

**ZEMİN İYİLEŞTİRME METOTLARININ
PROBLEMLİ ZEMİNLERDE İNŞA EDİLEN
TÜNELLERDE UYGULANMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Betül KAMA

Eskişehir 2025

**ZEMİN İYİLEŞTİRME METOTLARININ PROBLEMLİ ZEMİNLERDE İNŞA
EDİLEN TÜNELLERDE UYGULANMASI**

Betül KAMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN**

**Eskişehir
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Ağustos 2025**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Betül KAMA'nın ZEMİN İYİLEŞTİRME METOTLARININ PROBLEMLİ ZEMİNLERDE İNŞA EDİLEN TÜNELLERDE UYGULANMASI başlıklı çalışması 21/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Üye (Tez Danışmanı)

:

Prof. Dr. Ahmet TUNCAN

Üye

:

Prof. Dr. Nazile URAL

Üye

:

Doç. Dr. Burak EVİRGEN

Unvan Adı Soyadı

İmza

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

21/08/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Betül KAMA, ZEMİN İYİLEşTİRME METOTLARININ PROBLEMLİ ZEMİNLERDE İNşA EDİLEN TÜNELLERDE UYGULANMASI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Ahmet TUNCAN

ÖZET

ZEMİN İYİLEŞTİRME METOTLARININ PROBLEMLİ ZEMİNLERDE İNŞA EDİLEN TÜNELLERDE UYGULANMASI

Betül KAMA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2025

Danışman: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN

Bu çalışma kapsamında, zemin-yapı etkileşimini gerçeğe en yakın şekilde temsil edebilmek amacıyla, olumsuz koşullar dikkate alınarak farklı jeolojik özelliklere sahip üç adet zemin profili belirlenmiştir. NATM yöntemiyle açılan at nalı kesitli bir tünelin kazısı, belirlenen gevşek kum-silt ve yumuşak kil zemin profillerinde Plaxis 2D yazılımı kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Zemin iyileştirme yöntemi olarak, alansal jet grout ve ardından uygulanan ankraj sistemleri değerlendirilmiştir. Jet grout uygulaması, özellikle alt yarıda düşey deformasyonları azaltmıştır. Ancak, jet grout sonrasında uygulanan ankraj sisteminin, statik analizler kapsamında düşey deformasyonlara anlamlı bir katkı sağlamadığı ve yapısal verimliliği olumsuz etkileyebileceği belirlenmiştir. Dinamik analizlerde ise, Mw 6,93 büyüklüğündeki Loma Prieta depremi etkisi altında herhangi bir göçme meydana gelmemiştir. Bu nedenle, daha düşük büyüklükteki depremler için ek analiz yapılmasına gerek duyulmamıştır.

Anahtar Sözcükler: Tünel, NATM, Jet Grout, Ankraj, Plaxis 2D

ABSTRACT

APPLICATION OF GROUND IMPROVEMENT METHODS IN TUNNELS CONSTRUCTED IN PROBLEMATIC SOILS

Betül KAMA

Department of Civil Engineering

Programme in Geotechnical

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2025

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN

Within the scope of this study, three soil profiles with different geological characteristics were selected by considering adverse conditions in order to represent the soil-structure interaction as realistically as possible. The excavation of a horseshoe-shaped tunnel constructed using the NATM method was modeled and analyzed in the defined loose sand-silt and soft clay soil profiles using Plaxis 2D software. As ground improvement methods, area-wide jet grouting and subsequently applied anchorage systems were evaluated. The jet grout application notably reduced vertical deformations, particularly in the lower half. However, the anchorage system applied after jet grouting did not provide a significant contribution to vertical deformations within the scope of static analyses and was determined to potentially have a negative impact on structural efficiency. In the dynamic analyses, no collapse occurred under the Mw 6.93 Loma Prieta earthquake. Therefore, additional analyses for lower-magnitude earthquakes were deemed unnecessary.

Keywords: Tunnel, NATM, Jet Grout, Anchor, Plaxis 2D

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında bana rehberlik eden, araştırma sürecinde destek veren, yönlendiren ve katkılarını esirgemeyen, aynı zamanda ailevi sağlık sorunları yaşadığımda ve sonrasında oldukça yorgun olduğum yaklaşık iki buçuk senelik benim için oldukça zorlu olan süreçte bana her zaman destek olan çok değerli danışmanım Prof. Dr. Ahmet TUNCAN'a içtenlikle teşekkür ederim. Tez sürecindeki sabır ve katkıları, bu çalışmanın tamamlanmasında önemli bir rol oynamıştır.

Her zaman desteğini hissettiğim, rehberliği ve katkılarıyla yolumu aydınlatan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Necati MERT'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan, beni anlayışla karşılayıp destekleyen annem Sabahat KAMA'ya, desteğini her zaman yanımda ve benimle hissettiğim babam Mehmet Atnan KAMA'ya teşekkür ederim.

Tez süreci tam anlamıyla bir ekip işiydi. Bu yolda bana destek olan bilgisi motivasyonu ve yardımlarıyla yanımda hissettiren çok kıymetli arkadaşlarım Edanur Tuğba AKTÜRK, Yeliz ÇOLAK, Deniz ÇOLAK, Zehra TOPAL ve Şeymanur TOPAL'a gönülden teşekkür ederim. En zorlu zamanımda bilgisayar teknik desteği sağladığı için Yunus HIRÇIN'a ve İrem HIRÇAN'a içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu süreçte moral ve motivasyonlarıyla yanımda olan arkadaşlarıma ve sevdiklerime teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma süresince edindiğim bilgi ve deneyimlerin meslek hayatımda yol gösterici olacağına inanıyorum. Emeği geçen herkese minnettarlığımı ifade etmek isterim, içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Betül KAMA

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Betül KAMA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVI
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. TEORİK ÇALIŞMALAR	7
3.1. Konsolidasyon.....	7
3.2. Sıvılaşma	7
3.3. Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	8
3.3.1. Jet grout ile zemin iyileştirme.....	9
3.3.2. Ankraj ile zemin iyileştirme.....	12
4. TÜNEL.....	17
4.1. Tünel Tipleri.....	17
4.1.1. Hizmet tünelleri	17
4.1.2. Ulaşım tünelleri.....	18
4.2. Tünel Açma Yöntemleri	19

4.2.1. Aç-kapa yöntemi.....	20
4.2.2. Delme-patlatma yöntemi.....	21
4.2.3. Mekanize kazı yöntemleri.....	23
4.2.3.1. <i>Tünel açma makinesi (TBM) yöntemi</i>	23
4.2.3.2. <i>Yeni Avusturya tünel açma (NATM) yöntemi</i>	25
5. SONLU ELEMENLAR METODU (SEM)	32
5.1. Plaxis 2D.....	32
5.1.1. Plaxis 2D programı ile model oluşturma	34
5.1.2. Plaxis 2D zemin modelleri.....	38
6. SAYISAL ANALİZ.....	39
6.1. Birinci Vaka (Sıvılaştan Zemin-1)	43
6.1.1. Vaka 1 Plaxis 2D ile çözümleme statik analiz	46
6.1.2. Vaka 1 alansal jet grout metodu ile iyileştirme statik analiz.....	48
6.1.3. Vaka 1 alansal jet grout metodu ardından ankraj ile zemin iyileştirme statik analiz	50
6.1.4. Vaka 1 jet grout ile zemin iyileştirme dinamik analiz.....	51
6.2. İkinci Vaka (Sıvılaştan Zemin-2)	52
6.2.1. Vaka 2 Plaxis 2D ile çözümleme.....	55
6.2.2. Vaka 2 jet grout metodu ile iyileştirme statik analiz.....	57
6.2.3. Vaka 2 jet grout metodu ardından ankraj ile zemin iyileştirme statik analiz	59
6.2.4. Vaka 2 alansal jet grout ile zemin iyileştirme dinamik analiz.....	60
6.3. Üçüncü Vaka (Yumuşak Zemin)	61
6.3.1. Vaka 3 Plaxis 2D ile çözümleme.....	64
6.3.2. Vaka 3 jet grout metodu ile iyileştirme	66
6.3.3. Vaka 3 jet grout metodu ardından ankraj ile zemin iyileştirme statik analiz	68
6.3.4. Vaka 3 alansal jet grout ile zemin iyileştirme dinamik analiz.....	69

7. SONUÇLAR.....	71
KAYNAKÇA.....	73
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Aktif ve pasif ankrajların uygulama ve enjeksiyon aşamaları (Xanthakos, 1991)	15
Tablo 4.1. Tünel açmada dikkat edilmesi gereken başlıca önemli olan faktörler (Li ve ark, 2022).....	20
Tablo 6.1. Vaka 1, Vaka 2 ve Vaka 3 zemin profilleri özeti.....	39
Tablo 6.2. Vaka 1, Vaka 2 ve Vaka 3 zemin profilleri ve profillerin zemin tabakalarına ait mühendislik.....	40
Tablo 6.3. Tünel inşa edilirken kullanılan yapısal elemanların malzeme özellikleri.....	41
Tablo 6.4. Birinci vaka profiline ait mukavemet parametreleri	45
Tablo 6.5. Vaka 1-İlk hal (zemin iyileştirme olmaksızın) düşey yer değiştirme (statik analiz)	47
Tablo 6.6. Vaka 1- Alansal iyileştirme jet grout uygulanmış iyileştirilmiş zemine ait mühendislik	48
Tablo 6.7. Vaka 1- Alansal jet grout uygulaması düşey yer değiştirme (statik analiz)	49
Tablo 6.8. Vaka 1 – Uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait düşey yerdeğiştirme	51
Tablo 6.9. Vaka 1 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait düşey yer değiştirme (dinamik analiz).....	52
Tablo 6.10. İkinci vaka profiline ait mukavemet parametreleri	54
Tablo 6.11. Vaka 2- İlk hal (zemin iyileştirme olmaksızın) düşey yer değiştirme (statik analiz)	56
Tablo 6.12. Vaka 2 alansal iyileştirme jet grout uygulanmış iyileştirilmiş zemine ait mühendislik.....	57
Tablo 6.13. Vaka 2-Alansal jet grout uygulaması düşey yer değiştirme (statik analiz)	58
Tablo 6.14. Vaka 2 – Uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait düşey yer değiştirme.....	60
Tablo 6.15. Vaka 2 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait düşey yer değiştirme (dinamik analiz).....	61

Tablo 6.16. Üçüncü vaka profiline ait mukavemet parametreleri.....	63
Tablo 6.17. Vaka 3-İlk hal (zemin iyileştirme olmaksızın) düşey yer değiştirme (statik analiz)	65
Tablo 6.18. Vaka 3 alansal iyileştirme jet grout uygulanmış iyileştirilmiş zemine ait mühendislik	66
Tablo 6.19. Vaka 3-Alansal jet grout uygulaması düşey yer değiştirme (statik analiz)	67
Tablo 6.20. Vaka 3 – Uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait düşey yer değiştirme.....	69
Tablo 6.21. Vaka 3 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait düşey yer değiştirme (dinamik analiz).....	70
Tablo 7.1. Vaka 1, Vaka 2, Vaka 3 için Plaxis 2D ile gerçekleştirilen analiz sonuçları.....	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Jet Grout yönteminin sahada uygulanmasının şematik gösterimi (Rawlings vd. 2000)	9
Şekil 3.2. Monitörlerin şematik çizimleri: (a) tek akışkanlı, (b) çift akışkanlı ve (c) üç akışkanlı sistemler	10
Şekil 3.3. Çalışma sahasındaki jet grout uygulamaları: (a) dolgu tabanı zemin iyileştirme, (b) kazı-iksa.....	11
Şekil 3.4. Ankrajların, çekme ya da basınç anında yük aktarım bölgeleri (Xanthakos, 1991)	13
Şekil 3.5. Ankraj yapısı bileşenleri (Xanthakos, 1991).....	14
Şekil 3.6. Sahada ankraj uygulaması (Xanthakos, 1991)	16
Şekil 4.1. Aç-Kapa yöntemi şematik gösterimi (Pujades vd. 2023).....	21
Şekil 4.2. Delme-patlatma yönteminin şematik gösterimi (Yun, 2019).....	22
Şekil 4.3. TBM yöntemi ile inşa aşamalarının şematik gösterimi (Sharma, 2021).....	24
Şekil 4.4. TBM cihazının mekanizmasına ait şematik gösterim (Attewell, 1986).....	24
Şekil 4.5. NATM yöntemi için dizayn kriterleri (Karakuş and Fowell, 2004).....	26
Şekil 4.6. NATM yöntemi ile üst yarı, alt yarı ve taban kazılarının karşıdan şematik görünümü	27
Şekil 4.7. NATM yöntemi ile üst yarı, alt yarı ve taban kazılarına karşıdan bakış.....	28
Şekil 4.8. NATM ile açılan tünelin alt yarı bölgesine geçici tahkimat işlemine başlamadan önce	29
Şekil 4.9. NATM ile açılan tünelin taban kazısı ardından taban donatısı yerleştirilmesi aşaması	29
Şekil 4.10. Tünel ayna çerçevesinin zemin iyileştirme yöntemleri ile iyileştirilmesi.....	30
Şekil 4.11. Tünel ayna çerçevesinde üst yarı bölgesine geçici tahkimat için destek elemanlarının.....	30
Şekil 4.12. NATM ile açılan tünelde kalıcı destek sistemi olarak nihai beton kaplama uygulaması	31

Şekil 4.13. NATM ile açılan tünel iç çeperine zemin iyileştirme ve püskürtme beton uygulaması.....	31
Şekil 5.1. Plaxis 2D ile oluşturulan eleman ağı gerilme ve düğüm noktaları.....	33
Şekil 5.2. Model özellikleri giriş sekmesi	34
Şekil 5.3. Model oluşturmada kullanılan ana sekmelerin bölümü	35
Şekil 5.4. Zemin ve yapısal elemanlar için tanımlama sekmesi	36
Şekil 5.5. Zemin profili oluşturma sekmesi.....	37
Şekil 5.6. Modelin meshlendikten sonraki görüntüsü	37
Şekil 6.1. Tünel tasarımı ve tünel destekleme sistemi.....	41
Şekil 6.2. Tünel tepe noktası ve tünelin sol-sağ taraflarının üst yarı, alt yarı ve taban bölgelerinde	42
Şekil 6.3. Vaka 1- Zemin Profilini içeren dağa ait jeolojik profil	44
Şekil 6.4. Vaka 1- Ayna Kesiti	44
Şekil 6.5. Vaka 1-Çözümleme için oluşturulan model geometrisi	45
Şekil 6.6. Vaka 1-Çözümleme için oluşturulan model ağı (mesh) görüntüsü.....	46
Şekil 6.7. Vaka 1- İlk Hal (Zemin İyileştirme yapılmaksızın) açılan tünele ait ayna kesiti.....	47
Şekil 6.8. Vaka 1 için uygulanan alansal jet grout aşamaları	49
Şekil 6.9. Vaka 1 – Uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait ayna kesiti.....	50
Şekil 6.10. Vaka 1 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait ayna kesiti (dinamik analiz).....	52
Şekil 6.11. Vaka 2- Zemin profilini içeren dağa ait jeolojik profil	53
Şekil 6.12. Vaka 2- Ayna kesiti	53
Şekil 6.13. Vaka 2- Çözümleme için oluşturulan model geometrisi	55
Şekil 6.14. Vaka 2- Çözümleme için oluşturulan model ağı (mesh) görüntüsü.....	55
Şekil 6.15. Vaka 2 – İlk Hal (Zemin İyileştirme yapılmaksızın) açılan tünele ait ayna kesiti.....	56

Şekil 6.16. Vaka 2 için uygulanan alansal jet grout aşamaları	58
Şekil 6.17. Vaka 2 – uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait ayna kesiti.....	59
Şekil 6.18. Vaka 2 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait ayna kesiti (dinamik analiz).....	61
Şekil 6.19. Vaka 3- Zemin profilini içeren dağa ait jeolojik profil	62
Şekil 6.20. Vaka 3- Ayna kesiti	62
Şekil 6.21. Vaka3- Çözümleme için oluşturulan model geometrisi	64
Şekil 6.22. Vaka 3- Çözümleme için oluşturulan model ağı (mesh) görüntüsü.....	64
Şekil 6.23. Vaka 3 – İlk Hal (Zemin İyileştirme yapılmaksızın) açılan tünele ait ayna kesiti.....	65
Şekil 6.24. Vaka 3 için uygulanan alansal jet grout aşamaları	67
Şekil 6.25. Vaka 3 – Uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait ayna kesiti.....	68
Şekil 6.26. Vaka 3 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait ayna kesiti (dinamik analiz).....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

V_{unsat}	: Kuru birim hacim ağırlık
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
Ψ	: Dilatansi (dilatasyon) açısı
c'	: Efektif Kohezyon
E	: Elastisite modülü
kPa	: Kilopascal
NATM	: Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi, New Austrian Tunneling Method
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
SPT	: Standard Penetrasyon Testi
TBM	: Tünel Açma Makinesi, Tunnel Boring Method

1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfus, hızlı kentleşme ve bu gelişmelere paralel olarak bina, karayolu, demiryolu gibi yapı ve altyapı gereksiniminin artması, yüksek mühendislik özelliklerine sahip uygun nitelikteki arazi miktarını ciddi ölçüde azaltmıştır. Yapıların güvenli ve ekonomik bir şekilde inşa edilebilmesi amacıyla, zeminlerin taşıma gücü yetersizliğini, sıvılaşma problemini ve deformasyon karakteristiklerini iyileştirmek, günümüzde kaçınılmaz bir mühendislik gerekliliği haline gelmiştir. Bu durum, mühendisleri yapıların inşa edileceği alanlarda mevcut zayıf ve yumuşak zeminleri, zemin iyileştirme yöntemleri ile güçlendirerek kullanmaya yönlendirmiştir (Mishra, 2016).

Tünelde su sızıntısı, kaplama arkasındaki boşluklar ve kaplama çatlaması gibi ciddi sorunlar meydana gelebilmektedir. Bunlar arasında, özellikle tünelin kemeri ve yan duvarlarında olmak üzere kaplama çatlaması en sık görülmektedir. Kplama çatlamaları, tünel yapısının bütünlüğünü, taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını ciddi şekilde etkileyerek, betonun kabarması ve donatı korozyonu gibi sorunlara yol açmakta ve tünel kaplama yapısının ömrünü büyük ölçüde azaltmaktadır. Malzeme, inşaat, yan basınç, karmaşık yer altı ortamı, kazalar ve diğer faktörler kaplama çatlamalarına yol açabilir (Zhou vd. 2022).

Zemin iyileştirme yöntemleri; titreşim, katkı maddeleri, yapısal dolgu ile yapısal takviye iyileştirmesi, grouting (harç enjekte etme) ve diğer yöntemler gibi bir dizi kategoriye ayrılabilir. Farklı zemin davranışlarını geliştirerek, zemin dayanımını ve özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilecek pek çok teknik bulunmaktadır (Edil, 2003). Zemin taşıma kapasitesinin artırılması, toplam ve farklılaşmış oturma potansiyelinin azaltılması, oturmanın meydana gelme süresinin kısaltılması, özellikle doymuş gevşek ince kum veya hidrolik dolguların sıvılaşma potansiyelinin azaltılması, zeminin hidrolik iletkenliğinin düşürülmesi, yer altı suyu drenajı; zemin iyileştirme yöntemlerinin önemli özellikleri arasında yer almaktadır (Edil, 2003; Kazemain ve Barghchi, 2012).

Sıvılaşma riski taşıyan ya da düşük dayanımlı zeminlerde tünel kazısı sırasında oluşabilecek deformasyonların kontrol altına alınabilmesi amacıyla zemin iyileştirme yöntemlerini uygulamak kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu tür zeminlerde özellikle jet grout, enjeksiyon ve ankraj gibi etkin iyileştirme yöntemleri kullanılarak zemin mukavemeti artırılmakta, geçirgenlik azaltılmakta ve yapı-zemin etkileşimi iyileştirilmektedir. Uygulanan iyileştirme yöntemlerinin doğru şekilde değerlendirilebilmesi için sonlu

elemanlar yöntemiyle sayısal modelleme yapılan Plaxis 2D gibi ileri düzey geoteknik analiz programları kullanılmaktadır (Bao vd. 2019; Sadikon vd. 2024).

Bu çalışmada, zemin profili mukavemet parametrelerinin zayıf olan Çakıllı Siltli KUM, Killi SİLT, Kumlu Killi SİLT, Siltli KİL, Siltli KUM, Kumlu KİL, Kumlu SİLT tabakalarını içeren iki yönlü Yüksek Hızlı Tren hattına ait raylı sistem ile ulaşım sağlanabilmesi için NATM yöntemi ile tünel inşa edilmiş olup zemin iyileştirmek için jet grout ve ankraj olmak üzere iki farklı yöntem ile zemin iyileştirme yapılması amaçlanmıştır. Aynı zamanda zemin iyileştirmesi yapılacak zeminde yeraltı suyu seviyesi varlığında statik ve farklı deprem büyüklükleri değerleri ile dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde, NATM yöntemiyle yapılan tünel kazılarında jet grout ve ankraj yöntemleriyle gerçekleştirilen zemin iyileştirme çalışmalarına sıkça rastlanmaktadır. Bu çalışmalar söz konusu yöntemlerin statik ve dinamik yöntemler altındaki davranışlarını inceleyen deneysel araştırmalar ile başlamış ardından bu davranışların nümerik modellerle analiz edildiği çalışmalar ile devam etmiştir. Bu bölümde ise, bu kapsamda yapılan tasarıma yönelik çalışmalar özetlenmiştir.

Masini vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada, Roma Metro Hattı C kapsamında, TBM ile San Giovanni İstasyonu arasında yer alan ve Aurelian Duvarları'na yakın geçen konvansiyonel tünellerin kazısı, tarihî yapıya zarar vermemek amacıyla üç aşamalı bir yöntemle gerçekleştirilmiştir: mini TBM ile küçük çaplı tünel açılması, bu tünellerden radyal çimento enjeksiyonu ile zemin iyileştirmesi ve ardından asıl tünellerin kazısı. Ayrıca, duvar ile tünel arasında kazık bariyeri uygulanmıştır.

