



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ŞEHİRİÇİ TÜNELCİLİKTE 3 BOYUTLU MODELLEME
YARDIMI İLE JEOLojİK – JEOTEKNİK RİSKLERİN
BELİRLENMESİ**

Burak KÜÇÜK

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Murat YILMAZ

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeoloji Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma 11.07.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Jeoloji Mühendisliğı Anabilim Dalı, Jeoloji Mühendisliğı Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ



Dr.Öğr.Üyesi Murat YILMAZ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Fakülte



Prof. Dr. Atiye TUĞRUL
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Fakülte



Prof. Dr. Deniz TUMAÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’ de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Jeoloji Mühendisliği Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Çalışmada, şehiriçi tünelticilikte karşılaşılabilir jeolojik - jeoteknik riskler, modellemeler üzerinde tanımlanarak, farklı mühendislik alanları ile ortak bir dil kurulması hedeflenmektedir.

Tüm bu çalışma hikâyesine başlamadan önce ise, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum tüm İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Jeoloji Mühendisliği Bölümü hocalarına ve öğrenimim süresince desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlanmamı sağlayan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat Yılmaz’a teşekkür ederim.

Tez kapsamında, çalışma içeriğini oluşturan metro tüneline ait verilerin kullanılması hususunda gerekli izinleri sağlayan işveren İstanbul Büyükşehir Belediyesi Avrupa Yakası Raylı Sistemler Müdürlüğü’ne ve yüklenici Aga Enerji firmasına teşekkür ederim.

Bugüne gelmemi sağlayan, emeği ödenmeyecek “*Aileme*” ve adını burada yazamadığım ancak hayatıma dokunan herkese *teşekkürü bir borç bilirim.*

Haziran 2019, Burak KÜÇÜK

“Ölçmek bilmektir. Ölçülebileni ölçün, ölçülemeyeni ise ölçülebilir hale getirin”

Galileo Galilei

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. ARKA PLAN	1
1.2. AMAÇ VE HEDEFLER	1
1.3. METODOLOJİ	2
1.4. KAPSAM VE İÇERİK	3
1.5. PROJE SEÇİMİ	4
2. GENEL KISIMLAR	5
2.1. İNCELEME ALANINA AİT JEOLojİK – JEOTEKNİK BİLGİLER	5
2.1.1. Bölgesel Jeoloji Koşulları	5
2.1.2. İnceleme Alanının Jeolojik Koşulları	9
2.1.2.1. Ceylan Formasyonu (Tkc Orta – Üst Eosen)	12
2.1.2.2. Gürpınar Üyesi (Tdg, Danışment Formasyonu - Geç Oligosen)	13
2.1.2.3. Çukurçeşme Üyesi (Tç, Çekmece Formasyonu Orta - Üst Miyosen)	14
2.1.2.4. Güngören Üyesi (Tçeg, Çekmece Formasyonu - Üst Miyosen)	14
2.1.2.5. Bakirkoy Üyesi (Tçeb, Çekmece Formasyonu - Üst Miyosen)	14
2.1.2.6. Alüvyon (Qal)	15
2.1.2.7. Yapay Dolgu (Qyd)	15
2.1.3. Hidrojeolojik Koşullar	16
2.1.4. Referans Jeoloji – Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları	19
2.1.5. Sondaj, Laboratuvar ve Yerinde Test Çalışmaları	20
2.1.6. Tünelcilik Açısından Zemin ve Kaya Sınıflamaları	24
2.2. TÜNEL METODOLOJİSİ VE PROJE ANA KARAKTERİSTİKLERİ	30
2.2.1. Tünelcilik Tarihçesi	30
2.2.2. Tünel Yapım Metotları	31
2.2.3. Proje Teknik Özellikleri	33

2.3. 3 BOYUTLU JEOLJİK MODELLEME METODOLOJİSİ	34
2.3.1. Genel Tanımlar	34
2.3.2. Modelleme Çalışmaları Üzerine Literatür Taraması	34
2.4. RİSK ANALİZ PROSEDÜRÜ VE METODOLOJİSİ.....	38
2.4.1. Genel Tanımlar	38
2.4.2. Tünellerde Jeolojik – Jeoteknik Risk Esasları	46
2.4.3. Jeolojik – Jeoteknik Risk Çalışmaları Üzerine Literatür Taraması	51
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	58
4. BULGULAR	59
4.1. 3 BOYUTLU JEOLJİK MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	59
4.1.1. Jeolojik Modelleme Çalışmaları.....	61
4.1.2. Güzergâh Tahmini Ayna Haritaları	62
4.2. JEOLJİK – JEOTEKNİK RİSK ÇALIŞMALARI	63
4.2.1. Tehlikelerin Tanımlanması	67
4.2.2. Risk Formülasyonu.....	77
4.2.2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)	77
4.2.2.2. Risk Değerlendirme Karar Matrisi	85
4.2.3. Risk Cetveli ve Risk Haritası	86
4.2.4. Güzergâh Değerlendirmesi	87
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	89
KAYNAKLAR	94
EKLER	107
ÖZGEÇMİŞ	108

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Çalışma ana ve alt başlıkları	2
Şekil 1.2: Çalışma alanının Google Earth üzerinde yer bulduru haritası	4
Şekil 2.1: Türkiye ve yakın çevresinin makro tektonik haritası (Okay ve Tüysüz, 1999)	6
Şekil 2.2: İstanbul alanının Senozoyik birimlerinin genelleştirilmiş stratigrafik sütun kesiti (İ.B.B. DEZİM, 2007)	8
Şekil 2.3: İnceleme alanının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (OYO, 2009)	9
Şekil 2.4: İnceleme alanının jeoloji haritası (İ.B.B. DEZİM, 2007)	10
Şekil 2.5: İnceleme alanının 3 boyutlu genel modellemesi (İ.B.B. DEZİM, 2007)	10
Şekil 2.6: İnceleme alanının fay haritası (İ.B.B. DEZİM, 2007)	11
Şekil 2.7: İnceleme alanı çevresindeki yeraltı suyu derinlik haritası (OYO, 2009)	17
Şekil 2.8: Kaya ve zeminler için tünel açma makinaları (Zhao, 2007'den Türkçeleştirilmiştir)	32
Şekil 2.9: Risk değerlendirmesi iş akış planı	40
Şekil 2.10: Risk analizi süreci akış diyagramı (Verzani, 2014'ten Türkçeleştirilmiştir)	47
Şekil 2.11: Birinci ve ikinci derece tehlike kaynakları (Guglielmetti ve diğ., 2007'den Türkçeleştirilmiştir)	48
Şekil 2.12: Ortama bağlı tünel yenilmeleri (Konstantis, 2016)	49
Şekil 2.13: Yapım metoduna bağlı tünel yenilmeleri (Konstantis, 2016)	49
Şekil 2.14: Tünelcilikte mali kayıp ve frekans değerleri (Konstantis, 2016)	50
Şekil 2.15: Tünelcilikte gecikme ve frekans değerleri (Konstantis, 2016)	50
Şekil 3.1: Risk analizi iş akış planı	58
Şekil 4.1: Jeolojik modelleme belirsizlikler (a) Tip 1, ham verideki belirsizlikten dolayı gömülü yapının belirsizliği (b) Tip 2, bilinen noktadan uzaklıktan dolayı deneştirme belirsizliği (c) Tip 3, yeraltı yapıları hakkındaki eksik bilgilerden kaynaklı belirsizlik (Wellmann ve diğ., 2010).	60
Şekil 4.2: Jeolojik modelde kullanılan sondaj konumları ve çalışma güzergâhı	61
Şekil 4.3: Çalışma güzergâhı boyunca jeolojik birimler arası ilişkiler	61
Şekil 4.4: Tahmini ayna haritaları oluşturulma şeması	62
Şekil 4.5: Km: 5+700 – 5+800 arası tahmini ayna haritaları	62
Şekil 4.6: Analiz süreçleri ve modellemelerde limitler	63
Şekil 4.7: Sıkışan ve şişen zeminlere etki eden parametreler ve sonuçları (Sousa, 2010'dan değiştirilerek)	68

Şekil 4.8: Kaya patlaması oluşum süreci etken parametreler (Sousa, 2010'dan değiştirilerek).....	69
Şekil 4.9: Karst morfolojilerin kavramsal modeli.....	70
Şekil 4.10: Kaya kütlesi süreksizliklerdeki (çatlaklardaki) suyun yeraltı kazılarına etkileri (Hodson, 1989'dan alıntılan Ulusay ve Sönmez, 2007)	71
Şekil 4.11: Gevşemiş blokların ayna ile kesici arasında kalması (Kovari ve Ramoni, 2004)	72
Şekil 4.12: Blok kaya düşmesine etken parametreler (Sousa, 2010'dan değiştirilerek).....	73
Şekil 4.13: Fay ve ezik zonların tünel stabilitesine etkileri (Stille ve Palmström, 2008)	74
Şekil 4.14: Karışık ayna koşullarına şematik örnekler (Geodata, 2001 ve Kovari, 2004).....	76
Şekil 5.1: İnceleme güzergâhı boyunca oluşturulan tahmini ayna haritalarına bir örnek	89

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: İnceleme alanındaki ana fayın genel görünümü (İ.B.B. DEZİM, 2007).....	12
Tablo 2.2: Yeraltı yapılarının çizim ve inşaat çalışmaları için kullanılan permabilite sınıfları (AFTES, 2003).....	17
Tablo 2.3: Jeolojik formasyonların / birimlerin genelleştirilmiş hidrojeolojik özellikleri	18
Tablo 2.4: İBB DEZİM (2007) laboratuvar deney sonuçları özet tablosu.....	20
Tablo 2.5: Dalgıç ve diğ. (2009) laboratuvar deney sonuçları özet tablosu	21
Tablo 2.6: Ertürk (2015) laboratuvar deney sonuçları özet tablosu.....	22
Tablo 2.7: Tüm birimlere ait arazi ve laboratuvar verileri özet tablosu (Polat, 2017).....	23
Tablo 2.8: Alüvyona ait arazi ve laboratuvar verileri	24
Tablo 2.9: Güngören kiline ait arazi ve laboratuvar verileri.....	25
Tablo 2.10: Çukurçeşme üyesine ait laboratuvar ve arazi verileri.....	26
Tablo 2.11: Gürpınar kiline ait arazi ve laboratuvar verileri	27
Tablo 2.12: Ceylan Formasyonu'na ait arazi ve laboratuvar verileri	28
Tablo 2.13: Tünel kazılarında karşılaşılmaması beklenen kaya birimlerinin tünelcilik açısından sınıflandırılması.....	28
Tablo 2.14: Tünel kazılarında karşılaşılmaması beklenen zemin birimlerinin tünelcilik açısından sınıflandırılması.....	29
Tablo 2.15: Metro güzergâhı istasyon ve makas yapıları yapım metodolojisi	33
Tablo 2.16: Risk değerlendirme metodolojileri ve süreçleri (Özkılıç, 2014'ten değiştirilerek).....	43
Tablo 4.1: Tunnelman zemin sınıflaması.....	64
Tablo 4.2: Terzaghi kaya kütle sınıflaması	65
Tablo 4.3: Tünelcilikte karşılaşılan tehlikeler (Klein ve O'Carroll, 2017'den değiştirilerek)	66
Tablo 4.4: Farklı türdeki kayalarda ortalama aşırı sökülme yüzdeleri (Krynine ve Judd, 1957).....	69
Tablo 4.5: Önem skalası değerleri	78
Tablo 4.6: Rastgele gösterge değerleri (RI)	82
Tablo 4.7: Tünelcilik açısından tehlikelere bağlı etkilerin önem değerleri	82
Tablo 4.8: Etkilerin öncelik oranı yüzdeleri	83
Tablo 4.9: Etki puan ve düzeyi tablosu.....	83

Tablo 4.10: Etki düzeyi seçiminde tünel özellikleri ve karakteristik katsayılar	84
Tablo 4.11: Etki çarpanı kriteri referans aralıkları.....	84
Tablo 4.12: Tahmini ayna haritasının gözlenme olasılığı	85
Tablo 4.13: Risk matrisi puan sistemi.....	86
Tablo 4.14: Risk sonuçlarının kabul edilebilirlik değerleri	86
Tablo 5.1: Önerilen etki puanı ve etki düzeyi tablosu	90
Tablo 5.2: Etki düzeyi seçiminde tünel özellikleri ve karakteristik katsayılar	91
Tablo 5.3: Etki çarpanı kriteri referans aralıkları.....	91
Tablo 5.4: Tahmini ayna haritasının gözlenme olasılığı	92
Tablo 5.5: Risk matrisi puan sistemi.....	92

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$I_{s(50)}$	: Nokta yükü dayanım indeksi
σ_c	: Tek eksenli basınç dayanımı
q_u	: Serbest basınç
Φ	: İçsel sürtünme açısı
w_n	: Doğal su içeriği
γ_n	: Birim hacim ağırlık
c	: Kohezyon
c'	: Effektif kohezyon
c_u	: Toplam kohezyon
E_m	: Deformasyon modülü
E_p	: Presiyometrik modül
I_c	: Kıvamlılık indeksi

Kısaltmalar	Açıklama
İBB DEZİM	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü
NATM	: Avusturya Tünel Açma Metodu
TBM	: Tünel Açma Makinesi
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci
RMR	: Jeomekanik Sınıflandırma (Rock Mass Rating)
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması
Q	: Kaya Tüneli Kalite İndisi (Rock Tunnelling Quality Index)

NGI	: Norway Geotechnical Institute
GSİ	: Jeolojik Dayanım İndisi (Geological Strength Index)
SPT N	: Standart Penetrasyon Testi (penetrasyon sayısı)
(N1)60	: Effektif gerilme ve enerji düzeltmesi yapılmış penetrasyon direnci
PI	: Plastisite İndisi
PL	: Plastik Limit
LL	: Likit Limit
TCR	: Toplam Karot Yüzdesi
SCR	: Sağlam Karot Verimi (Solid Core Recovery)
RQD	: Kaya Kütle Belirteci (Rock Quality Designation)
SM	: Siltli Kum
SC	: Killi Kum
GM	: Siltli Çakıl
GP	: Kötü Derecelenmiş Çakıl
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
ML	: Düşük Plastisiteli Silt
SP	: Kötü Derecelenmiş Kum
Qyd	: Yapay dolgu
Qal	: Alüvyon
Tçeb	: Çekmece Formasyonu, Bakırköy Üyesi
Tçeg	: Çekmece Formasyonu, Güngören Üyesi
Tç	: Çekmece Formasyonu, Çukurçeşme Üyesi
Tdg	: Danişment Formasyonu, Gürpınar Üyesi
Tkc	: Ceylan Formasyonu

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEHİRİÇİ TÜNELCİLİKTE 3 BOYUTLU MODELLEME YARDIMI İLE JEOLojİK – JEOTEKNİK RİSKLERİN BELİRLENMESİ

Burak KÜÇÜK

İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat YILMAZ

Günümüzde kentsel bölgelerde tünelcilik faaliyetleri giderek artmakta, hızla artan nüfusa nefes aldıracak çalışmalar yeraltında sürdürülmektedir. Bu kapsamda çeşitli kara yolu, demir yolu, gaz, atık su, temiz su, haberleşme vb. tünel çalışmaları yapılmakta, belirlenen süre ve bütçelerde tamamlanmaya çalışılmaktadır. Ancak çoğu zaman, proje tasarım aşaması öncesinde yapılması gereken jeolojik – jeoteknik incelemelerin göz ardı edilmesi veya eksik yapılması nedeniyle tünel kazıları sırasında öngörülemeyen olumsuz olaylarla karşılaşmaktadır. Bu aksaklıklar maddi olarak yükleniciyi zor durumda bırakmakta ve projede gecikmelere sebep olmaktadır.

Bu tez çalışması, tünel faaliyetlerine başlamadan önce gerçekleştirilmiş jeolojik – jeoteknik çalışmaları ve jeolojik model incelemeleri, tünel güzergâhı boyunca yeraltı şartlarına bağlı muhtemel riskleri de sisteme dahil ederek tasarım adına gerekli verileri ortaya koyma amacı taşımaktadır. Burada asıl hedef tasarım çalışmalarının, riskleri temel alan alternatif yapım metodlarını da kapsayan yaklaşımı dikkate almasıdır. Risk tarafından bakıldığında bu durum zemin ve kaya yenilme modellerini, muhtemel problemleri, bu olayların gerçekleşme ihtimallerini, etki düzeylerini ve sonuçlarını belirtmek olarak da söylenebilir.

Tez kapsamında inşaatı devam eden bir metro tüneli projesinin saha araştırmaları ve sondaj çalışmalarından elde edilen bilgilere göre, Autodesk Civil3D Geotechnical Module 2018 yazılımı kullanılarak 3 boyutlu jeolojik modellemesi yapılmıştır. Modelleme ile birlikte açılması planlanan tünellerin kaya ve zemin ortamına bağlı olarak belirlenen aralıklarda tahmini ayna haritaları oluşturulmuştur. Güzergâh boyunca tüm kaya ve zemin gruplarının fiziksel - mekanik özellikleri (indeks özellikler, Atterberg limitleri, tek eksenli – üç eksenli basın dayanımı, aşındırıcılık deneyi, direk kesme testi, şişme deneyi vb. test ve deneyleri sonucunda) ve hidrojeolojik bulgularından yola çıkılarak jeolojik - jeoteknik risk tanımları ve risk puanlaması yapılmıştır.

Jeolojik – jeoteknik risk puanının belirlenmesinde Risk Değerlendirme Karar Matrisi, riskin temelini oluşturan etki çarpanı için Analitik Hiyerarşi Prosesi, olasılık çarpanı için temelde modelleme üzerine kurgulanan ayna haritalarının bölgedeki en yakın sondaja uzaklığına göre gerçekte karşılaşılabilmek ihtimali üzerine ampirik (deneysel) metodlar önerilmektedir.

Yapılan çalışma, proje inşaatına başlamadan önce tünellerde güzergâh seçimi, tasarım, maliyet ve zaman kavramlarının yanına jeolojik – jeoteknik risk olgularını da ekleyerek çalışma yelpazesini ve perspektifini genişletmektedir. Aynı zamanda farklı alanlardan mühendislerin ortak bir dil üzerinden anlaşmasını, ölçülemeyen potansiyel risklerin ölçülebilir hale getirilmesini sağlamaktadır.

Haziran 2019, 108 sayfa.

Anahtar kelimeler: Jeoloji, Jeoteknik, Tünel, 3-B Jeolojik Model, Kalitatif Analiz, Kantitatif Analiz, Analitik Hiyerarşi Prosesi, Risk Değerlendirme Matrisi, Risk Haritası

SUMMARY

M.Sc. THESIS

DETERMINING GEOLOGICAL - GEOTECHNICAL RISKS WITH THE HELP OF 3D MODELING IN URBAN TUNNELING

Burak KÜÇÜK

İstanbul University - Cerrahpaşa

Institute of Graduate Education

Department of Geological Engineering

Supervisor: Dr. Murat YILMAZ

Tunneling activities in urban areas are increasing from day to day and the works that will allow the rapidly growing population to breathe are being carried out underground. Within this scope, various highway, railway, gas, waste water, clean water, communication tunnels are being carried out and efforts are made to complete them within the specified time and budgets. However, unforeseen unfavorable events are encountered during tunnel excavations due to the neglect or inadequate geological - geotechnical investigations that should be done before the design phase. These failures leave the contractor in a difficult situation and cause delays in the project.

The aim of this thesis is to present the necessary information for the design by considering the potential risks related to underground conditions on the tunnel route before starting the tunnel activities. The main objective is that the design model takes into account a framework including possible alternative construction scenarios depending on risks. In terms of risk, this situation can be evaluated as defining the probable problems, rock-soil failure models, their realization probability, effects and results.

According to the information obtained from site investigations and drilling works of a metro tunnel project under construction, 3 dimensional geological modeling has been carried out and the estimated tunnel face maps of the tunnels planned to be opened in the determined intervals depending on the rock and soil groups have been created by using Autodesk Civil3D Geotechnical Module 2018. Based on physical / mechanical properties (index properties, Atterberg limits, uniaxial - triaxial compressive strength, abrasion test, direct shear test, swelling test, etc. as a result of tests) and hydrogeological findings of all rock and soil groups along the route, geological and geotechnical risk definitions and risk scoring have been made.

Risk Assessment Decision Matrix is used to determine geological - geotechnical risk score. Empirical (experimental) methods are proposed on the probability that the Analytic Hierarchy Process for the effect multiplier constituting the basis of the risk and the probability that the tunnel face maps based on modeling to the nearest borehole in the region.

Before starting the construction of the project; in addition to route selection, design, cost and time concepts in tunnels, geological - geotechnical risk phenomena are added and it extends its working range and perspective. At the same time, it enables engineers from different fields to agree on a common language, making potential risks that cannot be measured become measurable.

June 2019, 108 pages.

Keywords: Geology, Geotechnic, Tunnel, 3-D Geological Model, Qualitative Analysis, Quantitative Analysis, Analytical Hierarchy Process, Risk Assessment Matrix, Risk Map

1. GİRİŞ

1.1. ARKA PLAN

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Jeoloji Mühendisliği Programı kapsamında “Şehiriçi Tünelcilikte 3 Boyutlu Modelleme Yardımı İle Jeolojik – Jeoteknik Risklerin Belirlenmesi” adı altında ve Dr. Öğr. Üyesi Murat YILMAZ danışmanlığında yüksek lisans tezi olarak hazırlanarak okuyucuya sunulmaktadır.

Çalışma konusunun seçimindeki temel dayanak; tünelcilik faaliyetlerinde tehlikelerin en aza indirgenmesi için yapılmasının gerekli olduğu belirtilen jeolojik - jeoteknik risk analizi ve 3 boyutlu jeolojik modelleme çalışmalarının eksikliğidir. Bu eksiklikler göz önüne alındığında çalışma, bahsedilen eksikliklerin oluşturduğu boşlukların doldurulmasını hedeflerken, bu kapsamda yapılan referans çalışmaları detaylı olarak okuyucuya sunmaktadır.

1.2. AMAÇ VE HEDEFLER

Günden güne artan tünelcilik faaliyetleri, başta kentsel bölgeler olmak üzere günlük yaşam faaliyetlerinin sürdüğü her alanda yürütülmektedir. Bu kapsamda insanoğlunun hayat kalitesini arttıracak çeşitli kara yolu, demir yolu, atık su, temiz su vb. tünel çalışmaları planlanmakta, belirlenen süre ve bütçeler çerçevesinde tamamlanmaya çalışılmaktadır. Ancak proje tasarım aşaması öncesinde, yapılması gereken jeolojik – jeoteknik incelemelerin göz ardı edilmesi veya eksik yapılması nedeniyle tünel kazıları sırasında öngörülemeyen sorunlarla karşılaşilmektedir.

Bahsedilen bu jeolojik – jeoteknik çalışmalar ve jeolojik model incelemeleri, tünel güzergâhı boyunca yeraltı şartlarına bağlı muhtemel riskleri sisteme dahil ederek tasarım adına gerekli verileri ortaya koyma amacı taşımaktadır. Burada asıl hedef, tasarım çalışmalarının, riskleri temel alan alternatif yapım metodlarını da kapsayan bir yaklaşımı dikkate almasıdır. Risk analizindeki amaç ise zemin ve kaya yenilme modellerini ve muhtemel tehlikeleri, bu tehlikelerin gerçekleşme olasılıklarını ve etki düzeylerini dikkate alarak kalitatif (niteliksel), yarı kantitatif (niceliksel) veya kantitatif (niceliksel) yöntemlerle değerlendirmektir.

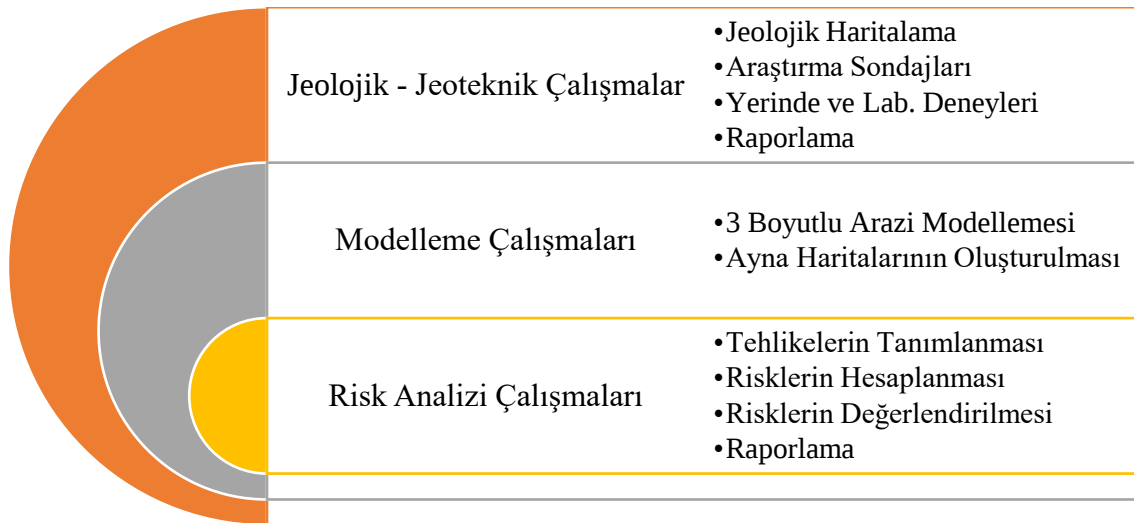
Bu kapsamda tez çalışmasında aşağıdaki unsurların daha iyi anlaşılması hedeflenmektedir.

- Güzergâh boyunca karşılaşılabilecek jeolojik – jeoteknik tehlikelerin tanımlanması,
- Risk sınıflamaları yapılarak problemli bölgeler için önlemler alınmasının sağlanması,
- En uygun kazı güzergâhının, kazı biçiminin ve tünel tipinin belirlenmesinin sağlanması,
- Risk çalışması kapsamında olasılık, etki ve sonuç çerçevesinde bütçe – zaman planlamasının dışına çıkılmasının önlenmesi,
- Farklı mühendislik alanları ile ortak bir dil kurulması,
- Sigortacılık faaliyetlerinde, tünel ve yeraltı çalışmalarında jeolojik – jeoteknik risk kavramlarının ve neden olabileceği olayların belirtilmesine katkı sunulması.

1.3. METODOLOJİ

Yürütülen çalışmada 3 boyutlu modelleme ve jeolojik – jeoteknik risk kavramları ayrı ayrı çalışıldıktan sonra sentezlenerek sonuçlandırılmıştır. Bu kapsamda Şekil 1.1 de gösterildiği üzere daha önce gerçekleştirilmiş sondajlar, jeolojik haritalamalar, jeolojik kesitler bilgisayar programları aracılığıyla revize edilerek 3 boyutlu modelleme ve güzergâh boyunca tahmini ayna haritaları çıkartılmıştır.

Arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve bunlardan elde edilen sonuçları kapsayan raporlar aracılığıyla güzergâhın jeolojik, hidrojeolojik ve mühendislik jeolojisi başlıkları detaylı olarak çalışılmış ve jeolojik – jeoteknik risk tanımları bu kaynaklara bağlı kalınarak yapılmıştır.



Şekil 1.1: Çalışma ana ve alt başlıkları

Yapılan tüm analiz ve değerlendirmeler sonucunda örnek projeye ait güzergâhın jeolojik – jeoteknik risk haritası yapılarak çalışma sonlandırılmıştır.

Çalışma süresince kullanılan araştırma kaynaklarını, çevrimiçi olarak yapılan araştırmalardan elde edilen makaleler, tez çalışmaları, ders ve önemli proje sunumları, İstanbul Büyükşehir Belediyesi çalışmaları ile risk ve 3 boyutlu modelleme ilgili yazılmış kitaplar oluşturmaktadır.

Projeye özgü bilgiler Ataköy–İkitelli Metro Hattı Güzergâhı Kesin Proje Jeolojik – Jeoteknik Etüt raporundan sağlanmaktadır.

1.4. KAPSAM VE İÇERİK

Tez kapsamında örnek proje aşamasındaki bir metro tünelinin saha araştırmaları ve sondaj çalışmalarından elde edilen bilgilere göre güzergah jeolojisi 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Mevcut çalışmalardan farklı olarak 3 boyutlu modelleme ile birlikte, açılması planlanan tünelin kaya ve zemin ortamına bağlı olarak belirlenen aralıklarda tahmini ayna haritası çıkarılarak, muhtemel sorunlar (heterojen ayna koşulları, aşındırıcılık, yapışkan – şişen zemin, akan zemin, kartlaşma vb.) bölgesel olarak ortaya koyularak, olasılık - etki unsurları dahilinde risk puanlaması yapılmaktadır.

Yapılan çalışmalar tünellerde güzergâh seçimi, tasarım, maliyet ve zamanında bitirilme gibi olguların daha rahat anlaşılmasını ve inşaat aşamasında olası sorunların minimum düzeye indirgenmesini sağlamak üzerine yürütülmektedir. Tez kapsamında değinilen ana başlıklar ve içerikleri aşağıda belirtilmektedir.

2. ve 3. Bölüm (Genel Kısımlar – Malzeme ve Yöntem); inceleme alanına ait genel jeolojik – jeoteknik bilgiler, tünelcilik yöntemleri, örnek projenin ana özellikleri, 3 boyutlu modelleme ve risk kavramlarıyla ilgili terminolojik bilgiler ve çalışmaların detayları bu bölümde okuyucuya sunulmaktadır.

4.Bölüm (Bulgular); 3 boyutlu modelleme ve güzergâh ayna haritalarının detayları, jeolojik – jeoteknik risk tanımlamaları ve elde edilen sonuçlar bu bölümde yer almaktadır.

5.Bölüm (Tartışma ve Sonuç); çalışma boyunca elde edilen ve ilgili başlıklarda detaylı olarak sunulan tüm sonuçların ve değerlendirmelerin özeti yapılarak önemli kısımlara tekrar değinilmektedir.

1.5. PROJE SEÇİMİ

Büyükşehirler, günden güne artan nüfuslarından dolayı altyapı projeleri olmadan kullanılabılır değildir ve çoğu durumda bu altyapı tercihi en iyi seçenek tüneller olmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, yoğun ve kalabalık kentlerde tünellerin inşa edilmesi için büyük bir talep olmaktadır ve bu talep gelecek yıllarda da farklı amaçlar için yenilenecektir.

Bahsedilen hususlar göz önüne alındığında İstanbul, tünelcilik faaliyetlerinin hızlı bir şekilde yürütüldüğü ve önümüzdeki zaman diliminde de yürütüleceği 15 milyonu aşkın nüfusu olan bir anakent olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ataköy - İkitelli metro hattı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından, Avrupa yakasındaki yapılması planlanan toplu taşıma hattı koridorları olarak tanımlanan metro sisteminde önemli bir yere sahiptir. Büyük oranda Bakırköy ve Küçükçekmece ilçe sınırları dahilinde, kısmen de Bahçelievler ve Başakşehir ilçe sınırları içinde yapılacak hat, çift tüp olarak, yaklaşık 13,70 km tünel ve 12 adet istasyondan oluşmaktadır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2: Çalışma alanının Google Earth üzerinde yer bulduru haritası

Tez kapsamında çalışılan projenin seçilme nedeni olarak yazar, yaşadığı şehrin sorunlarından biri olarak gördüğü tünelcilikte jeolojik faktörlere bağlı gecikmelerin ve bütçe aşımalarının önüne geçilmesinin sağlanmasına, taahhüt edilen şekilde çalışmaların sonlandırılarak projelerin hizmete girmesine katkıda bulunmak olduğunu belirtmektedir.

2. GENEL KISIMLAR

Bu bölümde inceleme alanı ve yakın çevresine ait jeolojik - jeoteknik bilgiler, tünecilik metodolojisi ve tez kapsamında çalışılan projeye ait teknik bilgiler, 3B jeolojik modelleme ve risk analizi üzerine terminolojik bilgiler ile referans çalışmalara ait özet bilgiler yer almaktadır.

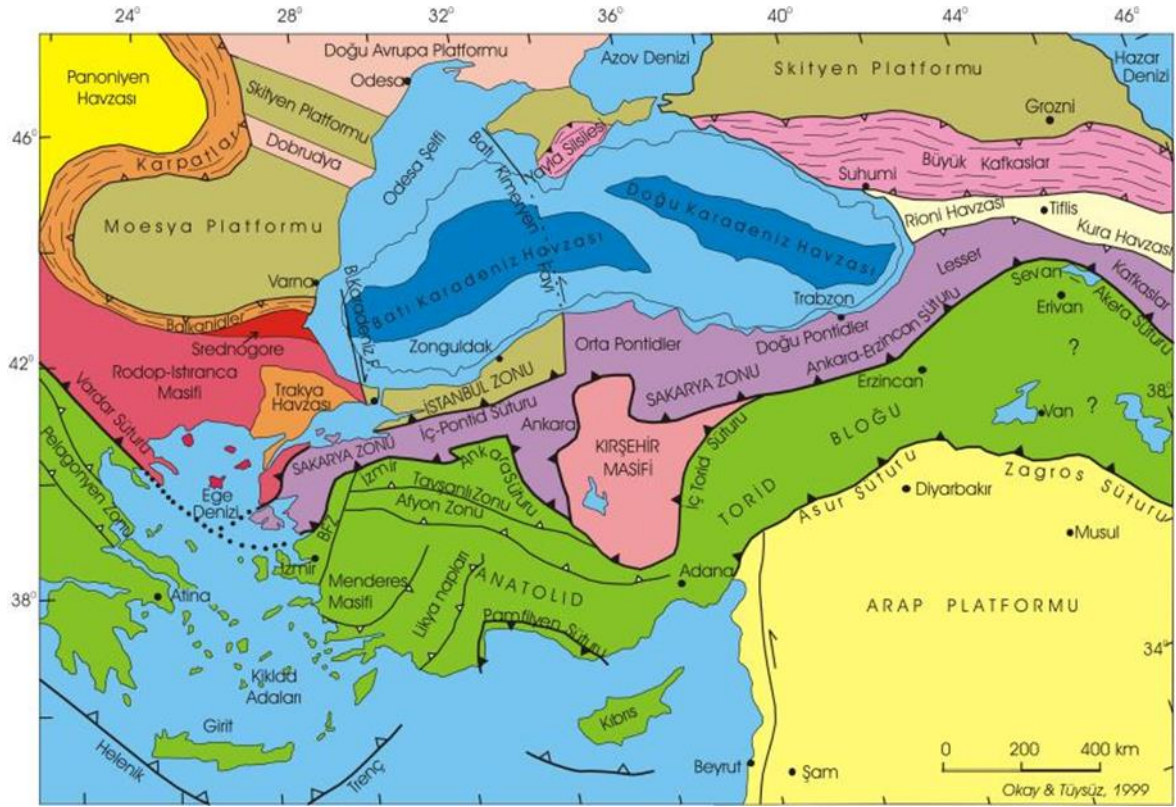
2.1. İNCELEME ALANINA AİT JEOLojİK – JEOTEKNİK BİLGİLER

Geçmişten günümüze İstanbul ve yakın çevresinin jeolojisi birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve oldukça fazla yayınla açıklanmıştır. Bu tez kapsamında, yapılan tüm çalışmalardan ziyade örnek proje çevresinde yapılmış genel yayınlar ve özel çalışmalar özetlenmektedir.

2.1.1. Bölgesel Jeoloji Koşulları

Türkiye'nin içinde bulunduğu bölgenin genel jeolojik çerçevesi birçok araştırmacı tarafından çizilmiş, bölgesel ve özel çalışmalar ise artan teknolojik imkânlarla devam etmektedir. Jeolojik tarihçe olarak çok geriye gidilmeden, proje bölgesini ilgilendiren kısma bakıldığında; Pontidler'in Tetis kapanım suturunu oluşturan İzmir-Ankara-Erzincan hattının kuzeyinde kıvrımlı, bindirmeli ve faylı yapıya sahip bir tektonik birlik olduğu, önemli bir metamorfizma göstermediği bilinmektedir. Anatolid-Torid tektonik kuşağının aksine Variskan (Karbonifer) ve Kimmerid (Triyas) orojenezlerine ait izler taşırken, Batı Pontidler üç alt birlik halinde tanımlanır ve bunlar sırası ile İstiranca, İstanbul ve Sakarya birlikleri isimlerini almaktadır.

İnceleme alanının içinde bulunduğu İstanbul Birliği, Karadeniz'in güneybatısında yaklaşık 55 km genişliğinde ve 400 km uzunluğunda kıtasal tektonik alanı ifade etmektedir (Şekil 2.1). Kristalize temeli, geç Prekambriyen yaşlı meta-volkanik kayalar, gnays, meta-ofiolit ve geç prekambriyen granitoid oluşumları oluşturmaktadır (Chen ve diğ., 2002; Yiğitbaş ve diğ., 2004; Ustaömer ve diğ., 2005). Bu temel Bolu kuzeyinde yer alan Bolu Masifi'nde yüzeylenmekte ve üzeri Ordovisiyen-Karbonifer aralığında kesintisiz bir istif olan İstanbul-Zonguldak Paleozoik İstifi ile uyumsuz şekilde örtülmektedir (Görür ve diğ., 1997; Dean ve diğ., 2000).



Şekil 2.1: Türkiye ve yakın çevresinin makro tektonik haritası (Okay ve Tüysüz, 1999)

İstanbul Birliği'nin doğu ve batı kesimleri arasında belirgin stratigrafik ve fasiyes farklılıkları söz konusudur. Batı kesimlerde, İstanbul Asya ve kısmen Avrupa yakasında ve Haliç kuzeyinde, erken Karbonifer 2000m'den kalın, şeyl-kumtaşı aralanmaları ile temsil edilen derin denizel türbiditik oluşumlar yer alırken, doğuda, Zonguldak taraflarında, erken Karbonifer sığ denizel karbonatlar gözlenir. Bu stratigrafik değişkenler, Karbonifer paleocoğrafyasında, batı bölümünde silis daneli ve derin denizel çökelim ortamını, doğu bölümünde karbonat platformu ve kıtasal ortamların yaygınlığını gösteren sığ denizel ortamı işaret etmektedir (Okay ve diğ., 2006).

