlanmış ve imalatlarda invertli şekilde uygulanmıştır (Şekil 4.60).



Şekil 4.60. T3 tüneli invert imatları.

Projesine uygun şekilde her iki aynadan da ilerlemeler yapılmış ve göçük meydana gelen 170 metrelik kesim NATM metodu ile açılarak giriş çıkış portalları arasında ulaşım sağlanmıştır (Şekil 4.61).

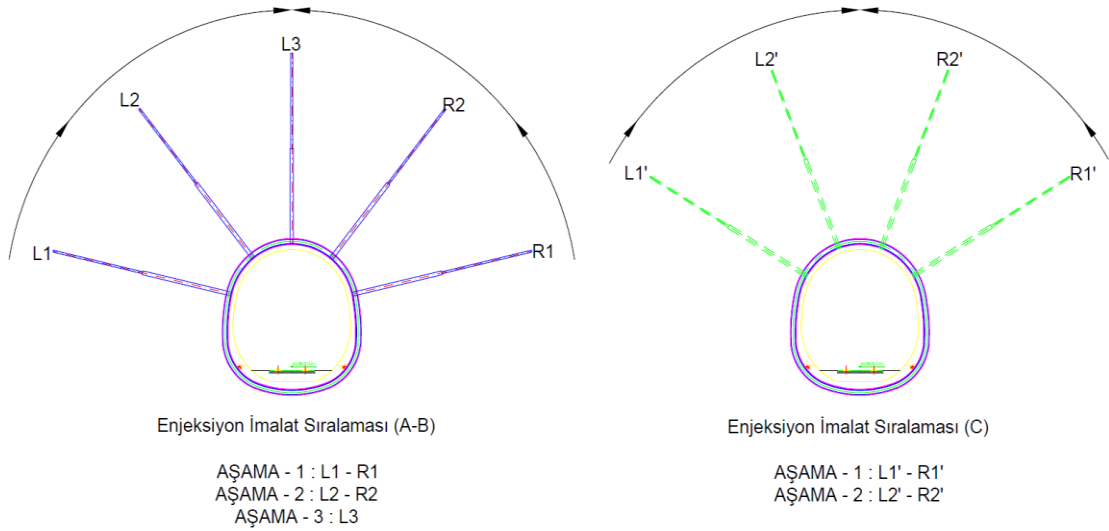


Şekil 4.61. T3 tüneli göçük meydana gelen-NATM ile açılmış kesim.

4.2.2.2 Tünel içi kademeli enjeksiyon imalatı

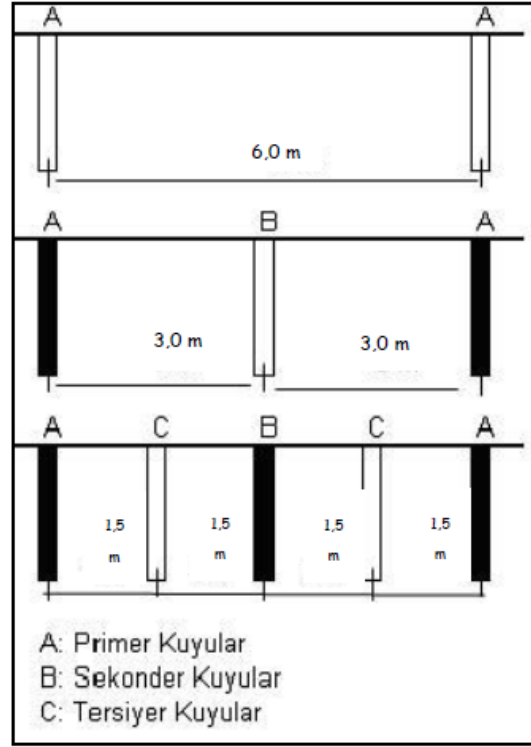
T3 Tünelinde projesinde verilen şekli ile kazı destekleme imalatlarına başlanılmış olup ilk iksadan son iksaya kadar hiçbir ek imalat yapılmadan göçük bölgesi geçilmiştir. Bu durum yapılan araştırma çalışmaları ve etütler neticesinde ortaya konulan modelleme ve seçilen parametrelerin sahayı olabildiğince iyi bir şekilde temsil ettiğini ve yapılan sayısal analizlerinde başarılı olduğunun bir göstergesidir.

Tamamlanan kazı destekleme imalatları sonrasında, tüneldeki zemin koşullarına bağlı olarak meydana gelen aşırı deformasyon, fay zonunun varlığı ve muhtemel plastikleşmeden kaynaklı olarak tünel içerisinde kademeli konsolidasyon enjeksiyonu imalatlarının yapılmasına karar verilmiştir. İmalat yapılacak kesim ano-ano ayrılmış ve delgiler primer (A), sekonder (B) ve tersiyer (C) olacak şekilde üç aşamaya ayrılmıştır (Şekil 4.62).



Şekil 4.62. Kesitte enjeksiyon uygulama aşamaları şematik gösterimi.

Konsolidasyon enjeksiyonu işlemi ano sistemine göre 6,0 m'lik kesimlere bölünerek azalan yarı eşit aralık metoduna göre delgiler açılarak enjeksiyon imalatı yapılmıştır (Şekil 4.63).



Şekil 4.63. Azalan yarı eşit aralık metodu (6 m' lik 1 ano için).

Yapılacak enjeksiyon imalatlarında kademeler metodu kullanılmıştır. Bu metotta enjeksiyon delgisi projesinde belirtilen derinliğe kadar delinir, delik yıkanır ve gerekirse basınçlı su deneyleri yapılır. Bundan sonra tıkaç en alttaki kademeyi enjekte etmek üzere yerleştirilir ve kademinin enjeksiyonu teknik şartnamelere uygun şekilde gerçekleştirilir. Sonra bir üst kademenin belirtilen derinliğe kadar delinir ve aynı işlemler uygulanır. Tıkaç bir üstteki kademeyi enjekte etmek üzere yukarı alınır ve ikinci kademenin enjeksiyonu yapılır. T3 Tünelinde yapılan enjeksiyon uygulamasında da ilk olarak 3,80 metre delgi yapılarak enjeksiyon işlemi uygulanmış, daha sonra prizini alan bölgede ikinci aşama olarak 7,60 metre delgi yapılmış ve 3,80 – 7,60 metre aralığına enjeksiyon verilerek kuyu tamamlanmıştır.