Yer hareketleri detaylı olarak izlenmiş, enjeksiyon işleminin zemin yüzeyinde önemli kabarmalara (heave) neden olduğu ve bu etkilerin tünel kazısından kaynaklanan deformasyonlarla benzer büyüklükte olabileceği görülmüştür. Sayısal analizler, enjeksiyonun hacimsel etkileri modele dâhil edilmeden gözlemlenen davranışın açıklanamayacağını göstermiştir. Koruyucu kazık bariyeri, özellikle Aurelian Duvarları'nda oturma ve dönme deformasyonlarını anlamlı ölçüde azaltarak etkili bir önlem olarak değerlendirilmiştir.

Shakya vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, jet grouting uygulamasının sayısal modellenmesi için Hareketli Parçacık Yarı-Derinlemesine (MPS) yöntemi ve Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) tabanlı model geliştirme süreçleri kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Literatürdeki eksiklikler göz önüne alınarak adım adım ilerleyen bir yöntem önerilmiş, püskürtme ve malzeme parametrelerinin doğruluğu deneysel verilerle karşılaştırılarak onaylanmıştır. Ayrıca, Bingham akışkan modelinde karmaşık olan malzeme parametresi belirleme süreci, basınçsız tek eksenli dayanımı (UCS) bilinen zeminler için evrensel bir kılavuza dönüştürülmüştür. Simülasyonun güvenilirliği benzer deneysel çalışmalarla doğrulanmış ve yöntem yüksek doğrulukta sonuçlar vermiştir.

Tyagi (2025) tarafından yapılan bu çalışmada, derin zemin karışımı ve jet grouting gibi zemin iyileştirme yöntemlerinin toplu taşıma ve yeraltı istasyonu projelerindeki kullanımı incelenmiştir. İyileştirilmiş zeminlerin dayanımı ve kırılma davranışının

anlaşılması için santrifüj ve sonlu eleman modelleriyle ön tasarım rehberleri geliştirilmiştir. Makalede, büyük yeraltı açıklıklarının kırılma modları, stabilite denklemleri ve örtü kalınlığının etkisi ele alınmış, ayrıca zemin özelliklerindeki varyasyonu hesaba katan rastgele sonlu eleman analizine dayalı tasarım yaklaşımı tartışılmıştır .

Abdelhamid vd. (2023) tarafından yapılan bu çalışmada, taş kolonların zayıf ve yumuşak zeminlerde ekonomik ve çevresel açıdan etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olduğu vurgulanmıştır. Makalede, taş kolonların inşaat yöntemleri, kırılma mekanizmaları ve davranışlarını etkileyen temel faktörler ile çevrelenmiş taş kolonların performansına dair yakın tarihli çalışmalar özetlenmiştir. Sonuçlar, geosentetik malzeme ile çevrelenmiş taş kolonların yük-oturma davranışını iyileştirdiğini göstermektedir. Literatürde bu kolonların çökme oturmasını azaltmadaki etkisi üzerine eksiklikler bulunmakta olup, bu konuda detaylı çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Yao vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, yüksek basıncılı jet grout kazıklarının çevreleyen zeminlerde önemli yanal yer değiştirmelere yol açtığı ve bu durumun diyafram perdeleri gibi yapıları etkileyebileceği vurgulanmıştır. Saha testleriyle, akıllı algılamalı süper jet kazık (SJT) ve Rodin jet kazık (RJP) tekniklerinin zemin yanal yer değiştirmelerine etkisi analiz edilmiştir. SJT tekniği, çevreleyen zeminde daha az rahatsızlık yaratmış ve etkisi 4 m ile sınırlı kalmıştır. Ayrıca, pasif kazık teorisine dayalı bir model geliştirilerek, diyafram perdelerdeki yanal sapmalar tahmin edilmiş ve sonuçlar gözlemlerle tutarlı bulunmuştur. Bu bulgular, jet grout kazıklarının hassas yapıların yakınında güvenli bir şekilde tasarlanması için önemlidir .

Pradhan ve Tiwari (2024) tarafından yapılan çalışmada, yumuşak kil ile takviye edilmiş geri dönüştürülmüş agregalarla yapılan granüler kazıkların oturma profili incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile kazığın geometrisindeki değişiklikler, yük-oturma yanıtı ve fazla gözenek suyu basıncı profili analiz edilmiştir. Kazık aralığındaki artışın, tüm malzemelerde fazla gözenek suyu basıncı profilinin zirvesini artırdığı bulunmuştur. Ayrıca, granüler kazıkların penetrasyonunun arttırılması, taşıma kapasitesini ve boşalma oranını iyileştirmektedir. Geri dönüştürülmüş tuğla en düşük, geri dönüştürülmüş beton agregası ise en yüksek fazla gözenek suyu basıncına sahiptir. Sonuçlar, yumuşak zemin iyileştirme açısından uygundur.

Njock vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada jet grout uygulamasının tarihsel gelişimi ele alınmakta; tek, çift ve üç akışkanlı sistemler farklı zemin koşulları,

kolon çapı, dayanım ve karışım homojenliği gibi performans parametreleri açısından karşılaştırılmaktadır. Çift ve üç akışkanlı sistemler özellikle geniş alanlarda ve bindirmeli kolon uygulamalarında tercih edilirken, tek akışkanlı sistemin (mono-fluid) daha karmaşık ve kısıtlı alanlarda esnek ve kullanışlı olduğu, ancak geniş çaplı zemin iyileştirmelerinde diğer sistemlere kıyasla sınırlı kaldığı bildirilmektedir.

Karakuş ve Fowell (2004) 1964'te ilk kez tanıtılan ve Rabcewicz tarafından modern bir yöntem olarak sunulan Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM), zeminin kendi dayanım ve taşıma kapasitesini sistemin bir parçası olarak kullanmayı hedefler. 1994'te meydana gelen Heathrow Express İstasyonu tünellerinin çökmesi, NATM'nin uygun bir yöntem olup olmadığını sorgulatmıştır. Bu nedenle makale, NATM'deki çökme nedenlerini açıklamak ve yaşanan başarısız uygulama örneklerini incelemek amacıyla hazırlanmıştır.

NATM'de kazı yapıldıktan sonra ince püskürtme beton uygulanır; gerekirse ankrajlar, çelik hasır, kafes kiriş gibi yardımcı elemanlar eklenir. Yöntemin avantajları arasında farklı kesit ve büyük tünel açıklıklarında uygulanabilirlik, daha düşük maliyet, ek destek elemanlarının kolayca uygulanabilmesi, su yalıtım membranının rahatça yerleştirilebilmesi ve çeşitli zemin koşullarına uyum sayılabilir. Bu özellikleri sayesinde NATM, eleştirilere rağmen dünyada uygulanmaya devam etmektedir.

Pichler vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada, NATM tünelcilikte kentsel alanlarda kullanılan yatay jet enjeksiyonu (HJG) yönteminin yüzey oturmalarına etkisi incelenmiştir. Jet kolonlarının sayısı, konumu, bekleme süresi ve zemin özellikleri sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Sonuçlar, kolon sayısının azaltılmasının oturmaları artırdığını, bekleme süresinin ise belirgin bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Uygun zemin koşullarında HJG oturmaları azaltmada etkili bir yöntemdir.

Dasari vd. (1996) tarafından yapılan çalışmada, Londra'da NATM tünel inşaatı, sonlu elemanlar programı CRISP kullanılarak hem iki boyutlu (2D) hem de üç boyutlu (3D) olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Çalışmada temel amaç, farklı modelleme yaklaşımları arasındaki farkların ortaya konmasıdır. Bu kapsamda, tünel yüzü önünde meydana gelen zemin kemerleşmesi (arching effect), kaplama rijitliğinin ve kaplama süresinin yüzey oturmalarına etkisi değerlendirilmiş; ayrıca 2D ve 3D analizlerde kullanılan yöntemler karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, tünel inşaatında yapım sırasının yüzey oturmaları üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca 2D analizler, 3D analizlere kıyasla yaklaşık üç kat daha büyük oturma değerleri

tahmin etmektedir. Bu nedenle, yalnızca 2D analizlere dayanılarak yapılan değerlendirmelerin yanıltıcı olabileceği, daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için 3D modellemenin de mutlaka dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Phadke ve Titirmare (2017) yapılan çalışmada, NATM ve TBM yöntemlerini teknik, ekonomik ve güvenlik açısından karşılaştırmak ve farklı koşullara göre hangi yöntemin daha avantajlı olduğunu belirlemektir. TBM yöntemi, büyük ölçekli makinelerle gerçekleştirilen, güvenli ve hızlı bir tünel açma tekniğidir. NATM yönteminde ise kazı işlemleri patlayıcılar kullanılarak yapılmaktadır. TBM, patlayıcı içermediğinden daha güvenli kabul edilmekle birlikte, yüksek maliyetli olması ve değişken jeolojik koşullara uyum sağlamakta zorlanması önemli dezavantajlarıdır. Her iki yöntemde de yeraltı jeolojisinin dikkatle incelenmesi gerekmekte olup, doğru yöntemin seçimi hem ekonomik verimlilik hem de güvenlik açısından kritik öneme sahiptir.

3. TEORİK ÇALIŞMALAR

3.1. Konsolidasyon

Konsolidasyon, suya doymun olan ve özellikle kil tabakalarının bulunduğu ince taneli zeminlerde zamanla uygulanan yük etkisiyle boşluk suyu basıncı azalmaktadır. Buna bağılı olarak zaman içerisinde zemin hacminde meydana gelen oturma sürecidir. Kil içeren zeminlerde, suyun zemindeki boşluklardan dışarı çıkması zaman almaktadır. Bu nedenle konsolidasyon süreci genellikle zamanla gelişen bir deformasyon sürecidir ve geçici boşluk suyu basıncının sönümlenmesiyle tamamlanmaktadır. Diğer bir deyişle; konsolidasyon, geoteknik mühendisliğinde oturma analizlerinin temelini oluşturan kritik bir süreçtir. Zemin davranışının zamana bağılı olarak değerlendirilmesi gereken durumlarda (örneğin bir baraj altında bulunan yumuşak kil tabakasında) konsolidasyon süresi ve miktarı, yapı güvenliği ve servis performansı açısından doğrudan etkili olur.

Konsolidasyonun Önemi;

Yapılar altında oluşan oturmaların önlenmesi için konsolidasyon davranışı dikkatle analiz edilmelidir.

Özellikle barajlar, yollar, tüneller, yüksek yapılar, istinat yapıları gibi mühendislik projelerinde zemin davranışını doğru modellemek, konsolidasyon analizleriyle doğrudan ilgilidir.

Konsolidasyon hızı ve miktarı, zemin permeabilitesi, zemin kalınlığı, drenaj koşulları, yükleme süresi gibi parametrelerden etkilenmektedir.

3.2. Sıvılaşma

Özellikle suya doymun gevşek halde bulunan granüler zemin olan kumlarda dinamik yükleme (deprem sırasında) ile tetiklenen sıvılaşma, yapı temelleri ve mevcut yapılarda önemli hasarlara yol açabilmektedir. Meydana gelebilecek ani denge durumu kayıpları ise yapıların yıkımına, ekonomik kayıplara ve hatta can kaybına neden olabilmektedir.

Sıvılaşma; boşluk suyu basıncının artması ve zeminin efektif gerilmesinin azalması sonucu kesme dayanımını kaybetmektedir. Bu durum neticesinde kumlu zeminin sıvı benzeri özellikler göstermesine yol açmaktadır. Bu olaya sıvılaşma denilmektedir.

Sıvılaşmanın etkilerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için en yaygın olarak zemin iyileştirme yöntemleri uygulanmaktadır. Sıvılaşma potansiyeli olan özellikle

gevşek kum zeminlerin fiziksel özellikleri üzerine yapılan araştırmalar neticesinde; kum yoğunluğu, ince dane içeriği, uniformluk katsayısı ve diğer faktörlerin sıvılaşma üzerinde önemli etkisi olduğu açığa çıkmıştır. Ancak, bu faktörlerin kontrolü sıvılaşma direncini artırmak için en etkili yöntem olmamıştır.

Sıvılaşma direncini artırmak için mevcut yöntemler arasında çimento veya kimyasal çözeltilerle (sodyum silikat, akrilat, epoksi vb.) enjeksiyon, temel sıkıştırması, çakıl kolonları, temel değiştirme ve drenaj yer almaktadır (Kramer, 1996; Bao vd. 2019; Sadikon vd. 2024).

3.3. Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin iyileştirme, teknik ve ekonomik açıdan bakıldığında, çalışma sahasındaki zemini mühendislik özellikleri açısından inşaata uygun hale getirmenin en etkili yöntemidir.

Çalışma sahası hakkında; yerel zemin tipi, arazi kullanımının mevcut ve gelecekteki durumu, üst yapıdan gelecek yapısal yüklerin taşınması için gereken dayanımlar ve projenin tahmini maliyeti hakkında bilgi sahibi olmak; inşaat yapıları ya da madencilik aktiviteleri gibi herhangi bir çalışma yapılmadan önce çok önemlidir (http-1).

Zemin iyileştirmenin temel amacı; söz konusu çalışma sahasındaki zeminin veya üzerine inşa edilecek yapının kayma mukavemeti, taşıma gücü, rijitliği ve stabilitesini artırmak; oturma, sıvılaşma, göçme, geçirgenlik ve şişme gibi istenmeyen özelliklerini ise en aza indirmektir. Bu sebeple bir ya da daha fazla zemin özelliğinin değiştirilmesi işlemine zemin iyileştirme denmektedir (Dawson vd. 1998).

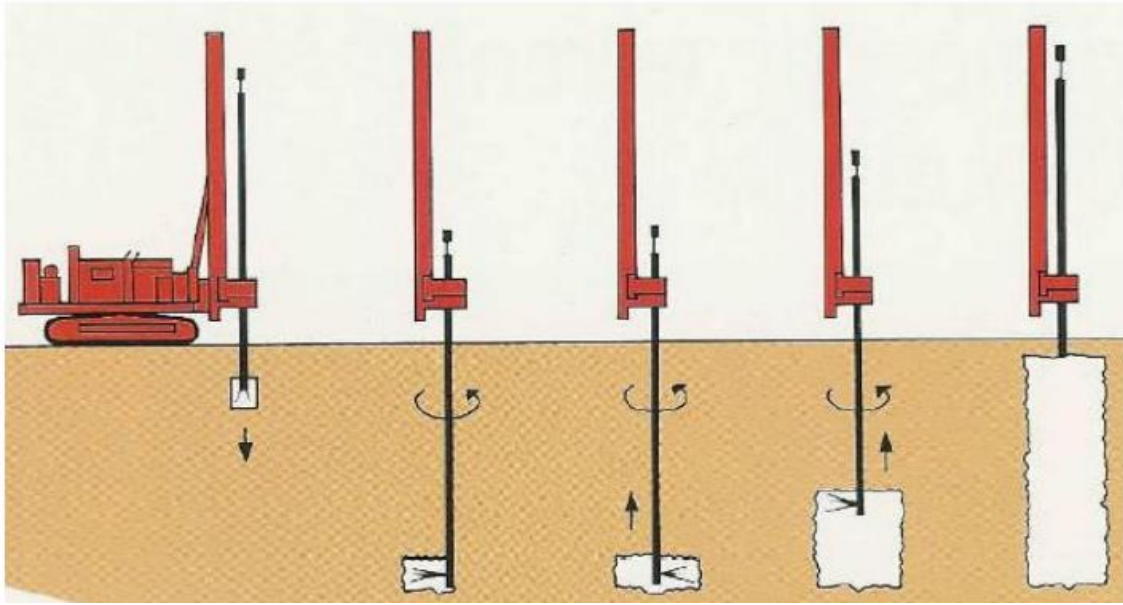
Stabil olmayan zeminlerde; eğim göçmelerinden temel oturmalarına, tünel ve maden pasa yığının (atık depolama alanı) tamamen çökmesine kadar; üzerindeki yapıların ve diğer mühendislik sistemlerinin tamamen çökmesine kadar büyük felakatlere yol açabilmektedir (Gupta vd. 2019).

Uygun olmayan zeminlerin inşaata elverişli hale getirilmesi amacıyla birçok farklı teknik geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Farklı zemin türleri, çeşitli yöntemler ve malzemeler kullanılarak zemin iyileştirmek mümkündür. Güvenli yapıların inşa edilebilmesi için zemin koşullarının geliştirilmesine yönelik çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında jet grout ve ankraj ile zemin iyileştirme başlıkları üzerine çalışma ayrıntılı olarak incelenmektedir.

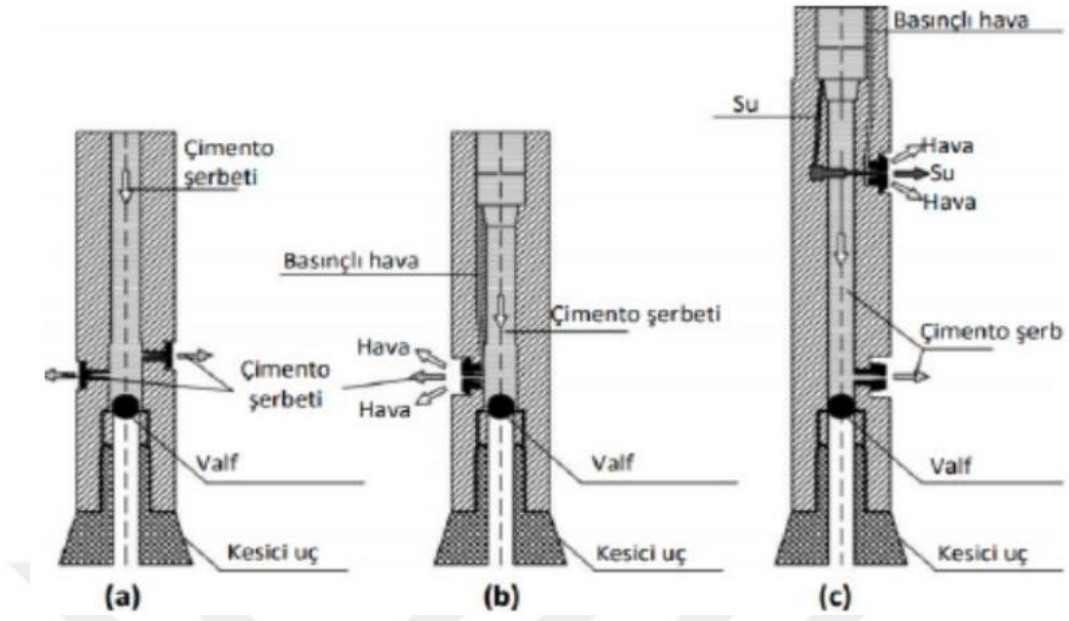
3.3.1. Jet grout ile zemin iyileştirme

Jet grout yöntemi, çimento şerbeti, hava, su gibi bir ya da daha fazla akışkan jeti zemine yüksek basınç altında enjeksiyonla zeminin iyileştirilmesi esasına dayanmaktadır. Söz konusu yöntemi uygulama aşamasında; istenilen derinliğe kadar yerleştirilen çelik bir boru aracılığıyla, uygulama derinliğinden yüzeye doğru çekilmektedir. Uygulanan akışkan jet, bu esnada yüksek basınç altında zemine enjekte edilirken; diğer yandan boru eksenine dik yönde yayılım göstermektedir. Aynı zamanda zeminin parçalanması, yerinden taşınması ve aynı anda çimento ile karıştırılması vasıtasıyla yerinde silindirik kolonların oluşturulması esasına dayanmaktadır (Raison, 2004). Şekil 3.1’de jet grout yönteminin sahada uygulanması şematik olarak gösterilmektedir



Şekil 3.1. Jet Grout yönteminin sahada uygulanmasının şematik gösterimi (Rawlings vd. 2000)

Çalışma sahasında jet grout yöntemi ile kolon oluşturulması amacıyla üç temel jet grout sistemi mevcuttur. Tek akışkanlı (sadece harç enjeksiyonu), Çift akışkanlı (harç + hava enjeksiyonu), Üçlü akışkanlı (su + hava enjeksiyonu ve ardından harç enjeksiyonu) sistemler ile gerçekleştirilmektedir. Tek ve çift akışkanlı sistemler, gevşek kumlu zeminlerde kullanılabilirken, üç akışkanlı sistem çoğu zemin türünde kullanılabilir. Şekil 3.2’de jet grout uygulaması akış sistemleri şematik olarak görülürken aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır.



Şekil 3.2. Monitörlerin şematik çizimleri: (a) tek akışkanlı, (b) çift akışkanlı ve (c) üç akışkanlı sistemler (Wang vd. 2013)

Tek akışkanlı sistem: Yüksek basınçla zemine sadece çimento şerbeti enjekte edilmektedir.

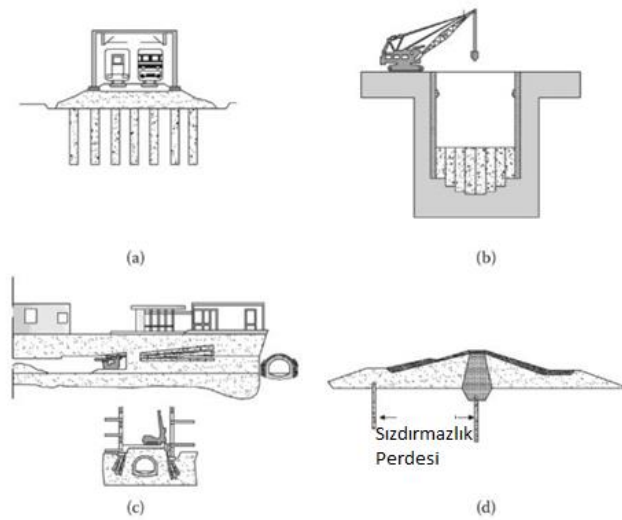
Çift akışkanlı sistem: Çimento şerbeti ile birlikte basınçlı hava kullanılmaktadır. Yüksek basınçta enjeksiyon edilen çimento şerbeti ve hava, daha fazla zeminin çıkarılmasını ve harçla değiştirilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemde jet etkisinin artırılması amaçlanmaktadır.

