T.C

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KRALKIZI – DİCLE CAZİBE SULAMASI DÖRDÜNCÜ ANA KANALI T1 VE T2 TÜNELLERİNİN MÜHENDİSLİK PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Gürkan ERDAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Nisan-2017

T.C

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Gürkan ERDAL tarafından yapılan "Kralkızı-Dicle Cazibe Sulaması Dördüncü Ana Kanalı T1 ve T2 Tünellerinin Mühendislik Parametrelerinin İncelenmesi" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Maden Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir

Jüri Üyesinin

	Ünvanı Adı Soyadı	
Başkan:	Prof. Dr. Ahmet DAĞ	
Üye :	Prof. Dr. Mustafa AYHAN	
Üye :	Doç. Dr. Askeri KARAKUŞ	

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 14/04/2017

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../2017

Doç.Dr.Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜR V.

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Araştırma konusunun belirlenmesinde, araştırmanın yürütülmesi sürecinde bilimsel ve her tür katkılarıyla yardımcı olan, eğitimim süresince hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa AYHAN'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca, çalışmalarımda bana desteklerini eksik etmeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Şefik İMAMOĞLU hocama ve Arş. Gör. Deniz AYDIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR I
İÇİNDEKİLER II
ÖZET IV
ABSTRACT V
ÇİZELGE LİSTESİ VI
ŞEKİL LİSTESİ VII
KISALTMA VE SİMGELER IX
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ÖZETLERİ 3
3. YERALTI YAPILARI OLARAK TÜNELLER 9
3.1. Türkiye'de ve Dünya'da Tünelciliğin Gelişimi 9
3.2. Tünellerin Sınıflandırılması 12
3.2.1. En kesitlerine Göre Tüneller 12
3.2.2. Yapım Amacına Göre Tüneller 13
3.2.3. Yapım Yöntemlerine Göre Tüneller 13
3.2.3.1. Aç-Kapa Tünel Açma Yöntemi 13
3.2.3.2. Delme-Patlatma Tünel Yöntemi 14
3.2.3.3. Mekanize Kazı Yöntemleri 16
3.3. Yeraltı Kazılarında Meydana Gelen Önemli Jeolojik Sorunlar Ve Çözüm Yolları .. 20
3.3.1. Zemin ve Kayanın Genel Niteliği 21
3.3.2. Ana Zayıflık Düzlemlerinin Yönlenimi 22
3.3.3. Kayanın Ayrışması 22
3.3.4. Yerinde Kaya Gerilmesi 22
3.3.5. Yer Altı Suyu 25
3.3.6. Litoloji ve Sertlik 25
3.3.7. Araştırma Yöntemleri 25
3.4. Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri 26
3.4.1. RQD Kaya Kalite Göstergesi 27
3.4.2. RMR Kaya Kütle Sınıflama Sistemi 28
3.4.3. Terzaghi Sınıflandırması 28
3.4.4. Q Sınıflaması 36
3.5. Yeraltı Yapılarının Tahkimatı 41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI 43

4.1. Çalışma Alanı 43
4.2. Genel Jeoloji 45
4.2.1. Şelmo Formasyonu (Tş) 47
4.2.2. Deprem Durumu 47
4.2.3. Hidrojeoloji 48
4.3. Proje Özellikleri ve Tünel Güzergahında Yapılan Jeoteknik Çalışmalar 48
4.3.1. T1 Tünelinde Yapılan Çalışmalar 49
4.3.2. T2 Tünelinde Yapılan Çalışmalar 53
4.3.3. T1 ve T2 Tünellerinde Uygulanan Kazı Yöntemi 55
4.3.4. T1 ve T2 Tünellerinde Öngörülen Destekleme Yöntemi 56
4.4. T1 ve T2 Tünellerinde Karşılaşılan Sorunlar ve Çözümleri 59
4.4.1. T1 Tüneli 59
4.4.1.1. Su Geliri ve Zemin Batması 60
4.4.1.2. Yanal Kapanmalar 63
4.4.1.3. Tavanda Oluşan Akmalar ve Göçükler 68
4.4.1.4. Süren Uygulamaları 71
4.4.2. T2 Tüneli 73
4.5. Tünellerin Kazı ve Destekleme Performansları Değerlendirilmesi 76
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 79
6. KAYNAKLAR 81
ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

KRAL KIZI – DİCLE CAZİBE SULAMASI DÖRDÜNCÜ ANA KANALI T1 VE T2 TÜNELLERİNİN MÜHENDİSLİK PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gürkan ERDAL

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
2017

Bu çalışmada Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) projesi kapsamında yer alan ve Devlet Su İşleri 10. Bölge Müdürlüğü tarafından Ufuk İnş. Mühendislik Müşavirlik ve Tic. Ltd. Şti.'ne inşaa ettirilen Kralkızı Dicle 1. Merhale Projesi Kralkızı-Dicle Cazibe Sulaması 4. Kısım içinde yer alan T1 ve T2 tünellerinin yapımı incelenmiştir.

Yapılan jeoteknik etüt çalışmalarının tünel ortamını yansıtmaması nedeniyle ilk olarak açılan T1 tünelinde; göçük, akma, taban kabarması, yanal kapanma problemleri yaşanmıştır. Bunun sonucunda bekleme süresi ve maliyetlerde artışlar gözlenmiştir.

Çalışma kapsamında, tünel açımı esnasında elde edilen verilere de dayanılarak T1 tünelinde yaşanan problemlerin aşılmasında kullanılan yöntemler ve alınan önlemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. T1 tünelinde kazanılan deneyimden sonra açılan T2 tünelinde alınan önlemler sayesinde ilerleme hızı artmış, T1 tünelinde yaşanan sorunlar bertaraf edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Tünel, Kazı, Destekleme, Göçük, İksa

ABSTRACT

INVESTIGATION OF ENGINEERING PARAMETERS OF THE FOURTH MAIN CHANNEL T1 AND T2 TUNNELS OF KRALKIZI-DİCLE CAZİBE SULAMASI

MSc THESIS

Gürkan ERDAL

INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DICLE UNIVERSITY DEPARTMENT OF MINING ENGINEERING

2017

In this study, the construction of T1 and T2 irrigation tunnels in Kralkızı - Dicle Gravity Irrigation 4th Section within the scope of Southeastern Anatolia Project has been investigated. Dent, flow, floor heave, lateral closure problems were occurred due to the fact that the geotechnical survey studies do not reflect the tunnel environment in the T1 tunnel that was opened first. This has resulted in an increase in standby time and cost.

In the scope of the study, the methods and the precautions taken to overcome the problems during the tunnel opening are explained in detail based on the data obtained in the T1 tunnel. Thanks to the measures taken in the T2 tunnel opened after the experience gained in the T1 tunnel, the advance rate has been increased and the problems occurred in the T1 tunnel have been eliminated.

Key Words: Tunnel, Excavation, Supporting, Dent, Shoring

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 3.1	Tünel kazısı ve desteklemesi için kayaçların sınıflandırılması	30
Çizelge 3.2	RMR Kaya kütle sınıflama sistemi (Bieniawski 1989)	31
Çizelge 3.3	Eklem yönlenimine göre düzeltme	32
Çizelge 3.4	Kaya sınıflamaları ve dereceleri	32
Çizelge 3.5	Kaya sınıflama yorumları	33
Çizelge 3.6	Tünelde süreksizlik eğim ve eğim yönünün etkisi tablosu	33
Çizelge 3.7	Süreksizlik yönelimine göre düzeltme tablosu	34
Çizelge 3.8	Kaya sınıfları ve puanlan tablosu	34
Çizelge 3.9	RMR Sistemine göre tünel kazıları ve desteklemeleri	35
Çizelge 3.10	Q Sistemi parametreleri	38
Çizelge 3.10	(Devamı)	39
Çizelge 3.10	(Devamı)	40
Çizelge 3.10	(Devamı)	41
Çizelge 4.1	İnceleme alanı ve çevresi genelleştirilmiş stratigrafik kesiti	46
Çizelge 4.2	Proje özellikleri	48
Çizelge 4.3	T1 tünel ekseninde açılan sondajlardan elde edilen veriler	50
Çizelge 4.4	T1 ve T2 nin RMR kaya kütle sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi	52
Çizelge 4.5	T2 tünel ekseninde açılan temel sondajların yeraltı suyu durumu	55
Çizelge 4.6	T1 ve T2 tünellerinin ilerleme hızları	76

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 3.1	Manş tüneli	10
Şekil 3.2	Thames tüneli	10
Şekil 3.3	Fréjus demiryolu tüneli	11
Şekil 3.4	New York metrosu	11
Şekil 3.5	(a), (b), (c), (d) ‘de Çeşitli enkesit şekilleri	12
Şekil 3.6	Aç-Kapa tünel açma yöntemi	14
Şekil 3.7	Jumbo makinesi	15
Şekil 3.8	Del-Patlat tünel açma yönteminde kazı ve destekleme akım şeması	15
Şekil 3.9	Tünel açma makinası	16
Şekil 3.10	Kalkanlı bir TBM’in genel görünüşü	17
Şekil 3.11	Küresel ve konik galeri açma makinası	18
Şekil 3.12	NATM kazı yöntemi	19
Şekil 3.13	Şıkıştırma/Basma gerilmesi (Compressive stress)	23
Şekil 3.14	Çekme gerilmesi (Tensile stress)	24
Şekil 3.15	Makaslama gerilmesi (Shear stress)	24
Şekil 3.16	Burulma gerilmesi (Torsional Stress)	24
Şekil 3.17	Kaya kalite göstergesi (RQD)	27
Şekil 3.18	Terzaghi'nin tünel kaya yük kavramı	29
Şekil 4.1	Kralkızı-Dicle 1. Merhale Projesi Kralkızı-Dicle Cazibe Sulaması	43
Şekil 4.2	Proje alanı yer bulduru haritası	44
Şekil 4.3	Proje alanının deprem bölgeleri haritasındaki yeri	47
Şekil 4.4	T1 tüneli plan görüntüsü	51
Şekil 4.5	T1 tünelinde yapılan jeoteknik sondajlar	51
Şekil 4.6	T2 tüneli plan görüntüsü	54
Şekil 4.7	T2 tünelinde yapılan jeoteknik sondajlar	54
Şekil 4.8	Hidrolik kırıcı	55
Şekil 4.9	Yükleyici ile pasa nakli	56
Şekil 4.10	4 nolu Kaya sınıfı destekleme	57
Şekil 4.11	5 nolu Kaya sınıfı destekleme	58
Şekil 4.12	6 nolu Kaya sınıfı destekleme	58
Şekil 4.13	T1 tünelinde yaşanan problemlerin tünel boy kesitindeki kilometreleri	59
Şekil 4.14	Tünel tabanında suyun birikimi	61

Şekil 4.15 Tünel tabanında kaya dolgu uygulaması 62
Şekil 4.16 Tünel tabanında drenaj kanallarının yapımı 62
Şekil 4.17 Tavanda yaşanan akma (boşalma) 63
Şekil 4.18 Yan duvarlarda akmalar 64
Şekil 4.19 İksaların yanal basınçlar nedeniyle bükülmesi 65
Şekil 4.20 İksa ayaklarındaki kapanmanın şematik gösterimi 65
Şekil 4.21 Bükülen iksaların (taranana) traşlanan kesimleri 66
Şekil 4.22 İksa ayaklarının gergiler ile sabitlenmesi 67
Şekil 4.23 İksa ayaklarının küp kalıplara alınarak sabitlenmesi 67
Şekil 4.24 İksaların eğildiği bölümler ve birimler 68
Şekil 4.25 Tünelin güzergahında meydana gelen göçüğün plan görünüşü 70
Şekil 4.26 Oluşan göçüğün kesit görünüşü 70
Şekil 4.27 Göçük bölgesindeki enjeksiyon uygulaması 71
Şekil 4.28 Süren uygulaması 72
Şekil 4.29 Süren kesiti 73
Şekil 4.30 T2 tünelinde yaşanan problemlerin tünel boy kesitindeki kilometreleri 75
Şekil 4.31 T1 tünelinde her bir kazı periyodu için yapılan işlemlerin oransal dağılımı 77
Şekil 4.32 T2 tünelinde her bir kazı periyodu için yapılan işlemlerin oransal dağılımı 77

KISALTMA ve SİMGELER

m^3 **:** Metreküp

mm **:** Milimetre

cm^3 **:** Santimetreküp

RQD **:** Kaya kalite göstergesi

Jn **:** Eklem takım numarası

Jr **:**Eklem pürüzlülük numarası

Ja **:** Eklem ayrışma numarası

Jw **:** Eklem suyu azalım faktörüdür

SRF **:** Gerilme azalım faktörüdür

B **:** Tünelin tabandaki genişliği

Ht **:** Tünelin yüksekliği

HP **:** Kaya yükü (m)

Gw **:** Yeraltı suyu durumu

OI **:** Süreksizliklerin konumu

Jc **:** Süreksizliklerin durumu

Js **:** Süreksizlik aralığı

σc **:** Kaya örneğinin tek eksenli basınç dayanımı

Q **:** Kaya Kütle Kalitesi

SK **:** sondaj Kuyusu

l/s **:** Litre, saniye

Yas **:** Yeraltı suyu

kN **:** Kilo Newton

Mpa **:** Mega Pascal

1. GİRİŞ

Tüneller, altyapı sistemleri içerisinde geçmişten bugüne değin ulaşım, baraj ve maden arama-işletme gibi amaçlarla çok yaygın olarak kullanılmış, gelişen teknoloji ve yapım metotları ile birlikte özellikle yolların geometrik standartlarının yükseltilmesi açısından önemli bir yere sahiptirler.

Günümüzde; nüfus artışının neden olduğu kullanım alanlarının daralması problemi, yer üstünün olduğu kadar yeraltının da kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Yeraltı yapıları ulaşım, enerji ve sulama tesisleri, çeşitli atıkların veya kaynakların depolanması, madencilik gibi alanlarda birçok açıdan büyük önem taşımaktadır. Teknolojinin ilerlemesi ve sanayinin gelişmesi, kentli nüfusun göçle birlikte artışı nedeniyle özellikle insanların hem iş yaşamında hem de günlük hayatlarında ulaşımının daha kısa zamanda ve konforlu bir şekilde yapılması, içme suyu, atık sular, iletim hatları gibi genel sistemlerin yeraltına alınmasını zaruri hale getirmiştir. Yeraltında inşa edilmesi düşünülen bu yapılar teknolojide meydana gelen hızlı gelişmeler sayesinde tünelcilik uygulamalarında yeni yöntemlerin ve çözüm yollarının da gelişmesini sağlamıştır. Bu gelişmelerin en etkili olduğu alanlardan biri olan tünelcilik faaliyetleri ülkemizde de son yıllarda büyük bir ivme kazanmıştır. Gelişen makine sanayi ile birlikte tünel açma yöntemleri önemli gelişmeler kaydetmiş, hızlı, ekonomik ve güvenli tünel açma imkânları doğmuştur. Özellikle ulaşım sektöründe karayolu ve demiryolu güzergâhlarının bir kısmının tüneller ile yeraltından geçirilmesi ve barajlardan elde edilen suların iletim hatları ile tarımsal alanda da ivmelenmeye büyük katkılar sunmaktadır (Aktaş 2009).

Tüneller projelendirme ve yapım aşamalarında mühendislik jeolojisi, kaya mekaniği, zemin mekaniği gibi farklı disiplinlerin birlikte değerlendirilmesiyle yapılan kazı işlemleri olarak değerlendirilebilmektedir.

Bu çalışmada GAP projesi kapsamında yer alan Kralkızı Dicle 1. Merhale Projesi Kralkızı-Dicle Cazibe Sulaması 4. Kısım Ana Kanalı sulama T1 ve T2 tünellerinin inşası sırasında yaşanan sorunlar, ön jeolojik etüt çalışmalarının yetersizliği ve imalat sürecinde karşılaşılan sorunların çözümünde uygulanan kazı ve destekleme yöntemlerinin mühendislik jeolojisi açısından bir değerlendirmesi yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yıldırım (2009), Türkiye'de, özellikle İstanbul ve Ankara'da yapılmakta olan metro inşaatlarında uygulanan tünel kesitleri ve kil zemin koşullarındaki davranışları çevresel koşulları dikkate alarak hesaplamıştır. Ankara'daki metro inşaatında çift hatlı metro tünelleri, İstanbul'da aynı güzergahta bulunan farklı kil koşullarındaki çift hatlı metro tünelleri esas alınarak konu irdelenmiştir. İstanbul'daki tünellerden Yenikapı bölgesi tünel uygulaması ile Ankara metrosu tünel uygulaması şişme özelliği yüksek olan kil koşullarında, Süleymaniye Bölgesi'nde ise farklı tip tünel kesitleri kullanılarak, normal durumları ile iyileştirme koşulları dahil edilerek toplam yedi adet analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları, kildeki değişimler baz alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre farklı özellikteki killerde güvenli bir kazı için gerekli olabilecek önlemler belirtilmiştir.

Satır (2007), Doğu Karadeniz Bölgesinde yapılmakta olan Doğu Karadeniz Sahil Devlet Yolu üzerinde bulunan "Trabzon 2 ve Arhavi" tünellerinde oluşan deformasyonların, jeodezik, geoteknik ve Sonlu Eleman Yöntemi gibi farklı yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece farklı yöntemlerden belirlenen sonuçlar irdelenerek deformasyonların daha gerçekçi yorumlanması yapılmıştır.

Aktaş (2009), İstanbul Büyük Şehir Belediyesi tarafından KİSKA- MAKYOL (KİSMAK) adi ortaklığına inşaa ettirilen ve EMAY Uluslararası Mühendislik Müşavirlik ve Tic. Ltd. şirketi tarafından projelendirilen "Kağıthane- Piyalepaşa Tünelleri" incelenmiştir. Öncelikle tünel güzergahı jeolojik ve geoteknik açıdan değerlendirilmiştir. Yapılan sondajlar ve laboratuar deneyleri sonuçlarına göre tünel güzergahı boyunca yer alan jeolojik birimler tanımlanmış ve bu birimlere ait yerinde (in-situ) kaya dayanım parametreleri belirlenmiştir. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi esasları gözetilerek inşa edilen bu tünellerin sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda inceleme konusu tünellerin yeraltında ve yer üstünde yol açması beklenilebilecek yer değiştirmelerin izin verilebilir sınırlar içinde kalacağı, herhangi bir göçme olasılığı bulunmadığı ve önerilen iksa elemanlarının yeterli olacağı anlaşılmıştır. Farklı değişkenlerin tünel ve çevresine etkilerini incelemek için oluşturulan modeller üzerinde PLAXIS 3D TUNNEL sonlu elemanlar programı ile yapılan analiz sonuçları değerlendirilerek tünellerin güvenli bir şekilde açılmasında önemli yer tutan parametrelerin olası etkileri ortaya konmuştur.

Polat (2010), Yeni Avusturya Tünel Açma Metodunun yanı sıra, tünelcilikte kullanılan diğer metotlarda ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada NATM metodu ile yapılan, Karadeniz sahil yolunda yer alan Arhavi tüneli verileri, sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Plaxis 8.2 programı ile modellenmiştir. Yapılan analizler sonuçları değerlendirilerek tünellerin güvenli bir şekilde açılmasında önemli yer tutan parametrelerin olası etkileri ortaya konmuştur.

Satıcı ve Topal (2015), Tünel tasarımında yaygın olarak kullanılan tünel açma yöntemlerinin, uluslararası kabul görmüş kaya kütle sınıflama sistemleri ve sayısal modeller ile olan ilişkisi ve uygulamada yaşanan sorunlar anlatılmaya çalışılmıştır. Uygulamada; kaya kütle sınıflamalarından tünel kazı ve destek sınıflarına geçiş, bunların sayısal modellere yansıtılması, yapılan kabuller ve özellikle sayısal modelleme sırasında yazılımların dayandığı kabullerden kaynaklanan mühendislik jeolojisi modelleme hataları ve doğru tasarım için yapılması gerekenler birer örnek ile açıklanmaya çalışılmıştır.

Eren (2014), Mühendislik yapıları olarak adlandırılan; barajların, tünellerin, yüksek yapıların inşa aşamasındaki ölçümlerin zorunluluğuna dikkat çekilmiştir. Bu denli önemli ve pahalı olan yapıların inşasından sonra da yapıların izlenmesine değinilmiştir. İzleme işlemlerinin yapılabilmesi için uygun görülen aralıklarla ölçümler tekrarlanması gerektiği irdelenmiştir. Bu işlemlerin ardından deformasyon analizinin yapılması ve ölçülen noktalarda anlamlı hareket olup olmadığının belirlenmesi işlemi Hannover Yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonucu mühendislik yapılarında, yapı emniyetini tehlikeye düşürecek derecede hareketin saptanması durumunda yapı emniyeti için önlemler alınması gerektirdiği saptaması yapılmıştır.

Şeker (2008), Cezayir'de bulunan Doğu Batı Otoyolu Projesi kapsamında açılmakta olan ve iki tüpten oluşan Bouira Karayolu Tüneli uygulaması incelenmiş, daha sonrasında ise tünellerden elde edilen verilerle Plaxis yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle tünel tasarımları yapılmıştır. Hesaplarda 2 boyutlu analizler kullanılmıştır. Tünellerin farklı kademelerde inşası modellenerek tünel kaplamalarında ve zemin yüzeyinde oluşacak etkiler anlaşılmaya çalışılmış ve tünellerin birbirlerine olan etkileri araştırılmıştır. Tünel kaplamaları etrafında oluşan kesit tesirleri gözlemlenerek tünel kaplaması statik olarak kontrol edilmiştir. Bu modelleme çalışması sonucunda tünellerin inşası sırasında Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine uygun kademeli kazı yöntemlerinin uygulanmasıyla tünel etrafında

oluşan deplasman değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kademeli kazılar sonrasında oluşan zemin oturmaları incelenmiştir. Tünellerin inşa sırasının değişmesi sonucunda oluşacak olan deplasman değerlerinin de değiştiği gözlemlenmiştir. Yapılan bu analizlerin sonucunda tünel kaplamasındaki ön boyutlandırmalar kontrol edilerek tekrar boyutlandırılmıştır.

Doğruoğlu (2009), Zemin ortamlarında açılan şehir içi tünellerde oluşan zemin yer değiştirmeleri ve düşey deplasmanları incelenmiştir. Farklı örtü kalınlıklarına sahip ikiz tüneller üzerinde oluşan yüzey deplasmanlarının dağılımı değişik sayısal analiz yöntemleri ile değerlendirilmiştir.

Kaya (2010), İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından planlanan ve inşaatı sürmekte olan "İstanbul Metrosu 4. Levent – Ayazağa Kesimi Bağlantı Hatları ve Depo Sahası İnşaatı" projesinin devamındaki Darüşşafaka – Hacıosman arası ilave kısmında (Hat 1, Km:23+100-24+515 arası) yapılan zemin incelemelerini ve jeoteknik değerlendirmeleri incelennmiştir. Tünel güzergahında kesilecek kaya ve zeminlerin mühendislik özellikleri irdelenmiş; tünel mühendisliği açısından sınıflandırılmaları yapılmış ve birincil desteklerin projelendirilmesine yönelik zemin parametreleri ve destek grupları verilmiştir.

Öngen (2015), 44 km uzunluğundaki İzmir Hafif Raylı Sistemi'nin yaklaşık 5,5 km'lik Üçyol-Fahrettin Altay güzergahını kapsayan kısmının tünel zemin/kaya ilişkilerinin incelenmesi için jeoteknik kesitlerin değerlendirmesi yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeler neticesinde tünel güzergahında ÖNORM kaya sınıfına göre yüzdesel dağılımlar çıkarılmış ve hâkim kaya sınıfı için sayısal modelleme çalışması yapılmıştır. Yapılan modelleme çalışması ile elde edilen sonuçlar yorumlanmış, tünel etrafında oluşan deformasyonlar göz önüne alınarak uygulanan kazı ve destekleme sistemleri değerlendirilmiştir.

Kun (2010), Bu tez çalışmasında zayıf kaya ortamlarında ve fay zonlarında tünel açma, tasarım ve yapım gereksinmeleri, ampirik, analitik, gözlemsel ve sayısal modelleme teknikleri kullanılarak araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda zayıf kayalarda ve fay zonlarında tünel açımında, hangi parametrelerin değerlendirilmesi gerektiği, ampirik, analitik ya da sayısal modellemeler kullanılarak elde edilen verilerin hangisinin yada hangilerinin daha iyi sonuç verdiği, İzmir Metrosu II. aşama Üçyol-Fahrettin Altay güzergahı ele alınarak değerlendirilmiştir.

Emiroğlu (2010), Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) uygulanarak açılan bir tünelde yapılan mühendislik çalışmalarını içermektedir. Bunun için, metroların gerekliliği ve önemimden bahsedilmiştir. Dünya'daki ve Türkiye'deki önceden yapılmış metro çalışmalarına değinilmiş ve kaya sınıflama sistemlerinden bahsedilmiştir. Kaya ve zemin birimlerinin mühendislik özellikleri anlatılmıştır. Elde edilen bilgilerle tünel tipleri ve destekleri belirlenmiştir. Yapılan kazı çalışması ve destek terkiplerinde kullanılan malzeme hakkında bilgiler verilmiştir.

Öztürk-Durmuş (2008), Bayındırlık yapılarından biri olan tünelleri; enkesit şekline, işlevlerine ve yapım şekline göre sınıflandırma suretiyle bu yapılara toplu bir bakış sağlaması amacıyla yapılmıştır. Türkiye'nin coğrafi yapısı ve stratejik önemi bakımından mevcutlarına ilaveten bu yapıların yenilerinin yapımının da gerekli olduğunu göstermesi açısından tünel inşaatlarının yapımı incelenmiştir.

Kılıç (2005), Bu çalışma jeoloji ve jeofizik mühendisliğinin çalışma alanlarından birisi olan kaya mekaniği dersinin içeriğini anlatmak ve kayaların mekanik özelliklerini, davranışını inceleyen teorik ve uygulamalı, disiplinler arası bir bilim dalı olarak önemini anlatmak için yapılmıştır. Kayanın, çevresindeki kuvvet sahalarına karşı davranışlarını inceleyen bir bilim dalıdır. Kaya mekaniği, kaya ortamın ilk durum girdilerini belirleyerek, teknik girişimden sonra oluşacak yeni durumu ve dolayısı ile kaya ile yapı arasındaki karşılıklı ilişkileri inceleyen, belirleyen ve buna bağlı olarak yeraltı kaya yapılarını boyutlandıran teknik bilim dalıdır.