Bölgesel ölçekte Tersiyer Formasyonlar, İstanbul Avrupa yakasında Paleozoyik temeli uyumsuz bir şekilde örtmektedir. Bazı bölgeler, özellikle tepelik alanlar, genç (Eosen-Pliyosen) kıtasal formasyonlarla ve nehir vadilerinde alüvyon çökelleriyle örtülüdür. İstanbul eski bir yerleşim bölgesi olduğu için, eski kent alanlarında oldukça kalın bir dolgu tabakası mevcuttur.

Stratigrafik kesite göre Paleozoyik çökel istif (kalınlığı birkaç bin metreye ulaşmaktadır) bölgede temeli oluşturmaktadır. Bu kalın sedimenter istif başta kireçtaşı, karbonatlı şeyl, arenalaşmış kayalardan oluşmaktadır.

İstanbul'un Avrupa yakasında, İstanbul Paleozoyik İstifine ait Karbonifer yaşı Trakya Formasyonu en yaşı jeolojik birimdir ve alanın jeolojik temelini oluşturur. Eosen yaşı Ceylan Formasyonu ve Soğucak Kireçtaşı Üyesi, uyumsuz olarak Trakya Formasyonu'nu örtmektedir. Oligosen yaşı Danişment Formasyonu'na ait Gürpınar Üyesi (kil egemen), Miyosen yaşı Çukurçeşme (genelde kum/silt), Güngören (kil) ve Bakırköy (kireçtaşı, marn, kil) üyelerine ayrılan Çekmece Formasyonu bu birimleri örtmektedir (Şekil 2.2). Yerleşim alanlarında çoğunlukla görülen dere vadilerindeki alüvyon ve güncel yüzey dolguları, jeolojik haritadaki en genç birimlerdir.

Tektonik olarak, bölge, çok fazlı genişleme ve sıkışma tektonizmasına maruz kaldığından dolayı temel kaya kıvrımlı ve faylı karmaşık bir yapıya sahiptir. Diğer taraftan, genç birimler daha az deforme olmuşlar ve hafif bir eğime sahiptirler. Alandaki önemli tektonik yapılardan biri, Boğazın Kuzeyinde D-B doğrultulu bindirme yapısıdır. Şile bindirmesi olarak adlandırılan bu yapı Kuzeyde Paleozoyik Formasyonların Kratese yaşı volkanik kayalara bindirmesi olarak açıklanır.

Ayrıca Kuzey Anadolu Fay Zonu, inceleme alanının yaklaşık 15-30 km güneyinden Marmara Denizi içerisinden geçmektedir. Kuzey Anadolu Fay zone çok ciddi depremleri tetiklemiş aktif uzun bir kabuksal yırtılma zonudur. Fayın Marmara kesiminde gerçekleşen en son depremler 1999 yılında birçok can kaybına neden olan İzmit depremi (7.2M) ve birkaç ay sonra gerçekleşen Düzce depremidir (7M).

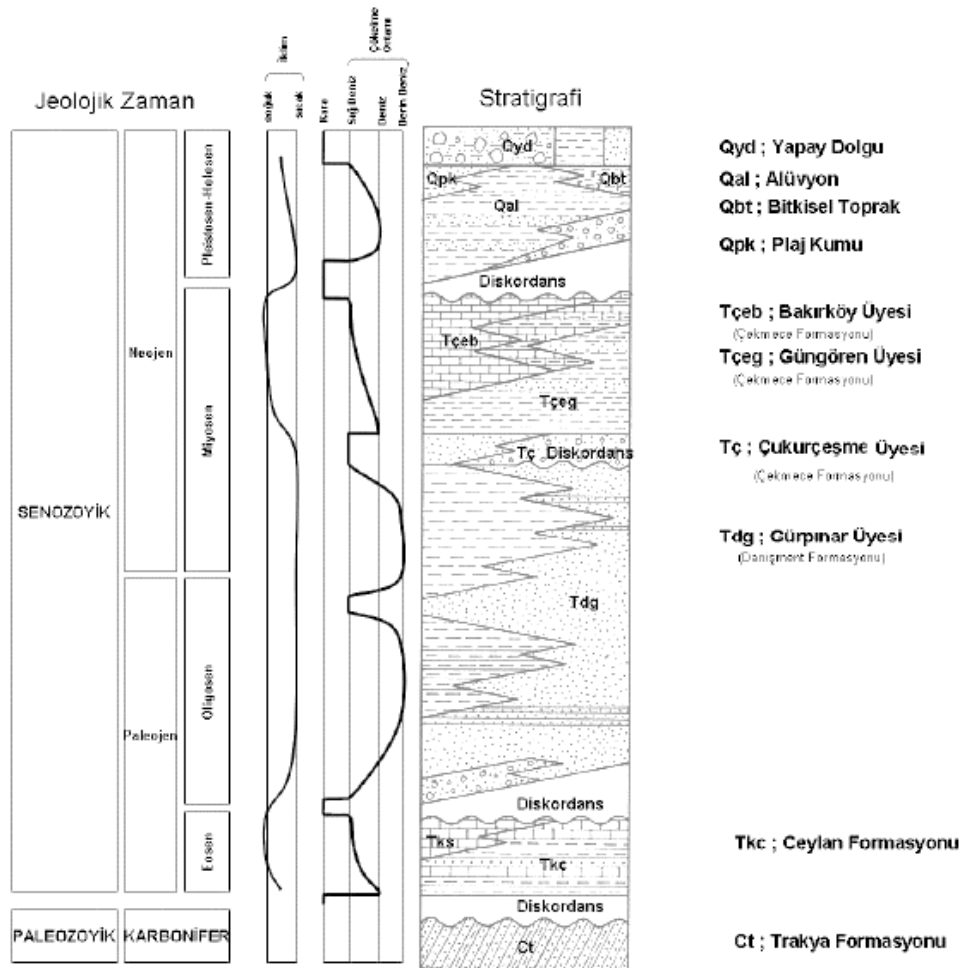
Kuzey Anadolu Fay zone dışında birkaç KB-GD doğrultulu genç fay mevcuttur ancak bu faylar, mevcut aktif fay haritalarında aktif olarak gözükmemekte ve aktivitelerine ilişkin kesin bilgiler bulunmamaktadır.

SİSTEM	SENOZOYİK										LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SERİ	Üst Miyosen-Pliyosen(?)											
KAT	Orta-Üst Oligosen											
FORMASYON	Rupeliyen											
ÜYE	Çekmece											
YAKLAŞIK KALINLIK (m)	İstanbul											
	Çukurçeşme											
	Kıraç											
	Ağaçlı											
	Sinekli											
	Çantaköy											
	Gürpınar											
	Silivri											
	Süloğlu											
	Balıkköyü											
	Yassıören											
	Kızılcaali											
	Soğucak											
	Koyunbaba											
Max ~100	~150											
	~1000											
	10											
	50											
	100											
	~40											
	~40											
	~40											
	~40											
	~100											
	~25											
	~30											
	80-100											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											
	~40											
	~30											
	~200											

2.1.2. İnceleme Alanının Jeolojik Koşulları

Lokal olarak inceleme alanı, Trakya ya da Ergene havzasının doğu kısmında yer almaktadır. Alt Oligosen ve Alt Miyosen arasında bu alan, lagünler ve yerel acı su bölgeleri içeren sıg deniz ve delta ortamı geçiş fasiyesine dönüşmüştür. Bu kısım günümüzde, organik seviyeler ve ince linyit/organik tabakalar içeren ve ince taneli zemin ve zemin-kaya geçiş malzemesinden oluşan Danişment Formasyonu (farklı litolojilerin dikey-yatay geçişlerinin olduğu denizel-kıta geçişi); Güngören ve Kırac birimleri (kanal dolgusu) ile temsil edilir (Şekil 2.3).

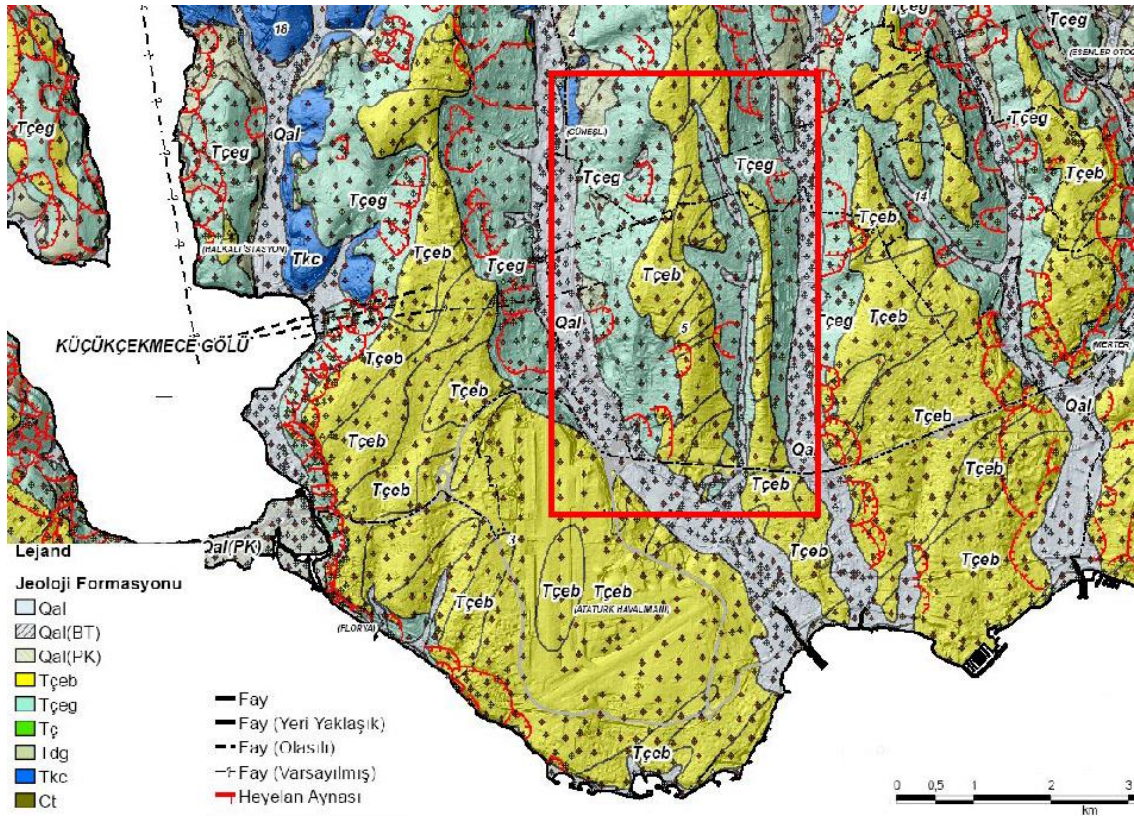
Neo-tektonik aşamada biraz daha yükselerek, kıtasal göl fasiyesine dönüşür. Bu tabaka, Çekmece Formasyonu'nun Çukurçeşme Üyesi gibi ince malzemeli ara tabakalı granüler malzeme mercekleri ve Çekmece Formasyonu'nun Güngören Üyesi gibi organik seviyeli ve izole kumlu-siltli ara katmanlı ince taneli zeminler ile temsil edilir. Bakırköy Üyesi ise üst birimdir (fosilli kireçtaşı ile marn alt seviyelerde karbonatlı kil aratabakaları).



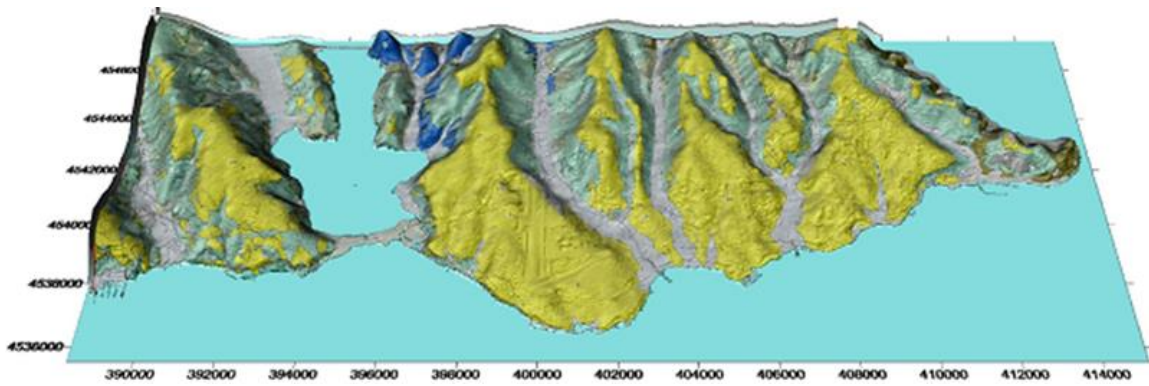
Şekil 2.3: İnceleme alanının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (OYO, 2009).

Alan son durumuna, daha sonraki deniz çekilmesiyle ulaşmıştır. Dere vadilerindeki alüvyon ve güncel yüzey çökelleri, geç Kuvaterner / güncel dolguları temsil etmektedir (Koral, 1998).

Bahsedilen jeolojik evrim, jeolojik modellemede zorluk ve belirsizlik üreten yukarıda açıklanan yanal ve düşey litolojik çeşitliliği oluşturmuştur. İBB Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü çalışma grubu tarafından, mevcut veriler esas alınarak ve genel jeolojik bilgilerin derlenmesiyle Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te gösterildiği üzere, yerel ölçekte jeolojik model tasarlanmıştır.



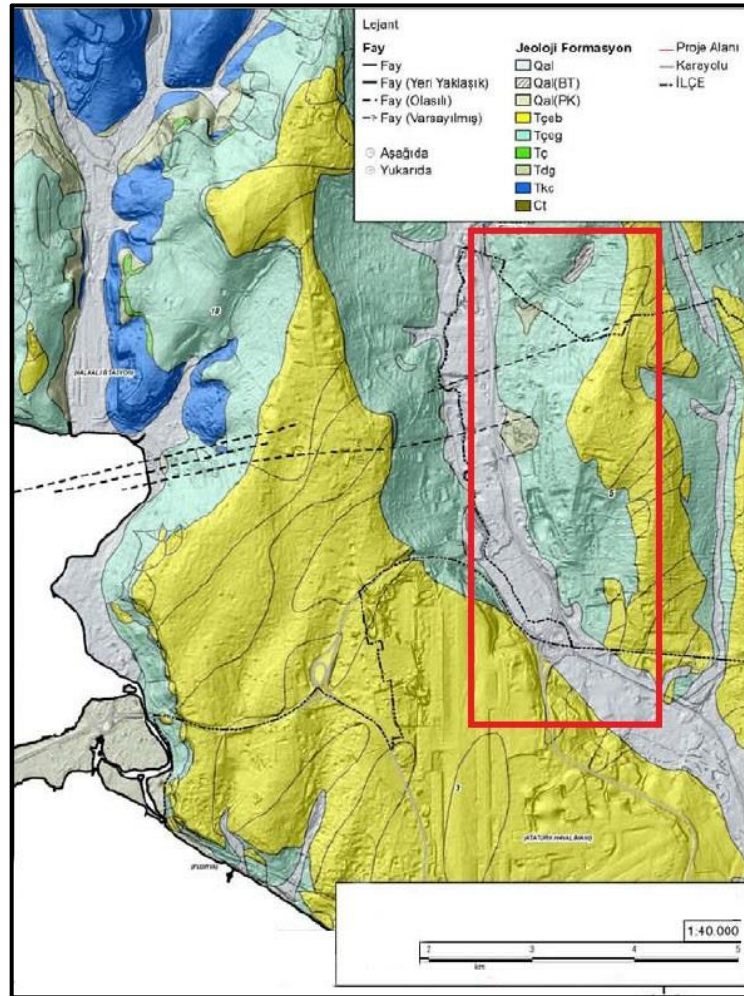
Şekil 2.4: İnceleme alanının jeoloji haritası (İ.B.B. DEZİM, 2007)



Şekil 2.5: İnceleme alanının 3 boyutlu genel modellemesi (İ.B.B. DEZİM, 2007)

Bölgedeki fay zonlarının belirlenmesi ve tanımlaması ile ilgili belirsizliklerin ortaya konulması da konu ile bağlantılıdır. Yoğun kentleşme ve neredeyse sürekli bir zemin örtüsünden dolayı makaslama ve / veya kırıklı bölgenin doğrudan tespiti güncel kazılar olmadıkça imkânsızdır. Ayrıca karbonatlı malzemelerin niteliği, muhtemel kırılğan (mineral re-kristalizasyonu dışında) faylı kayalar için bir miktar iz bırakmaması, sondajlar boyunca tanınmalarını da zor kılmaktadır. Bununla birlikte, İstanbul bölgesinin uzun tektonik geçmişi göz önüne alındığında, bazı potansiyel aktif fayların (daha genç yumuşak / zemin örtü dolgularını kesmiş) ve uyumsuzlukların güzergâh boyunca varlığı dikkate alınmalıdır.

İBB Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü tarafından yürütülen çalışmalar sonucu sondajlardan ve araştırma çukurlarından elde edilen, Küçükçekmece Gölü'nün batı yakasındaki topoğrafya ve jeoloji ile örtüşen çıkarsanmış faylar Şekil 2.6'da gösterilmekte, fay sistemine ait özellikler Tablo 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.6: İnceleme alanının fay haritası (İ.B.B. DEZİM, 2007)

Tablo 2.1: İnceleme alanındaki ana fayın genel görünümü (İ.B.B. DEZİM, 2007)

İsim	Halkalı – Bağcılar Fay Sistemi
Yer	Halkalı – Bağcılar Güneyi
Doğrultu	DKD - BGB
Tip	Normal fay
Uzunluk	12 km veya daha fazla
Yer Değiştirme	10 – 20 m veya daha büyük (düşey)
Yer Değiştirme Kriteri	Ceylan ve Gürpınar arasındaki uyumsuz seviye
Fay Kanıtı	Sıralı sondajlar sonucu ana kaya kontur haritasındaki sert eğim
Aktivite Yaşı	Erken veya Orta Oligosen (Ceylan’dan sonra Gürpınar’dan önce)
Son Aktivite	Gürpınar’dan önce
Aktif Fay Kanıtı	YOK

İnceleme alanında bulunan jeolojik birimlerin farklı granülometrik yüzdeleri, yapı ve doku farklılıkları, tutturulma dereceleri, alterasyon ve ayrışma gibi özellikleri, büyük değişiklik göstermektedir. Ayrıca, stratigrafik istif hem yatay hem düşey varyasyonlarda çoğunlukla süreksizdir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu karmaşıklıktan dolayı literatürdeki jeolojik ve stratigrafik tanımlamalar ve birim ayırmada halen güncellemeler yapılmaktadır.

Litolojik istif; güncel dolgu ve alüvyal dolgu ile örtülmüş yaşlıdan gence doğru aşağıdaki birimleri içermektedir.

2.1.2.1. Ceylan Formasyonu (Tkc Orta – Üst Eosen)

Ceylan Formasyonu temel olarak çeşitli oranlarda marn-killi kireçtaşı, karbonatlı kilaşından oluşmaktadır. Kumtaşı ve kireçtaşları tuf aralanmalıdır. Marnlar ve kilaşları taze iken mavimsi-kül rengi, ayrıştığında sarımsı boz-krem rengindedir. Kireçtaşı - karbonatlı kumtaşı ve fosilli sert kireçtaşı seviyeleri içermektedir. Orta ve düzgün katmanlı, içbükey ya da dışbükey kırılma yüzeylidir (Özgül ve diğ., 2005).

Ceylan Formasyonu sondaj kuyularından elde edilen karot numunelerinde ve mostralarının üst kesimlerinde Nümmülit vb. bentonik Foraminifer’li biyomikritik ve mikritik kireçtaşı, killi kireçtaşı, biyoklastik kireçtaşı-kalkarenit araseviyelerini içermektedir. Özgül (2005) kireçtaşının yoğun olduğu benzer düzeyleri “Yassıören Üyesi” adıyla incelemektedir.

Birim yüksek oranda kil içermesi sebebiyle, Soğucak Kireçtaşı kadar erime ve karstlaşma görülmemektedir. Bu nedenle yeraltı su seviyesi açısından geçirimsiz ve yarı geçirimsiz kaya niteliği taşımaktadır. Taze durumda dayanımlı ve sert iken, kil içeriği sebebiyle hava ile temas ettiğinde kolay nemlenerek yumuşak kaya özelliği kazanmaktadır.

Ceylan Formasyonu, Soğucak Kireçtaşı'nın resiflerinin geliştiği sırtlar arasında kalan, daha derin ortamlarda çökelmiştir. Soğucak birimi ile yatay ve düşey geçişlidir ya da bu kireçtaşını aşmalı olarak üstler. Birim Çekmece Formasyonları tarafından uyumsuzlukla üstlenir. Formasyon kalınlığı, Soğucak Kireçtaşı resiflerinin gelişimine ve taban topoğrafyasına bağlı olarak, 40 metreden 200 metreye kadar değişkenlik göstermektedir.

2.1.2.2. Gürpınar Üyesi (Tdg, Danişment Formasyonu - Geç Oligosen)

Kısa mesafelerde farklı mühendislik davranışı sergileyen, yatay ve dikey yönde çeşitlilik gösteren, ince kum - mil araseviyeli kil - kilaşı, Gürpınar Üyesi'nin egemen litolojisini oluşturmaktadır. Birim içinde yer yer çakıl mercekleri bulunmaktadır. Kilaşı, taze halde yeşilimsi ve morumsu renkli, ayrılmış halde açık külrengi, kahve – boz renkli, ince-orta katmanlı ve laminalıdır. Kalınlığı 20 cm'yi geçmeyen kumtaşı düzeyleri ara seviyeleri oluşturmaktadır. Genellikle ince kavrık, küçük boyutlu, gastropod ve beyaz renkli lamellibrans kavrıklarını kapsayan, 5-10 cm kalınlıkta makrofosilli araseviyeler ve nadiren Congeria'lı beyaz kireçtaşı araseviyelerini kapsamaktadır. Yer yer bitki izlerine rastlamak mümkündür (Özgül ve diğ., 2005).

Gürpınar Üyesi Küçükçekmece Gölü'nün batı yakasındaki yüzeylemelerinde egemen kaya türünü oluşturan kil ve kilaşı istifi kum-kumtaşı ve kireçli kumtaşı arakatkılarını içerir. Gölün doğu yakasında kum-kumtaşı içeriği azalır kil-kilaşı egemen olur.

Gürpınar Üyesi alt düzeylerinde tabanına yakın kesimlerinde çakıl ya da çakıltaşı merceklerini içerir. İnceleme alanı çevresinde yapılan derin sondajlar Gürpınar Üyesi'nin bölgede 250 metrenin üzerinde bir kalınlığa sahip olduğunu göstermektedir.

Gürpınar Üyesi inceleme sahası çevresinde Soğucak birimini uyumsuzlukla örtmektedir. Soğucak Kireçtaşı'nı doğrudan örttüğü alanlarda, kireçtaşı kökenli çakıl ve blokları içeren çakıl – kum seviyesi ile başlamaktadır.

Formasyon, inceleme alanında Eosen kireçtaşları ve Trakya Formasyonu'nu uyumsuz olarak örterken Çekmece Formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülür. Yıldırım ve Savaşkan (2003)'a göre Eminönü çevresinde 40-90 metre, Küçükçekmece çevresinde 80 metre, Gürpınar civarında, tabanı açığa çıkmamış mostralarında yaklaşık 100 metrenin üzerinde kalınlığa sahiptir. Yapılan derin sondajlarda birimin Topkapı bölgesinde 50 m. Ataköy civarında 160 m. Avcılar bölgesinde ise 250 metreden daha kalın olduğu tespit edilmiştir.

2.1.2.3. Çukurçeşme Üyesi (Tç, Çekmece Formasyonu Orta - Üst Miyosen)

Çukurçeşme Üyesi; sarımsı boz renkli, bol mikalı, orta boylanmış, yer yer derecelenmiş, orta-kaba kum boyutunda kuvars, kuvarsit, volkanit, kumtaşı çakmaktaşı ve kireçtaşı kökenli ayrık malzemeyi içermektedir. Çapraz katmanlı, mika çakıllı, çimentolanmamış kum ve bazı yerlerde kil ara tabakaları baskın litolojiyi oluşturmaktadır. Çekmece Formasyonu'na ait Güngören Üyesi ile girik yapı göstermektedir. Mostraları genel olarak ayrışmaya ve erozyona uğradığından birim kalınlığı tahminidir ve yaklaşık 30 metredir. Genelde devamsız, geniş ya da dar uzanımlı mostraları gözlenir. Birim akarsu ortamını temsil etmektedir (Özgül ve diğ., 2005).

2.1.2.4. Güngören Üyesi (Tçeg, Çekmece Formasyonu - Üst Miyosen)

Güngören Üyesi kuvarslı, mikalı, çapraz katmanlı kum-kil ardalanmasıyla başlamaktadır. Üst kısımlarda yer yer makrofosil kavkılı yeşil renkli killer birimin egemen kaya türünü oluşturmaktadır. Killer değişen oranlarda çapraz katmanlı, orta boylanmış, gevşek, ince kum ara seviyelerini içermektedir. Nadir olarak kömürlü kil ara seviyelerini içerir. Güngören Üyesi, üst seviyeleri makro fosillidir (kavkı) ve Bakırköy Üyesi'nin kireçtaşlarına benzer nitelikte, 5-30 cm kalınlığında killi kireçtaşı, kireçli kilaşı, kireçtaşı araseviyelidir (Özgül ve diğ., 2005).

Güngören Üyesi, Trakya ve Ceylan Formasyonlarını açısal uyumsuz olarak Gürpınar ve Çukurçeşme Üyelerini açısız uyumsuzluklarla örtmektedir. Üyenin birim kalınlığı inceleme alanının kuzey, batı ve doğusunda havza kenarlarına yakın kesimlerinde 50 m. ya da daha az kalınlıktadır. Kil mil boyu ince gercin egemen olduğu Güngören Üyesi düşük enerjili, durgun göl ve bataklık ve zaman zaman denizle bağlantılı ortam koşullarını yansıtmaktadır.

2.1.2.5. Bakırköy Üyesi (Tçeb, Çekmece Formasyonu - Üst Miyosen)

Çekmece Formasyonu'nun üst kısmını oluşturur. Kirli beyaz - krem renkli, ince-orta katmanlı, boşluklu-gözenekli kil-killi kireçtaşı-marn ara seviyelerini kapsamaktadır. Sıklıkla algli ve onkoidlidir. Mactra fosili içeriğinden dolayı "Mactralı Kireçtaşı" olarak da adlandırılmaktadır. Alt kısımlarda kil, üst kısımlarda kireç oranı artmaktadır (Özgül ve diğ., 2005).

Güngören Üyesi'ni dikey ve yatay geçişli olarak örter; mostraları ayırmaya müsait alanlar olduğundan dolayı birim kalınlığı kesin değildir. Görünür kalınlık çalışma alanının güney kısmında Atatürk Havalimanı ve Bakırköy Limanı çevresinde 45 metre, havzanın kenar kısımlarında ise 10 metre dolayındadır.

Bakırköy Üyesi, Güngören Üyesi'ni uyumlu ve geçişli biçimde örtmektedir. İki birim arasında keskin bir dokanak çizilememektedir. Güngören Üyesi'nin kil-marn ağırlıklı istifi, kireçtaşının yoğun olduğu Bakırköy Üyesi'ne, kireçtaşı arakatkılı kil-marn dan oluşan bir ara düzey ile geçiş gösterir. Bakırköy Üyesi kapsadığı fosil içeriği ve sedimentolojik özellikleriyle durgun bir göl ortamı koşullarını yansıtmaktadır.

2.1.2.6. Alüvyon (Qal)

İnceleme alanındaki alüvyon genellikle kilden meydana gelmektedir. Gömülü vadiler çevresinde Gürpınar kumu dağıldığı durumda, alüvyon çoğunlukla Gürpınar kumundan oluşan kum tabakaları içermektedir. Gömülü vadilerin tabanı kısmen çakıl içermektedir. Çoğunlukla organik malzeme içeren koyu gri renkli kil, genelde fosil kavrıkları da içermektedir.

Kahverengi renkli kilin bir kısmı tesadüfi kuru koşullar altında birikmiş olduğu tahmin edilmektedir. Bu gibi durumlarda kil biraz daha sert olmaktadır.

Tipik kil yumuşaktır ve yüksek miktarda su ihtiva eder. SPT-N değerleri genellikle 10'dan azdır. SPT örnekleri ile hidrometre testine göre, kum harici kil ve silt içeriği yarı yarıyadır (%50 - %50). Plastisite, Gürpınar kili ile karşılaştırıldığında göreceli olarak düşüktür. Bitkisel toprak örtüsü genel olarak inceleme alanının bazı kısımlarında dağılmaktadır. Bu toprakların çöküntü alanlarına ya da yamaçlara, rüzgârlar veya yüzey suları ile taşınmış olduğu düşünülmektedir. Bitkisel toprak örtüsü (koyu kahverengi), büyük miktarda organik malzeme içeren yumuşak ve killi topraklardır (Özgül ve diğ., 2005).

2.1.2.7. Yapay Dolgu (Qyd)

Heterojen yapay dolgular; kum, çakıl, moloz vb. atıkları içeren kilden oluşan birimlerdir. Kalınlıkları genel olarak 3 - 5 metre arasında değişken olmakla beraber yerel olarak 10 - 40 metre arasında da görülebilmektedir. Kaynağı belirsiz dolguların, artık topraklar ve benzerleri ile bugünkü halini aldığı söylenebilir. Bunları doğal zeminden ayırmak oldukça güçtür ve karmaşık - değişken yapılarından dolayı mühendislik jeolojisi özellikleri çok değişkendir.

2.1.3. Hidrojeolojik Koşullar

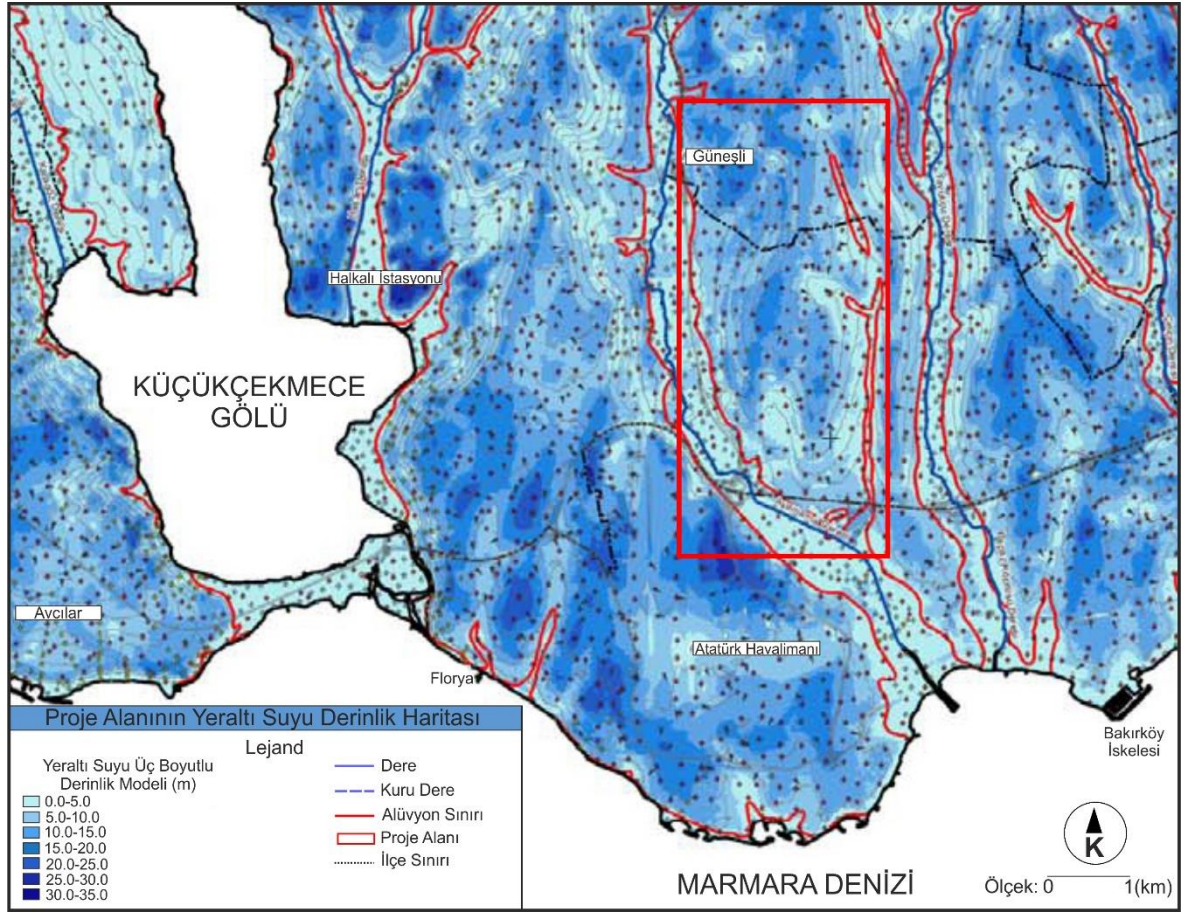
İnceleme alanında genel hidrojeolojik model, karşılıklı etkileşim ile birlikte, üç ana rejim içerir:

- Alüvyonların göllerin çevresindeki yüzeysel çökellerdeki serbest yeraltı suyu rejimi (dolgu ve denizel depolar dahil).
- Tabakalar halinde granüler poroz zeminler / geçirimsiz kil bakımından zengin zeminler içindeki merccekler / basınçlı yerel su tablaları (Danışment Fm. / Gürpınar Üyesi, Çukurçeşme, Güngören, Bakırköy Üyesi, vb.)
- Karstik Eosen kireçtaşı içindeki boşluklu zonlar, kırık hatları ve örtülü bölgelerde artezyen koşulları içeren karstik hidrojeoloji rejimi.

Gürpınar Birimi, Çukurçeşme Üyesi, Güngören Üyesi ve Bakırköy Kireçtaşı Üyesi; ardalanmış geçirimli-geçirimsiz birimler, yerel karstlaşma gibi heterojen koşulları nedeni ile bağımsız yerel asılı süreksiz akifer bölmeleri ve değişken su seviyeleri içermektedir. Ayrıca, bazı yerel alanlardaki fayların varlığı da gözardı edilemez, kırık ve çatlaklar boyunca, geçirimsiz sınırlar arasındaki geçirimli zonlara yönelmiş ince malzemeli su gelirleri de mümkün olabilmektedir.

Çalışma güzergâhında bulunan Tavukçu Deresi, Ayamama ve Ayamama Deresi'nin kollarından olan Yenibosna ve Kaynarca derelerinin yataklarında beklenen alüvyal ve haliç çökelleri kil, çakıl - kum baskın seviyelerden oluşmaktadır. Killi bölümler düşük geçirimlilik özelliği nedeniyle yeraltı suyu taşıma ve iletme potansiyeline taşımazlar. Kum ve çakıl baskın seviyeler kısmen geçirimli olup yeraltı suyu taşıma ve iletme potansiyeline sahiptir. Bu düzeyler, yer yer alttan killerle sınırlanmış asılı zayıf akifer biçiminde iken, bazen altında yer alan kireçtaşı seviyesini beslemektedirler.

Güzergâh boyunca, hidrojeolojik durum, su / piezometrik seviyeler, yön ve akış hızı, ayrıca kimya (kıyıya yakınlığa bağlı) açısından son derece değişken / karmaşık olarak açıklanabilir. Akiferler bir yerde sürekli, bir yerde yerleşmiş, bir yerde izole edilmiş veya süreksiz, aynı zamanda kısmen doymuş miktarlarda, özellikle kentsel dolgular içerisinde de bulunabilir. T.C. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü tarafından yürütülen çalışmalar sonucunda elde edilen yeraltı suyu derinlik haritası Şekil 2.7'de verilmektedir.



Şekil 2.7: İnceleme alanı çevresindeki yeraltı suyu derinlik haritası (OYO, 2009)

Çalışma bölgesi çevresinde yürütülen çalışmalardan yola çıkılarak jeolojik formasyonların – birimlerin permeabilite sınıflarına göre (Tablo 2.2) genelleştirilmiş hidrojeolojik özellikleri Tablo 2.3’te verilmektedir.