Üç akışkanlı sistem: Çimento şerbeti, hava ve su birlikte enjekte edilmektedir. Bu sistem ile daha fazla zeminin çıkarılması sağlanırken zemin neredeyse tamamen çimento şerbetiyle değiştirilmektedir. Su ve hava karışımı aracılığıyla zemin parçalanırken, ayrı bir nozuldan çimento enjeksiyonu yapılmaktadır. Bu sistem en yüksek ayrıştırma ve karıştırma kapasitesine sahiptir (Wang vd. 2013).

Çeşitli mühendislik gereksinimleri için, farklı zemin koşullarında uygulanabilir zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemin başlıca uygulanma amaçları aşağıda maddeler halinde ifade edilmektedir.

- Heterojen ya da mühendislik özellikleri yeterli olmayan zemin koşulların olduğu çalışma sahasında dayanımı yüksek ve permeabilitesi düşük kolonlar oluşturarak temel altı iyileştirme yapılması amacıyla zeminin taşıma gücü artırılması ve var olan temel yapısının güçlendirilmesi için tercih edilmektedir.

- Tünel, metro, istasyon gibi yeraltı yapılarına ait kazılarda ve baraj temelleri gibi yapıların etrafında permeabilite ve yer altı su kontrolünün sağlanması; aynı zaman da kazı güvenliği sağlamak ve yapının uzun süreli dengesini korumak amacıyla su geçirimsizliği için bariyer ya da ön iyileştirme perdeleri yapılmaktadır (Şekil 3.3.).
- Kazı güvenliği sağlamak ve yapının uzun süreli dengesini korumak amacıyla tünel kazılmadan önce ön iyileştirme perdeleri yapılmaktadır.
- Suyu doymuş kumlu zeminlerde deprem kuvveti etki ettiğinde, jet grout yöntemiyle zeminin rijitliği ve drenaj kapasitesi iyileştirilerek sıvılaşma riski önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Dolayısıyla zemin sıvılaşma ihtimalinin azaltılması amacıyla da kullanılmaktadır.
- Obrukların doldurulması ve mevcut durumda yeraltında var olan boşlukların dengesini sağlamak amacıyla uygulamaktadır. Bu esnada yapı güvenliği sağlanırken, çalışma sahasındaki jeolojik koşullarında da olabilecek riskler indirgenmektedir.
- Pasif zemin direnci, jet grout uygulaması vasıtasıyla iyileştirilmekte ve kazı esnasında meydana gelebilecek deformasyonlar sınırlandırılmaktadır. Söz konusu uygulamada; Şev duraylılığı artırılması ve derin kazı destek sistemleri olmak üzere iki farklı sistem de zeminde iyileştirme yapılması amacıyla kullanılmaktadır (Croce vd. 2014; Al-Khadaar and Ahmed, 2023).



Şekil 3.3. Çalışma sahasındaki jet grout uygulamaları: (a) dolgu tabanı zemin iyileştirme, (b) kazı-iksa sistemlerinde taban geçirimsizliği sağlayan sistem, (c) geçici tünel destek sistemi ve (d) baraj yapılarında sızdırmazlık perdesi (Croce vd. 2014)

Jet grout yerinde uygulanan yöntem olması sebebiyle titreşim, deplasman gibi çevreye yönelik kısıtlamaları oldukça azdır. Çalışma alanında şartları takip edilerek, kolon çapı, dayanımı gibi parametreler kontrol edilebilmektedir. Geçirgenliği düşük zeminlerde de uygulama sonrası verim söz konusudur. Hali hazırda var olan yapıların temel altı uygulamalarında uygulanabilmektedir. Aynı zamanda farklı geometrilere sahip koşullar içinde tasarım ve uygulama gerçekleştirilebilmektedir.

Jet grout yönteminin uygulama sürecinde;

- Ekonomik açıdan malzeme, cihaz ve sahada gerçekleştirmesi,
- Çalışma sahasının iyi bir şekilde denetlenmesi ve kalifiye operatörün var olması, uygulama kalitesini ciddi ölçüde etkilemesi,
- Jet grout gerçekleştirilirken, aşırı basınç uygulanması durumunda etraftaki yapılarda zarara ve deformasyona sebep olabilmesi,
- Projelendirme esnasında yanlış parametre seçimi, sahada uygulamada yetersiz sonuç verebilmesi

gibi zorlu ve kısıtlayıcı şartların var olabileceği göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

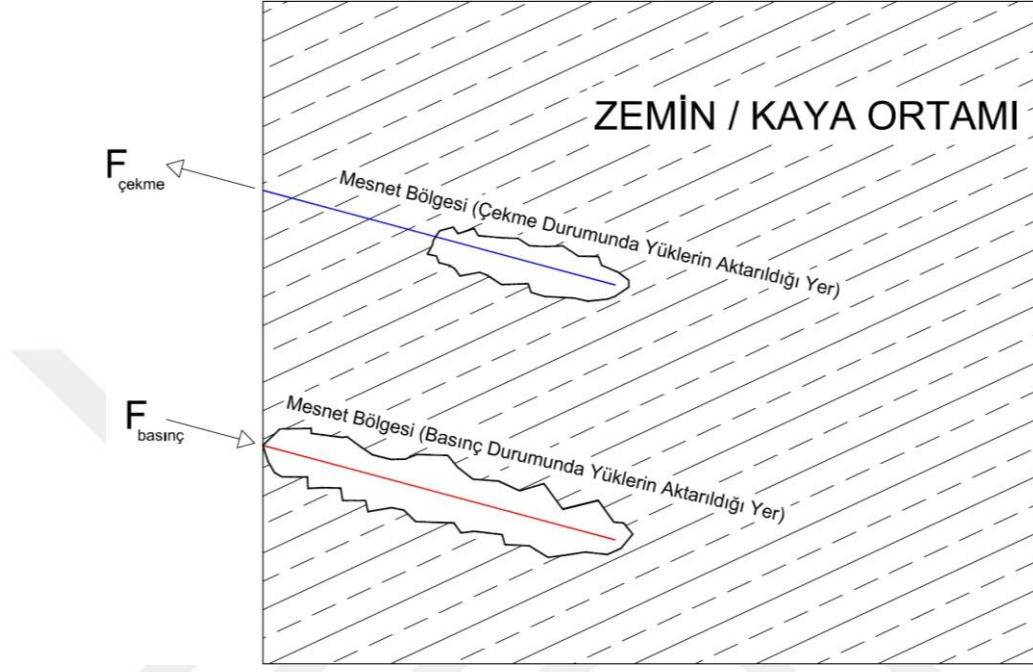
Bu yöntemin dezavantajı, yeterli derecede karıştırma sağlamak için genellikle özel ekipmanların gerekli olmaktadır. Eğer karıştırma yetersiz meydana gelirse, ortaya çıkan ürün, iyileştirilmiş sert noktalarla ayrılmış ve iyileştirilememiş yumuşak noktalar şeklindedir. Bu durum, hiç iyileştirme yapılmamış olmaktan daha kötü bir sonuca sebep olabilmektedir (Ingles and Metcalf, 1973).

3.3.2. Ankraj ile zemin iyileştirme

Ankraj, zemin ya da kaya içine yerleştirilen ve uygulanan çekme yükünü zemine iletmek için kullanılan yapısal bir elemandır. Ankraj uygulaması; zemin ya da kaya içerisinde açılacak delgi içerisine kısmi olarak kaplı çelik elemanın (çubuk, halat vs.) enjeksiyon karışımı ile yerleştirilerek gerçekleşmektedir. Ankraj kullanımının amacı; zemin veya kaya içerisine yerleştirilen yapısal elemanlar aracılığıyla bulunduğu ortama çekme yüklerinin aktararak şev ya da yapının denge halini korumaktır (Elton and Whitbeck, 1997; Strom and Ebelling, 2001; Barley and Mothersille, 2007).

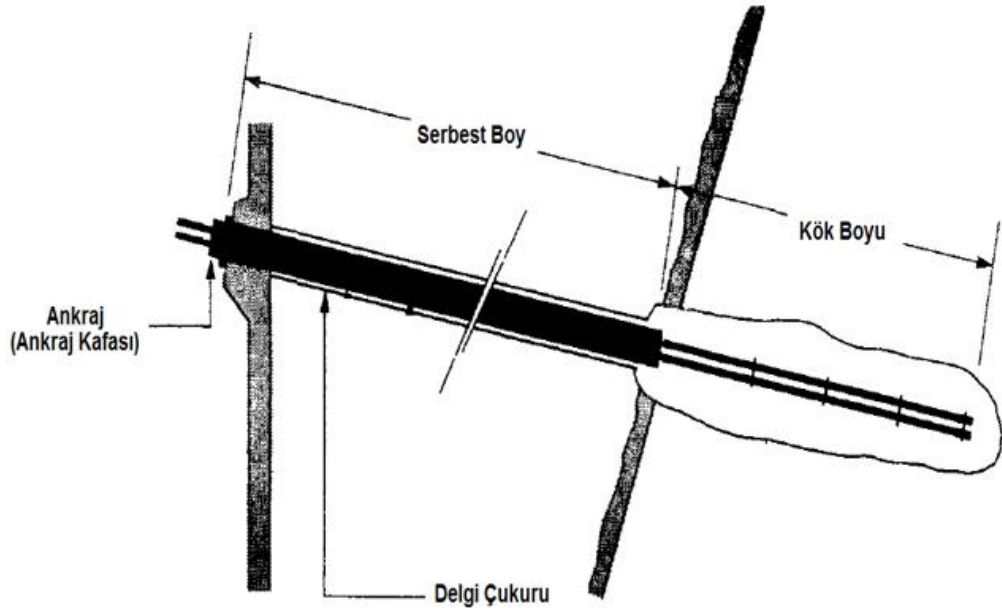
Ankrajların yük taşıma kapasitesi, yalnızca kullanılan çelik ya da alternatif malzemelerin çekme dayanımına değil, aynı zamanda yükün aktarıldığı kök bölgesi ile

ankrajın yerleştirildiği zemin ya da kaya ortamı arasındaki bağın etkinliğine de bağlıdır. Şekil 3.4'te ankraj ankrajların, çekme ya da basınç anında yük aktarım bölgeleri şematik olarak gösterilmektedir (Niroumand and Kassim, 2016).



Şekil 3.4. Ankrajların, çekme ya da basınç anında yük aktarım bölgeleri (Xanthakos, 1991)

Ankraj yapısı ankraj kafası, serbest boy ve kök boyu olmak üzere başlıca üç kısımdan oluşmaktadır. Ankraj kafası, yüzeydeki yapıya yük aktarımını sağlamaktadır. Serbest boy, Yük taşımaz, amacı ankraj çubuğunun serbest olarak gerilmesini sağlamaktır. Kök boy ise, enjeksiyonla zemine bağlanan ve yükün zemine aktarıldığı bölgedir. Ankrajın oluşturduğu yapısal elamanlar, ankrajın etkin biçimde çalışmasını ve denge halini korumasını sağlanmaktadır. Şekil 3.5 'te ankraj yapısının şematik gösterimleri yer almaktadır (Xanthakos, 1991).



Şekil 3.5. Ankraj yapısı bileşenleri (Xanthakos, 1991)

Ankrajlar kullanım amaçlarına ve yükleme şekillerine göre pasif ve aktif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Pasif ankrajlar, öngerme işlemi uygulanmamaktadır. Başka bir deyişle, pasif ankrajların yük taşıması, çevresindeki deformasyonlara bağlıdır. Ankraj elemanı (çelik çubuk ya da halat), çimento/su enjeksiyonu ile zemine yerleştirilmektedir. Ankrajda yükleme, zeminde ya da kaya ortamında meydana gelen hareketler olan çekme yükleri pasif ankrajı oluşturan çelik elemanlar tarafından taşınarak sisteme aktarılmaktadır.

Pasif ankrajlar genellikle;

- Zemin çivisi ve kaya bulonu sistemlerinde,
- Stabil olmayan şevlerin güçlendirilmesi,
- Çok derin olmayan kazı uygulamalarında,
- Tünel ve metro gibi yeraltı yapılarında lokal göçmeleri engellemek amacıyla kullanılmaktadır.

Aktif ankrajlar, belirli bir öngerme kuvveti uygulanarak sistemin ilk andan itibaren yük taşıyacak şekilde tasarlanmış elemanlardır.

Aktif ankrajlar genellikle;

- Şev destekleme sistemlerinde,
- Kazıların stabilitesinin sağlanmasında,
- Yapıların kaldırma kuvvetlerine karşı korunmasında,

- Yapının maruz kalacağı nihai yükler karşısında deformasyonları sınırlandırmak amacıyla uygulanmaktadır.

Aktif ankrajlar, yalnızca dış yükleri değil, aynı zamanda yapının servis süresi boyunca karşılaşılabileceği tüm etkilere karşı direnç sağlamaktadır.

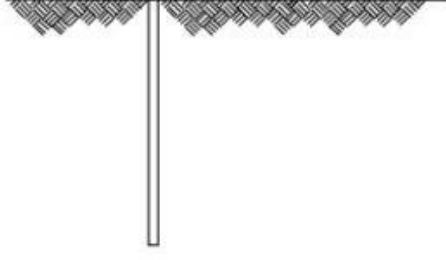
Çekme yüklerinin zemine ya da kaya ortamına aktarılması amacıyla kullanılan aktif ankrajlar; desteklenmiş olan yapının nihai durumdaki doğal zemin ile yapmış olduğu etkileşimi göz önünde bulundurmadan, mevcut öngerme seviyesinde yük uygulanması çalışmaktadır.

Kazıların desteklenmesi, şevlerin güçlendirilmesi, yapıların suyun kaldırma etkisi altında kontrol altına alınması gibi birçok farklı projede uygulanan aktif ankrajlar, desteklemiş olduğu yapının daha sonra maruz kalacağı yükler altında göstereceği deformasyonu sınırlandırmak ve azaltmak için tercih edilmektedir. Tablo 3.1’de ankraj tiplerini uygulama ve enjeksiyon aşamaları özet olarak yer almaktadır (Xanthakos, 1991).

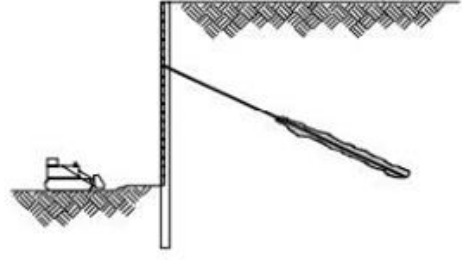
Tablo 3.1. Aktif ve pasif ankrajların uygulama ve enjeksiyon aşamaları (Xanthakos, 1991)

Zemin Ankrajı Tipi	Ankraj Çelik Tipi	Yapı ile Bağlantıyı Sağlayan Ankraj	Zemin İçindeki Kök Bölgesi	Enjeksiyon Aşamaları
Aktif	Öngermeli	Öngermeli çelik için cihaz, aparat	Kök bölge ile sınırlı	1-Kök bölgenin enjeksiyonu 2-Boruların zemine bağlanması için enjeksiyon 3-Boruların enjeksiyonlanması
Pasif	Öngermesiz	Bağlantı ve göğüsleme için kullanılan sıradan aparat ve ekipmanlar	Ankraj boyunca devam etmekte	1-Boruların zemine bağlanması için enjeksiyon 2-Boruların enjeksiyonlanması
Ara	Yarı Öngermeli	Öngermeli çelik için cihaz ve aparat	Kök bölge ile sınırlı	1-Kök bölgenin enjeksiyonu 2-Boruların zemine bağlanması için enjeksiyon 3-Enjeksiyon olmadan çelik elemanın korunması

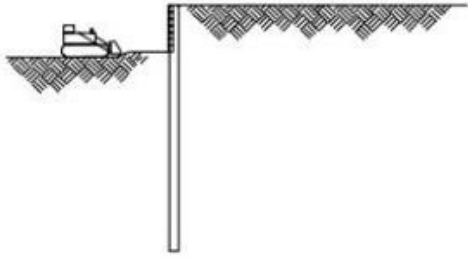
Ankraj ile yatay olarak iksa destek uygulaması Şekil 3.6’da saha uygulama aşamaları görülmektedir. Kazı yapılmadan önce düşey iksa elemanı yerinde tatbik edilmektedir. Ardından projede belirtilen derinliğe kadar kazı gerçekleştirilmektedir. Bu kademdeki ankraj uygulamaları gerçekleştirilip kazı tamamlanana kadar aynı şekilde devam edilmektedir. Sonrasında ankraj başlıkları ve barbakan montajı gerçekleştirilmektedir. Son aşamada ise ankraj başlıkları zarar görmemesi için bütün yüzey püskürtme beton gibi uygulama ile kaplanmaktadır (Xanthakos 1991).



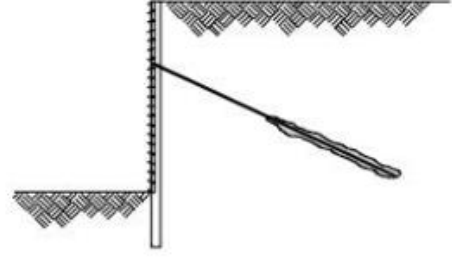
AŞAMA 1: Dikey destek elemanlarının yerleştirilmesi



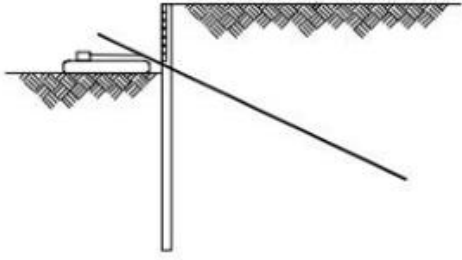
AŞAMA 4: Kazının tamamlanması



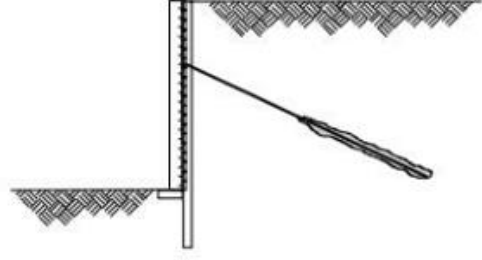
AŞAMA 2: Kazı ve yatay destek elemanı montajı



AŞAMA 5: Ankraj başlıklarının ve barbakanların montajı



AŞAMA 3: Zemin ankrajının montajı ve test edilmesi



AŞAMA 6: Ön yüz cephe kaplaması, ankraj uygulaması sonrası

Şekil 3.6. Sahada ankraj uygulaması (Xanthakos, 1991)

4. TÜNEL

Yer altı mühendisliğinin önemli yapı birimlerinden biri tünel sistemleridir. Tünel, iki ucu boşluklu olup yatay ya da eğik olacak şekilde açılan yapılara denmektedir. Başka bir deyişle, ekonomik bakımdan yetersiz veya vasıta veya ulaşım yolunun bir bölümünün zemin üzerinden geçirilmesinin teknik açıdan uygun olmayan koşullarda söz konusu yolların bir bölümünün yer altından geçilmesini mümkün kılan iki ucu açık olan yer altı yapılarıdır (Bickel vd. 1996).

4.1. Tünel Tipleri

Yer altında inşa edilen mühendislik geçitleri olan tüneller; içme suyu ve atıksu iletimi, hidrolik güç ve su, maden işletmeciliği, ulaşım gibi çeşitli alt yapı ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. İşlevlerine göre farklı çeşitleri mevcuttur. Bu çalışmada ulaşım ve hizmet tünelleri iki temel grup altında sınıflandırılmış olup başlıklar altında detaylı anlatım gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Hizmet tünelleri

Hizmet tünelleri, alt yapı sistemlerinin, iletişim hatlarının, enerji nakil hatlarının veya diğer hizmetlerin taşınması ve bakımının yapılması için inşa edilen tünellerdir. Bu tüneller, bu hizmetleri yer altında korumak ve erişilebilir kılmak amacıyla kullanılmaktadır. Hizmet tünelleri aşağıdaki gibi çeşitli alanlarda hizmet edebilmektedir.

Kanalizasyon Tünelleri: çeşitli kaynaklardan kullanım neticesinde açığa çıkan atık suların, kirliliklerinin giderimi için arıtma tesislerine ulaşımını gerçekleştirmek amacıyla yapılmaktadır. Tünel inşaa edilirken kullanılacak yalıtım malzemesi ve tünel nihai kaplaması belirlenirken, söz konusu olan atıksuların içerisinde yer alan çeşitli kimyasallar ve tünel çeperlerine olabilecek olası korozyon, aşındırıcı gibi etkileri sebebiyle mukavemetli materyal kullanılmaktadır.

Alt Yapı Tünelleri: Doğalgaz veya petrol boru hatlarını içeren enerji nakil hatları; telefon hatları, fiber optik kablolar ve diğer telekomünikasyon hatlarını içeren iletişim sistemleri; elektrik şebekelerini ve yer altı dağıtım sistemlerini içeren elektrik hatları gibi yer altı hatlarının içinde yer alan kablo ve boruları zemin altında korurken, aynı zamanda bakımını da kolaylaştırmaktadırlar. Boyutları büyük boyutlarda olmayan tünellerdir.

Hidrolik güç ve su tünelleri: Yükseklik kazandırılmış suyun akım enerjisinden

faaydalanmak istenmektedir. Kanal ya da su borusu vasıtasıyla belli yüksekte olan su akışı ile trbirlere verilip elektrik enerjisi elde etmek için kullanılmaktadır. Genelde sağlam kayaalarda inşa edilmesine dikkat edilmektedir.

Hizmet tünelleri, kent yaşamındaki alt yapıların güvenliğini, bakımını, kontrolünü sağlamak için önemlidir. Yaşamın şehir içinde, şehir içinde verimli, rahat, sürdürülebilir olmasına olanak sağlamaktadır (Bickel vd. 1996; Canto-Perello and Curiel-Esparza, 2006; Fang vd. 2019; Qian vd. 2021).