Özbek (2005), Ekonomik ve emniyetli bir tünelcilik, kazı esnasında oluşan deformasyonların sistematik olarak ölçülmesi ve değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu çalışma, Kırkgeçit-1 (Pozantı-Adana) ve Kızlaç (Bahçe-Osmaniye) tünellerinde 3D optik deformasyon ölçüm sistemi kullanılarak elde edilen yer değiştirme vektörü ve yer değiştirme vektör yönelimi değerlerinden yararlanılarak tünel içerisinde oluşabilecek yer değiştirme miktarı ve kazı ilerisindeki kaya koşulları (zayıf kaya, sağlam kaya) hakkında önceden tahminlerin yapılmasını kapsamaktadır. Bu amaçla Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi kullanılarak açılan her iki tünelde yapılan deformasyon ölçümleri ile boyuna ve düşey yer değiştirme bileşenleri belirlenmiştir. Yer değiştirme bileşenleri belirli bir zaman peryodu göz önüne alınarak kümülatif olarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu bileşenlerden yararlanılarak yer değiştirme vektörü ve yer değiştirme vektör yönelimi değerleri elde edilmiştir. Yerdeğiştirme vektör değeri Kırkgeçit-1 tünelinde en yüksek 5.6 mm ve Kızlaç

tünelinde 8.4 mm olarak bulunmuştur. Yer değiştirme vektör yönelimi değerlerinden yararlanılarak her iki tünel için zayıf kaya-sağlam kaya, sağlam kaya-zayıf kaya geçişlerini gösteren eğilimler elde edilmiştir. Bu eğilimlerden yararlanılarak tünel kazısı ve ilerisindeki kaya koşulları hakkında önceden tahminler yapılmıştır.

Karaman, K., Cihangir, F., Demirel, S., Kesimal, A. (2014), Birçok tasarım parametresi arasında kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü (Em) kaya mühendisliği projelerinin başarıyla yürütülmesinde ve tasarımında hayati öneme sahip olan önemli bir parametredir. Ancak, yerinde testler zaman alıcı ve pahalı hatta bazı durumlarda yapılması imkânsız olabilmektedir. Bu sınırlandırmalar, araştırmacıları deformasyon modülünü daha düşük fiyatla kolay bir şekilde diğer kaya kütle özelliklerine (RQD, RMR, Q) dayanarak dolaylı olarak tahmininde ampirik eşitlik geliştirmesine zorlamıştır. Bu çalışmada da kaya kütleleri için ampirik bir eşitlik önerilmiştir. Bu amaca yönelik olarak, bir tünel güzergâhının otuz yedi farklı noktasındaki volkanik, tortul ve metamorfik kaya kütleleri üzerinde çalışılmıştır. Karşılaştırmak amacıyla, literatürde önerilmiş olan altı farklı ampirik eşitlik yardımıyla Em değerleri hesaplanmıştır. Çoklu karşılaştırma ANOVA testleri ayrıca önerilen ve diğer eşitlikler arasında yapılmıştır. ANOVA analizleri bu çalışmada üretilen eşitliğin kaya kütlelerinin Em değerlerinin belirlenmesinde güvenle kullanılabileceğini göstermiştir

3. YERALTI YAPILARI OLARAK TÜNELLER

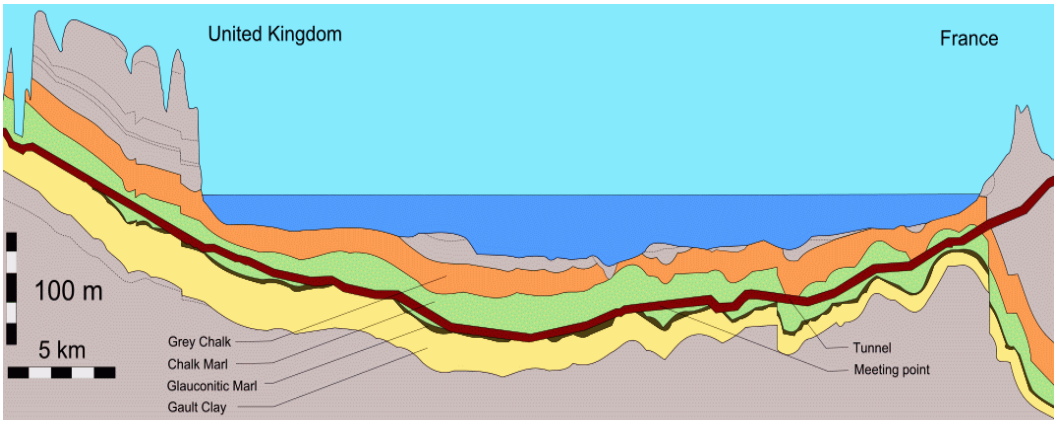
3.1 Türkiye'de ve Dünya'da Tünelciliğin Gelişimi

Tüneller, altyapı sistemi içinde geçmişten bugüne kadar çok yaygın olarak kullanılmış ve gelişen teknoloji ile beraber değişik yapım metotları sayesinde, özellikle ulaşım, tarım ve iletim hatlarında çok esnek çözümler getirmiştir. Barajların yapımında tarımsal amaçlı sulamada şehirlerde kanalizasyon, iletişim ve elektrik hatlarının komplike bir şekilde tek alanda toplanması ile, demir yolları ve karayollarının kentleri birbirine bağlaması gibi daha birçok alanda tünel mutlaka vardır.

Türkiye'de 1970 – 1990 yılları arasında çok şeritli ekspres yollar ve otoyolların yapılmaya başlanması ile tek tüp olarak inşa edilen tüneller çift tüp olarak inşa edilmeye başlanmıştır. 1990'lı yılların sonunda tünel projelendirme ve inşasında Yeni Avusturya tünel açma (NATM) yöntemi kullanılması ile topoğrafik koşullar, jeolojik yapı, güzergâhta kaçınılmak istenilen heyelan, yüksek yarma vb. durumlarla karşılaşılması, iklim şartları ve standardı yüksek yolların yapımına ihtiyaç duyulması nedenleriyle, günümüzde karayollarında yapılan tünel inşaatlarında çok hızlı bir artış olmuştur. Tüneller, gerek projelendirme ve yapım tekniklerinin gelişmesi gerekse edinilen tecrübeler sonucunda yol güzergâhları üzerindeki kritik noktalardaki geçişlerde tercih edilen sanat yapıları haline gelmiştir. Coğrafi konumu nedeniyle bölgesel ve bölgeler arası karayolu bağlantısını sağlamaya yönelik birçok uluslararası projede yer alan ülkemizde, son yıllarda dünyanın ilgi ile takip ettiği modern projelendirme ve yapım teknikleri ile gerçekleştirilen tüneller bir bir işletmeye açılmışlardır.

Dünya'da ise tünelciliğin gelişimi sanayi devrimiyle beraber ortaya çıkan ulaşım ve kaynak ihtiyacı tünellere verilen önemi arttırmıştır. Endüstri devriminin sonucunda 17. yüzyılda İngiltere ve Fransa'da birçok yeraltı su kanalları açılmıştır. Bunu takip eden dönemlerde Güney Afrika'da maden çıkarmak için yeraltı tünelleri açılmaya başlanmıştır (Şeker 2008).

Bir diğer önemli gelişme ise F. Beaumont tarafından bulunan ilk basınçlı hava makinesi ile 1880 yılında Manş denizinin altından keşif galerisi açılmasıdır. Bunu takip eden yıllarda İngiltere ve Fransa'yı birbirine su altından bağlayan Manş Tüneli inşa edilmiştir (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Manş tüneli (Özdemir 2012)

Tünel işlerinde yapılan en önemli gelişmelerden bir diğeri ise; 1823 – 1843 yılları arasında Thames nehri altında açılan tüneldir (Şekil 3.2.). Bu tünelin önemi Fransız mühendis Brunel'in patentini aldığı Bukliye (kalkan-şilt) metodunu ilk kez burada uygulamasından kaynaklanmaktadır. Bu 4.20 m ve 4.80 m çaplarında ikiz tünel olup halen kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Thames tüneli (veribaz.com)

Büyük tünellerin açılması, demiryolunun öneminin artmasına paralel olarak inşaa edilmeye başlanmıştır. İlk demiryolu tüneli Fransa'da 1826 yılında inşaa edilmiştir. Şekil 3.3.'te görüldüğü üzere Fréjus Tüneli bugün Alplerdeki en eski tünellerdendir (Satır 2007).



Şekil 3.3. Fréjus demiryolu tüneli (veribaz.com)

Nitekim bununla beraber 1868 yılında tamamlanan New York metrosu Birleşik Devletler'de ilk yeraltı demiryolu projesidir (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. New York metrosu (veribaz.com)

3.2. Tünellerin Sınıflandırılması

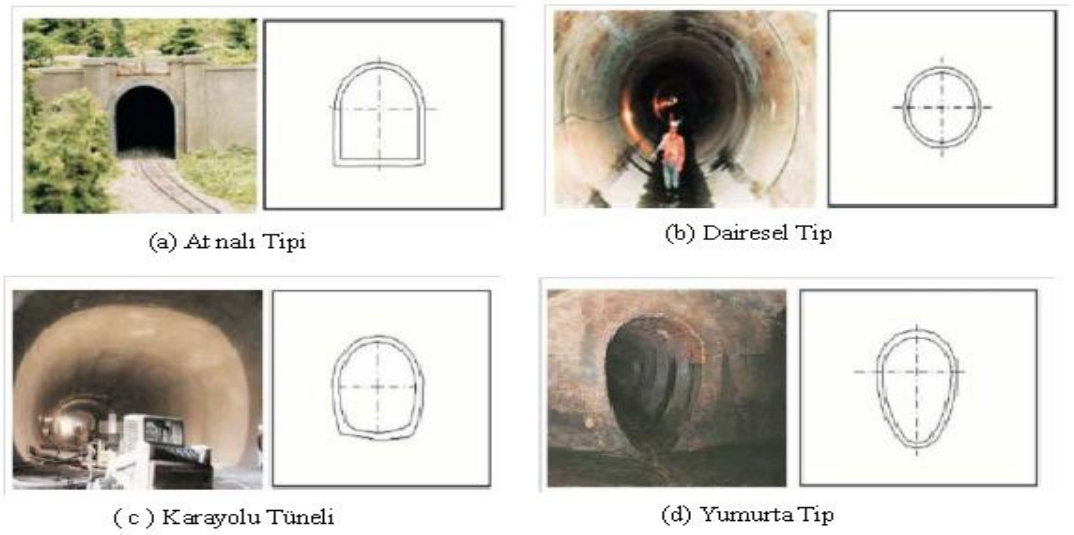
Genel anlamda yer altı geçidi olarak da tanımlanabilen tüneller; enkesitlerine, yapım amacına ve yapım şekline göre sınıflandırılabilmektedir.

3.2.1. Enkesitlerine Göre Tüneller

Tünellere ilişkin enkesit tipleri bunların üzerinde bulundukları ulaşım yolunun cinsine ve bu yol zemininden gelecek etkilere göre değişmektedir. Bunlar kaya ortamlarda genellikle enkesitleri dairesel kemer ve iki düşey yan duvardan oluşacak şekilde inşa edilmektedir. Yumuşak zeminlerde açımı yapılan tünellerin yatay basınçları karşılayacak en kesitlere sahip olması gerekmektedir. Bu tür zeminlerde açılması planlanan tünellerin dairesel veya at nalı şeklinde tasarlanması gerekmektedir. Yuvarlak formda tasarlanan tüneller iç ve dış basınçları en iyi şekilde karşılayan yapılardır. Günümüzde özellikle ulaşım amaçlı tüneller at nalı şeklinde tasarlanmaktadırlar (Öztürk ve Durmuş 2008).

Sel, taşkınlar ve şehir atık sularının, yeraltında oluşturulan tünellerle uzaklaştırılması için yapılan tünellerin enkesitleri ise; yumurta şeklinde olmaktadır.

Köşeli tasarımları sebebiyle dikdörtgen şeklinde yapılan tüneller aç-kapa ve su altı tünellerinde kullanılmaktadır (Aktaş 2009). Aşağıda bu enkesitleri gösterir şekiller verilmektedir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. (a), (b), (c), (d) ‘de Çeşitli enkesit şekilleri (Aktaş 2009)

3.2.2. Yapım Amacına Göre Tüneller

Tüneller yapımı amacına göre karayolu ulaşımı, metro, demiryolu, su ve atık su ile iletim hatlarını meydana getirmek için yapılırlar. Bununla beraber maden işletme ve barajlarda derivasyon tünelleri olarak da tasarlanırlar.

3.2.3. Yapım Yöntemlerine Göre Tüneller

Yapım yöntemine göre tüneller; aç-kapa tünel açma yöntemi, del-patlat ve mekanize kazı yöntemi olarak üçe ayrılmaktadır.

Bu yöntemler kazı aşaması, iksa sistemleri ve kaplama tiplerinin seçimleri konularında farklılık göstermektedir (Polat 2010).

3.2.3.1. Aç-Kapa Tünel Açma Yöntemi

Yüzeye yakın yerlerde kullanılan bir yöntem olan aç – kapa yöntemi, oluşturulan yer altı boşluğunu yan taraflarında fore kazık veya duvar perdesi ile desteklenmesi sonrası, yüzeyden hendek şeklinde kazılarak açılması ile oluşturulur. Bazı kanalizasyon veya içme suyu tünelleri bu yöntemle açılmaktadır. Tünel tavan kısmı kaplamadan sonra kazılan kısım tekrar doldurularak eski haline getirilir. Aç – kapa tünel yöntemi genellikle 10m derinliğe kadar olan işlemlerde etkili bir şekilde uygulanır. Normal tünel açımına göre daha ucuz, güvenli ve uygulaması daha kolaydır. Fakat yerleşim alanlarında, uygulandığında yaya ve araç trafiğini engellemesi, nedeniyle yapımı esnasında sıkıntılar oluşturmaktadır. Şekil 3.6.'da aç-kapa tünel örneği görülmektedir.



Şekil 3.6. Aç-Kapa tünel açma yöntemi (Binay 2016)

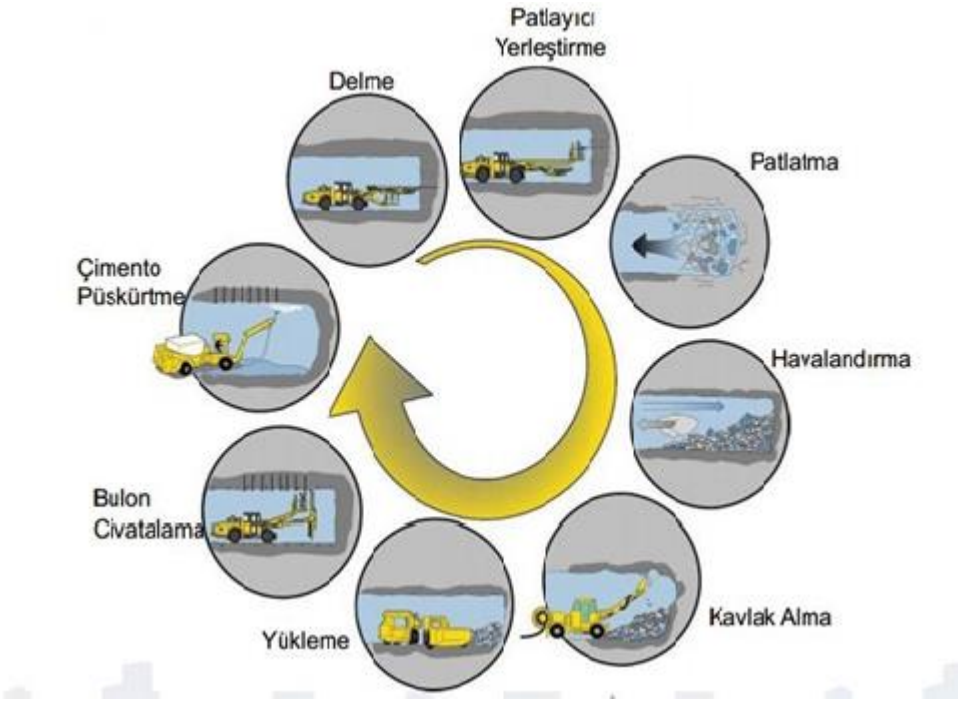
3.2.3.2. Delme Patlatma Yöntemi

Del-patlat yöntemleri genellikle sağlam zemin olarak adlandırılan kaya ortamlarda ve tünel makineleriyle açılması daha zor olan zeminlerde kullanılmaktadır. Kayada açılan bu tür tünellerde ekseriyetle delme patlatma yöntemi ya da değişik türdeki delme araçları kullanılmaktadır. Bu ortamlar kendini taşıyabilir özellikte olması nedeniyle bu tip zeminlerde inşa edilen tünellerde genellikle stabilite sorunlarıyla karşılaşılmamaktadır (Aktaş 2009).

Bu yöntemde genellikle Şekil 3.7.'de yer alan jumbo adı verilen makinelerle tünel aynasına açılan deliklere patlayıcı yerleştirerek patlatılması sonucu tünel açılmaktadır. Şekil 3.8.'de delme patlatma yöntemi şematize edilmiştir (Öztürk ve Durmuş 2008).



Şekil 3.7. Jumbo makinesi



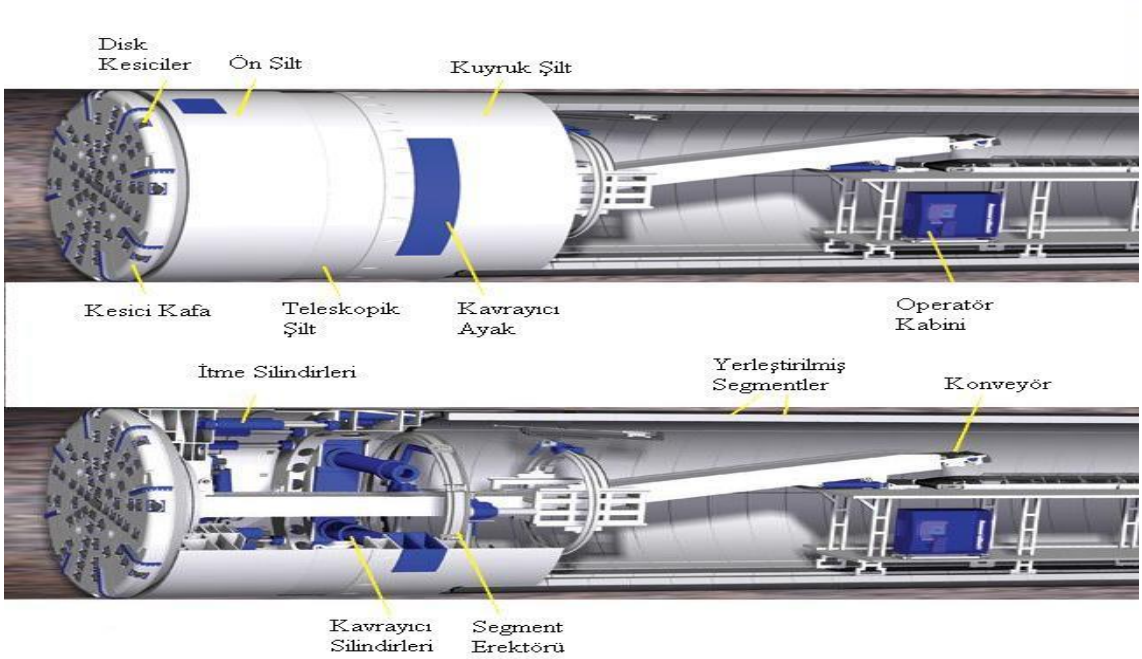
Şekil 3.8. Del-Patlat tünel açma yönteminde kazı ve destekleme akım şeması (Özgen 2013)

3.2.3.3. Mekanize Kazı Yöntemleri

Mekanize kazı yöntemleri tam kesit çalışan ve parçalı kesit çalışan makinelerle açılan yöntemler olarak kendi içinde ikiye ayrılabilir. Tam kesit çalışan diye adlandırılan kazı makineleri TBM'lerdir. Bu makineler kullanılacak zeminlere göre dizayn edilirler. Örneğin çok sert kayada açılacak bir tünel için kalkansız TBM'ler kullanılırken stabilitesi düşük veya yoğun yeraltı suyunun geçişinin olduğu zeminlerde kalkanlı makineler ya da zemin dengeleyici modu bulunan EPB'ler kullanılarak tünel açılmaktadır (Doğruoğlu 2009). Şekil 3.9.'da kalkansız bir TBM ve Şekil 3.10.'da ise; kalkanlı TBM görülmektedir.



Şekil 3.9. Tünel açma makinası (Doğruoğlu 2009)



Şekil 3.10. Kalkanlı bir TBM'in genel görünüşü (Doğruoğlu 2009)

Kaya yapıların dayanımları daha az olduğu yerlerde kazı işlemi tam kesit yerine parçalı olarak yapılabilmektedir. Parçalı kazı, tüneli çevreleyen kaya ortamındaki deformasyonların, istenmeyen oturmalara, gevşemelere ve kaya mukavemetinin azalmasına neden olmayacak kadar küçük olarak gerçekleştirilmesiyle yapılan kazı şeklidir. Kazının parçalı olarak yapılmasındaki neden açılan tünelin destek yerleştirilmeden kendini tutabilmesini sağlayarak bu bölgenin üzerine gelen yüklerin de az olmasını sağlamaktır. Bu şekilde açıldığı takdirde tünelde oluşacak deformasyonlar ve akmalar da bu duruma bağlı olarak azalacaktır. Parçalı kesit tünel açımında kazı işlemi Galeri Açma Makinası (Roadheader), ekskavatör ve hidrolik kırıcı gibi makinalarla yapılmaktadır. Galeri Açma Makinaları, tünel aunasını küresel kafa veya konik kafanın dönmesi ile keserek kazı yapmaktadır. Bu kesici kafa üstünde yumuşak kayadan sert kayaya kadar kesici özellik gösteren çiviler mevcuttur (Şekil 3.11.). Kazı kolu (Boom) vasıtası ile kaya yüzeyine baskı uygulanarak kesici kafa çalışır. Kafa üzerindeki çiviler kayanın cinsi ve kazının miktarına göre hesap edilir (Öngen 2015).



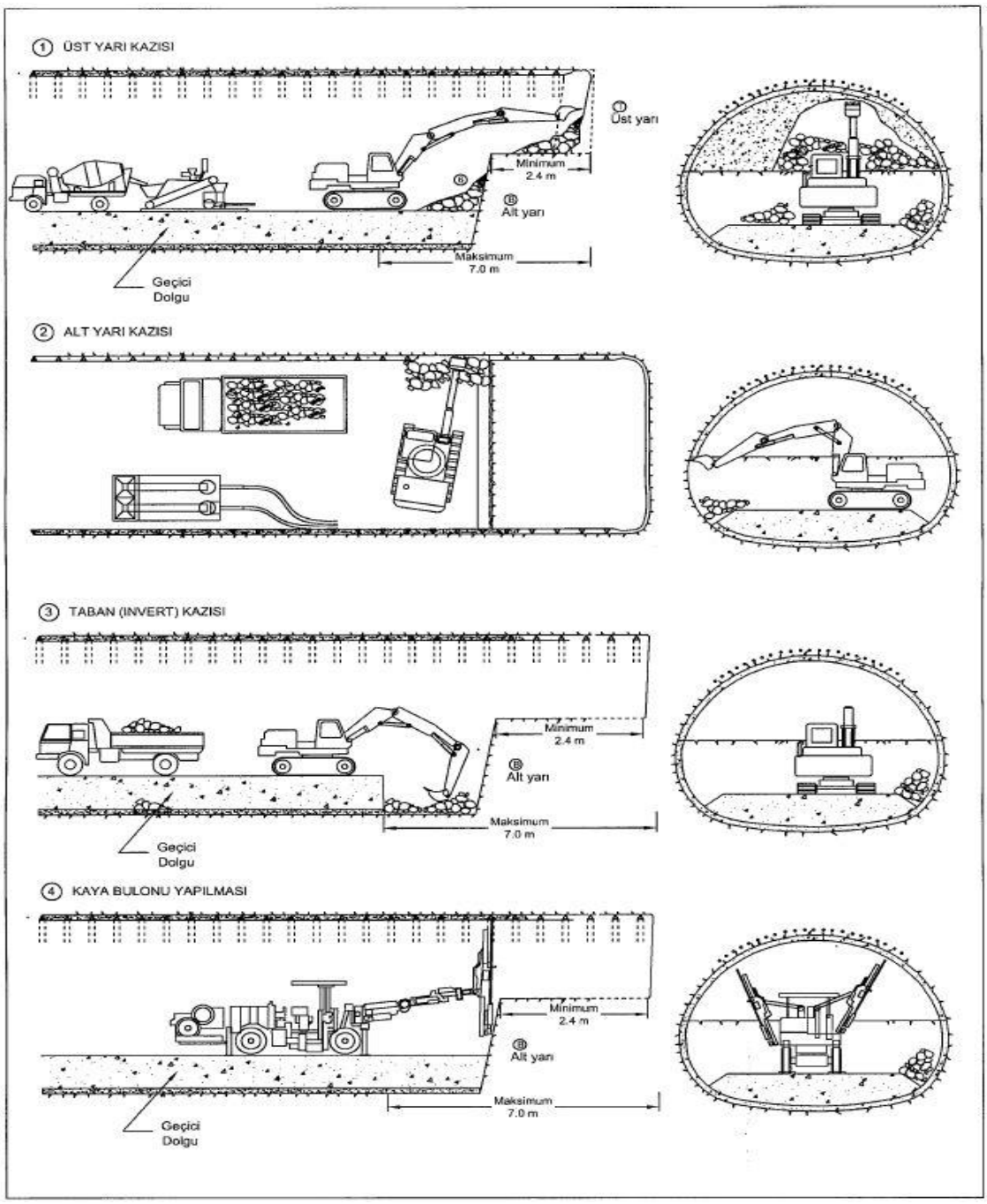
Şekil 3.11. Küresel ve konik galeri açma makinası (Öngen 2015)

Parçalı kazı yönteminde kullanılan makinalarla yapılan tünel açımında belirli bir şekle bağlı kalınmadan kazı işlemi gerçekleştirilirken; diğer tünel açma makinalarına oranla daha güvenli çalışma şartlarının olması, pratik olması, özel ekipmana ihtiyaç olmaması ve TBM'ler göre ilk yatırım ve işletme maliyetinin daha düşük olması, küçük bir çalışma alanında daha az nitelikli iş gücüne ihtiyaç duyması bakımından avantajlıdır. Bu yöntemde delme-patlatmaya oranla çok daha az titreşim meydana gelmektedir. Ekipman arızalarında anında müdahale şansı olduğundan iş uzun süreli kesintiye uğramaz (Öngen 2015). Bahsi geçen makinalarla yapılan parçalı kazı yöntemlerinden en bilineni ve yaygın olanı NATM yöntemidir.

Bu yöntemin ilk ve en önemli ilkesi; zemini kendisine taşıtarak, tünel çevresindeki zeminde kendini destekleyen genişçe bir halka oluşturmaktır (Yıldırım 2009).