Deformasyon bölgesi temel kaya şartları dikkate alınarak nihai enjeksiyon karışımı (şerbeti) alışı kriteri (ano kapatma başarı sınır değeri) $\leq 25-50$ kg/m (Orta az alışı) olmalıdır. Geçirimsizlik sınır değeri ise ≤ 2 Lugeon (Lu) olarak belirlenmiştir. Kuyuların tünel kesitindeki yeri ile manometre arasındaki yükseklik farkından dolayı oluşan basınç kaybı dikkate alınmıştır. Refü koşulu, enjeksiyonu yapılan bir kademenin enjeksiyonuna son verebilmek için bu kademenin enjeksiyon basıncında,

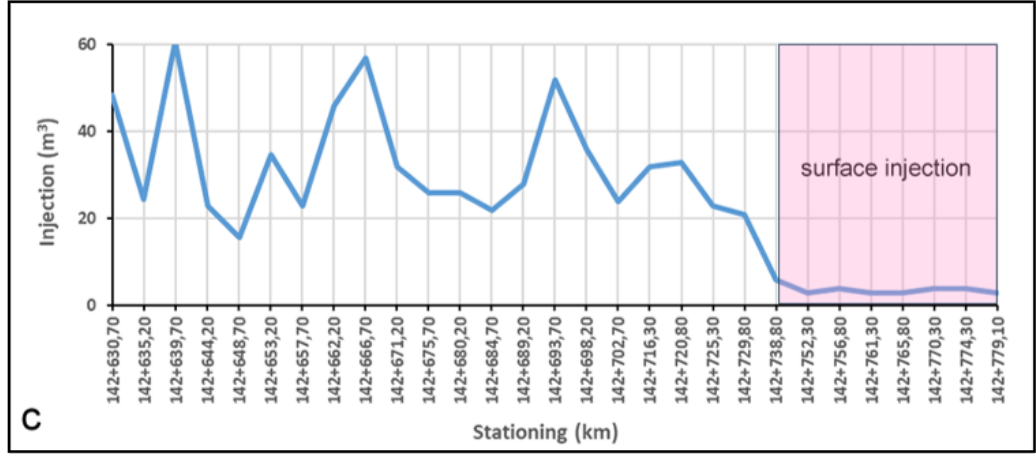
kabul edilebilen miktarda veya daha az şerbet yemesi halidir. Enjeksiyon kuyularının refü koşulu için refü basıncında kuyu 0,6 lt/m/dakika veya daha az şerbet yemesi gerekir. Bu çalışmada “refü koşulu” yukarıda belirtilen basınç altında kuyunun 0,6 lt/m/dakika veya daha az şerbet yemesi durumu kullanılmıştır.

Şekil 4.64. Enjeksiyon uygulama kesiti.



Şekil 4.65. Tünel içi konsolidasyon enjeksiyonu yapılması.

Tüm tünel imalatları boyunca uygulanan ayna desteklemelerinden, kendinden delgili sürenlerden, destekleme paftasında yer alan bulonlardan verilen bütün enjeksiyonlar kayıt altına alınmıştır. Aynı zamanda tünel üzeri yapılan enjeksiyonlar, tünel içi yapılan enjeksiyonlarda da hangi metrede ne kadar enjeksiyon aldığıının verileri tutulmuştur. Tüm bu veriler birleştirildiğinde tünel içerisinde yapılan enjeksiyon imalatlarında, tünel üzeri enjeksiyon yapılan kesimlerde zemine çok daha az enjeksiyon karışımı gittiği, nispeten boşluklu yapıların olduğu, tünel üzerinden müdahale şansının olmadığı giriş kesimlerinde ise zemine daha fazla enjeksiyon verildiği görülmüştür (Şekil 4.66).

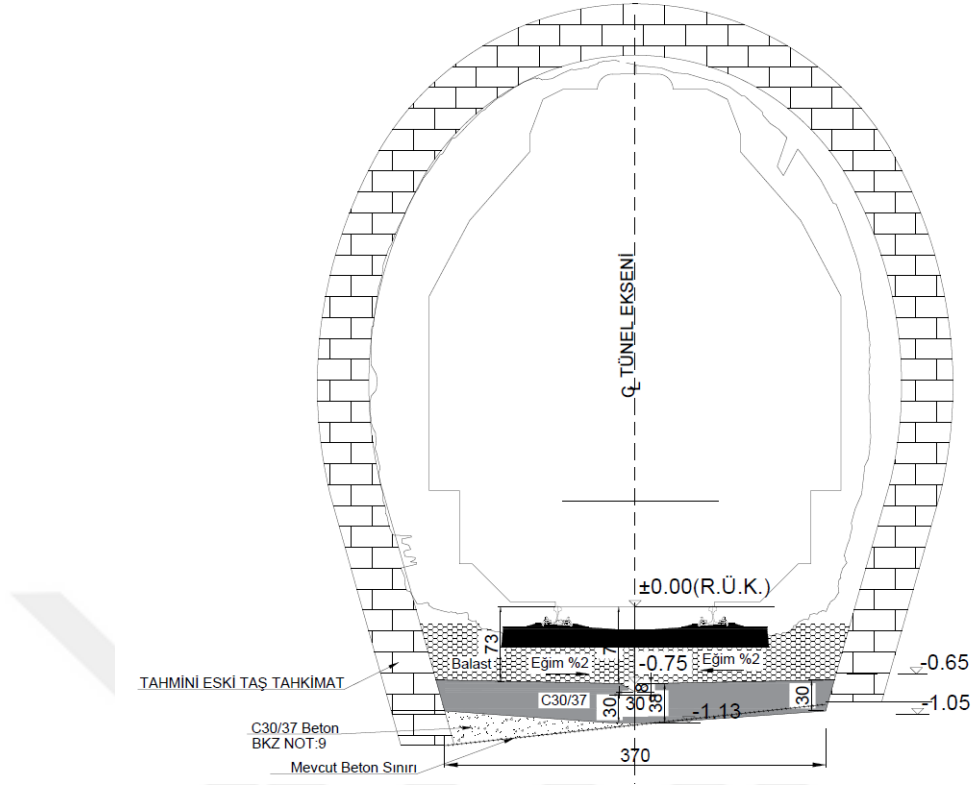


Şekil 4.66. T3 tüneline zeminin enjeksiyon alışı gösteren grafik (Karahana vd.,2025).