4.1.2. Ulaşım tünelleri

Ulaşım tünelleri, ulaşım sisteminin bir parçası olan ve aynı zamanda insanların ya da malzemelerin lokasyonlar arası ulaşımını gerçekleştirmek amacıyla yapılan yapılarıdır. Aynı zamanda ulaşım tünelleri, deniz ve nehir altı gibi bölgelerde, yer altında ya da dağ içi gibi zorlu ve doğal arazi şartları altında, demiryolu, karayolu, metro gibi ulaşım sistemlerinin güvenli, sürekli bir şekilde akışını sağlamak için inşası gerçekleştirilen yeraltı yapılarıdır. Bahsi geçen tüneller ulaşım sistemindeki yoğunluğu azaltıp aynı zamanda ulaşım sisteminde sürekliliği sağlamayı amaçlamaktadır. Ulaşım tünelleri karayolu, demiryolu, metro ve yaya tünelleri olmak üzere 4 ana başlık altında sınıflandırılarak aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

Karayolu tünelleri: Otomobil, kamyon, tır gibi farklı araçların geçebileceği yükseklik ve genişlikteki motorlu vasıtaların ulaşımının, yoğun kent içi bölgelerde ya da zorlu doğal arazi şartlarında, güvenli ve sürekli bir şekilde sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen karayolu sistemlerinin geçtiği tünellerdir. Bahsi geçen tünellerin projelendirme aşamasında tünel yol geometrisi, trafik hacmi, taşıt cinsi, hız ve manevra kabiliyeti gibi faktörler dikkate alınarak dizayn edilmektedir. Aynı zamanda acil koşullar ya da ihtiyaç olması durumunda yayaların yürüyebilmesi amacıyla yol kenarlarına yapılan yaya yolları, havalandırma, aydınlatma, sinyalizasyon, drenaj ve yangın nleme sistemlerinin de olması zorunlu olan yapılarıdır.

Demiryolu tünelleri: uzun mesafeli insan ya da malzemelerin bir noktadan diğer noktaya nakledilmesini sağlamak amacıyla inşa edilen demiryolu sistemlerinin geçtiği tünellerdir. Bahsi geçen tünellerin projelendirme aşamasında tünel geometrik tasarımı, trenlerin taşıyacağı yk ve hızı gibi faktörler dikkate alınarak dizayn edilmektedir.

Metro tünelleri: Yolcu yoğunluğu fazla olan şehir içi bölgelerde, yüksek kapasiteye sahip, istasyon arasındaki mesafelerin kısa olduğu aynı zamanda düzenli ve sürdürülebilir

toplu taşıma gerçekleştirmek amacıyla inşa edilen metro ya da yer altı raylı sistem sistemlerinin geçtiği tünellerdir. Geleneksel demiryolu tünellerine göre; söz konusu metro tünellerinin içi yapısı, elektromekanik ve işletme sistemlerinin daha kompleks olduğu bilinmektedir.

Metro tünellerinin inşa edilmesiyle, yer üzerinde kısıtlı bölgesi olan şehir merkezlerinde ulaşım sürekliliğini gerçekleştirerek karayolu trafiğini hafifletmek (en aza indirmek), aynı zamanda mevcut araziye en etkin şekilde kullanmak amaçlanmaktadır.

Yaya tünelleri: Şehir içinde yaya hareketliliğinde devamlılık (sirkülasyonuna); karayolları, demir yolları gibi ulaşım alt yapılarının fiziksel olarak engel olmasını ortadan kaldırmak amacıyla inşa edilen yer altı tünelleridir (geçitleridir). Özellikle trafiğin yoğun olduğu şehir içi bölgelerde yayaların rahat ve güvenilir şekilde hareket etmelerini sağlamada oldukça etkili bir yöntemdir (Kavvadas, 2005; Diamantidis vd. 2000; Bešinović, 2020).

4.2. Tünel Açma Yöntemleri

Tünel açma yöntemleri, yer altı altyapı sistemlerinin yapımında uygulanan/kullanılan çeşitli mühendislik tekniklerini ifade etmektedir/içermektedir. Aç-Kapa, Delme-Patlatma, Tünel Açma Makinesi (Tunnel Boring Method, TBM) ve Yeni Avusturya Metodu (NATM) olmak üzere başlıca dört çeşit kazı yöntemi mevcuttur.

Hangi kazı yönteminin kullanılacağı; zemin/kaya şartları, tünelin kullanım maksadı, çevreye yönelik kısıtlamalar, ekonomik parametreler ve güvenlik gereksinimleri gibi çok sayıda faktör dikkate alınarak belirlenmektedir. Tünel inşa edilirken dikkat edilmesi gereken mühendislik açısından önemli olan unsurlar Tablo 4.1’de ayrıntılı olarak belirtilmektedir. Yapı inşası esnasında yapısal bütünlüğün sağlanması, ekonomik etkinliğin korunması aynı zamanda çevreye yönelik etkileri en aza indirilmesi için; tünel inşası amacıyla seçilen yöntemin uygunluğu büyük önem taşımaktadır. Söz konusu yöntemler; su iletimi, enerji nakli gibi hizmet tünellerini ve demiryolu, karayolu gibi ulaşım tünellerini içeren farklı alanlardaki ihtiyaçlar için yapımı gerçekleştirilen tünellere ait alt yapı gereksinimlerinin karşılanmasında güvenli, verimli ve sürdürülebilir çözümler sunar (Bickel vd. 1996; Thuro and Plinninger, 2003; Chapman vd. 2017).

Tablo 4.1. *Tünel açmada dikkat edilmesi gereken başlıca önemli olan faktörler (Li ve ark, 2022)*

Tünel Açmada Başlıca Kriterler	Mühendislik Açısından Önemi
Jeolojik Koşullar	Zemin türü
	Kaya dayanımı
	Yapısal sereksizlikler
	Yer altı suyu durumu
Derinlik ve Kazı Hattı	Derinlik mertebesi (sığ-derin)
	Eğim değerleri
	Güzergah üzerinde yer alan doğal ya da yapay engeller
Çevreye Yönelik Kısıtlamalar	Gürültü
	Titreşim
	Hava Kirliliği
	Yakınlarında yer alan yapılar
Ekonomik Etkenler	Yerleşim birimleri
	İlk yatırım için yapılan harcamalar
	Bakım ve işletme için yapılan harcamalar
	Ekipman gereksinimleri
Güvenlik ve Erişim	Yangın güvenliği
	Havalandırma
	Acil çıkışlar ve tahliye yolları
Kullanım Amacı	Ulaşım tünelleri
	Hizmet tünelleri

4.2.1. Aç-kapa yöntemi

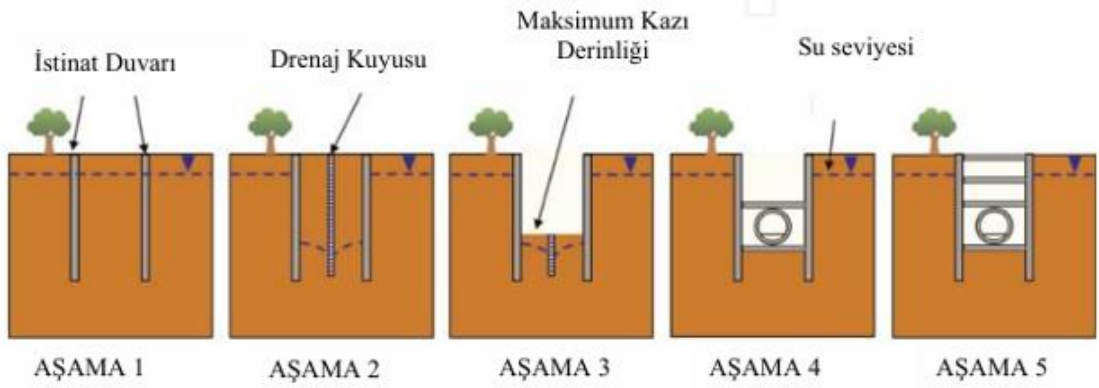
Aç-kapa yöntemi, tünel inşa edilirken kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Söz konusu yöntemde, öncelikle zemin yüzeyden kazılarak açılır. Açılan kazı çukuruna uygulanması planlanan tünel yapısı inşaatı gerçekleştirilir. Akabinde tamamlanan tünel yapısının üst kısmı, zemin yüzeyde istenen seviyeye getirilerek kapatılır. Şekil 4.1’de aç-kapa yöntemi şematik olarak görülmektedir. Genel olarak yüzey erişimi kısıtlı olan yoğun şehir içi bölgelerin metro hatları ya da yaya alt geçitleri gibi tünelleri inşa ederken tercih edilmektedir. Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu bölgelerde geçici su yalıtımı ve zemin iyileştirme yöntemleri uygulanabilir.

Mühendislik parametreleri zayıf olan zeminlerde inşa edilmesi durumunda tünel kazısı esnasında iksa destek ve zemin iyileştirme yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu duruma ilave olarak yer altı su seviyesinin zeminin üst kotuna yakın olduğu (yüksek olduğu) bölgelerde geçici su yalıtımı sistemleri ile sistemi izole edebilmek mümkündür.

Yapısal eleman olarak ise yerinde dökme ya da prefabrik donatılı beton duvarlar ve döşemeler kullanılmaktadır. Aynı zamanda mukavemeti zayıf olan zemin şartlarında oluşabilecek oturmaları azaltıp, stabiliteyi sağlamak için en uygun sayısal modeli

belirleyerek uygulamak çok önemlidir.

Aç-Kapa yöntemi inşaat sürecinde uygulama kolaylığı, inşaat araç-gereçlerine ulaşımının daha kolay ve rahat olması, nispeten daha düşük inşaat giderlerinin olması ve şehir içi bölgelerde kısa mesafeli tünellerin inşası için olanak sağlaması yöntemin en büyük avantajları arasında yer almaktadır.



Şekil 4.1. Aç-Kapa yöntemi şematik gösterimi (Pujades vd. 2023)

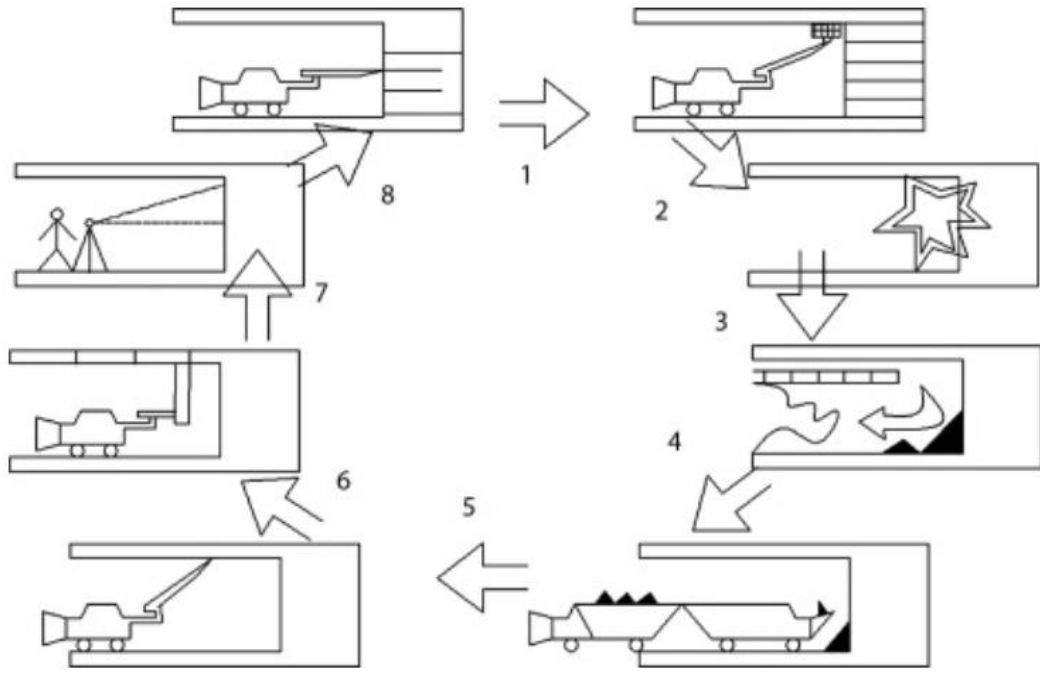
Aç-kapa yönteminin inşa sürecinde;

- Zemin yüzeyinde ciddi bozulmalar meydana gelebilmesi,
- Trafiğin yoğun olduğu bölgelerde uygulanması durumunda yolun deplase, edilmesi gibi işlemlerin olma ihtimali ve geniş çalışma alanı ihtiyacı olabilmesi,
- Yer altı suyu seviyesi ve su akışı kontrolünün sağlanması,
- Olası geçici tahkimat kurulması gereksinimi gibi zorlu ve kısıtlayıcı şartların var olabileceği göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Chapman vd. 2017; http-2).

4.2.2. Delme-patlatma yöntemi

Delme-patlatma yöntemi, geleneksel bir kazı yöntemi olup genellikle sert kaya ortamlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemde; tünel aynasında projede belirtilen düzende delikler açılır. Yeterli miktarda patlayıcı, bu deliklere yerleştirildikten sonra patlatma aşaması kontrollü olarak uygulanır. Patlama neticesinde açığa çıkan m parçalanmış kaya kütlesi olan molozlar o bölgeden tahliye edilir. Patlatma ve tahliye işlemi tamamlandıktan sonra bu bölümler tahkimat uygulanarak dengede olması sağlanır (Zare and Bruland, 2007; Yun, 2019). Şekil 4.2’de delme-patlatma yöntemi şematik olarak görülmektedir.

Dağlık bölgelerde karayolu, demiryolu gibi tüneller inşa etmek amacıyla, TBM'lerle tünel açma işlemi gerçekleştirilemeyen zorlu şartların olduğu alanlar gibi yerlerde uygulanabilir. Tünelin geometrik bütünlüğünü korumak, çevre yapılar üzerindeki titreşim etkilerini sınırlamak ve fazla kazı oluşumunu önlemek açısından; tasarımın gerçekleştiği projelendirme aşaması ve sonrasında kontrollü bir şekilde uygulamanın yürütülmesi çok önemlidir.



Şekil 4.2. Delme-patlatma yönteminin şematik gösterimi (Yun, 2019)

Delme-patlatma yönteminin inşa sürecinde;

- Titreşim, toz ve gürültü gibi çevreye yönelik kısıtlamalar,
- Patlatma sonrası tahkimat gereksinimi,
- Mühendislik özellikleri zayıf olan zeminlerde stabilite sorunları,
- Uzmanlık ve tecrübe gerektiren uygulama süreci

gibi zorlu ve kısıtlayıcı şartları da göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Zare and Bruland, 2007; Yun, 2019).

4.2.3. Mekanize kazı yöntemleri

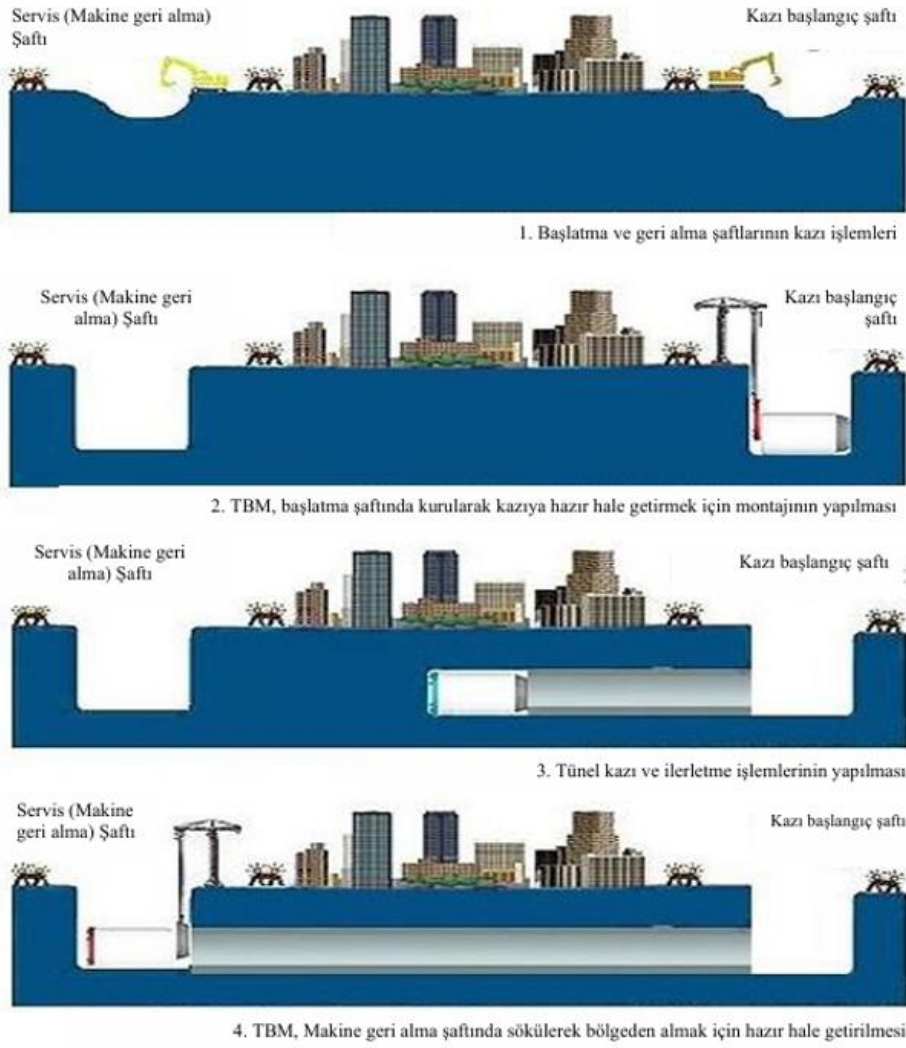
4.2.3.1. Tünel açma makinesi (TBM) yöntemi

Tünel Açma Makinesi (Tunnel Boring Method, TBM); yer altı tünellerinin kazılması aşamasında kullanılmakta olup, mekanik aynı zamanda otomatik kazı makineleriyle uygulanan, çapı büyük olan ve hat mesafesi uzun olan tünel projelerinde tercih edilen; sürekli tünel kazısı ve aynı zamanda kaplama montajı gerçekleştirebilen ileri düzey sistem olan tünel açma teknolojilerinden biridir.

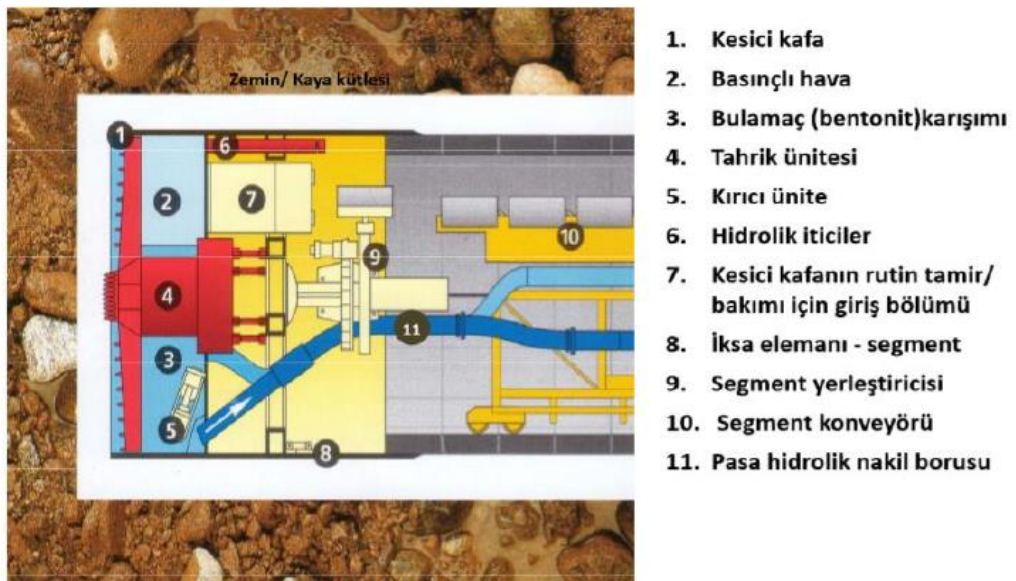
Söz konusu yöntemde; kazı süreci aşamaları ve kullanılan mekanizmalar aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

- Kesici kafa (cutter head): TBM'in ön yüz kısmında yüksek dayanımlı çelikten yapılmış döner kesici kafa bulunmaktadır. Çeşitli tiplerde kesici dişler (disc cutters) ve kazıyıcı elemanlar vasıtasıyla kaya veya zemin ortamları üzerinde dönerek parçalamaktadır.
- Kazı ve malzeme taşıma: Parçalanmış malzeme, hidrolik veya elektrik motorları ile döndürülen kesici kafa vasıtasıyla kırılan ya da parçalanmış kayaç ya da zemin tünel dışına aktarılmaktadır.
- Destekleme: Kazı ilerledikçe TBM arkasında kalan kazılmış bölgedeki çökme riskinin önüne geçebilmek ve stabiliteyi sağlamak amaçlanmaktadır. TBM'in arkasında bulunan yerleştirme mekanizması vasıtasıyla tünel çevresine genellikle prefabrik tünel elemanları olarak adlandırılan beton segmentler yerleştirilir ve birbirine kitlenmesi sağlanmaktadır.
- İleri hareket: TBM, hidrolik pistonlar vasıtasıyla kendi üzerine itilerek ilerlemektedir.
- Kontrol ve ölçüm: İşlem süresince, TBM'in hızı, torku, itme kuvveti gibi parametreleri izlenerek kazının verimliliği ve güvenliği sağlanmaktadır.

Adımları takip edilerek tünel açma süreci tamamlanmaktadır. Özetle Kesici kafa döner, malzeme taşınır, makine itilir ve destekleme yapılır ve bu döngüye tünel uzunluğu istenilen uzunluğa erişene kadar devam edilmektedir. Şekil 4.3'te TBM cihazının mekanizması, Şekil 4.4 'te ise TBM yöntemi ile kazı aşamasının şematik gösterimi yer almaktadır (Sharma, 2021; Zhang vd. 2024).