Tablo 2.2: Yeraltı yapılarının çizim ve inşaat çalışmaları için kullanılan permabilite sınıfları (AFTES, 2003)

Permabilite Sınıfı	Permabilite (ms^{-1})	Tanımlama
K1	$< 10^{-8}$	Düşük Permeabilite
K2	$10^{-8} - 10^{-6}$	Orta Derecede Permeabilite
K3	$10^{-6} - 10^{-4}$	Yüksek Permeabilite
K4	$> 10^{-4}$	Çok Yüksek Permeabilite
K5	Pratikte “sonsuz”	Karst Permeabilitesi

Tablo 2.3: Jeolojik formasyonların / birimlerin genelleştirilmiş hidrojeolojik özellikleri

Formasyon	Litoloji	Beklenen Hidrojeolojik Durum (AFTES, 2003 sınıfı)
Alüvyon	Kum, silt ve çakıl karışımı	Kesintisiz akifer, belirgin geçirgenlik (K2 – K3)
Bakırköy Üyesi	Kireçtaşı, marn geçişi	Süreksiz akifer, değişken yeraltı suyu seviyesi, lokal olarak kireçtaşı içerisinde yüksek permabilite (K3)
Güngören Üyesi	Kil baskın seviyeler	Düşük Permabilite (K1)
	Siltli kum seviyeler (killi birimler içerisinde izole mercekler/cepler beklenir)	Süreksiz akifer, değişken yeraltı suyu seviyesi, ortalama permabilite düşükten orta dereceye doğru (K2), kumtaşı merceklerinde yüksek permabilite (K3). Herhangi bir yerde basınçlı izole akifer bulunabilir (kum mercekleri/cepleri)
Çukurçeşme Üyesi	Çimentolanmamış çakıl, kum ve silt karışımı	Bu formasyon önemli bir akifer olarak bilinir. (Sığ derinlikte su kuyusu), yerel bir su kaynağıdır. Permabilitesi iyidir, $>10^{-5}$ m/s olduğu tahmin edilmektedir (K3)
Gürpınar Üyesi	Kumtaşı, silttaşı, kiltası, şeyl	Süreksiz akifer, değişken yeraltı suyu seviyesi. Çoğunlukla düşük-orta permabilite (K1 – K2), kumtaşı tabakalarında daha yüksek
Ceylan Formasyonu	Karasal malzemeler ile birlikte Kireçtaşı tabakaları, karbonatça zengin silt ve kil	Ceylan Formasyonu değişken su seviyeleri ile birlikte, süreksiz ve çok değişken bir akiferdir. Permabilitesi zemin ve zayıf kaya bölümlerinde düşükten orta dereceye doğru çok değişkendir; (K1 – K2) karstlaşmadan dolayı kireçtaşı zonunun fosilli seviyelerinde permabilitesi iyidir (K2 – K3). Ayamama deresi boyunca açılmış birçok su kuyusu, çoğunlukla, verimli olarak kaydedilir. Yarımburgaz alanında da geçirimsiz litolojilerin ve kireçtaşı ile birlikte temas zonu boyunca karstik boşlukların varlığı ve karstik kaynaklar (Altınşehir) bilinmektedir. Serbest akışlı boşluklar muhtemeldir.
(Soğucak Üyesi)	Resifal kireçtaşı blokları	

2.1.4. Referans Jeoloji – Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları

Tez kapsamında çalışılan projeye ait bilgiler dahil olmak üzere İstanbul ve yakın çevresinde gerçekleştirilmiş çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu bölümde bahsedilen çalışmalar, yalnızca proje güzergâhında bulunan litolojik birimlerin ve formasyonların genel jeolojik ve mühendislik özelliklerinin tanıtılması amacıyla yönelik olanları içermektedir.

Penck (1919), bölgenin stratigrafik ve yapısal özelliklerinin anlaşılmasını hedefleyen çalışmalara öncülük etmektedir. Paeckelmann (1925, 1938) İstanbul bölgesi jeolojik harita yapımı ve formasyonların çökel ortamlarını çalışmıştır. Chaput (1947), İstanbul civarının 1 / 125000 ölçekli jeolojik haritasını yapmıştır. Önalın (1981) ve Ketin (1988) İstanbul bölgesinde çalışmalar yürütmüş, Trakya Formasyonu'nun yapısal özelliklerini ortaya koymuşlardır.

OYO (2009), İstanbul Avrupa Yakası – Mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında, T.C. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü tarafından yaptırılan çalışma; jeoloji, mühendislik jeolojisi, saha araştırmaları, yapısal jeoloji, heyelan, sıvılaşma ve hidrojeolojik haritalama, saha testleri gibi temel bilgileri içermektedir.

İBB DEZİM (2007-2011). İstanbul bölgesinde 2007 yılında “İstanbul Avrupa Yakası Mikrobölgeleme Çalışması” tamamlanmıştır. 2011 yılında, yaklaşık 5366 km² alanı kapsayan “İstanbul İl Alanın Jeolojisi” projesi ise hem resmi hem de en güncel jeolojik / mühendislik jeolojisi çalışmasıdır (Bu çalışma OYO, 2009 çalışmasını da kapsamaktadır).

Dalgıç ve diğ. (2009), İstanbul Avrupa yakasında bulunan zemin ve kaya ortamların fiziksel - mekanik özellikleri incelenmekte, bölgede yapı temellerinde karşılaşılan problemlerin nedenlerine yer verilmektedir. Bu olumsuz durumlara neden olan faktörlerin zemin büyütmesi, yetersiz taşıma gücü, fay, ayrışma, karstik boşluk, sel, heyelan, şişme sorunları, oturma ile yeni bina temeli kazısı, metro kazısı ve taş ocağı kazısı kaynaklı problemler olduğu belirtilmektedir.

Ertürk (2015), İstanbul Avrupa yakasındaki jeolojik birimlerin karot numunelerine ait laboratuvar deney sonuçlarının sayısal analizi yapılarak bölgenin geoteknik parametreleri istatistiksel yöntemler kullanılarak değerlendirilmektedir.

Polat (2017), İstanbul Avrupa yakasında inşaa edilecek Ataköy – İkitelli Metro Projesi kapsamında yapılmış jeolojik harita, jeolojik – jeoteknik kesit ve raporları içermektedir.

2.1.5. Sondaj, Laboratuvar ve Yerinde Test Çalışmaları

Bu bölümde yer alan çalışmalar, İstanbul Avrupa yakasındaki litolojik birimlere ait birbirinden bağımsız farklı laboratuvar çalışmalarından elde edilen değerlerin değişkenliklerinin ve benzerliklerinin saptanması üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 2.1.4. Referans Jeoloji – Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları bölümünde bahsedilen çalışmalarda laboratuvar deneylerine ait bulgular özet olarak verilmektedir ve 2.1.6. Tünelcilik Açısından Zemin ve Kaya Sınıflamaları bölümünde bahsedilen, inceleme sahası için yürütülmüş çalışmalardan elde edilen değerlerle denetleme yapılmasına olanak sağlanmaktadır.

İ.B.B. DEZİM (2007), İstanbul Avrupa Yakası Mikrobölgeleme çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen sondajlardan elde edilen laboratuvar deney sonuçları Tablo 2.4'te verilmektedir. Değerler her birim için ağırlıklı ortalamaları göstermektedir.

Tablo 2.4: İ.B.B. DEZİM (2007) laboratuvar deney sonuçları özet tablosu

Test / Deney Türü, Parametre	Simge	Yapay Dolgu	Altıyön	Bakırköy Üye	Güngören Üye	Çukurçeşme Üye	Gürpınar Üye	Ceylan Fm.
Penetrasyon Direnci	SPT N ₃₀	2-10	2-20	-	2-50	>50	30-50	-
Çakıl (%)	-	23,27	5,98	19,25	3,06	9,21	3,07	11,38
Kum (%)	-	28,34	26,24	17,98	17,78	54,20	23,41	23,94
Kil + Silt (%)	-	48,41	68,15	62,78	79,21	36,59	73,57	64,67
Likit Limit (%)	LL	46,50	50,30	47,10	60,60	41,30	56,10	47,30
Plastik Limit (%)	PL	13,20	13,00	15,20	16,00	13,50	15,70	15,30
Plastisite İndisi	PI	33,30	37,30	31,90	44,50	27,80	40,40	32,00
Doğal Su İçeriği (%)	W _n	23,80	32,20	24,10	28,90	17,80	24,60	24,70
Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	γ _n	1,80	1,80	2,10	1,85	1,90	1,90	2,20
Konsolidasyon (kg/cm ²)	m _v	0,015	0,029	0,015	0,011	0,013	0,010	0,013
Serbest Şişme (%)	-	1,407	0,969	1,531	2,253	2,007	2,228	1,283
Şişme Basıncı (kg/cm ²)	-	0,076	0,058	0,071	0,112	0,112	0,132	0,048
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	q _u	1,71	1,38	1,56	1,96	3,27	2,53	1,83
Kohezyon(kgf/cm ²)	C (q _u /2)	0,85	0,69	0,78	0,98	1,64	1,27	0,91
Kohezyon (kPa)	C	0,69	0,77	1,98	2,25	-	0,85	0,61
İçsel Sürtünme Açısı (°)	Φ	9,30	7,30	7,90	11,40	-	13,50	11,00
USCS Zemin Sınıflaması	-	-	CH	-	CH	SM	CH	-

Dalgıç ve diğ. (2009), İstanbul Avrupa yakasında bulunan zemin ve kaya ortamların fiziksel - mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deneylerine ait sonuçlar Tablo 2.5'te özet olarak verilmektedir. Değerler her birim için ağırlıklı ortalamaları göstermektedir.

Tablo 2.5: Dalgıç ve diğ. (2009) laboratuvar deney sonuçları özet tablosu

Test / Deney Türü, Parametre		Alüvyon	Bakırköy Üye	Güngören Üye	Çukurçeşme Üye	Gürpınar Üye
Çakıl (%)		0,00	0,00	0,83	2,02	2,02
Kum (%)		53,33	7,41	25,62	49,49	23,35
Kil + Silt (%)		46,67	92,59	73,55	48,48	74,67
Plastisite Derecesi Oranları (%)	En Büyük Ip (%)	46,67	92,59	73,55	48,48	74,67
	En Küçük Ip (%)	53,33	7,41	25,62	49,49	23,35
	Plastik Değil	0,00	0,00	0,83	2,02	2,02
	Önemsiz	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Düşük	1,68	4,55	1,08	7,41	0,00
	Orta	13,45	27,27	13,98	11,11	14,29
	Yüksek	47,90	50,00	48,39	55,56	85,71
	Çok Yüksek	36,97	18,18	36,56	25,93	0,00
Kıvamlılık İndeksi (Ic) Sınıflaması Yüzdeleri (%)	Akışkan	0,00	0,00	0,00	3,03	0,00
	Çok Yumuşak	0,00	0,00	6,45	0,00	0,00
	Yumuşak	50,00	0,00	9,68	9,09	4,71
	Orta Katı	0,00	4,55	29,03	18,18	17,65
	Katı	50,00	59,09	45,16	39,39	42,35
	Çok Katı	0,00	36,36	9,68	30,30	35,29
Serbest Basınç Sınıflaması Yüzdeleri (%)	Çok Yumuşak	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Yumuşak	0,00	0,00	1,69	0,00	1,61
	Orta Katı	0,00	13,33	3,39	0,00	4,84
	Katı	100	24,67	64,41	0,00	14,52
	Çok Katı	0,00	20,00	20,34	100,00	32,36
	Sert	0,00	40,00	10,17	0,00	46,77

Ertürk (2015), İstanbul Avrupa yakasındaki jeolojik birimlerin karot numunelerine ait laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen ortalama değerler Tablo 2.6’da özet olarak gösterilmektedir.

Tablo 2.6: Ertürk (2015) laboratuvar deney sonuçları özet tablosu

Test / Deney Türü, Parametre		Simge	Bakırköy Üye	Güngören Üye	Çukurçeşme Üye	Gürpınar Üye
Su Muhtevası (%)		w_n	-	27,86	21,03	24,06
Likit Limit (%)		LL	-	59	-	60
Plastik Limit (%)		PL	-	21	-	20
Boşluk Oranı		e	-	0,84	0,75	0,72
Doğal Birim Hacim Ağırlık(kN/m ³)		γ_n	22,85	18,67	18,08	18,89
Serbest Basma Dayanımı (kPa)		q_u	-	301,20	-	182,80
UU-Üç Eksenli Kesme (kPa)	Drenajsız Kohezyon	c_u	-	153,39	90,40	168,28
	Kayma Direnci (kPa)	c	-	42,37	-	34,03
	Kayma Direnci Açısı	Φ	-	13,40	-	11,50
	Kayma Direnci (kPa)	c'	-	34,38	-	27,77
	Kayma Direnci Açısı	Φ'	-	23,80	-	24,60
CU-Üç Eksenli Hücre Kesme Deneyi	Kayma Direnci (kPa)	c	-	52,33	30,13	56,63
	Kayma Direnci Açısı	Φ	-	16,70	24,6	17,30
	Kayma Direnci (kPa)	c_r	-	21,58	-	21,49
	Kayma Direnci Açısı	Φ_r	-	14,20	-	11,80
Kesme Kutusu Deneyi	Ön Konsolidasyon Basıncı (kPa)	σ_c	-	396,00	-	446,50
	Sıkışma İndisi	C_c	-	0,275	-	0,301
	Yeniden Sıkışma İndisi	C_r	-	0,038	-	0,055
	200 kPa altında %50 konsolidasyon süresi	t_{50}	-	9,6	-	13,2
	400 kPa altında %50 konsolidasyon süresi	t_{50}	-	11,4	-	13,4
Kayada Tek Eksenli Basma Dayanımı (Mpa)		σ_1	18,93	-	-	-

Polat (2017), Ataköy – İkitelli Metro Projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan, sondaj verilerine bağlı arazi ve laboratuvar değerleri aşağıda verilmektedir.

Seçilen güzergâhta yapılacak tünel kazıları; kireçtaşı ve kilaşı - marn gibi kaya seviyeleri ile kum ve kil gibi zemin seviyeleri içinde yapılacaktır. Mühendislik ve tünelcilik özellikleri bakımından 2.1.6. Tünelcilik Açısından Zemin ve Kaya Sınıflamaları bölümünde, inceleme alanı esaslı rapora göre değerlendirilen birimlere ait arazi ve laboratuvar deneyleri özeti Tablo 2.7’de verilmektedir.

Tablo 2.7: Tüm birimlere ait arazi ve laboratuvar verileri özet tablosu (Polat, 2017)

Test / Deney Türü, Parametre	Simge	Yapay Dolgu	Alüvyon	Bakırköy Üye	Güngören Üye	Çukurçeşme Üye	Gürpınar Üye
Penetrasyon Direnci	SPT N ₃₀	11	11	28	30	40	37
Çakıl (%)	-	22	7	10	3	3	3
Kum (%)	-	24	16	20	15	50	12
Kil + Silt (%)	-	54	77	70	82	47	85
Likit Limit (%)	LL	44	45	49	55	35	52
Plastik Limit (%)	PL	11	13	14	17	16	18
Plastisite İndisi	PI	33	32	35	38	19	34
Doğal Su İçeriği (%)	W _n	-	30,6	29	31	25	27
Birim Hacim Ağırlık (t/m ³)	γ_n	-	1,8	1,8	1,8	1,82	1,84
Konsolidasyon (kg/cm ²)	m _v	-	-	-	-	-	-
Elastisite Modülü	E	-	-	-	14	19,4	29
Serbest Şişme (%)	-	-	-	-	-	-	-
Şişme Basıncı (kg/cm ²)	-	-	-	-	-	-	-
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	q _u	-	222	-	286	324	323
Kohezyon(kgf/cm ²)	C	-	90	115	94	31	38
Kohezyon (kPa)	C _u	-	39	66	143	165	190
İçsel Sürtünme Açısı (°)	Φ	-	7	10	11	11	11
USCS Zemin Sınıflaması	-	NP	CL	CH	CH	SM	CL-CH

2.1.6. Tünelcilik Açısından Zemin ve Kaya Sınıflamaları

Tünel mühendisliğinde zeminler, Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına (USCS) ve diğer mühendislik sınıflamalarına ek, kütleli dayanım ve permeabiliteleri ile bunlara bağlı diğer özellikleri bakımından da sınıflandırılmaktadırlar. İnce daneli zeminlerin tünelcilikteki davranışları SPT, kıvam, serbest basınç test verilerine göre yapılırken, kaba daneli zeminlerin ise yaygın olarak granülometri ve standart penetrasyon test (SPT) verilerine göre yapılmaktadır. Tüm bunlara ek olarak zemin tabakasının yeraltı su seviyesi altında veya üstünde olması da zeminlerin tünelcilikteki davranışlarını etkilemektedir (Polat, 2017).

Bu kapsamda önceki bölümde özet olarak verilen arazi ve laboratuvar sonuçlarının detayları, birimlerin tünelcilik açısından genel davranışları ve sınıflamalar bu bölümde yer almaktadır.

- **Alüvyon**

Alüvyon birimi düşük – yüksek plastisiteli orta katı – katı killerden, kısmen de gevşek killi kum, silt ve çakıllı, killi kumlardan oluşmaktadır. Birim ile ilgili laboratuvar ve arazi verileri Tablo 2.8’de verilmektedir.

Tablo 2.8: Alüvyona ait arazi ve laboratuvar verileri

Test / Deney Türü, Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama Değer
Penetrasyon Direnci	SPT N_{30}	2	>50	11
Çakıl (%)	-	0	84	7
Kum (%)	-	1	82	16
Kil + Silt (%)	-	8	99	77
Silt (%)	-	18	45	33
Kil (%)	-	23	80	59
Likit Limit (%)	LL	22	76	45
Plastik Limit (%)	PL	7	24	13
Plastisite İndisi	PI	12	61	32
Doğal Su İçeriği (%)	W_n	22,4	43,5	30,6
Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	γ_n	16,5	19	18
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	q_u		222	
Kohezyon (kPa)	C	14	74	39
Kohezyon (kPa)	C_u	20	143	90
İçsel Sürtünme Açısı ($^{\circ}$)	Φ	2	17	7
USCS Zemin Sınıfı		% 58 CL, % 27 CH, % 15 SM ve GC- GM		

- **Güngören Üyesi (Tçeg, Çekmece Formasyonu)**

Az oranda düşük plastisteli killer ve ağırlıklı olarak yüksek plastisiteli killer ile ara seviyeler halinde bulunan kumlu killerden veya killi kumlardan oluşmaktadır. Penetrasyon değerlerine göre alt seviyeleri sert (ortalama çok katı), üst seviyeleri çok katı kil özelliği taşımaktadır. Ara seviyeler halinde bulunan kil ve killi kumlar ise orta sıkı – sıkı özelliktedir. Tünelcilik açısından killer dökülen - şişen zemin, kumlar ise hızlı dökülen zemin özelliğindedir. Birim ile ilgili laboratuvar ve arazi verileri Tablo 2.9’da verilmektedir.

Tablo 2.9: Güngören kiline ait arazi ve laboratuvar verileri

Test / Deney Türü, Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama Değer
Penetrasyon Direnci	SPT N ₃₀	14	>50	30
Net Limit Basınç (MPa)	PL	0,82	2,44	1,2
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	7	18	14
Çakıl (%)	-	0	76	3
Kum (%)	-	0	100	15
Kil + Silt (%)	-	8	100	82
Silt (%)	-	12	90	35
Kil (%)	-	0	88	51
Likit Limit (%)	LL	18	110	55
Plastik Limit (%)	PL	8	27	17
Plastisite İndisi	PI	5	90	39
Doğal Su İçeriği (%)	W _n	18	48	31
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	γ _n	16	19	18
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	q _u	46	613	286
Kohezyon (kPa)	C	8	245	94
Kohezyon (kPa)	C _u	32	308	143
İçsel Sürtünme Açısı (°)	Φ	2	27	11
USCS Zemin Sınıfı	% 57 CH, % 30 CL, % 9 SM – SC, %4 ML/CL- ML-CH,GM,GC,GP			

- **Çukurçeşme Üyesi (Tç, Çekmece Formasyonu)**

Az oranda çok katı-sert kilden, yüksek oranda orta sıkı - sıkı kumdan oluşur. Tünelcilikte, birimin yeraltı su seviyesi altında kalan bölümlerinde veya tabaka suları taşıyan kumlu merccek seviyelerinde, ani ve yerel su geliri veya su ile birlikte malzeme boşalmaları (akıcı kum, kum akması), suyun olmadığı durumlarda ise kumlarda dökülmeler görülebilmektedir. Birim ile ilgili laboratuvar ve arazi verileri Tablo 2.10'da verilmektedir.

Tablo 2.10: Çukurçeşme üyesine ait laboratuvar ve arazi verileri

Test / Deney Türü, Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama Değer
Penetrasyon Direnci	SPT N ₃₀	21	>50	40
Net Limit Basınç (MPa)	PL	0,36	2,8	1,6
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	3,7	41	19,4
Çakıl (%)	-	0	50	3,4
Kum (%)	-	0	93	50
Kil + Silt (%)	-	7	99	47
Silt (%)	-	0	53	24
Kil (%)	-	0	64	20
Likit Limit (%)	LL	21	65	35
Plastik Limit (%)	PL	10	23	16
Plastisite İndisi	PI	4	51	19
Doğal Su İçeriği (%)	W _n	20	44	25
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	γ _n	17,4	18,7	18,2
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	q _u	45	435	324
Kohezyon (kPa)	C	6	44	31
Kohezyon (kPa)	C _u	106	217	165
İçsel Sürtünme Açısı (°)	Φ	2	29	11
USCS Zemin Sınıfı	% 63 SM, SC, SW- SP, SM-SC, % 32 ML,CL –ML, % 5 CH			

- **Gürpınar Üyesi (Tdg, Danışman Formasyonu)**

Birimin dikkat edilmesi gereken en önemli mühendislik özelliği yüksek plastisiteli, fissürlü killerden oluşmasıdır. Gürpınar Üyesi'nin killi kısımları genellikle yüksek plastisiteli, kısmen de düşük plastisiteli killerden oluşmaktadır. Penetrasyon testi verilerine göre genellikle sert kil özelliğindedir. Tünelcilik açısından bakıldığında şişen zemin niteliği taşımaktadır. Birim ile ilgili laboratuvar ve arazi verileri Tablo 2.11'de verilmektedir.

Tablo 2.11: Gürpınar kiline ait arazi ve laboratuvar verileri

Test / Deney Türü, Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama Değer
Penetrasyon Direnci	SPT N ₃₀	9	>50	37
Net Limit Basınç (MPa)	PL	0,35	3,3	2,1
Presiyometrik Modül (MPa)	Ep	2,7	58	29
Çakıl (%)	-	0	58	3
Kum (%)	-	0	90	12
Kil + Silt (%)	-	15	100	85
Silt (%)	-	15	46	32
Kil (%)	-	0	82	52
Likit Limit (%)	LL	19	85	52
Plastik Limit (%)	PL	10	24	18
Plastisite İndisi	PI	8	65	34
Doğal Su İçeriği (%)	W _n	20	33	27
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	γ _n	17,7	18,8	18,4
Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	q _u	182	555	323
Kohezyon (kPa)	C	23	168	38
Kohezyon (kPa)	C _u	91	291	190
İçsel Sürtünme Açısı (°)	Φ	5	27	11
USCS Zemin Sınıfı	% 46 CH, % 46 CL, %8 Diğerler			

- **Ceylan Formasyonu (Tkc)**

Bölgesel ölçekte kısmi erime boşluklu olup, eriyen alanların bir kısmı kahve renkli kil dolgulu olup bir kısmı ise boştur. Erime boşluklarının yaygın olduğu alanlarda kayaya ait mühendislik özellikleri önemli ölçüde değişmektedir. Birim ile ilgili laboratuvar ve arazi verileri Tablo 2.12’de verilmektedir.

Tablo 2.12: Ceylan Formasyonu’na ait arazi ve laboratuvar verileri

Test / Deney Türü, Parametre	Simge	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Ortalama Değer
Toplam Karot Verimi	TCR	12	100	68
Sağlam Karot Verimi	SCR	0	100	49
Kaya Kalitesi	RQD	0	100	39
Net Limit Basınç (MPa)	PL	$\geq 1,7$	$\geq 2,5$	$\geq 2,1$
Presiyometrik Modül (MPa)	E_p	75	166	121
Nokta Yüğü Dayanımı (MPa)	Is_{50}	0,1	2,84	1,5
Tek Eksenli Basınç D. (MPa)	σ_c	2,4	59	11

Yeraltı kazılarında genellikle kullanılan üç önemli kaya sınıflaması bulunmaktadır. Bunlar; jeolojik dayanım indeksi (GSI), tünel destekleme tasarımı için kaya kütlelerinin mühendislik sınıflaması NGI (Q) ve eklemli kaya kütlelerinin jeomekanik sınıflaması (RMR) olarak sayılabilir. Bahsedilen sınıflamalar dikkate alınarak tünel kazısında karşılaşılabilecek beklenen kaya birimleri için yapılan sınıflandırma Tablo 2.13’te verilmektedir.

Tablo 2.13: Tünel kazılarında karşılaşılabilecek beklenen kaya birimlerinin tünelcilik açısından sınıflandırılması

Formasyon	Kaya Özellikleri	Q Değeri	RMR _{temel} Değer	GSI Değeri	Kaya Sınıfı
Ceylan Fm.	Marn-Kiltaşı, Kireçtaşı ara seviyeli	0,19 – 0,29	30 - 35	30 - 35	Q: Çok zayıf kaya RMR: Zayıf kaya GSI: Zayıf kaya

Terzaghi (1950, 1977), Heuer (1974), Heuer ve Virgens (1987), Deere ve diğ. (1969) tarafından geliştirilen zemin sınıflamaları dikkate alınarak tünel kazısında karşılaşılabilecek beklenen zemin tabakaları için yapılan sınıflandırma Tablo 2.14'te verilmektedir.

Tablo 2.14: Tünel kazılarında karşılaşılabilecek beklenen zemin birimlerinin tünelcilik açısından sınıflandırılması

Kesilecek Birim (Formasyon, Üye – Litoloji)		SPT N ₃₀	SPT N ₆₀	USCS Zemin Sınıflaması	Yeraltı Suyu Durumu	Tünelcilik Açısından Sınıf
Dolgu	Yumuşak – Orta katı Kil	11	8	Ağırlıklı NP, GM – GC, daha az CL	Yeraltı su seviyesi üstünde	Hızlı dökülen
Alüvyon	Yumuşak – Orta katı Kil	11	8	% 58 CL, % 27 CH, % 15 SM ve GC- GM	Yeraltı su seviyesi altında	Akıcı, hızlı dökülen
Güngören Üyesi	Çok katı Kil	30	23	% 57 CH, % 30 CL, % 9 SM – SC, %4 ML/CL- ML- CH,GM,GC,GP	Yeraltı su seviyesi altında	Dökülen, hızlı dökülen
Çukurçeşme Üyesi	Siltli Kum, Killi Kum	40	27	% 63 SM, SC, SW- SP, SM- SC, % 32	Yeraltı su seviyesi üstünde	Hızlı dökülen
	Kumlu kil ara seviyeler			ML,CL –ML, % 5 CH	Yeraltı su seviyesi altında	Akıcı
Gürpınar Üyesi	Kil, siltli kil, Kiltaşı	38	29	% 46 CH, % 46 CL, %8 Diğerler	Yeraltı su seviyesi altında	Sağlam - dökülen
	Siltli kum, kum	45	30	SM, SP, SC	Yeraltı su seviyesi altında	Hızlı dökülen, akıcı

2.2. TÜNEL METODOLOJİSİ VE PROJE ANA KARAKTERİSTİKLERİ

2.2.1. Tünelcilik Tarihçesi

Tünelcilik faaliyetleri, dağlar ve büyük su kütleleri gibi ana doğal bariyerlerin geçilmesi ihtiyacından ya da yüksek oranda inşa edilmiş kentsel alanları yerin altından geçme ihtiyacından doğmuştur. Mühendislerin son zamanlarda en çok mesai harcadığı tünellerin temel kullanım amaçları, içme suyu temini, karayolu, demiryolu, madencilik, kanalizasyon, hidroelektrik santralleri olarak sayılabilir.

Tnelciliğin tarihsel kökeni belirsizdir. Ancak yapılan arkeolojik çalışmalar dünyanın en eski tünelinin Babilliler tarafından Fırat Nehri altında M. 2180 – 2160 yılları arasında inşaa edildiğini göstermektedir. Mısırlılar sert kayalarda testere ve matkap kullanarak, Romalılar kayaları parçalamak için ateş yakarak tünel açma faaliyetlerini sürdürmüşlerdir. Daha sonraları barut ve devamında dinamitin kullanımıyla kazı mekanizmalarında yeni metotlar geliştirilmiştir.

Yeni Avusturya Tünel Metodu (NATM) 1950'lerde püskürtme betonun sistematik olarak kullanılmaya başlanmasıyla geliştirilmiştir. O zaman püskürtme metodu olarak adlandırılan NATM terimi, 1962'de Salzburg'da 13. Jeomekanik Semineri'nde Profesör Rabcewicz'e ait bildirilerinden ortaya çıkmaktadır. NATM, tahkimatı yerleştirmeden önce zeminin deforme olmasına izin vermenin avantajını ve tünel çevresindeki yüklerin bir miktar azaltılmasını sağlamaktadır.

Tünelcilik açısından tarihteki en önemli adım Thames Nehri altında 1823 – 1843 yılları arasında açılan tneldir. Bu tünel Fransız mühendis Brunel'in patentini aldığı kalkan metodunun ilk kez burada uyguladığı tünel olarak tarihteki yerini almaktadır. Bu adımın ardından TBM'lerin gelişimi, 19. yüzyılın ilk yarısının uzun demiryolu tünellerinin gelişimiyle beraber olmuştur (Pelizza, 1999a).

Tarihte bugüne dönüldüğünde ise özellikle büyük kentlerin ulaşım problemlerinde en etkili ve kalıcı çözüm yolu olan metro tünelleri; toplu taşımacılık sistemlerinde yaygın olarak ve tüm dünyada giderek artan oranda kullanılmaktadır.

Dünyanın ilk büyük metro projeleri 19. yüzyılın sonunda ve 20. yüzyılın başlarında Paris, New York, Londra ve Moskova'da inşaa edilmeye başlandı. 1860 yılında Londra'da dünyanın ilk

yeraltı demiryolunun yapımına başlanarak 1863'te tamamlandı. İngiltere'den sonra Avrupa'daki ilk metro, Macaristan'ın başkenti Budapeşte'de 1896 yılında açıldı ve devamında dünyanın farklı bölgelerinde yeni uygulamalar gerçekleştirildi.

Ülkemizde ise ilk yeraltı raylı ulaşım sistemimiz olan Karaköy Tüneli, dünyadaki ilk metrolardan biri olarak tarihte yerini almış, İstanbul'da Galata ile Beyoğlu arasında 17 Ocak 1875'de hizmete sunulmuştur.

2.2.2. Tünel Yapım Metotları

Tünel açma metotları, bölgenin jeolojik yapısına, zeminin ve kayanın litolojik özelliklerine, jeolojik dayanımına, seçilen güzergâhın uzunluğuna, derinliğine, bulunduğu noktadaki zemin basınçlarına, mühendislik özelliklerine, kaya kütle ve zemin sınıflamasına, yerleşim yeri yoğunluğuna ve uzaklığına bağlı temel parametreler göz önüne alınarak belirlenmektedir (Yıldırım ve Gökaşan, 2013).

Genel olarak tünel ve galeri kazılarının modern yöntemlerle açılmaları çok eskiye dayanmamaktadır. Tünel açma süreçleri önceleri kazma kürek yani insan gücü yardımıyla yapılırken, bugün ilerleyen teknolojiyle beraber mekanize olarak yürütülmektedir.

Yeraltı kazılarında jeolojik ve hidrojeolojik veriler kullanılarak farklı amaçlar için kullanılan çeşitli tünel açma yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar;

El aletleri kullanarak tünel açma: 5 metreden küçük çapta, kısa ve tünel güzergâhı boyunca zeminin sıklıkla değiştiği durumlarda emniyetli ve ekonomik şekilde kazı yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Aç - kapa yöntemi: Yapılması planlanan tünelin üzerindeki zemin örtüsünün 10 metreden daha az olduğu durumlarda metro, karayolu, kanalizasyon, içme suyu vb. yapıların açılmasında bu yöntem kullanılmaktadır.

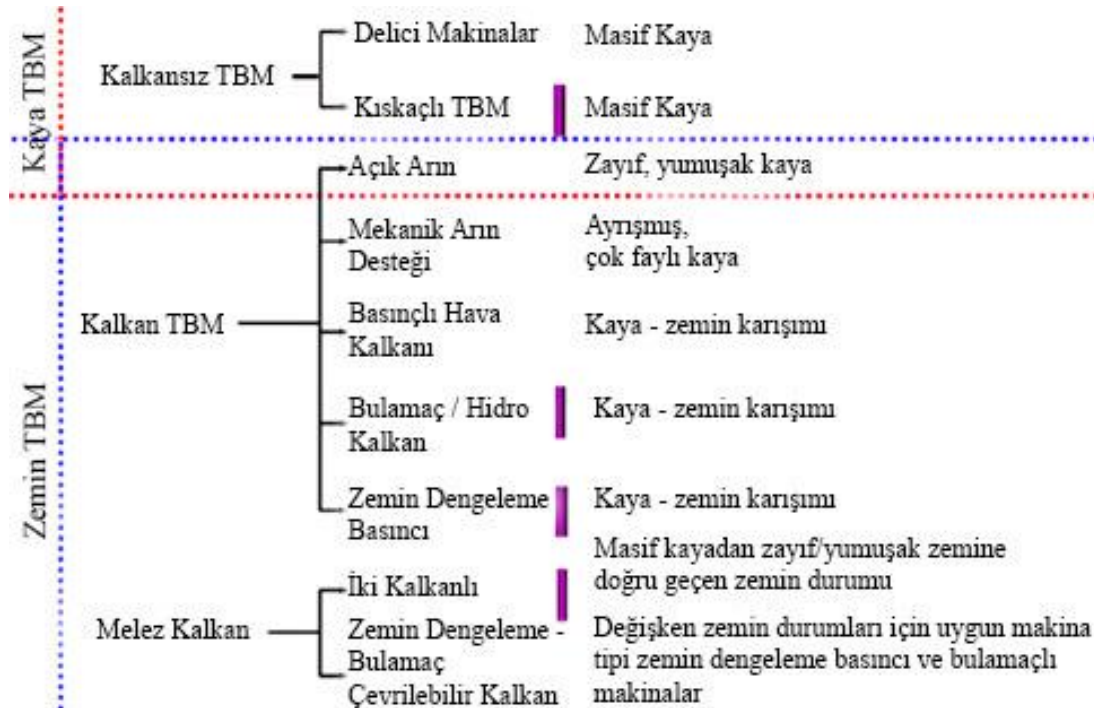
Yeni Avusturya tünel açma yöntemi: Klasik yeraltı kazı yöntemlerindendir. Hidrolik kırıcılar ve farklı kazı gereçleriyle gerçekleştirilir. Bu yöntemin temel amacı, tüneli çevreleyen zeminde kendi kendini destekleyen geniş bir zonun oluşturulması ve zeminin mukavemetini korunmasıdır. Farklı bir söylemle, bu yöntem sayesinde jeolojik ortamda iksasız veya ekonomik iksa kullanımı ile tünel kazısı yapılmaktadır. Tünelcilik faaliyetleri boyunca oluşması beklenen

deformasyonlar dolayısıyla çatlakların en aza indirilmesi için tünel açıldıktan sonra kısa zamanda bir ön kaplama yapılması gereklidir. Bunun için pasif iksa yerine esnek iksa denilen aktif iksa sisteminin seçilmesi günümüzde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamada bulonlar ve püskürtme beton kullanılarak, iksa sisteminin dayanımının iyileştirilmesi hedeflenmektedir (Vardar, 1977).

Delme ve patlatma yöntemi: Zor kaya koşullarında, hidrolik kırıcıların yetersiz kaldığı durumlarda kullanılmaktadır.

Kalkan kullanarak tünel açma yöntemi: Bu yöntem yumuşak, ince taneli ve kuru zeminlerde tercih edilmektedir. Kalkan, kazının şekline uygun biçimde çelik plakalardan üretilmektedir. Tünel aynası ile kaplaması tamamlanan bölüm arasındaki alanın gevşeyerek kazı boşluğuna dökülmesini veya akmasını önlemek adına bu yöneme sıkça başvurulmaktadır.

TBM ile tünel açma yöntemi: Günümüzde en sık rastlanan tünel açma biçimidir. Kaya ve zemin ortamlarına göre farklı özelliklere sahip makineler üretilip kazı işlemi yapılmaktadır (Şekil 2.8). TBM, inşaa edilmesi planlanan tünel boyutunda çapa sahip, dairesel silindirik yapılı, tünel yapımı için gerekli tüm teknolojiyi üzerinde barındıran tünel açma makinesidir.



Şekil 2.8: Kaya ve zeminler için tünel açma makinaları (Zhao, 2007'den Türkçeleştirilmiştir)

2.2.3. Proje Teknik Özellikleri

Ataköy - İkitelli metro hattı İstanbul'da kuzey güney aksında, Başakşehir ilçesine bağlı İkitelli ile Bakırköy ilçesine bağlı Ataköy semti arasında planlanarak inşaatına devam edilen çift tüp olarak yaklaşık 13,70 km tünel ve 12 adet istasyondan oluşan metro tüneli projesidir. Tünellerin önemli kısmı tünel açma makinası (TBM), bir kısmı ise (bazı istasyonlar ve makas yapıları) Yeni Avusturya Metodu (NATM) ile açılmaktadır.

Güzergahta inşa edilmesi planlanan metro istasyonları sırası ile Masko, Bahariye, Mehmet Akif, Halkalı Caddesi (212), Hoca Ahmet Yesevi, Mimar Sinan, Doğu Sanayi, İhlas Yuva, Çobançeşme, Yenibosna ve Ataköy şeklindedir. Kazısı TBM ile yapılacak tünellerin kesitleri tam dairesel olup, tünel çapları kazı sırasında 6,57 m ve kazı sonrası kaplanmış halde 5,70 m olacaktır. NATM yöntemi ile kazılması planlanan istasyon, makas gibi yapılar değişik çap ve kesitlere sahiptirler.

Tez kapsamında modellenecek alan kilometre artış yönüne göre Mimar Sinan İstasyonu öncesi Km:5+750'den başlayıp, Çobançeşme İstasyonu sonrasında Km:9+750 arası alanı kapsayacak olup, bu bölümde inşaatı yapılacak peron, makas ve hat tünellerine ait detaylar Tablo 2.15'de verilmektedir.