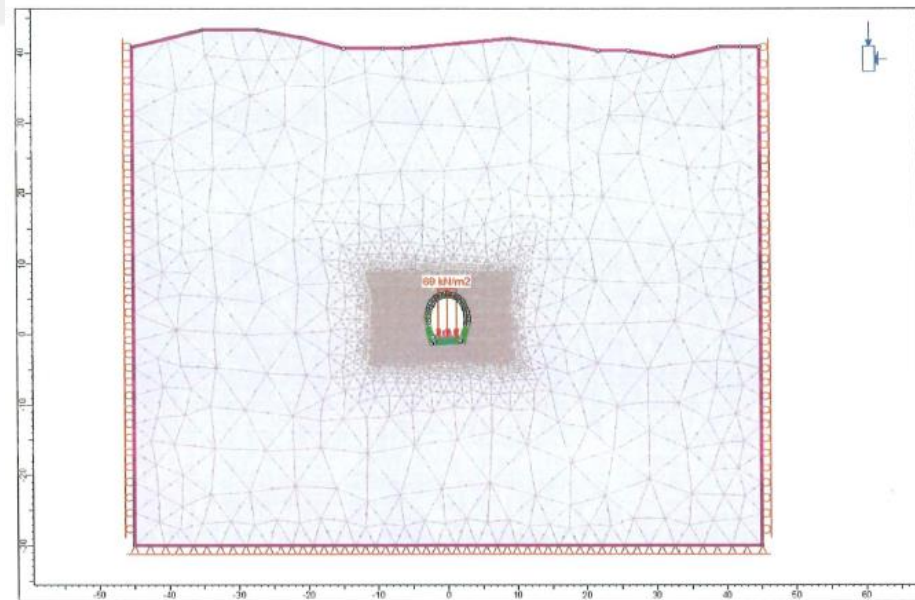
4.2.2.3 Tünel nihai beton imalatları

Mevcut T3 Tünelinin tamamında taban betonu imalatları, NATM metodu ile kazı destekleme imalatları tamamlanan 170 metrelik kesimde ise taban betonlarına ek olarak nihai kemer betonu projelendirilmiştir.

İlk olarak tünel taban betonu için kesitler oluşturulmuş (Şekil 4.67) ve analizler yapılmıştır (Şekil 4.68). Analizlerde Çizelge 4.12’ de yer alan destekleme sistemleri kullanılmıştır.



Şekil 4.67. T-3 tüneli taş kaplama kesimi taban betonarmesi.



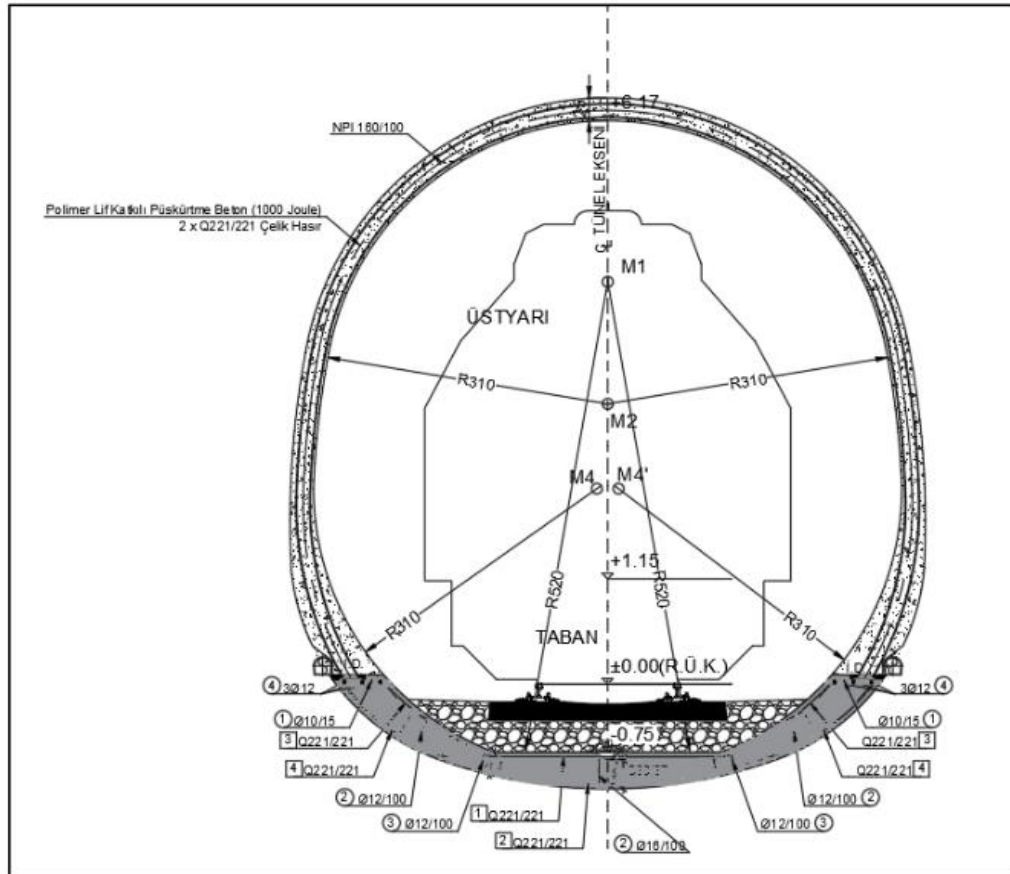
Şekil 4.68. T-3 tüneli taş kaplama kesimi taban betonarmesi sonlu elemanlar analiz modeli.