Şekil 4.3. TBM yöntemi ile inşaa aşamalarının şematik gösterimi (Sharma, 2021)



Şekil 4.4. TBM cihazının mekanizmasına ait şematik gösterim (Attewell, 1986)

TBM yöntemi; delme-patlatma yöntemiyle kıyaslandığında uzun tünellerde daha hızlı ilerlemektedir. Aynı zamanda daha az insan müdahalesi gerektirmektedir. Tünel açma aşamasında kazı yüzeyi daha düzgün olurken, destekleme ve kaplama işlemleri daha kolay yapılabilir. Sistemsal sorun olmadığı sürece TBM ile çalışmalarda kazı işlemi aralıksız devam edebilmektedir. Bunların yanında çevreye yönelik etkileri diğer yöntemlere göre daha az olması gibi avantajları mevcuttur.

TBM yönteminin inşa sürecinde;

- Tünel açma makinesinin üretimi, taşınması ve kurulumu çok maliyetlidir. Bu sebeple başlangıç maliyeti oldukça yüksek olması,
- Çok sert, heterojen ya da yakın mesafede çatlak olan zeminler gibi jeolojik sınırlamaların olduğu birimlerde cihazın uygulama verimi düşme ihtimali,
- Sistem esnekliğinin az olması sebebiyle kazı güzergahında ani değişiklikler yapılması zor olmasının yanı sıra maliyetli olması,
- Bakım ve onarım açısından zordur. Cihazın arızalanması durumunda tamir süresi uzun olabildiği gibi aynı zamanda sistem durma noktasına da gelebilmesi gibi zorlu ve kısıtlayıcı şartları da göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Sharma, 2021; Zhang vd. 2024).

4.2.3.2. Yeni Avusturya tünel açma (NATM) yöntemi

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Austrian Tunneling Method, NATM); zorlu ve değişken zemin koşullarına uyum sağlayabilen etkili bir metottur. Söz konusu yöntemde tünel çevresindeki zemin, taşıyıcı eleman olarak kullanılmaktadır. Yöntem uygulanırken püskürtme beton, ön destekleme elemanı olarak kullanılmakta olup aynı zamanda sistemli olarak deformasyon ölçümleri yapılmaktadır. Bu şekilde tünel açım aşaması sürekli olarak takip edilmektedir (Masosonore, 2018; Karakus ve Fowell, 2000).

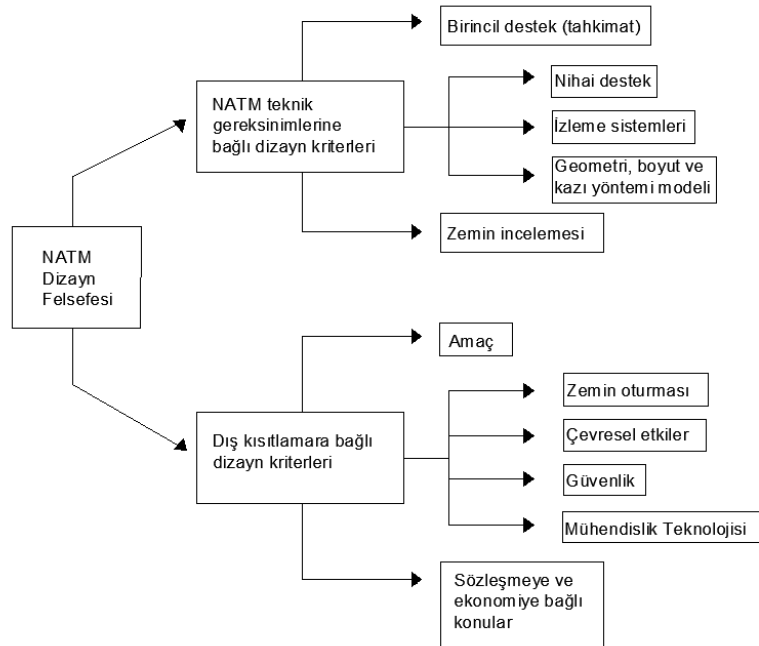
Özellikle zayıf zemin koşullarına sahip çalışma sahalarında NATM yöntemi ile tünel açma süreci tasarlanmaktadır (Şekil 4.5). Bahsi geçen zeminlerde tünel çevresindeki zemin kütlesi, aşırı gerilme altındadır. Bu sebeple inşa sürecinde ek destek sistemlerine gereksinim olmaktadır.

NATM yönteminin dizayn ve inşa edilmesi sürecinde kritik olan, tünel çevresindeki zeminin yapısal davranışının belirlenmesidir. Bu yaklaşım, yeraltında oluşturulan boşluğa zeminin nasıl tepki verdiğinin gözlemlenmesi ve bu doğrultuda mühendislik çözümleri geliştirilmesi esasına dayanmaktadır (Masosonore, 2018).

NATM yöntemi dizayn edilme ve uygulama aşamasında aşağıdaki maddelere dikkat edilmektedir.

- Tünel çevresindeki zemin dayanımı, maksimum düzeyde mobilize edilmek üzere bilinçli olarak kullanılmaktadır.
- Zemin dayanımının mobilizasyonu, zemine kontrollü deformasyonlar izin verilerek sağlanmaktadır.
- İlk destek sistemleri, zemin koşullarına uygun yük-şekil değiştirme karakteristiklerine sahip olacak şekilde tasarlanmakta ve yerleştirme zamanı, zemin deformasyonlarıyla uyumlu biçimde belirlenmektedir.
- Deformasyonların izlenmesi amacıyla enstrümantasyon kurulmakta; bu sistem hem ilk destek tasarımının hem de kazı sırasının değiştirilmesi için temel veri sağlamaktadır.

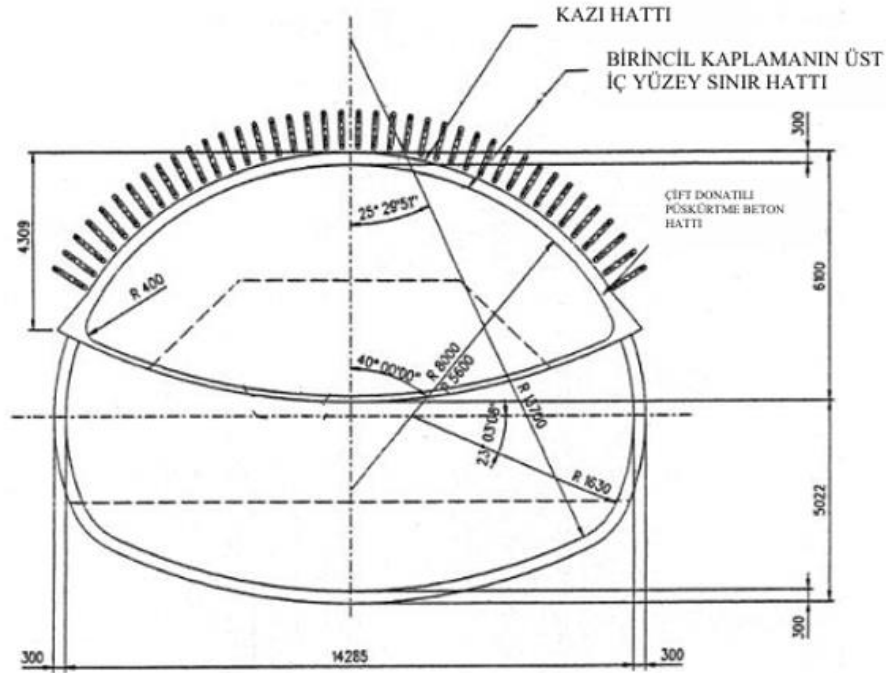
NATM yöntemine ait dizayn kriterleri özet halinde Şekil 4.5'te görülmektedir. Söz konusu kriterlerin her biri tüm tasarım sürecinin bütününe oluşturmakta olup bahsi geçen kriterleri ayrı ayrı düşünüp dizayn edilmesi, NATM'ın başarısızlıkla sonuçlanmasına neden olabilmektedir. Tünelin geometri ve boyutlarının, yumuşak zemin ya da kaya kütleindeki uygulamasına göre belirlenmesinden sonra, NATM tasarımı başlıca destekleme özelliklerine bağlıdır (Karakuş and Fowell, 2004).



Şekil 4.5. NATM yöntemi için dizayn kriterleri (Karakuş and Fowell, 2004).

NATM ile tünel açma yönteminde, tünel sırasıyla (üst yarı, alt yarı, taban) kazılıp destek uygulanmaktadır. Kazı sıralaması uygulama esnasında değişkenlik gösterebilmektedir. İlk zemin desteği çelik eleman ve püskürtme beton ile gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda zemin iyileştirme çalışmaları gerekebilmektedir. Kalıcı destek olarak genellikle yerinde dökme kaplama uygulanmaktadır (Karakuş and Fowell, 2004).

Jeolojik ve geoteknik koşullar, kesit geometrisinin boyutu ve şekli gibi faktörler sebebiyle tünelde genellikle NATM yöntemi uygulanırken kazı işlemi aşamalı (sıralı) olarak gerçekleştirilmektedir (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7). Aşamalı kazı; tünelin geometrisi, aşama sayısı kullanılan destek tipi ve en önemlisi jeolojik ve geoteknik koşullara bağlı olarak belirlenmektedir. Kazı sırası ile zemin destek elemanlarının (püskürtme beton, çelik tahkimatlar ve kaya bulonları gibi) uygulanma sırası, tünelin stabilitesi açısından büyük önem taşımaktadır (Viana Da Fonseca and Topa Gomes, 2010).



Şekil 4.6. NATM yöntemi ile üst yarı, alt yarı ve taban kazılarının karşıdan şematik görünümü (Yeo vd. 2009)



Şekil 4.7. NATM yöntemi ile üst yarı, alt yarı ve taban kazılarına karşıdan bakış

NATM yönteminde tünel genellikle el ile kazı ekipmanları kullanılarak açılmaktadır (Şekil 4.8, Şekil 4.9). Kazı işlemini takiben tünel yüzeyi hemen sürekli bir püskürtme beton ile desteklenmektedir. Püskürtme beton, inşaat süresince geçici bir destek sistemi olarak görev yapmaktadır (Şekil 4.10). Tünel stabilitesinin sağlanması için gerekmesi durumunda ankraj ya da eneksiyon gibi zemin iyileştirmesi uygulanmaktadır (Şekil 4.11, Şekil 4.12). Uzun vadeli stabiliteyi sağlamak amacıyla, daha sonra tünel duvarına genellikle kalıcı bir beton kaplama yerleştirilmektedir (Şekil 4.13) (Wang vd. 2021).



Şekil 4.8. NATM ile açılan tünelin alt yarı bölgesine geçici tahkimat işlemine başlamadan önce



Şekil 4.9. NATM ile açılan tünelin taban kazısı ardından taban donatısı yerleştirilmesi aşaması



Şekil 4.10. *Tünel ayna çerçevesinde üst yarı bölgesine geçici tahkimat için destek elemanlarının yerleştirilmesi*



Şekil 4.11. *Tünel ayna çerçevesinin zemin iyileştirme yöntemleri ile iyileştirilmesi*



Şekil 4.12. NATM ile açılan tünel iç çeperine zemin iyileştirme ve püskürtme beton uygulaması



Şekil 4.13. NATM ile açılan tünelde kalıcı destek sistemi olarak nihai beton kaplama uygulaması

5. SONLU ELEMANLAR METODU (SEM)

Tünel tasarımı; zemin-yapı etkileşimi, doğrusal olmayan davranışlar ve geometrik karmaşıklıklar nedeniyle mühendislikte oldukça karmaşık bir alandır. Gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için, hem zemin hem de tünel kaplamasındaki fiziksel ve geometrik doğrusal olmayan özelliklerin detaylı şekilde modellenmesi gerekmektedir. Söz konusu zemin davranışlarının analiz edilebilmesi için birçok parametrenin birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu parametreler birbirleriyle etkileşim hâlinindedir. Aynı zamanda zemin yapısının homojen olmayan, zamana ve çevresel koşullara bağlı değişken yapısı, zemin tanımını daha da karmaşık hale getirmektedir (Behnen vd. 2015).

Zeminle ilgili mühendislik problemlerine çözüm üretmek amacıyla çeşitli ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemler, çoğunlukla genelleştirilmiş varsayımlara dayandığından, karmaşık ve gerçekçi mühendislik uygulamalarında yetersiz kalabilmektedir.

Bu sebeple, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM), tünel analizlerinde zemin-yapı etkileşimini dikkate alan kapsamlı ve güvenilir bir sayısal araç olarak yaygınlaşmıştır. Söz konusu yöntemin başarısı, özellikle rijitlik oranlarının ve etkileşim parametrelerinin doğru tanımlanmasına bağlıdır. Bu parametrelerin hatalı seçimi, yapının taşıma davranışını yanlış yorumlamaya ve güvenli olmayan veya ekonomik olmayan tasarımlara yol açabilmektedir.

Diğer bir deyişle, sadece zemin özelliklerini değil, aynı zamanda temel sistemlerini ve üst yapının rijitliğini de dikkate alarak kapsamlı çözümler sunmaktadır. Daha güvenilir ve maliyet açısından daha etkin çözümler; SEM tabanlı yazılımlar aracılığıyla elde edilebilmektedir. SEM, yapı-zemin etkileşimini dikkate alan entegre analizler aracılığıyla mühendislik kararlarının doğruluğunu artırmaktadır (Düzgün, 2001).

Bu çalışmada, ilgili geoteknik analizlerin gerçekleştirilmesi için yaygın olarak kullanılan ve iki boyutlu modellemeye imkân sağlayan Plaxis 2D yazılımı tercih edilmiştir.

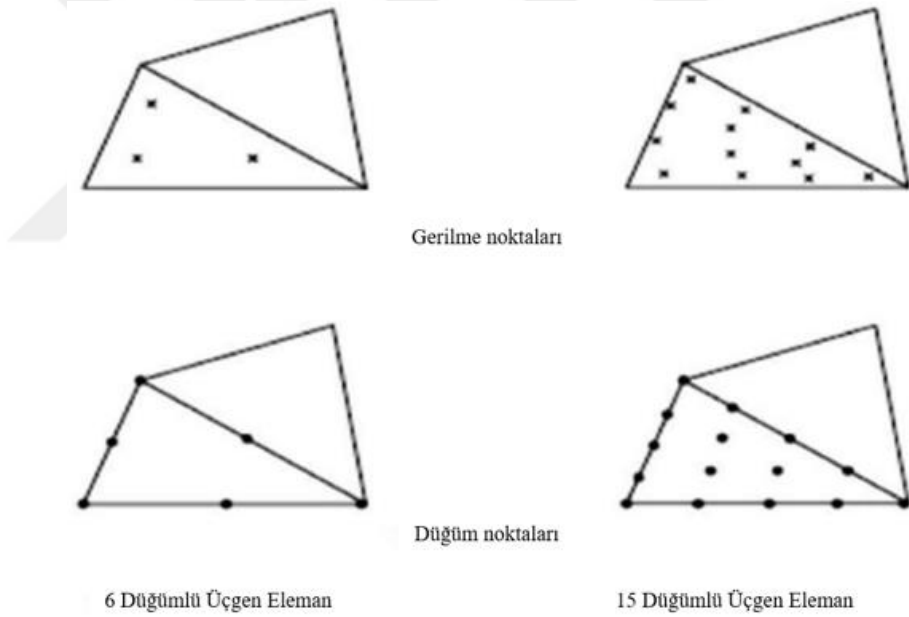
5.1. Plaxis 2D

Plaxis, geoteknik mühendisliği alanında tasarım ve analiz süreçlerinde yaygın olarak kullanılan, sonlu elemanlar yöntemi (SEM) temelli bir sayısal modelleme programıdır. Bu yazılım aracılığıyla, zemin ve yapı etkileşimleri başta olmak üzere, taşıma gücü, oturma ve deformasyon, gerilme-şekil değiştirme davranışı, konsolidasyon

süreci, şev stabilitesi, dinamik etkiler ve yeraltı suyu akışı gibi birçok geoteknik parametre ayrıntılı olarak incelenebilmektedir.

Plaxis 2D programı ile yapılan analizlerde, sürekli ve geniş alana sahip zemin ortamları, belirli sınırlar içinde tanımlanarak sayısal modele dönüştürülmekte, bu model de çok sayıda küçük sonlu elemana ayrılmaktadır. Her bir eleman, komşu elemanlarla düğüm noktaları aracılığıyla bağlantılıdır ve bu sayede sistemin genel davranışı simüle edilebilmektedir.

Plaxis'te kullanılan eleman tipleri genellikle 6 düğüm noktalı (üçgen) elemanlar ve 15 düğüm noktalı daha gelişmiş elemanlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Şekil 5.1). 15 düğümlü elemanlar, daha yüksek doğrulukta ve detaylı sonuçlar elde edilmesine olanak tanırken; 6 düğümlü elemanlar, daha kısa işlem süresi ve düşük hesaplama maliyeti ile hızlı analizler için tercih edilebilmektedir.



Şekil 5.1. *Plaxis 2D ile oluşturulan eleman ağı gerilme ve düğüm noktaları (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020)*

Analizler sonucunda elde edilmek istenen gerilme ve deformasyon değerleri, oluşturulan eleman ağı üzerindeki düğüm noktaları ve eleman içi konumlar üzerinden okunarak elde edilmektedir. Böylece, zemin davranışına ilişkin detaylı dağılımlar görsel olarak da yorumlanabilmektedir. Plaxis 2D yazılımında eleman ağı ve gerilme noktalarının dağılımı, Şekil 5.1'de yer almaktadır (Plaxis 2D Reference Manuel, 2020).

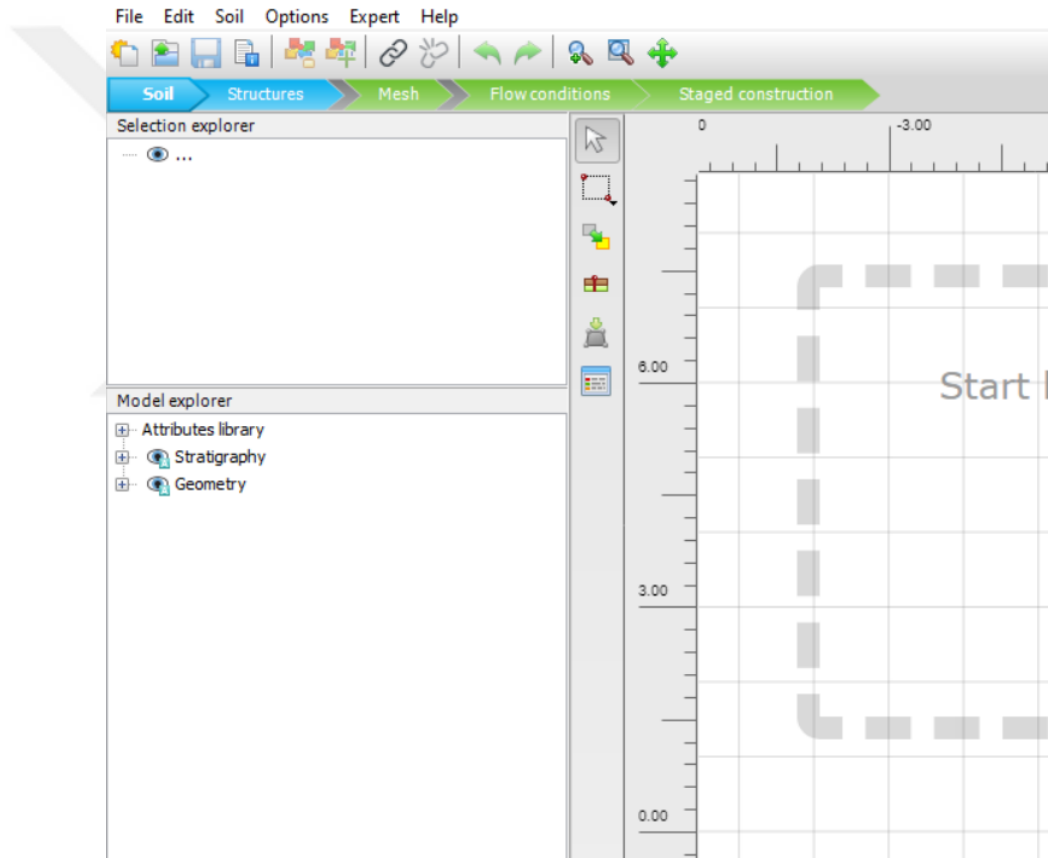
5.1.1. Plaxis 2D programı ile model oluşturma

Plaxis 2D programında model oluşturma işlemine modelin sınırları ve düğüm noktası sayılarının belirlenmesiyle başlanılır. 'Project Properties' penceresinden modelin x ve y koordinatları için başlangıç ve bitiş sınır değerleri girilir. Sonrasında 'Elements' sekmesinden 6 ya da 15 düğüm noktalı elemanlardan biri seçilir. Hızlı sonuçlar için 6 düğüm noktalı eleman tercih edilebilmektedir. Detaylı ve daha doğru analizler yapmak için 15 düğüm noktalı eleman seçilmesi gerekmektedir. 15 düğüm noktalı elemanların 6 düğüm noktalıya göre dezavantajı ise analizlerin biraz daha uzun sürmesidir. İşlem penceresi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

Şekil 5.2. Model özellikleri giriş sekmesi

Plaxis 2D programı ana penceresinde soil, structures, mesh, flow conditions ve staged construction sekmeleri olmak üzere 5 ana sekme bulunmaktadır (Şekil 5.3). Bu sekmelerde gerçekleştirilen işlem sırası ile model oluşturma aşamaları devam etmektedir. Model oluşturulduktan sonra, model üzerinde herhangi bir sekmede değişiklik yapılması gerekmesi durumunda, düzenleme yapılan sekme ve sonrasındaki aşamalar için de yapılan değişikliği tanımlamak gerekmektedir. Programda analiz gerçekleştirirken sistem kendisi uyarı vermektedir.