NATM'de genel olarak kazı üst yarı, alt yarı, taban (invert) kazısı olmak üzere tünel açımı yapılmaktadır. Tünel açımı sırasında ve sonrasında ikincil deformasyonların ve gerilmelerin gözlenmesi çok önemlidir. Bu açıdan tünel kazısı sırasında düzenli deformasyon ölçümleri yapılarak tünel açma çalışmalarının denetlenmesi ve sonuçlara göre yönlendirilmesi gerekmektedir (Polat 2010). Şekil 3.12.'de bu yöntemde yapılan kazı ve destekleme sistemi görülmektedir.

NATM ile tünel açımı süresince jeoteknik ölçüm ve kontrollerle tünel çevresinde kazı esnasında oluşan yeni basınç dağılımı gözlenebilmekte, tünelin stabilitesi kontrol edilebilmektedir. Ölçüm verilerine göre, uygulanan kazı sırası, destek sınıfı gözden geçirilerek optimize edilebilmektedir (Satır 2007).



Şekil 3.12. NATM kazı yöntemi (http://www.tunelteknolojisi.com/pdfler/mak-1433418388.pdf)

NATM'de birincil destekler olarak kullanılan püskürtme beton, hasır çelik, iksa ve kaya bulonları kaya kütlesiyle birlikte bir bütün halinde yapı oluşturmaktadır. Kaya ve destek elemanlarından oluşan bu sistem, tünel kazı çevresinde oluşan basınçların yeniden dağılımını sağlayarak, kayanın veya zeminin gevşeme sonucu azalmakta olan dayanımını artırarak sağlam bir bölge oluşturmaktadır (Satır 2007).

3.3. Yeraltı Kazılarında Meydana Gelen Önemli Jeolojik Sorunlar ve Çözüm Yolları

Yeraltı kazılarında beklenmeyen jeolojik durumlarla karşılaşılması, tünel yapımında maliyeti arttıran temel faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Tünel açımı esnasında karşılaşılan en yaygın sorun inşası düşünülen tünelin ön araştırma raporlarının yetersizliği konusudur. Bunun nedenleri incelendiğinde genellikle bölgede araştırma verisinin yetersizliğinin yanı sıra tünelcilik konusunda deneyimin az olması söylenebilir. Jeolojik etütlerin detaylı ve yeterli sondaj kuyuları açılmaması ve haritalamanın doğru yapılmaması proje üzerinde tartışmalar meydana getirmektedir. Ülkemizde tünelcilik faaliyetleri yeni olduğundan ötürü bazı yüklenici firmaların bu konularda deneyim eksikliği nedeniyle çeşitli sıkıntılar yaşanabilmektedir (Merrit 1979).

Yeraltında inşası düşünülen projelerdeki yapım güçlüklerinin en önemlileri; açılan zemindeki iksa tipi ve miktarı ile ilerleme yapılırken ortaya çıkan su basıncı ve miktarıdır. Kazı esnasında önceden bilinemeyen ve kazı sırasında ortaya çıkan jeolojik problemler iksa tipinin ve kullanılacak iksa adedinin artışına neden olabilmektedir. Aynı şekilde yer altı suyundan kaynaklı akmalar ve zemin batma problemleri yapımı devam eden projelerde çalışma yöntemlerini, günlük işletmeyi, inşa gereçlerinin temin edilmesini ve tüm projenin ilerleyişini etkilemektedir. Tüm bu problemleri incelediğimizde diğer yapım ve inşaat işlerine göre tünel inşaatlarının risklerinin daha fazla olduğunu görmekteyiz. Tüm inşa işlerinde olduğu gibi; özellikle tünel inşaatlarında yapılması gereken en önemli iş ön fizibilite çalışmalarının doğru ve kapsamlı şekilde yapılmasıdır (Merrit 1979).

Tünel açımında karşılaşılan sorunların genel niteliği aşağıdaki biçimde altı bölümde toplanabilir:

- Zeminin veya Kayanın Genel Yapısı
- Ana Zayıflık Düzlemlerinin Yönlenimi
- Kayanın Ayrışması
- Yerindeki Gerilme
- Yer Altı Suyu
- Litoloji ve Sertlik
- Araştırma Yöntemleri

3.3.1. Zeminin veya Kayanın Genel Niteliği

Daneleri arasında bağlantı bulunmayan veya suyun etkisi ile daneler arasındaki bağlantının koparılabildiği ayrık kayaçlara zemin adı verilmektedir. Büyük kütleli, çimentolu veya kristalli yoğun kayaçlar ise kaya olarak adlandırılır (Vardar ve Koçak 2013).

Kaya kütlesi olarak adlandırılan iyi çimentolanmış boşluksuz yapılar yer altı projelerinde çok az soruna neden olmaktadır. Diğer taraftan zemin diye adlandırılan kayaçlar ise gerilmelerin etkisi, yeraltı su etkileriyle zamana bağlı olarak dayanım ve davranışını önceden tahmin etmek güçleşmektedir. Kaya kütlesinin düşük dayanımı, yüksek deformasyona uğrama özelliği ve heterojenliği, tünel performansının tahminini zorlaştırır (Özbek 2005).

Dolayısıyla ister yeraltı; ister yerüstü yapılar olsun projelendirilirken kaya niteliğini belirlemek en önemli unsurdur. Bunun için birçok kaya kütle sınıflaması yöntemi kullanılmaktadır. Belirlenen kaya kütle sınıfı ile inşaatı yapılacak projenin iksa sisteminin seçimi ve miktarının belirlenmesi sağlanmış olacaktır (Merrit 1979).

3.3.2. Ana Zayıflık Düzlemlerinin Yönelimi

Tünel gibi yeraltı yapılarının inşasında en önemli jeolojik yapıları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Eklemler
- Tabakalanma
- Faylar
- Kayma Bölgeleri
- Metamorfik kayalardaki yapraklanma

Yukarıda konu edilen bu yapısal özellikler, doğru bir şekilde değerlendirildiğinde, açımı yapılacak tünel veya yeraltı yapısında yaşanabilecek aşırı sökülme, zeminde batma ve kullanılacak iksa yöntemleri vb. işlemler öngörülebilir sorunların çözümünü daha sağlıklı yapılmasını sağlayacaktır (Merrit 1979).

3.3.3. Kayanın Ayrışması

Kayaların ayrışması olayı daha çok çöl iklimi ve karasal iklimin görüldüğü alanlarda meydana gelmektedir. Sıcaklık farkının yüksek olduğu bölgelerde yeraltında açılan bir boşlukta meydana gelebilecek en önemli sorunlardan olan kayanın ayrışması olayı ortamda bulunan suyla birlikte az çimentolanmış ayrışmış kaya yapılarında çözünme ve akma problemlerini meydana getirmektedir (Merrit 1979).

3.3.4. Yerinde Kaya Gerilmesi

Gerilme, en basit şekilde; birim alana etkiyen kuvvet olarak tanımlanır. Bu alan, bir yapının sınırlarını oluşturan dış yüzey, fay, eklem gibi süreksizlik yüzeyleri, ya da farazi bir içsel yüzey olabilir (Merrit 1979).

Mühendislik projelerinde, mevcut durumun gerilme dağılımları "primer gerilme durumu" olarak adlandırılmaktadır. Kazı, imalat ve inşaat sürecinde bu gerilmelerin yer, yön ve şiddet değiştirmesiyle oluşan gerilme dağılımı ise "ikincil (sekonder) gerilme durumu" olarak ele alınıp, statik ve dinamik stabilite analizlerinde kullanılmaktadır.

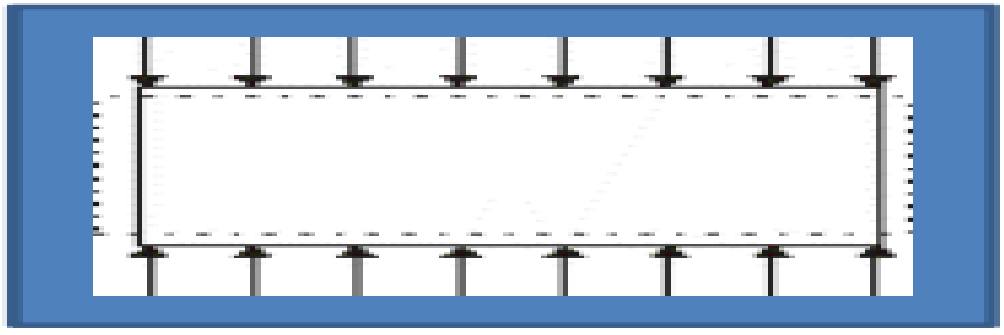
Elde edilen sonuçlara göre de, önlemler belirlenmekte ve yapı elemanları boyutlandırılmaktadır. İkincil gerilmelerin değişken oluşunun üzerinde titizlikle durulmasının nedeni, ancak böylece karşılıklı etkileşimlerin belirlenebilmesi ve sonuçta doğru işlem ve yöntemleri seçilebilmesiyle olmaktadır.

Bu şekilde dengeye kavuşturulmuş olan ikincil gerilme durumunun yeraltı yapılarının inşasından sonraki işletme döneminde yeniden değişime uğraması ile de "üçüncül (tersiyer) gerilme durumu" ortaya çıkmaktadır. Tersiyer etkiler arasında, mevcut yeraltı yapılarının çevresindeki yeni kazı, yapılaşma ve değişen yük koşulları gibi yapay veya erime, kabarma, şişme, ayrışma, yeraltı suyu düzeyi ve kimyasındaki değişmeler ile depremler gibi doğal etkiler bulunmaktadır.

Bu bakımdan ele alındığında; her yeraltı yapısı projesinin, bilinen primer koşullardan hareketle, sekonder koşullara uygun ve tersiyer etkilenimlere hazırlıklı ve bunları tanımlayıcı şekilde projelendirilmiş olması, uyulması kaçınılmaz olan kurallardandır (Vardar ve Eris 2008).

Gerilme türlerini dört başlıkta inceleyebiliriz.

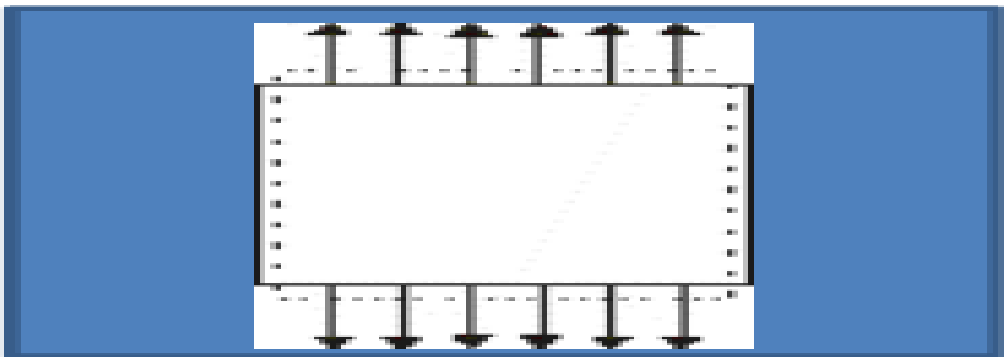
Şıkıştırma/Basma Gerilmesi (Compressive stress): Şekil 3.13.'te görüldüğü gibi aynı doğrultuda, zıt yönlü ve birbirlerine doğru kuvvetlerin oluşturduğu ve bir cisme sıkıştırıcı yönde etki eden gerilmelerdir. Bu gerilmeler, kaya mekaniğinde pozitif (+) olarak alınır. Kayada etkidiği doğrultuda boy kısalmasına neden olur (Tuncay 2012).



Şekil 3.13. Şıkıştırma/Basma gerilmesi (Compressive stress)

Çekme Gerilmesi (Tensile stress): Şekil 3.14.'te görüldüğü gibi aynı doğrultuda, zıt yönlü ve birbirlerinden uzaklaşan kuvvetlerin oluşturduğu gerilmelerdir.

Bu gerilmeler kaya mekaniğinde negatif (-) olarak alınır. Etkidiği doğrultuda boy uzamasına neden olur (Tuncay 2012).



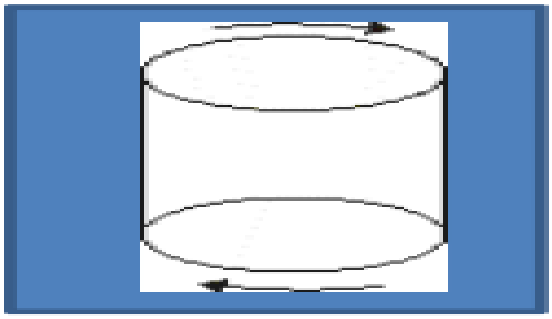
Şekil 3.14. Çekme gerilmesi (Tensile stress)

Makaslama Gerilmesi (Shear stress): Şekil 3.15.'te görüldüğü gibi cismin yüzeyine paralel yönde etkiyen, doğrultuları aynı yönleri zıt kuvvetlerin oluşturduğu gerilmelerdir. Kayada şekil değişikliğine neden olurlar (Tuncay 2012).



Şekil 3.15. Makaslama gerilmesi (Shear stress)

Burulma Gerilmesi (Torsional stress): Şekil 3.16.'da görüldüğü gibi bir cisme farklı iki noktasından cisim içerisinde dönme oluşturacak şekilde etki eden teğetsel gerilmelerdir (Tuncay 2012).



Şekil 3.16. Burulma gerilmesi (Torsional Stress)

3.3.5. Yeraltı Suyu

Yeraltı suyu zemin altında geçirimli jeolojik ortamın doygun bölgesinde bulunan ve kuyuları, kaynakları, akarsu, göl ve deniz gibi su kütlelerini besleyen sudur. Yeraltında pompaj ile alınabilecek miktarda bulunan durgun veya hareketli tüm sular bu tanımlama içine girer. Yeraltına sızan sular geçirimsiz bir tabaka üzerinde birikir ve yeraltı sularını oluşturur. Yeraltı suyu taşıyan tabakalara akifer denmektedir. Yeraltında açılması planlanan yapılarda su konusunda yaşanan sorunlar, dağlık kesimlerde ve büyük su kütlelerinin altında ki faylı ya da erir nitelikteki kayalarla ilgili durumlardır. Yeraltı su seviyesi altında açılan tünellerde su tünel içine doğru hareketlenmektedir. Tünel yeraltı suyu için bir çeşit drenaj kanalı vazifesi görmeye başlar (Merrit 1979).

3.3.6. Litoloji ve Sertlik

Sertlik ve litoloji, tünel açma işlemlerinde bir tünelin sağlıklı, zamanında ve ekonomik olarak açılmasında önemli parametrelerdir. Yeraltı araştırmaları; sondaj, yarma, kuyu, galeri ve jeofizik yöntemlerden yararlanılarak yapılmaktadır.

Kayaçların;

• Litolojik ve petrografik özellikleri

• Ayrışma derecesi ve derinliği,

• Sertlik ve kazılabilirlik gibi özelliklerine bakılarak tünel açımı sağlıklı bir şekilde yapılabilmektedir.

Özellikle TBM ile açılması planlanan tünellerde jeolojik araştırma verilerine göre elde edilen bilgilerle kaya sertliği ile ilgili özgül problemler, kaya tabakalarının duruş ve değişimi, kayanın dayanma süresi TBM'nin başarısını etkileyen önemli öğelerdir (Merrit 1979).

3.3.7. Araştırma Yöntemleri

Yeraltı kazıları için jeoteknik araştırma programları şu konulardan oluşmaktadır.

- Bölgesel jeoloji

- Daha önce bölgede açılmış olan tüneller
- Ayrıntılı jeoteknik raporlar ve araştırmalar
- Kazı sırasında saha gözlemi

Jeoteknik etüt çalışmalarında litoloji, tünelin açımının yapıldığı bölgedeki jeolojik yapıların yönelimleri, tabaka eğimleri ve yeraltı suyu rejimi çok iyi detaylandırılmalıdır. Daha önceden bölgede açılmış tünel veya tüneller ile ilgili kayıtlar var ise bunlar kaya duraylılığı ve yer altı suyu problemleri konusunda yeni yapılacak inşaatlara önemli veriler sağlayabilmektedir. Detaylı ve çok iyi yapılmış bir ön jeolojik etüt ve yeraltı araştırması karşılaşılabilecek problemlerin tam tanımlanması, tünelin açım maliyetini ve dolayısıyla riskini azaltmaya da yardımcı olacaktır (Merrit 1979).

3.4. Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri

İnsanoğlunun tarih boyunca yapı malzemesi olarak kullandığı en yaygın malzeme taştır. Barınma amacıyla kullanmaya başlanmasıyla birlikte kayaya olan güvenin artırılması gereği ortaya çıkmıştır. Gelişen teknoloji ve ihtiyaçlar doğrultusunda kaya üzerinde inşa edilen yapıların yüksek katlı olması ve kaya içerisindeki yapı boyutlarının büyümesi v.b gibi nedenler kayayı tam olarak anlamadan, incelemeden kullanmaya karşı güveni azaltmıştır (Kılıç 2005).

Büyük mühendislik yapıları olan baraj, tünel, köprü ayağı, bina vb. gibi proje çalışmaları incelendiğinde tünel inşaatlarında bahsedilen diğer yapılara nazaran bilinmeyenlerin sayısı daha fazla olmaktadır. Ortaya çıkan bu bilinmeyenlerin sayısını çeşitli araştırma yöntemlerinden faydalanarak araştırmacılar asgariye indirmeye çalışmaktadırlar. Görgül (kaya kütlesi sınıflama sistemleri) ve sayısal yöntemler tünel gibi yeraltı mühendislik yapılarının tasarlanmasında en yaygın kullanılan iki önemli araçtır. Günümüzde açılmakta olan tünellerin birçoğunda kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden yararlanılmaktadır.

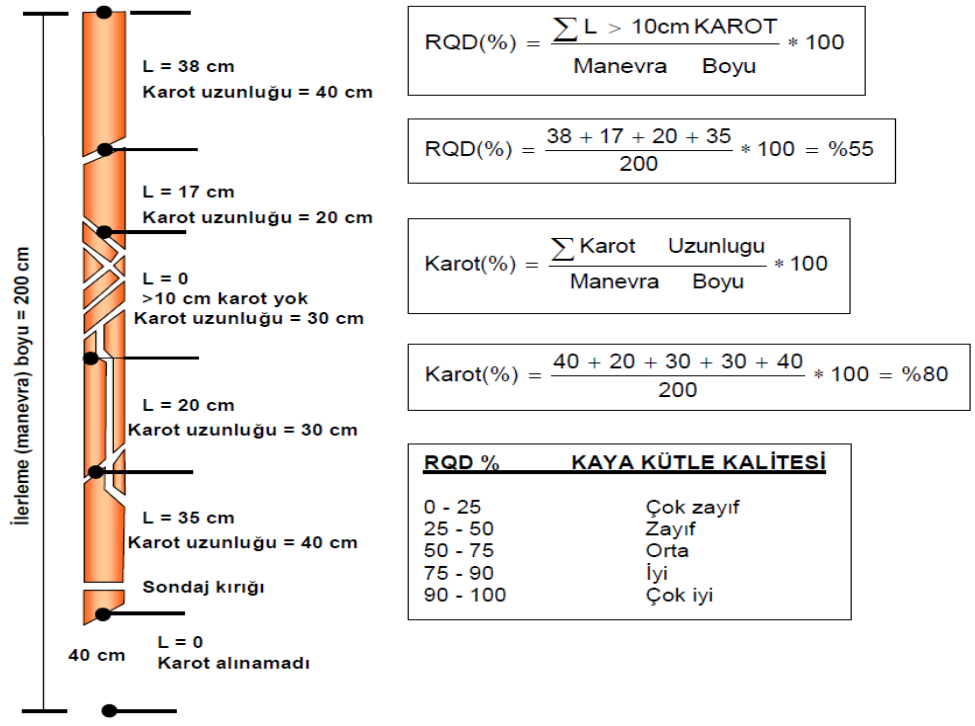
Kaya kütlesi sınıflama sistemleri; kaya kütlesinin davranışını etkileyen önemli parametreleri tayin etmek, kaya kütlelerini kendi içlerinde benzer özellikler gösteren bölgelere ayırarak değişik kaya kütlesi sınıflarını belirlemek, bir sahadaki kaya koşulları ile ilgili kazanılan deneyimin diğer sahalarda karşılaşılan koşullarla karşılaştırıp ilişki

kurmak, mühendislik tasarım işleri için sayısal veri ve bir kılavuz elde etmek ve de mühendisler arasında ortak bir temele dayalı bilimsel ve teknik bir dil sağlamak amacı ile kullanılmaktadır (Kun 2010).

Bu sistemler, yaklaşık 70 yıl öncesinden (Terzaghi 1946) başlayarak günümüze kadar geliştirilmiş, buna paralel olarak ortaya birçok yeni sınıflama sistemleri konmuş ve çeşitli projelerde uygulanmıştır. Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden Kaya Kütle Puanlaması (RMR) ve Kaya Kütle Kalitesi (Q), birçok araştırmacı tarafından yüzlerce tünelde başarı ile uygulanmış ve evrensel düzeyde kabul görmüştür. Oluşturulan bu sınıflama sistemleri ile açımı yapılan tünellerin daha ekonomik, daha az riskle ve daha kısa surede bitirilmesi sağlanmıştır (Karaman ve ark. 2014).

3.4.1. RQD Kaya Kalite Göstergesi

RQD, bir ilerleme aralığında doğal süreksizliklerle ayrılmış, boyu 10cm ve daha büyük olan ve silindirik şeklini koruyan karot parçalarının toplam uzunluğunun ilerleme aralığının uzunluğuna oranının yüzde olarak ifade edildiği niceliksel bir indekstir. Jeoteknik amaçlı loglamada ilk önce tayin edilecek olan parametreler; toplam karot verimi, kaya kalite göstergesi (RQD) ve eklem sıklığı olmaktadır (Emir 2014).



Şekil 3.17. Kaya kalite göstergesi (RQD) (Özkan 2013)

3.4.2. RMR Kaya Kütle Sınıflama Sistemi

RMR kaya kütlesi sınıflaması Bieniawski tarafından 1972-1973 yılları arasında geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistem 1989 yılında son şeklini almıştır. Tüneller, büyük yeraltı açıklıkları (odalar), maden işletmeleri, şevler ve temellerle ilgili 351 değişik uygulamadan derlenen verilerin ve yapılan gözlemlerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi, yöntemin bugünkü şeklini almasında en önemli araçlar olmuştur (Kun 2010).

Bu sınıflama sisteminde, aşağıda sıralanan ve sahada ölçülebilen veya sondaj verilerinden elde edilebilecek, altı değişken kullanılır (Özkan 2013).

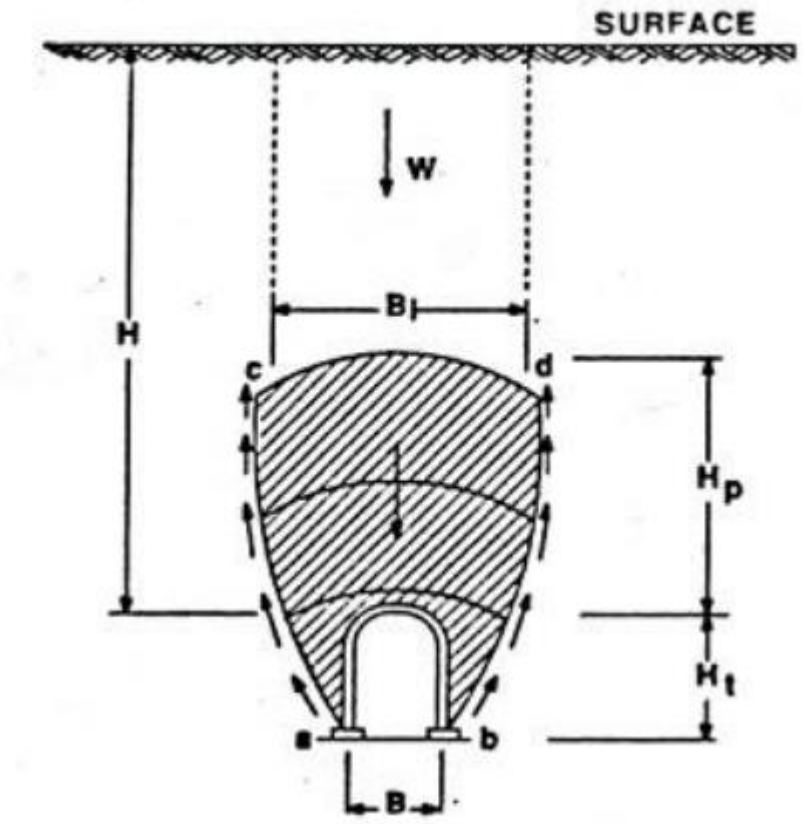
- Kaya örneğinin tek eksenli basınç dayanımı (σc)
- Sondaj karotlarından elde edilen RQD (Kaya Niteliğinin tanımlanması) değerleri.
- Süreksizlik aralığı(Js)
- Süreksizliklerin durumu (Jc)
- Yeraltı suyu durumu (Gw)
- Süreksizliklerin konumu (OI)

RMR Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemine göre kayaç kalitesini sınıflama parametreleri ve puanlama Çizelge 3.1.'de verilmiştir (Bieniaswki 1989).

3.4.3. Terzaghi Sınıflandırması

Terzaghi (1946) tarafından önerilen bu sistem, tünellerde çelik destek tasarımı için kaya yüklerinin değerlendirilmesi amacıyla geliştirilmiş ilk gerçekçi kaya sınıflama sistemidir. Alp Dağları'ndaki demiryolu tünellerinde kullanılan çelik desteklerle ilgili deneyim ve gözlemlere dayanmaktadır. Çelik-kemer destekli tünellerde kaya yükünün tahmin edilmesini sağlamaktadır. Terzaghi'nin önerdiği bu modele göre, tünel kazısında "abcd" ile gösterilen alan içindeki gevşemiş kaya kütlesi tünele doğru hareket edecektir. Bu hareket "ac" ve "bd" ile gösterilen yan sınırlar boyunca sürtünme kuvvetleri tarafından karşılanacaktır. Dolayısıyla tünelin tavanı ve yan duvarların, Hp yüksekliğine eşdeğer bir bölgenin dengelenmesi için desteklenmeyi gerekli kılar.