Numerik analizler yapılırken hem deprem durumu hem de beton imalatları tamamlandıktan sonra beton üzerine gelecek demiryolu yükleri dikkate alınmıştır. Her iki durum içinde analizlerde herhangi bir sorun ile karşılaşılmamıştır. Nihai kaplama yapısına gelmesi öngörülen yükler bu analizlerden elde edilmiştir. Elde edilen yükler betonarme kapasite diyagramları ile teyit edilmiştir.

Çizelge 4.12. Taban betonarmesi özellikleri.

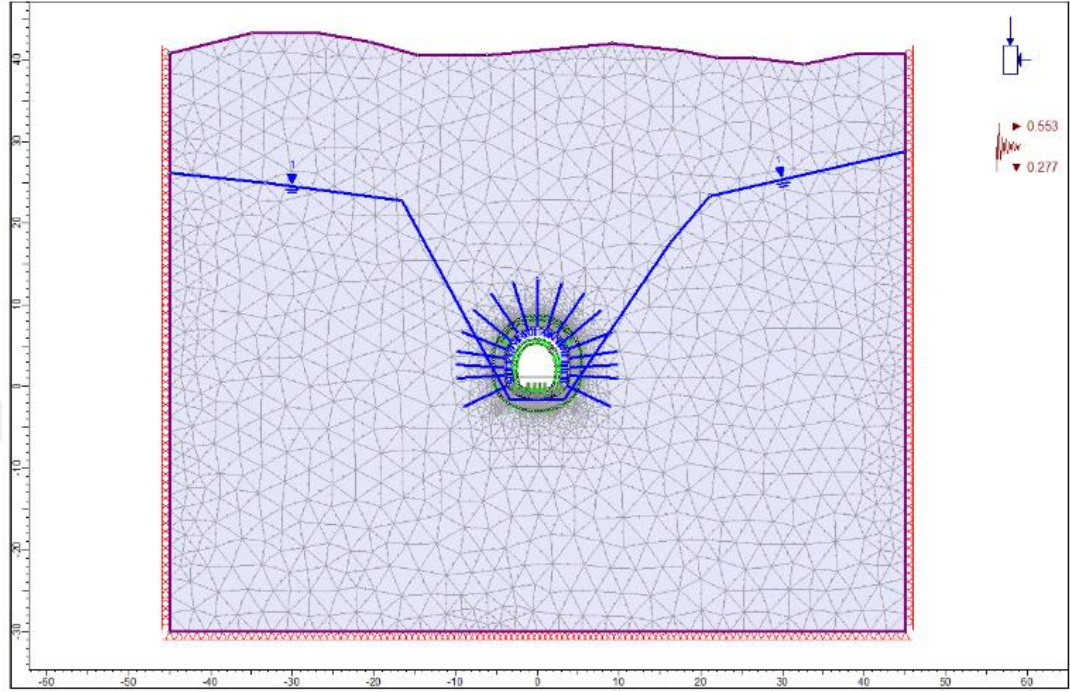
Beton Kalınlığı (cm)	30,00
Beton Sınıfı	C 30/37
Donatı	Alt ve Üst Q335/335

Tünel nihai kemer betonları için iksalı, çelik hasırlı ve fiber püskürtme betonlu bir nihai kaplama tasarımı yapılmıştır (Şekil 4.69).



Şekil 4.69. T-3 tüneli nihai kaplama sistemi.

Oluşturulan nihai kaplama kesitleri üzerinde model oluşturulmuş ve sonlu elemanlar numerik modeli üzerinde analizler yapılmıştır (Şekil 4.70). Yapılan analizlerde Çizelge 4.13’ te yer alan destek sistemleri kullanılmıştır.



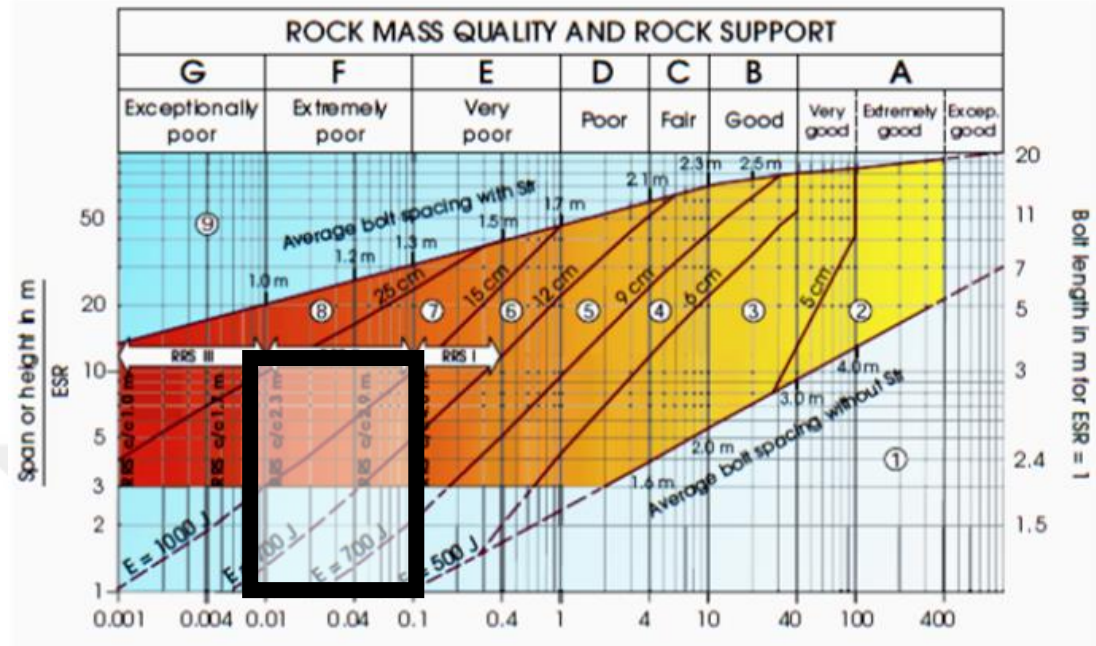
Şekil 4.70. T-3 tüneli nihai kaplama kesiti sonlu elemanlar analiz modeli.