Tablo 2.15: Metro güzergâhı istasyon ve makas yapıları yapım metodolojisi

İsim	Yapım Metodolojisi	Tünel Tipi	Kesit Alanı (m ²)
Mimar Sinan İstasyonu	Aç - Kapa	-	-
Mimar Sinan - Doğu Sanayi Hat Tüneli	TBM	TBM	~34
Doğu Sanayi İstasyonu	NATM	P	65
Doğu Sanayi - İhlas Yuva Hat Tüneli	TBM	TBM	~34
Doğu Sanayi İstasyonu Makas Yapısı	NATM	T	100
İhlas Yuva İstasyonu	NATM	P	65
İhlas Yuva – Çobançeşme Hat Tüneli	TBM	TBM	~34
Çobançeşme İstasyonu	Aç - Kapa	-	-
Çobançeşme İstasyonu Makas Yapısı	Aç - Kapa	-	-

2.3. 3 BOYUTLU JEOLJİK MODELLEME METODOLOJİSİ

2.3.1. Genel Tanımlar

Mallet, 1992; Nigro ve diğ., 2003; Scheck-Wenderoth ve Lamarche, 2005; Wang ve diğ., 2008; Kessler ve diğ., 2009; Jacobsen ve diğ., 2011'in çalışmalarında bahsettiği üzere 3B Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), jeolojik saha uygulamalarında hızla kullanılabilir bir hal almaktadır. Bu gelişme risk değerlendirmesi ve tünel yönetimi konularında yeni bilgiler edinilmesine olanak sağlamıştır. Bununla birlikte, 3B CBS teknolojisini tünel mühendisliği tasarım ve yapımına uygulamak için, inşaat alanının bölgesel jeolojik modelleri veya tünelleri çevreleyen alan için yerel modellemeler gerekmektedir (Tacher ve diğ., 2006). Kazı modellemeleri (Cai, 2008) ve sonlu elemanlar analizleri (Taromi ve diğ., 2015) dahil olmak üzere kapsamlı analizler, yalnızca jeolojik modellere dayanarak yapılabilir.

Görselleştirilmiş bir 3B model, stratigrafik olarak tabakaların ve fiziksel olarak süreksizliklerin üç boyuttaki mekânsal dağılımını içermektedir. Bu mühendislerin mühendislik yapılarıyla çatlaklı bölgeler ve zayıf tabakalar gibi olumsuz jeolojik koşullar arasındaki ilişkilerin doğrudan gözleminin yapılması, analiz edilmesi için güçlü ve kullanışlı bir araç olmaktadır. Bu nedenlerle 3B jeolojik modelleme mühendislik jeolojisi ve jeoteknik mühendisliği disiplinlerindeki araştırmacılar tarafından yoğun ilgi görmektedir (Xu ve diğ., 2011).

İnşaatın ilk aşamalarında bir tünel güzergâhı boyunca olumsuz jeolojik koşulların belirlenmesi zor olduğundan, 3B jeolojik modelleme çoğu zaman yeterli sondaj ya da kesit verilerinden yoksundur. Dolayısıyla, tek bir jeolojik modelleme yöntemi tünel inşaatının taleplerini karşılamamaktadır. Çalışma kapsamında gerçek tünel inşaatı verileri ve 3B modellemeler sonucunda ayna haritaları çıkarılarak belirsizliklerin önüne geçilmeye çalışılmaktadır.

2.3.2. Modelleme Çalışmaları Üzerine Literatür Taraması

Ioannou ve diğ. (1989), çalışma etkili tünel tasarım ve destek sistemleri geliştirmek adına temel olarak tünel jeolojisinin olasılıksal tahmini için genel bir model sunmaktadır. Bu kapsamda çalışmalar Markov Zinciri ve Bayesian Modeli ile yürütülmüş, proje üzerinde çalışmanın detayları gösterilmiştir. Önerilen model mevcut tüm jeolojik bilgileri sisteme dahil ederek ve yeni gözlemlere dayanarak jeolojik tahminleri güncelleme prosedürlerini otomatikleştirmektedir. Çalışma tünelcilik faaliyetleri sırasında gözlemleri de sisteme dahil etmesi nedeniyle klasik kazı metodunda kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Che ve diğ. (2008), çalışmada geçmişten günümüze jeolojik modelleme metodolojileri, uygulama biçimleri ve kullanılabilirlikleri anlatılmaktadır. GeoMo^{3D} yazılımında GTP (Genelleştirilmiş Üçgen Prizma) metodu ile Pekin (Çin) şehir merkezindeki metro inşaatı çevresinde gerçek jeolojik model gösterilmeye çalışılmaktadır. Bu üç boyutlu tasarım sayesinde jeolojik birimlerin metro güzergahı boyunca kazı ve miktar hesaplaması yapılmaktadır ve hat ile tabakaların ilişki analizi gösterilmektedir.

Zheng ve diğ. (2010), çalışmada Chongqing (Çin)'de bulunan bir karayolu tüneline üç boyutlu dijital platform sisteminde kullanılan modelleme tabanlı yaklaşık paralel profil yönetimi çalışmasının esasları anlatılmaktadır. 2 tüp olarak planlanan tünellerden elde edilen saha verilerine göre ortak bir jeolojik model hedeflenmektedir. Burada üç boyutlu model tasarımının amacının tünel verimliliğinin ve kalitesinin artırılarak görselleştirme ve dijitalleşme sayesinde tasarımcıya canlı ve kolay analiz imkânının sağlanması olduğu belirtilmektedir.

Aldiss ve diğ. (2012), çalışmada GSI 3D yazılımı kullanılarak Farringdon (İngiltere) İstasyonu ve yakın çevresinin üç boyutlu modellenmesi yapılmıştır. Model sayesinde klasik yöntemler kullanılarak mümkün olmayan yerel jeolojik yapı hakkında bilgiler sağlanmaktadır. Bu yerel jeolojik bilgiler özellikle bölgedeki kumlu ve çakıllı birimlerin su taşıma kapasitelerini ve daha önce belirlenemeyen fayları içermektedir. Model temelde kritik alanlarda bölgesel zemin araştırmasını, tasarım detaylarının daha iyi anlaşılmasını ve riski kontrol etmeye yardımcı olmak adına yapılmaktadır. Bu kısımda risk, zemin koşullarının daha iyi anlaşılması sonucunda daha az belirsizlik oluşmasını; güvenlik, tasarım, maliyet, zaman kavramlarının daha net ifade edilmesine olanak sağlamaktadır.

Gakis (2014), Gakis ve diğ. (2014) ve Gakis ve diğ. (2016), çalışmalar Farringdon (İngiltere) metro tünel inşaatı sırasında elde edilen bilgiler ile tasarım arasındaki bilgilerin kombinasyonu sonucu geliştirilen jeoteknik risk yönetimi yaklaşımını sunmaktadır. Riskler ek saha araştırması, kapsamlı deneme delgisi stratejisi ve inşaat aşamasında elde edilen gerçek zemin modeli ile yönlendirilmiştir. Çalışma; karşılaşılan jeolojik özelliklerin dinamik modellenmesinin, karmaşık zemin koşullarında bilgi düzeyini ve anlaşılabilirliği sürekli artırarak proje riskinin nasıl azaltılabileceğini göstermektedir. Aynı zamanda İngiliz Jeoloji Enstitüsü'ne (British Geological Survey) ait 3 boyutlu jeolojik modelinin ilk kez tünel açma çalışmaları ile birlikte kullanılmak üzere geliştirilme süreci, kullanımının faydaları ve Lambeth Grubu'nun jeolojisine ilişkin öğrenilen dersler bu çalışmalarda sunulmaktadır.

Jarna ve diğ. (2015), çalışma 3 boyutlu jeolojik modelleme tekniklerini ve bu çalışmalarda kullanılan argümanların Norveç Jeoloji Araştırma Enstitüsü'nde anakaya, jeofizik, kentsel ve yeraltı suyu çalışmalarında kullanımını anlatmaktadır. Çalışmada sunulan çok sayıda jeolojik olgunun, verinin, yöntemin ve ihtiyaca göre yazılım kullanımının üç boyutlu görseller sayesinde daha iyi anlaşıldığı ve endüstri – yerel yönetimler arasında daha iyi iletişim sağladığı belirtilmektedir.

Che ve diğ. (2015), çalışma Çin'de kentleşmenin hızla artmasıyla jeolojik problemlerin giderek arttığını ve 3B jeolojik modeller sayesinde kentsel kaynak analizi, yeraltı mühendislik planlaması, afet önleme – azaltma için karar altyapısı oluşturulduğunu anlatmaktadır. Çin'de bahsedilen çalışmaya kadar; sondaj verilerine dayanan mevcut modelleme yöntemlerinin eksiklerinden yola çıkılarak faylar gibi yapısal unsurlar dahil olmak üzere üç boyutlu jeolojik yapıları modelleme adına yeni bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntem daha önce önerilen GTP (Genelleştirilmiş Üçgen Prizma) metodunu temel olarak kabul ederken fay gibi jeolojik bulguları modele başta işleyerek daha sonra elle yapılan düzeltmelerden kaçınılmaktadır. Tüm jeolojik modeller GeoMo^{3D} yazılımı kullanılarak yapılmaktadır.

Wang ve diğ. (2015), çalışmada modelleme üzerinde yalnızca niteliksel bilginin yanısıra jeolojik yapıların, tabaka litolojilerinin bileşenlerinin ve derece bilgilerinin de yer aldığına değinilmektedir. Bu çalışmaları yaparken geleneksel çalışmaların üstüne ek yöntemler önerilerek görsel bilgilerin yanında ek bilgilere de yer verilmektedir. Çalışmada GTP metodu kullanılarak üç boyutlu model çalışması yapılmış, ardından B-Rep sistemi ile düzenlemeler gerçekleştirilmiştir. Birleştirilmiş modelleme yöntemi 3 boyutlu CBS ile yer bilim analizleri arasında bağlantı oluşturularak pratikte mühendislik kararları için temel ve teknik destek sağlanmaktadır.

Skipper ve diğ. (2015), çalışma Londra'da yapılacak olan metro tünelinin yaklaşık 10 km'lik kısmında bulunan ve Lambeth Grubu (Lambeth Group) olarak tanımlanan sedimanter birimin temel jeolojik modelini özetlemektedir. Belirtilen birim karmaşık bir yapıya sahip olması nedeniyle birçok riski beraberinde getirmektedir. Mevcut ayrıntılı zemin bilgileri dikkate alınarak proje maliyeti ve program optimizasyonunun uygulanabileceği alanlara vurgu yapılmaktadır. 15-20 metre kalınlığındaki birim deniz yükselmesi alçalması sonucu oluşmuştur. Bu bakımdan tez çalışmasındaki birimlere benzer bir yapı sunmaktadır.

Sojoudi (2015), çalışmada mevcut tünel inşaatı sonucu gelişen deformasyonlar ile Plaxis 8.5 programı kullanılarak çıkan oturma analizi sonuçları karşılaştırılmış ve değerlerin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Çalışmada oturma hesabı yapılırken tünel çapı, derinliği, yeraltı su seviyesi değişimi, tünel seviyesi altındaki zeminin kalınlığı vb. tanımlar değiştirilerek farklı oturma sonuçlarının izlenmesi sağlanmaktadır.

Méndez ve Dickmann (2016), çalışma jeolojik, hidrojeolojik ve jeoteknik bilgilerin yeraltında devam eden karakterizasyonunun belirlenmesi adına yürütülmüştür. Bu kapsamda Tünel Sismik Tahmin (Tunnel Seismic Prediction), sismik yansıma ilkesine dayanan yöntemle örnek projede kaya kütlesi durumunda değişiklikler tespit edilmiş, elde edilen sonuçların kazılan kısımdaki jeoloji ve yatay delgi uygulamaları verileriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Živec ve Žibert (2016), çalışma Leapfrog Geo 3D yazılımı kullanılarak Karavanke (Slovenya) Tünelinin mevcut ve yeni verilerle jeolojik sayısallaştırmasını anlatmaktadır. Tünel, Avusturya – Slovenya arasındaki sınırda bulunan dağları geçmektedir. 1980’li yılların sonunda inşaa edilen ilk tek tüp tünelin ardından günümüzde artan araç sayısına ve güvenliğe bağlı olarak mevcut tünelin 70 m. doğusuna yeni tünelin yapımı için karar alınmıştır. Bahsi geçen tünel güzergâhı oldukça karmaşık jeolojik yapıya sahiptir. Tünel çalışmaları boyunca günlük ayna logu ve ölçme – izleme faaliyetlerinin yürütülmesi, 3 boyutlu jeolojik modelin yapılması ve gelecekteki analizler için taban oluşturmaktadır. Ek tünel için yapılan yüzey ve yeraltı çalışmaları ile güncel çalışmalar Leapfrog Geo 3D yazılımı sayesinde dijitalleştirilmektedir. Bölgede yer alan ana fay sistemleri modelleme üzerine gösterilerek açılacak tünelin fayların hangi noktasına denk geldiği, genel ortam koşulları ve kaya kütle sınıflamalar gösterilerek tasarımcıya kazı – destek için yol açılmaktadır.

Schweizer ve diğ. (2017), çalışma Shannon (1948)’in olasılık teorisinde belirtilen bilgi entropisi temeline dayanan Wellmann ve Regenauer-Lieb (2012)’in çalışmasını geliştirerek farklı jeolojik veri kategorilerinden gelen ardışık verilerin toplanmasının mevcut modele; model belirsizliği ve model geometrisi üzerindeki etkilerini göstermektedir. Bu nedenle Staufen (Almanya) çalışma bölgesinde farklı üç boyutlu jeolojik modellemeler yapılarak ardışık modellerde belirsizliklerin nicel değerlendirmesi için bilgi entropisi ve model farklılığı kullanan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Burada veri girişlerinin model kalitesi, yeraltı ve model geometrisinin genel yapısal anlayışı üzerindeki etkisini tanımlamak için yeni bir iş akışı ve yöntemleri sunulmaktadır.

2.4. RİSK ANALİZ PROSEDÜRÜ VE METODOLOJİSİ

2.4.1. Genel Tanımlar

Uluslararası risk analizi, değerlendirme ve yönetimi literatüründe çeşitli risk tanımları ve bunlarla ilgili terimler yer almaktadır. Günümüzde risk ve risk süreci ile ilgili önemli çalışmalar yapılmasına rağmen, konu ile ilişkili tanımlamalarda ortak dil birliği sağlanamamaktadır. Riskle alakalı süreçlerin tanımının yapılabilmesi için önce riskin tanımlanması; riskin tanımının yapılabilmesi için ise zarar ve tehlike kavramlarının iyi ifade edilmesi gerekmektedir.

Genellikle tehlike ve risk kavramları aynı anlamda kullanılmaktadır. Coburn ve Spence (1992), Okuyama ve Chang (2004) riski, tehlikenin neden olacağı sonuçlar ile tehlikenin meydana gelme olasılığının bir bileşkesi olarak tanımlamaktadırlar.

6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu kapsamında İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği'ne bakıldığında tehlike; işyerinde var olan veya dışarıdan gelebilecek, işyerini ve / veya çalışanı etkileyebilecek hasar veya zarar verme potansiyeli olarak tanımlanmaktadır. Risk; tehlike kaynaklı kayıp, yaralanma ya da diğer zararlı sonuçların meydana gelme olasılığı şeklinde tarif edilmektedir.

Özkılıç (2014) bir işletmede risk değerlendirme yöntemlerinin seçim aşamasının en önemli kısım olduğunu ve bu yapılacak seçimin yanlış olması halinde manevi ve maddi kayıpların yaşanmasının muhtemel olduğunu belirtmektedir.

Zhou ve Zhang (2011) verilecek her kararda, sezgi, kişisel yargı ve deneyimin etkisinin her zaman olduğunu ve risk değerlendirme süreçlerini kullanırken de kişisel bilgi, sezgi, yargı ve deneyimlerin birleştirilmesi gerektiğini belirtmektedirler. Mühendislik uygulamalarında rutin olarak gerçekleştirilen risk analizlerinin çoğu niteliksel veya en iyi ihtimalle yarı niceliksel metodolojilere dayanmaktadır.

Riskler genellikle olasılıkları ve sonuçları birleştirilerek analiz edilir ve değerlendirilir. Risk analizleri kalitatif (niteliksel), yarı kantitatif (niceliksel) veya kantitatif (niceliksel) olabilir. Jeoteknik mühendisliği ve tünelcilik faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılan ve büyük yeraltı inşaat projelerinde kullanım için uygun olabilecek bazı risk analizi ve değerlendirme araçlarına genel bakış aşağıda verilmektedir.

Kalitatif değerlendirme; “düşük”, “orta” ve “yüksek” gibi önem seviyeleri belirterek risklerin sonuçlarının, olasılıklarının ve düzeylerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Burada olasılıkları ve sonuçları bir araya getiren yöntem, kalitatif kriterler yardımıyla kesin risk seviyesinin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Burada amaç projeyi tehdit eden tehlikeleri tanımlamayı, sonuçta ortaya çıkan riskleri değerlendirmeyi ve risk azaltılması stratejisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Sözleşmelerin hazırlanması, projenin yönetimi ve paydaşların veya çalışanları ile temsilcileri arasında sorumlulukların tahsis edilmesi için bir temel teşkil etmektedir.

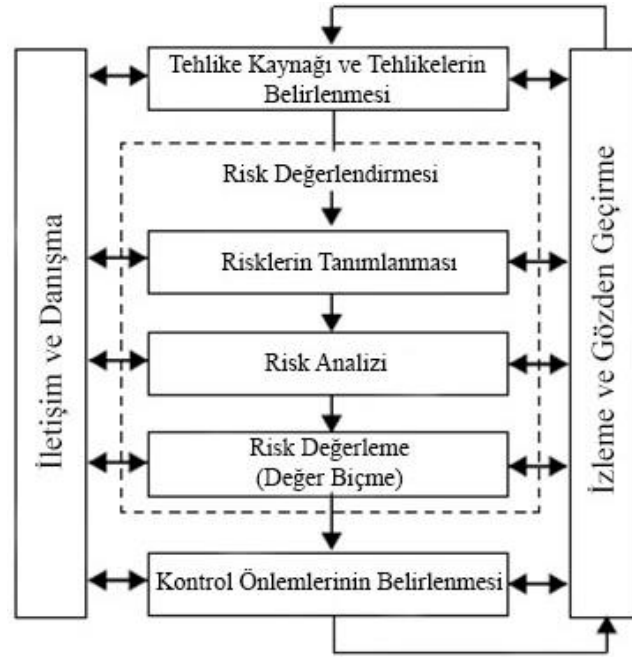
$$\text{Risk} = \text{Oluşma Olasılığı} \times \text{Oluşan Tehlikenin Yaratacağı Sonuç}$$

Riskleri değerlendirmek için, bir tehlikenin ortaya çıkma olasılığını ve sözlü biçimde beklenen sonuçları tanımlayan değişken sınıflandırma ve derecelendirme sistemleri kullanılır. Bu tür derecelendirme sistemlerinin örnekleri Eskesen ve diğ. (2004), Tichý (2006), Edgerton (2008), Shahriar ve diğ. (2008), Hong ve diğ. (2009) ve Aliahmadi ve diğ. (2011) olarak gösterilebilir. Olasılık ve sonuçların derecelendirilmesi, riski değerlendirmek için bir risk endeksinde veya bir risk matrisi ile birleştirilir. Risk matrisleri, olasılık ve sonuç derecelendirmesinin her bir kombinasyonuna riskin sözlü olarak sınıflandırılmasını sağlamaktadır.

Kantitatif değerlendirme, riskin sayısal yöntemlere başvurarak hesaplanmasıdır. Kantitatif risk analizinde tehditin etkisi ve tehditin olma ihtimali gibi unsurlara sayısal değerler verilmektedir. Bu değerler mantıksal ve matematiksel metotlar kullanılarak risk değeri elde edilmektedir.

Yarı kantitatif değerlendirme; olasılıklar ve sonuçlar için sayısal derecelendirme ölçeklerinden faydalanmaktadır. Risk seviyesini belirlemek için formül kullanarak bunları bir araya getirir. Ölçekler logaritmik ya da doğrusal olabilir veya başka türden bir ilişki içerebilir. Sistemde tercih edilen formüller de değişiklik gösterebilir.

IEC ISO 31010: 2011 uluslararası standartında, risk değerlendirme ve yönetim süreci içerisindeki adımlardan, risk değerlendirme çalışmalarının her aşamasında yöntemlerin ne şekilde uygulanacağını gösteren değerlendirmeler yapılmaktadır. Bu adımlar temelde tehlike kaynaklarının belirlenmesi ile başlarken risk değerlendirme aşaması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi - izlenmesi olarak devam etmektedir. Örnek iş akış planı Şekil 2.9’da gösterilmektedir.



Şekil 2.9: Risk değerlendirme iş akış planı

Risk analizi türlerine bakıldığında ise farklı amaçlara hizmet eden metodolojilerin geliştirildiği ve dünyada 150’den fazla yöntemin kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerden en sık kullanılanları aşağıda tanımlanırken, risk değerlendirme için kullanılan araçların uygulanabilirliği Tablo 2.16’da verilmektedir.

Ön Tehlike Analizi (PHA); tasarım aşamasında risk değerlendirme yapılmamış bir tesiste yapılması gereken ilk değerlendirme yöntemidir. Bu yöntemde riskler, sistematik olarak incelenmekte ve belgelenecek değerlendirilmektedir. Tespit edilen tehlike kaynakları için diğer risk değerlendirme yöntemlerinin kullanılması ve analizin çeşitlendirilmesine karar verilir (Özkılıç, 2014).

Olursa Ne Olur? (SWIFT Tekniği); analizi yapan ekip, bir sistemin, kuruluşun veya prosedürün normal davranış ve işletim sapmalarından nasıl etkileneceğini soruşturmak için bu yöntemi tercih etmektedir. Bu yöntemde ipuçlarıyla birlikte klasik olarak “Olursa Ne Olur?” gibi soru cümleleri kullanılmaktadır. Aksaklıkların muhtemel sonuçları tespit edilirken, ilgili kişiler tarafından her bir durum için tavsiyelerde bulunmaktadır (Özkılıç, 2014).

Birincil Risk Analizi (PRA); Monte Carlo ve diğer simülasyon türlerini içeren bu analiz yöntemi jeoteknik mühendisliğinde belki de en yaygın kullanılan nicel risk analizi yöntemidir (Baecher ve Christian, 2003; Fenton ve Griffiths, 2008).

Risk Degerlendirme Karar Matrisi; risk derecelendirmesi veya risk düzeyinin belirlenmesi için yarı niceliksel veya niteliksel tanımların olasılık / sonuç derecelendirmelerinin bir araya getirilme yöntemidir. Oluşma olasılığı ve etkinin ciddiyeti sıralamasının belirlenmesinden sonra, risk; olasılık - etki matrisi olarak adlandırılan bir risk matrisi ile ilişkilendirilir. Önceden belirlenmiş bu risk matrisinde sırasıyla kabul edilemez, kabul edilebilir veya ihmal edilebilir veya bazen kabul edilemez, ciddi ve kabul edilebilir olarak sınıflandırılan risk aralıkları vardır. Meydana gelme olasılığı ve etkinin ciddiyeti çarpıldıktan sonra ortaya çıkan risk sıralaması, risk matrisi ile ilgilidir, böylece risk analistleri veya risk değerlendiricileri, belirlenmiş tehlikelerin hangi risk sıralaması altında olduğunu görebilirler. Risk matrisinin bir özelliği de, yüksek olasılık riskinin, ancak düşük etki şiddetinin risk matrisine göre nasıl bir risk olarak aynı derecede önemli olarak değerlendirilebileceğini göstermesidir (Avestedt, 2012).

Tehlike ve İşletilebilme Çalışması Metodolojisi (HAZOP); mevcut veya planlı ürünün, prosedürün, sürecin veya sistemin sistematik ve yapısal olarak incelenmesidir. Başta kişiler olmak üzere çevreye, ekipmana veya organizasyon odaklı hedeflere ilişkin risklerin belirlenmesini hedefleyen bir metottur.

Hata Ağacı Analizi (FTA); şematik biçimde, büyük bir tehlikeye veya olaya neden olabilecek hata ve başarısızlık kombinasyonlarını tanımlar, gösterir ve temsil eder. Meydana gelen olayların olasılığını ölçmekle veya ölçmeksizin kullanılabilir.

Olay Ağacı Analizi (ETA); büyük bir olaya neden olma potansiyeline sahip olan gerçekçi olay senaryolarının ve olayların zamanla ilişkilerinin, bağımlılıklarının ve potansiyel artışının sistematik bir haritasını sağlar. Ayrıca, bileşen olaylarının ve tırmandırılan olayın meydana gelme ihtimaline ilişkin sayısal tahminler sağlar.

Neden - Sonuç veya Neden - Etki Analizi; olay ağacı ve hata ağacı analizinin bir birleşimidir. Sonuç, bir olayın sebepleri ile sonuçları veya sonuçları arasındaki ilişkileri gösteren bir şemadır. Bu teknik en çok başarısızlık mantığı basit olduğunda kullanılır, çünkü hata ile olay ağaçlarını birleştiren bir diyagram oldukça karmaşık olabilir.

Karar Ağacı Analizi; mevcut bilgilere dayanarak verilen kararların veya seçimlerin sonuçlarını analiz etmek veya değerlendirmek için kullanılan yapısal bir formattır. Yeraltı inşaatında alınan birçok karar önemli belirsizlik içermektedir.

Çok Kriterli Karar Analizi, her biri stokastik değişken olarak ele alınan istatistiksel olarak bağımsız çoklu riskler veya tehlikeler içeren durumlar için yaklaşık bir hesaplama yöntemidir. Belirsizlikle baş etmek için bir yöntem sunar ve tünel açma, örneğin çalışma gibi maliyetleri tahmin etmede kullanılabilir (Eskesen ve diğ., 2004).

Papyon Analizi; bir dizi kontrolün, risk oluşturabilecek belirli olayların ortaya çıkma olasılığının nasıl ortadan kaldırabileceğini, en aza indirilebileceğini veya bir olayın meydana geldiğinde sonuçlarını nasıl azaltabileceğini göstermektedir.

Markov Analizi; mevcut duruma bağlı sistemin gelecekte nasıl yanıt verebileceğini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Çoklu durumda görülebilecek sonuçların, bir blok diyagram analizi ile güvenilir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır (Özkılıç, 2014).

Monte Carlo Simülasyonu; birçok analiz yönteminde, analitik teknikler kullanılarak belirsizlik etkilerinin hesaplanması hedeflenirken, bu süreç oldukça karmaşık yapıya sahip olmaktadır. Bu yöntem, istenmeyen sonuçların muhtemel N çıktılarına ulaşmak adına girdi örnekleme ile N sayısında hesaplamalar yaparak ve girdi değerlerini rastlantısal değişkenler gibi düşünerek değerlendirebilmektedir (Özkılıç, 2014).

Bayesian Analizi, bir sistemin bileşenleri arasındaki sebep-sonuç ilişkilerini gösteren olasılık-temelli grafiksel ve matematiksel araçlardır. Değişkenler arasında koşullu bağımlılığa izin verir, belirsizlik altında bir muhakeme yolu sağlar ve daha fazla bilgi mevcut olduğunda olasılık tablolarının güncellenmesine izin verir. Uygulamada, genellikle bazı karar analizleriyle birlikte kullanılırlar.

F-N Eğrileri; tespit edilen bir grup için belirli seviyede zarar veren tehlikelerin olasılığının grafiksel gösteriş biçimidir. F-N eğrileri riskleri karşılaştırmak, sistem tasarımı veya mevcut sistemlerin yönetimi adına kullanılabilir.

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP); karar vermede ve risk değerlendirmesinde hatalı tanımlanmış veya yanlış yapılandırılmış sorunları ele almak için kullanılır. Çok kriterli karar vermede matematiksel bir tekniktir ve karar alternatiflerinin çiftler arası karşılaştırmalarla tercihlere göre sıralanmasını sağlar (Saaty, 1980; Taroun ve Yang, 2011). Bu teknik, Çin inşaat endüstrisinde, bazen diğer yaklaşımlarla birlikte nispeten yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhou ve diğ., 2006; Deng ve Zhou, 2010).

Tablo 2.16: Risk değerlendirme metodolojileri ve süreçleri (Özkılıç, 2014'ten değiştirilerek)

METODOLOJİ	TANIM	Risk Değerlendirme Süreci				
		Risk Analizi				Risk Değerleme
		Risk Tanımlama	Sonuç	Olasılık	Risk Düzeyi	
Ön Tehlike Analizi (Preliminary Hazard Analysis PHA)	Bir işletmede özellikle tasarım aşamasında ya da hiç risk değerlendirme çalışması yapılmamış bir tesiste ilk yapılacak risk değerlendirme metodolojisidir.	++	-	-	-	-
Olursa Ne Olur? (What If? / SWIFT)	Ne-Eğer” ya da “Olursa Ne Olur?” türünden soru cümleleri kullanır. Değişikliklerin sonuçlarını ve bu nedenle oluşan riskleri incelemek için kullanılır.	++	++	++	++	++
Çeklist Kullanılarak Birincil Risk Analizi (Preliminary Risk Analysis- PRA Using Checklists)	Sistemin veya prosesin potansiyel tehlikeli parçalarını tespit ederek değer biçmek ve tespit edilen herbir potansiyel tehlike için az ya da çok kaza ihtimallerini belirlemektir.	++	-	-	-	-
Birincil Risk Analizi (Preliminary Risk Analysis (PRA)		++	-	-	-	-
Risk Değerlendirme Karar Matrisi (Risk Assessment Decision Matrix)	Risk düzeyinin belirlenmesi veya risk derecelendirmesi için niteliksel veya yarı niceliksel sonuç/olasılık derecelendirmelerinin bir araya getirilme yöntemidir.	++	++	++	++	+
Tehlike ve Isletilebilme Çalışması (Hazard and Operability Studies - HAZOP)	Zararlı sonuçları olabilecek sapmaların araştırmasının yapılmasıdır.	++	++	+	+	+
Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis - FTA)	İstenmeyen belirli bir duruma katkı sağlayan faktörleri analiz etmek ve tanımlamak için kullanılan bir tekniktir	+	-	++	+	+
Olay Ağacı Analizi (Event Tree Analysis - ETA)	Hata sonuçları önemli olan ve bu sonuçların hafifletilmesi istenilen çeşitli sistemlerin işleyişi/ işlemeyişine göre hazırlanan, basit olasılık hesaplamalarına yönelik grafiksel bir tekniktir.	+	++	+	+	-

Tablo 2.16 (devam): Risk değerlendirme metodolojileri ve süreçleri (Özkılıç, 2014'ten değiştirilerek)

METODOLOJİ	TANIM	Risk Değerlendirme Süreci				
		Risk Analizi				Risk Değerleme
		Risk Tanımlama	Sonuç	Olasılık	Risk Düzeyi	
Neden - Sonuç Analizi (Cause and Consequence Analysis)	Tetikleyici olayın sonuçlarını hafifletmek amacı ile tasarlanan sistemlerin hatalarını ya da oluşabilecek koşulları gösteren EVET/HAYIR mantık geçitleri aracılığıyla yapılan bir analizden ibarettir. Koşulların ve hataların nedenleri, hata ağaçları aracılığıyla analiz edilir.	+	++	++	+	+
Neden - Etki Analizi (Cause and Effect Analysis)	İstenmeyen bir olay ya da problemin muhtemel nedenlerini tanımlayan yapılandırılmış bir yöntemdir. Neden-Etki analizi, kök neden analizi gerçekleştirmede bir yöntem olarak kullanılır	++	++	-	-	-
Karar Seması / Karar Ağacı Analizi (Decision Tree Analysis)	Belirsiz sonuçları dikkate alan ve sonuçları peş peşe gelecek şekilde sıralayarak bu sonuçlar için karar alternatiflerini geliştirmek için kullanılan bir analiz türüdür.	-	++	++	+	+
Çok Kriterli Karar Analizi (Multi Criteria Decision Analysis -MCDA)	Bir dizi seçeneğin toplam değerliliğini nesnel ve şeffaf bir biçimde değerlendirmek için belirli kriterler kullanmaktır. Genel hatlarıyla hedef, mevcut seçenekler arasında yöntem tercihi yapmaktır. Analiz, her bir seçenek için toplam bir puan belirlemek adına derecelendirilen ve bir araya getirilen, seçenek ve kriterlerden oluşmuş bir matrisin geliştirilmesini içerir.	+	++	+	++	+
Papyon Analizi (Bow-Tie)	Sebeplerden sonuçlara risk yollarını tanımlama ve analiz etmeye yönelik basit bir şematik analizdir	-	+	++	++	+

Tablo 2.16 (devam): Risk değerlendirme metodolojileri ve süreçleri (Özkılıç, 2014'ten değiştirilerek)

METODOLOJİ	TANIM	Risk Değerlendirme Süreci				
		Risk Analizi				Risk Değerleme
		Risk Tanımlama	Sonuç	Olasılık	Risk Düzeyi	
Markov Analizi (Markov Analysis)	Yalnızca mevcut duruma bağlı bir sistemin gelecek durumlarda nasıl cevap verebileceğini analiz etmek maksadı ile kullanılır. Birden fazla durumda var olabilecek sonuçların, güvenilir bir blok diyagram analizi kullanılarak analiz edilmesini sağlar.	+	++	-	-	-
Monte Carlo Analizi (Monte-Carlo Analysis)	Belirsizliğin çok çeşitli durumlardaki sistemler üzerindeki etkisini değerlendirme olanağını sağlar. Genellikle, muhtemel sonuç çeşitliliğini, masraf, süre, üretilen iş, talep ve benzer ölçümler gibi bir sistemin kantitatif ölçümlerine yönelik bu çeşitlilikteki değerlerin göreceli sıklığını değerlendirmek için kullanılır.	-	-	-	-	++
Bayesian Analizi (Bayesian Analysis),	Değişkenler kümesini ve olasılıksal bağlantılarını göstermek için bir grafik modeli kullanmaktadır. Ağ, bir rastlantısal değişkeni ve bir üst düğümü alt düğüme bağlayan okları temsil eden düğümlerin oluşumudur.	-	++	-	-	++
F-N Egrileri (F-N Curves)	Belirtilen bir grup için belirli bir seviyede zarar veren olayların olasılığının grafiksel bir gösterimidir.	+	++	++	+	++
Analitik Hiyerarşi Prosesi	Alternatif tercihlere göre karar vermeyi sağlayan analiz biçimidir.	++	+	-	+	+

2.4.2. Tünellerde Jeolojik – Jeoteknik Risk Esasları

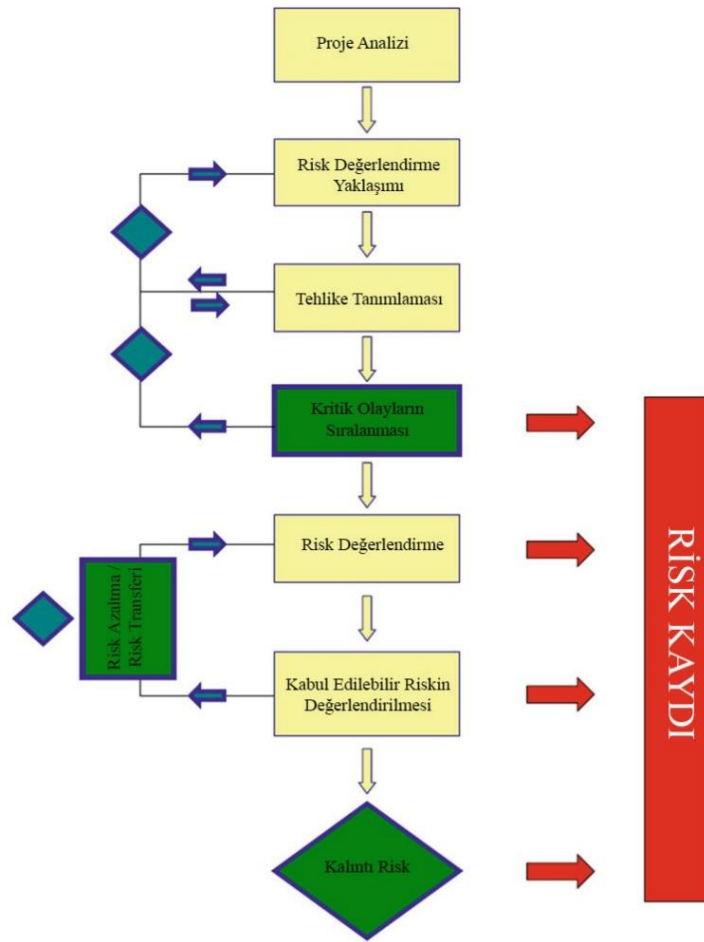
Tünellerin inşa edilmesinde karmaşık problemler göz önüne alındığında, bu projelerin her aşamasında risklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu riskleri, daha sonra projenin zamanı ve maliyetini kontrol edebilecek hale getirmek için iş ortaklarıyla paylaşılması gerekmektedir.

Risk analizi, projenin uygulanmasıyla ilgili potansiyel tehlikelerin tanımlarını ve risklerin sonuçlarını içermelidir. Planlama aşamasında önceki verilerin değerlendirilmesi, jeoteknik incelemeler ve değerlendirmeler, saha durumu ve mümkünse yüzeydeki olumsuz zemin koşullarından ve hassas yapılardan kaçınan tünel düzenlemelerinin seçimi ile başlamaktadır. Bu temellere dayanarak işveren ve planlama mühendisleri kazı yöntemlerini seçmekte ve risk toleranslarını belirleyebilmektedir.