Hareketlerin meydana geldiği kaya zonunun genişliği (B1), kaya kütlesinin özelliklerine ve tünelin boyutlarına (Ht ve B) bağlıdır (Arıoğlu 2009). Kaya yükü miktarına ilişkin değerler ve buna bağlı değerlendirmeler Çizelge 3.1.' de verilmiştir



Şekil 3.18. Terzaghi'nin tünel kaya yük kavramı

B: Tünelin tabandaki genişliği

Ht: Tünelin yüksekliği

HP: Kaya yükü (m)

Çizelge 3.1. Tünel kazısı ve desteklemesi için kayaçların sınıflandırılması (Terzaghi sınıflaması)

Sınıf No	Fiziksel özellik	Açıklama	Düşey yük H_p	Desteklenme Şekli
1	Sağlam ve çatlaksız	Magmatik kayaçlar, tabaka kalınlığı tünel boyutu yanında önemsiz kalan çökel kayaçlar	0	Kaya bulonu veya geçici destek
2	Sağlam tabakası veya şistsel	Seyrek eklem ve çatlaklı çökel kayaçlar,çok hafif metamorfizma geçirmiş şistler	0-0.5B	Kaya bulonu veya geçici destek
3	Tabakasız, orta derecede eklemli	Magmatik, metamorfik çökel kayaçlar orta derecede eklemli ve çatlaklı, çatlaklar arasında kuvars ve kalsit gibi bağlayacılar iyi, kil kötü yönde etkiler.	0-0.25B	Kaya bulonu veya geçici destek
4	Parçalı ve çatlaklı	Makaslama ve fay zonları yakınında ortalama 10 cm den büyük aralı, parçalı, çatlaklı kayaçlar	0.25B - 0.35 $(B+H_t)$	Sık kaya bulunu(2m aralıklı)veya kalıcı-geçici destek
5	Çok parçalı ve çatlaklı	Makaslama ve fay zonları yakınında ortalama 10 cm den ufak aralı çok parçalı, çatlaklı kayaçlar	0.35-1.10 $(B+H_t)$	Kalıcı destek ve/veya püskürtme betonu
6	Tamamen parçalanmış (fakat kimyasal yönden ayrışmamış)	Tamamen parçalanmış, sıkışmamış, kohezyonu, çok az, ince daneler haline gelmiş veya kimyasal ve fiziksel etkilerle belirli bir sürede bu hale gelebilen kayaç	1.10 $(B+H_t)$	Dairesel kalıcı destek ve püskürtme betonu,prefabrik kaplama
7	Sıkıştıran (Orta derinlikte)	Killer ve kil mineralleri içeren kayaçlar	(1.10-2.10) $(B+H_t)$	Dairesel kalıcı destek ve püskürtme betonu,prefabrik kaplama
8	Sıkıştıran (Çok derinde)	Az şişen killer (kaolen minerali)	(2.10-4.50) $(B+H_t)$	Dairesel kalıcı destek ve püskürtme betonu,prefabrik kaplama
9	Şişen	Çok şişen killer (montmorillonit,bentonit vb.)	4.50 $(B+H_t)$ -75m	Dairesel kalıcı destek ve püskürtme betonu, prefabrik kaplama

Çizelge 3.2. RMR Kaya kütle sınıflama sistemi (Bieniawski 1989)

1	Sağlam Kayacın Dayanımı	Nokta Yükü Dayanım İndeksi	> 100 Mpa	4-10 Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Düşük Aralıklar İçin Tek Eksenli Dayanım		
		Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı	> 250 Mpa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Puan		15	12	7	4	2	1	0
2	Kayaç Kalite Göstergesi, RQD	%90-%100	%75-%90	%50-%75	%25-%50	<%25			
	Puan	20	17	13	8	3			
3	Süreksizlik Aralığı	> 2m	0.6-2m	200-600 mm	60-200 mm	< 60mm			
	Puan	20	15	10	8	5			
4	Süreksizliklerin Durumu	Çok Kaba Yüzeyler Sürekli Değil Ayrılma Yok Sert Eklem Yüzeyleri	Az Kaba Yüzeyler Ayrılma <1 mm Sert Eklem Yüzeyleri	Az Kaba Yüzeyler Ayrılma< 1mm Yumuşak Eklem Yüzeyleri	Sürtünme İzli Yüzeyler veya Fay Dolgusu < 5 mm veya 1-5 mm açık eklemler, Sürekli Eklemler	Yumuşak Fay Dolgusu > 5 mm Devamlı Süreksizlikler			
	Puan	30	25	20	10	0			
5	Yeraltı Suyu	Tünelin 10m'lik Kısmından Gelen Su		Yok	10lt/dk	<25 lt/dk	25-125 lt/dk	> 125 lt/dk	
		Oran	Eklemdeki Su Basıncı / Ana Asal Gerilme	Veya 0	0.0-0.1	Veya 0.1-0.2	Veya 0.2-0.5	Veya >0.5	
		Genel Koşullar		Veya Tamamen Kuru	Nemli	Veya Islak	Veya Damlama	Veya Su Akışı	
		Puan		15	10	7	4	0	

RMR sınıflama sistemi, verilerin araziden kolayca toplanması açısından çok fazla avantajlar sağlar ve kısa sürede değerlendirilmesi açısından oldukça avantajlıdır. RMR sınıflama sisteminin önemli parametreleri şunlardır;

1. Sağlam kayacın dayanımı,

2. Kaya kütle göstergesi,

3. Süreksizlikler arası mesafe,

4. Süreksizliklerin durumu

a) Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğü,

b) Süreksizlik yüzeyinin iki duvarı arasındaki açıklık ve varsa dolgunun kalınlığı,

c) Dolgunun tipi,

d) Süreksizliğin devamlılığı,

5. Su durumu,

6. Süreksizliklerin doğrultu ve eğimi'dir.

Yukarıdaki parametreler laboratuvar ve arazi ölçümleri ile tayin edildikten sonra puanlama yapılır ve elde edilen puana göre, RMR sınıflama sisteminin önerdiği şekilde Çizelge 3.4. kullanılarak kayaç sınıflaması yapılır.

Çizelge 3.3. Eklem yönlenimine göre düzeltme (Bieniawski 1989)

Eklemlerin Doğrultu ve Eğim Yönlenimi		Çok İyi	İyi	Orta	Kötü	Çok Kötü
Dereceleme	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Yamaçlar	0	-5	-25	-50	-60

Çizelge 3.4. Kaya sınıflamaları ve dereceleri (Bieniawski 1989)

Sınıflama No.	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok İyi Kaya	İyi Kaya	Orta Kaya	Zayıf Kaya	Çok Zayıf Kaya
Derecelendirme	100-90	90-70	70-50	50-25	< 25

Çizelge 3.5. Kaya sınıflama yorumları (Bieniawski 1989)

Sınıflama No.	I	II	III	IV	V
Ortalama Dayanma Süresi	5m açılıkta 10 yıl	4m açıklıkta 6 ay	2m açıklıkta 1 hafta	1.5m açıklıkta 5 saat	0.5m açıklıkta 10 dk.
Kaya Kütlesinin Kohezyonu	>300 kPa	200-300 kPa	150-kPa	100-150 kPa	<100 kPa
Kaya Kütlesinin Sürtünme Açısı	$>45^0$	40^0-45^0	35^0-40^0	30^0-35^0	$<30^0$
Cevherin Kazılabilirliği	Çok Zayıf	Kolaylıkla Büyük Parçalar Çıkmaz	Orta	Kolaylıkla Kazılır İyi Parçalanma	Çok İyi

Çizelge 3.6. Tünelde süreksizlik eğim ve eğim yönünün etkisi tablosu (Bieniawski 1989)

Doğrultu tünel eksenine dik			Doğrultu Tünel Eksenine paralel			Doğrultuya Bakılmaksızın eğim 0^0-20^0 arasında
Eğim yönünde ilerleme	Eğime karşı yönde ilerleme					
Eğim 45^0-90^0	Eğim 20^0-45^0	Eğim 45^0-90^0	Eğim 20^0-45^0	Eğim 45^0-90^0	Eğim 20^0-45^0	
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil	Orta	Orta

Çizelge 3.7. Süreksizlik yönelimine göre düzeltme tablosu (Bieniawski 1989)

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

Çizelge 3.8. Kaya sınıfları ve puanlan tablosu (Bieniawski 1989)

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

Çizelge 3.9. RMR Sistemine göre tünel kazıları ve desteklemeleri

BİRİNCİL DESTEK (TAHKİMAT)				
Kaya kütlesi sınıfı	Kazı	Kaya sapmaları(10m genişlikteki tünel için uzunluk)	Şatkrit (püskürtme betonu)	Çelik destek
I	Tam kesit, 3 m ilerleme	Bir miktar kaya saplaması haricinde genellikle destek gerektirmez		
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 2.0-2.5 m aralıklı	Gerektiğinde tavan kemerinde 50 mm	Yok
III	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme, tavandan 1.5-3.0 m ilerleme, komple destek aynaya 10 m mesafede	3-4 m uzunlukta sistematik saplamalar, kemerde tel kafesli duvarlar ve kemerlerde 1.5-2.0 m aralıklı	Tavan kemerinde 50-100 mm ve 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 tahkimat	Tel kafesli duvarda ve kemerde 1.0-1.5 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 traversler
V	Tavan ve taban birlikte ilerleme, tavandan 0.5-1.0 m ilerleme, kazıya birlikte destek yerleştirilmeli, patlatmadan hemen sonra şatkrit uygulanmalı	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1.0-1.5 m aralıklı, 5 m uzunlukta sistematik saplama	Tavan kemerinde 100-200 mm, yan duvarlarda 10 mm, aynada 50 mm	Çelik iksalı, 0.75 m aralıklı orta-ağır traversler

3.4.4. Q Sınıflama Sistemi

Q sınıflama sistemi, 1974 yılında Norveç Jeoteknik Enstitüsü araştırmacılarından Barton, Lien ve Lunde tarafından ortaya konmuştur. İlk olarak İskandinavya'da tünellerde gerçekleştirilen 200 ayrı inceleme ve değerlendirme sonucunda ortaya çıkmıştır. RMR sistemine benzer şekilde, altı parametreye değerler vererek Q sistemi geliştirilmiştir (Emiroğlu 2010).

Bu parametreler:

· RQD

· Süreksizlik takım sayısı

· En elverişsiz süreksizliğin pürüzlülüğü

· Ayrışma derecesi veya en zayıf süreklilikteki dolgu

· Su artış miktarı

· Gerilme durumu

Kaya kütlesinin değerini belirten 'Q' sayısı (tünelcilik niteliği belirteci) aşağıdaki formülle tanımlanmıştır.

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

* RQD= Kaya kalite göstergesi,

* Jn= Eklem takım numarası

* Jr= Eklem pürüzlülük numarası (süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü ile ilgili).

* Ja= Eklem ayrışma numarası (süreksizlik yüzeylerinin ayrışma veya bozuşma derecesiyle ilgili).

* Jw= Eklem suyu azalım faktörüdür (süreksizlik içine akan su miktarları ve süreksizlikteki basınçlarla ilgilidir).

* SRF= Gerilme azalım faktörüdür (makaslama zonlarının varlığı, gerilme konsantrasyonları, sıkışan ve kabaran kayalarla ilgili).

Çizelge 3.10. Q Sistemi parametreleri

Açıklama	Değer	Notlar
Kaya Kalite Göstergesi	**RQD**	RQD'nin 10 olarak ölçüldüğü veya rapor edildiği durumda (sıfır dahil), Q'yu değerlendirmede 10 nominal değeri kullanılır.5'lik RQD aralıkları (100,95,90 vb.) yeterince hassastır.
a) Çok kötü	0-25	
b) Kötü	25-50	
c) Orta	50-75	
d) İyi	75-90	
e) Mükemmel	90-100	
Eklem Takım Numarası	**J_n**	Ara kesitler için ($3.0xJ_n$) kullanınız. Portallar için ($2.0xJ_n$) kullanınız.
a)Masif, sınıf veya birkaç çatlak	0.5	
b)Bir eklem takımı	2	
c)Bir eklem takımı ve rastgele	3	
d)İki eklem takımı	4	
e)İki eklem takımı ve rastgele	6	
f)Üç eklem takımı	9	
g)Üç eklem takımı ve rastgele	12	
h)Dört veya daha fazla eklem takımı, rastgele, ileri derecede çatlaklı'şeker küpü'vs.	15	
j)Topraksı, ezilmiş kaya	20	
Eklem Pürüzsüzlük Numarası	**J_r**	İlgili eklem takımının ortalama açıklığının 3 m den büyük 1.0 ekle. Lineasyonlar uygun şekilde yönlenmiş olmak koşuluyla lineasyonlu, düzlemsel, çizikli eklemler için Jr= 0.5 kullanılabilir. b den g ye kadar olanlar küçük, diğerleri büyük yapılardır
(i)Kaya duvarı teması	-	
(ii) 10 cm makaslamadan önce kaya duvarı		
a)Süreksiz eklem	4	
b)Pürüzlü, dalgalanmalı	3	
c)Pürüzsüz dalgalanmalı	2.0	
d)Çizikli, dalgalanmalı	1.5	
e)Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5	
f)Pürüzsüz, düzlemsel	1.0	
g)Çizikli, düzlemsel	0.5	
(iii)Makaslandığında kaya duvar teması yok	-	
h)Kaya duvarı temasını önlemeye yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon	1.0	
j: Kaya duvarı temasını önleyecek kadar kalın, kumlu, çakıllı veya ezilmiş kaya	1.0	

Çizelge 3.10. (Devamı)

Eklem Ayrışma Numarası	J_a	Φ_r	
(i)Kaya duvarı teması	-	-	
a)Sıkıca kapanmış, sert, yumuşamayan, geçirimsiz dolgu; örnek: kuvars veya epidot	0.75	-	
b)Bozunmamış eklem duvarları; sadece yüzeyde lekeler	1	25-35 °	
c)Hafifçe ayrışmış eklem duvarları, yumuşamayan mineral kaplamaları, kumlu partiküller, kil içermeyen parçalanmış kaya	2	25-35 °	
d)Siltli veya kumlu kil şeklinde kaplamalar, küçük kil fraksiyonu(yumuşamayan)	3	20-25 °	
e)Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil minerali kaplamaları; örnek: kaolonit, mika. Ayrıca klorit, talk, jips, grafit vb.ile az miktarda şişebilen killer (süreksiz giysiler; kalınlık 1-2mm'den az)	4	8-16 °	
(ii)10 cm makaslamadan önce kaya duvarı teması	-	-	Φ_r, değerleri ayrışma ürünlerinin mineralojik özelliklerine yaklaşık bir kılavuz bilgi sağlamak amacıyla verilir.
f)Kumlu partiküller, kil içermeyen parçalanmış kaya vb.	4	25-30 °	
g) Kuvvetlice aşırı konsolide, yumuşamayan kil mineral dolguları (sürekli; kalınlık<5 mm)	6	16-24 °	
h)Aşırı konsolidasyon orta veya düşük derece,yumuşayan,kil mineral dolguları(sürekli;kalınlık<5 mm)	8	12-16 °	
j)Şişebilen kil dolgulu; örnek: montmorillonit (sürekli; kalınlık <5 mm)Ja değeri, kil boyu partiküllerin yüzdesine, suyun girişine bağlıdır.	8,12	6-12 °	
(iii)Makaslandığında kaya duvarı teması yok	-	-	
k)Parçalanmış kaya ve kil zonları veya bantları(kil şartlarının tanımı için bkz.h ve j şıkları)	6,8 veya 8,12	6-24 °	
l)Siltli kil zonları veya bantları, az kil fraksiyonu yumuşamayan)	5	-	
m)Kalın, sürekli kil zonları veya bantları (kil şartlarının tanımı için bkz.g, h ve j şıkları)	10,13 veya 13,20	6-24 °	

Çizelge 3.10. (Devamı)

Gerilme Azalma Faktörü	SRF		
(i)Tünel kazısında kaya kütlesinin gevşemesine neden olabilecek; kazı yüzeyini kesen zayıflık zonları	-	İlgili makaslama zonunun kazı yüzeyini sadece etkidiği fakat kesmediği durumda SRF değerlerini %25-50 oranında azaltınız.	
a)Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya içeren çok sayıda zayıflık zonu, çok gevşek komşu kaya (herhangi bir derinlikte)	10.0		
b)Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya içeren tek zayıflık zonu (kazı derinliği <50m)	5.0		
c)Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya içeren tek zayıflık zonu (kazı derinliği >50m)	2.5	Kuvvetli bir anizotrop gerilme alanının bulunduğu durumda (ölçülmüşse): $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ olduğu zaman σ_c ve σ_t 'yi 0.8 σ_c ve 0.8 σ_t 'ye düşürür.	
d)Sağlam kayada(kil içermeyen) çoklu makaslama zonları, gevşek komşu kaya(herhangi derinlikte)	7.5		
e)Sağlam kayada (kil içermeyen) tek makaslama zonu, gevşek komşu kaya (kazı derinliği <50 m)	5.0		
f)Sağlam kayada (kil içermeyen) tek makaslama zonu, gevşek komşu kaya (kazı derinliği>50 m)	2.5	$\sigma_1 / \sigma_t > 10$ olduğu zaman σ_c ve σ_t 'yi 0.6 σ_c ve 0.6 σ_t 'ye düşür.	
g)Gevşek, açık çatlaklar, aşırı derecede çatlaklı veya şeker küpü vs. (herhangi derinlikte)	5.0		
(ii)Sağlam kaya, kaya gerilme problemleri	-	σ_c / σ_1	σ_t / σ_1
h) Düşük gerilme, yüzeye yakın	2.5	>200	>13
j) Orta düzey gerilme	1	200-10	13-0.66
k)Yüksek gerilme, çok sıkı yapı (genellikle stabilite için uygun, duvar stabilitesi için uygun olmayabilir)	0.5-2.0	10-5	0.66-0.33
l)Vasat düzeyde kaya patlaması (masif kaya)	5-10	5-2.5	0.33-0.16
m)İleri düzeyde kaya patlaması (masif kaya)	10-20	<2.5	<0.16
(iii) Sıkışan kaya; sağlam olmayan kayanın yüksek kaya basıncının etkisi altında plastik akması	-	-	
n) Orta derecede sıkan kaya basıncı	5-10		
p) İleri derecede sıkan kaya basıncı	10-15		

Çizelge 3.10. (Devamı)

Eklem Suyu Azalım Faktörü	J_w	Yaklaşık Su Basıncı (kg/cm^2)
a) Kuru kazılar veya kazı içine minör akış; yerel olarak 5 l/dk	1.0	< 1
d) Çok miktarda akış veya yüksek basınç, eklem dolgularının önemli miktarda yıkanması	0.33	2.5-10
e) Patlatma sırasında son derece yüksek içeri akış veya su basıncı; zamanla azalan türde	0.2-0.1	> 10
f) Kayda değer bir azalım göstermeksizin, son derece yüksek içeri akış veya su basıncı	1.0-0.5	> 10

3.5. Yeraltı Yapılarının Tahkimatı

Arazinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri, teknik-çevresel faktörler ve tünel inşa yöntemi arazi deformasyonlarını etkileyen temel unsurlardır (O'Reilly ve New, 1982; Arıoğlu, 1992; Karakuş ve Fowell, 2003; Tan ve Ranjit, 2003; Minguez vd., 2005; Ellis, 2005; Suwansawat ve Einstein, 2006). Arazinin deformasyon özellikleri ve yer altı suyu koşulları detaylı olarak ortaya konulmalıdır. Tünelin derinliği, geometrisi, çapı, eğimi, virajlar tek veya çift hat olması ve civardaki yer altı veya yeryüzü yapıları gibi parametreler teknik ve çevresel faktörleri oluştururlar.

Tünel üzerinde oluşan arazi oturmaları; kazı sonrasında arazi gerilmelerinin değişimi ve boşalması etkisiyle arazinin tünel içine doğru kapanması (konverjans) sonucunda oluşmaktadır. Bu kapanma zemin kaybı veya hacim kaybı olarak ifade edilmektedir. Yeryüzünde oluşan oturma hacmi genellikle tünel içine kapanan zemin hacim miktarına eşit olduğu kabul edilmektedir (O'Reilly ve New, 1982).

Yeryüzü oturmalarında; uygulanan kazı ve destekleme yöntemi, zeminin jeomekanik özellikleri ve tünel geometrisi (çap ve derinlik) önemli etkiye sahiptir (Arıoğlu vd. 2002).

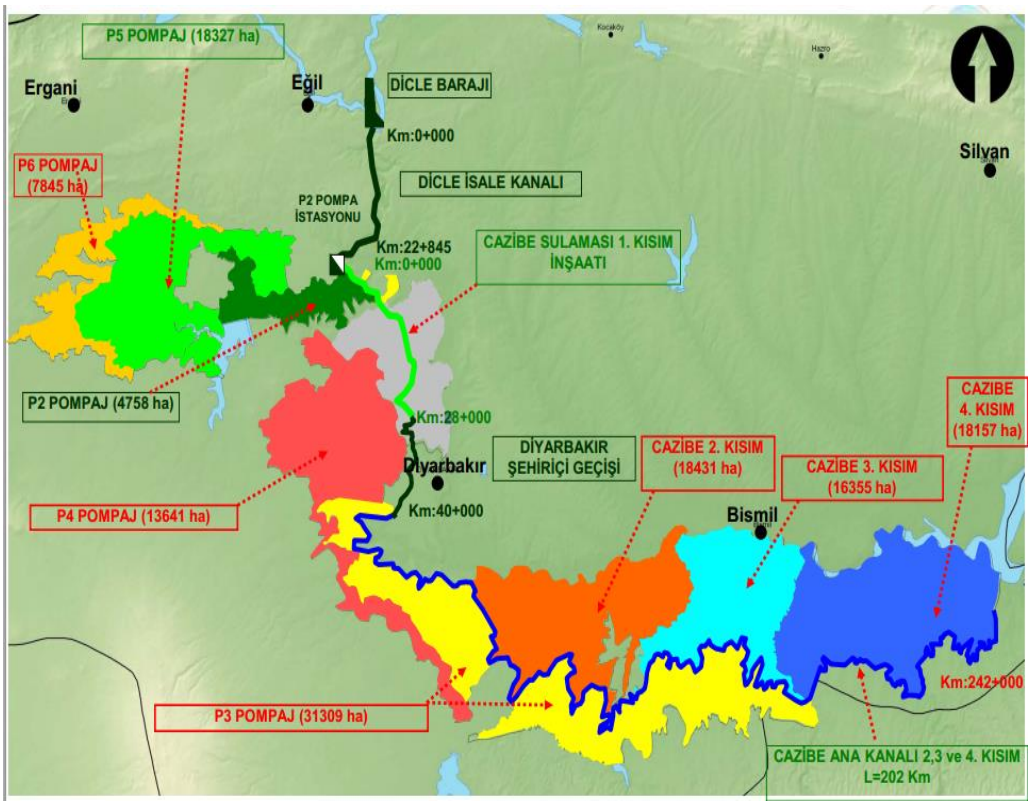
Yeraltı suyu arazi davranışının zamana bağlı değişiminde, kısa ve uzun dönem yeryüzü oturmalarında önemli rol oynamaktadır (Attewell vd., 1986). Geçirimsiz zemin koşullarında kısa dönem yeryüzü oturmaları; kazı esnasında veya kazıdan birkaç gün-hafta sonrasında oluşur. Uzun dönem oturmaları ise zeminin zamana bağlı olarak akması, gerilme durumunun değişmesi ve yeraltı suyunun drene olması sonucunda boşluk basıncının ortadan kalkması ile oluşan zemin konsolidasyonudur. Uzun dönem yeryüzü oturmalarının stabil duruma ulaşması birkaç ay ve birkaç yıl sürebilmekte ve miktar olarak kısa dönem oturmalarının birkaç katına ulaşabilmektedirler. Kuru zemin koşullarında uzun dönem oturmaları oldukça düşüktür (Copur vd. 2007).

Şehir içinde yumuşak zeminlerde açılan sığ tünellerde, kazı ve destekleme arasındaki sürenin kısa tutulması son derece önemlidir. Kazı sonrası zeminin hava temasını kesmek için derhal püskürtme betonla kaplanmalı ve iksa yerleştirilmelidir. Özellikle yumuşak zemin koşullarında yeraltı su seviyesinin de yüksek olduğu durumlarda iksa yapılarına çok daha fazla görevler düşmektedir (Kempfert ve Gebreselassie 2006).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Çalışma Alanı

Güneydoğu Anadolu Projesinin önemli bir ünitesini oluşturan Kralkızı-Dicle 1. Merhale Projesi Kralkızı-Dicle Cazibe Sulaması 4. Kısım Ana Kanalı, bu sulama projesinin son kesimi olup km:128+690,60'tan başlamaktadır. 4. kısmın Km:128+690,60-140+000 arasındaki bölümünün mühendislik jeolojisi çalışmaları yapılmış ve raporu onaylanmıştır. Bu çalışma, 4. Kısım Ana Kanalının Km:140+000-154+000 arasındaki bölümünü kapsamaktadır. Şekil 4.1.'de teze konu olan alan da dahil olmak üzere sulama projesinin tamamı görülmektedir.



Şekil 4.1. Kralkızı-Dicle 1. Merhale Projesi Kralkızı-Dicle Cazibe Sulaması

İnceleme alanı Diyarbakır-Çınar ilçesi sınırları ile Mardin-Savur ilçesi sınırları içerisinde bulunmaktadır. 4. Kısım Ana Kanalı, Diyarbakır-Çınar ilçesinin yaklaşık 13 km kuzeydoğusunda bulunan Çataltarla köyünün 2 km kuzeyinden başlamakta, Bismil ilçesinin yaklaşık 25 km güneydoğusunda bulunan Topraklı köyünün 2,5 km kuzeydoğusunda sonlanmaktadır. İnceleme alanına, Diyarbakır-Bismil ilçesi Tepe beldesinden İsapınar köyüne ayrılan asfalt yolla ulaşılmaktadır. Belde ile İsapınar köyü arası yaklaşık 6 km'dir. Şekil 4.2.'de projenin yeri gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Proje alanı yer bulduru haritası

4.2. Genel Jeoloji

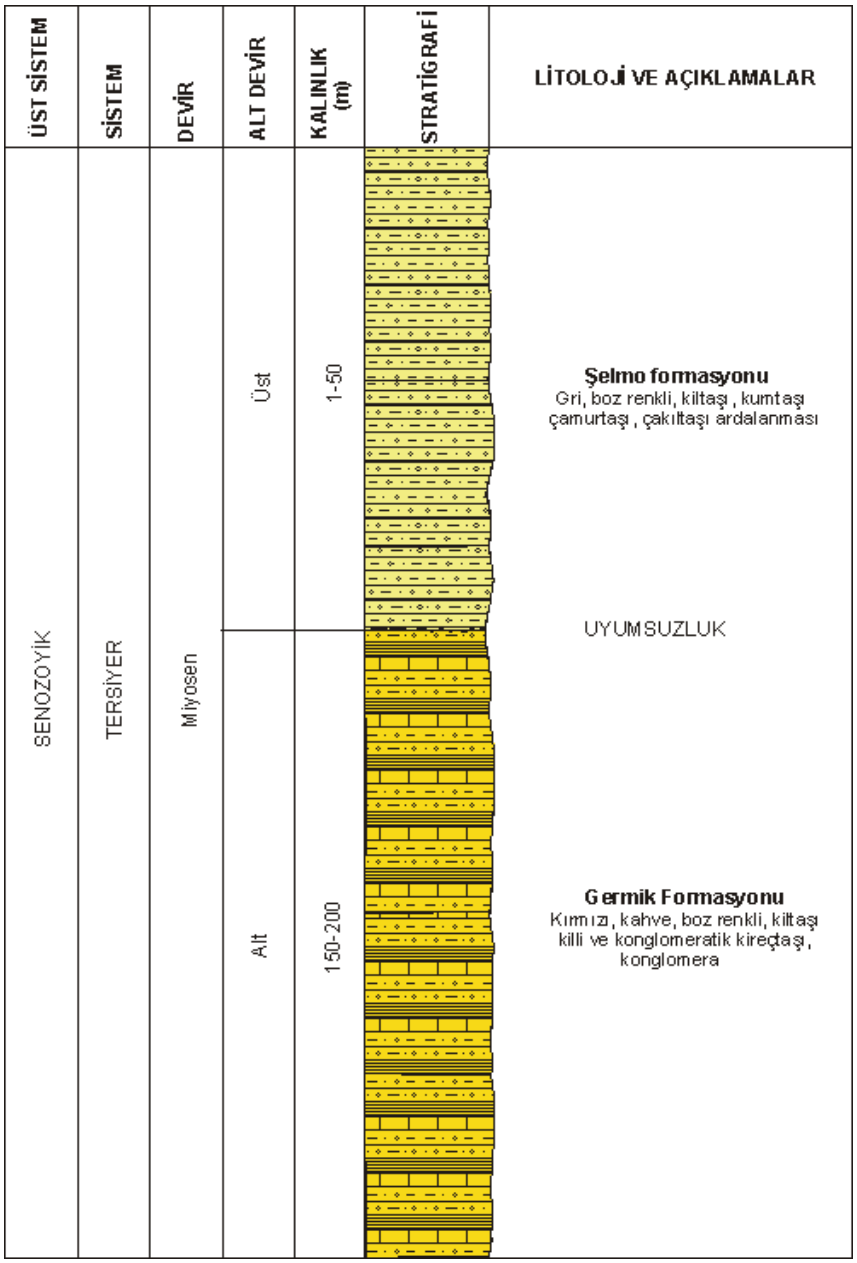
DSİ 10. Bölge Müdürlüğü tarafından yaptırılan jeolojik etüt çalışmalarında inceleme alanında şu birimler yayılım göstermektedir.