Numerik analizler yapılırken hem deprem durumu hem de beton imalatları tamamlandıktan sonra beton üzerine gelecek demiryolu yükleri dikkate alınmıştır. Her iki durum içinde analizlerde herhangi bir sorun ile karşılaşılmemiştir. Nihai kaplama yapısına gelmesi öngörülen yükler bu analizlerden elde edilmiştir. Elde edilen yükler betonarme kapasite diyagramları ile teyit edilmiştir.

Çizelge 4.13. Nihai kaplama özellikleri.

Nihai Kaplama (cm)	25,00
Beton Sınıfı	C 25/30
Donatı	İç ve Dış Q221/221
Polimer Lif Katkı	700-1000 Joule
Çelik İksa	NPI 160 / 100 cm

Tünel nihai kaplama sisteminde kullanılacak püskürtme betonun kaya sınıfına göre ve deneysel veriler çerçevesinde kapasite hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 4.71. Q kaya sınıflama sistemi lif katkılı beton değerlendirilmesi.

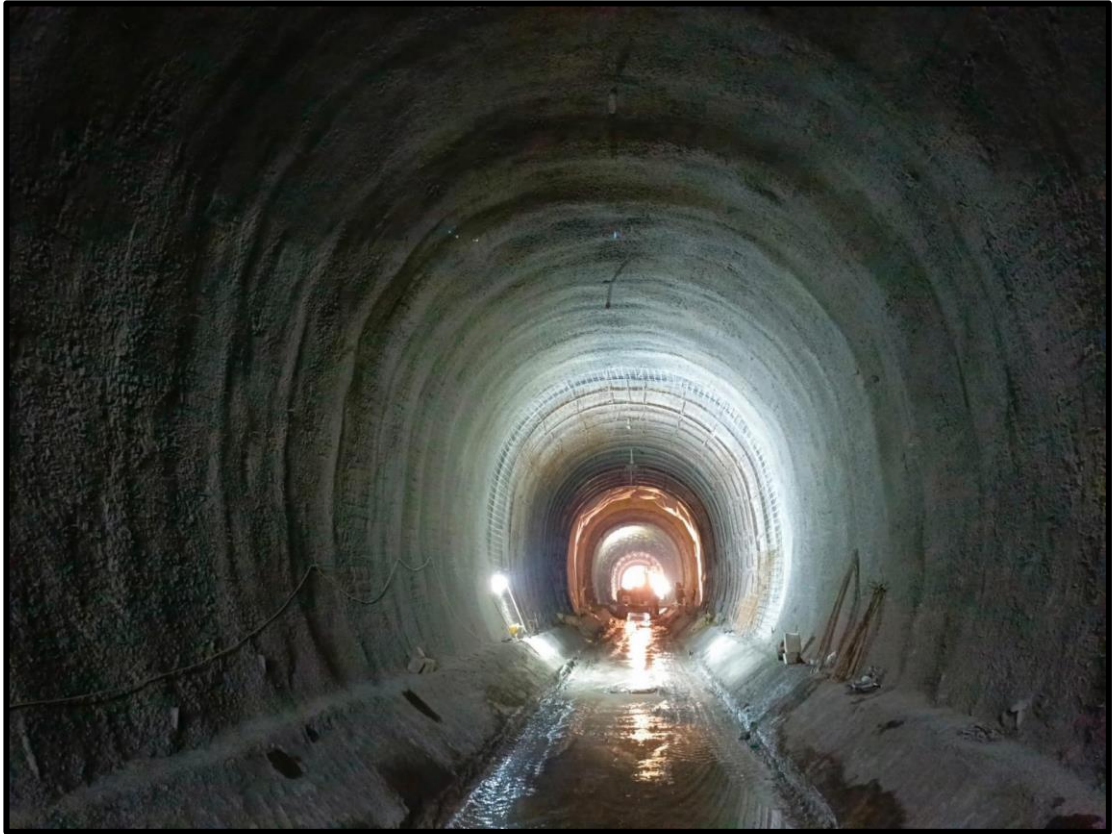
Grafikte Q kaya sınıflama sistemine göre verilen değerler NATM Kaya Sınıflama Sistemine göre yeniden düzenlendiğinde C sınıfı zeminlerin grafikte belirtilen değer aralığında olması gerekmektedir. Bu durum nihai kaplama beton imalatlarında kullanılacak polimer lif katkılı püskürtme betonunda Joule değer aralığı 700-1000 Joule arasında belirlenmiştir (Şekil 4.71). Nihai kaplama beton imalatlarında kullanılmak üzere sahaya getirilen polimer liflerden alınan numuneler İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetim Enstitüsü Müdürlüğü'ne gönderilerek teknik rapor alınmıştır. İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında yapılan deneyde sahadan alınan plak numunesi altına iki adet LVDT (deplasman ölçer) yerleştirilmiş ve 100 mm x 100 mm kare plaka numunenin tam merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiş ve yük uygulanmıştır. Daha sonra elde edilen verilere göre yük-sehim ilişkisi incelenerek numunenin enerji yutma kapasitesi (Tokluk Değerleri) belirlenmiştir. Bu deney 3,5 kg/m³, 4,0 kg/m³ ve 4,5 kg/m³ fiber içeren 3 farklı plak numune üzerinde yapılmış ve numunelerin 25 mm sehime karşılık gelen tokluk değerleri ve plak numunelerin taşıdığı maksimum yük değerleri bulunmuştur (Çizelge 4.14).

Çizelge 4.14. Numunelere ait tokluk ve maksimum yük değerleri tablosu.