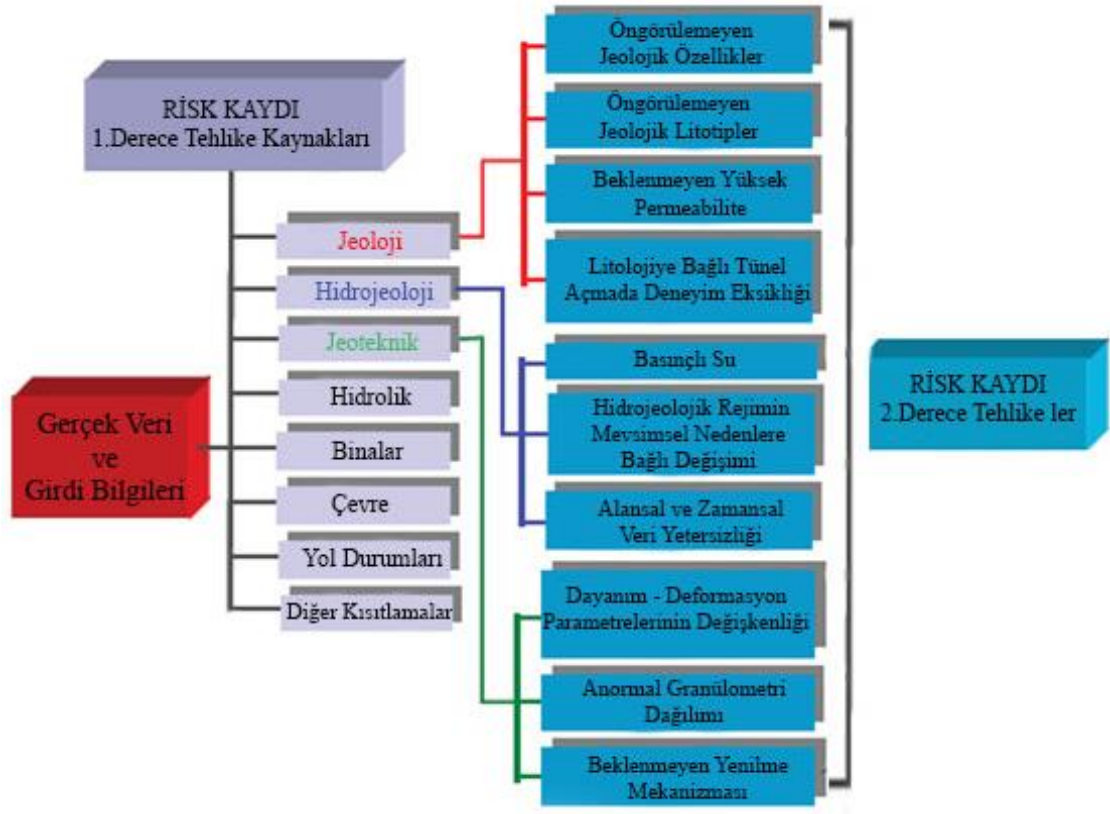
Risk değerlendirme ve yönetim teknikleri yeraltı mühendislik projelerinde nitel veya yarı nicel bir yaklaşımla uygulanmaktadır. Genel olarak zemin ve kaya mühendisliğinde proje ile ilgili potansiyel tehlikeleri tanımlayan bir risk kaydı sistemi üzerinde tehlikelerin her birinin olasılığı ve sonuçları; planlanan veya yapılması gereken kontrol, gözlem, risk azaltma önlemleri, bu kontrol önlemlerinin uygulanmasının ardından mevcut kalan riskler ve riskin kimler tarafından üstlenildiği bu sistemlerde tanımlanmaktadır. Bu çalışmalar, resmi risk kayıt defterlerinin bir parçası olarak proje dökümanları arasında yer almalıdır (Goodfellow ve diğ., 2014). Bu sayede işveren tarafından yükleniciyi neler beklediğinin öngörülmesi sağlanabilir.

Tünellerde modelleme yetersizlikleri, zemin davranışının değişkenliği, modellemede kullanılan sistemlerin yetersizliği - yanlış kullanımı ve yapımsal belirsizlikler proje süresinin uzamasına, beraberinde zamansal ve parasal kayıplara neden olabilecek faktörler olarak gösterilebilir. Tünelcilikte istenmeyen durumları engellemek adına yeterli tecrübeye sahip mühendislik bilgisi ana çözüm yolu olsa da, sistematik biçimde ayrılarak tanımlanmış ve uygulanmaya hazır risk analizi, problemlerin gerçekleşmeden çözümlenmesini ya da ilgili kişilere bir uyarı anlamı taşıması yönünden oldukça önemlidir (Dayanç, 2011).

Risk değerlendirme uygulama aşamaları temelde pratik ve teorik bilgiler ile tecrübeye dayanmakta, tünelcilik sektörü de dahil olmak üzere farklı sektörlerde uygulanmaktadır. İngiliz Tünelcilik Derneği (BTS) tünel çalışmalarındaki bu riskleri tanımlama ve risk azaltma ile ilgili başladığı çalışmalarını 2003 senesinde bir kılavuz yayımlayarak tamamlamıştır. Bu kapsamda risk değerlendirme çalışmalarında izlenecek akış planı Şekil 2.10'de gösterilmektedir.



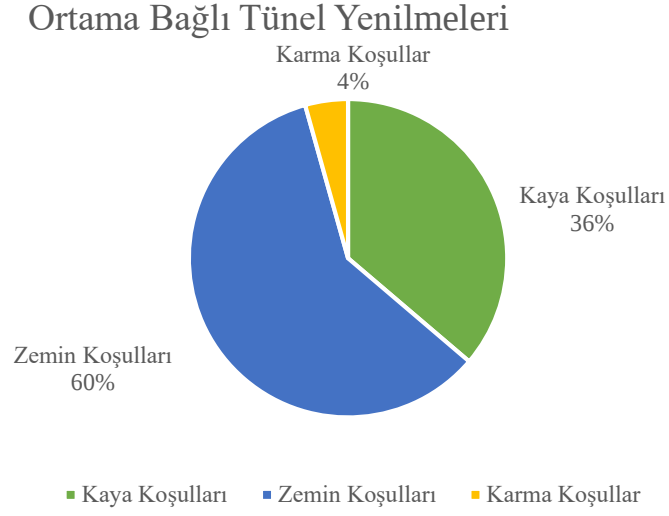
Şekil 2.10: Risk analizi süreci akış diyagramı (Verzani, 2014'ten Türkçeleştirilmiştir)



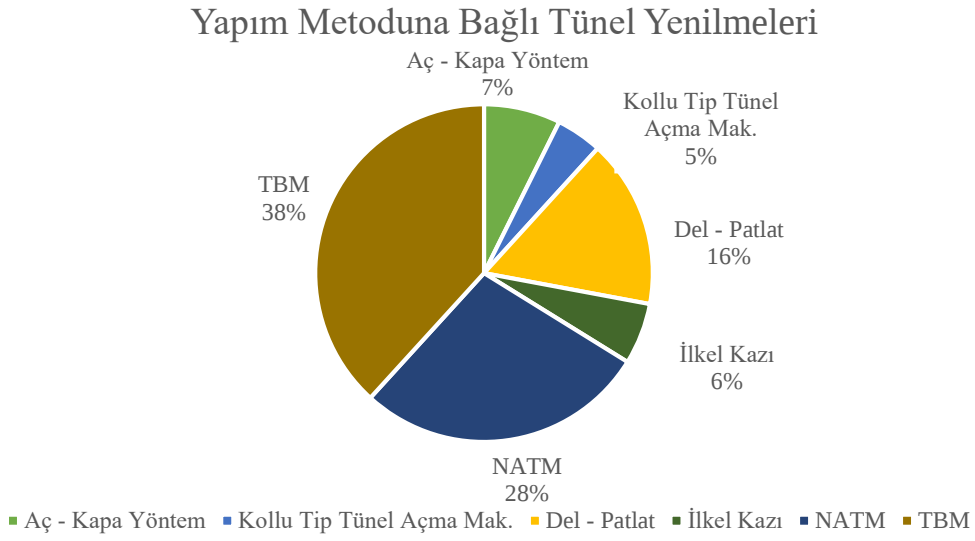
Şekil 2.11: Birinci ve ikinci derece tehlike kaynakları (Guglielmetti ve diğ., 2007'den Türkçeleştirilmiştir)

Tünel projeleriyle ilişkili ana risk kaynakları jeolojik ve jeoteknik parametrelerle ilgilidir (Guglielmetti ve diğ., 2007). Bu parametreler doğrudan kazı yönteminin belirlenmesi, kullanılacaksa TBM tipinin seçimini, işletme parametrelerini ve beklenen performansı doğrudan etkilemektedir.

Clayton (2001b) 'a göre, İngiliz tünel endüstrisindeki gecikmelerin ve maliyet aşımalarının büyük çoğunluğu zeminle ilgili olaylardan kaynaklanmaktadır. Konstantis (2016)'e göre bahsedilen gecikme ve maliyetlerle ilgili 70 örnek çalışma sonucunda elde edilen bilgiler Clayton (2001b)'ın öngörüsünü desteklemektedir. Bu kapsamda jeolojik ortama ve yapım metodolojisine (Şekil 2.12 ve Şekil 2.13) bağlı tünel yenilme grafikleri aşağıda verilmektedir.



Şekil 2.12: Ortama bağlı tünel yenilmeleri (Konstantis, 2016)

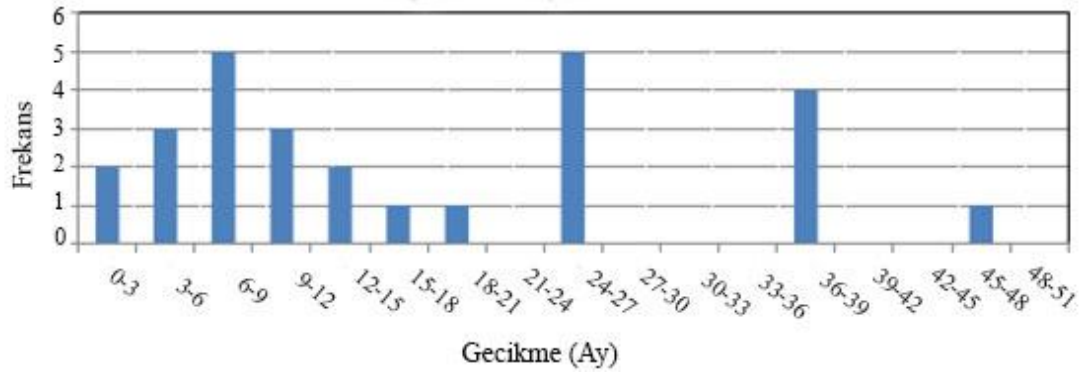


Şekil 2.13: Yapım metoduna bağlı tünel yenilmeleri (Konstantis, 2016)

Öngörülemeyen jeoteknik koşullar nedeniyle tasarımdaki küçük değişiklikler toplam maliyete en az %5 oranında etki etmekte ve bu oran kolayca % 30-50 seviyelerine ulaşabilmektedir. Tyrell ve diğ., 1983). Zamansal aşımara bakıldığında ise 18 aya kadar gecikmelerin çok sık tekrarlandığı görülmektedir (Şekil 2.14 ve Şekil 2.15).



Şekil 2.14: Tünelcilikte mali kayıp ve frekans değerleri (Konstantis, 2016)



Şekil 2.15: Tünelcilikte gecikme ve frekans değerleri (Konstantis, 2016)

Tünel projelerinde jeolojik - jeoteknik risk değerlendirmesi, olası jeolojik tehlikeleri tanımlamalı, bu tehlikelerin muhtemel sonuçlarını ve olasılığını değerlendirmelidir. Yüksek sonuçları içeren düşük olasılık tehlikesi, düşük sonuçları olan yüksek olasılık tehlikesi kadar önemli bir risk olabilir. Böyle durumlarda riske nasıl müdahale edileceği, ek çalışmaların yapılıp yapılmayacağına karar verilmesi oldukça önem taşımaktadır.

Sonuç olarak tanımlanan riskler tipik olarak, tünel inşaatı sırasında çeşitli zorluklar yaratabilen, genellikle inşaat gecikmeleri ve buna bağlı maliyet etkileriyle sonuçlanabilecek olumsuz koşulların tamamını içermelidir. Sadece böyle bir risk değerlendirmesi ve risk yönetimi projenin başarıyla sonuçlandırılmasını sağlamaktadır.

2.4.3. Jeolojik – Jeoteknik Risk Çalışmaları Üzerine Literatür Taraması

BTS (2003), İngiliz Tünelcilik Derneği (British Tunneling Society) tarafından mevcut yeraltı yapılarının yenilenmesi dahil olmak üzere tüm yeraltı yapılarının tasarımı ve inşaatı ile ilgili risklerin asgari düzeye indirgenmesi ve yönetilmesi adına en iyi uygulamanın seçimine yöneliktir. Proje başından sonuna kadar risklerin tanımlanması, taraflar arasında belirsizliklerin ortadan kaldırılması adına önem taşımaktadır.

Benardos ve diğ. (2004), çalışma TBM ile açılacak tünellerde operasyon sırasında karşılaşılabilecek sorunların genel bir değerlendirme endeksini oluşturarak, analize jeolojik ortamla ilgili belirsizlik ve değişkenliği dahil etmektedir. Böylece sorunlu alanlara ve burada karşılaşılan tehlikelerin büyüklüğüne odaklanan proaktif bir değerlendirme, ortak bir referans ölçeği ile mümkün olabilmektedir.

Eskesen ve diğ. (2004), çalışma Uluslararası Tünel Birliği Çalışma Grubu 2 tarafından hazırlanan bu çalışma; tünel ve diğer yeraltı projelerindeki risklerin tanımlanması, devamında yönetilmesi için genel şemanın hazırlanması ve rehberlik amacını taşımaktadır. Çalışma operasyonunun başından sonuna kadar tüm süreci ve bu süreçteki risk yönetimi aşamalarını kalitatif ve kantitatif risk seçenekleri ile açıklamaktadır.

Choi ve diğ. (2004), çalışma Kore'deki bir metro projesinden ayrıntılı bir örnek olay incelemesi ile özellikle yeraltı inşaat projeleri için bir risk değerlendirme metodolojisi sunmaktadır. Yazarlar riski değerlendirmek ve yönetmek için geliştirilen özel bir yazılım önermektedir. Önerilen yazılım, hem olasılıksal parametre tahminlerinde hem de öznel yargılarda belirsizlikleri temsil eden belirsizlik aralığını göz önünde bulundurmak üzere tasarlanmıştır.

Teknomo (2006), çoklu karar verme mekanizmaları arasından Analitik Hiyerarşi Prosesini anlatmaktadır. Analitik Hiyerarşi Prosesine göre belirli bir amaca yönelik seçilen kriterler ve faktörler, alternatif seçimler ve bunların skor değerleri ile ağırlıkları karar verme mekanizmasında önemli rol almaktadır. Burada amaca yönelik çalışmalarda belirlenen kriterler ve faktörler ile alternatifler sonsuz sayıda olabilir. Bu kısımda çalışmayı yapacak kişi ya da kişilerin tecrübelerine bağlı olarak öznel yapılar değerlendirilerek matematiksel sonuçlar elde edilmeye çalışılmaktadır.

IMIA (2006), 1994 – 2005 yılları arasında tünel sektöründeki zamansal ve finansal zararlara neden olan olayları kapsamaktadır. Yanlış seçimler veya deneysel çalışmalar daha yüksek risklere yol açmakta, maliyetler üzerinde büyük etkiler yaratmakta fazla sermaye, maliyet, zaman ve eğitimli personele olan ihtiyacı arttırmaktadır.

Russo (2008,2014), Russo ve diğ. (2007), çalışmalarda kaya ortamında tünel açılması sırasında kazı davranışının tahmin edilmesi ele alınmaktadır. Farklı kriterler ve sınıflandırma sisteminin entegre edildiği bir yaklaşımla oluşturulan çoklu grafik, kaya tünellerinde potansiyel tehlikeleri ortaya koymaktadır. Çalışma; kaya blok hacmi, GSI, tek eksenli basınç vb. parametreler kullanılarak ampirik bir yaklaşımla potansiyel tehlikelerin tespit edilmesini sağlamaktadır.

Russo ve diğ. (2008), çalışma Cebelitarık Boğazı'nın tabanının altından yapılması planlanan 42 kilometre uzunluğundaki demiryolu bağlantı tünelinin risk analizini içermektedir. Fas ve İspanya hükümetleri tarafından görevlendirilen iki farklı mühendislik firması tünel fizibilite çalışmalarını farklı bakış açılarından değerlendirerek (inşaat, güvenlik, bakım, zaman, maliyet vb.) proje için en uygun tasarım çözümü adına çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar temelde gerçek ön aşama çalışmalarından yapı detaylarına kadar tüm tasarım boyunca eldeki girdiler ve klavuz bilgilerin yeterli bir risk analizine dayandırılmıştır. Bu kapsamda başlıca tehlikeler ve riskler listelenerek sayısallaştırılmıştır. Çalışmalar sırasında su basıncının 50 bara kadar ulaşabileceği, bu değerin de mühendislik sınırlarının oldukça üzerinde olduğu görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda kum ve çakıl mercerklerinden yüksek su geliri ve su basıncına bağlı risk ve yüksek sıkışma özelliği bulunan fliş ortamında tünel açma makinasının sıkışma riskleri yüksek dereceli riskler olarak sınıflanmış, alınacak önlemlerle birlikte kalıntı risklerin hafiflediği sonucuna varılarak ek jeolojik araştırmaların gerekliliği sonucuna varılmıştır.

Rodriguez (2010), Rodriguez ve diğ. (2012), çalışmalarda ortak konu jeolojik risklerin yönetimi ve bu konuyu çevreleyen temel kavramlardır. Jeolojik risk yönetimi için modern bir konsept tanımlamak ve günümüzde bu amaç için kullanılan araç ve önlemlerin ana hatlarını çizmektedir. Çalışmalar sonucunda elde edilen veriler; jeolojik risk yönetiminin hangi metotlarla yapıldığını, sonuçların ülkeden ülkeye değişkenlik sunabildiği ve farklı yöntemlerin uygulandığı, jeolojik olayların olumsuz etkilerini ve uluslararası eğitimlerle risk azaltma ve riskten kaçınma stratejilerinin tanıtılmaya ihtiyacı olduğunu savunmaktadır.

Vahdatirad ve diğ. (2010), çalışmada Tebriz’de (İran) yapılacak metro çalışması öncesinde farklı yapı ve temel türlerine göre risk seviyesi değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca Yeraltı Ticaret Merkezi’nin yapı oturma analizi ampirik ve sayısal yöntemlerle tahmin edilmiştir. Ticaret merkezinin risk seviyesi çeşitli yapı tiplerinin risk sınıflaması ile ilgili sunulan tanımlara dayanarak belirlenmektedir. Yapılan analizler sonucunda risk kategorileri belirlenerek alınacak önlemler ortaya koyulmaktadır.

Hamidi ve diğ. (2010), çalışmada Zagros (İran) su iletim tünelinin ikinci fazında beklenen zemin koşullarına bağlı uygun tünel açma makinası (TBM) seçimine ilişkin farklı kriterler hesaba katabilen etkili karar verme mekanizması olan Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci ve risk değerlendirmesi yapılmaktadır. Çalışma boyunca tünel jeolojisinde sürekli değişen bir litoloji bulunmaktadır. Ancak en önemli problem aşırı su geliri, H₂S ve metan gazı ile yapılan zemin olmuştur. Bu olumsuzlukların TBM ilerleme hızına negatif etki yaptığı belirtilmektedir.

Ataei ve diğ. (2011), çalışmada Qomroud’da (İran) gerçekleştirilecek su iletim tüneli öncesinde kazıyı gerçekleştirecek en uygun kazı makinasının seçimini Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemiyle açıklamaktadır. Kazı makinasının seçimi adına alternatifleri değerlendirmek için kriterler belirlenerek hiyerarşik model ortaya koyulmaktadır. Çalışmada kullanılacak makinalar beş farklı seçenek olarak sunulmuş, seçim için kriterler jeolojik, tünel geometrisi, makine parametreleri, fiyat olarak belirlenerek en uygun makine seçimi sonucuna ulaşılmıştır.

Cerić ve diğ. (2011), tünelcilik faaliyetlerinde süreç odaklı risk değerlendirme metodolojisini sunmaktadır. Bu metodoloji inşaat sürecini bir bütün olarak ele alır ve risk yönetimi sürecini risk tanımından risk tepkisine kadar tüm yönleriyle analiz eder. Sürecin her aşamasında döngüsel risk yönetimi dinamik şekilde işletilir. Çalışmanın her aşamasında her bir risk etki ve olasılık unsurları belirlenerek sonuca ulaştırılmıştır.

Dayanç (2011), çalışmada Kadıköy – Kartal Metro güzergâhı boyunca bulunan jeolojik formasyonların sondaj numunelerine doğrusal kesme testleri uygulanmış ve kabul edilen yaklaşımlarla beraber deterministik yollar ve risk analizi olarak Monte Carlo Simulasyonu ile minimum, maksimum ve ortalama kazı değerleri hesaplanarak gerçek saha verileriyle karşılaştırılmıştır.

Brown (2012), çalışma yeraltı kaya mühendisliği alanında uluslararası literatür taramasına ve bazı kişisel deneyimlere dayanarak risk değerlendirmesi ve yönetimi uygulamalarına bir bakış sunmaktadır. Risk değerlendirmesi ve yönetimi ülkeden ülkeye değişkenlik sunmaktadır. Olasılık risk analiz metodu kaya mühendisliği ve jeoteknik mühendisliğinde en çok tercih edilen yöntemdir.

Sousa ve diğ. (2012), çalışma tünel inşaatıyla ilişkili riskleri sistematik olarak tanımlamak, değerlendirmek ve yönetmek için bir metodoloji sunmaktadır. Metodoloji, tünel inşaatında ayna önündeki jeolojik tahmin modelinin, farklı yapım türleri arasında en düşük riske sahip olanın seçilmesinin kombinasyonu olarak tanımlanır. Çalışmada TBM verileri tünel jeolojisinin tahmininde kullanılmaktadır. Bu kombinasyonu oluşturan model etki alanı bilgisi verilerini birleştirme, değişkenler arasındaki bağımlılıkları kodlama ve nedensel ilişkileri yönetme konusunda yeteneklerinden dolayı Bayesian Ağları Metodu ile yapılmaktadır. Bu kapsamda çalışma Porto Metrosunda uygulanmıştır. Netice olarak jeolojik tahmin ve inşaat stratejisi kombinasyonu projede başarıyla uygulanarak planlamacıların ve mühendislerin tünel inşaatıyla ilgili doğal riskleri sistematik olarak değerlendirip azaltabilecekleri bir araç sunmaktadır. Makale, belirli bir proje bağlamında jeoteknik risk kaynaklarını, düşük olasılıklı olanlar dahil tespit etmeyi ve daha sonra kantitatif risk analizini gerçekleştirmeyi sağlayan bir metodoloji geliştirerek spesifik jeoteknik risk konusunu ele almaya çalışmaktadır.

Ghasemi ve diğ. (2012), çalışmada tünel inşaat projelerinin kendine özgü risklerinin belirlenmesinden sonra, kök sebepler tanımlanmakta ve her bir riskin hata ağacı yapılmaktadır. Bu hata ağaçları uzmanlar tarafından onaylanmıştır. Önceki araştırmalar daha çok risk yönetimi ile ilgilenmekte olasılık ve etki dereceleri kullanarak genel risklerin sıralanmasına odaklanmaktadır. Bu çalışmada kentsel tünel projelerinin ayrıntılı, özel ve idari risklerinin belirlenmesini, her önemli risk için hata ağacı şeması geliştirilmesi üzerine durulmaktadır.

ITIG (2012), çalışmada 2003 yılında İngiliz Tünelcilik Derneği tarafından yayınlanan The Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works in the UK çalışmasının Uluslararası Tünelcilik Derneği (ITA) ve Uluslararası Mühendislik Sigortacılığı Birliği (IMIA) ile yapılan ortak görüşmelerin ardından ortaya koyulmuştur. Önceki yayındaki tüm başlıkların uluslararası olarak kabul edilmenin zor olması üzerine yeniden düzenlenerek temelde yine risk yönetiminde en iyi uygulamayı teşvik etmek ve kazaların oluşmasını engellemek için bir proje yönetim aracı olarak tasarlanmıştır.

Gattinoni ve diğ. (2012), çalışmada tünelticilikte kullanılan jeolojik risk analizinin en gelişmiş birleşimlerinden biri sunulmaktadır. Buna göre kullanılan metodolojik yaklaşımlar; sahada risk oluşturabilecek jeolojik tehlikelerin ön tanımlaması, tanımlanan jeolojik tehlikelerin olay olasılıklarının hesabı için stokastik analiz, sivil ve çevresel bağlamda gerçekleşebilecek özel tehlike olgularında kritik eşiklerin tanımlanması, farklı tasarım çizimleri için tehlike değerlendirmesinin yapılması olarak sıralanmaktadır. Çalışmanın, şehirleşmenin yüksek olduğu bölgede yürütülmesinden dolayı yüzey oturmaları risk analizinde detaylı olarak çalışılmıştır. Metodolojinin amacı kavramsal model tanımına dayanarak risk alanlarının belirlenmesi, farklı tasarım çizimleriyle beraber potansiyel tehlikelerin büyüklüğünün hesaplanması ve tehlikelerin istatistiksel değerlendirmesinin yapılmasıdır.

Russo ve diğ. (2014), çalışmada İtalyan Geodata mühendislik firmasının risk analizi ve yapısal tasarım kombinasyonu ile olasılık – analiz metoduna dayanarak geliştirilen “Risk Analysis – driven desing” (RAAdD) yani “Tasarım Odaklı Risk Analizi” olarak Türkçeleştirilebilecek tek bir rasyonel sürecin, referans gösterilerek El Teniente (Şili) Madeni’nde uygulanabilirliği anlatılmaktadır. Tünelin yapım aşamasında olması tasarım sürecinin tamamlanması ve öngörülen jeolojik – jeomekanik senaryoları kontrol etme olanağı sunmaktadır. Çalışmanın her aşamasında, belirsizlik – değişkenlik göz önünde bulundurularak destek sistemi ile güzergâhın kontrol edilmesi ve güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmektedir.

Huang ve Zhang (2015), çalışma Çin’de yürütülen tünelticilik faaliyetlerinde nicel risk yönetimi konusundaki bazı deneyimleri yeni teknikler ve ilgili pratik uygulamalar yardımıyla okuyucuya sunmaktadır. Bu kapsamda kullanılan yöntemlerden Markov Zinciri zemin belirsizliğinin olasılık analizinde, kantitatif hassasiyet analizi; sonuç değerlendirmesi ve çevresel etki hesabı için kullanılmaktadır. Kullanılan bu yöntemler makalede yer alan gerçek durumlara uygulanarak başarı oranları doğrulanmaktadır.

Amiri ve Ghasemi (2015), çalışmada Tohid (İran) karayolu tüneline tüm tünel projelerinin spesifik riskleri belirlendikten sonra, risklerin nedenleri tanımlanarak her riskin hata ağacı oluşturulmaktadır. Risklerin önem derecesinin hesabında ise Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, kullanılan metodolojiyle risk değerlendirmesinin karmaşık projeler için uygulanabilir olduğu ve şehiriçi tünelticilikte en önemli risklerin tünelde tavan – taban duraysızlığı ve çevre binalara zarar verme riskleri olduğu belirtilmektedir.

Özfırat (2015), çalışma Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesini kullanarak yumuşak zeminlerde en uygun kazı yönteminin seçimini anlatmaktadır. Bu kapsamda yöntem seçimine etki eden jeoloji, zemin koşulları, tünel özellikleri, jeolojik – çevresel riskler ve proje özellikleri kavramları süreç kapsamında değerlendirilerek en uygun kazı yönteminin türü belirlenmektedir. Verilen parametreler arasından jeolojinin %34 ve jeolojik – çevresel risklerin %33,7 ile ilk önceliğe sahip olduğu, projeye özgü değerlendirme sonucunda en uygun kazı biçiminin EPB ile kazı olduğu belirtilmektedir.

Verzani ve diğ. (2015), çalışma risk yönetimine odaklanmış tasarım metodolojisini sentezlemektedir. Referans modellerin temelinde tahmin edilen jeolojik – jeomekanik senaryoların tanımı ile ilgili tehlikelerin tanımlanması ve azaltılması yer almaktadır.

O'Carroll ve diğ. (2015), dünyada kabul görmüş bazı risk yönetimi ilkelerinin Amerika'da farklı uygulandığını, hatta ülke içinde dahi farklı kuralların ve uygulamaların olduğunu açıklarken, yazarlar bu çalışmanın bir kod veya sözleşme belgesi olmadığını belirtmektedirler. Ancak çalışmanın içindeki kuralların kabul edilmesi ile proje sahiplerine, planlayıcı-tasarımcı, yüklenici ve sigortacıların risklerin geniş kapsamı ve önemi hakkında daha derin bir anlayışa sahip olacaklarına inanmaktadırlar. Çalışma tünel ve diğer yeraltı kazılarında tasarım ve inşaat faaliyeti ile ilgili risklerin tanımı, azaltılması ve yönetilmesi üzerine yürütülmektedir. Bu kapsamda tüm ilgili kişiler arasında bağ kurarak risk yönetimine teşvik etmektedir.

Konstantis ve diğ. (2016), çalışma tünel zayıflıklarına sürekli olarak etki eden belirli faktörlerin olduğunu göstermeyi hedeflemektedir. Bu kayıplar inşaat metodolojisinin ve sonradan ortaya çıkan başarısızlık tipini ayrıştırarak maliyete ilişkin verilerin değerlendirilmesi yoluyla niceliksel olarak değerlendirilir ve analiz edilir. Buradan edilen sonuçlar sigorta piyasası için proaktif, hedefi risk mühendisliği ve yaklaşımı olan öneriler sağlanmaktadır. Proaktif risk mühendisliğinin sigorta alanında önemi ve faydaları niteliksel olarak ortaya koyulmaktadır.

Satıcı (2016), karayolu tünel kazıları sırasında beklenen riskler, etkileri ve riskin gerçekleşmesi halinde ortaya çıkabilecek sonuçları mühendislik mekaniği ve risk çerçevesinde incelemekte, olası senaryoları açıklamaya çalışmaktadır. Risk modellemesinin amacını gerçekleştirebilecek senaryoların önlenmesi, eldeki kaynakların en iyi şekilde kullanılması, iş güvenliği, işin devamlılığı ve ekonomik kayıpların en aza indirgenmesi olarak özetlemektedir.

Amnieh ve diğ. (2016), çalışmada Tahran’da (İran) bulunan demiryolu projesindeki jeolojik – hidrolojik koşullar ve bu koşulların tünel açma makinasına etkileri anlatılmaktadır. Çalışmada potansiyel tehlikeler elde edilen veriler neticesinde niteliksel olarak tanımlanmaktadır. Makina disklerinin aşınması – erozyonu, tıkanma, karma ayna, yüksek zemin geçirgenliği, ince taneli zemin eksikliği, blok – büyük kaya parçaları, su kanalları, tünel güzergâhı boyunca değişken yeraltı su seviyesi jeolojik ve hidrolojik riskler olarak tanımlanmaktadır.

Artopoulos (2016), tünelcilik faaliyetlerinin diğer inşaat mühendisliği türlerinin aksine, öncelikle tünelin içindeki zemin ve zeminin davranışına dair sınırlı bilgi nedeniyle daha büyük risklere maruz kaldığını belirtmektedir. Bu bağlamda sigorta endüstrisindeki son eğilimlere ve temel motivasyonlara genel bir bakış sunmaktadır.

Klein ve O’Carroll (2017), çalışma tünel ve yeraltı çalışmaları için temel risk yönetimi sürecinin gözden geçirilmesini savunurken, jeoteknik risk değerlendirmelerini detaylı olarak ele almaktadır. Genel risk stratejilerinin tartışılması daha önemli jeoteknik riskleri ele almak için kullanılabilecek yaklaşımlar sunulmaktadır.

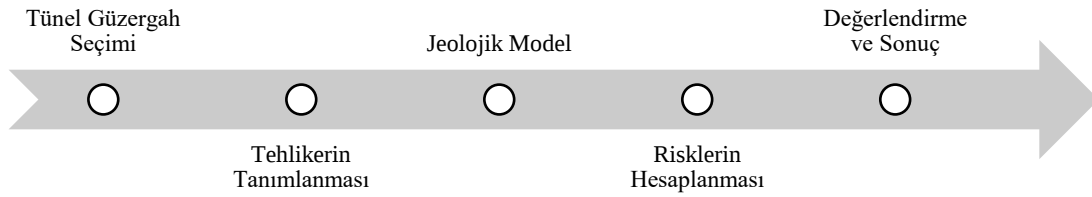
Erdal ve diğ. (2018), çalışmada Dicle sulama tünelleri inşaatı sırasında karşılaşılan sorunlar ve çözümleri anlatılmaktadır. Çalışmada eksik yapılan jeolojik çalışmalar nedeniyle inşaat süresi ve maliyet artışı olduğu, T1 tüneline karşılaşılan problemlerden çıkarılan sonuçlarla T2 tüneline hızlı müdahale imkânı oluşturulduğu belirtilmektedir.

Mikaeil ve diğ. (2018), çalışma Emamzadeh Hashem (İran) Tünelinin ikinci kısmında jeolojik özelliklerin tanımlanmasından sonra gerçekleşebilecek jeoteknik risklerin Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ve Promethee ile değerlendirilmesini kapsamaktadır. Çalışmada, öngörülen tehlikeler bahsedilen yöntemlerle analiz edilmiş olup, çalışma sonucunda jeoteknik riskleri tahmin etmek ve ortaya çıkabilecek felaketleri azaltmak için çok kriterli karar verme, analitik, sayısal ve bulanık yöntemlerin kombinasyonunun kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Xiong ve diğ. (2018), çalışma tünelcilikte risk değerlendirmesi ve riski azaltmak için 3 boyutlu çok ölçekli jeolojik modelleme için güncel bir yöntem önermektedir. Bu kapsamda önerilen modellerin inşaat öncesinde ön değerlendirmeler için kullanılabilir olduğu, inşaat başladıktan sonra elde edilen yeni bilgilerle geliştirilebileceği belirtilmektedir. İnşaat sırasındaki dinamik değerlendirmeler Monte Carlo algoritmasına dayanmaktadır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Daha önce 1.3 Metodoloji bölümünde bahsedildiği üzere, yürütülen çalışmada 3 boyutlu modelleme ve jeolojik – jeoteknik risk kavramları ayrı ayrı çalışıldıktan sonra sentezlenerek sonuçlandırılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Risk analizi iş akış planı

Jeolojik – jeoteknik risk analizleri; projeye özgü arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve bunlardan elde edilen sonuçları kapsayan raporlar ile proje bölgesi yakın çevresinde daha önceden gerçekleştirilmiş çalışmalardan elde edilen genel bilgiler ile yürütülmüştür. Güzergâhın jeolojik, hidrojeolojik ve mühendislik jeolojisi araştırmaları yapılan tez çalışmasında altlık olarak kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında Autodesk Civil3D Geotechnical Module 2018 yazılımı kullanılarak sondaj verilerine dayalı jeolojik modelleme ve güzergâh boyunca tahmini ayna haritaları çıkartılmıştır.

Risklerin hesaplanması bölümünde ise kalitatif ve kantitatif risk analizleri içeren Analitik Hiyerarşi Prosesi ve Risk Değerlendirme Karar Matrisi kullanılmaktadır. Bu bağlamda, tüm tünel uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan jeolojik – jeoteknik tehlikeler tanımlanarak, tünelcilik açısından etkileri Analitik Hiyerarşi Prosesi ile hesaplanmıştır. Kesin risk puanının ve risk düzeyinin belirlenmesinde ise Risk Değerlendirme Karar Matrisi kullanılmıştır.

Yazar tarafından Risk Değerlendirme Karar Matrisi ve Analitik Hiyerarşi Prosesi için önerilen puanlamalar, alanındaki uzman önerileri ve literatür taramaları sonucu ortaya koyulan öngörülerini içermektedir.

Yapılan tüm analiz ve değerlendirmelerin detayları 4.Bulgular bölümünde anlatılmaktadır.

4. BULGULAR

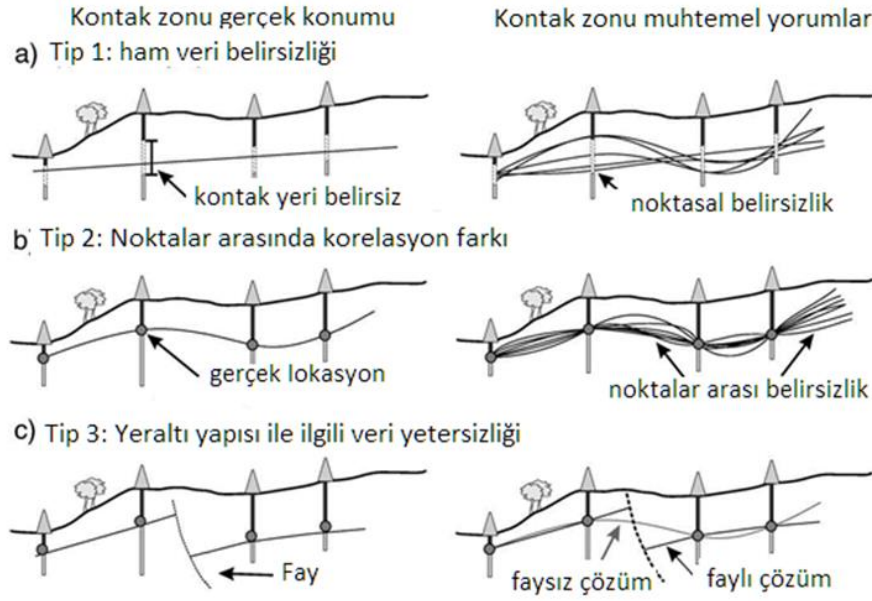
4.1. 3 BOYUTLU JEOLJİK MODELLEME ÇALIŞMALARI

3 boyutlu modelleme özellikle maden sektörü olmak üzere farklı alanlarda kullanılmaya başlanırken gerçek modelin anlaşılabilirliği (fay, sokulum vb.) artmıştır. İnşaat sektörü açısından bakılacak olursa, jeoteknik tasarım aşamasında tünellerde ve açık kazılarda 3 boyutlu modellemelerin yapılması risk analizi çalışmalarına olanak sağlamaktadır. 3 boyutlu jeolojik modelleme sadece görselleştirme açısından değil, işveren, tasarımcı ve yüklenici arasında yerinde ve hızlı bilgi akışı sağlamada önemli bir rol oynamaktadır.