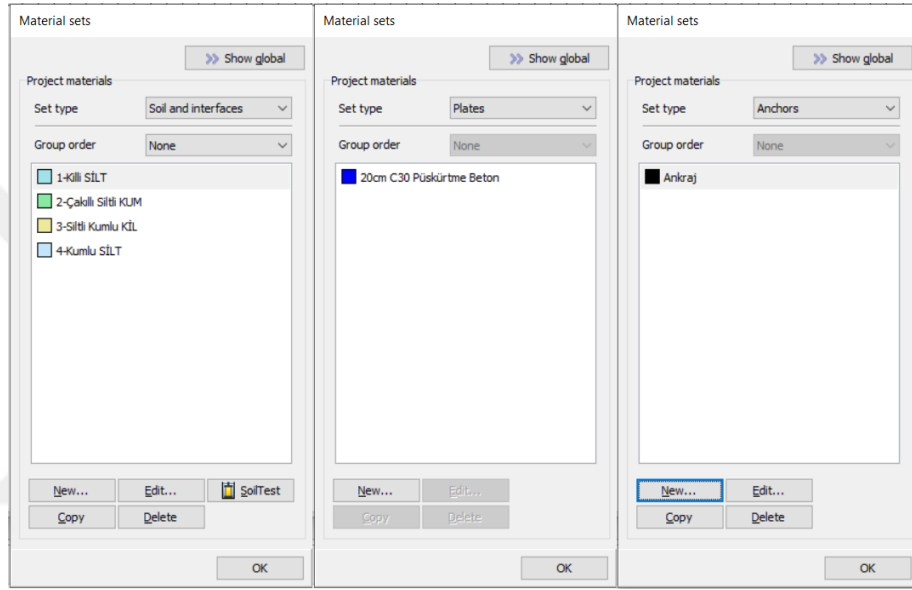
Beş ana sekmede bulunan ‘soil’ bölümünden zemin ve zeminde bulunan yeraltı su seviyesi ‘borehole’ vasıtasıyla modellenmektedir. ‘Structure’ bölümünden temel, duvar, kazık, iksa yapıları, tünel gibi zemin haricindeki yapısal elemanlar modellenmektedir. ‘Flow conditions’ bölümünden, ‘soil’ bölümünde sisteme tanımlanan yeraltı su seviyesi düzenlemesi gerçekleştirilmektedir. Sistemde su seviyesinde değişiklik yapılmak isteniyorsa yapılmaktadır. Eğer değişiklik yapılması istenmiyorsa su seviyesi durumu kontrol edilerek diğer sekmeye geçilmektedir. ‘Staged construction’ bölümünde ise modelin çözümlenmesi için aşamalı ya da aşamasız olarak, aktif ya da deaktif edilerek, model için istenen hesap adımları belirlenerek analiz gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.3. Model oluşturmada kullanılan ana sekmelerin bölümü

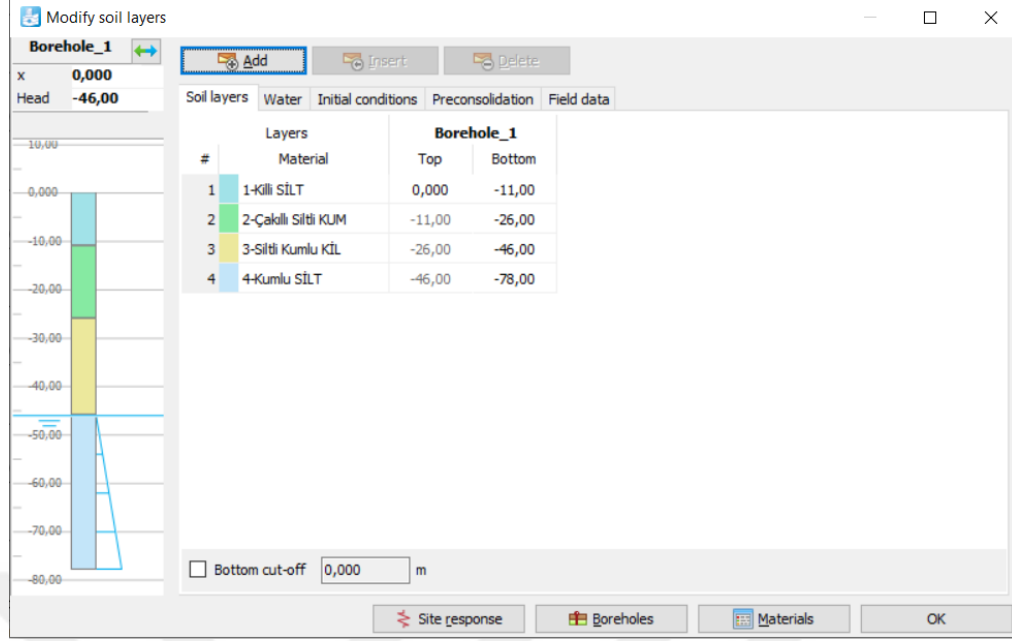
Plaxis'te model oluşturma aşamasında ilk olarak model sınırları belirlenmektedir. Ardından modelde tanımlanacak zemin ve yapısal elemanların özellikleri ‘show materials’ simgesi seçildiğinde açılan ‘Material sets’ bölümünde gerçekleştirilmektedir. Açılan sekmede ‘set type’ bölümünde tanımlanacak zemin ya da yapısal eleman tiplerine göre sınıflama yapılmaktadır (Şekil 5.4). ‘Soil and interfaces’ bölümünden zemin modeli

ile birlikte zemin cinsi ve özellikleri, ‘plates’ kısmından temel, perde, duvar gibi yapısal elemanları, ‘embedded beams’ bölümünde jet grout kolonu gibi gömülü kazık elemanları, ‘anchors’ bölümünde ise ankraj kök bölgesi elemanları tanımlanması gerçekleştirilmektedir. Oluşturmak istenen eleman sınıfında ‘new’ sekmesi seçilerek eleman tanımlanması için gerekli özellikler girilmektedir. Ardından model oluşturmak için istenen zemin, yapısal eleman gibi diğer elemanların özellikleri tanımlanabilmektedir.



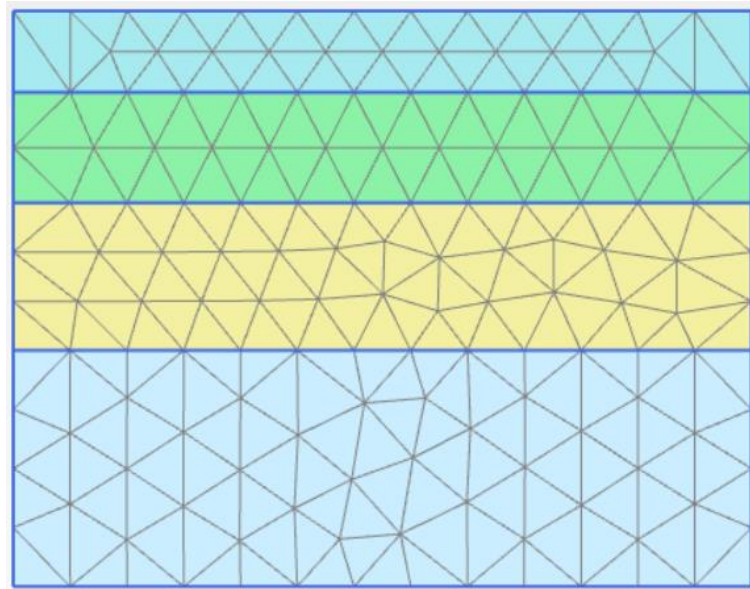
Şekil 5.4. Zemin ve yapısal elemanlar için tanımlama sekmesi

Programda ilk olarak modelde kullanılacak zemin ve yapısal elemanların özellikleri tanımlanmaktadır. Ardından zemin profili oluşturulmaktadır. Zemin profili oluşturmak için ‘soil’ bölümünde bulunan ekranda ‘create borehole’ simgesi seçilmektedir. Açılan sekmede zemin tabakalarının cinsi ve tabaka yüksekliği değerleri tanımlanmaktadır (Şekil 5.5). Aynı sekmenin sol üst köşesinde ise su seviyesi girilerek zemin profili oluşturulmaktadır. Daha sonra oluşan zemin üzerine yüklemeler girilip, kazılar yapılıp ve yapısal elemanlar oluşturularak eleman atamaları yapılmaktadır.



Şekil 5.5. Zemin profili oluşturma sekmesi

Aşamalı olarak sırasıyla zemin profilini, yapısal elemanları tanımlayarak oluşan zemin modeli için ‘mesh’ işlemi gerçekleştirilmektedir. ‘Mesh’ bölümünden yapılan işlemde model, üçgen elemanlara bölünmektedir (Şekil 5.6). Bu şekilde hesap elemanları ve düğüm noktaları oluşmaktadır. Meshleme işlemi gerçekleştirilirken kötüden iyiye doğru birkaç derecede meshleme işlemi yapılabilir. Meshleme derecesi iyileştikçe oluşan eleman ve düğüm noktası sayısı artmaktadır. İnceleme yapılan bölgede daha doğru ve hassas sonuçlar alınması, mesh derecesinin artması ile mümkün olmaktadır.



Şekil 5.6. Modelin meshlendikten sonraki görüntüsü

Yukarıda belirtilen adımlar uygulandıktan sonra Plaxis programında model analizi aşaması uygulanabilmektedir. Bu bölümde program kullanılarak uygulanan işlem aşamalarından yüzeysel anlatılmıştır. Bu tez çalışmasında uygulanacak model oluşturulma aşamaları ileriki bölümlerde takip edilen işlem adımları ve eleman özellikleri daha detaylı belirtilmektedir.

5.1.2. Plaxis 2D zemin modelleri

Plaxis programında tasarlanan modelde, farklı zemin türlerine yönelik bir dizi zemin modeli bulunmaktadır. Bu modellerin amacı, zeminin özelliklerine ve hedeflenen sonuca bağlı olarak daha hassas ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktır. Bahsi geçen zemin özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Lineer Elastik (LE) Zemin Modeli
- Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli
- Hardening Soil (HS) Zemin Modeli
- Hardening Soil Small Strain (HSSS) Zemin Modeli
- Soft Soil (SS) Zemin Modeli
- Soft Soil Creep (SSC) Zemin Modeli
- Jointed Rock (JR) Zemin Modeli
- Modified Cam Clay (MCC) Zemin Modeli
- UBC3D-PLM Zemin Modeli

Bu çalışma kapsamında üç farklı zemin profili olan modeller için; ön statik hesaplamalar için Hardening Soil (HS) zemin modeli, sıvılaşma analizlerinde ise sıvılaşma analizlerinin gerçekleştirildiği UBC3D-PLM zemin modeli vasıtasıyla dinamik analizler uygulanmıştır.

6. SAYISAL ANALİZ

Bu çalışma kapsamında, zemin-yapı etkileşimini gerçeğe en yakın şekilde temsil edebilmek amacıyla, olumsuz şartlar göz önünde bulundurularak farklı jeolojik özelliklere sahip üç adet zemin profili belirlenmiştir. Söz konusu zemin profilleri; gevşek daneli yapıdaki kum, silt ve yumuşak kil zeminlerden oluşmaktadır. Zemin profilleri, literatürden elde edilen veriler, saha koşulları ve mühendislik deneyimleri doğrultusunda danışman eşliğinde tanımlanmıştır.

Analizlerde, bu zemin profillerinin her biri için NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu) esas alınarak üç aşamalı kazı süreci modellenmiştir. NATM ile inşaa edilmesi planlanan tünelin zemin-yapı etkileşimi ve konsolidasyon oturmasının ve sıvılaşma potansiyeli etkileri incelenmiştir. Üç farklı zemin profili (vaka) ile Plaxis 2D programı kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Her bir vaka beş katmanlı olup, zemin üst yüzeyinden itibaren -58 m ile -70 m arasında 12 m yüksekliğinde ve 12 m genişliğinde tünel hattı yer almaktadır. Söz konusu tünel hattı, vaka 1’de Kumlu SİLT, vaka 2’de Siltli KUM, vaka 3’te ise Siltli KİL içeren sıvılaşmaya yatkın gevşek zeminler ile yumuşak kil tabakalarından oluşmaktadır. Tablo 6.1’de vakaların zemin profilleri ve zemin yüzeyinden itibaren tabaka yüksekliği değerleri, Tablo 6.2’de ise vakaların zemin profilleri ve profillere ait zemin tabakalarının mühendislik özellikleri yer almaktadır.

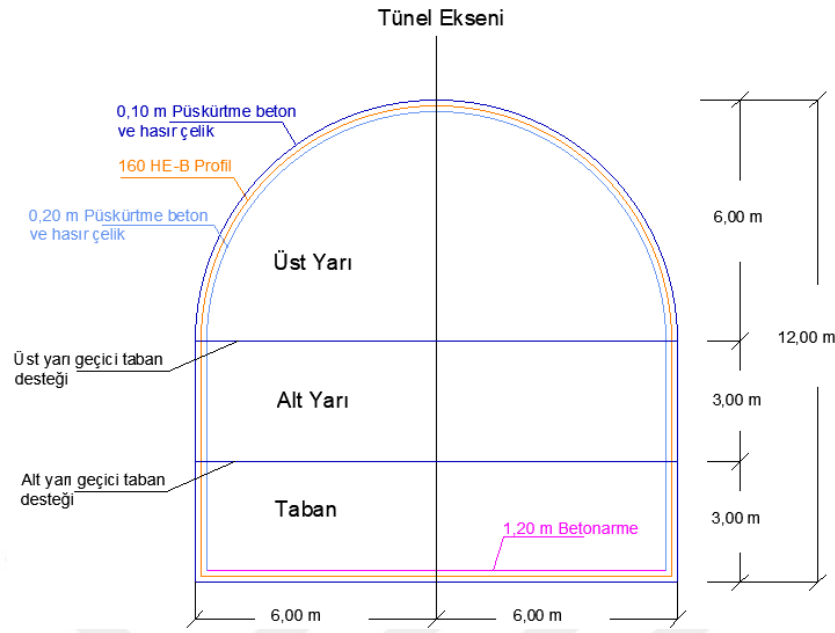
Tablo 6.1. *Vaka 1, Vaka 2 ve Vaka 3 zemin profilleri özeti*

Zemin Profili Yüksekliği	Zemin Profili Tünel Hattı Konumu	Vaka 1		Vaka 2		Vaka 3	
		Zemin Yüzeyinden İtibaren Tabaka Yüksekliği	Zemin Profili	Zemin Yüzeyinden İtibaren Tabaka Yüksekliği	Zemin Profili	Zemin Yüzeyinden İtibaren Tabaka Yüksekliği	Zemin Profili
(m)	--	(m)	--	(m)	--	(m)	--
70	Tünel Hattı Üstü (Yükselik 58 m)	0 - 11 m	Killi SİLT	0 - 14 m	Çakıllı Siltli KUM	0 - 11 m	Killi SİLT
		11- 26 m	Çakıllı Siltli KUM	14- 26 m	Killi SİLT	11- 23 m	Çakıllı Siltli KUM
		26- 46 m	Siltli Kumlu KİL	26- 44 m	Kumlu KİL	23- 38 m	Kumlu SİLT
		46- 58 m	Kumlu SİLT	44- 58 m	Siltli KUM	38- 58m	Siltli KİL
30	Tünel Hattı Altı (Yükselik 30 m)	58- 72 m	Kumlu SİLT	58- 72 m	Siltli KUM	58- 72 m	Siltli KİL
		72-100 m	Orta Sıkı KUM	72-100 m	Orta Sıkı KUM	72-100 m	Orta Sıkı KUM

Tablo 6.2. Vaka 1, Vaka 2 ve Vaka 3 zemin profilleri ve profillerin zemin tabakalarına ait mühendislik özellikleri

Vaka Adı	Tünel Hattının Oluşturulan Zemin Profilineki Yeri	Zemin Türü	Parametreler					
			SPT-N	V_{unat}	c'	σ	Ψ	E
—	—	—	—	(kN/m ³)	kPa	(°)	(°)	kPa
Vaka 1		Killi SİLT	35	16	10	38	8	8000
	Tünel Hattı Üstü	Çakıllı Siltli KUM	32	19	6	40	10	40000
		Siltli Kumlu KİL	12	14	8	6	0	2000
	Tünel Hattı	Kumlu SİLT	8	16	4	10	0	5000
	Tünel Hattı Altı	Orta Sıkı KUM	30	18	3	36	6	25000
Vaka 2		Çakıllı Siltli KUM	36	19	10	38	8	40000
	Tünel Hattı Üstü	Killi SİLT	30	16	10	35	10	8000
		Kumlu KİL	14	14	10	6	0	2000
	Tünel Hattı	Siltli KUM	10	17	4	8	0	10000
	Tünel Hattı Altı	Orta Sıkı KUM	30	18	3	36	6	25000
Vaka 3		Killi SİLT	34	16	10	38	8	11000
	Tünel Hattı Üstü	Çakıllı Siltli KUM	30	20	6	40	10	45000
		Kumlu SİLT	12	17	4	12	0	5000
	Tünel Hattı	Siltli KİL	10	16	10	8	0	2100
	Tünel Hattı Altı	Orta Sıkı KUM	30	18	3	36	6	25000

NATM yöntemi ile tünel açılırken üst yarı (6 m), alt yarı (3 m) ve taban (3m) olmak üzere üç aşamada ve farklı derinliklerde kazı gerçekleştirilmiştir. Tünel 12 m x 12 m boyutlarında at nalı kesitlidir. Vaka 1, vaka 2, vaka 3'te Şekil 6.1'de görülmekte olan tünel tasarımı ve tünel destekleme sistemi detayları uygulanmıştır.



Şekil 6.1. Tünel tasarımı ve tünel destekleme sistemi

NATM yöntemi ile kazı esnasında, 0,10 m ve 0,20 m kalınlıklarında püskürtme beton ve Q221 hasır çelik destekleme sistemleri olarak uygulanmıştır. Üst yarı geçici desteği bölümünde, vaka 1, vaka 2, vaka 3'te 0,10 m püskürtme beton ve Q221 hasır çelik uygulanmıştır. Alt yarı geçici desteği bölümünde, vaka 1 ve vaka 2'de 0,10 m püskürtme beton ve Q221 hasır çelik uygulaması gerçekleştirilmiştir. Vaka 3'te alt yarı geçici taban desteği 0,10 m püskürtme beton ve Q221 hasır çelik uygulandığında akış koşullarının yetersiz kalmıştır. Bu sebeple püskürtme beton ve Q221 hasır çelik geçici destek elemanları bu aşamada 0,20 m olarak uygulanmıştır. NATM kazı destekleme sistemine ait mühendislik parametreleri Tablo 6.3'te yer almaktadır.

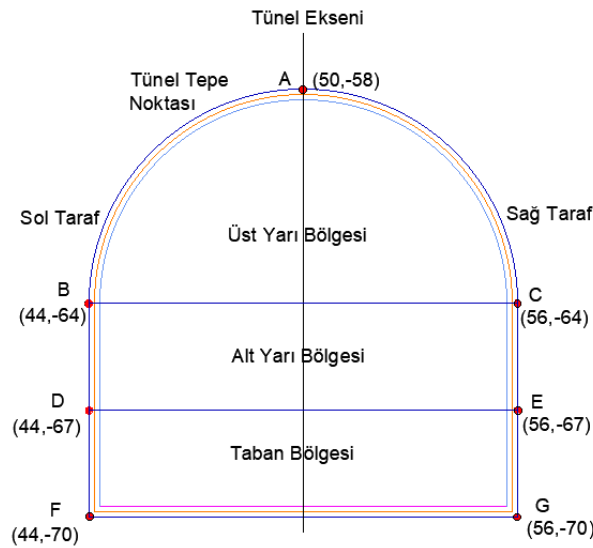
Tablo 6.3. Tünel inşa edilirken kullanılan yapısal elemanların malzeme özellikleri

Uygulanan Yapısal Eleman Kalınlığı Tanımı	Yapısal Eleman Tanımı	EA	EI
--	--	(kN/m)	(kNm ² /m)
0,10 m	Püskürtme Beton ve Hasır Çelik (Q221)	3200000	2667
0,20 m	Püskürtme Beton ve Hasır Çelik (Q221)	6400000	21330
1,20 m	Betonarme	3840000	4608000
--	160 HE-B Profil	1140000	5229

Plaxis 2D programı ile; üst yarı kazısı ve geçici tahkimat kurulumu (aşama 1), alt yarı kazısı ve geçici tahkimat kurulumu (aşama 2), taban kazısı ve geçici tahkimat kurulumu (aşama 3) olmak üzere üç aşamalı kazı yapılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz esnasında uygulanan aşamalardan önce kazı bölgelerindeki su seviyesi kazı seviyesi altına pompa ile çekilmiştir.

Bu çalışmada, Plaxis 2D ile oluşturulan modelin çözümlenmesi için hesap tipi olarak, “Ko Procedure”; su basıncı hesap tipi olarak, “Steady State Groundwater Flow” ve malzeme modeli olarak “Hardening Soil” seçilmiştir. Plaxis 2D ile analiz yaparken modelin çözümlenmesinde seçilen “Ko Prosedürü”, tünel kazısından önce zeminin doğal gerilme durumunu doğru olarak tanımlayarak deformasyonların ve iç kuvvetlerin daha gerçekçi elde edilmesini sağlaması sebebiyle tercih edilmiştir. Malzeme modeli seçilen “Hardening Soil” ise tünel ve kazı mühendisliğinde karşılaşılan gerilme yoluyla artan deformasyonlar ve kalıcı şekil değiştirmelerinin daha gerçekçi elde edilmesini sağlaması sebebiyle tercih edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamındaki vakalarda, tüneli çevreleyen zeminde inşa aşamasında deformasyon takibi amacıyla düşey yer değiştirme (deformasyon) noktaları (node) belirlenmiştir. Bunlar; Şekil 6.2’de kırmızı nokta ile belirtilen noktalarda tanımlanan tünel tepe noktası (A), üst yarı (sol taraf, B; sağ taraf, C), alt yarı (sol taraf, D; sağ taraf, E) ve taban (sol taraf, F; sağ taraf, G) bölgelerindeki tüneli çevreleyen zeminde seçilen ve analiz sonucu belirtilen kısımlarda meydana gelen deformasyon değerlerini veren noktalardır.