Numune Tipi	25mm Sehime Karşılık Gelen Enerji (Joule)	Maksimum Yük (kN)
3,5 kg/m ³ Plak	722	41,3
4,0 kg/m ³ Plak	983	48,1
4,5 kg/m ³ Plak	1078	56,3

Deney sonuçlarından elde edilen veriler sonrasında T3 Tünelinin bulunduğu bölgenin şartları, deprem durumu vb. konular dikkate alınarak nihai kemer beton imalatlarında 4,0 kg/m³ fiber kullanılmasına karar verilmiştir.

Yapılan analizler sonucu oluşturulan tasarım projelendirilmiş ve imalatlar projesine uygun şekilde tamamlanmıştır (Şekil 4.72).



Şekil 4.72. T3 Tüneli nihai betonları tamamlanmış durum.

5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Aktif faylar tarafından kesilen tünellerde büyük göçmeler, sıkışmalar gibi büyük mühendislik sorunları oluşarak tünelin kullanılamaz hale gelmesine neden olabilirler ve bu tür tünel vakaları literatürde oldukça azdır. Bu çalışmada Kahramanmaraş depremlerinin ardından yüzey kırığı tarafından kesilen 1930'da Kilit taşlı yığma taş yöntemiyle imalatı tamamlanan T3 Tünelinde oluşan mühendislik problemleri incelenmiştir.

Kahramanmaraş depremlerinin etkisiyle T3 Tünelinde tünel üzeri heyelan, tünel içi sıkışma, göçük yaşanmış ve tünel ulaşımına kapanmıştır. Demiryolunun ulaşımına tekrar açılabilmesi amacıyla araştırma çalışmalarının ardından tünel üzeri heyelan ve T3 Tünelinin yeniden dizaynı aşamalarını içeren prosedürler oluşturulmuştur. İlk aşamada depremlerle tetiklenen ve iç içe geçmiş 4 adet heyelanın geometrileri belirlenmiştir. Heyelanların T3 Tüneline etkisinin azaltılması amacıyla dayanma yapılarıyla heyelanın ıslahı sağlanmıştır. Kullanılan bu dayanma yapıları sayesinde tünelin uzun dönem stabilitesine katkıda bulunulmuştur.

İkinci aşamada T3 Tünelinin yeniden dizaynı çalışmalarına başlanmış öncelikle tünel içinde oluşan göçük için yüzeyden 3 farklı karışımla konsolidasyon enjeksiyonları yapılmıştır. Konsolidasyon enjeksiyonları, tünelin yeniden tasarımı sırasında kaya ortamının sayısal analizde homojen ve izotropik olarak kabul edilmesine katkıda bulunmuştur. Ek olarak yapılan konsolidasyon enjeksiyonları fay kırıklarıyla oluşan boşlukları doldurarak tünel birincil desteklemesine kayadan asimetrik yükler gelmesi riskini azaltmıştır. Ardından heyelanlı bir bölgede yer alan T3 Tünelinin çıkış portalının yeniden tasarıma geçilmiştir. Oluşturulan model 2D sayısal analizlerle desteklenmiştir. Sahadaki yer değiştirmeler ile 2D analiz sonuçlarının (en yüksek toplam yer değiştirme 2 cm) benzer olduğu görülmüştür. Son aşamada ise tünel içinin yeniden dizaynına geçilmiştir. Tünel geometrisinde iyileştirmeye gidilerek destek sistemi tüneldeki sorunlar değerlendirilerek biraz daha rijit seçilmiştir. Oluşturulan model 2 farklı tünel gerçek kesiti için 2D analizlerle kontrol edilmiş ve sonrasında imalat aşamasına geçilmiştir.

Bu çalışmada tünelde meydana gelen gk sadece bir gk olarak çözümlenmemiş, bölgede daha önceden var olan, meydana gelen deprem ile tetiklenen tüm durumların tespitine önem verilmiş ve bölge bir bütün olarak modellenmiştir. Bunun sonucunda öncelik sırasına göre hedefler belirlenmiş, amaca yönelik tasarımlar meydana getirilmiş, oluşturulan tasarımların sahaya uygunluğu ve olumlu sonuç verip vermeyeceği analiz edilmiş ve son aşamada uygulama esnasında metodolojilere harfiyen uyularak, binlerce artçı sarsıntının kayda alındığı deprem bölgesinde, imalatlar sorunsuz şekilde tamamlanmıştır.



KAYNAKÇA

- Arpat, E. ve Şaroğlu, F. 1975. Türkiye'deki Bazı Önemli Genç Tektonik Olaylar. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 18, 1, 91-101.
- Aygar, E. B. ve Gökçeoğlu, C. 2021. A special support design for a large-span tunnel crossing an active fault (T9 Tunnel, Ankara–Sivas High-Speed Railway Project, Turkey), Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80, 2, 1247-1264.
- Barton, N., Lien, R. ve Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics, 6, 4, 189-236.
- Barton, N., 1995. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. In Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects (Vol. 1, pp. 703-733), Pergamon.
- Barton, N. ve Grimstad, E., 2002. Updating the Q-system using QlogQ. In Proceedings of the International Conference on Tunnelling and Underground Space Technology, 321-328.
- Berge, A. M., 2011. Inverse Theory with Applications in Geophysics, Cambridge University Press.
- Bieniawski, Z. T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses, Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, 15, 12, 335-344.
- Bieniawski, Z. T., 1976. Rock mass classification in rock engineering, In Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering, 97-106.
- Bieniawski, Z. T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley and Sons, 237.
- Bullen, K. E., 1985. An Introduction to the Theory of Seismology, Cambridge University Press.
- Candansayar, M. E. ve Başokur, A. T., 2001. A field example of 2-D electrical resistivity tomography (ERT) for shallow subsurface investigation in an urban area, Journal of Applied Geophysics, 47, 4, 267-288.
- Canitez, N., 1997. Jeofizikte Sayısal Modelleme, İstanbul Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- Dahlin, T., 2001. The development of multi-electrode resistivity imaging surveys, Near Surface Geophysics, 1, 3, 143-150.
- Dahlin, T. ve Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity inversion methods over dipole–dipole data, Geophysical Prospecting, 52, 5, 489-514.
- Dalgıç, S., 2003. Tunneling in fault zones, Tuzla tunnel, Turkey. Engineering Geology, 69(3-4), 247-259.