Jeolojik tahmin, yere özgü veya genel olarak nitelendirilebilecek bilgilere dayanmaktadır. Bu; saha araştırması, bölge jeolojisi ve bölgenin jeolojik tarihi hakkında yapılan doğrudan gözlemlerin yanı sıra, jeolojik birimlerin değişen jeolojik ortamlara nasıl tepki verdiğinin bilinmesinin ve anlaşılmasının aynı derecede önemli olduğunu vurgulamaktır (Robinson, 1972). Bu nedenle, lokasyona özgü araştırma sonuçlarını yorumlamak ve doğrudan gözlemler arasında veya uzak gözlemlerden jeolojiyi tahmin etmek için genel bilgiler açıkça modele dahil edilmelidir. Ancak, jeolojik verilerin kesinliği ile ilgili sınırlamalar ve belirsizlikler nedeniyle bulguların yerindeki gerçek durumdan çoğu zaman az veya çok sapabileceği yapılan araştırmalar sonucu ortaya koyulmuştur. Bunda kaçınılmaz sadeleştirmeler, heterojenlik, doğal rasgelelik, farklı yorumlanabilecek olasılıklar ve hipotezler (belli bir veri grubunun birden fazla çözüm için geçerli olabilmesi durumu, ör. kıvrım ya da fay ile açıklanabilme gibi), ölçüm hata payları, örneklemede kısıtlamalar, yetersiz numune sayısı vb. faktörler rol oynamaktadır.

Belirsizlikler, genel anlamda, jeolojik kütlenin derinlik ve çeşitli ölçeklerde geometrisini tahmin etmemizdeki sınırlamalardan kaynaklanır. Ölçümlerde bir jeolojik birimin tamamen gözden kaçırılması ve / veya bir birimden diğerine geçişin tanınmasındaki güçlük vb. bazı belirsizliklere yol açmaktadır. Jeolojik verilerin yaratabileceği çeşitli tipte belirsizliklere örnekler aşağıda gösterilmiştir (Wellmann ve diğ., 2010).

Tip 1, modellemede kullanılan her türlü ham verideki belirsizlik, formasyon sınırı ya da gömülü yapının konumu gibi. Tip 2, bu durum bilinen veri noktaları arasındaki deneştirme, uzatma vb. belirsizliği olarak gösterilir. Tip 3, yapısal unsurun varlığı ya da yokluğu ile ilgili genelleme ihtiyacı için eksik ve hatalı bilgiler vb. için geçerlidir (Şekil 4.1).



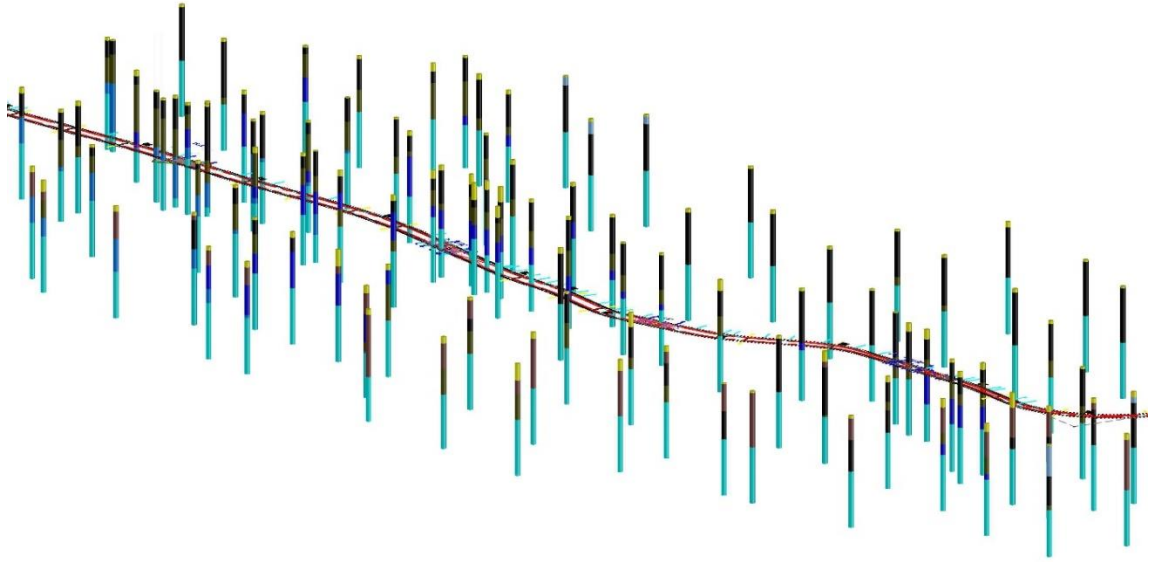
Şekil 4.1: Jeolojik modelleme belirsizlikler (a) Tip 1, ham verideki belirsizlikten dolayı gömülü yapının belirsizliği (b) Tip 2, bilinen noktadan uzaklıktan dolayı deneştirme belirsizliği (c) Tip 3, yeraltı yapıları hakkındaki eksik bilgilerden kaynaklı belirsizlik (Wellmann ve diğ., 2010).

Jeolojik model; jeolojik çalışmaların ve geniş çapta yapılan araştırmaların sonuçlarını sentezleyerek güzergâh boyunca jeolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik koşullar hakkında ilk bilginin sağlanması ve jeolojik açıdan en kritik veya en karmaşık bölgelerin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu anlamda jeolojik model, güzergâhın teknik karakterizasyonu için ilk temel adımı temsil etmektedir. Bu karakterizasyon detaylı jeolojik araştırmalar ve saha – laboratuvar deneyleri ile desteklenmektedir. Bir sonraki aşamada analitik ve nümerik temellere dayanan kazı modellemeleri ve sonlu elemanlar analizleri ile kazı sırasındaki tünel davranışının tahmin edilmesini sağlanmaktadır.

Tam bir model, tasarım ve yapım kararları üzerinde güçlü etkiye sahip tüm jeolojik parametreleri içerebilmelidir. Model, parametre sayısına veya düşünülebilecek parametre durumlarına sınırlama getirmemelidir. En önemlisi model, genel tasarım ve inşaat planlamasını kolaylaştırmak için olası jeolojik profilleri gerçekçi bir şekilde simüle edebilmelidir. Üretilen profiller, inceleme alanı jeolojisi ile ilgili genel beklentilere veya inşaat öncesi bilinen parametre durumlarına ilişkin gözlemlerle çelişmemeli ve proje çevresindeki genel jeolojik koşullardan önemli ölçüde sapmamalıdır (Ioannou, 1989).

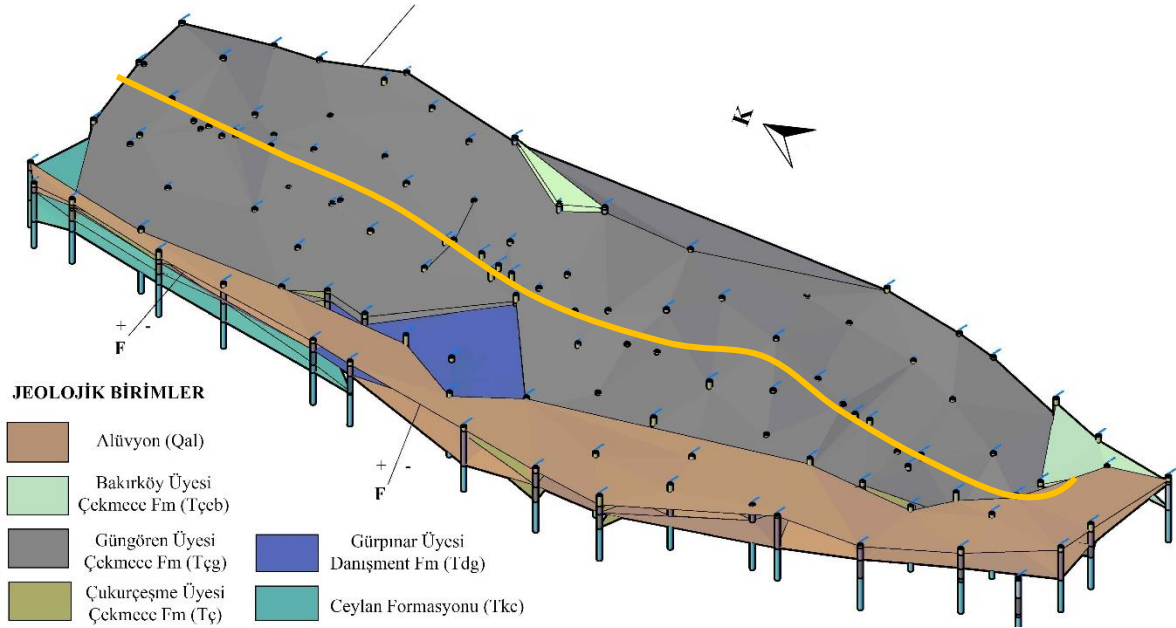
4.1.1. Jeolojik Modelleme Çalışmaları

Jeolojik modelleme çalışmaları çerçevesinde; Autodesk Civil3D Geotechnical Module 2018 yazılımı kullanılarak Şekil 4.2’de gösterildiği üzere Km: 5+750 – 9+750 arasında 117 sondaj verisine dayalı jeolojik model oluşturulmuştur.



Şekil 4.2: Jeolojik modelde kullanılan sondaj konumları ve çalışma güzergâhı

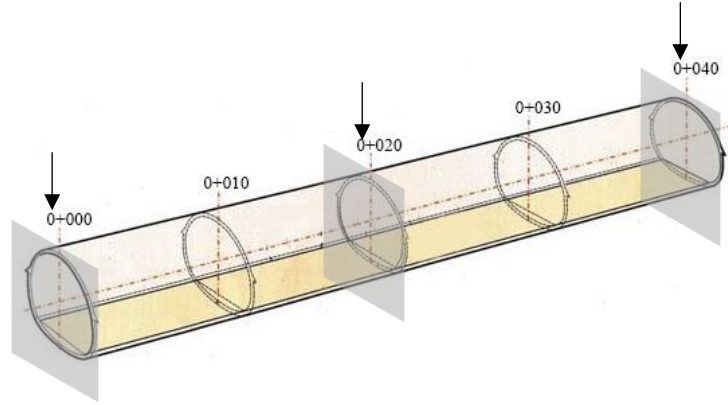
Oluşturulan modelde jeolojik birimler arası ilişkiler ve tünel güzergâhı (sarı renkli çizgi) boyunca konumları gösterilmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Çalışma güzergâhı boyunca jeolojik birimler arası ilişkiler

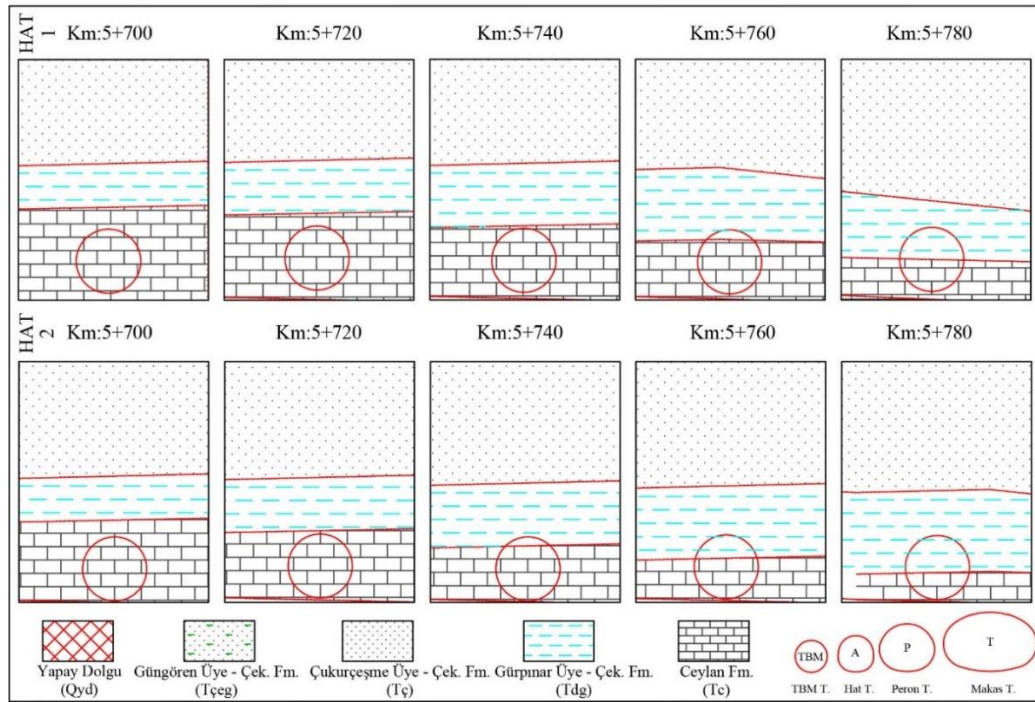
4.1.2. Güzergâh Tahmini Ayna Haritaları

Çalışma güzergâhı (Km: 5+750 – 9+750) boyunca tahmini ayna haritaları, Autodesk Civil3D Geotechnical Module 2018 yazılımı kullanılarak 3 boyutlu modelleme ile birimler arası ilişkiler ortaya koyulduktan sonra yine aynı program ile aynaya paralel çizilen kesitler yardımıyla oluşturulmuştur. Tahmini ayna haritaları Hat-1 olarak tanımlanan İkitelli – Ataköy yönü ve Hat-2 olarak tanımlanan Ataköy - İkitelli yönü peron, makas ve hat tünelleri için 20 metre aralıklarla çizilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4: Tahmini ayna haritaları oluşturulma şeması

Oluşturulan tahmini ayna haritalarına ait bölümler Şekil 4.5'te örneği görüldüğü üzere Hat 1 ve Hat 2 olarak ayrılarak (Bkz. EK-1) ekler bölümünde detaylı olarak verilmektedir.



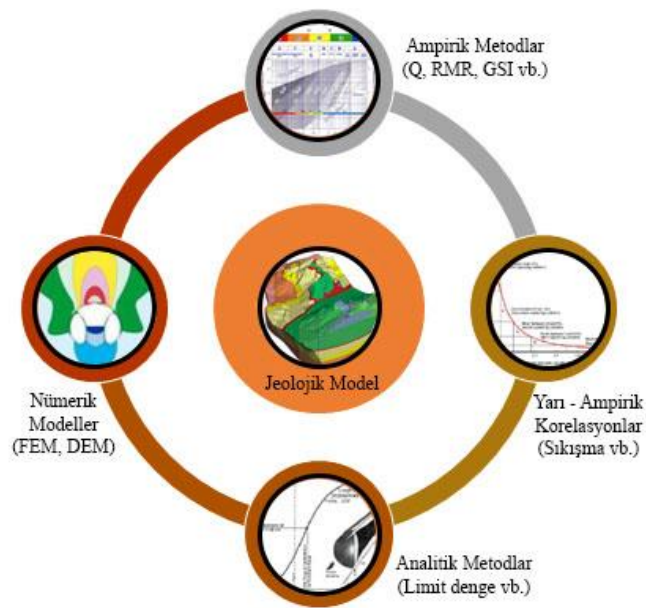
Şekil 4.5: Km: 5+700 – 5+800 arası tahmini ayna haritaları

4.2. JEOLJİK – JEOTEKNİK RİSK ÇALIŞMALARI

Risk, tehlikenin ve ilgili etkilerinin oluşma olasılığı ile doğuracağı sonucun çarpımının ürünü olarak olarak tarif edilmektedir. Ülkemizde yürütülen risk analizi çalışmaları genellikle iş sağlığı ve güvenliği kapsamında gerçekleştirilmektedir. Tünel, baraj vb. özel yapılar için tüm projeyi kapsayan ve farklı alanlara hizmet eden detaylı risk analizleri yapılmamakta ya da eksik yapılmaktadır. Bu olay işveren, tasarımcı, yüklenici arasında bilinmezliklere sebep olmaktadır.

Tünelcilik açısından bakıldığında, jeolojik ve jeoteknik belirsizlikler genellikle bir projeye ilgili en önemli riskleri oluşturmaktadır (Guglielmetti ve diğ., 2007). Fay ve sıkışma bölgeleri gibi zorlu koşullar, yumuşak killer, suya doymun kum cepleri, çatlaklı ve düşük kaliteli kaya, karst oluşumu, yüksek yeraltı suyu basınçları tünel yapımı için önemli riskler sunmaktadır. Bu riskler düşük tünel ilerlemelerine, gecikmelere, maliyet artışlarına, mevcut altyapıda hasarlara veya inşaat ekipmanlarında hasarlara neden olmaktadır. Bu nedenle, etkili ve kapsamlı bir risk analizi, projelerin başarılı şekilde tamamlanması için çok önemlidir (Klein ve O'Carroll, 2017).

Günümüzde tünelcilik tasarımlarında uygulanan temel yaklaşımlar ampirik metodlar, yarı ampirik korelasyonlar, analitik metodlar ve nümerik modelleri kapsamaktadır (Şekil 4.6). Ancak tam bir risk analizinin yapılabilmesi adına jeolojik model sisteme doğru bir şekilde dahil edilirken, risk tarifinde kullanılan farklı metodlarla kombinasyon oluşturulmalı ve tünelcilik açısından riskli alanlar proje ortaklarıyla paylaşılmalıdır.



Şekil 4.6: Analiz süreçleri ve modellemelerde limitler

Zemin tünellerindeki jeoteknik koşullar genellikle Tunnelman tarafından önerilen, Terzaghi (1950,1977), Peck (1969), Heuer (1974), Rose (1982), Huer ve Virgens (1987) tarafından geliştirilen ve değiştirilen zemin sınıflamaları dikkate alınarak karakterize edilir. Zemin tüneli davranışı, temel olarak zeminin tipine, fiziksel özelliklerine ve dayanım özelliklerine bağlı olarak sağlam, sökülün, akan, sıkışan ve şişen zemin olarak tanımlanmaktadır (Tablo 4.1).

Tablo 4.1: Tunnelman zemin sınıflaması

Sınıf	Davranış	Tipik Zemin Türleri
Sağlam Zemin	Üst yarı birincil destek olmadan ilerletilebilir ve tahkimat zemin harekete geçmeden yerleştirilebilir.	Su tablasının üstünde ve yüksek gerilme olmadığında sert kil, marn, çimentolanmış kum ve çakıl.
Sökülen Zemin	Desteksiz kalan zeminden küçük yada iri parçalar gevşemenin ve yüksek gerilmenin etkisiyle kopabilir. (Zemin sıkışan zeminin aksine farklı yüzeyler boyunca ayrılır veya kırılır) Hızlı sökülmede süreç 5 dk. İçinde başlar, aksi takdirde yavaş sökülme gerçekleşir.	Rezidüel zeminler veya az miktarda bağlayıcı içeren kum su tablasının altında hızlı sökülme özelliği göstermektedir. Sert ve fisürlü killer strese bağlı olarak yavaş veya hızlı sökülme özelliği göstermektedir.
Sıkışan Zemin	Zemin, görünür çatlak veya süreklilik kaybı ve su içeriğinde gözle görülür artış olmadan plastik olarak tüneli sıkıştırır. Olayın temel nedeni aşırı gerilmedir.	Düşük sürtünme kuvvetine sahip, aşırı gerilmeye bağlı, sık ve orta derinlikteki çok yumuşak orta katı kıvamlı kil, yüksek örtü yükünün olduğu katı – sert killerde aynanın gerisinde sökülme ile kombinasyon halinde görülebilmektedir.
Akıcı Zemin	Kohezyonsuz granüler malzemeler, dayanma açılarından daha büyük bir eğimde kararsızdır (30-35). Daha dik eğimlere maruz kaldıklarında eğim düzleşinceye kadar toz şeker veya kumul gibi hareket ederler.	Temiz, kuru taneli malzemeler, nemli kum veya zayıf çimentolanmış granüler zemin sökülme davranışı göstermeden akıcı zemin özelliği gösterebilir.
Akan Zemin	Toprak ve su karışımı, viskoz bir sıvı gibi tünele akar. Tünelin her bölgesinden girebildiği gibi aynadan uzak mesafelere kadar gidebilir.	Su tablasının altında, yapışma ve plastisite verecek kadar kil içermeyen silt, kum veya çakıllı zeminlerde görülür.
Şişen Zemin	Suyu emen zeminin hacminin artması ve yavaşça tünele ilerlemesi durumudur.	Montmorillonit içeren, yaklaşık % 30'dan fazla plastiklik indeksine sahip, konsolide killerde görülür.

*Heuer (1974) tarafından Terzaghi (1950)'den değiştirilmiştir.

Zemin ortamından kaya ortamına geçildiğinde jeolojik - jeoteknik riskler azalmamaktadır. Fay - sıkışma bölgelerinde çok çatlaklı veya ezilmiş kaya, ayrılmış kaya ve rezidüel zemin, altere kaya, karışık ayna koşulları ve zayıf matriks içine gömülmüş yüksek dayanımlı kaya blokları gibi koşulların tümü, kapsamlı değerlendirme ve uygun risk azaltma önlemleri gerektiren önemli inşaat zorluklarını sunmaktadır (Klein ve O'Carroll, 2017). Kaya tüneli projeleriyle ilgili, geçmiş deneyimler çok zor olduğu ve önemli risk içeren kanıtlanmış bir dizi olay içerdiği için Terzaghi (1946) ve Deere ve diğ. (1970) tarafından bir sınıflama geliştirilmiştir (Tablo 4.2)

Tablo 4.2: Terzaghi kaya kütle sınıflaması

Sınıflama	Tanımlama
Sağlam	Ne eklem ne de kılcal çatlaklar içermez. Bu nedenle eğer kırılırsa, sağlam kaya tümüyle kırılır. Kayaçların patlatma nedeniyle hasarından oluşan çatlayan parçalar patlatmadan birkaç saat sonra tavandan düşebilir. Bu durum kavlama olarak bilinir. Sağlam sert kayalar tünel duvarlarından veya tavandan kendiliğinden ve aniden ayrılabilir.
Tabakalı	Tabaka sınırları boyunca ayrılmaya karşı oldukça az dirençli veya dirençsiz bireysel tabakalardan oluşur. Tabakalar çapraz eklemler tarafından zayıflamış olabilir veya olmayabilir. Bu tür bir kayada, kavlama koşulu oldukça yaygındır.
Orta Çatlaklı	Eklemler ve kılcal çatlakları içerir, ancak eklemler arasındaki blok lokal olarak birarada büyür veya dikey duvarların yanallı destek gerektirmemesi için birbirine kenetlenir. Bu tür kayalarda hem kavlama hem de fırlama durumu ile karşılaşılabilir.
Bloklu ve şekilsiz	Tamamen birbirinden ayrı ve kusursuz bir şekilde birbirine kilitlenen kimyasal olarak sağlam veya neredeyse sağlam kaya parçalarından oluşur. Bu tür kayalarda, dikey duvarlar destek gerektirebilir. Orta derecede bloklu ve parçalı kayaların yan basıncı yoktur. Çok bloklu ve parçalı kayaların çok az yan basıncı vardır veya yoktur.
Ezik	Ezilmiş ancak kimyasal olarak sağlam kayada, parçaların çoğu veya tamamı ince kum taneleri kadar küçükse ve yeniden sementasyon gerçekleşmemişse, su tablasının altındaki ezilmiş kaya, kumun özelliklerini gösterir.
Sıkışan	Algılanabilir hacim artışı olmadan yavaş yavaş tünele ilerler. Sıkışma için ön koşul, düşük şişme kapasitesine sahip yüksek oranda mikroskobik veya yarı mikroskobik mika mineralleri yada killi mineral parçacıklarıdır.
Şişen	Genişlemeden dolayı esas olarak tünele ilerler. Şişmenin kapasitesi, montmorillonit gibi yüksek bir şişme kapasitesine sahip kil mineralleri içeren kayalara bağlıdır.

4.2.1. Tehlikelerin Tanımlanması

Bu bölümde bir önceki bölümde genel olarak bahsedilen kaya ve zemin tünelticiliğinde sıkça karşılaşılan tehlikelerle ilgili detaylı açıklamalar ve tünel projelerinde tanımlanmış her bir tehlikeye ait oluşum süreçleri yer almaktadır.

- **Akıcı Zemin (T1) ve Akan Zemin (T2)**

Zeminler litolojiye (malzeme cinsi), içerdikleri suya ve su miktarına göre akıcı zemin ve akan zemin özelliği kazanmaktadır. Akıcı zeminler ortamda su olmaksızın kuru durumda iken de akma kabiliyetine sahiptir. Kohezyonsuz, özellikle çimentolanmamış kumlu zeminlerde bu durum gerçekleşmektedir. Akan zeminler toprak, moloz, killi ve siltli zeminler olarak tanımlanabilir. Akma hızı su içeriği ile orantılıdır ve bu ortamlarda çamur akmaları görülmektedir.

- **Sıkışan Zemin (T3)**

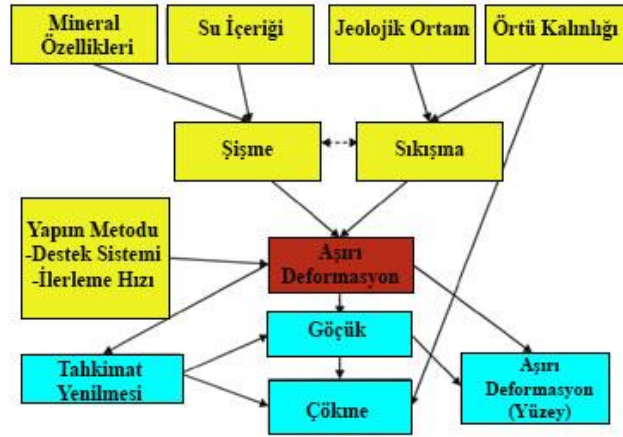
Az su içeren siltli ve killi zeminler olarak tanımlanır. Basınç altında dalgalanır, kabarır ve kıvrılırlar. Plastik sınırdadır.

Bazı mineraller suyu emerken (şişirirken) hacmini artırma özelliğine sahiptir. Bu hacim artışı engellenirse hareketi engelleyen elemana karşılık gelen bir basınç uygulanır. Tünel inşaatında şişme konverjans sorunlarına ve tünelin tabanının uzun süreli kabarmasına neden olabilir. Bu da yapının servis kabiliyetini bozabilir veya tabanın kısmen bozulmasına neden olabilir (Kolymbas, 2005; Einstein, 2000). Bu bahsedilen olaylar tünel içerisinde veya yüzeyde aşırı deformasyonların meydana geldiği ancak gerçek bir çökmenin olmadığı durumlardır. Tehlikenin temelinde yetersiz tasarım, inşaat kusurları ve / veya önceden tahmin edilmemiş şişme ve sıkışma özelliğine sahip belirli tipteki zeminler bulunmaktadır.

- **Şişen Zemin (T4)**

Sıkışan zemin genellikle, tünel çevresindeki gerilme gradyanının etkisinden dolayı yer değiştiren malzemeleri ifade eder. Tünel yüzeyinde kapatma meydana gelmeye başladığından, sıkışma etkileri bir kazı sırasında hemen ortaya çıkar. Şişme davranışı ise, bentonit vb. kil mineralince zengin zeminlerde görülmektedir. Su alınca hacimleri artar, şişer ve kabarılırlar. Bu durum hareket etmelerine olanak sağlar.

Bentonit, illit ve montmorillonitler su alınca şişmektedirler. Kaolin bu minerallere oranla daha az şişer, kilin türü bu durumda çok önemlidir. Yumuşak zeminlerde tünel faaliyetlerine başlanınca yan duvarlar ve tavan duraysızlaşır. Tabanda da kabarma ve çukurlaşmalar oluşur. Sıkışan ve şişen zeminlere ait oluşum süreci ve etkili parametreler Şekil 4.7’de verilmektedir.



Şekil 4.7: Sıkışan ve şişen zeminlere etki eden parametreler ve sonuçları (Sousa, 2010’dan değiştirilerek)

- **Yapışkanlık – Adezyon (T5)**

Killi minerallerin bulunduğu zeminlerde (kaolinit, illit vb.) yapışkanlık, özellikle TBM kullanılan kazılarda kesici takımların performansını etkileyebilecek kesici kafa, kazı odası ve konveyörde bir tıkanıklık yaratabilecek davranış sergilemektedir. Bu yapışkanlığı azaltmak ve işlenebilirliği artırmak için zemine iyileştirici madde enjekte edilmektedir ve yapışkanlığa bağlı olarak gelişen tıkanma potansiyeli, zeminin su içeriği artırılarak hafifletilmektedir.

Plastik İndeks I_p (%) ve W_n/W_p (su muhtevası/plastik limit) arasındaki karşılaştırma potansiyel yapışkanlık eğiliminin (zeminlerin diğer nesnelere yapışma kapasitesi) tahminine imkân verir.

- **Sökülme (T6)**

Tünel kazılarında, tünel tavanında ve cidarında meydana gelen, istenilen kesitten daha fazla hafriyata neden olan profil fazlası olaylara aşırı sökülme adı verilir. Süreksizlikler, kayanın ayrışma oranı, tünelin kesit tipi ve kesit alanı, patlayıcı kullanılıyorsa; patlatma türü ve yöntemi, kazı ilerleme boyu, aşırı sökülmeyle direkt olarak etkileyen unsurlardır (Yıldırım ve Göktaşan, 2013).

Tünelin süreksizliklere ve dayk gibi farklı dirençlerdeki kayalara yakın olan kısmında da kaya patlamaları ve aşırı sökülme meydana gelmektedir. Farklı kayalardaki aşırı sökülmenin ortalama değerleri Krynine ve Judd (1957)'a göre Tablo 4.4'te verilmektedir.

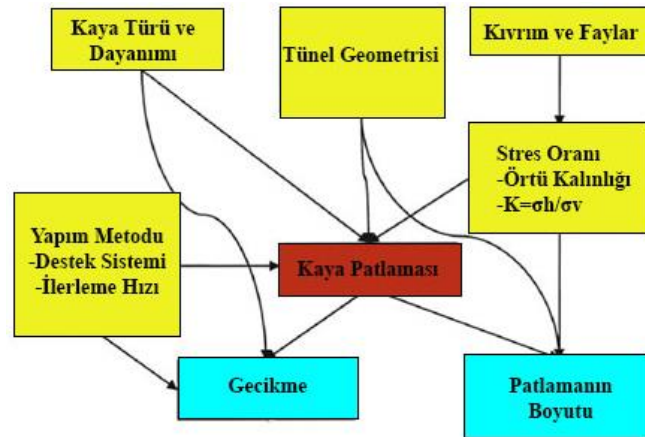
Tablo 4.4: Farklı türdeki kayalarda ortalama aşırı sökülme yüzdeleri (Krynine ve Judd, 1957)

Kayaç Türü	Aşırı Sökülme Oranı
Sedimanter Kaya	%9 – 11
Granit	%10 – 12
Bazalt	%8 – 15
Gnays	%8 – 11
Diğer Metamorfik Kaya	%11

- **Kaya Patlaması - Parçalanma (T7)**

Tünel çevresinde ani gerilme artışları ile su ve gaz basınçlarındaki artışlar nedeniyle meydana gelen zamanı, yeri, miktarı ve şiddeti önceden belirlenemeyen kırılma, sökülme veya göçme olaylarının tümüne denilmektedir (Yıldırım ve Gökaşan, 2013).

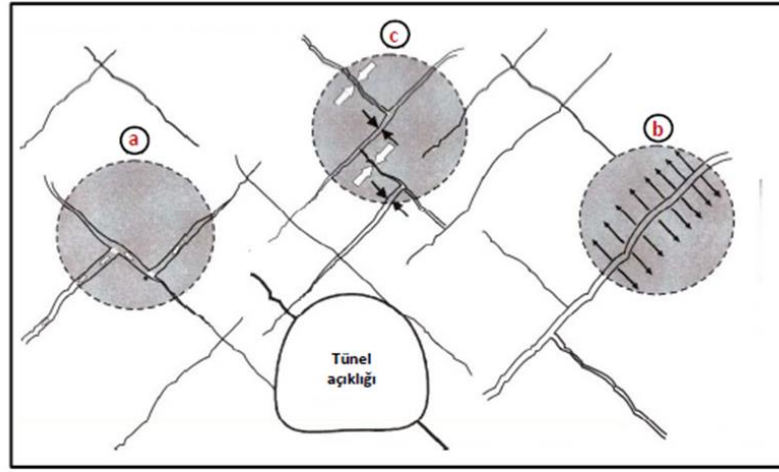
Kaya patlamaları, kayanın kılcal çatlaklarının sonucudur. Kaya türü, kaya patlamasını ve ciddiyetini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Kaya patlaması daha muhtemel ve kırılğan kayalarda daha fazla ciddiyetle ortaya çıkar. Temelde kayanın üzerine uygulanan strese bağlıdır ve bu da derinliğe bağlı artmaktadır. Fay ve kırık gibi süreksizliklerin bulunması ve farklı dirençli kayaların bir arada olması kaya patlaması olayında etkilidir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Kaya patlaması oluşum süreci etken parametreler (Sousa, 2010'dan değiştirilerek)

Çatlakların, kil, kuvars, kalsit, çeşitli maden v.b. ile doldurulmuş olması yeraltında geçirimsiz bir perdenin oluşmasına, bu perdenin iki tarafında farklı hidrostatik basınçlı bölgelerin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Yeraltı suyunun varlığı, yeraltını karakterize eden önemli unsurlardan biridir. Tünel seviyesinde suya rastlanırsa, tünelin kazılmasının hem tasarım hem de inşaat aşamalarındaki süreci değişecektir. Yeraltı suyu çalışması, sırasıyla nicel ve nitel yaklaşımların kullanılması hem teknik hem de çevresel açıdan önemlidir. Şekil 4.10'da suyun yeraltı kazılarına etkisi gösterilmekte ve farklı senaryolar için açıklamalar yapılmaktadır.



Şekil 4.10: Kaya kütlesi süreksizliklerdeki (çatlaklardaki) suyun yeraltı kazılarına etkileri (Hodson, 1989'dan alıntılan Ulusay ve Sönmez, 2007)

a) Çatlaklardan su geliri, çatlağın/kaya kütlesinin yerindeki mekanik büyüklüklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Özellikle yerinde basınç dayanımı, σ_b , yerinde elastik modül, E_y , kohezyon, c_y değerlerindeki azalma ciddi boyutta olabilir. Kuru durumdaki içsel sürtünme açısı, ϕ , ıslak duruma göre birkaç derece - 2° ile 5° daha yüksek olabilir.

b) Süreksizlikler arasında dolaşan suyun basıncı yüksekse, çatlak düzeyine dik olarak etki eden normal gerilmenin büyüklüğünü önemli ölçüde azaltarak, kaya kütlesinin yenilme zarf eğrisine ait karakteristik büyüklükleri (kohezyon ve içsel sürtünme açısı) azaltmaktadır.

c) Çok yüksek normal gerilme altında bulunan süreksizliklerde ise dolgunsuz çatlaklar kapanarak, ortamın drenaj özelliklerini azaltmaktadır. Su drene olamadığı için tünel kazısı çevresindeki su basıncı artmaktadır.

- **Engel (Büyük Kaya vb.) (T10)**

Kum veya kil merccekleri, kayalar gibi engeller ve kaya / zemin sınırları arasındaki geçiş gibi anomalilerin varlığı tehlike kaynağıdır. Bu alanlarda riskleri azaltmak adına TBM kazılarında önemli ve hızlı değişiklikler gerektirmektedir (Zhao, 2007).

Eski su kuyularının ve insan yapımı yapıların varlığı da şehiriçi mekanize kazılarda sıkça karşılaşılan sorunlardandır. Burada su kuyularının tespiti ve haritalanması, arkeolojik yapıların ortaya çıkarılması adına jeofizik çalışmaların yapılması oldukça önem taşımaktadır.

- **Blok Kaya Düşme Potansiyeli (T11)**

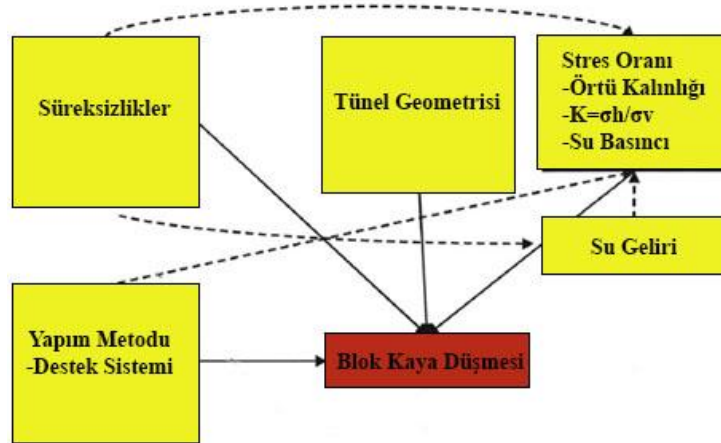
Bazı jeolojik formasyonlarda Şekil 4.11’de görüldüğü gibi tavan ile ayna arasındaki gevşemiş bloklar büyük bir problem oluşturabilir. Tavan için malzeme hasar görebilir ve aynada aşırı sökülmeler bölgesel duyarsızlıklara neden olabilir. Bir miktar enjeksiyon işlemi disk tarafından kesim esnasında blokların yerinde kalmasını sağlar ve sorunsuz ilerleme sağlanabilir.



Şekil 4.11: Gevşemiş blokların ayna ile kesici arasında kalması (Kovari ve Ramoni, 2004)

Özellikle, farklı litolojilerde yaygın bir tabakalaşma ve geçiş ile kaya kütlelerinin içinde, tabakalaşma ve eklemlerin kesişimi, blokların serbest bırakılması için gerekli koşulları oluşturabilir (karmaşık kaya kütleleri, örneğin; iri taneli / ince taneli kireçtaşı geçişi). Bu duraysızlıklar, tünel istikameti ve tabakaların duruşu arasındaki ilişkiye bağlı olarak kayma ve düşme olaylarını içerebilirler (Şekil 4.12).

Bir kaya düşmesi kayan veya düşerek ayrılan bir bloktan oluşur. İlgili farklı mekanizmalar kama veya düzlemsel yenilmelerdir. Olumsuz jeoloji, kaya düşmesinin mekanizmalarının ana nedenidir. Bu, kayadaki süreksizlikleri, kayadaki yıpranmış ve zayıf bölgeleri içermektedir.