Şekil 6.2. Tünel tepe noktası ve tünelin sol-sağ taraflarının üst yarı, alt yarı ve taban bölgelerinde seçilen deformasyon noktaları (node) ve noktalara ait koordinat bilgisi

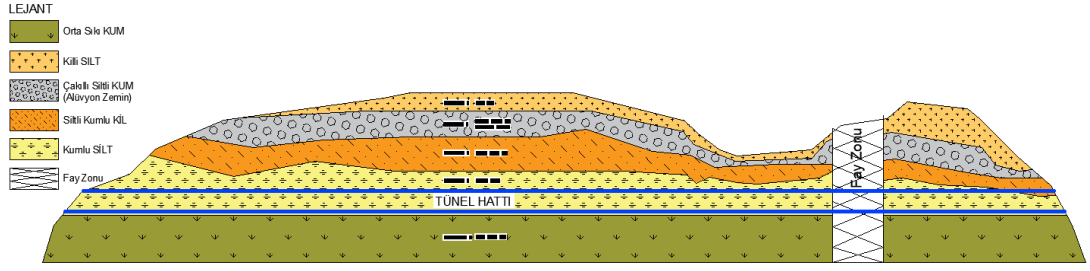
Seçilen deformasyon noktalarından y eksenine göre aynı seviyede olanların aynı kazı aşamalarında değerlerinin eşit olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple deformasyon grafiklerinde st yarı (A, B, C), alt yarı (D, E) ve taban (F, G) noktalarını ifade etmekte olup, belirtilen noktalar için sadece mevcut kazı aşamasındaki deformasyon verisi tek değer olarak belirtilmiştir.

Bu tez kapsamında NATM yöntemi ile üç aşamalı 12 m x 12 m ebatlarında at nalı kesitli tünel inşasını gerçekleştirmek amacıyla her üç vaka için uygulanan analizler maddeler halinde aşağıda yer almaktadır.

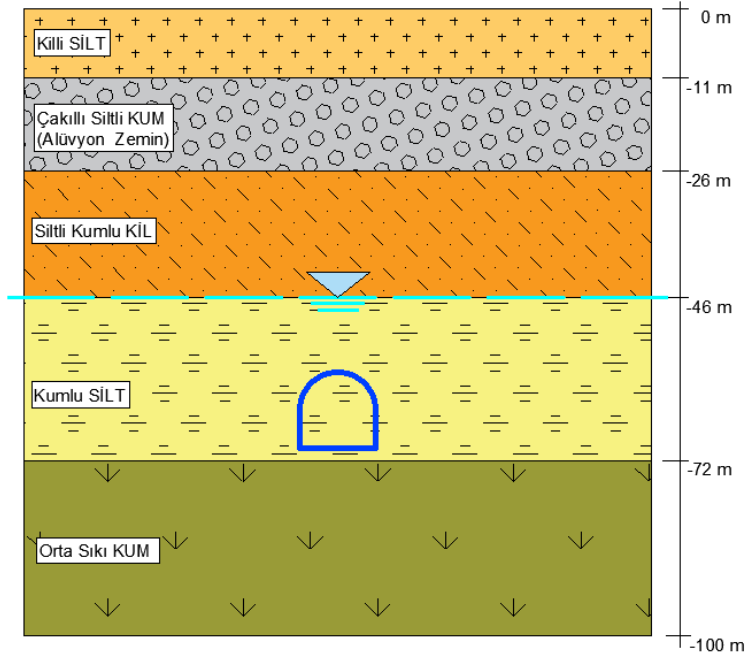
- İlk hal (Zemin iyileştirme yapılmaksızın),
- Tünel hattı ve tüneli çevreleyen zeminde alansal jet grout uygulaması,
- Tünel hattı ve çevreleyen zeminde alansal jet grout uygulaması ve ardından tünel hattı üstünde ankraj uygulaması gerçekleştirilerek tünel yapısı inşa edilmiştir.
- Statik açıdan uygun olan iyileştirme yöntemi ile Mw 6,93 büyüklüğünde Loma Prieta 1989 depremi seçilerek dinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

6.1. Birinci Vaka (Sıvılaşan Zemin-1)

Birinci vakada; özellikle tünel hattı ve çevresinde sıvılaşma potansiyeli olabilecek Kumlu SİLT zemin tabakası mevcuttur. Tünel tabanından itibaren zemin st kotuna kadar 70 m zemin yüksekliğine sahip, at nalı kesitli tünelin ebatları 12mx12m'dir. Su seviyesi -46 m'de belirlenmiştir. İlk 11m'de Killi SİLT (SPT-N: 35, c: 10 kPa, Ø: 38 °, V_{unsat} : 16 kN/m³), ardından 26 m'ye kadar olan tabakada akıllı Siltli KUM (SPT-N: 32, c: 6 kPa, Ø: 40 °, V_{unsat} : 19 kN/m³) ve 46 m'ye kadar Siltli Kumlu KİL (SPT-N: 12, c: 8 kPa, Ø: 6 °, V_{unsat} : 14 kN/m³) tabakaları olup, 70 m'ye kadar sıvılaşan zemin olan Kumlu SİLT (SPT-N: 8, c: 4 kPa, Ø: 10 °, V_{unsat} : 16 kN/m³) ve devamında 100 m'ye Orta Sıkı KUM (SPT-N: 40, c: 3 kPa, Ø: 40 °, V_{unsat} : 20 kN/m³) birimi yer almaktadır. şekil 6.3'te tünel inşaatının gerçekleştirileceği dağa ait jeolojik profil ve şekil 6.4'te ise tünelde analizi gerçekleştirilecek ayna kesiti görülmektedir.



Şekil 6.3. Vaka 1- Zemin Profilini içeren dağa ait jeolojik profil



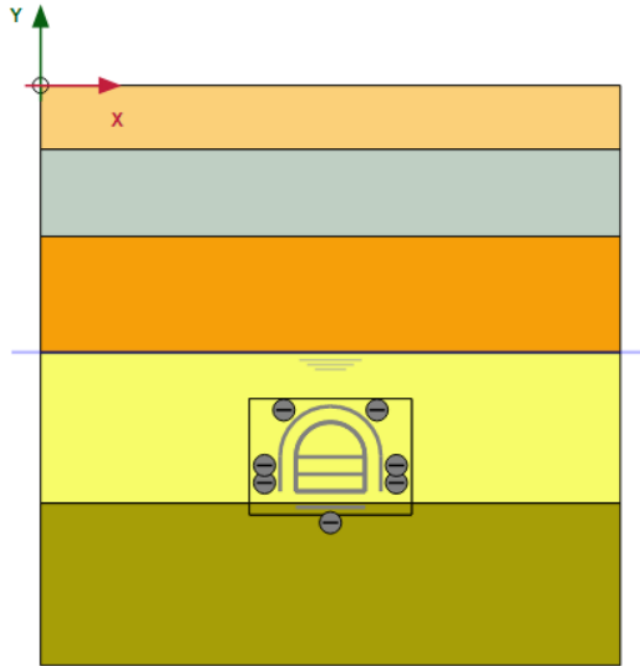
Şekil 6.4. Vaka 1- Ayna Kesiti

Zemin parametrelerinin belirlenmesinde, doğadaki olumsuz koşullar göz önünde bulundurularak model oluşturulmuştur. Standart penetrasyon testi (SPT) verileri ve zemin sınıfı, zemin profili ve mukavemet değerleri belirlenmiştir. Özellikle zemin yüzeyinden itibaren 26-72 m'de bulunan Siltli Kumlu KİL ve Kumlu SİLT tabakaları tünel hattı ve üzerinde bulunan yaklaşık 46 metrelik zemin tabakası, düşük SPT-N değerleri (gevşek ve yumuşak zemin koşulları) dikkate alınarak modellenmiştir. Yeraltı su seviyesi -46 m'dedir. Tablo 6.4'te birinci vaka için belirlenen zemin profiline ait mukavemet parametreleri yer almaktadır.

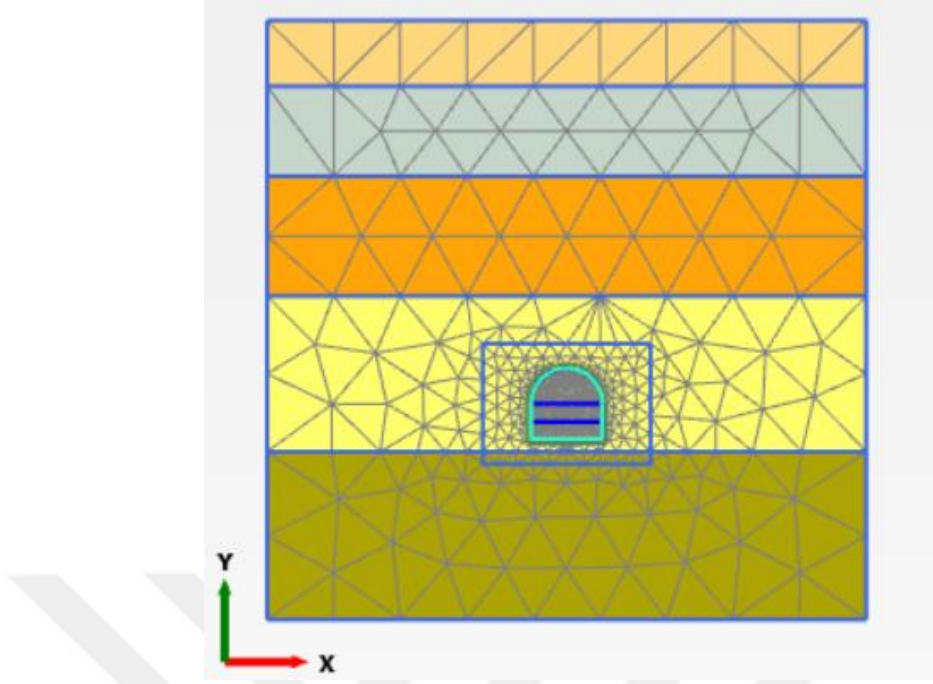
Tablo 6.4. Birinci vaka profiline ait mukavemet parametreleri

Zemin Profili Yüksekliği	Zemin Profilinde Tünel Hattı Konumu	Zemin Üst Yüzeyinden İtibaren Kot	Zemin Tabaka Yüksekliği	Zemin Türü	SPT-N	V_{usset}	Parametreler			
							c'	ϕ	ψ	E
(m)	—	(m)	(m)	—	—	(kN/m ²)	kPa	(°)	(°)	kPa
		0								
		-11	11	Kıllı SİLT	35	16	10	38	8	8000
		-26	15	Çakıllı Siltli KUM	32	19	6	40	10	40000
70	Tünel Hattı Üstü (Yükselik 58 m)	-46	20	Siltli Kumlu KİL	12	14	8	6	0	2000
		-58	12	Kumlu SİLT	8	16	4	10	0	5000
	Tünel Hattı (Yükselik 12 m)	-70	12	Kumlu SİLT	8	16	4	10	0	5000
30	Tünel Hattı Altı (Yükselik 8 m)	-100	30	Orta Sıkı KUM	30	18	3	36	6	25000

Plaxis 2D programından çözüm için oluşturulan modelin Vaka 1 için Şekil 6.5'te model geometrisi, Şekil 6.6'da ise model ağı (mesh) görüntüsü yer almaktadır.



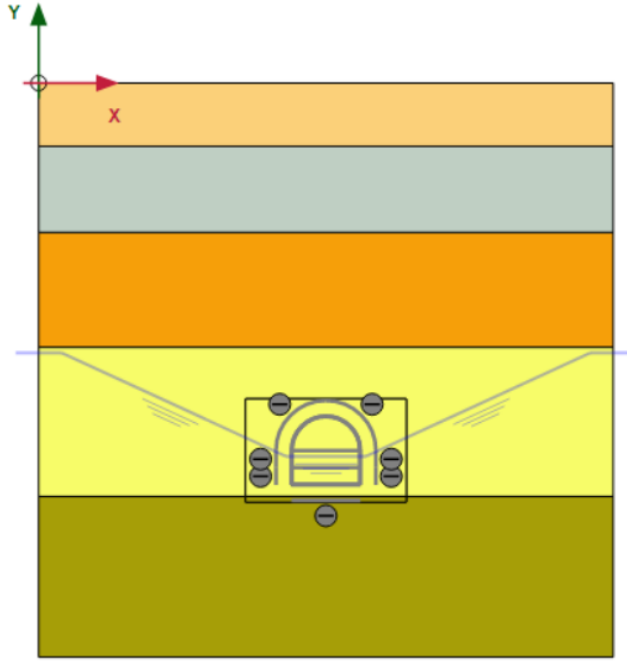
Şekil 6.5. Vaka 1-Çözümleme için oluşturulan model geometrisi



Şekil 6.6. Vaka 1-Çözümleme için oluşturulan model ağı (mesh) görüntüsü

6.1.1. Vaka 1 Plaxis 2D ile çözümleme statik analiz

Vaka 1, NATM yöntemi ile at nalı kesitli üç aşamalı tünel açma analizinde üst yarı, alt yarı ve taban bölgeleri için çözümleme gerçekleştirilmiştir. Vaka 1’de zemin iyileştirmesi olmaksızın (Şekil 6.7), tünelin destekleme sistemi ile açıldığı ilk hal ile gerçekleştirilen statik analize ait düşey yöndeki yer değiştirme verileri Tablo 6.5’te grafikte yer almaktadır. A, B, C noktalarının bulunduğu üst yarı bölgesinde 104 mm; D, E noktalarının bulunduğu alt yarı bölgesinde 294 mm ve F, G noktalarının bulunduğu taban bölgesinde 9 mm değerinde düşey deformasyon meydana gelmiştir.



Şekil 6.7. Vaka 1- İlk Hal (Zemin İyileştirme yapılmaksızın) açılan tünele ait ayna kesiti

Tablo 6.5. Vaka 1-İlk hal (zemin iyileştirme olmaksızın) düşey yer değiştirme (statik analiz)

Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme
			(mm)
Vaka 1	Üst Yarı	A-B-C	104
	Alt Yarı	D-E	294
	Taban	F-G	9

Vaka 1’de tüneli çevreleyen ve üzerinde yer alan yaklaşık 46 m mühendislik özellikleri zayıf olan gevşek ve yumuşak zemin tabakaları mevcuttur. Söz konusu zemin tabakalarında, deformasyon değerlerinin olumsuz zemin koşullarında, yüksek çıkması nedeniyle zemin iyileştirme yöntemleri araştırılmıştır.

İlk aşamada, zeminin ilk hali (zemin iyileştirmesiz) ile yalnızca kazı ve destekleme elemanları sebebiyle meydana gelen düşey yer değiştirme etkisi değerlendirilmiş olup deformasyonların gevşek zemin profili için yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum üzerine, tünel hattı ve çevresinde deformasyonları azaltmaya yönelik olarak; tünel kesiti ile çevreleyen bölgede alansal iyileştirme ile jet grout uygulaması ve ayrıca alansal jet grout iyileştirme yöntemi ardından ankraj uygulamalarının yapılması planlanmıştır.

6.1.2. Vaka 1 alansal jet grout metodu ile iyileştirme statik analiz

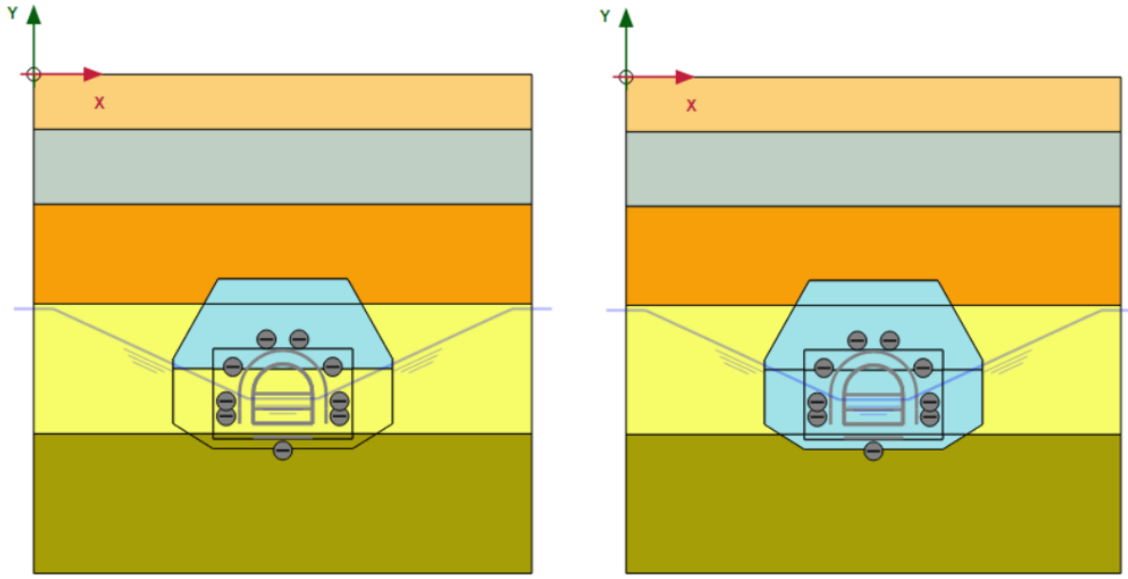
Vaka 1’de uygulanacak olan alansal jet grout uygulaması için 0,60 m çapında, 0,60 m eksenden eksene mesafeli (0,20 m kesişimli kolonlar), 20 m uzunluğunda kolonlar ile alansal bir iyileştirme yapılması tercih edilmiştir.

Alansal jet grout uygulamasına ilişkin mühendislik parametrelerinin belirlenmesinde, Durgunoğlu (2004) tarafından sunulan deneysel veriler ve önerilen zemin iyileştirme esasları temel alınmıştır. Söz konusu çalışma doğrultusunda, jet grout kolonlarının oluşturduğu iyileştirilmiş zemin özellikleri dikkate alınarak, analizlerde kullanılacak elastisite modülü, kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri hesaplanmış ve modelleme sürecine tanımlanmıştır. Vaka 1 için elde edilen sonuçlar Tablo 6.6’da yer almaktadır.

Tablo 6.6. *Vaka 1- Alansal iyileştirme jet grout uygulanmış iyileştirilmiş zemine ait mühendislik parametreleri*

İyileştirilmiş Zeminin Mühendislik Parametreleri		
Parametre	Birim	Kabul edilen
Alan oranı	--	0,8
Zeminin İçsel Sürtünme Açısı	$\phi, ^\circ$	41,0
Zeminin Etketif Kohezyonu	kPa	410,0
Zeminin Elastisite Modülü	E, kPa	590000,0

Uygulanan alansal jet grout iyileştirmesi, tünel tavanının üzerindeki yaklaşık 20 metrelik bölgeyi ve bu kısmın altında kalan taban bölgesini kapsayacak şekilde tünelin içinden daha önce açılmış olan tünel üst yarının olduğu bölgede gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.8). İlk olarak NATM yöntemiyle açılan tünelde kazı işlemi gerçekleşmeden tünel çevresi ve tünel hattı jet grout ile iyileştirilmiştir. Ardından üç aşamalı NATM yöntemi ile kazı gerçekleştirilmiş olup iksa destekleme sistemi olarak Şekil 6.1’de yer alan yapısal elemanlar kullanılmıştır. Uygulanan jet grout zemin iyileştirme yöntemi alansal olması sebebiyle iyileştirilen bölgeye jet grout iyileştirilmiş zemin malzeme tipi, “Mohr-Colomb” ve drenaj tipi “Undrained A” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.8. Vaka 1 için uygulanan alansal jet grout aşamaları

Vaka 1’de Jet Grout metoduyla alansal zemin iyileştirme uygulaması gerçekleştirilen statik analize ait düşey yöndeki yer değiştirme verileri Tablo 6.7’de yer almaktadır. A, B, C noktalarının bulunduğu üst yarı bölgesinde 67 mm; D, E noktalarının bulunduğu alt yarı bölgesinde 9 mm ve F, G noktalarının bulunduğu taban bölgesinde 5 mm değerinde düşey deformasyon meydana gelmiştir.

Tablo 6.7. Vaka 1- Alansal jet grout uygulaması düşey yer değiştirme (statik analiz)

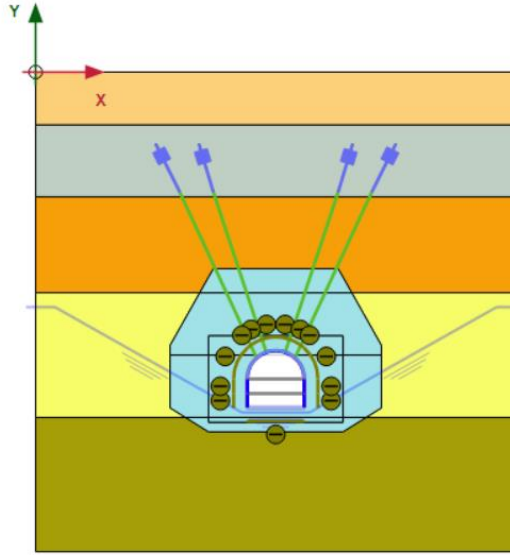
Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme (mm)
Vaka 1	Üst Yarı	A-B-C	67
	Alt Yarı	D-E	9
	Taban	F-G	5

Vaka 1’de tünel hattı ve çevresinde uygulanan alansal jet grout ile zemin iyileştirmesi analizi neticesinde, ilk haline göre (zemin iyileştirme olmaksızın) düşey yer değiştirme değerlerini azaltmakta etkili olduğu belirlenmiştir. Jet grout kolonlarının zemin rijitliğini artırarak deformasyonları (Tablo 6.7) sınırladığı ve bu sayede yüzeyde oluşabilecek oturmaların kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. Elde edilen mühendislik verileri ve analiz sonuçları doğrultusunda, söz konusu uygulamanın

yapısal performansa olumlu katkı sağladığı değerlendirilmiş ve uygulama uygun bulunmuştur.