- DeGroot-Hedlin, C. ve Constable, S. C., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, 55, 12, 1613-1624.
- Drahor, M. G., Demirci, A. ve Filiz, E., 2004. 2-D resistivity imaging for shallow subsurface investigations at a historical site, western Turkey, *Journal of Archaeological Science*, 31, 10, 1443-1455.
- Drahor, M. G., Demirci, A. ve Filiz, E., 2005. Assessment of groundwater contamination using 2-D electrical resistivity imaging, A case study from western Turkey, *Environmental Geology*, 48, (4-5), 649-657.
- Duran, A., Yılmaz, B. ve Kaya, C., 1988. Türkiye'nin Tersiyer Stratigrafisi, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Yayınları, Ankara.
- Duran, A., Yılmaz, B. ve Kaya, C., 1989. Doğu Anadolu Bölgesi'nin Jeolojisi, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Yayınları, Ankara.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş. ve Şaroğlu, F., 2013. Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası Ölçek 1:1.250.000, MTA Özel yayınlar serisi, 30, 89.
- Fairhurst, C., 2003. Stress Estimation in Rock: A Brief History and Review, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1, 40, (7-8), 957-973.
- Ghadimi Chermahini, A. ve Tahghighi, H., 2023. Numerical finite element analysis of underground tunnel crossing an active reverse fault, a case study on the Sabzkouh segmental tunnel, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149, 12.
- Griffiths, D. H. ve Barker, R. D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and its application to landfill investigations, *Journal of Applied Geophysics*, 29, (3-4), 211-226.
- Griffiths, D. H., Turnbull, J. ve Olayinka, A. I., 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array, *First Break*, 1 8(4), 121-129.
- Grimstad, E. ve Barton, N., 1993. Updating the Q-system for NMT. In *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, 46-67.
- Günther, T., Rücker, C. ve Spitzer, K., 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography-Part 1: Modelling, *Geophysical Journal International*, 166, 2, 495-505.
- Herece, E., 2003. Doğu Anadolu Fayı (DAF) Atlası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi No: 5. (Daha sonra 2008'de Özel Yayın Serisi No: 13 olarak güncellenmiştir.), Ankara.
- Hoek, E. ve Brown, E. T., 1980. *Underground Excavations in Rock*, CRC Press, London, England.

- Hu, H., Lan, Y., Liu, Y. ve Qiu, W., 2023. Experimental study on the damage performance and forced response of concrete lining in fault-crossing tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 131, 104816.
- Kan, A., 2013. Güneydoğu Anadolu Ofiyolitlerinin Petrojenezi ve Tektonik Evrimi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Karahan S., Büyükdemirci B. ve Gökçeoğlu, C., 2024. 6 Şubat 2023 Türkiye Depremleri Sırasında İki Demiryolu Sanat Yapısının Sismik Performansı ve Rehabilitasyon Çalışmaları, *International Conference Commemorating The 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes*, Adıyaman, Türkiye.
- Karahan, S., Posluk, E., Büyükdemirci, F. B. ve Gokceoglu, C., 2025. Re-design of a railway tunnel intersected by surface rupture of the Erkenek fault segment during the 6 February 2023 Pazarcık (Mw 7.7) Earthquake (Türkiye), *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84, 198.
- Ketin, İ., 1959. Türkiye'nin orojenik gelişimi, *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi*, 53, 78-89.
- Ketin, İ., 1966. Türkiye'nin genel tektonik haritası ve başlıca yapısal üniteleri, *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi*, 66, 1-8.
- Koefoed, O., 1979. *Geosounding Principles, 1: Resistivity Sounding Measurements*, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. ve Poulos, H. G., 1977. Stress-deformation and strength characteristics, State-of-the-art report, *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol. 2, 421-494.
- Li, H., Li, X., Yang, Y., Liu, Y. ve Ma, M., 2023. Structural Stress Characteristics and Joint Deformation of Shield Tunnels Crossing Active Faults. *Applied Sciences*, 13, 21, 11799.
- Liu, J.-g., Zhou, X.-j., Xiao, Q.-h. ve Zhao, W., 2023. Fault-Related İnstability Problems Of Tunnels-The Host Rock Slip Criterion And Charecteristic Of The Tunneling-İndued Shear Displacement, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15, 6, 1200-1215.
- Loke, M. H. ve Barker, R. D., 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, *Geophysical Prospecting*, 44, 1,131-152.
- Loke, M. H. ve Barker, R. D., 1996b. Practical aspects of electrical imaging surveys over landfills, *Geophysical Prospecting*, 44, 5, 899-923.

- Mohamed, T. ve Nasr, A., 2020. Evaluating fault stability near tunnels: a numerical parametric study and a dimensionless safety approach, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103267.
- Olayinka, A. I. ve Yaramancı, Ü., 2000. Optimisation of electrode arrays for 2-D electrical imaging, *Geophysical Prospecting*, 48, 5, 833-846.
- Öğrenmiş, Z., 2001. Adıyaman ve Çevresinin Jeolojisi ve Mühendislik Jeolojisi Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Özdemir, A., 2008. Jeofizik Yöntemler, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography using boreholes, *Geophysical Prospecting*, 40, 4, 453-464.
- Sheorey, P. R., Biswas, A. K. ve Sinha, A., 2001. An empirical approach to predict the horizontal stress in Indian coalfields, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 5, 701-707.
- Sorensen, K. K. ve Okkels, N., 2013. Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays, 1 *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2715-2718.
- Sönmez, H. ve Ulusay, R., 2002. The modified RMR system and its application to the stability assessment of rock slopes, *Engineering Geology*, 66, 3-4, 205-218.
- Stroud, M. A., 1975. The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks, *Proceedings of the Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties*, Vol. 1, 347-365.
- Stummer, P., 2003. *Applied Geophysics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Şengör, A. M. C., 1980. Türkiye Neotektoniğinin Esasları, *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 23, 1, 1-40.
- Şengör, A. M. C., 1984. The Cimmeride orogenic system of Eurasia: structure, tectonics, and geodynamic evolution, *Geological Society of America Special Papers*, 195, 1-82.
- Şengör, A. M. C. ve Yılmaz, Y., 1983. Türkiye'nin tektonik evrimi ve orojenik gelişimi, *Türkiye Jeoloji Dergisi*, 33, 1-32.
- Tacim, G., Posluk, E. ve Gokceoglu, C., 2023. Importance of grouting for tunneling in karstic and complex environment (a case study from Türkiye). *International Journal of Geo-Engineering*, 14(1), 6, URL Adres: <https://doi.org/10.1186/s40703-023-00183-0> Erişim tarihi: 17.03.2025.
- Terzaghi, K., 1946. Rock defects and loads on tunnel supports, In *Rock Tunneling with Steel Supports*, 17-99.