Nebati toprak-kil	Kuvaterner
Şelmo Formasyonu	Üst Miyosen
Germik Formasyonu	Alt Miyosen

İnceleme alanı ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kesiti Çizelge 4.1.' de verilmiştir.

Her iki tünelin kazısı da genelde Şelmo Formasyonu olarak adlandırılan Üst Miyosen yaşlı kiltaşı, kumtaşı, çamurtaşı, silttaşı, çakıltaşı, konglomeraların ardalanmasından ve yer yer kireçtaşlarından oluşan birimler içerisinde yürütülmüştür.

Çizelge 4.1. İnceleme alanı ve çevresi genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (MTA Arşivi)



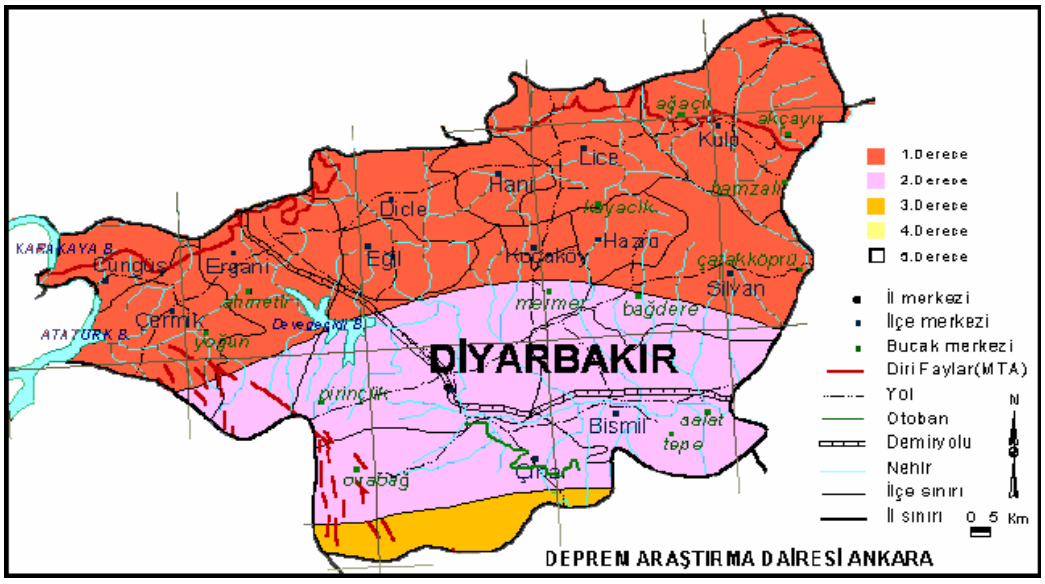
4.2.1. Şelmo Formasyonu (Tş)

İnceleme alanının doğu kesimi ile kuzeybatı kesiminde geniş bir alanda yayılım göstermektedir. Gri, kahve ve boz renklerdedir. Kiltaşı, kumtaşı, çamurtaşı, silttaşı ve çakıltaşı birimlerinden oluşan bu formasyon ritmik ardalanmalıdır. Kiltaşı hakim litoloji durumundadır. Kumtaşı seviyeleri muntazam laminalanma gösterir. İnce-orta katmanlı, orta sert yapıda olup bağlayıcı, çoğunlukla kil ve kısmen karbonattır. Çamurtaşı düzeyleri yumuşak ve ayrışmalıdır. Çakıltaşı seviyeleri ise orta-iri taneli, yuvarlak çakıllı, polijenik elemanlı ve metamorfik kayaç parçacıklarından oluşmuştur. Yer yer yumuşak, dağılgan, ayrışmalı, el ile ufalanabilen çakıltaşı seviyeleri, kil ve karbonat çimentoludur. Formasyonun üst kesimleri kalınlığı 0-3 m arasında değişen nebati toprak ve birimin atmosferik etkilerle yerinde ayrışması ve altere olması sonucu oluşmuş kil ile örtülüdür. Yol yarmalarında mostra veren bu formasyonda yapılan incelemede tabakalanma belirgin olmayıp genel olarak yatay ve yataya yakın eğimlidir.

Germik formasyonunu diskordanslı olarak örtmektedir. İnceleme alanındaki kalınlığı 1-100 m arasındadır. Subsidans havzası çökelidir. Üst Miyosen yaşlıdır.

4.2.2. Deprem Durumu

İnceleme alanı, Türkiye Deprem Bölgeler Haritasında 2. derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Şekil 4.3.'te Bölgenin deprem haritası verilmiştir.



Şekil 4.3 Proje alanının deprem bölgeleri haritasındaki yeri (TPAO Arşivi)

4.2.3. Hidrojeoloji

İnceleme alanında yayılım gösteren formasyonlar genel olarak yeraltısuyu bakımından verimsizdir. Ancak Şelmo formasyonunun kumtaşı ve çakıltaşı seviyeleri ile Germik formasyonunun konglomera ve kireçtaşı seviyeleri beslenime bağlı olarak az miktarda yeraltısuyu içermektedir.

Güzergahta açılan sondaj kuyularında SK-1 nolu kuyunun dışındaki kuyularda yeraltısuyu seviyesi tespit edilmiştir.

4.3. Proje Özellikleri ve Tünel Güzergahında Yapılan Jeoteknik Çalışmalar

Kanal güzergâhında kazı derinliğinin 10 m'nin üzerinde olduğu kesim ile sifon yapı yeri ve tünel güzergâhlarında yapı kotunun altına ulaşılacak şekilde 12 adet toplam 383 m derinliğinde temel sondaj kuyusu açılmıştır. Ayrıca kanal güzergâhında yayılım gösteren birimlerin jeolojik ve jeoteknik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yaklaşık 500 m arayla 16 adet araştırma çukuru açılmıştır. Araştırma çukurlarından bozulmuş ve bozulmamış örnekler ile sondaj kuyusundan karot ve bozulmamış numuneler alınarak güzergâhta geçilecek birimlerin jeoteknik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla gerekli laboratuvar deneyleri yaptırılmıştır (DSİ Jeoteknik Raporu 2013). Proje özellikleri Çizelge 4.2. 'de verilmiştir.

Açılan 12 adet sondajdan SK-5, SK-6, SK-7, SK-8, SK-9 nolu sondajlar T1 tüneli güzergahında; SK-10, SK-11, SK-12 nolu sondajlar ise T2 tüneli güzergahında açılmıştır.

Çizelge 4.2. Proje özellikleri

Yeri	Diyarbakır-Çınar, Mardin-Savur
Amacı	Sulama
T1 Tünel boyu	2075 m
T2 Tünel boyu	1200 m
Tünel çapı	4,20 m
Tipi	Atnalı
Kazıcı	Hyundai LC 110 kırıcı
Yükleyici	Volvo L90

4.3.1. T1 Tünelinde Yapılan Çalışmalar

2135 m uzunluğunda olan ve T-1 olarak adlandırılmış bu tünel ortalama 663,75-666,10 kotları arasındadır. Tünel güzergâhında kiltaşı, kumtaşı, çakıltaşı, silttaşı ve yer yer kireçtaşı birimlerinin ardalanmasından oluşan Şelmo formasyonu yayılım göstermektedir.

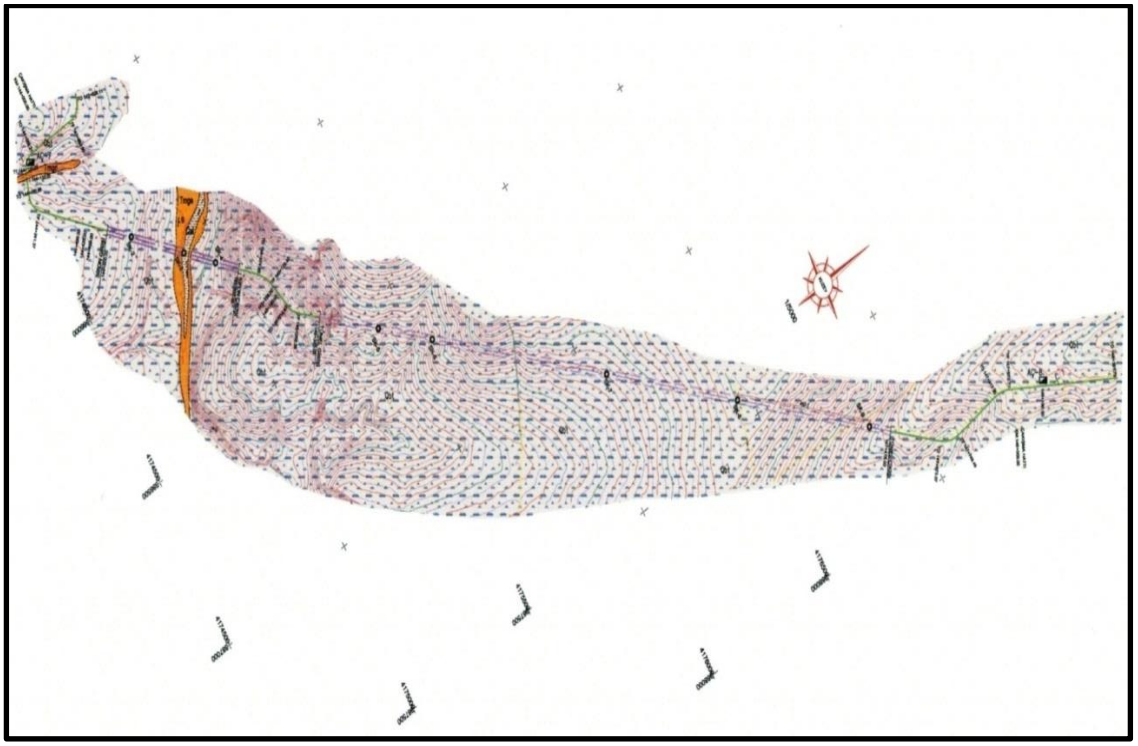
Şelmo formasyonuna ait birimler genel olarak zayıf çimentolu ve zayıf dayanımlıdır. Yer yer kumtaşı ve çakıltaşı seviyeleri sert ve dayanımlı bir yapıya sahiptirler. Su ve havayla temas etmesi durumunda kısa sürede ayrışmakta ve dağılmaktadır. Sondaj kuyularından alınan karotlarda da benzer özellikler görülmektedir. Sondaj çalışmalarında birimin durumuna göre az suyla veya zaman zaman susuz çalışılmasına rağmen karot yüzdeleri genel olarak düşük, RQD değerleri ise zayıftır. Tünel güzergahında açılan kuyularda yeraltısuyu seviyesine ulaşılmıştır. Yeraltısuyu seviyesi tünel tavan kotunun üzerinde bulunmaktadır. Ancak kumtaşı ve çakıltaşı seviyelerinden beslenime bağlı olarak 1-5 l/s civarında su alınabilmektedir. Tünele gelecek su miktarının da yaklaşık 2-3 l/s mertebesinde olması beklenmektedir.

Şelmo formasyonu tabaka eğimleri belirgin olmamakla birlikte yatay ve yataya yakın eğimli olup eğim genel olarak tünel çıkışına doğrudur. Tünel güzergâhında SK-5, SK-6, SK-7, SK-8 ve SK-9 nolu sondaj kuyuları açılmıştır (Çizelge 4.3.).

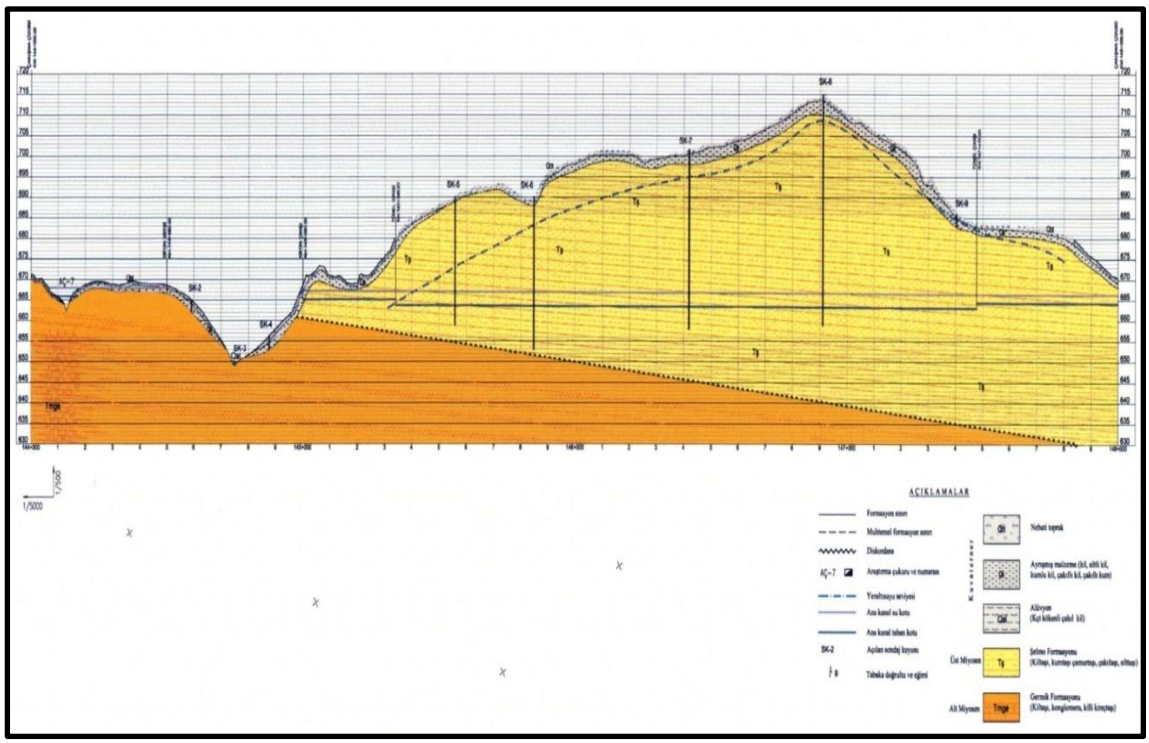
Şekil 4.4.'de T1 tüneli plan görüntüsü ve Şekil 4.5.'te ise T1 tüneli boyunca açılan jeolojik sondajlar gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. T1 tünel ekseninde açılan sondajlardan elde edilen veriler

Kuyu No	Geçilen Birimler	Kotu (m)	Derinlik (m)	YAS Seviyesi	YAS Kotu (m)	Koordinat	RQD (%)	Ayrışma Derecesi
SK-5	Nebati toprak Şelmo formasyonu	690	31,50	16,75	673,25	651193 4174056	%0-25 (çok zayıf)	Az-orta
SK-6	Nebati toprak-kil Şelmo formasyonu	689	37	6,50	682,50	651172 4174303	%0-25 (çok zayıf)	Az-orta
SK-7	Nebati toprak Şelmo formasyonu	701	45	6,35	694,65	651568 4174805	%0-25 (çok zayıf)	Az-orta
SK-8	Nebati toprak-kil Şelmo formasyonu	715	57,50	6,15	708,85	651932 4175282	%0-25 (çok zayıf)	Az-orta
SK-9	Nebati toprak-kil Şelmo formasyonu	686	25	7,05	685,10	652235 4175680	%0-25 (çok zayıf)	Az



Şekil 4.4. T1 tüneli plan görüntüsü



Şekil 4.5. T1 tünelinde yapılan jeoteknik sondajlar

Tünelde geçilecek birimlerin kaya niteliği, RMR kaya kütlesi sınıflama sistemine göre en iyi ve en kötü şartlarda belirlenmeye çalışılmıştır. Bu sınıflama sistemine göre tünelde geçilecek birimlerin en iyi ve en kötü koşullarda kaya kalitesi IV. Sınıf "zayıf kaya" olarak belirlenmiştir.

Tünelde süreksizlik eğim ve eğim yönünün etkisi tablosu (Çizelge 3.6.) ile süreksizliklerin yönelimine göre düzeltme tablosundan (Çizelge 3.7.) yararlanılarak toplam puanda düzeltme yapılmıştır.

Çizelge 3.6.'dan yararlanılarak süreksizlik eğim yönü, "orta" (doğrultuya bakılmaksızın eğimin 0°-20° arasında) bulunmuştur. Çizelge 3.7.'da tünellerde "orta"ya karşılık gelen düzeltme puanı -5 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. 'de görüldüğü gibi düzeltme yapıldıktan sonra kaya kalitesi en iyi şartlarda 39 puan, en kötü şartlarda ise 32 puan olarak belirlenmiştir. Kaya Sınıfları ve Puanları Tablosundan (Çizelge 3.8.) yararlanılarak bu puanların (39-32) IV nolu sınıfa karşılık geldiği ve sınıfında zayıf kaya olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.4. T1 ve T2 nin RMR kaya kütle sınıflama sistemine göre değerlendirilmesi

Parametreler	En iyi durumda	En kötü durumda
Sağlam Kayacın Dayanımı	4	4
Kayaç Kalite Göstergesi, RQD	8	5
Süreksizlik Aralığı	8	8
Süreksizliklerin Durumu	20	20
Yeraltı Suyu	4	0
Toplam puan	44	37
Düzeltme puanı	-5	-5
Net puan	39	32

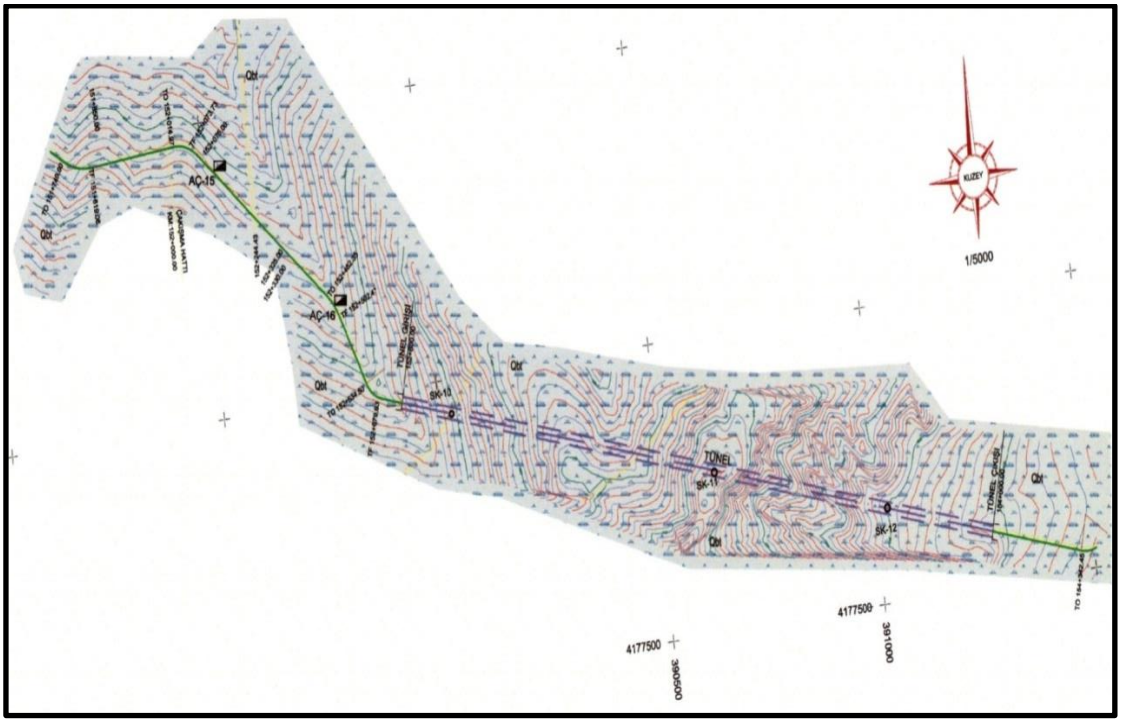
RMR kaya kütle sınıflama sistemine göre IV. sınıf "zayıf kaya'' ortamında açılması öngörülen T1 tünelinin kazı ve destekleme tablosu Çizelge 3.9.'de verilmiştir.

4.3.2. T2 Tünelinde Yapılan Çalışmalar

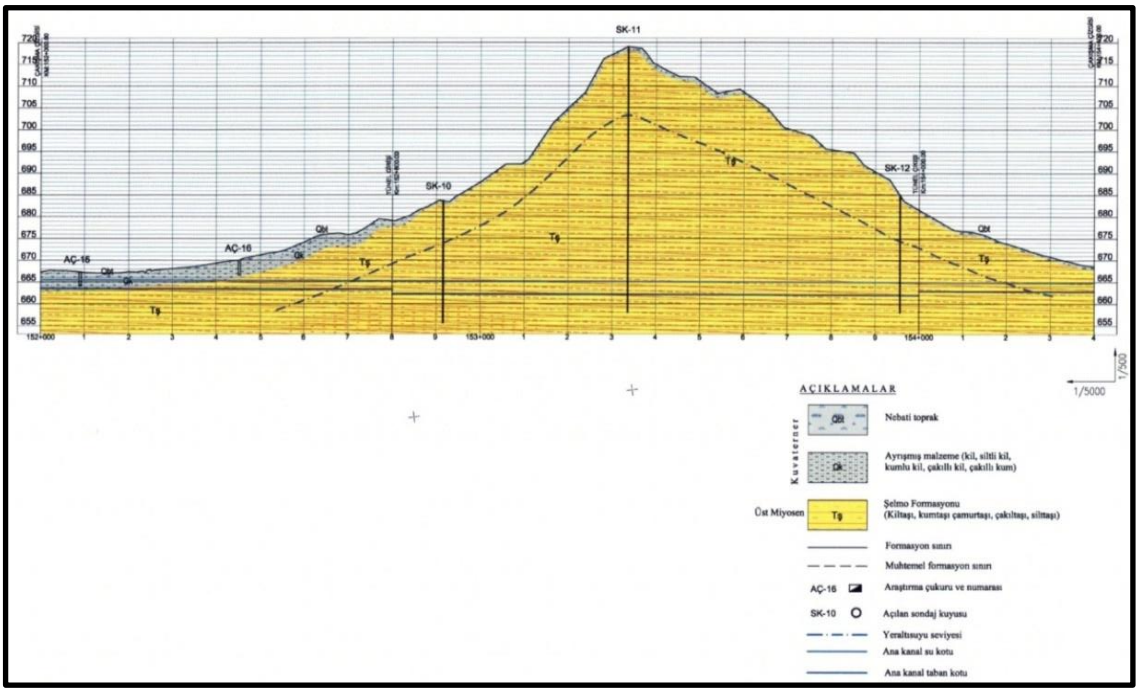
T2 tüneli 1200 m uzunluğunda olup tünel güzergâhı boyunca SK-10, SK-11, SK-12 (Çizelge 4.5.) olmak üzere toplam 3 adet jeoteknik amaçlı sondaj yapılmıştır. Tünel güzergahı, T1 tünelinde olduğu gibi Şelmo Formasyonu olarak adlandırılan Üst Miyosen yaşlı kiltaşı, kumtaşı, çamurtaşı, silttaşı, çakıltaşı ve konglomeraların ardalanmasından oluşan birim içerisinde geçmektedir.

Söz konusu bölgede şelmo formasyonun tabaka eğimleri T1 tünelinde olduğu gibi belirgin olmamakla birlikte, yatay ve yataya yakın konumda olup, eğimler genelde tünel çıkışına doğrudur.

Yeraltı suyu seviyesi ve tünele gelecek su miktarlarının T1 tüneli için öngörülen seviyelerde olduğu düşünülmüştür. Tünel güzergâhında açılan kuyularda yeraltı suyu seviyesine ulaşılmıştır. T2 tüneli açımında geçilecek birimlerin kaya niteliği, yine RMR kaya kütlesi sınıflama sistemine göre en iyi ve en kötü şartlarda belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarda, T1 tünelindeki kazı şartları, sınıfı ve yapılacak desteklemeler ile alınacak önlemlerin bu tünel içinde geçerli olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.6. T2 tüneli plan görüntüsü



Şekil 4.7. T2 tünelinde yapılan jeoteknik sondajlar

Çizelge 4.5. T2 tünel ekseninde açılan temel sondajların yeraltı suyu durumu

Kuyu No	Geçilen Birimler	Kotu (m)	Derinlik (m)	YAS Seviyesi (m)	YAS Kotu (m)	Koordinat	RQD (%)	Ayrışma Derecesi
SK-10	Nebati toprak Şelmo for.	684	28	9,93	674,07	654445 4176804	% 0-25 (Çok Zayıf)	Az-orta
SK-11	Nebati toprak-kil Şelmo for.	718	61	15,54	702,46	655049 4176649	% 0-25 (Çok Zayıf)	Az
SK-12	Nebati toprak Şelmo for.	685	27	10,50	674,50	655449 4176553	% 0-25 (Çok Zayıf)	Az

4.3.3. T1 ve T2 Tünellerinde Uygulanan Kazı Yöntemi

T1 ve T2 tünellerinin kazısında Hyundai LC 110 kırıcı ve kazılan pasanın nakli içinde Volvo L90 yükleyici kullanılmıştır. Ayna kazısında daha güçlü kırıcılar kullanılırken tarama kazısında ise aşırı söküm, galeri çevresinde yüksek titreşim ve örselenmenin oluşmaması için, ufak kırıcıların monte edildiği makinalar kullanılmıştır (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. Hidrolik kırıcı

Tünellerde yapılan kazı sonrası ortaya çıkan pasa yükleyici yardımıyla kamyonlara yüklenerek tünel dışına taşınmıştır (Şekil 4.9.). Aynadan her bir ilerleme periyodunda yaklaşık olarak bir seferde 25 m^3 malzeme kazısı gerçekleştirilmiştir.