Şekil 4.12: Blok kaya düşmesine etken parametreler (Sousa, 2010'dan değiştirilerek)

- **Kemerlenme (T12)**

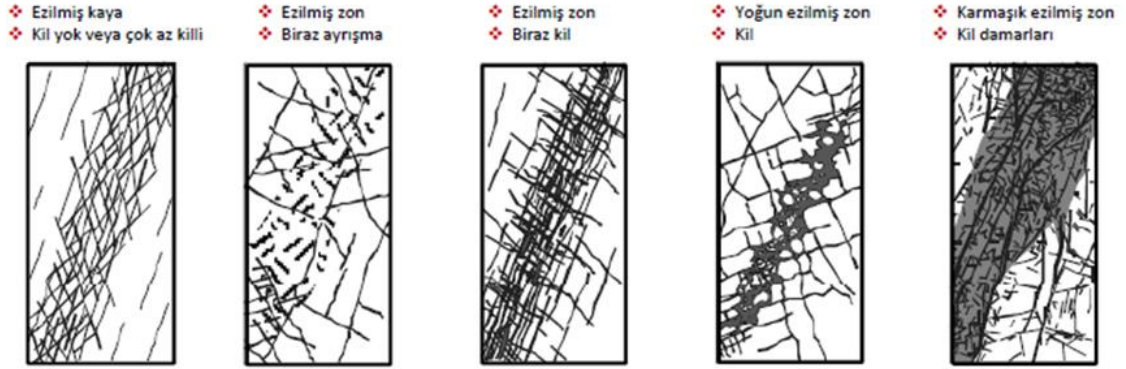
Tünel içi gerilmelerine bağlı, kayaların tünel boşluğuna doğru yönelme isteğine karşın kayaların birbirlerine destek olarak denge kurmaları durumudur. Kemerlenme, tavandaki kayaların yapısal durumu, litolojisi, içindeki makaslama ve gerilme kuvvetleri, basınç dirençleri ve büyüklüğü ile ilişkilidir. Faylanmış bölgelerde kayalar ezilmiş ve parçalanmış olduğundan bu bölgelerde kemerlenme az, aşırı sökülme fazla olmaktadır. Kum ve çakılların kemerlenme özelliği yokken, sert killerin kemerlenme süresi bir gündür.

- **Fay Zonu / Ezik Zon (T13)**

Fay zonları, çevre zeminden daha düşük kaliteli malzemelerden, daha az geçirgen malzemeden, yeraltı suyuna baraj görevi gören diğer maddelerden oluşur. Bu nedenle tünel ezik zona ulaştığında, büyük miktarda malzeme ve su tarafından istila edilebilir. Fayların iki tarafındaki farklı hidrodinamik basınçlar tünellerde su patlamalarına neden olabilir. Bu durumda gerekli önlemler alınmalıdır. Aksi takdirde bahsedilen olaylar tünelin çökmesine neden olabilmektedir.

Tünel açılan yerdeki fayların aktif durumda olması zaman zaman tünele zarar verir. Bu zonların güçlü biçimde desteklenmesi gerekir.

Faylanmış bölgelerde kayalar gevşemiş durumdadır. Bu gibi yerlerde tünel açılırken kemerlenme az; aşırı sökülme ise fazla olur. Milonit zondaki killeri su alarak hacim genişlemesi sonucu tünelde kabarmalara neden olurlar (Şekil 4.13).



Şekil 4.13: Fay ve ezik zonların tünel stabilitesine etkileri (Stille ve Palmström, 2008)

- a) Çatlaklı yapısı nedeni ile kaya kütlelerinin yerinde mekanik büyüklükleri daha küçüktür. Çatlak dolgusunun olup olmama durumuna göre su geliri söz konusudur.
- b) a' daki durum geçerlidir. Bozunma zonlarının varlığı nedeni ile yerinde dayanımlar daha da azalır. Bu zonların içinde yapılan kazılarda radyal yer değiştirme / kapanma hareketleri belirgindir.
- c) b maddesinde söylenenler geçerlidir. Kil mineralinin cinsine ve zon içerisindeki kapsadığı alana bağlı olarak tünel cidar kapanmaları daha şiddetlidir. Bu hareketler zaman boyutuna bağlı olarak artar (bu tür ortamlardaki deformasyon özellikleri sünme özelliğindedir).
- d) c maddesinde söylenenler geçerlidir.
- e) Bu tür zonlarda tünel deformasyonlarına (radyal cidar yer değiştirmesi / kazı yarıçapı) bağlı olarak çok ciddi stabilite sorunları yaşanır. Killi kesim bütün ayrışma zonunu kapsadığından dolayı yeraltı suyunun drenajı tam olarak sağlanamaz. Bu durumda tünel destek sistemine ek olarak büyük ölçekte su basıncı etki etmektedir.

- **Kavlama / Kabarma (T14)**

Masif, sert ve gevrek kaya ortamında, orta – yüksek gerilme altında tünel duvarlarından veya tavandan ince ve levhamsı kaya parçalarının ani ve şiddetli kopması durumu kavlama olarak tanımlanmaktadır.

- **Yüksek Dayanım (T15) ve Düşük Dayanım (T16)**

Q ve RMR sınıflama sistemine göre iyi ve çok iyi grubunda yer alan sağlam, süreksizliği az ve homojen kayalarda tünele istenilen çap ve şekil verilebilir, ancak yüksek dayanım sebebiyle tünelde ilerleme yapmak oldukça zordur.

Q ve RMR sınıflama sistemine göre zayıf ve çok zayıf grupta yer alan kayalarda tünel stabilitesini sağlamak oldukça güçtür. Bu tür kayalarda ayrışma derecesi de oldukça önem taşırken, Bu tür kayalarda tünelcilikte ek tahkimat sistemlerine ihtiyaç duyulabilmektedir.

- **Aşındırıcılık (T17)**

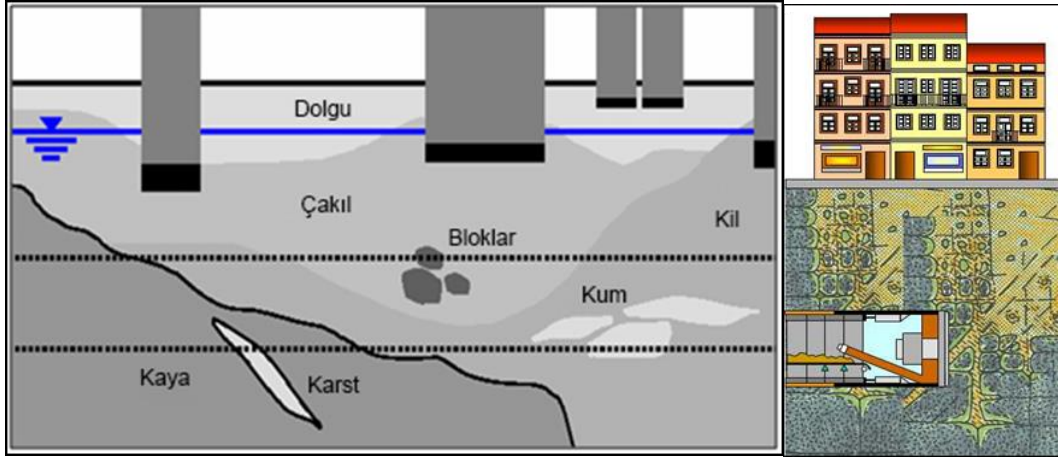
Bir TBM'nin kesici kafası, tünel aynasını kazmak için farklı kesici takımlarla donatılmıştır. Tünel kazısı süresince, kesici aletler doğal olarak aşınır ve sonunda değiştirilmelidir. Kesici takım aşınması oranı, öncelikle kuvars içeriği, tane büyüklüğü ve jeolojik birimin kayma dayanımı ile ilgili olan aşınmasının bir fonksiyonudur (Köppl ve diğ., 2015).

- **Karma Ayna (T18)**

Bu tür alanlarda stratigrafik ve jeoteknik bağlamın karmaşıklığından dolayı tasarım ve / veya yapım aşamasında yorumlayıcı zorluklar ortaya çıkabilir. Bu durum, tünellerin (TBM ve konvansiyonel yöntemlerle açılan tüneller için), istasyonların, şaftların, bağlantı tünellerinin, aç - kapa yapılarının vb. inşaatını farklı şekillerde etkilemektedir. En önemli zorluk, TBM kullanımında aynadaki destek basıncının korunmasında zorlukların ortaya çıkabileceği, heterojen bir kazı yüzünün (karma ayna) bulunduğu kazı ile ilgilidir.

Söz edilen karma jeolojik koşullar aşağıda belirtilen durumları kapsamaktadır (Şekil 4.14).

- Farklı litoloji geçişleri
- Kaya blokları / birimleri içerisine gömülü zeminler
- Zayıf kaya kütlelerinden zeminlere öngörülemeyen geçişler
- Farklı türdeki zeminler arasında sürekli geçişler (tüm özellikleri dikkate alınarak: granülometri, doku, yoğunluk / kıvam vb.)
- Ayrışmış ve ayrışmamış kaya geçişleri
- Farklı hidrojeolojik koşullar arasındaki geçişler (su tablasının altında / üstünde, kil bakımından baskın yataklar içerisinde gömülü basınçlı mercerler vb.)



Şekil 4.14: Karışık ayna koşullarına şematik örnekler (Geodata, 2001 ve Kovari, 2004).

- **Tabanda Kirlenme (T19)**

Marn tipi kayalarda su ile birlikte tabanın bataklık halini alması ve özellikle NATM kazılarında ilerlemenin azalması ve makinaların tünelde ilerlemesine direkt etki etmektedir. Bu tip bölgelerde suyun drene edilmesi oldukça önem taşımaktadır.

- **Zehirli Gazlar (T20)**

Su buharı ve SO_2 , H_2S , CH_4 , CO_2 gazları tünellerde en çok rastlanan gazlardır. Bunlar gaz cepleri veya gaz boşluklarında bulunmaktadır. Yerlerinin tahmin edilmesi pek mümkün değildir.

CH_4 (Metan) %3,5-19,5 oranda hava ile karıştığında ve ateşle temas halinde patlama olur. Bu durum grizu olarak bilinmektedir. Metan gazına tüm kömürlü bölgelerde ve bitümlü şist alanlarında cepler şeklinde rastlamak olasıdır.

CO_2 : Magmatik alanlarda volkanizmanın son ürünü olarak çıkabilmektedir. Ayrıca kömür tabakalarında bunların yanmasıyla oluşur. CO_2 , çelik ve beton tünel kaplamalarında aşındırıcı etki yapmaktadır.

CO (Karbonmonoksit): Havadan hafiftir ve zehirlidir. Kömür havzalarında görülür

H_2S : Havada %1'den az orandaki karışımı zehirleyici olmaktadır. % 6'dan fazla olduğunda patlar. Mineralli ve sıcak sularda karşılaşılabılır.

SO_2 : Volkanik bölgelerde bulunur. Betona çok etkir.

4.2.2. Risk Formülasyonu

Çalışma kapsamında Risk Değerlendirme Karar Matrisi ve Analitik Hiyerarşi Prosesi için kullanılan puanlamalar, alanındaki uzmanların görüşleri ve literatür taramaları sonucu yazar tarafından ampirik formüllere dayanarak önerilmektedir. Kullanılan metodların işleyiş süreci ve elde edilen bulgular aşağıda verilmektedir.

4.2.2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

AHP, öğeleri arasında karmaşık ilişkiler olan sistemlere ait karar mekanizmalarında sistemi, alt seviyeleriyle bağlantılı hiyerarşik bir yapı yardımıyla sade bir biçimde ifade ederek mantıksal ve sezgisel düşünceyle incelemektedir. AHP, kişileri nasıl karar vermeleri noktasında bir yöntem kullanmaya zorlamaktan çok, onlara kendi karar verme sistemlerini tanıma olanağı sağlamakta ve bu sayede daha iyi kararlar vermelerini hedeflemektedir (Saaty, 1986).

Analitik Hiyerarşi Prosesi ile çözümlenebilmesi için uygulanması gereken adımlar aşağıda tanımlanmaktadır. Her adımda, ilgili formülasyonla birlikte gerekli açıklamalar yapılmaktadır.

Adım 1: Tünelcilik açısından etkiler tanımlanır.

Burada tünelcilik açısından etkiler belirlenmektedir. Sonucu etkileyebilecek faktörlerin detaylı tanımlarının yapılması ve sayısının doğru belirlenmesi her faktörün ikili karşılaştırmalarının mantıklı ve tutarlı yapılabilmesi açısından oldukça önem taşımaktadır.

Adım 2: Etkiler Arasında Karşılaştırma Matrisi Oluşturulur

Etkiler arasında karşılaştırma matrisi, $n \times n$ boyutlu bir adet kare matris olarak tanımlanmaktadır. Belirlenen matrisin köşegeni üzerindeki matris öğeleri 1 değerini almaktadır. Oluşturulan örnek karşılaştırma matrisi aşağıda gösterilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Karşılaştırma matrisinin köşegeni üzerindeki ögeler, $i = j$ olduğunda, 1 değerini almaktadır. Bu durumun nedeni ilgili faktörün kendisiyle karşılaştırılmasıdır. Faktörlerin karşılaştırılması, birbirlerine göre sahip oldukları önem derecelerine göre yapılmaktadır. Faktörlerin birebir karşılaştırılmasında Tablo 4.5'teki önem skalası kullanılmaktadır.

Tablo 4.5: Önem skalası değerleri

Değer	Tanım	Açıklama
1	Eşit Önemli	İki seçenek eşit derece öneme sahiptir
3	Biraz Önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı biraz üstün kılmakta
5	Fazla Önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı oldukça üstün kılmakta
7	Çok Fazla Önemli	Bir kriter diğerine göre üstün sayılmıştır
9	Aşırı Derece Önemli	Bir kriterin diğerinden üstün olduğunu gösteren kanıt çok büyük güvenilirliğe sahiptir
2,4,6,8	Ara Değerler	Birbirine yakın tercih durumları olduğunda kullanılır

Karşılaştırmalar, matrisinin tüm değerleri 1 olan köşegeninin üstünde kalan değerler için yapılmaktadır. Köşegenin altında kalan bileşenler için (4.1) formülünün kullanılması yeterli olmaktadır.

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (4.1)$$

Örnek verilecek olursa; birinci faktörün üçüncü faktöre göre öneminin daha yüksek olduğu düşünülüyorsa, karşılaştırma matrisinin birinci satır üçüncü sütunu ($i = 1, j = 3$), 3 değerini alacaktır. Bir başka durumda yani birinci faktörün üçüncü faktörle karşılaştırılmasında, daha önemli tercihi üçüncü faktörden yana kullanılacaksa bu durumda karşılaştırma matrisinin birinci satır üçüncü sütun bileşeni 1/3 değerini alacaktır.

Adım 3: Etkilerin Yüzdesel Önem Dağılımları Belirlenir

Karşılaştırma matrisi, etkilerin birbirlerine göre önem düzeylerini belirli bir mantık içerisinde göstermektedir. Ancak bu etkilerin tüm sistem içerisindeki ağırlıklarını, yani yüzde önem dağılımlarını belirlemek için, karşılaştırma matrisini oluşturan sütun vektörlerinden yararlanılır. Bu hesabın yapılabilmesi için n adet, n bileşenli B sütun vektörü oluşturulmalıdır.

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n1} \end{bmatrix}$$

B sütun vektörlerinin hesaplanması adına (4.2) formülü kullanılmalıdır.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (4.2)$$

Değerlendirme faktörlerinin birbirleri arasındaki karşılaştırmalarını gösteren A karşılaştırma matrisi aşağıdaki gibi tanımlanmış ve vektörü hesaplanmak istendiğinde;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

B_1 vektörünün b_{11} elemanı, $b_{11} = \frac{1}{1+3+0,2}$ şeklinde hesaplanmaktadır.

B_1 vektörünün diğer elemanları hesaplandığında, vektör aşağıdaki gibi elde edilebilir ve sütun vektörünün bileşenleri toplandığında toplam değerin 1 olduğu görülebilir.

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0,238 \\ 0,714 \\ 0,048 \end{bmatrix}$$

Yukarıda bahsedilen aşamalar diğer değerlendirme faktörleri için uygulandığında faktör sayısınca B sütun vektörü elde edilmektedir. n adet B sütun vektörü, bir matris formatında bir araya getirildiğinde aşağıda verilen C matrisi oluşturulacaktır.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix}$$

Örneğe göre bakılacak olursa C matrisi aşağıdaki gibi oluşmaktadır.

$$C = \begin{bmatrix} 0,238 & 0,210 & 0,500 \\ 0,714 & 0,632 & 0,400 \\ 0,048 & 0,158 & 0,100 \end{bmatrix}$$

C matrisi kullanılarak, faktörlerin birbirleri arasındaki önem değerlerini gösteren yüzde önem dağılımları elde edilebilir. Bunu yapabilmek için (4.3) formülünde gösterildiği üzere C matrisini oluşturan satır bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınır ve W sütun vektörü (öncelik vektörü) elde edilir.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (4.3)$$

W vektörü ve yukarıda verilen örneğe ait önem sonuçları aşağıda gösterilmiştir.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} \frac{0,238+0,210+0,500}{3} \\ \frac{0,714+0,632+0,400}{3} \\ \frac{0,048+0,158+0,100}{3} \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} 0,32 \\ 0,58 \\ 0,10 \end{bmatrix}$$

Adım 4: Faktör Kıyaslamaları Arasındaki Tutarlılık Seviyesi Ölçülür

Proses kendi içinde tutarlı bir sistematığe sahiptir ancak sonuçların gerçekçiliği doğal olarak, karar vericinin faktörler arasında yaptığı birebir karşılaştırmadaki tutarlılığa bağlıdır. Bu karşılaştırmalardaki tutarlılık düzeyinin ölçülebilmesi için ek bir çalışma daha sunmaktadır. Sonuç olarak tutarlılık oranı (CR), öncelik vektörünün etkiler arasında yapılan birebir karşılaştırmalarında tutarlılığın test edilebilme olanağını sunmaktadır. AHP, CR hesaplamasının temelini, temel değer adı verilen (λ) bir katsayının faktör sayısı ile karşılaştırılmasına dayandırmaktadır. λ 'nın hesaplanması için öncelikle A karşılaştırma matrisi ile W öncelik vektörünün matris çarpımından D sütun vektörü elde edilmelidir.

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix}$$

(4.4) formülünde gösterildiği üzere, bulunan D sütun vektörü ile W sütun vektörünün karşılıklı elemanlarının bölümünden her bir değerlendirme faktörüne ilişkin temel değer (E) elde edilir. Değerlerin aritmetik ortalaması (4.5) formülü yapılan karşılaştırmaya ait temel değeri (λ) verir.

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.4)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (4.5)$$

λ değeri hesaplandıktan sonra tutarlılık göstergesi (CI), (4.6) formülünden yararlanılarak hesaplanabilir.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (4.6)$$

Son olarak tutarlılık göstergesi (CI), rastgele gösterge (RI) olarak tanımlanan ve Tablo 4.6’ da verilen standart düzeltme değerine bölünerek (4.7) formülü, tutarlılık oranı (CR) elde edilir.

Tablo 4.6: Rastgele gösterge değerleri (RI)

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.7)$$

Bulunan CR değerinin 0.10’den küçük olması durumunda, çalışmayı yapan kişinin yaptığı karşılaştırmaların tutarlı olduğuna, CR değerinin 0.10’ dan büyük olması proste karar vericinin karşılaştırmalarındaki tutarsızlığına veya bir hesaplama hatasına işaret etmektedir.

Yukarda verilen sürece ait adımlar Microsoft Excel yazılımında formülize edilerek hesaplanmıştır. Bu kapsamda daha önce Tablo 4.3 tanımlanan ve 4.2.1. Tehlikelerin Tanımlanması bölümünde açıklanan tehlikelerin tünelcilik açısından etkileri (ayna duraysızlığı, ilerlemenin azalması, zemin kaybı, tünel konverjans ve çökme / göçük) hesaplanarak etkilerin kendi aralarındaki hiyerarşik öncelikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda Tablo 4.7’de etkilerin önem değerleri, Tablo 4.8’de ise etkilerin yüzdesel dağılımları verilmektedir.

Tablo 4.7: Tünelcilik açısından tehlikelere bağlı etkilerin önem değerleri

Karşılaştırmalar	Ayna Duraysızlığı	İlerlemenin Azalması	Zemin Kaybı	Tünel Konverjans	Çökme / Göçük
Ayna Duraysızlığı	1.000	5.000	0.500	5.000	0.250
İlerlemenin Azalması	0.200	1.000	0.166	2.000	0.125
Zemin Kaybı	2.000	6.024	1.000	8.000	0.500
Tünel Konverjans	0.200	0.500	0.125	1.000	0.125
Çökme / Göçük	4.000	8.000	2.000	8.000	1.000
TOPLAM	7.4	20.52409639	3.791	24	2

Tablo 4.8: Etkilerin öncelik oranı yüzdeleri

Karşılaştırmalar	Ayna Duraysızlığı	İlerlemenin Azalması	Zemin Kaybı	Tünel Konverjans	Çökme / Göçük	Kümülatif Toplam	Kriter Ağırlığı (W)	Normalleştirilmiş Yüzde veya Öncelik Oranı Yüzdesi
Ayna Duraysızlığı	0.135135135	0.243616085	0.131891322	0.208333333	0.125	0.843975875	0.168795175	16.87951749
İlerlemenin Azalması	0.027027027	0.048723217	0.043787919	0.083333333	0.0625	0.265371496	0.053074299	5.30742992
Zemin Kaybı	0.27027027	0.293513355	0.263782643	0.333333333	0.25	1.410899602	0.28217992	28.21799203
Tünel Konverjans	0.027027027	0.024361608	0.03297283	0.041666667	0.0625	0.188528133	0.037705627	3.770562651
Çökme / Göçük	0.540540541	0.389785735	0.527565286	0.333333333	0.5	2.291224895	0.458244979	45.82449791
TOPLAM	1	1	1	1	1	5		

Tablo 4.8’de belirtildiği üzere tehlikeler sonucu ortaya çıkabilecek etkilerin sonuçları kendi aralarında kıyaslandığında %45,82 ile çökme / göçük en önemli etkiye sahip olurken %3,77 tünel konverjans en düşük etkiye sahiptir.

Bulunan sonuçların adım 4’te belirtildiği üzere tutarlı olup olmadığına bakıldığında ise CR değeri % 3,465 bulunarak sürecin kendi içinde tutarlı olduğu kanıtlanmıştır.

Eskenen ve diğ. (2004)’ e göre etkilerin (sonuçların) beş aralık halinde sınıflandırılması önerilmektedir. Hiyerarşik öncelik oranından yola çıkılarak önerilen etki puanı ve etki düzeyi Tablo 4.9’da verilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken konu, ilerlemenin azalması olarak tarif edilen etkinin tali olarak diğer etkilere eklenerek birlikte değerlendirilecek olmasıdır.

Tablo 4.9: Etki puan ve düzeyi tablosu

Etki Düzeyi	Etki Puanı	Hiyerarşik Öncelik Oranı (%)
Çok Yüksek	5	>50
Yüksek	4	31 – 50
Orta	3	16 – 30
Düşük	2	6 – 15
Çok Düşük	1	0 – 5

Önerilen etki puanı 4.2.2.2. Risk Değerlendirme Karar Matrisi bölümünde anlatılan risk puanının belirlenmesi aşamasında kullanılmaktadır. Risk hesaplamasında aynı tehlikenin muhtemel birçok etkisi olması durumunda, hangi etki düzeyinin kullanılması gerektiği; yapım metodu, tünel tipi ve tünel derinliği unsurları dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu bağlamda kullanılması önerilen etki seçim parametreleri ve puanlama sistemi Tablo 4.10’da verilmektedir.

Tablo 4.10: Etki düzeyi seçiminde tünel özellikleri ve karakteristik katsayılar

Etki Seçim Parametreleri		
Tünel Özellikleri (Bk)	Karakteristik Katsayı (Kk)	
Yapım Metodu (1,00)	NATM (2,00)	TBM (1,50)
Tünel Tipi (1,00)	Makas (1,75)	TBM Tüneli (1,25)
	Peron (1,50)	
	A Tipi (1,25)	
Tünel Derinliği (0,50)	0 - 10 m (2,00)	0 - 10 m (3,00)
	10 - 20 m (1,50)	10 - 20 m (2,50)
	20 - 30 m (1,00)	20 - 30 m (2,00)
	>30 m (0,50)	>30 m (1,50)

Tablo 4.10’da verilen tünel özellikleri ve karakteristik katsayı değerlerine bağlı, (4.8) formülünden yararlanarak bulunan etki çarpanı kriteri (m) sayesinde aynı tehlikenin birden fazla etki düzeyine ilişkin hangi düzeyin seçileceğine karar verilmektedir. m değerine bağlı referans aralıkları Tablo 4.11’de verilmektedir.

$$m = \sum (Bk * Kk) \quad (4.8)$$

Tablo 4.11: Etki çarpanı kriteri referans aralıkları

m	Değerlendirme
> 4,00	Maksimum
3,50 – 4,00	Orta
≤ 3,50	Minimum

Yukarıda bahsedilen hususlar dikkate alınarak bir örnek verilecek olursa; akan – akıcı zemin tehlikesi taşıyan bir bölgede tünelcilik açısından etkiler ayna duraysızlığı, zemin kaybı – oturma ve çökme / göçük olarak tanımlanmaktadır. Analitik hiyerarşi prosesi sonucunda bu etkilerin kendi aralarındaki önem sırası orta, yüksek ve çok yüksek olarak hesaplanmaktadır. Risk hesabında bu derecelerin hangisinin kullanılacağı m değerine göre hesaplanırsa, 15 metre derinlikteki makas tüneline m değeri 4,50, peron tüneline 4,25, A tipi hat tüneline ve TBM tüneline 4,00 olarak bulunmaktadır. Buna göre aynı derinlikte farklı tüneller için risk hesabı yapıldığında, m değeri 4,00’ten büyük olan makas ve peron tünelleri için maksimum etki düzeyinin seçilmesi, diğer tünellerde orta seviye etki düzeyinin seçilmesi önerilmektedir.

4.2.2.2. Risk Değerlendirme Karar Matrisi

Risk değerlendirme karar matrisi ABD askeri standardı (DoD,2000) MIL-STD_882-D olarak da bilinen sistem güvenlik program gereksinimlerini karşılamak amacıyla geliştirilmiş olup, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi analiz etmekte amacıyla kullanılmaktadır. L Tipi Matris (LTM) metodunda tehlikelerin oluşma olasılığı ile tehlikenin sonucu arasındaki ilişki analiz edilmektedir (Department of Defence, 2000; Koltan ve diğ., 2010).

Çalışma kapsamında tünelcilik açısından etki kavramının Analitik Hiyerarşi Prosesi kullanılarak hesaplandığı ve buna bağlı etki puanlamasının esasları önceki bölümde anlatılmaktadır. Olasılık çarpanı ise temelde modelleme üzerine kurgulanan ayna haritaları üzerinden hesaplanmaktadır. Burada sondaj verilerinin aynaya yakın ya da uzak olma durumuna göre gerçekte karşılaşılabilecek ihtimali üzerine varsayımsal bir öneri sunulmaktadır. Bu durum r yarıçapındaki bir alanda bulunan sondajın aynaya mesafesinin olasılık tablosunda nicelleştirilmesiyle sağlanmaktadır. Önerilen sınıflama Tablo 4.12’de verilmektedir.

Tablo 4.12: Tahmini ayna haritasının gözlenme olasılığı

Olasılık Düzeyi	Olasılık Puanı	En Yakın Sondaja Uzaklık
Çok Yüksek	5	0 – 25 m
Yüksek	4	25 – 50 m
Orta	3	50 – 75 m
Düşük	2	75 – 100 m
Çok Düşük	1	>100 m

Analitik Hiyerarşi Prosesi sonucu elde edilen etki ve sondajlara bağlı olasılık faktörlerinin risk formülüne göre çarpılması ile belirli bir aralık için "1" ile "25" arasında bir risk değeri bulunmaktadır. Hesaplanan risk değerleri, düşükten en yükseğe doğru sıralanarak, nicel olarak ifade edilebilmektedir. Tablo 4.13’te risk formülünün uygulanması sonucunda bulunan risk seviyesi ve riskin hangi nicel değeri temsil ettiği gösterilmektedir.

Risk sınıflandırma tablosunda gösterilen değerler; risk cetveli (Bkz. EK-2) ve risk haritası (Bkz. EK-3) bölümünde riski ifade etmek amacıyla kullanılmaktadır.

Tablo 4.13: Risk matrisi puan sistemi

		ETKİ						
OLASILIK		1	2	3	4	5	RISK	
	5	5	10	15	20	25	Çok Yüksek	
	4	4	8	12	16	20	Yüksek	
	3	3	6	9	12	15	Orta	
	2	2	4	6	8	10	Düşük	
	1	1	2	3	4	5	Çok Düşük	

Tablo 4.14’te ise, risk sınıflandırma tablosundan elde edilen nicel sonuçların kabul edilebilirlik sınırları ve uygulanması gereken eylemler nitel olarak gösterilmektedir (Stoneburner, 2002; Koltan ve diğ., 2010; Kuzucuoğlu, 2014).

Tablo 4.14: Risk sonuçlarının kabul edilebilirlik değerleri

Sonuç	Tanım	Eylem
Çok Yüksek	Kabul Edilemez Risk	Tespit edilen risk kabul edilebilir seviyeye düşürülünceye kadar faaliyet başlatılmamalı, devam eden faaliyet durdurulmalıdır. Önlem planlarına göre risk seviyesi düşmüyorsa faaliyet engellenmelidir.
Yüksek	Önemli Risk	Risk azaltılınca kadar iş başlatılmamalı, devam eden faaliyet varsa durdurulmalıdır. Risk için devam etmesi ile ilgiliyse acil önlem alınmalı ve bunun sonucunda faaliyetin devamına karar verilmelidir
Orta	Orta Düzey Risk	Belirlenen riskleri düşürmek için faaliyetler başlatılmalıdır. Risk azaltma önlemleri zaman alabilir.
Düşük	Kabul Edilebilir Risk	Belirlenen riskleri ortadan kaldırmak için ilave kontrol tedbirlerine ihtiyaç olmayabilir. Ancak mevcut kontroller sürdürülmeli ve bu kontrollerin sürdürüldüğü denetlenmelidir.
Çok Düşük	Önemsiz Risk	Belirlenen riskleri ortadan kaldırmak için kontrol tedbirleri planlamaya ve gerçekleştirilecek faaliyetlerin kayıtlarını saklamaya gerek yoktur.

4.2.3. Risk Cetveli ve Risk Haritası

Yukarıda anlatılan tüm adımların sonuçları, çalışma güzergâhı boyunca 250 metrelik bölümler halinde oluşturulan tehlikelere bağlı risk cetveli (Bkz. EK-2) ve tüm inceleme güzergâhına ait risk haritası (Bkz. EK-3) ekler bölümünde verilmektedir.

4.2.4. Güzergâh Değerlendirmesi

Mevcut ve literatür çalışmalarından elde edilen bilgiler sonucunda; Güngören killeri ile Gürpınar killeri yapışkan ve şişme özelliğine sahiptir. Çukurçeşme birimine ait kumlar siltli, ince taneli, yarı geçirimli olup belirgin şekilde akıcı - akan zemin potansiyeli taşırken, kesit dışı kazılara sebep olan sökülme tehlikesinin görülmesi olasıdır. Ceylan Formasyonu'na ait kireçtaşı ve marn gibi litolojilerde karstik boşluk ve su gelirine dikkat edilmelidir. TBM kazılarında ise karma ayna koşulları stabilite sorunlarına sebep olabilmektedir.

Km 5+750 – 6+350 arasında tünel kazısının Ceylan Formasyonu ve Çukurçeşme kumları içinde yapılması beklenmektedir. Tünel üstünde bulunan örtü kalınlığı 20 – 30 m, su sütunu kalınlığı ise 5 – 20 m civarında değişkenlik göstermektedir. Bu kilometreler arasında yeraltı suyu, karışık zemin, akıcı kum, stabilite sorunları ve killerde yapışkanlık problemleri ile karşılaşılabilir.

Km 6+350 ile 9+750 arasında tünel üstündeki örtü kalınlığı 15 – 35 m, yeraltı su seviyesi ise tünel kırmızı kotuna göre -10 ile 25 m arasında değişkenlik göstermektedir. Tünel kazıları ya üst yarı, ya alt yarı veya tümü ile Güngören ya da Gürpınar killeri içinde kalacaktır. Söz konusu killer genel olarak orta – yüksek plastisiteli olup yapışkanlığa meyilli veya yapışkan davranış gösterebilir.

Km 6+100 – 7+750 ve Km 8+100 – 9+500 arasında üst yarı, alt yarı ya da tüm aynada karşılaşılacak Çukurçeşme kumları yer yer bolca siltli ve ince taneli olup düşük geçirimliliğe sahiptirler. Bahsedilen bu kumların tünel kazı kotlarında genel olarak suya doygun olması beklenmektedir. Bu iki koşul nedeniyle tünel kazıları sırasında akan zemin problemi ile karşılaşılabilir. Bu alanlarda suyun uzun süre ince malzeme taşıyarak drene olması da yüzey deformasyonlarına sebebiyet verebilir. TBM ve NATM kazılarında bu husus dikkate alınarak kontrollü kazı yapılmalıdır.

Risk puanlaması yapılan alanlardan Km 5+950 – 6+090 (Hat-1'e göre) arasında inşa edilecek istasyon ve Km 7+080 – 7+410 arasında inşa edilecek istasyon ve makas tünelleri yüksek - çok yüksek risk grubunda yer almaktadır (Bkz. EK-2 ve EK-3).

Km 8 +070 – 8+210 arasında inşa edilecek istasyonda formasyon bazlı değişikliklerden dolayı bir bölüm yüksek riskli grupta bulunmaktadır (Bkz. EK-2 ve EK-3).

TBM ile açılacak hat tünelleri orta riskli grupta yer alırken yer yer haritada yüksek riskli alan olarak tanımlanan kısımlar, olasılık çarpanının yüksek değerine bağlıdır. Bu bölümlerde risk cetvelindeki etki unsuru dikkate alınarak risk düzeyinde düzeltme yapılabilir.

Risk haritasında gri renki olarak görülen alanlar aç – kapa yöntemi ile inşa edileceğinden risk hesabına katılmamıştır.

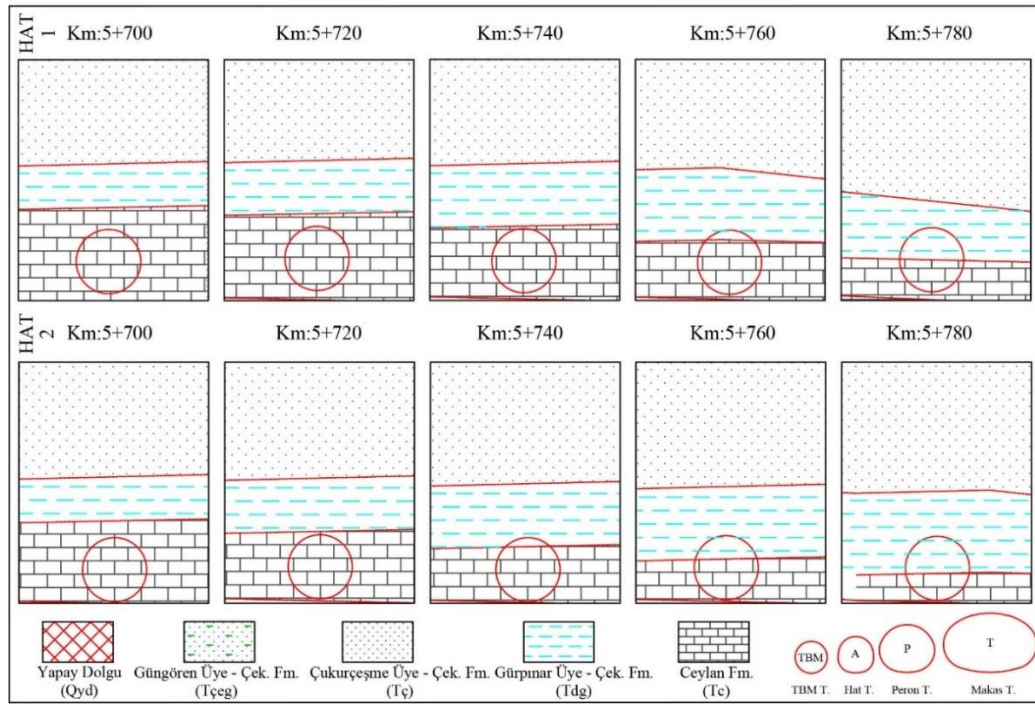
Risk haritasında sarı renkli alanlar sondaj aralıklarının çok fazla olduğunu ve ek çalışma gerekliliğini belirtmektedir. Bu alanlar, ek çalışma yapılmadığı takdirde risk cetvelindeki etki kısmı dikkate alınarak risk düzeyinde düzeltme yapılabilir.

Yoğun kentleşme ve neredeyse tamamen zeminle örtülü olmalarından dolayı makaslanma ve/veya kırıklı zonların belirlenmesi oldukça güçtür. Bununla birlikte, bugün hala çeşitli ölçekte aktif deformasyona tanık olduğumuz İstanbul bölgesinin uzun tektonik geçmişi ele alındığında, güzergâh boyunca bazıları halen potansiyel aktif yumuşak / zemin örtüsünü kesmiş bu fayların ve uyumsuzlukların varlığı beklenmektedir. Bazı temel kazıları, Marmara Bölgesinin son açılma tektoniği ile ilişkili KB-GD normal faylarını ortaya çıkarmıştır.

Bu kapsamda jeolojik modelde de gösterildiği üzere çalışmanın kuzeye en yakın ve orta bölgesinde birbirine yakın sondajlardaki uyumsuz seviyeler dikkate alındığında KB-GD doğrultulu normal fayların olabileceği düşünülmektedir. Bu görüş, İBB DEZİM (2007) çalışmalarında da yer almaktadır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yürütülen çalışmada 3 boyutlu modelleme ve jeolojik – jeoteknik risk kavramları ayrı ayrı çalışıldıktan sonra sentezlenerek sonuçlandırılmıştır. Bu kapsamda daha önce gerçekleştirilmiş sondajlar, jeolojik haritalamalar, jeolojik kesitler Autodesk Civil3D Geotechnical Module 2018 yazılımı aracılığıyla revize edilerek 3 boyutlu jeolojik model yapılmış ve Şekil 5.1’de örneği görüldüğü üzere güzergâh boyunca tahmini ayna haritaları (Bkz. EK-1) çıkartılmıştır.