- Tripp, A. C., Hohmann, G. W. ve Swift Jr, C. M., 1984. Two-dimensional resistivity inversion, *Geophysics*, 49,10, 1708-1717.
- T.C. Resmi Gazete, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (30364 mükerrer), 18.03.2018.
- U.S. Navy, 1971. Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, NAVFAC DM-7. Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command.
- Ulusay, R., 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Genişletilmiş Baskı 4, 38, 385.
- Van Nostran, R. G. ve Cook, K. L., 1966. Interpretation of resistivity data, United States Geological Survey Professional, 499.
- Van Overmeeren, R. A. ve Ritsema, I., 1988. Continuous electrical profiling for detecting cable and pipe lines, *First Break*, 6, 3, 187-194.
- Wang, Q., Chen, G., Guo, E. ve Ma, Y., 2023. Nonlinear Analysis of Tunnels Under Reversed Fault. *Journal of Geotechnical Engineering*, 45, 3, 210-225.
- Wang, W.L., Wang, T.T., Su, J.J., Lin, C.H., Seng, C.R. ve Huang, T.H., 2001. Tunnelling in Taiwan: Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16, 4, 331-340.
- Xia, C., Wang, Z., He, Y., Chen, Y., Li, C., Shi, L. ve Zhao, C., 2023. Seismic response of mountain tunnel induced by fault slip, *Scientific Reports*, 13, 1, 19858.
- Xia, J., Miller, R. D. ve Park, C. B., 1999. Surface wave inversion for near-surface site characterization, *Geophysics*, 64, 5, 1641-1651.
- Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., Ivanov, J. ve Tian, G., 2004. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves, *Geophysics*, 69, 6, 1365-1372.
- Xu, L., Du, X., Huang, J., Zhao, M., El Naggar, M. H. ve Zhao, X., 2021. Generalized solution for tunnel longitudinal response to fault movement, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 114, 103986.
- Yan, G., Zhao, B., Wang, Z. ve Gao, B., 2016. Simplified analytical solution for responses of fault-crossing tunnels with flexible joints under fault movement, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 213-223.
- Yan, Y.-S., Chen, Y.H., Wang, C.C., Hwu, Y., Lee, Y.C., Sheu, H.S. ve Chiang, C.C., 2016. Faults caused by the fault: Microstructural and mineral characterization of deformation in Chungliiao Tunnel, Taiwan, caused by Chishan Fault, *Engineering Geology*, 207, 1-14.

- Yao, C., Luo, W., Zhang, Y., He, C., Li, Y., Yang, W., Liu, Y. ve Yuan, R., 2023. Inclined rigid sliding walls to protect tunnels subjected to reverse faulting, Tunnelling and Underground Space Technology, 131, 104853.
- Yönlü, Ö., 2012. Doğu Anadolu Fay Zonunun Gölbaşı (Adıyaman) İle Karataş (Adana) arasındaki kesiminin geç kuvaterner aktivitesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yu, H., Chen, J., Bobet, A. ve Yuan, Y., 2014. Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake, Tunnelling and Underground Space Technology, 40, 1-13.
- Zhang, X., Wang, M., Li, Z., Yu, L. ve Yang, H., 2020. Mechanical response of tunnels crossing active fault zones under normal or reverse faulting: A refined nonlinear analytical approximate solution, Tunnelling and Underground Space Technology, 97, 103252.
- Zhang, X., Yu, L., Wang, M. ve Yang, H., 2020. A mechanical analysis model for tunnels under strike-slip faulting considering the fault zone width and nonlinear tunnel-stratum interaction, Tunnelling and Underground Space Technology, 97, 103252.
- URL-1 <<http://tdth.afad.gov.tr>>, Erişim tarihi: 27.03.2025.
- URL-2 <<https://deprem.afad.gov.tr/content/137>>, Erişim tarihi: 29.03.2025.
- URL-3 <<http://yerbilimleri.mta.gov.tr/>>, Erişim tarihi: 30.03.2025.
- Hoek, E., 2000, Rock Engineering Course Notes, Rockscience Web Site, URL adres: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf> Erişim tarihi: 31.03.2025.
- Hoek, E. ve Brown, E. T., 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength, Rocscience Web Site, URL adres: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/1997-Practical-Estimates-of-Rock-Mass-Strength.pdf> Erişim tarihi:31.03.2025.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Fatih Burak BÜYÜKDEMİRCİ

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Müh. Bölümü, 2009-2013

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Jeoloji Müh. Anabilim Dalı, 2022-2025

MESLEKİ DENEYİM

1. DSİ 5. Bölge Müdürlüğü / Yaz Stajı (2012)
2. TCDD Genel Müdürlüğü / Demiryolu Yapım Dairesi Bünyesinde Kontrol Şefi 2015-Devam ediyor.

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR ve SUNUMLAR

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Bulletin of Engineering Geology and the Environment (2025) 84:198
<https://doi.org/10.1007/s10064-025-04217-y>

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. "International Conference Commemorating the 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes"
2. "2nd International Conference Commemorating the 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes."
3. 77. Uluslararası Katılımlı Jeoloji Kurultayı (2025)
4. Isarc 7. International Mediterranean Scientific Research and Innovation Congress (2025)