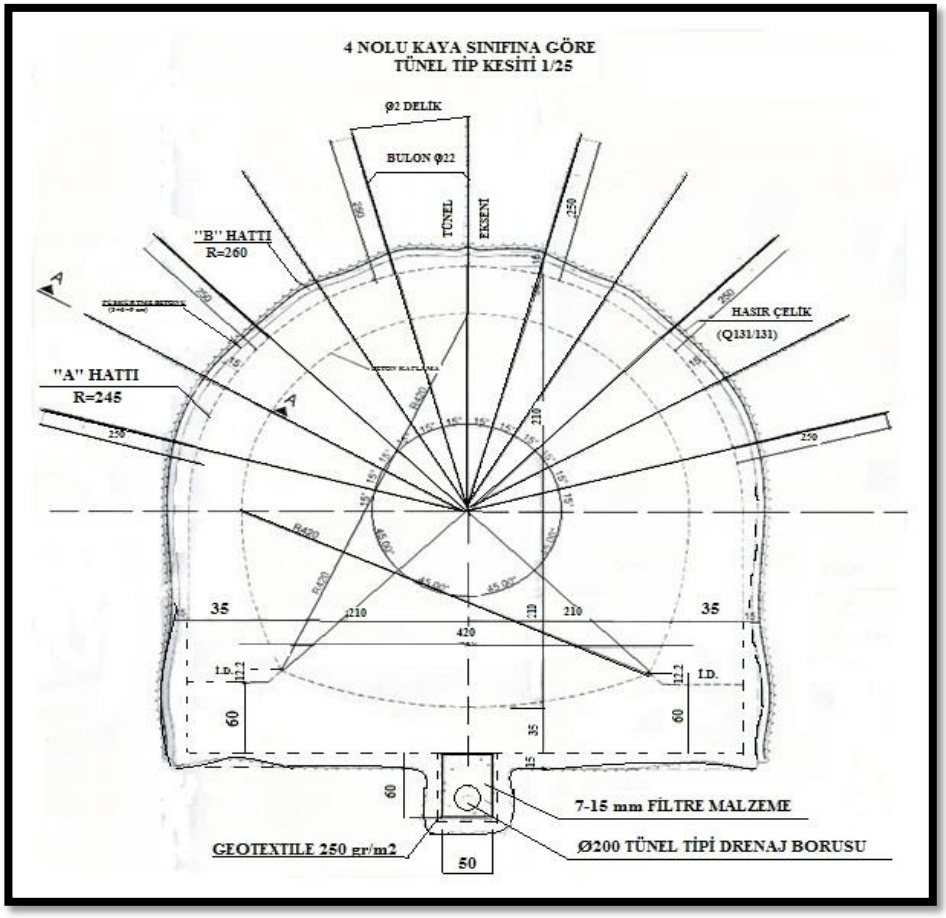


Şekil 4.9. Yükleyici ile pasa nakli

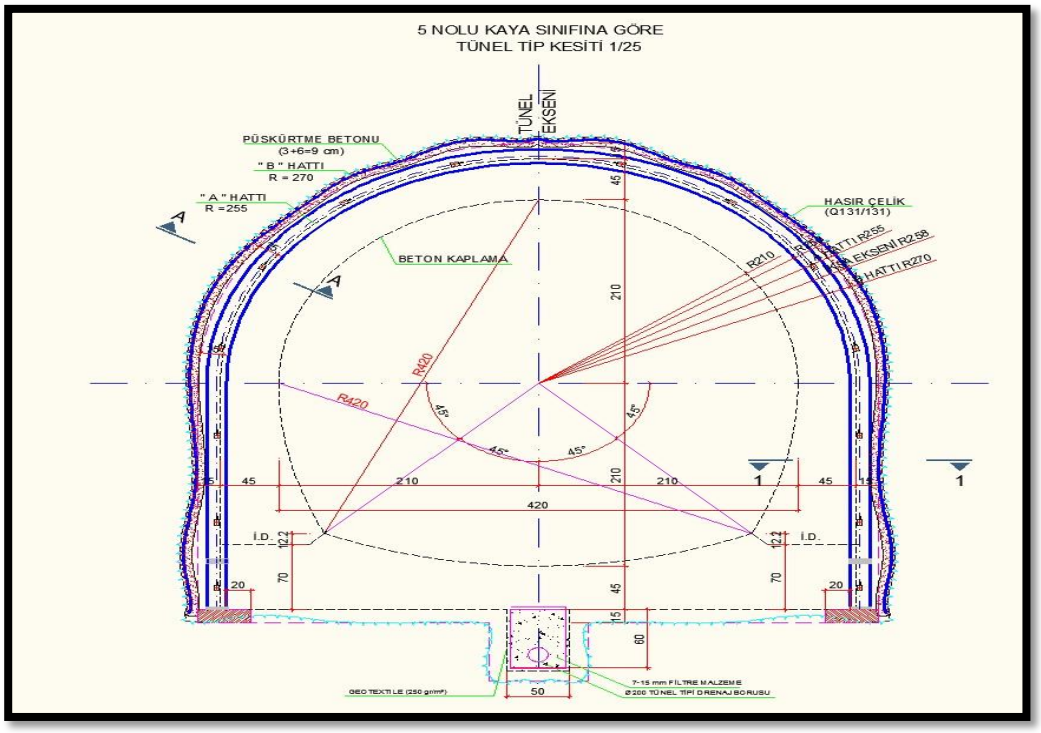
Kayanın stabilitesine, su durumuna ve seçilen kazı destek tipine bağlı olarak kazı sırasında akmaların önlenmesi için aynada topuk şeklinde göbek bırakılmıştır. Bu göbeğin bırakılması makinaların hareket alanını kısıtlamıştır.

4.3.4. T1 ve T2 Tünelinde Öngörülen Destekleme Yöntemi

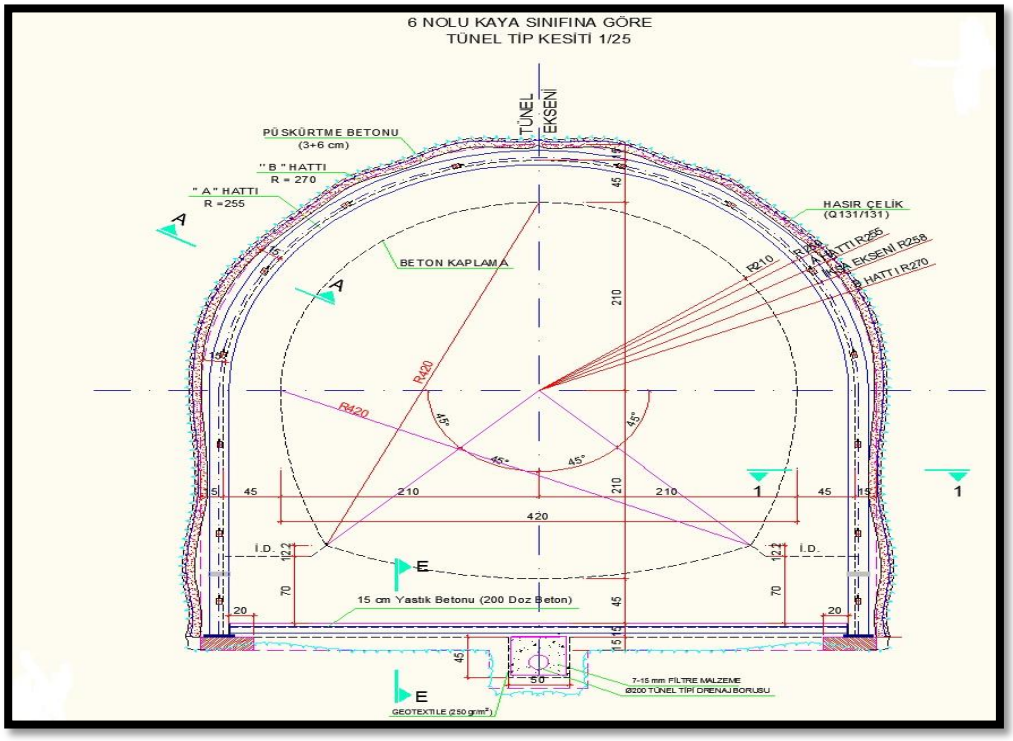
T1 ve T2 tünellerinin 4.5.6 no'lu kaya sınıfına göre uygulanacak destekleme yöntemleri sırasıyla Şekil 4.10. Şekil 4.11. Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.10. 4 nolu Kaya sınıfı destekleme



Şekil 4.11. 5 nolu Kaya sınıfı destekleme

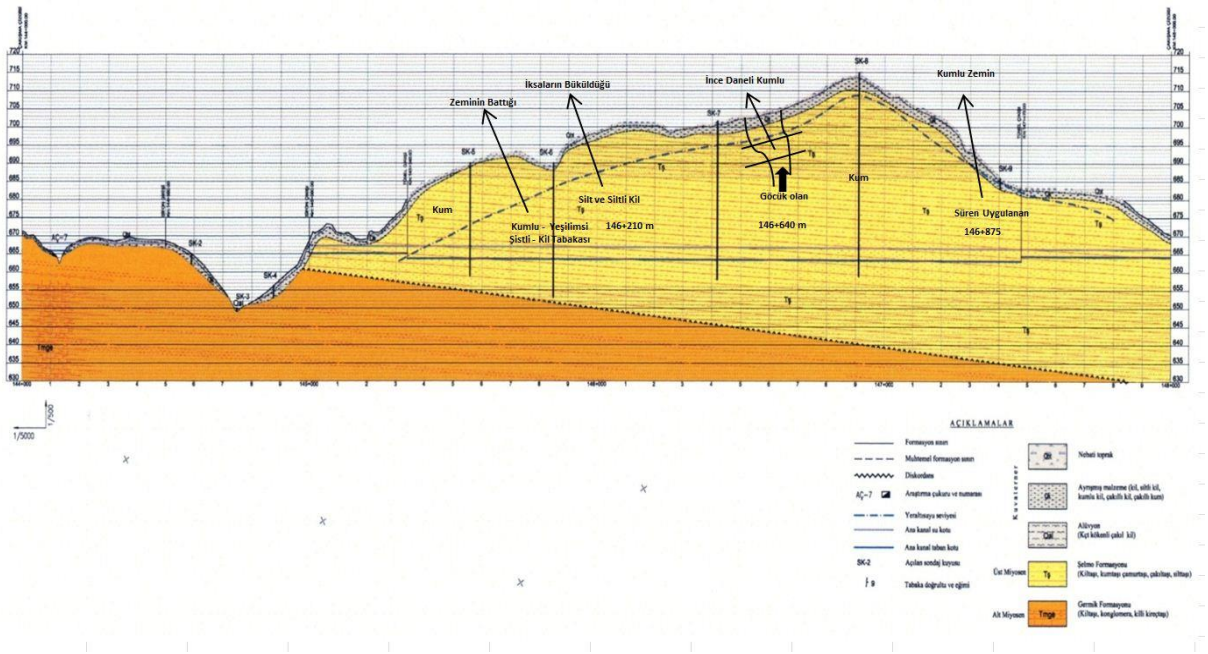


Şekil 4.12. 6 nolu Kaya sınıfı destekleme

4.4. T1 ve T2 Tünellerinde Karşılaşılan Sorunlar ve Çözümleri

4.4.1. T1 Tüneli

T1 tünelinde yapılan jeoteknik çalışmaların yetersizliğinden ötürü birimler ve jeolojik yapının tünel ortamını yansıtmadığı görülmüştür. T1 tüneli açımı (Kazı-Destekleme) sırasında yapılan ön jeolojik etüt çalışmalarında öngörülen sorunlardan farklı olarak sık sık formasyon geçişleri, aşırı miktarda su geliri, akma-boşalma-göçük, yanal basınçlar, ve tabanda çökme veya batması gibi problemlerle karşılaşılmıştır. T1 tünelinde tünel açımı sırasında geçilen formasyon özelliklerinin jeoteknik rapordan farklı olduğu tespit edilmiştir. T1 tüneli açımı sırasında yaşanan sorunların tünel boy kesitindeki konumları Şekil 4.13.'te verilmiştir.



Şekil 4.13. T1 tünelinde yaşanan problemlerin tünel boy kesitindeki kilometreleri

T1 Tünel açımı koyu kahve renkli kiltaşı ve siyah-gri renkli tamamen çimentosuz kum depozit içinde yürütülmüştür. Yaklaşık 2-2,5 m kalınlığında olan bu birim kazı sırasında tünelin üst kısmında bulunduğu kesimlerde kendini tutamamakta ve tünel tavanında yer yer boşalmalar yaşanmıştır.

Jeoteknik rapora göre; T1 tünelinin 145+510 – 146+470 km'leri arası 5 nolu kaya kütlesi sınıfı olarak değerlendirilmiş ve bu bölümde iksa aralığı 0,75 m olarak seçilmiştir. T1 tünelinin 146+470. km' sinden itibaren tünel üst yarısında siyah-gri renkli tamamen çimentosuz olan kum depozit birimi ile karşılaşılmıştır. Bu durum tünel açımı esnasında akma ve dökülmeler şeklinde stabilite problemlerine neden olmuştur. Bu nedenle km: 146+470' ten sonra kazıların 5 nolu kaya kütlesi sınıfında ve iksa aralıklarının 0,50 m olacak şekilde yapılması uygun görülmüştür.

Tünellerde kazı tarama ve pasa yükleme işlemi sonrası ilk olarak kafes kiriş sistemdeki çelik iksa montajı yapılmıştır. İki adet T20 ve bir adet T26 lık nervürlü çelik ile bunları bağlayan bağlantı elemanlarından oluşan iksa, çelik hasır, sürgü çubukları ve püskürtme beton geçici desteklemenin ana elemanlarını oluşturmuştur. Çelik hasır ve iksa montajı duraylılığı düşük, zayıf kaya ortamında kazı adımı yer yer 50 cm'den düşük tutulmuştur. Kazı sonrası çelik hasır ve çelik iksa montajı yapılıp, 15 cm. kalınlığında püskürtme beton atılmıştır. Tünellerde karşılaşılan temel problemler aşağıda sıralanmıştır.

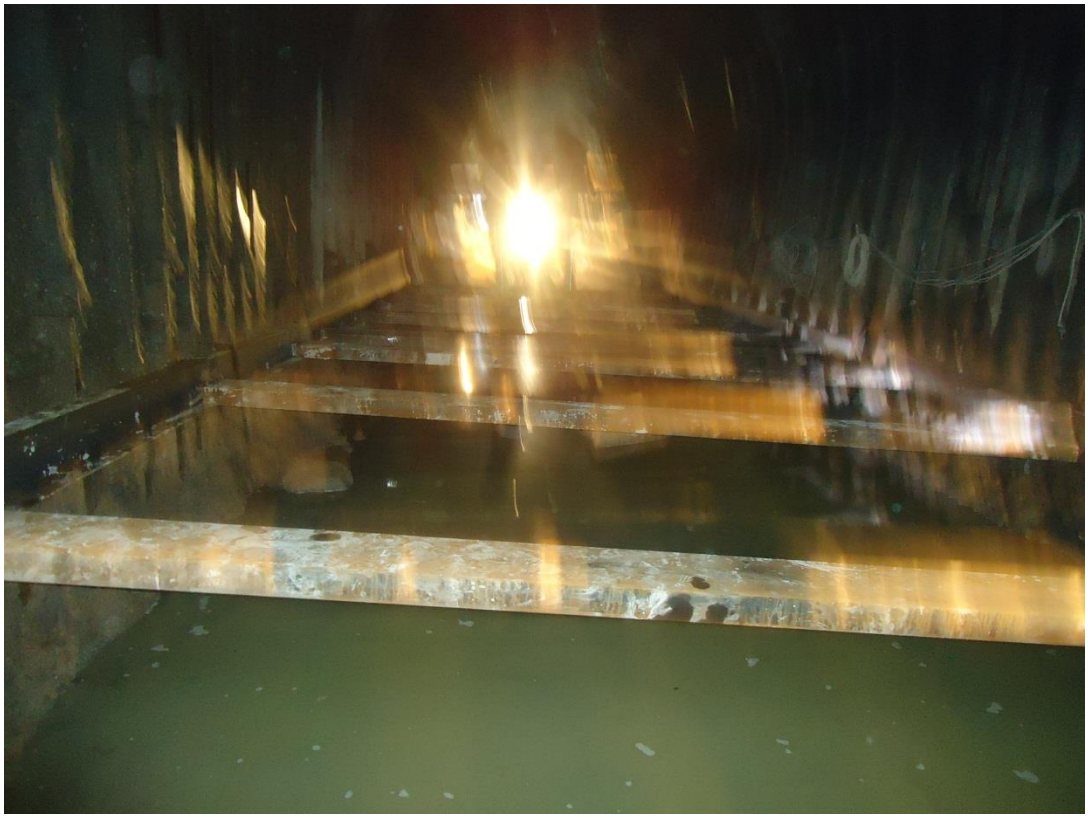
4.4.1.1. Su Geliri ve Zemin Batması

T1 tüneli genelinde su geliri ile birlikte tünel tabanında batma problemleri yaşanmıştır. Tünel tabanında bulunan suya doygun hale gelmiş killi, gevşek ve yumuşak malzeme nedeniyle yükleyici, delici ve kamyonların zemine batması gibi sorunlar yoğun yaşanmıştır. Bu durum tünel açma performansını olumsuz etkilemiştir. T1 tüneli 145+330 m'de jeoteknik etüt raporda formasyon kiltaşı olarak belirtilmiş, ancak tünel açımı sırasında bu kesimde daha çok yeşilimsi kiltaşı ve ince daneli kumlu zemin ile karşılaşılmıştır. Suyun drene olmaması nedeniyle tünel tabanında batmaya müsait balçık bir zemin oluşmuştur. Tünelde karşılaşılan su geliri kazı – yükleme, iksa kurumunu, püskürtme beton süreçlerini olumsuz etkilemiştir.

Su gelirinin ortaya çıkardığı bir diğer sorun ise kazı sırasında yeraltı suyu tabakalardaki mevcut çatlaklara girerek çatlak yüzeyindeki malzemenin kohezyon, kayma mukavemeti ve içsel sürtünme açısını düşürmektedir. Bunun neticesinde çatlaklarla sınırlanmış olan blokların kayarak düşmesine, boşalmalara yol açarak çalışma ortamının güvenliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Bununla birlikte, tünel

aynasında biriken su aynadaki pasanın yumuşamasına sebep olmuş makinaların ve kamyonların manevra kabiliyetini azaltmıştır.

Ayrıca tünel tabanındaki silt, kil gibi ince daneli zeminlerin ihtiva ettiği su, düşük geçirgenlik nedeniyle, tünel açım sırasında drene olmamış ve tünel tabanında birikmiştir. Şekil 4.14.'de drenajsız kesimde tünel tabanında biriken su görülmektedir.



Şekil 4.14. Tünel tabanında suyun birikimi

Bu problemi çözmek için öncelikle tabanda iri kaya bloklarında dolgu yapılmış ve daha sonra biriken suyun tahliyesi için ince filler malzeme ve membranla drenaj kanalları yapılmıştır. (Şekil 4.15. ve şekil 4.16.).



Şekil 4.15. Tünel tabanında kaya dolgu uygulaması



Şekil 4.16. Tünel tabanında drenaj kanallarının yapımı

Tünel açımı esnasında karşılaşılan su gelirinin bir diğer önemli etkisi ise tavan ve aynada akma ve göçmelere neden olmustur.

Bu göçük veya akmaları önlemek için; kazıdan hemen sonra, desteksiz tabakaların gevşeyerek dökülmesinin önlenmesi amacıyla kazı yüzeyine ve duvarlara yer yer 15 cm'ye varan yaş karışım püskürtme beton uygulanmış ancak tavandanki boşalmalar önlenememiştir (Şekil 4.17.).



Şekil 4.17. Tavanda yaşanan akma (boşalma)

Tünel çevresinde su gelirinin artması nedeniyle püskürtme beton, henüz prizini almaya zaman bulmadan suyun yıkama etkisi ile zeminden koparak yüksek oranda dökülme problemleri yaşanmıştır. Bunu önlemek için püskürtme beton uyugulaması, agrega ve kimyasal katkı oranları gözden geçirilerek yeni bir karışım tasarlanmıştır. Bu da tünel açımı süresine uzatmış ve maliyetleri arttırmıştır.

4.4.1.2. Yanal Kapanmalar

Yeryüzünde veya yüzeyin altında bulunan bir tabaka, kendi ağırlığı ve bu tabakanın üstünde bulunan yüzeye kadar olan tüm tabakaların etkisi altındadır.

Kaya veya zeminin ezilme dayanımının üstüne çıkmış olan bu gerilmeler, deformasyonlara ve açıklık ortamına doğru akmalara neden olurlar .

T1 tünelinde yaşanan taban kabarması ve iksalarda yaşanan yanal basma (kapanma) problemi daha çok şelmo formasyonuna ait kiltaşı biriminde gerçekleşmiştir. Tünelin hemen hemen tamamının yeraltı su seviyesinin altında açılması nedeniyle kiltaşı olan bölgelerde; kil suya doygun hale gelmiş ve havayla teması ile birlikte aktif duruma geçerek hızla şişme, ayrışma ve dağılma özelliği göstermiştir. Kilin bu şişme davranışı, T1 tünelinde belirli bölgelerde taban kabarması ve yanal basınç (yanal kapanma) problemlerinin yaşanmasına neden olmuştur. (Şekil 4.18.).



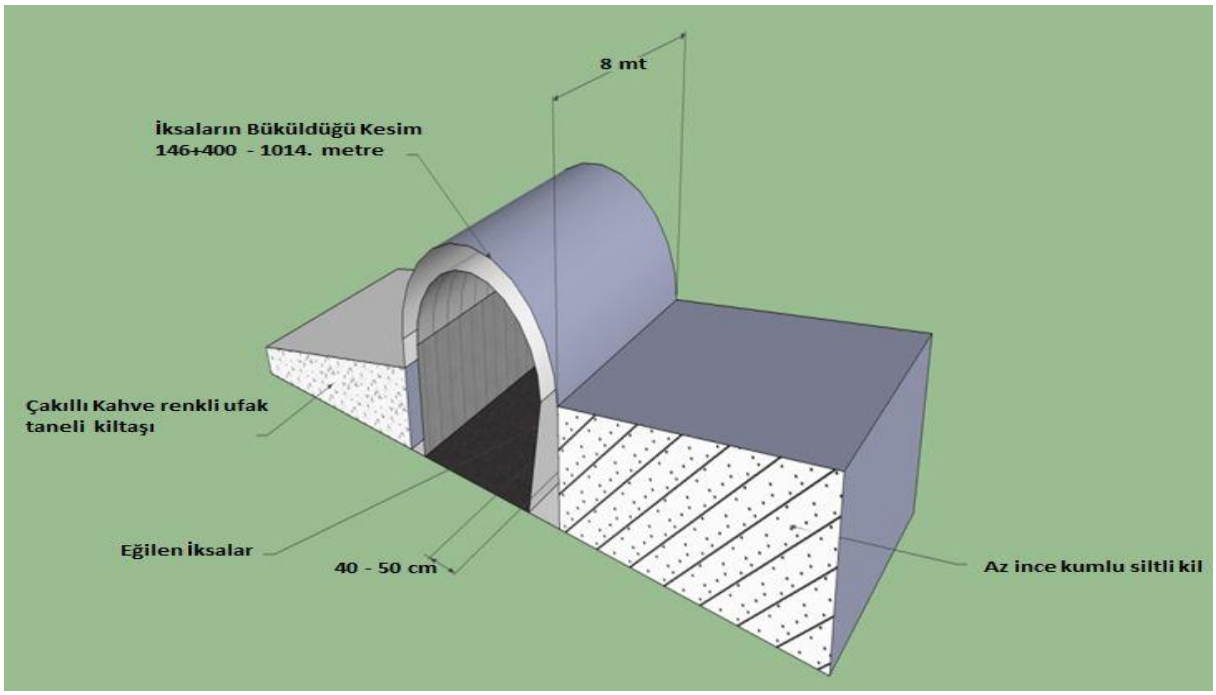
Şekil 4.18. Yan duvarlarda akmalar

Açıklığın tavanında veya duvarlarında oluşan bu hareketleri önlemek veya belirli seviyelerde tutmak için destek elemanlarının kullanılması zorunlu kılmıştır. T1 tünelinde de az ince killi kumlu siltli kil tabakalarının bulunduğu kesimlerde oluşan aşırı yanal kapanmalar (basınçlar) etkisiyle iksa ayaklarında içe doğru kayma ve bükülme şeklinde deformasyonlar oluşmuştur. Bu deformasyonlar nedeniyle iksa ayakları yaklaşık 45-50 cm kadar tünel içine doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.19.).