Şekil 5.1: İnceleme güzergâhı boyunca oluşturulan tahmini ayna haritalarına bir örnek

Tez kapsamının temelini oluşturan modellemede kullanılan jeolojik araştırma logları ve diğer veriler, belirlenen yerlerin dışında değişiklik gösterebilirler. Bu yüzden, loglardaki ya da bu çalışmadaki bilgilerin araştırma noktaları dışındaki ve çevresindeki koşullar için tam bir kesinliği söz konusu olamaz ve bunlar belli ölçülerde yorum ve yaklaşımlar olup, yeraltı koşulları açısından genel bir yol gösterici olarak kabul edilmelidir.

Arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve bunlardan elde edilen sonuçları kapsayan raporlar aracılığıyla güzergâhın jeolojik, hidrojeolojik ve mühendislik jeolojisi başlıkları detaylı olarak çalışılmış ve jeolojik – jeoteknik risk tanımları ve tehlike kaynakları bu çalışmalara bağlı kalınarak yapılmıştır.

Yapılan tüm analiz ve değerlendirmeler sonucunda örnek projeye ait güzergâhın jeolojik – jeoteknik risk haritası yapılarak çalışma sonlandırılmıştır.

Çalışmada tanımlanan temel riskler ve bunların kök sebepleri alanındaki uzmanlarla ve literatür taramalarıyla tespit edilmiştir. Belirlenen tehlikeler etki - olasılık kavramları çerçevesinde değerlendirilerek risk puanlaması (Bkz. EK-2) ve risk haritaları (Bkz. EK-3) oluşturulmuştur. Bu kapsamda risk puanlamasında kullanılan etki ve olasılık kavramları için 4.2.2. Risk Formülasyonu bölümünde anlatılan ampirik (deneysel) metodlar önerilmektedir.

Risk hesaplamasında kullanılan etki çarpanı için 4.2.1. Tehlikelerin Tanımlanması bölümünde açıklanan tehlikelerin tünelcilik açısından etkileri (ayna duraysızlığı, ilerlemenin azalması, zemin kaybı, tünel konverjans ve çökme / göçük) hesaplanarak etkilerin kendi aralarındaki hiyerarşik öncelikleri belirlenmiştir. Tanımlanan tehlikeler sonucu ortaya çıkabilecek etkilerin sonuçları kendi aralarında kıyaslandığında %45,82 ile çökme / göçük en önemli etkiye sahip olurken %3,77 tünel konverjans en düşük etkiye sahiptir. Eskesen ve diğ. (2004)' e göre etkiler (sonuçlar) beş aralık halinde sınıflandırılmaktadır. Hiyerarşik öncelik oranından yola çıkılarak önerilen etki puanı ve etki düzeyi Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo 5.1: Önerilen etki puanı ve etki düzeyi tablosu

Etki Düzeyi	Etki Puanı	Hiyerarşik Öncelik Oranı (%)
Çok Yüksek	5	>50
Yüksek	4	31 – 50
Orta	3	16 – 30
Düşük	2	6 – 15
Çok Düşük	1	0 – 5

Risk hesaplamasında aynı tehlikenin muhtemel birçok etkisi olması durumunda, hangi etki düzeyinin kullanılması gerektiği; yapım metodu, tünel tipi ve tünel derinliği unsurları dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu bağlamda kullanılması önerilen etki seçim parametreleri ve puanlama sistemi Tablo 5.2'de verilmektedir.

Tablo 5.2: Etki düzeyi seçiminde tünel özellikleri ve karakteristik katsayılar

Etki Seçim Parametreleri		
Tünel Özellikleri (Bk)	Karakteristik Katsayı (Kk)	
Yapım Metodu (1,00)	NATM (2,00)	TBM (1,50)
Tünel Tipi (1,00)	Makas (1,75)	TBM Tüneli (1,25)
	Peron (1,50)	
	A Tipi (1,25)	
Tünel Derinliği (0,50)	0 - 10 m (2,00)	0 - 10 m (3,00)
	10 - 20 m (1,50)	10 - 20 m (2,50)
	20 - 30 m (1,00)	20 - 30 m (2,00)
	>30 m (0,50)	>30 m (1,50)

Tablo 5.2’de verilen tünel özellikleri ve karakteristik katsayı değerlerine bağlı, (5.1) formülünden yararlanarak bulunan etki çarpanı kriteri (m) sayesinde aynı tehlikenin birden fazla etki düzeyine ilişkin hangi düzeyin seçileceğine karar verilmektedir. m değerine bağlı değerlendirme aralıkları Tablo 5.3’te verilmektedir.

$$m = \sum (Bk * Kk) \quad (5.1)$$

Tablo 5.3: Etki çarpanı kriteri referans aralıkları

m	Değerlendirme
> 4,00	Maksimum
3,50 – 4,00	Orta
≤ 3,50	Minimum

Risk hesaplamasında kullanılan olasılık çarpanı için temelde modelleme üzerine kurgulanan ayna haritaları üzerinden değerlendirme yapılmaktadır. Burada sondaj verilerinin aynaya yakın ya da uzak olma durumuna göre gerçekte karşılaşılabilmek ihtimali üzerine varsayımsal bir öneri sunulmaktadır. Bu durum r yarıçapındaki bir alanda bulunan sondajın aynaya mesafesinin olasılık tablosunda nicelleştirilmesiyle sağlanmaktadır. Önerilen sınıflama Tablo 5.4’te verilmektedir.

Tablo 5.4: Tahmini ayna haritasının gözlenme olasılığı

Olasılık Düzeyi	Olasılık Puanı	En Yakın Sondaja Uzaklık
Çok Yüksek	5	0 – 25 m
Yüksek	4	25 – 50 m
Orta	3	50 – 75 m
Düşük	2	75 – 100 m
Çok Düşük	1	>100 m

4.2.2.2. Risk Değerlendirme Karar Matrisi bölümünde tanımlanan, Analitik Hiyerarşi Prosesi sonucu elde edilen etki ve sondajlara bağlı olasılık çarpanlarının bileşkesinden "1" ile "25" arasında bir risk puanı bulunmaktadır. Hesaplanan riskler, düşükten en yükseğe doğru sıralanarak, nicel olarak ifade edilebilmektedir. Tablo 5.5'te risk formülünün uygulanması sonucunda bulunan risk seviyesi ve riskin hangi nicel değeri temsil ettiği gösterilmektedir.

Tablo 5.5: Risk matrisi puan sistemi

		ETKİ						
OLASILIK		1	2	3	4	5	RİSK	
	5	5	10	15	20	25	Çok Yüksek	
	4	4	8	12	16	20	Yüksek	
	3	3	6	9	12	15	Orta	
	2	2	4	6	8	10	Düşük	
	1	1	2	3	4	5	Çok Düşük	

Gerçekleştirilen çalışmaların temel amacı, tünelcilik faaliyetlerine direkt etki ettiği birçok çalışma tarafından ortaya koyulmuş jeolojik ve jeoteknik başlığı altında alt başlık olarak belirlenen tehlikelerin hem niteliksel hem de niceliksel bir değerlendirmesinin yapılmasıdır. Böylece tehlikelere bağlı ortaya çıkabilecek zararların daha net bir görüntüsü çıkarılabilmekte ve belirlenen risk senaryolarına göre müdahale kolaylığı sağlanmaktadır.

İstanbul Avrupa yakasının jeolojik koşulları bazı özgü bazı potansiyel tehlikeler içermektedir. Çalışma kapsamında, İstanbul Avrupa yakasında kaya ve zemin koşullarında gerçekleştirilmiş önceki çalışmalarda tecrübe edilmiş, daha önce farklı kaynaklarda değinilmiş jeolojik tehlikelerin tünelcilik açısından beraberinde getirdiği riskler açıklanmaktadır.

Çalışmanın ilgili kısımlarında güzergâhta karşılaşılması beklenen tüm zemin ve kaya seviyeleri, mühendislik ve tünel mühendisliği açısından değerlendirilerek potansiyel tehlikeler ortaya koyulmaktadır. Bu kapsamda; yapışkanlık, şişen zemin, akıcı – akan zemin, sökülme, karstik boşluk, yüksek su geliri ve karma ayna koşulları güzergâh için tanımlanan tehlikelerdir.

Km 5+750 – 6+350 arasında tünel kazısının Ceylan Formasyonu ve Çukurçeşme kumları içinde yapılması beklenmektedir. Tünel üstünde bulunan örtü kalınlığı 20 – 30 m, su sütunu kalınlığı ise 5 – 20 m civarında değişkenlik göstermektedir. Bu kilometreler arasında yeraltı suyu, akıcı kum, karışık zemin, stabilite sorunları ve killerde yapışkanlık problemleri ile karşılaşılabilir.

Km 6+350 ile 9+750 arasında tünel üstündeki örtü kalınlığı 15 – 35 m, yeraltı su seviyesi ise tünel kırmızı kotuna göre -10 ile 25 m arasında değişkenlik göstermektedir. Tünel kazıları ya üst yarı, ya alt yarı veya tümü ile Güngören ya da Gürpınar killeri içinde kalacaktır. Söz konusu killer genel olarak orta – yüksek plastisiteli olup yapışkanlığa meyilli veya yapışkan davranış gösterebilir.

Km 6+100 – 7+750 ve Km 8+100 – 9+500 arasında üst yarı, alt yarı ya da tüm aynada karşılaşılacak Çukurçeşme kumları yer yer bolca siltli ve ince taneli olup düşük geçirimsiliğe sahiptirler. Bahsedilen bu kumların tünel kazı kotlarında genel olarak suya doygun olması beklenmektedir. Bu iki koşul nedeniyle tünel kazıları sırasında akan zemin problemi ile karşılaşılabilir.

Risk puanlaması yapılan alanlardan Km 5+950 – 6+090 (Hat-1'e göre) arasında inşa edilecek istasyon ve Km 7+080 – 7+410 arasında inşa edilecek istasyon ve makas tünelleri yüksek - çok yüksek risk grubunda yer almaktadır. Km 8+070 – 8+210 arasında inşa edilecek istasyonda formasyon bazlı değişikliklerden dolayı bir bölüm yüksek riskli grupta bulunmaktadır. TBM ile açılacak hat tünelleri orta riskli grupta yer alırken yer yer haritada yüksek riskli alan olarak tanımlanan kısımlar, olasılık çarpanının yüksek değerine bağlıdır. Bu bölümlerde risk cetvelindeki etki unsuru dikkate alınarak risk düzeyinde düzeltme yapılabilir (Bkz. EK-2 ve EK-3).

Son olarak, bu çalışma kamusal yarar gözetilerek hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında ortaya koyulan değerlendirmeler ve görüşler tamamen yazara aittir, herhangi bir kurumu bağlamaz.

KAYNAKLAR

- AFTES (Association Francaise Travaux Souterrains), 2003, Carachterisation of Rock Masses for the design and the construction of underground structures, *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, n.177.
- Aldiss, D.T., Black, M.G., Entwisle, D.C., Page, D.P. and Terrington, R.L., 2012, Benefits of a 3D geological model for major tunnelling works: an example from Farringdon, east-central London, UK, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45 (4). 405-414.
- Aliahmadi, A., Sadjadi, S., Jafari-Eskandari, M., 2011, Design a new intelligence expert decision making using game theory and fuzzy AHP to risk management in design, construction, and operation of tunnel projects (case studies: Resalat tunnel), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53 (5-8), 789–798.
- Amiri, M. and Ghasemi, Y., 2015, Risk Assessment of Construction Projects for Urban Tunnels Using Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA), *7th International Civil Engineering Congress (ICEC-2015) “Sustainable Development through Advancements in Civil Engineering”*, Karachi, Pakistan, 153-160.
- Amnieh, H. B., Zamzam, M.S. and Mozdianfard, M.R., 2016, Geological Hazards analysis in Urban Tunneling by EPB Machine (Case study: Tehran subway line 7 tunnel), *Int. J. Min. & Geo-Eng*, Vol.50, No.1, pp.23-36.
- Artopoulos, S., 2016, Risk Management in TBM Tunneling – What Contractors Should Know When Buying Insurance Cover, *2nd International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DiGs Istanbul)*, Istanbul, 228 – 236.
- Ataei, M., Torabi, S.R.B., Sevary, A., 2011, The use of analytic hierarchy process in the selection of suitable excavation machine for Dez - Qomroud water conveyance tunnel (lot 1&2), *Journal of Mining & Environment*, Vol.2, No.1, 69-77.
- Avestedt, L., 2012, *Comparison of Risk Assessments for Underground Construction Projects*, (MSc), Department of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology.

- Baecher, G. B. and Christian, J. T., 2003, *Reliability and statistics in geotechnical engineering*, New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Benardos, A.G., Kaliampakos, D.C., 2004, A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling—illustrated by the Athens Metro, Greece, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, 987–999.
- Brown, E. T., 2012, Risk assessment and management in underground rock engineering—an overview, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4 (3): 193–204.
- BTS (The British Tunnelling Society), 2003, The Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works in the UK, 18 pages.
- Cai, M., 2008, Influence of stress path on tunnel excavation response—numerical tool selection and modeling strategy, *Tunn. Undergr. Space Technol*, 23, 618–628.
- Cerić, A., Marčić, D., Ivandić, K., 2011, A Risk-Assessment Methodology In Tunnelling, *Technical Gazette*, 18, 4, 529-536.
- Clayton, C.R.I., 2001b, Managing Geotechnical Risk: Improving Productivity in UK Building and Construction. Thomas Telford Ltd.
- Chaput, E., 1947, Türkiye’de Jeolojik ve Jeomorfojenik Tetkik Seyahatları, Çeviren: Tanoğlu, A., *İstanbul Üniversitesi Yayınları*, No:324, İstanbul.
- Che, D., Wu, L., Yin, Z., 2008, 3D Urban Geological Modeling and its Application in China: Technologies and Developments, *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, IGARSS 2008, July 8-11, Boston, Massachusetts, USA.
- Che, D., Wu, L., Chen, X., Lv, X. and Guo, M., 2015, 3D Urban Geological Modeling And Its Application In CBD Beijing, UDMS, *Urban Planning & Development – Part V*, Chapter 8, 8145-8153.
- Chen, F., Siebel, W., Satır, M., Terzioğlu, N., Saka, K., 2002, Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul Zone, *Int. J. Earth Science*, 91, 469–481.

- Choi, H. H., Cho, H. N., Seo, J. W., 2004, Risk assessment methodology for underground construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 130 (2): 258–272.
- Coburn, A.W., Spence, R.J.S., Pomonis, A., 1992, Factors Determining Human Casualty Levels in Earthquakes: Mortality Prediction in Building Collapse, *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain.
- Dalgıç, S., Turgut, M., Kuşku, İ., Coşkun, Ç., Coşgun, T., 2009, İstanbul'un Avrupa Yakasındaki Zemin ve Kaya Koşullarının Bina Temellerine Etkisi, *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, Sayı:2, 47-70.
- Dayanç, C., 2011, *Pasa Basınçlı Tünel Açma Makinesinin (EPB) Risk Analizi İle Performans Tahmini*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği, 65 sayfa.
- Dean, W.T., Monod, O., Rickards, R.B., Demir, O., Bultynck, P., 2000, Lower Palaeozoic stratigraphy and palaeontology, Karadere–Zirze area, Pontus Mountains, northern Turkey, *Geol. Mag.* 137, 555–582.
- Deng, T. and Zhou, X., 2010, Risk correlation analysis for China's construction projects based on stakeholder theory, *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 5 (4): 284–291.
- Deere, D. U., Peck, R. B., Monsees, J. E., and Schmidt, B., 1969, "Design of Tunnel Liners and Support Systems," Report to UMTA, DOT, available through NTIS.
- Deere, D. U., Peck, R. B., Parker, H. W., Monsees, J. E., and Schmidt, B., 1970, "Design of Tunnel Support Systems": Highway Res. Rec. No. 339:26-33.
- Department of Defence, 2000, Standard Practice for System Safety, DoD, MILSTD-882D.
- Edgerton, W.W., 2008, Recommended Contract Practices for Underground Construction. SME.
- Erdal, G., Ayhan, M., Aydın, D., 2018, Kralkızı-Dicle sulama tünellerinin yapımında karşılaşılan sorunlar ve uygulanan çözümler, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9:1, 301-312.

- Ertürk, Z., 2015, *İstanbul Avrupa Yakası Güneyindeki Zeminlerin Geotekniği*, Yüksek Lisans Tezi, T.C. İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, 62 sayfa.
- Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J. and Veicherts, T., 2004, “Guidelines for tunnelling risk management”: International Tunnelling Association, Working Group No. 2. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 19, Issue 3, pages 217-237.
- Fenton, G. A, Griffiths, D. V., 2008, *Risk assessment in geotechnical engineering*, New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Gakis, A., 2014, Design of a SCL wraparound tunnel utilising a 3D geological model for Crossrail Farringdon Station, *British Tunnelling Society*, 2014 Harding Prize Competition. 21 pages.
- Gakis, A., Salak, P., St.John, A., 2014, Geotechnical Risk Management for Sprayed Concrete Lining Tunnels in Farrigndon Crossrail Station, Crossrail Learning Legacy, *2014 Crossrail Technical Paper Competition*, 17 pages.
- Gakis, A., Cabrero, P., Entwisle, D., Kessler, H., 2016, 3D geological model of the completed Farringdon underground railway station, Crossrail Learning Legacy, *2016 Crossrail Technical Paper Competition*, 21 pages.
- Gattinoni, P., Pizzarotti, E., Rizzella, A., Scesi, L., 2012, Geological Risk in Tunneling: the Example of Teheran Underground, *World Tunnel Conference 2012*, Bangkok, 18-23 May 2012, p 1-8.
- Gattinoni, P., Pizzarotti, E.,M., Scesi, L., 2014, *Engineering Geology for Underground Works*, Springer, ISBN 978-94-007-7849-8, 335 pages.
- Ghasemi, Y., Ardeshir, A., Amiri, M., 2012, Risk Identification and Fault Tree Development of Urban Tunnel Projects, *Third International Conference on Construction in Developing Countries (ICCIDC-III)* “Advancing Civil, Architectural and Construction Engineering & Management” July 4-6, 2012, Bangkok, Thailand.

- Goodfellow, R., O'Carroll, J., Konstantis, S., 2014, Can the Risk Register become a Contract Document?, *North American Tunneling Conference*, 2014.
- Görür, N., Monod, O., Okay, A.I., Şengör, A.M.C., Tüysüz, O., Yiğitbaş, E., Sakıncı, M., Akkök, R., 1997, Palaeogeographic and tectonic position of the Carboniferous rocks of the western Pontides (Turkey) in the frame of the Variscan belt, *Bull. Soc. Geol. Fr.* 168, 197–205.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and Xu, S., 2007, Mechanised Tunnelling in urban areas. Design methodology and construction control.
- Hamidi, J. K., Shahriar, K., Rezai, B., Rostami, J., Bejari, B., 2010, Risk assessment based selection of rock TBM for adverse geological conditions using Fuzzy-AHP, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69:523–532.
- Heuer, R.E., 1974, Important Ground Parameters in Soft Ground Tunneling. Proceedings of the Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction Conference, *ASCE*, New York, NY, 41-55.
- Heuer, R.E. and D. L. Virgens., 1987, Anticipated behavior of silty sands in tunneling. Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference, Littleton, co: Society of Mining Engineers, Inc.
- Hong, E.S., Lee, I.M., Shin, H.S., Nam, S.W., Kong, J.-S., 2009, Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: Application to the design of shield TBM, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, 269–277.
- Huang, H. and Zhang, D., 2015, Quantitative Geotechnical Risk Management for Tunneling Projects in China, *International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, Amsterdam, the Netherland, 61-74, 13-16 October, 2015.
- IMIA (The International Association of Engineering Insurers), 2006, ALOP/DSU coverage for tunnelling risks?, *The International Association of Engineering Insurers 39th Annual Conference*, Boston.

- Ioannou, P. G., 1989, A Geologic Prediction Model For Tunneling, *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 115, No. 3, September 1989, pp. 339-356. Paper No. 23818.
- ITIG (The International Tunnelling Insurance Group), 2012, A Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works, May 2012, 28 pages.
- İ.B.B. ZEMİN ve DEPREM İNCELEME MÜDÜRLÜĞÜ, 2007, Avrupa Yakası Mikrobölgeleme Çalışması, İstanbul.
- İ.B.B. ZEMİN ve DEPREM İNCELEME MÜDÜRLÜĞÜ, 2011, İstanbul İl Alanın Jeolojisi, İstanbul.
- Jarna, A.A., Kittilsen, B., Haase, C., Henderson, I.H.C., Høgaas, F., Iversen, S., Seither, A., 2015, 3-Dimensional Geological Mapping And Modeling Activities At The Geological Survey Of Norway, The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-2/W4.
- Jacobsen, L.J., Glynn, P.D., Phelps, G.A., Orndorff, R.C., Bawden, G.W., Grauch, V., 2011, US Geological Survey: a synopsis of three-dimensional modeling, US Geological Survey 1, 3 Colorado.
- O'Carroll, J. and Goodfellow, B., 2015, Underground Construction Association of SME, Guidelines For Improved Risk Management On Tunnel And Underground Construction Projects In The United States Of America, 35 pages, June 2015.
- Kessler, H., Mathers, S., Sobisch, H.G., 2009, The capture and dissemination of integrated 3D geospatial knowledge at the British Geological Survey using GSI3D software and methodology, *Comput. Geosc.*, 35, 1311–1321.
- Klein, S. and O'Carroll, J., 2017, Geotechnical Risk Assessments for Tunneling/Underground Projects, *Geo-Risk 2017*, GSP 285, June 2017, 291-301. Denver, Colorado, USA.
- Koltan, A., Orhon, H.Y., Yılmaz, S., Altay, M., Yılmaz, S., Çay, İ., 2010, Risk Değerlendirmede Kullanılan L Tipi Karar Matrisi Yönteminin İşçi Sağlığı Uygunluğunun Değerlendirilmesi, *Türk Tabipler Birliği Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi*, 38- 43.

- Kolymbas, D., 2005, "Tunnelling and Tunnel Mechanics". *A Rational Approach to Tunnelling*, Ed. Springer. 437 pages.
- Konstantis, T., Konstantis, S., Spyridis P., 2016, Tunnel Losses: Causes, Impact, Trends and Risk Engineering Management, *World Tunneling Congress 2016*, San Francisco, USA. April 2016.
- Koral, H., 1998, "Küçükçekmece-Çatalca Dolaylarında Trakya Havzası Doğusunun Jeolojisi Ve Gelişimi: Yeni Bulgular", *İ.Ü.M.F. Yerbilimleri Dergisi*, cilt.11, ss.27-36.
- Kovari, K. and Ramoni, M., 2004, " Key note lecture at international congress on mechanized tunneling: challenging case histories," Urbantunneling in soft ground using TBM's, Politecnico di Torino, Italy, 16–19.
- Köppl, F., Thuro, K. and Thewes, M., 2015, "Suggestion of an empirical prognosis model for cutting tool wear of Hydroshield TBM." *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- Krynine, D.P. and Judd, W.R., 1957, *Principals of Engineering Geology and Geotechnics*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1-707.
- Kuzucuoğlu, A. H., 2014, Health-Safety Risks And Precautions At Library And Archive Buildings, *International Journal of Social Science*, Number: 29, p.313-338, Autumn III.
- Mallet, J., 1992, GOCAD: a computer aided design program for geological applications, Three-dimensional modeling with geoscientific information systems. Springer, pp. 123-141.
- Méndez, H. J. and Dickmann, T., 2016, 3D-TSP – Advanced geological prediction during tunneling projects in the Andes, *XV Colombian Geotechnical Congress & II International Specialized Conference Of Soft Rocks*, Cartagena On October 5th -7th 2016.
- Mikaeil, R. E., Gharahasanlou, J., Aryafar, A., 2018, Geotechnical Risks Assessment During the Second part of Emamzadeh Hashem (AS) Tunnel Using FDAHP-PROMETHEE, Amirkabir J. *Civil Eng.*, 49(4) (2018) 247-250.
- Nigro, J.D., Ungar, P.S., de Ruiter, D.J., Berger, L.R., 2003, Developing a geographic information system (GIS) for mapping and analysing fossil deposits at Swartkrans, Gauteng Province, South Africa. *J. Archaeol. Sci.* 30, 317–324.

- Okay, A. and Tüysüz, O., (1999), “Tethyan sutures of northern Turkey. In The Mediterranean Basins: Tertiary extension within the Alpine orogen (In B. Durand, L. Jolivet, F. Horváth and M. Séranne eds)”, Geological Society of London 156, 475–515.
- Okay, A.I., Satır, M., Siebel, W., 2006, Pre-Alpide orogenic events in the Eastern Mediterranean region. In: Gee, D.G., Stephenson, R.A. (Eds.), *European Lithosphere Dynamics. Geological Society*, London, Memoirs, vol. 32, pp. 389–405.
- Okuyama, S.E., Chang, E. (2004) Modeling Spatial Economic Impacts of Disasters, Berlin, SpringerVerlag.
- OYO International Corporation, 2009, Mikrobölgeleme Rapor ve Haritalarının Yapılması Avrupa Yakası (Güney), T.C. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- Önalın, M., 1981, ‘İstanbul Ordovisiyen ve Siluriyen istifinin çökelme ortamları: İstanbul Yerbilimleri, 2, 161-177.
- Özgöl, N., Üner, K., Akmeşe, İ., Bilgin, İ., Kokuz, R., Özcan, İ., Yıldız, Z., Yıldırım, Ü., Akdağ, Ö., Tekin, M., 2005, İstanbul il alanının genel jeoloji özellikleri. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem Risk Yöntemi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı Zemin ve Deprem İnceleme Müdürlüğü.
- Özfırat, M. K., 2015, Selection of tunneling machines in soft ground by fuzzy analytic hierarchy process, *Acta Montanistica Slovaca*, Volume 20, number 2, 98-109.
- Özkılıç, Ö., 2014, *Risk Değerlendirmesi*, Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu, Yayın No: 338, ISBN: 978-605-9994-01-9, 422 ss.
- Paeckelmann, W., 1925, Beitrage zur Kenntnis der Devons am Bosphorus, insbesondere in Bithynien. Abh. Preussische Geol Landesanstalt N.F., 98, 150.
- Paeckelmann, W., 1938, Neue Beitrage zur Kenntnis des Geologie, Palaontologie und Petrographie der Umgegend von Konstantinople. 2. Geologie Thraziens, Bithyniens und der Prinzeninseln. Abh. preussische geol. Landesanstalt N.F., 168, 202.

- Pelizza, S., 1999a, "Scavo Meccanizzato delle Gallerie" (in Italian). Gallerie e Grandi Opere Sotterranee. 59: 48.
- Penck, W., 1919, Grundzüge der Geologie des Bosphorus. Veröff. des Instit für Meereskunde, Geol.-Naturw, Reihe, H.4.
- Polat, F., 2017, Ataköy-İkitelli Metro Hattı Güzergâhı Kesin Proje Jeolojik – Jeoteknik Etüt Raporu, 65 sayfa (Yayınlanmamış rapor).
- Rabcewicz, L., 1965, "The New Austrian Tunnelling Method", Part one, Part Three, Water Power, January 1965, 19-24.
- Robinson, C.S., 1972, "Prediction of geology for tunnel design and construction," Proceedings of the North American Rapid Excavation and Tunneling Conference, Vol. 1, pp. 105-114, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., New York, N.Y.
- Rodriguez, G. L., 2010, "Model for geological risk management in the building and infrastructure processes". Edited by: Giancarlo Nota. ADVANCES IN RISK MANAGEMENT". Editorial SCIYO. Sciyo database. ISBN: 978-953-307-138-1. Chapter 11, 223-254.
- Rodriguez, G. L., Rodriguez, T.J.C., Quintana, I., N., V., 2012, Theoretical Considerations on Geological Risk Management, AcademyPublish.org - Risk Assessment and Management, 463 -479, USA.
- Rose, D., 1982, "Revising Terzaghi's tunnel rock load coefficient." Proc. 23rd U.S Symposium on Rock Mechanics., AIME, New york, pp. 953-960.
- Russo, G., Grasso, P., 2007, On the classification of rock mass excavation behaviour in tunneling, *11th Congress of International Society of Rock Mechanics*, Lisbon, 9-13 July 2007, pp 979-982.
- Russo, G., Grasso, P. , Bensaid, A., 2008, Framework For The Risk Analysis Of The Gibraltar Strait Railway-Link Tunnel, *ITA-AITES World Tunnel Congress*, India 2008, 19-25/09.

- Russo, G., 2008, A simplified rational approach for the preliminary assessment of the excavation behaviour in rock tunnelling, *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, N.207 (May - June 2008).
- Russo, G., 2014, An update of the “multiple graph” approach for the preliminary assessment of the excavation behaviour in rock tunnelling ". *Tunnelling and Underground Space Technology*, n.41 (2014) pp. 74–81.
- Russo, G., Grasso, P., Verzani, L.P. and Cabaña, A., 2014, On the concept of "Risk-Analysis Driven Design, *World Tunnel Congress 2014*, Brazil.
- Saaty, T. L., 1980, Multicriteria decision making: the analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill International Book Co.
- Saaty, T. L., 1986, “Axiomatic foundation of analytic hierarchy process”, *Management Science*, 32: 841 – 855.
- Satıcı, Ö., 2016, Tünel Yapım Çalışmalarında Risk Modellemesi, *Ulusal Tünelcilik ve Yeraltı Yapıları Kongresi*, p:797.
- Schweizer, D., Blum, P. and Butscher, C., 2017, Uncertainty assessment in 3-D geological models of increasing complexity, *Solid Earth*, 8, 515–530, 2017.
- Shahriar, K., Sharifzadeh, M., Hamidi, J.K., 2008, Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 318–325.
- Shannon, C. E., 1948, A mathematical theory of communication, *Bell Syst. Tech. J.*, 27, 379–423.
- Skipper, J. A., Scholes, H. E., Lawrence, H., Packer, M., Menkiti, C., 2015, ICE Publishing, The Lambeth Group In The Crossrail Project Of London, UK – The Geological Model, 2015. Technical Paper, Crossrail Learning Legacy.
- Sojoudi, H., 2015, Yerleşim Alanlarında Tünel Kazılarına Bağlı Deformasyonların Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 75 sayfa.

- Sousa, R. L., 2010, Risk Analysis for Tunneling Projects, PhD, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Sousa, R. L. and Einstein, H.H., 2012, “Risk Analysis During Tunnel Construction Using Bayesian Networks: Porto Metro Case Study.” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27, no. 1 (January 2012): 86–100.
- Stille, H. and Palmström, A., 2008, Ground Behaviour and Rock Mass Composition in Underground Excavations, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 46-64.
- Stoneburner, G., Goguen, A. Y., and Feringa, A., 2002, Sp 800-30, Risk Management Guide for Information Technology Systems.
- Tacher, L., Pomian-Srzednicki, I., Parriaux, A., 2006, Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models, *Comput. Geosci.*, 32, 212–221.
- Taromi, M., Eftekhari, A., Hamidi, J.K., 2015, Evaluation of Geological Model in Construction Process of Sabzkuh Tunnel (Case Study in Iran), *Engineering Geology for Society and Territory*-Volume 6. Springer, 599–610.
- Taroun, A., Yang, J. B., 2011, Dempster-Shafer theory of evidence: potential usage for decision making and risk analysis in construction Project management. *The Built and Human Environment Review*, 2011, 4 (Supp. 1): 155–166.
- Teknomo, K., 2006, Analytic Hierarchy Process (AHP) Tutorial, 2006, 20 pages.
- Terzaghi, K., 1946, “Rock Defects and Loads on Tunnel Supports”, *Rock Tunneling with Steel Supports*. Commercial Shearing, Youngstown, OH, 17-99.
- Terzaghi, K., 1950, “Geologic Aspects of Soft-Ground Tunneling”, in *Applied Sedimentation*, Chapter 11, John Wiley & Sons, New York, NY, 193-209.
- Terzaghi, K., 1977, *Earth tunneling with steel supports*. Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, OH.
- Tichý, M., 2006, Risk control: analysis and management. C. H. Beck.
- Tyrell, A. P, Lake, L. M. and Parsons, A. W., 1983, An Investigation of the Extra Costs Arising on Highway Contracts, Supplementary Report SR814, Crowthorne, United Kingdom.

- Ulusay, R. ve Sönmez, H., 2007, Kaya kütlelerinin Mühendislik Özellikleri Genişletilmiş İkinci Baskı, *TMMOB Jeoloji mühendisleri odası yayınları*, Ankara.
- Ustaömer, P.A., Mundil, R., Renne, P.R., (2005): U/Pb and Pb/Pb zircon ages for arc-related intrusions of the Bolu Massif (W Pontides, NW Turkey): evidence for Late Precambrian (Cadomian) age, *Terra Nova*, 17, 215–223.
- Vahdatirad, M. J., Ghodrat, H., Firouzianbandpey, S. and Barari, A., 2010, Analysis of an Underground Structure Settlement Risk due to Tunneling: A case study from Tabriz, Iran. Songklanakarin, *Journal of Science and Technology*, 32(2), 145-152.
- Vardar, M., 1977, Yeraltı Kaya Yapıları Mekaniğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Ana İlkeleri, İ.T.Ü.
- Verzani, L.P., Russo, G., Grasso, P. and Cabaña, A., 2014, The Risk Analysis Applied to Deep Tunnels Design—El Teniente New Mine Level Access Tunnels, Chile, *Engineering Geology for Society and Territory*, Volume 6, 1023-1030.
- Wang, B., Shi, B., Song, Z., 2008, 3D geological modeling method based on gis and virtual reality modeling, *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 27, 3563–3569.
- Wang,Y., Zhao, H., Sheng Y. and Kang,N., 2015, Construction and Application of 3D Geological Models for Attribute-oriented Information Expression, *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 315 – 322.
- Wenderoth, S. and Lamarche, M. J., 2005, Crustal memory and basin evolution in the central European basin system—new insights from a 3D structural mode., *Tectonophysics*, 397, 143–165.
- Wellmann, F. J., Horowitz, G. F., Schill, E., Regenauer-Lieb, K., 2010, Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion, *Tectonophysics*, 490 (3-4), 141-151.
- Wellmann, J. F. and Regenauer-Lieb, K., 2012, Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models, *Tectonophysics*, 526–529, 207–216.

- Xiong, Z., Guo, J., Xia, Y., Lu, H., Wang, M., Shi, S., 2018, A 3D Multi-scale geology modeling method for tunnel engineering risk assessment, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73 (2018) 71–81.
- Xu, Z., Li, S., Li, L., Chen, J., Shi, S., 2011, Construction permit mechanism of karst tunnels based on dynamic assessment and management of risk, *Chinese J. Geotech. Eng.*, 33, 1714–1725.
- Yıldırım, M. ve Savaşkan, E., 2003, “İstanbul bölgesi Tersiyer çökellerinin stratigrafisine yeni bir yaklaşım ve çökellerin mühendislik özellikleri”, *İstanbul’un Jeolojisi Sempozyumu (20-21 Aralık 2003) Bildiriler Kitabı*, s. 87-102, İstanbul.
- Yıldırım, M. ve Gökaşan, E., 2013, *Mühendisler için jeoloji bilgileri*, Genişletilmiş ikinci baskı, İstanbul 2013, 595 sayfa.
- Yiğitbaş, E., Kerrich, R., Yılmaz, Y., Elmas, A., Xie, Q.L., 2004, Characteristics and geochemistry of Precambrian ophiolites and related volcanic from the I . stanbul–Zonguldak Unit, Northwestern Anatolia, Turkey: following the missing chain of the Precambrian South European suture zone to the east. *Precambrian Res.* 132, 179–206.
- Zhao, J., 2007,. “Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore.” 22, 388–400.
- Zhou, H., Hao, Y., Jianhua, L., 2006, Construction risk assessment on deep foundation pits of a metro line in Shanghai, *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28 (Supp. 1): 1 902–1 906 (in Chinese).
- Zhou, H. B., Zhang H., 2011, Risk assessment methodology for a deep foundation pit construction project in Shanghai, *China. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE*, 2011, 137 (12): 1 185–1 194.
- Zheng, K., Zhou, F., Liu, P., Kan, P., 2010, Study on 3D Geological Model of Highway Tunnels Modeling Method, *Journal of Geographic Information System*, 2, 6-10.
- Živec, T. and Žibert, M., 2016, The 3D Geological Model of the Karavanke Tunnel, Using Leapfrog Geo, *Conference: ITA - AITES WTC 2016* .

EKLER

EK 1 - Km: 5+750 – 9+750 Arası Tahmini Ayna Haritaları

EK 2 - Km: 5+750 – 9+750 Arası Risk Cetvelleri

EK 3 – Risk Haritası

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Burak KÜÇÜK
Uyruğu	Türkiye Cumhuriyeti
Doğum tarihi, Yeri	10.08.1992 / İstanbul
Telefon	90 (537) 2413440
E-mail	burak.k.92@hotmail.com

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Yüksek Lisans	İ.Ü. – Cerrahpaşa / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü / Jeoloji Müh.	2019
Lisans	İ.Ü / Mühendislik Fakültesi / Jeoloji Mühendisliği	2015
Lise	İstanbul Atatürk Anadolu Lisesi	2011

Makaleler / Bildiriler

- Büyük Menderes Drenaj Alanının Batı Kesimindeki Farklı Ağaç Türlerinin ve Bunların Toprak Oluşumuna Katkılarının Bağlamında Güncel / Paleo - Hidrolojik Değerlendirmeler, TÜBİTAK 2209 / A, 2015.
- Kırklareli Vize İlçesi Kızılağaç ve Yakın Çevresinin Jeolojisi, İ.Ü. Lisans Tezi, 2015