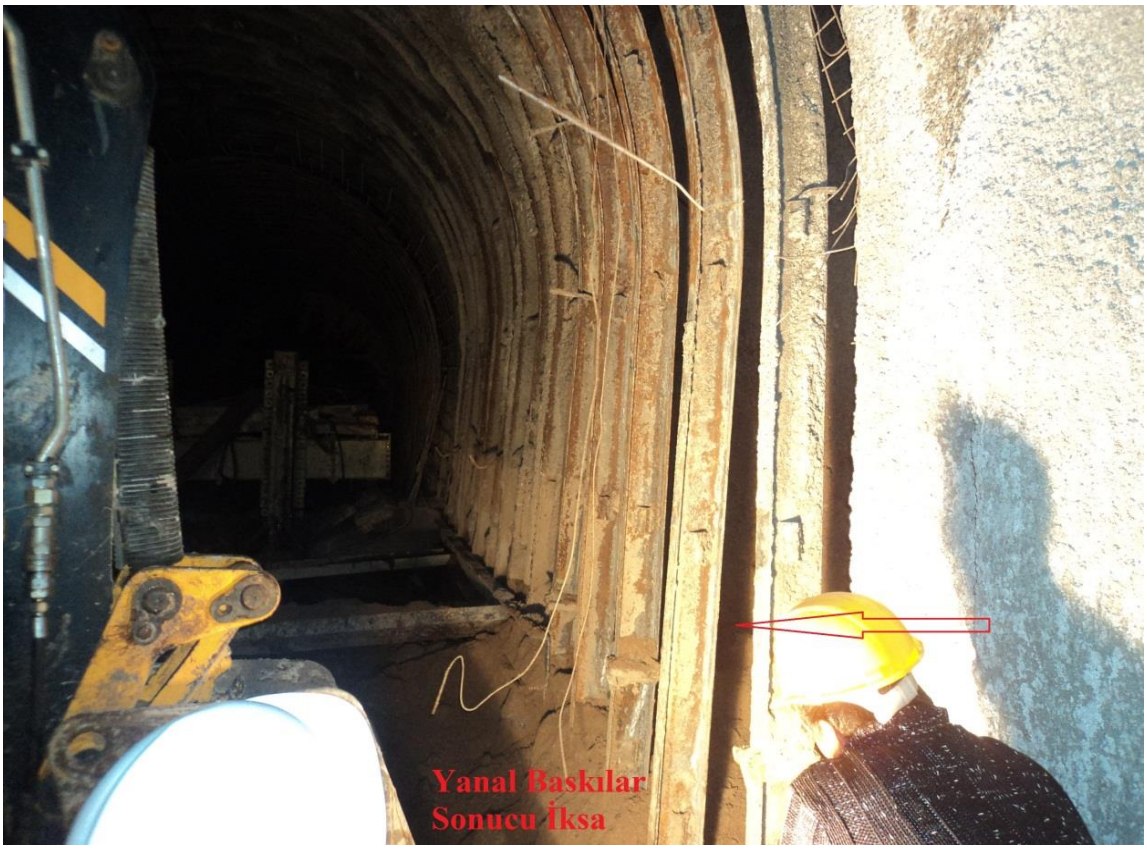
Şekil 4.19. İksaların yanal basınçlar nedeniyle bükülmesi

Şekil 4.20 'de görüldüğü gibi yanal basınçlara neden olan az kumlu siltli kil ve iksa ayaklarındaki kapanma şematize edilmiştir.



Şekil 4.20. İksa ayaklarındaki kapanmanın şematik gösterimi

İksa ayaklarında oluşan kayma ve bükülmeleri önlemek için öncelikle; deformasyona ugrayan iksaların arka kısımları tıraşlanmıştır (Şekil 4.21.).



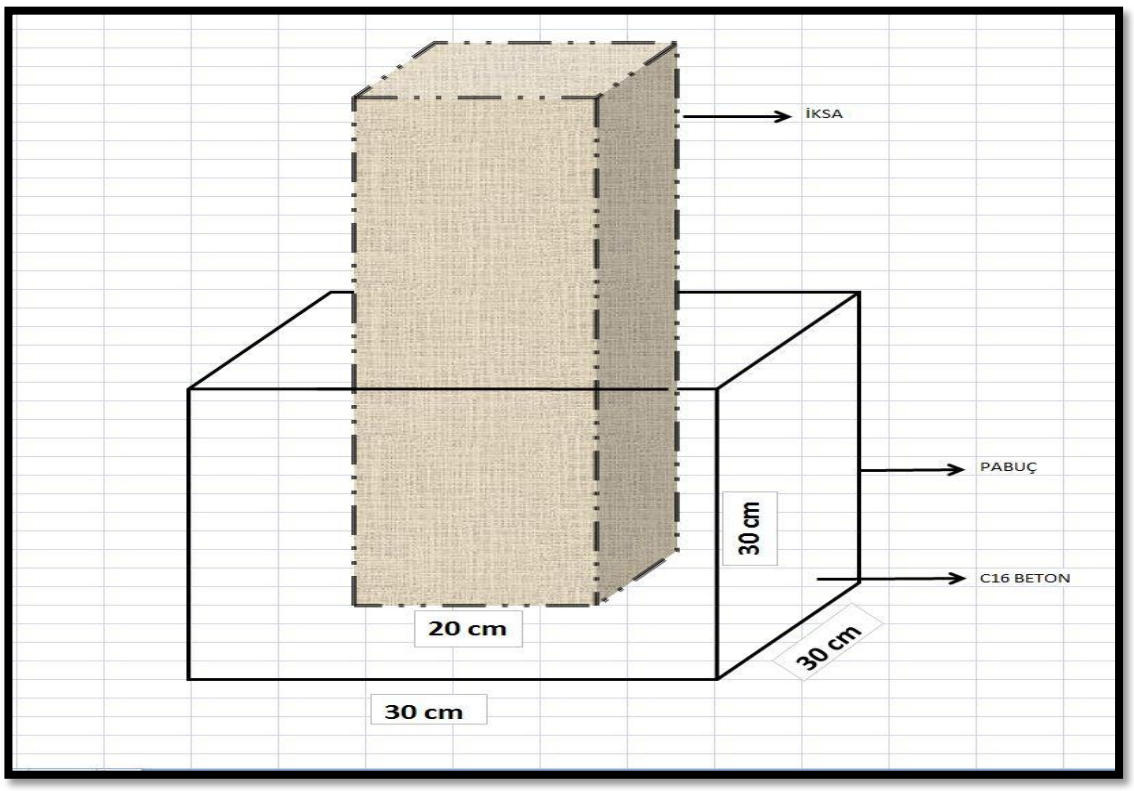
Şekil 4.21. Bükülen iksaların (taranana) traşlanan kesimleri

Bu iksaların bükülen kısımları ısıtılıp itilerek orijinal pozisyonuna getirilmiş iksa ayakları (papuç) arasına 5 metrelik 200'lük profillerle gergiler yerleştirilmiştir (Şekil 4.22.).

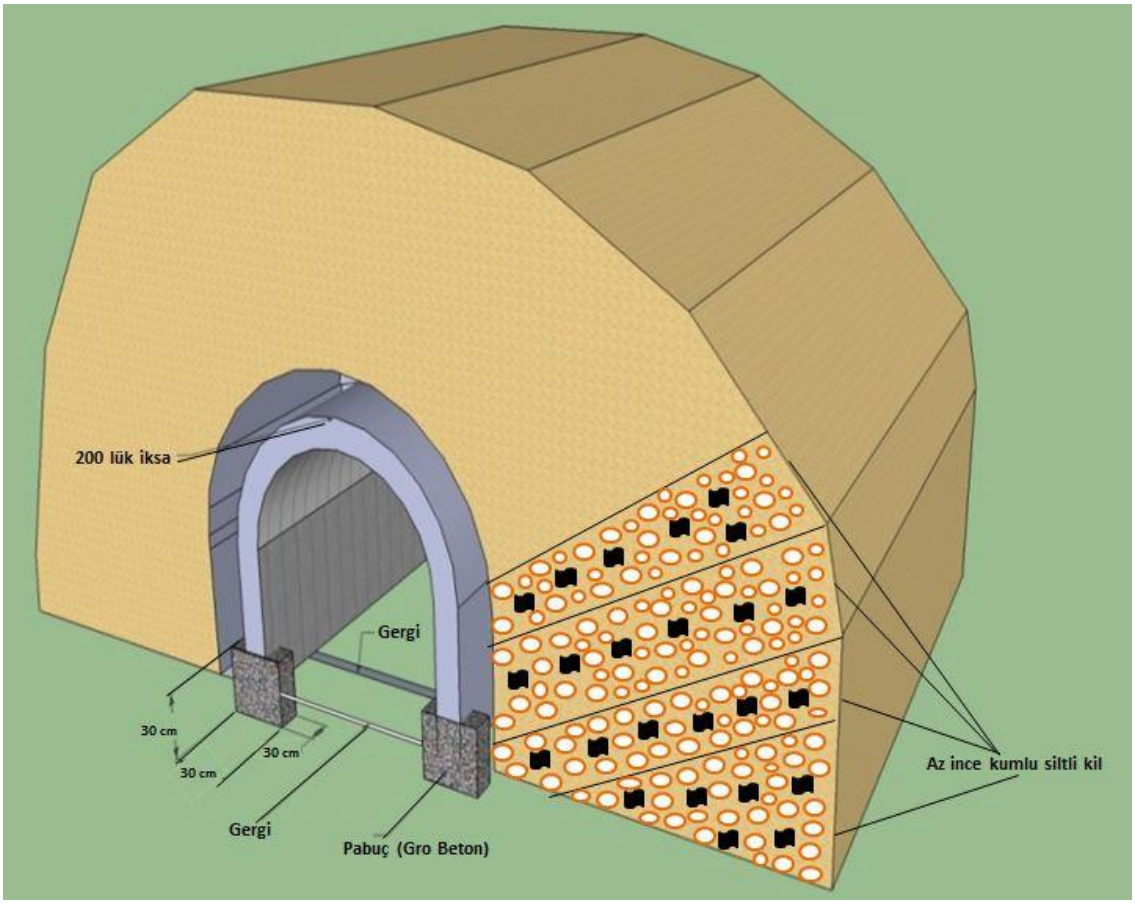
İkinci bir kayma veya bükülme yaşanmaması için sözkonusu iksaların ayakları 30x30x30 cm olan küp şeklinde kalıpların içine C16 beton basılıp sabitlenmiştir (Şekil 4.23.). Yapılan tüm bu işlemleri gösterir ilüstrasyon şekil 4.24.' de verilmiştir. Bununla birlikte işlem gören iksaların arkasına çelik hasır ve püskürtme beton uygulanmıştır.



Şekil 4.22. İksa ayaklarının gergiler ile sabitlenmesi



Şekil 4.23. İksa ayaklarının küp kalıplara alınarak sabitlenmesi



Şekil 4.24. İksaların eğildiği bölümler ve birimler

4.4.1.3. Tavanda Oluşan Akmalar ve Göçükler

Bazı zeminler ıslandıklarında veya yük altına girdiklerinde yapılarındaki ani göçme sonucu önemli hacim azalmaları gösterirler. Bunun nedeni kurak iklim şartlarında oluşmuş ve bir bağlayıcı ile tutturulmuş doygun olmayan zeminlerde, ıslanma sonucu bağlayıcı kuvvetlerin yitirilmesiyle boşluk oranında büyük azalmalar görülebilmektedir. Nitekim tünel açımı yapılan bölgenin yaz aylarında aşırı buharlaşma yaşanan kurak iklim sınıfında olan Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yer alması nedeniyle kum, çakıl, çimentolaşmış silt gibi malzemelerin duraylılığı düşük olduğundan, yeraltı su seviyesinin üstünde bu malzeme kendini tutamamakta ve akma şeklinde kendini göstermektedir. Bu tip zeminlerin tünel içine doğru hareketine karşı konulmazsa, deformasyonlar meydana gelebilir (Yıldırım 2009).

T1 tünelinde yaşanan göçük 146+640-146+650 km'leri arasında SK-7 ve SK-8 sondaj kuyuları arasında gerçekleşmiştir.

SK-7 nolu sondaj kuyusunda; Şelmo formasyonunun RQD değerleri, %0-25 arasında (çok zayıf), ayrışma derecesi genel olarak W2-W3 "az ayrışmış"-"orta derecede ayrışmış", yeraltı suyu seviyesi 6,35 m olarak belirlenmiştir. Tünele karşılık gelen kesimde kiltaşı-kumtaşı birimleri geçilmiş ve RQD değerleri %0'dır.

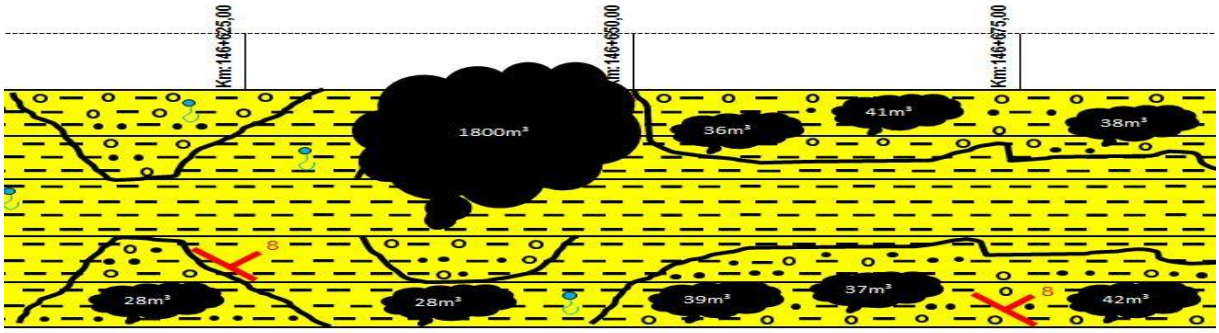
SK-8 nolu sondaj kuyusunda; Şelmo formasyonunun RQD değerleri, %0-25 arasında (çok zayıf), ayrışma derecesi genel olarak W2-W3 "az ayrışmış"-"orta derecede ayrışmış", yeraltı suyu seviyesi 6,15 m olarak belirlenmiştir Tünele karşılık gelen kesimde kumtaşı birimi geçilmiş ve RQD değerleri %0'dır.

Bu bölgede açılan sondaj kuyularından da anlaşıldığı gibi tünel yeraltı su seviyesi altında olup kiltaşı ve kumtaşı birimlerinden geçmektedir. Kiltaşında su ve hava temasına bağlı olarak hızla şişme, ayrışma ve dağılma davranışı yanı sıra su emme oranına bağlı olarak birim hacim ağırlığında artış söz konusudur. Bununla birlikte kumtaşında ise su ile birlikte, birim hacim ağırlığında artış ve daha kolay boşalma, akma özelliği kazanmıştır. Bu faktörlerin yanı sıra kontrolsüz kazı (hızlı ilerleme) ve tünel üzerindeki örtü tabakasının en kalın olduğu ve birimlerin suya doygun birim hacim ağırlıkları da dikkate alındığında tünele etkiyen düşey yüklerin en fazla olduğu kesimde; uzunluğu 10 metre ve yüksekliği 22-25 metre arasında değişen büyük ölçekli bir göçük olayı yaşanmıştır (Şekil 4.25.). Bir başka deyişle bu bölgede yüksek ilerleme hızına karşın destekleme hızı ayak uyduramamış, zayıf tahkimatsız durma süresi kısa olan formasyonun kendini tutamayıp akması gerçekleşmiştir. Geçilen birimlerin su içeri değerleri yer yer %17,0 - %29,1 arasında değişmektedir. Bir formasyonun yaklaşık 14,12 kN/m^3 olan kuru birim hacim ağırlığı değeri, suyla birlikte doğal birim hacim ağırlığı 18,23 kN/m^3,e ulaşmıştır. Bir başka değişle suyun etkisiyle formasyonların birim hacim ağırlıklarında poroziteye bağlı olarak yaklaşık % 30'luk bir artış söz konusudur.

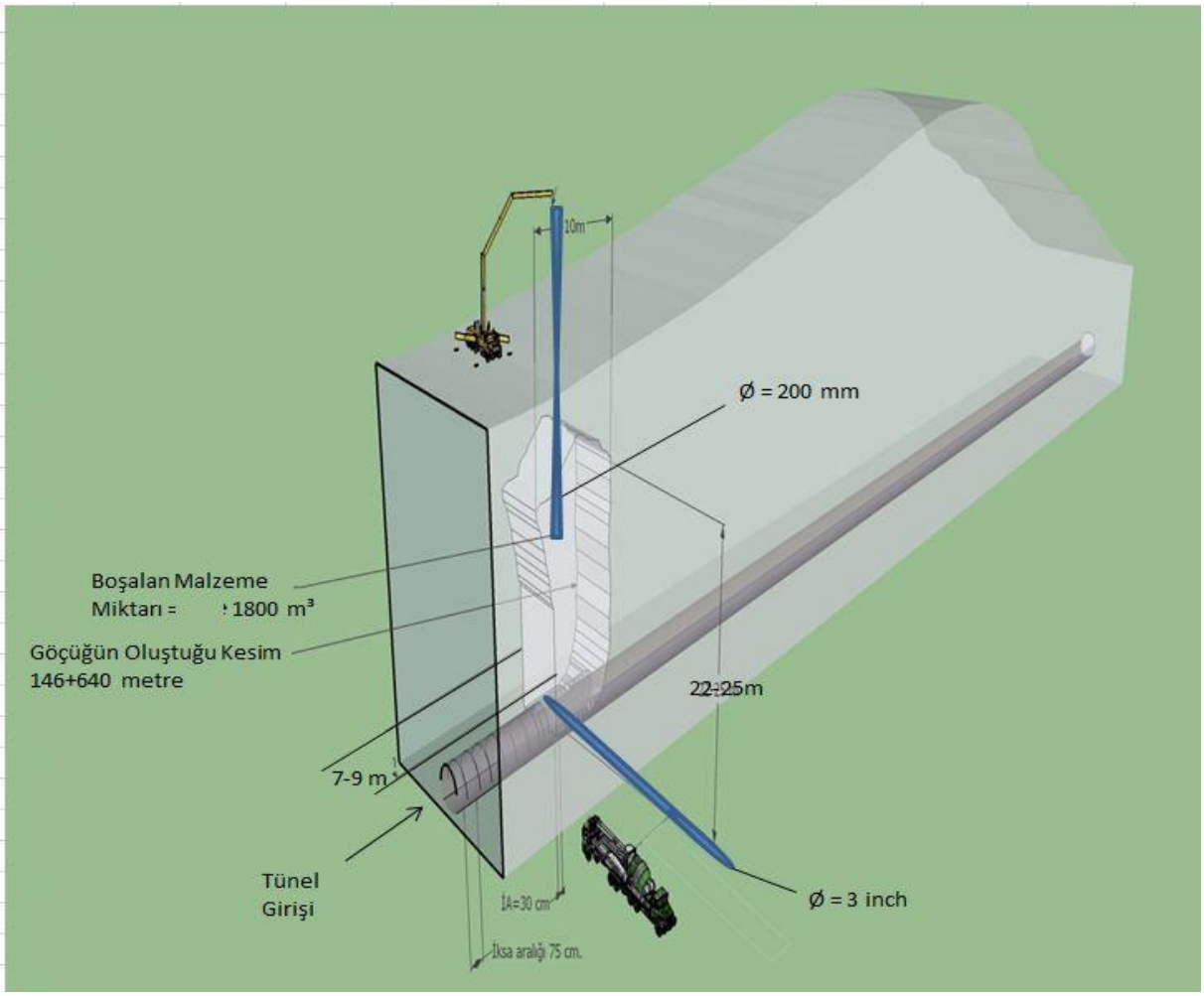
Göçük yaşanan bölge jeoteknik raporda "B2 çok gevrek" olarak tanımlanmış ancak göçük olayı ile birlikte bu bölgenin "B3 çok zayıf" kaya kütlesi olarak değerlendirilmesinin daha doğru olacağına karar verilmiştir. Yaşanan göçük olayı tünelde kazı çalışmalarının 10 gün durmasına neden olmuştur. Tünelde oluşan bu göçüklü bölgeyi sorunsuz geçebilmek için öncelikle göçen malzeme (1700-1800 m^3) alınıp akabinde iksa aralıkları 30 cm'ye kadar düşürülmüştür. Göçük bölgesinde tünel

içerisinden yukarıya doğru enjeksiyon yaparak oluşan boşluğun bir kısmının doldurulmasıyla tünel tavanı desteklenmiştir.

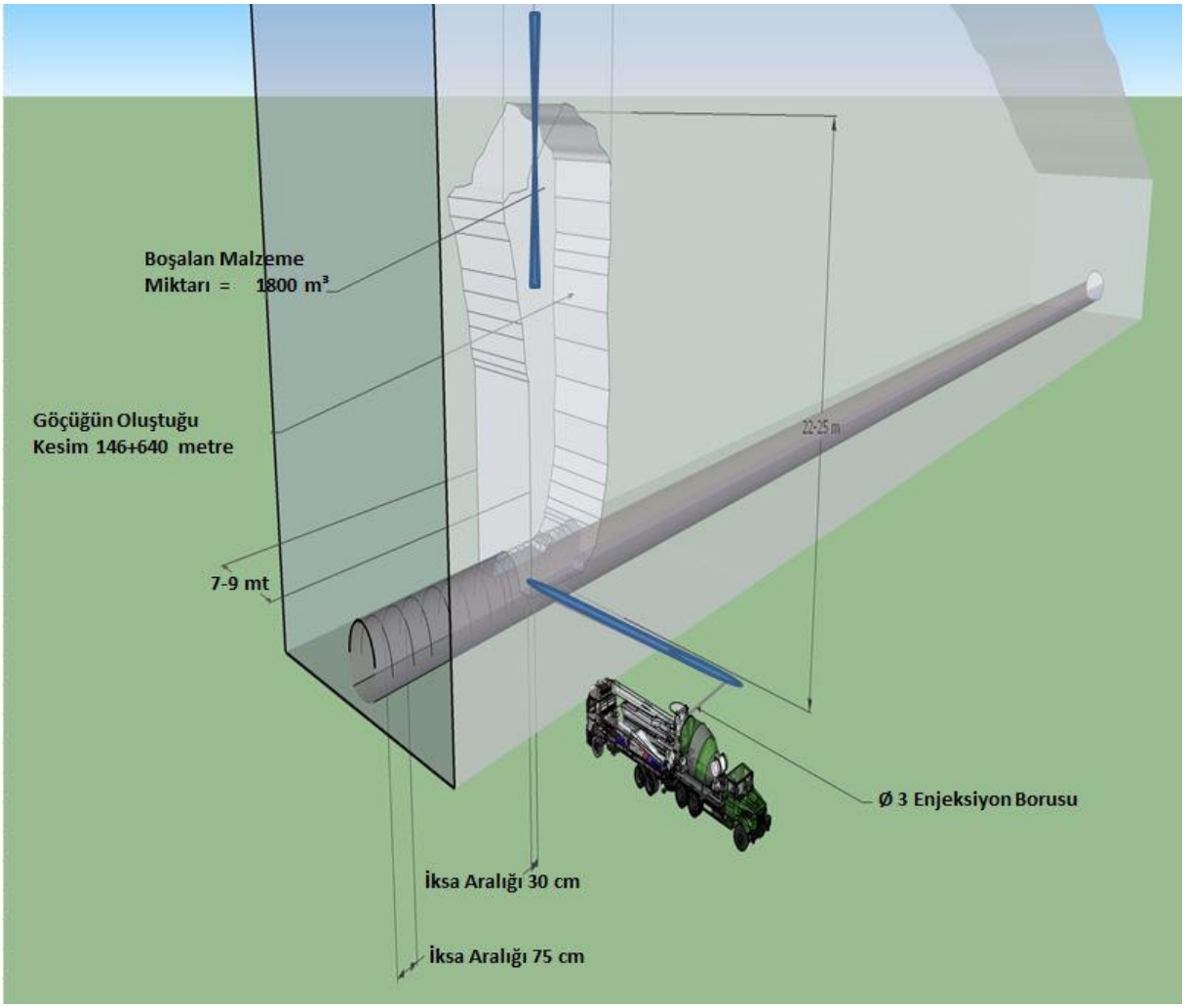
Daha sonra göçük bölgesine topoğrafik yüzeyden 200 mm çaplı boru yardımıyla göçük boşluğuna düşük dozlu grobeton basılarak nihai destekleme yapılmıştır (Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.).



Şekil 4.25. Tünelin güzergahında meydana gelen göçüğün plan görünüşü



Şekil 4.26. Oluşan göçüğün kesit görünüşü



Şekil 4.27. Göçük bölgesindeki enjeksiyon uygulaması

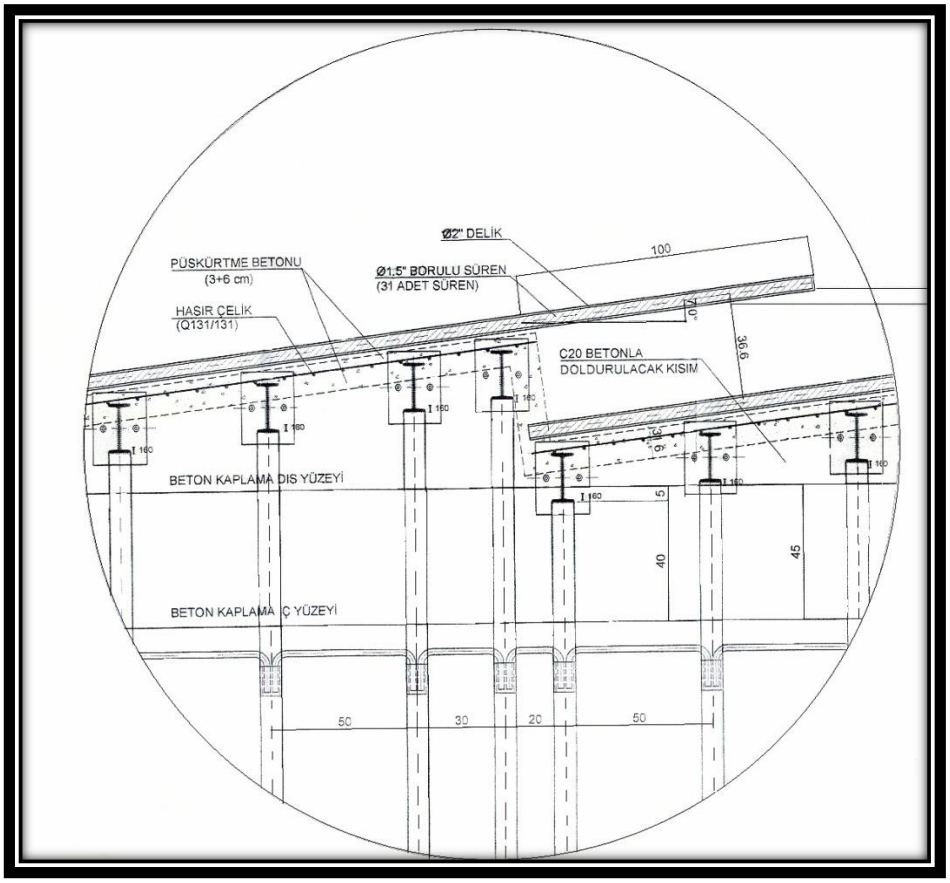
4.4.1.4. Süren Uygulamaları

T1 tünelinin zayıf formasyon ihtiva eden kesimlerde 30 cm iksa aralıklarıyla 2-2,5 metre ilerleme yapılmış, sağlam formasyon ihtiva eden kesimlerde ise; 75 cm'lik iksa aralıklarıyla 10-12 metre günlük ilerlemelere ulaşılmıştır. Jeoteknik sondajlarda T1 tünel aynasının üst kesimlerinin kiltaşı alt kesimlerinin ise kumtaşı olarak belirtilmesine rağmen kazı sırasında bu durum 3 ile 5 metre aralıklarla sürekli değişkenlik göstermiştir. T1 tünelinin çıkış ağzında jeoteknik rapora göre kiltaşında geçileceği öngörülmüş ancak kazı sırasında 600. metrede kumlu zeminle karşılaşılmış aşırı akmadan dolayı ilerleme durdurulmuştur.

Yüklenici firma ile idare arasında projede revizyona gidilmiş ve daha önce projede süren uygulaması öngörülmediği halde DSİ Genel Müdürlüğünün onayı alınarak tünelin 40-45 metrelik bu kesimi için süren uygulanmasına karar verilmiştir. Süren uygulaması için 26 mm çapında 4 metre boyunda tor çelikten üretilen sürenler kullanılmıştır (Şekil 4.28.). Sürenler 27 cm aralıklarla uygulanmış ve cebren itilerek deliğe yerleştirilmiştir (Şekil 4.29.). Projede yapılan bu revizyon maliyetlerin artmasına ve kazı süresininin uzamasına neden olmuştur.



Şekil 4.28. Süren uygulaması



Şekil 4.29. Süren kesiti

4.4.2. T2 Tüneli

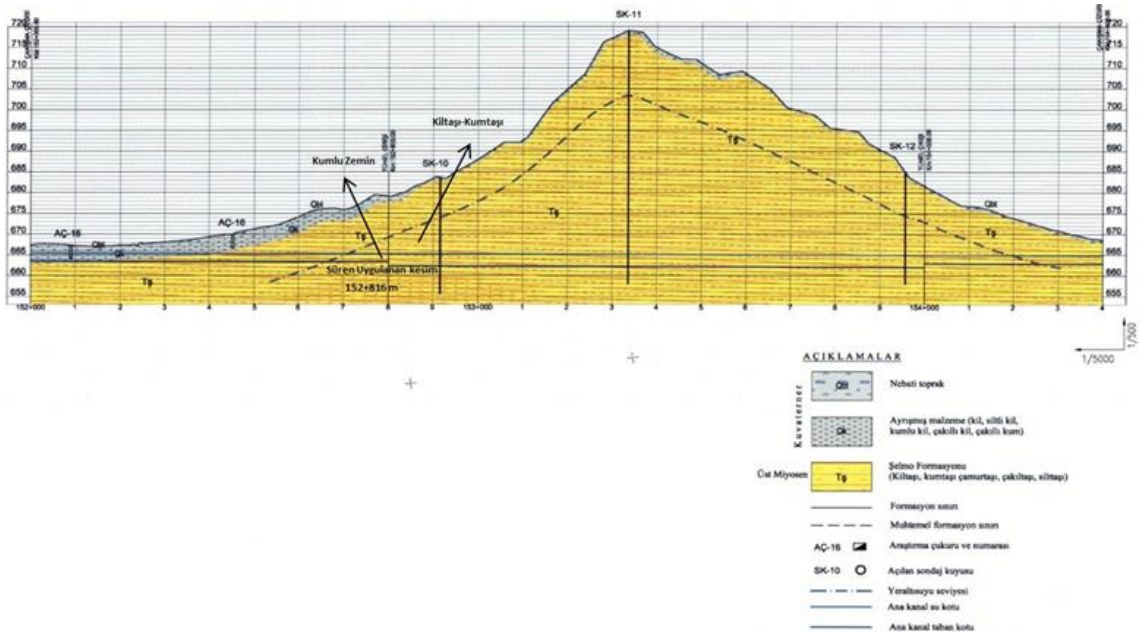
T1 Tünelinde yaşanan kazı ve destekleme problemlerinin T2 tünelinde tekrarlanmaması için destekleme yöntemi ve iksa aralıkları geçilen birimlerin özelliklerine göre yerinde yapılacak incelemeler sonucunda belirlenmesine karar verilmiştir. T2 tüneli giriş ağzından itibaren Km: 153+065 – 153+235 arasında 6 nolu kaya kütlesi sınıfında ve iksa aralığı 0,75 m olacak şekilde kazı-destekleme yapılmıştır. 153+235' teki birim, gri renkli gevşek ve zayıf çimentolu kumtaşı, çakıltaşı ve yer yer kil bantlarından oluşmaktadır. Tünel açımı esnasında tavan ve aynadan su gelimi olması ve sık sık tavanda boşalmaların meydana gelmesi nedeniyle, tünel tabanındaki gevşek ve dağılgan olan kum ve kil bataklık bir ortam oluşturmaktadır. Bu bölgede nispeten kemerlenme oluşsa da, 6 nolu kaya kütlesi sınıfı olarak değerlendirilip iksa aralıklarının 0,50 m olması tercih edilmiştir.

T2 tüneli çıkış ağzından irtibaren Km: 153+515 – 153+425 arası Terzaghi kaya kütle sınıflama sistemine göre 6 nolu kaya kütlesi sınıfı olarak tanımlanmış ve iksa aralıkları 0,75 m olacak şekilde seçilmiştir.

Km: 153+425' ten itibaren birim kahve renkli kiltaşı ve yer yer karbonat çakılları içermektedir. Bu bölgede sınırlı kemerleşme olmasına rağmen su gelirinin fazla olacağı göz önünde bulundurularak Km: 153+425' ten geriye doğru yapılacak kazıların 6 nolu kaya kütlesi sınıfında ve iksa aralıklarının 0,50 m olacak şekilde yapılması öngörülmüştür.

T2 tüneli giriş ağzından itibaren Km: 152+800 – 152+816 arasında tünel kazısı kahve renkli kiltaşı ile gri renkli oldukça gevşek ve zayıf çimentolu kumtaşı birimi 6 nolu kaya kütlesi sınıfı olarak değerlendirilmiştir. Km:152+816 – 152+858 arasında birimin; gri renkli, ince taneli ve çimentosuz olan kumlu olması nedeniyle bu km' ler arasında 1 nolu sürenli tip (Ø 26' lık demir ile yapılan enjeksiyonlu süren) destekleme yapılmıştır. Km: 152+816 – 152+858 arasında tünel aynasında kiltaşı ve kumtaşının ardalanmalı nispeten daha sıkı ve kendisini tutabilen birimin söz konusu olması nedeniyle 6 nolu kaya kütlesi sınıfında ve iksa aralığı 0,50 m olacak şekilde kazı destekleme yöntemi uygulanmıştır.

T2 tünelinin 152+858. km' sinden itibaren tünel aynasında kiltaşı ve kumtaşının ardalanmalı olarak gözlendiği, bu km'den itibaren çıkışa kadar bir önceki birime nazaran nisbeten daha sıkı tutabilen bir birim tespit edilmiş. Tünelin çıkışında ise; kil ve ince dokulu malzemeden dolayı zayıf tavan koşullarında ilerleme hızının azalacağı öngörülmüştür. Bu nedenle km: 152+858' den itibaren yapılan kazıların, projede belirtildiği gibi 6 no'lu kaya kütlesi sınıfında ve iksa aralığı 0,50 m olacak şekilde kazı destekleme yapılması uygun görülmüştür. Şekil 4.30.'da yapılan uygulamalar özetlenmiştir.



Şekil 4.30. T2 tünelinde yaşanan problemlerin tünel boy kesitindeki kilometreleri

T2 tünel kazısı yapılırken tünel tabanının batma problemleri yaşanmaması için zeminde iyileştirilmeler yapılarak ilerleme sağlanmıştır. Zayıf zemin şartlarında iksalar yerleştirilirken iksa ayakları sabitlenerek ve gerekli görülen kesimler gergilerle desteklenerek olası yanal basınçlara maruz kalındığı takdirde bükülmelerin yaşanması engellenmiştir. Normal şartlar altında günlük ortalama 5 ile 7 metre kadar tünel kazısı ve desteklemesi yapılmıştır. Aylık olarak ilerleme zaman zaman 210 metreye ulaşmıştır. Normalde tünellerin bulunduğu mevkiide yeraltı suyu çok fazla olmamasına rağmen mevsimsel yağışların etkisiyle (YAS) artmış olduğundan olası dökülmelerin önüne geçmek için püskürtme beton dizaynı yeni katkılarla tekrardan oluşturularak tavan ve yan duvarlara uygulanmıştır. Nitekim yapılan kazı çalışmaları T1 tüneli açımından elde edilen tecrübeyle daha kolay ve hızlı bir biçimde açılmıştır.

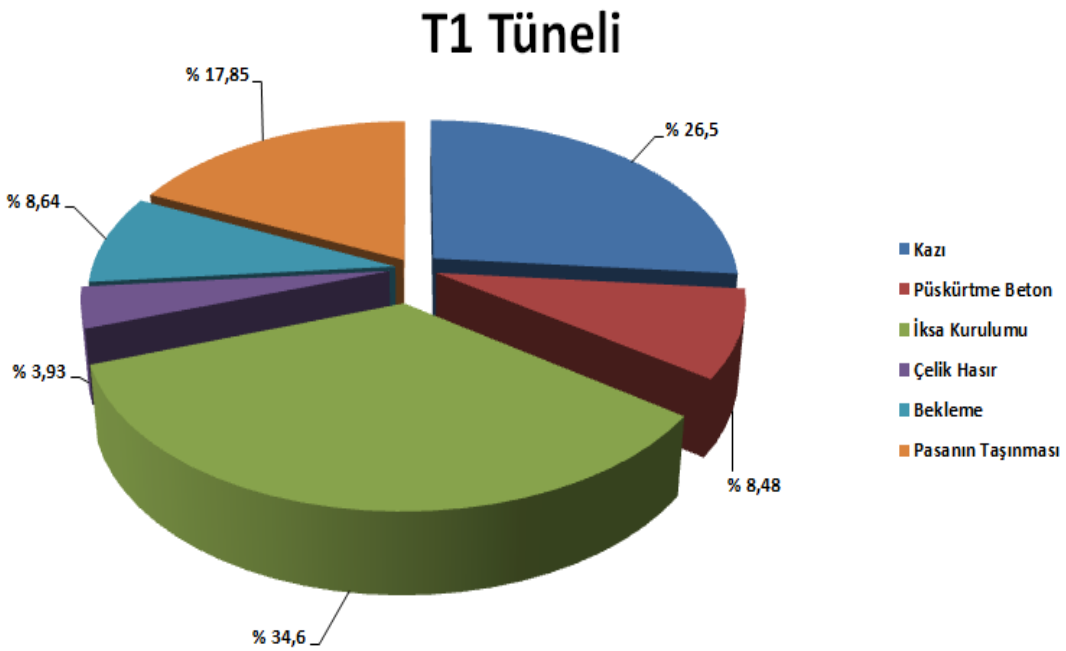
4.5. Tünellerin Kazı ve Destekleme Performanslarının Değerlendirilmesi

T1 ve T2 tünel kazılarının, büyük bir kısmı zayıf ve yumuşak formasyonlarda açılmış, göçük ve aşırı akma ve sökülmelerin olmaması için kontrollü kazı yapılmıştır. Tünelllerin günlük, haftalık, aylık otalama ve en iyi ilerleme hızları Çizelge 4.6.'da yer verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi T1 de yaşanan göçük, taban batması ve yanal basınçlar problemleri nedeniyle günlük-haftalık- aylık ortalama hızları T2 tüneline oranla daha düşük gerçekleşmiştir. T1 tünelinde yaşanan sorunlardan elde edilen deneyim sonucu T2 tünelinde yapılan kontrollü kazı ve destekleme neticesinde daha hızlı tamamlanmıştır. Ortalama günlük-haftalık ve aylık ilerleme hızları T2 tünelinde yaklaşık % 41 oranında artmıştır.

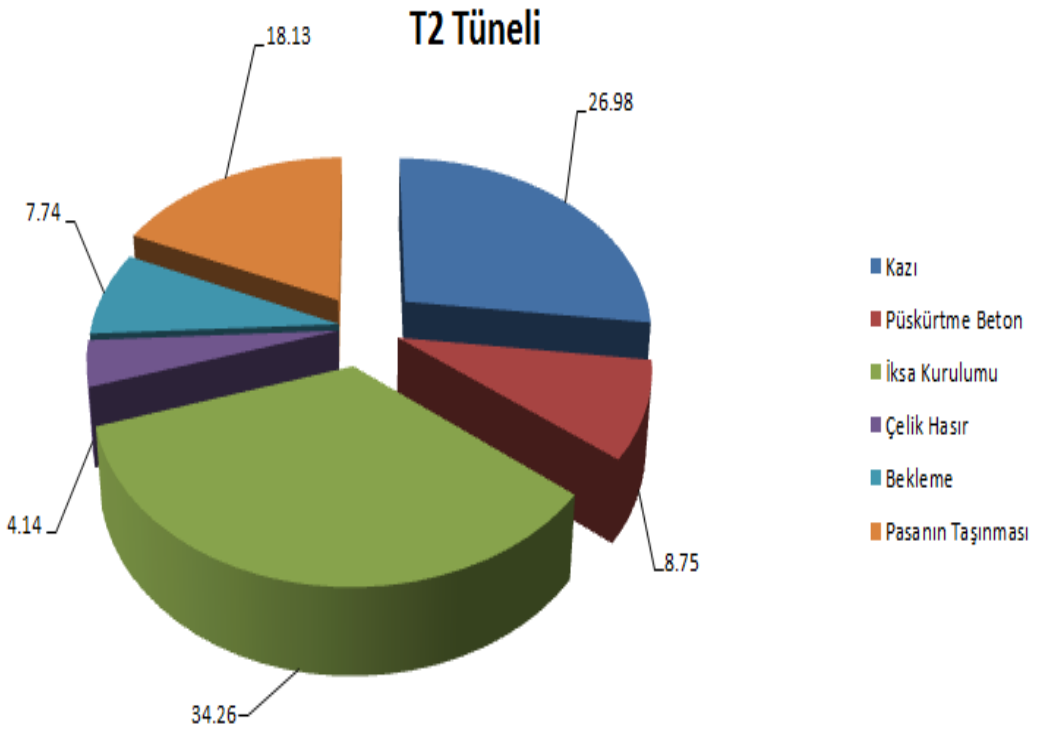
Çizelge 4.6. T1 ve T2 tünellerinin ilerleme hızları

Kazı Performansı Parametreleri	T1	T2
Ortalama Günlük İlerleme	5.13 m/gün (24h)	7.22 m/gün (24h)
Ortalama Haftalık İlerleme	35.91 m/hafta	50,54 m/hafta
Ortalama Aylık İlerleme	153,9 m/ay	216 m/ay
Günlük En İyi İlerleme	5.5 m /gün	7.38 m /gün
Haftalık En İyi İlerleme	38.50 m/hafta	51,66 m/hafta
Aylık En İyi İlerleme	165 m/ay	222 m/ay

T1 ve T2 tünelinin açımı sırasında birim metreye ilerlemeye karşılık yapılan işlemlerin (Kazı-Destekleme) oransal dağılımı Şekil 4.31. ve Şekil 4.32.'te verilmiştir.



Şekil 4.31. T1 tünelinde her bir kazı periyodu için yapılan işlemlerin oransal dağılımı



Şekil 4.32. T2 tünelinde her bir kazı periyodu için yapılan işlemlerin oransal dağılımı

Görüldüğü gibi hidrolik (darbeli) kırıcı ile kazı işlemi tüm tünel açımında yaklaşık % 26,5'lik bir orana sahiptir. T1 tünelinin zayıf formasyonlarda geçmesine rağmen böylesine yüksek bir oran görülmesinin nedeni, kazıda yer yer konglomera-kumtaşı ile karşılaşılması, taneler arasındaki iyi çimentolanma derecesinden dolayı sökümün zorlaşmasına bağlı olarak anlık ilerleme hızının düşmesidir. Tünellerin zayıf ve akıcı formasyonlarda açılması nedeniyle destekleme işlemlerinin (çelik hasır ve püskürtme beton) de %38,53 gibi yüksek bir oranla zaman açısından önemli bir noktada olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) projesi kapsamında inşa edilen zayıf formasyon koşullarında açılan T1 ve T2 sulama tünellerinin, jeolojik ve jeoteknik verileri ile öngörülen kazı ve destekleme yöntemleri incelenmiştir. T1 tünel ekseninde sondaj yoğunluğu 0,092 T2 tünelinde ise 0,096'dır. Genelde projelerin genel özelliklerine ve risk durumuna bağlı olarak sondaj yoğunluğu 0,2-1,5 arasında değişmektedir. Büyük projelerde bu değerin en az 1 civarında olmasına özen gösterilir. Dolayısıyla, T1 ve T2 tünellerinde yapılan jeoteknik sondajların sayı ve metraj açısından yetersizliği söz konusudur. Jeoteknik araştırmaların toplam maliyetinin proje bütçesindeki oranı ortalama %1,6 civarındadır. Daha iyi sonuçların elde edilebilmesi için bu değer %3'e kadar arttırılabilmektedir. Birim jeoteknik araştırma yatırımı proje maliyetinde 15 birim kazanım sağlayabilmektedir. Bu değerlerden de anlaşılacağı gibi T1 ve T2 tünelleri için yapılan çalışmaların, önerilen değerlerin çok altında olduğu görülmektedir.

Tünellerin projelendirilmesi aşamasında yapılan ön çalışmaların yetersizliği ve tünel ortamını tam olarak yansıtmaması; ilk açılan T1 tüneli kazısında uzun süre beklemelere ve maliyet artışlarına sebep olmuştur. Jeoteknik raporda öngörülmeyen; göçük, taban batması, aşırı sökülme, su geliri, yanal basınç problemleriyle karşılaşılmıştır. Dolayısıyla tünel ilerleme hızı düşmüş, kazı ve destekleme çalışmaları olumsuz etkilenmiştir. Farklı kazı ve destekleme önlemleri alınarak bu sorunlar giderilmiştir. T1 tünelinde ortalama ilerleme hızları; günlük 5,13 m, haftalık 35,91 m ve aylık ise; 153,9 m olmuştur.

T1 tünelinin açımından sonra aynı bölgede, benzer formasyon ve koşullarda açılan T2 tünelinde, T1 tünelinin açımından elde edilen deneyim ile gerekli kazı destekleme önlemleri alınarak, benzer sorunların yaşanması önlenmiştir. T2 tünelinde ortalama ilerleme hızları, günlük 7,22 m, haftalık 50,54 m ve aylık ise; 216 m olarak gerçekleşmiştir. Ortalama günlük ilerlemede %41 oranında artış gerçekleşmiştir**.**

Başarılı bir tünel projesinin gerçekleştirilmesinin temel şartının, kapsamlı bir şekilde yapılmış jeolojik etüt ve buradan hareketle uygun seçilmiş kazı ve destekleme yöntemlerinin olduğu bir kez daha anlaşılmıştır.

6. KAYNAKLAR

Aktaş, Ş.S. 2009. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemiyle İnşa Edilen Bir Tünelin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Analizi ve Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 4-9 32-39.

Arıoğlu, E., 1992. Şehir güzergahında tünel faaliyetlerinden dolayı yerüstü hareketleri ve binalarda oluşacak hasarların en aza indirilmesi. Meslekiçi Eğitim Semineri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Müh.Böl.

Arıoğlu, B., Yüksel, A., Arıoğlu, E., 2002. İstanbul Mevhibe İnönü tünelinde tasman (yüzey oturması) eğrisi dönüm noktasının belirlenmesi.VI. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 10-11 Ekim 2002, Konya. S, 305-316.

Arıoğlu, E. 2009. Yeraltı Kazıları Tüneller. Erişim: [http://birimler.dpu.edu.tr/app/views/panel/ckfinder/userfiles/11/files/ders_notlari/muhendislik_jeoloji/Muhendislik_jeolojisi_6.]. Erişim Tarihi:14.03.2017

Attewell, P.B, Yeates, J.& Selby, A.R., 1986. Soil movement induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures. Chapman and Hall, New York.

Ayhan, M. Topal, E. 2004. Excavation and support design of the Dicle-Kralkizi water tunnel: an overview. **Tunneling and Underground Space Technology**, 20 (1): 4.

Copur, H., Ercelebi, S. G., 2007. Prediction of surface settlements for İstanbul Metro Tunnels between Otogar and Bağcılar excavated by EPB-TBMs. Proceedings of the 2th Symposium on undergroung excavations for transportation. November, İstanbul, pp.443-454.

Doğruoğlu, M.T. 2009. Tbm Metodu İle Açılan İkiz Tünellerde Meydana Gelebilecek Deformasyonların Sonlu Elemanlar Metodu Ve Numerik Hesaplarla Tahmini. Yüksek lisans tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 26-27,36-47.

Ellis, D., 2005. High standards in Heatrow's art. Tunnels and Tunnelling International. Sep.,pp.29-34.

Emir, E. 2014. Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Kaya Mekaniği Ders Notları. Bölüm 4 Sayfa 5

Emiroğlu, A. 2010. İstanbul (4. levent-hacıosman arası) Metro Tünelindeki Mühendislik Uygulamaları. Yüksek lisans tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana. 38-39.

Eren, M. 2014. İki Farklı Yöntemle (Natm-Tbm) İle Açılan Bir Tünelde Düşey Deformasyon/Deplasman'ların Belirlenmesi:M5 Metro Örneği. Yüksek lisans tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 5-7.

Karakuş, M., Fowell, R.J., 2003. Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 18 (2003): 513-523.

Karaman, K., Cihangir, F., Demirel, S., Kesimal, A. 2014. Kaya Kütlesi Deformasyon Modülünün Farklı Yöntemlerle Belirlenmesi. **Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni**, 35 (3): 253-270.

Kaya, B. 2010. İstanbul Metrosu, Şaft 10 Şantiyesi Ana hat Tünellerinin Mühendislik Jeolojisi Özellikleri. Yüksek lisans tezi. Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde. 23.

Kempfert, H.G., Gebreselassie, B., 2006. Ezcavation end foundation in soft soil, Springer Pres, New York, 576p.

Kılıç, R. 2005. Kaya Mekaniği Ders Notları. **A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletme Yayınları**, Yayın No: 39, Sayfa:1, Ankara.

Kun, M. 2013. Zayıf Kaya Ve Faylı Zonlarda Tünel Kazısı. Tahkimat Ve Tasarım Parametreleri İzmir Metro Projesi Örneği. Erişim: [http://www.dedeman.com.tr/Resources/Common/Documents/MKD_2012_MADENCILIK_UCUNCULUK_ODULU.pdf.]. Erişim Tarihi: 24.09.2013.

Kun, M. 2010. Zayıf Kayalarda ve Faylı Zonlarda Tünel Açma Tasarım Ve Yapım Gereksinmelerinin Araştırılması ve Çözümlenmesi. Doktora tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir. 66-68.

Minguez, F., Gregory, A and Guglielmetti, V., 2005. Best practice in EPB management. Tunnels and Tunnelling International. Nov.,pp.21-25.

Merritt. H.A, 1979 Yeraltı Kazılarında Jeolojik Sorunlar ve Araştırma Yöntemleri, 2-6.

O'Reilly, M.P. and New, B.M., 1982. Settlement above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction. Proc. Tunneling 82 Conference. Brighton, pp. 173-181.

Öngen, Ö. 2015. İzmir Üçyol F. Altay Arası Hafif Taşıma Sistemi (Metro) Güzergahında Değişen Zemin Koşullarında, Tünellerde Kazı Ve Destekleme Sistemlerinin Uygulanması. Yüksek lisans tezi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa. 23-29.

Özbek, A. 2005. Yeraltı kazılarında (Tünellerde) Yerdeğiştirme Vektörünün İzlenmesi ve Ayna İlerisindeki Ortamların Tahmini. **İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi**, C.(18): 171.

Özgen, M. 2013. Farklı Tünel Açma Yöntemlerinde Kullanılan Ekipmanlar. Türkiye Tünelcilik Semineri, 13 Haziran 2013, Ankara. S, 25-29.

Özkan, H. 2013 Rmr Kaya Kütlesi Sınıflandırma Sistemleri. Erişim: [http://docplayer.biz.tr/16253213-Rmr-kaya-kutlesi-siniflandirma-sistemleri-hasan-ozkan-jeo-yuk-muh.html]. Erişim Tarihi :12.08.2016

Öztürk, H.T. Durmuş, A. 2008. Tünellere Toplu Bir Bakış ve Savunma Tünellerinin Türkiye İçin Önemi. Erişim: [http://imoistanbul.org/imoarsiv/ist-bulten/sayi96/(11-17)%20tuneller.pdf] Erişim :21.06.2016

Polat, D. 2010. NATM Metodu Kullanılarak Tünel Tasarımı ve Modellenmesi. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 9-14-15.

Tan, W.L, and Ranjit, P.G., 2003. Parameters and consideration in soft ground tunnelling. The Electronic Journal of Geotecnical Engineeering. Ppr 0344.

Satır, B. 2007. Tünel Deformasyonlarının Jeodezik, Geoteknik ve Sonlu Eleman Yöntemleri İle Belirlenmesi. Yüksek lisans tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 3-14.

Suwansawat, S. and Einsein, H.H., 2006., Artifical neural Networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPM shideld tunneling. Tunnelling and Underground Space Technology , 21(2006), 133-150.

Şeker, Ö. 2008. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi Prensiplerine Göre Tünel Kaplama Tasarımı. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 10-23.

Tuncay, E. 2012. Kayaç Mekaniği Ders Notları. Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, Bölüm 2, S, 5.

Vardar, M.-Eriş, İ. 2008. İstanbul Metrosu Örneğinde Kaya Mekaniği Parametrelerinin Uygulama Ve Planlamadaki Yeri. Ulaşımda Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu, 1-3 Aralık 1994, İstanbul. Cilt I S,14.

Vardar, M.-Koçak, C. 2013. İnşaat Jeolojisi Ders Notları. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, İstanbul. 3.

Yıldırım, Ü.E. 2009. Şişen Killer ve Tünel Tasarımına Etkisi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 54.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Gürkan ERDAL

Doğum Yeri: Diyarbakır

Doğum Tarihi: 04.01.1977

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dil: İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Ortaokul : Özel Karacadağ Ortaokulu

Lise: Özel Amid Lisesi

Lisans : Dicle Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Maden Müh. Bölümü

Yüksek Lisans: Dicle Üniversitesi, FBE, Diyarbakır; 2011-2017

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI İNTİHAL RAPORU FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Gürkan ERDAL
ÖĞRENCİ NO	11807002
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2016-2017
YARIYIL	☐ Güz x Bahar
ANABİLİM DALI	
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	KRALKIZI – DİCLE CAZİBE SULAMASI DÖRDÜNCÜ ANA KANALI T1 VE T2 TÜNELLERİNİN MÜHENDİSLİK PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	84
BENZERLİK ORANI	%11
RAPORLAMA TARİHİ	20/03/ 2017

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 84 sayfalık kısmına ilişkin, 20/03/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *TURNİTİN* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 11'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

x Kabul/Onay sayfaları hariç,
x Kaynakça hariç
x Alıntılar hariç/dâhil
x Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

(İmza)
Gürkan ERDAL

(İmza)	(İmza)
27/04/2017	27/04/2017
Prof. Dr. Mustafa AYHAN **Tez Danışmanı**	Prof. Dr. Mustafa AYHAN **Anabilim Dalı Başkanı**