6.1.3. Vaka 1 alansal jet grout metodu ardından ankraj ile zemin iyileştirme statik analiz

Vaka 1’de uygulanan alansal jet grout (Tablo 6.6) uygulaması ardından ankraj uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ankraj kök bölgesinde 1,2 m aralıkla, 0,6 m çapında ve 10 m uzunluğunda jet grout kolon olarak uygulanmıştır. Ankraj serbest bölgesinde ise 1,2 m aralıkla, 3 adet 0,6 inç süper tendon, 37 m uzunluğunda kullanılarak uygulanmıştır. Ayrıca söz konusu ankraj yönteminde, ankraj kök bölgesi Vaka 1’de yüzeyden itibaren ikinci tabaka olan Çakıllı Siltli KUM olan bölgede olmasına özen gösterilmiştir (Şekil 6.9). İlk olarak NATM yöntemiyle açılan tünelde kazı işlemi gerçekleşmeden tünel çevresi ve tünel hattı alansal olarak jet grout metodu ile iyileştirilmiştir. Ardından ankraj uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu esnada tünelde üç aşamalı NATM yöntemi ile kazı gerçekleştirilmiş olup kazı destekleme sistemi olarak Şekil 6.1’de yer alan yapısal elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 6.9. Vaka 1 – Uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait ayna kesiti

Vaka 1’de alansal jet grout metodu ardından ankraj uygulaması gerçekleştirildiği statik analize ait düşey yöndeki yer değiştirme verileri Tablo 6.8’de yer almaktadır. A, B, C noktalarının bulunduğu üst yarı bölgesinde 68 mm; D, E noktalarının bulunduğu alt yarı bölgesinde 9 mm ve F, G noktalarının bulunduğu taban bölgesinde 5 mm değerinde

düşey deformasyon meydana gelmiştir.

Tablo 6.8. *Vaka 1 – Uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait düşey yerdeğiştirme (statik analiz)*

Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme
			(mm)
Vaka 1	Üst Yarı	A-B-C	68
	Alt Yarı	D-E	9
	Taban	F-G	5

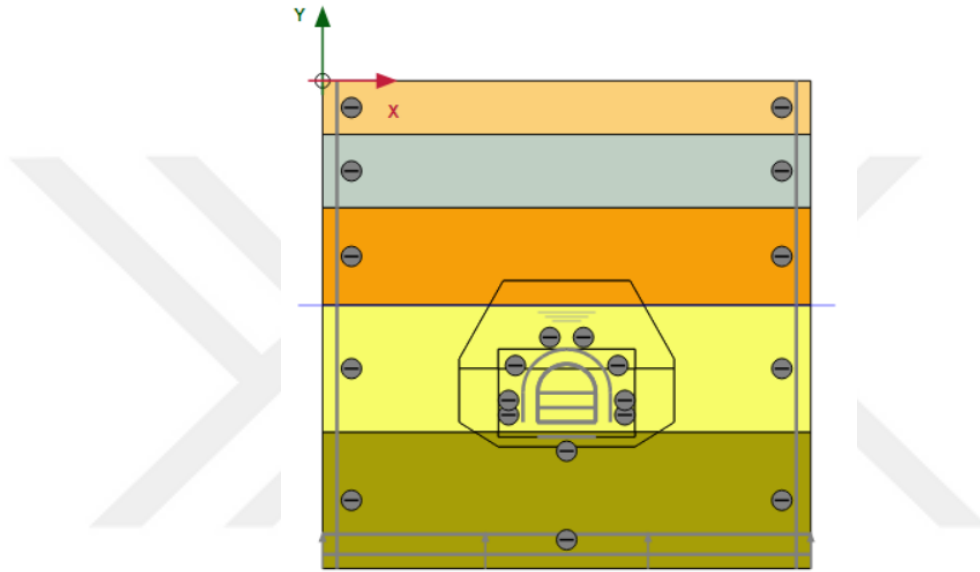
Vaka 1’de tünel hattı ve çevresine alansal jet grout metodu uygulandıktan sonra tünel hattı üzerine uygulanan ankraj metodu kullanılarak Plaxis 2D ile yapılan çözümleme neticesinde ankraj uygulamasının düşey yer değiştirme değerleri üzerinde anlamlı bir iyileşme sağlamadığı belirlenmiştir. Ayrıca sisteme entegre edilen ilave malzemelerin yapıya ek ölü yük getirmesi nedeniyle taşıyıcı sistem üzerindeki yüklemeyi artırdığı ve bu durumun yapısal verimliliği olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, söz konusu uygulamanın sistem performansına kayda değer bir katkı sunmadığı ve aksine yapısal etkinliği azaltabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle statik durum için ankraj uygulamasının gerçekleştirilmemesi gerektiğine karar verilmiştir.

6.1.4. Vaka 1 jet grout ile zemin iyileştirme dinamik analiz

Vaka 1’de tünel hattı ve çevresinde uygulanan alansal jet grout (Tablo 6.6) ile zemin iyileştirmesinin sismik performansını değerlendirmek amacıyla Mw: 7 olan deprem etkisi altında ivme-zaman değerleri ile Plaxis 2D programıyla dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, uygulamanın yapı-zemin etkileşimi ve düşey yer değiştirme üzerindeki etkileri Tablo 6.9’da yer almaktadır. Dinamik analiz gerçekleştirilecek zemin profili Şekil 6.10’da görülmektedir.

Tablo 6.9. Vaka 1 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait düşey yer değiştirme (dinamik analiz)

Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme (mm)
Vaka 1	Üst Yarı	A-B-C	28
	Alt Yarı	D-E	31
	Taban	F-G	14



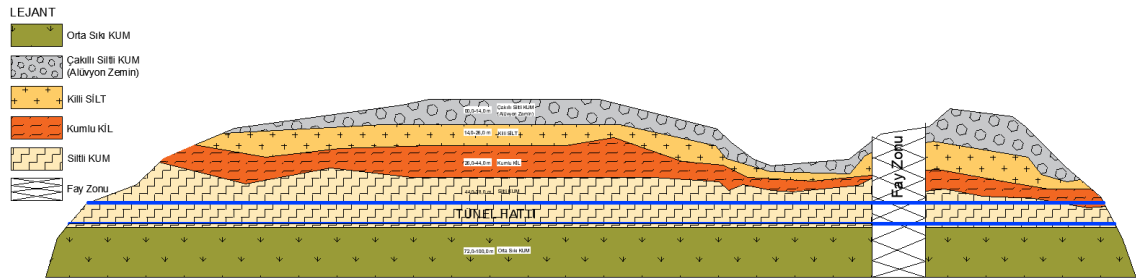
Şekil 6.10. Vaka 1 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait ayna kesiti (dinamik analiz)

Vaka 1’de tünel hattı ve çevresinde uygulanan alansal jet grout iyileştirmesi sonrası Mw 7 büyüklüğündeki deprem senaryosu altında gerçekleştirilen dinamik analizlerde, Tablo 6.10’da görüldüğü gibi üst yarıda 28 mm, alt yarıda 31 mm, tabanda ise 14 mm düzeyinde düşey yer değiştirme değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu değer, mühendislik açısından kabul edilebilir düzeydedir. Bu sonuçlar, alansal jet grout uygulamasının zemin rijitliğini arttırarak sismik yükler altındaki düşey yer değiştirmeleri etkin biçimde sınırlandırdığı görülmektedir.

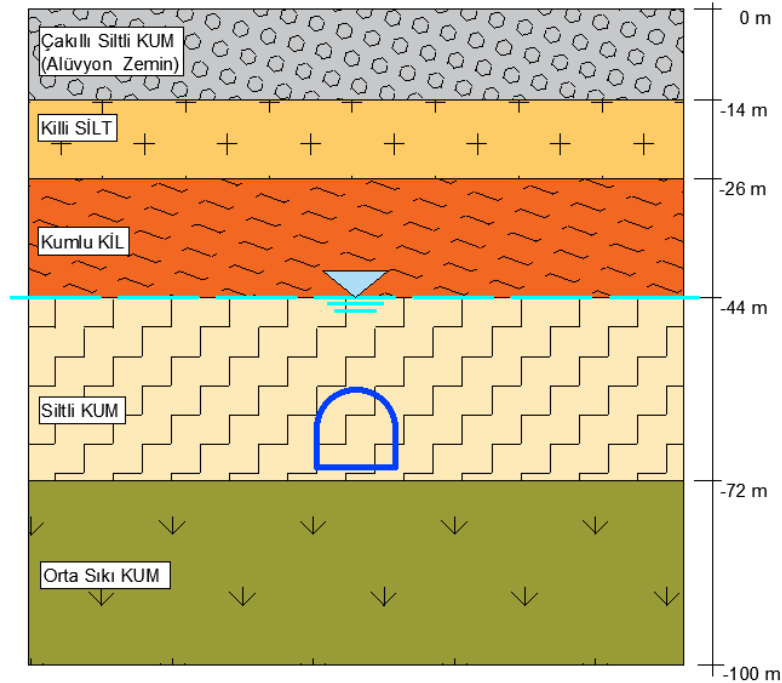
6.2. İkinci Vaka (Sıvılaşan Zemin-2)

İkinci vakada; özellikle tünel hattı ve çevresinde sıvılaşma potansiyeli olabilecek Siltli KUM zemin tabakası mevcuttur. Tünel tabanından itibaren zemin üst kotuna kadar 70 m zemin yüksekliğine sahip, at nalı kesitli tünelin ebatları 12mx12m’dir. Su seviyesi

-44 m’de belirlenmiştir. İlk 14 m’de Çakıllı Siltli KUM (SPT-N: 36, c: 10 kPa, Ø: 38 °, γ_{unsat} : 19 kN/m³), ardından 26 m’ye kadar olan tabakada Killi SİLT (SPT-N: 30, c: 10 kPa, Ø: 35 °, γ_{unsat} : 16 kN/m³) ve 44 m’ye kadar Kumlu KİL (SPT-N: 14, c: 10 kPa, Ø: 6 °, γ_{unsat} : 13 kN/m³) tabakaları olup, 70 m’ye kadar sıvılaştıran zemin olan Siltli KUM (SPT-N: 10, c: 4 kPa, Ø: 8 °, γ_{unsat} : 16 kN/m³) ve devamında 100 m’ye Orta Sıkı KUM (SPT-N: 40, c: 3 kPa, Ø: 40 °, γ_{unsat} : 20 kN/m³) birimi yer almaktadır. Şekil 6.11’de tünel inşaatının gerçekleştirileceği dağa ait jeolojik profil ve Şekil 6.12’de tünelde analizi gerçekleştirilecek ayna kesiti görülmektedir.



Şekil 6.11. Vaka 2- Zemin profilini içeren dağa ait jeolojik profil



Şekil 6.12. Vaka 2- Ayna kesiti

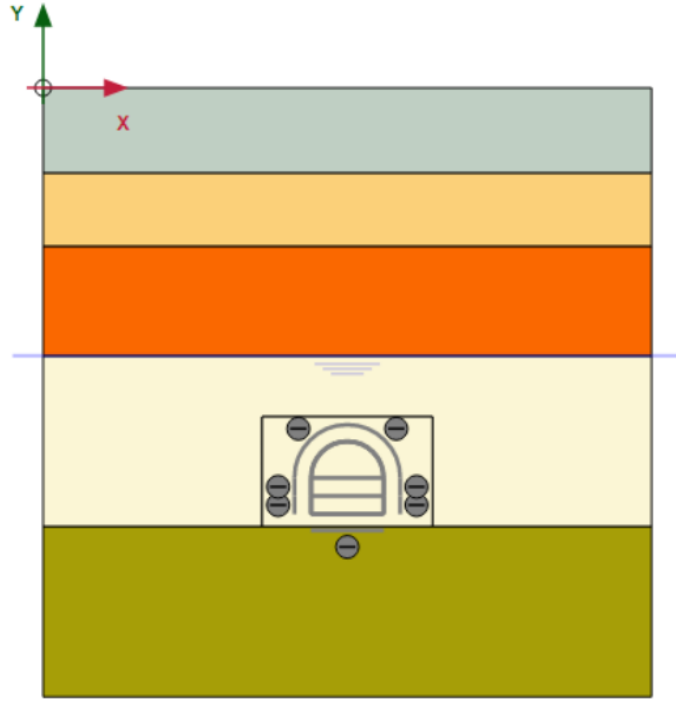
Zemin parametrelerinin belirlenmesinde, doğadaki olumsuz koşullar göz önünde bulundurularak model oluşturulmuştur. Standart penetrasyon testi (SPT) verileri ve zemin

sınıfı, zemin profili ve mukavemet değerleri belirlenmiştir. Özellikle zemin yüzeyinden itibaren 26-72 m’de bulunan Kumlu KİL ve Siltli KUM tabakaları tünel hattı ve üzerinde bulunan yaklaşık 46 metrelik zemin tabakası, düşük SPT-N değerleri (gevşek ve yumuşak zemin koşulları) dikkate alınarak modellenmiştir. Yeraltı su seviyesi -44 m’dedir. Tablo 6.10’da ikinci vaka için belirlenen zemin profiline ait mukavemet parametreleri yer almaktadır.

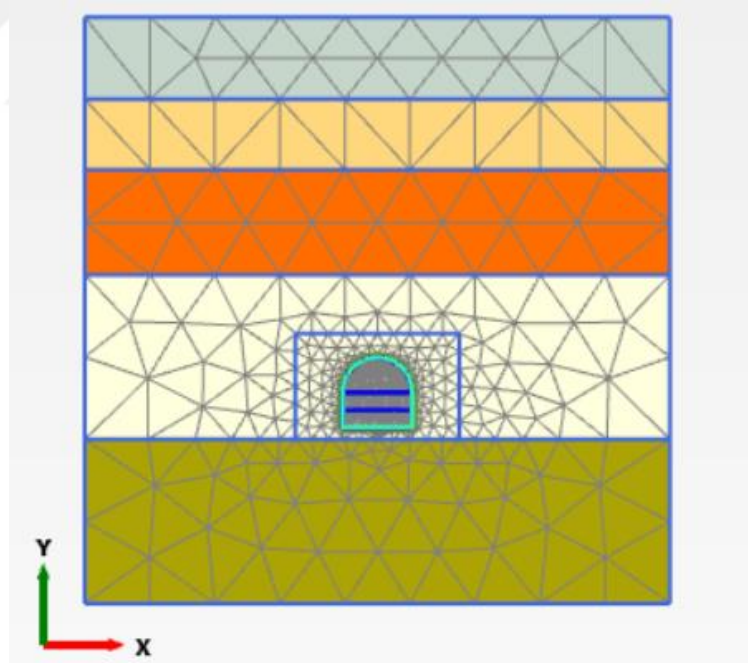
Tablo 6.10. İkinci vaka profiline ait mukavemet parametreleri

Zemin Profili Yüksekliği	Zemin Profiline Tünel Hattı Konumu	Zemin Üst Yüzeyinden İtibaren Kot	Zemin Tabaka Yüksekliği	Zemin Türü	SPT-N	V_{sonat}	Parametreler		
(m)	--	(m)	(m)	--	--	(kN/m ³)	c’	ϕ	ψ
		0							
		-14	14	Çakıllı Siltli KUM	36	19	10	38	8
		-26	12	Killi SİLT	30	16	10	35	5
70	Tünel Hattı Üstü (Yükselik 58m)	-44	18	Kumlu KİL	14	14	10	6	0
		-58	14	Siltli KUM	10	17	4	8	0
	Tünel Hattı (Yükselik 12 m)	-70	12	Siltli KUM	10	17	4	8	0
		-78	8	Siltli KUM	10	17	4	8	0
30	Tünel Hattı Altı (Yükselik 30 m)	-100	28	Orta Sıkı KUM	30	18	3	36	6

Plaxis 2D programından çözüm için oluşturulan modelin Vaka 2 için Şekil 6.13’te model geometrisi, Şekil 6.14’te ise model ağı(mesh) görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 6.13. Vaka 2- Çözümleme için oluşturulan model geometrisi

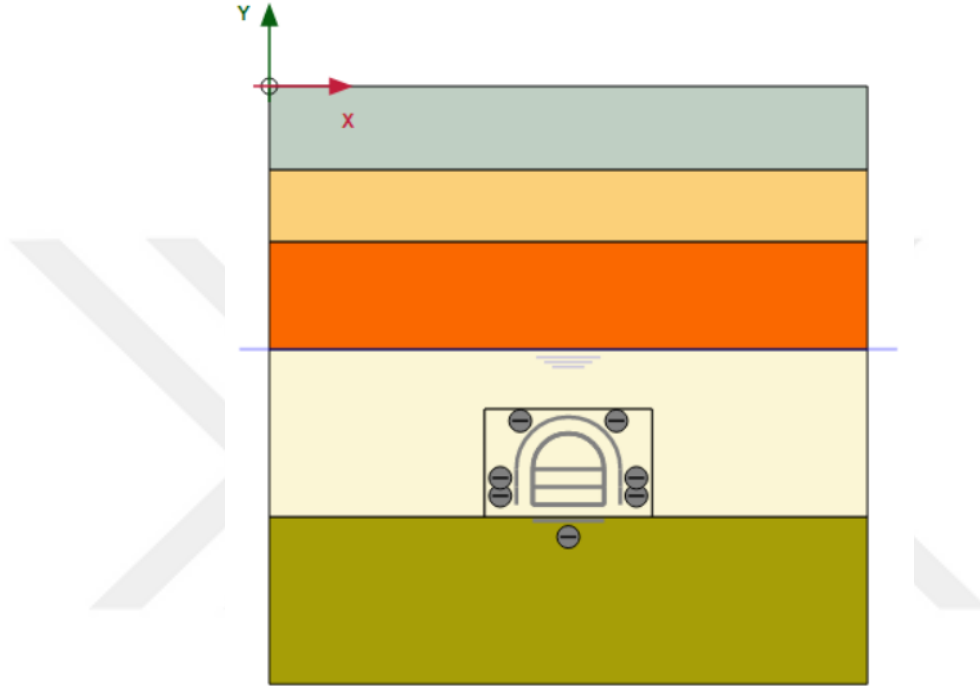


Şekil 6.14. Vaka 2- Çözümleme için oluşturulan model ağı (mesh) görüntüsü

6.2.1. Vaka 2 Plaxis 2D ile çözümleme

Vaka 2, NATM yöntemi ile at nalı kesitli üç aşamalı tünel açma analizinde üst yarı, alt yarı ve taban bölgeleri için çözümleme gerçekleştirilmiştir. Vaka 2’de zemin

iyileştirmesi olmaksızın (Şekil 6.15), tünelin destekleme sistemi ile açıldığı ilk hal ile gerçekleştirilen statik analize ait düşey yöndeki yer değiştirme verileri Tablo 6.11’de yer almaktadır. A, B, C noktalarının bulunduğu üst yarı bölgesinde 68 mm; D, E noktalarının bulunduğu alt yarı bölgesinde 483 mm ve F, G noktalarının bulunduğu taban bölgesinde 6 mm değerinde düşey deformasyon meydana gelmiştir.



Şekil 6.15. Vaka 2 – İlk Hal (Zemin İyileştirme yapılmaksızın) açılan tünele ait ayna kesiti

Tablo 6.11. Vaka 2- İlk hal (zemin iyileştirme olmaksızın) düşey yer değiştirme (statik analiz)

Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme
			(mm)
Vaka 2	Üst Yarı	A-B-C	68
	Alt Yarı	D-E	483
	Taban	F-G	6

Vaka 2’de tüneli çevreleyen ve üzerinde yer alan yaklaşık 46 m mühendislik özellikleri zayıf olan gevşek ve yumuşak zemin tabakaları mevcuttur. Söz konusu zemin tabakalarında, deformasyon değerlerinin olumsuz zemin koşullarında, yüksek çıkması nedeniyle zemin iyileştirme yöntemleri araştırılmıştır.

İlk aşamada, zeminin ilk hali (zemin iyileştirmesiz) ile yalnızca kazı ve destekleme elemanları sebebiyle meydana gelen düşey yer değiştirme etkisi değerlendirilmiş olup deformasyonların gevşek zemin profili için yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum üzerine, tünel hattı ve çevresinde deformasyonları azaltmaya yönelik olarak; tünel kesiti ile çevreleyen bölgede alansal iyileştirme ile jet grout uygulaması ve ayrıca alansal jet grout iyileştirme yöntemi ardından ankraj uygulamalarının yapılması planlanmıştır.

6.2.2. Vaka 2 jet grout metodu ile iyileştirme statik analiz

Vaka 2’de uygulanacak olan alansal jet grout uygulaması için 0,60 m çapında, 0,60 m eksenden eksene mesafeli (0,20 m kesişimli kolonlar), 20 m uzunluğunda kolonlar ile alansal bir iyileştirme yapılması tercih edilmiştir.

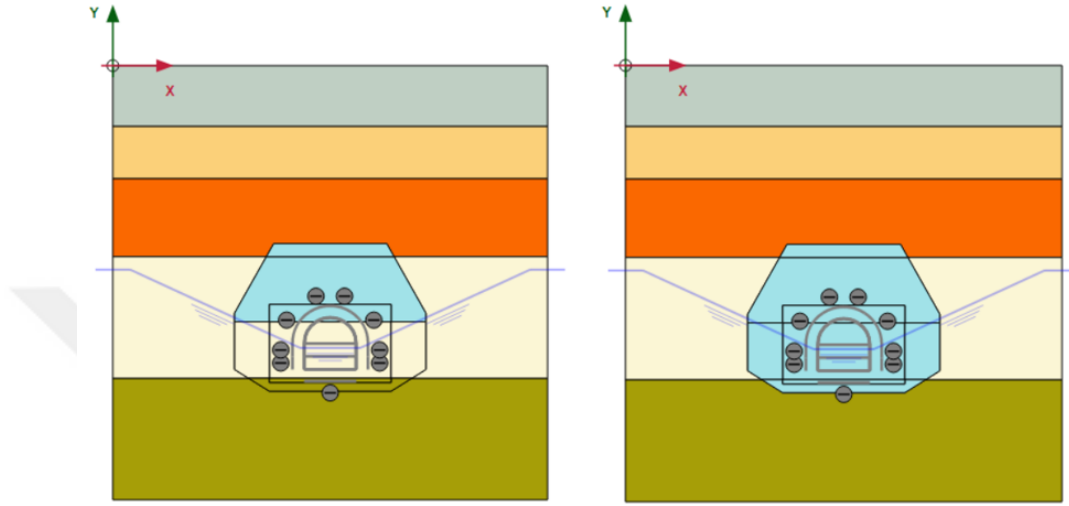
Alansal jet grout uygulamasına ilişkin mühendislik parametrelerinin belirlenmesinde, Durgunoğlu (2004) tarafından sunulan deneysel veriler ve önerilen zemin iyileştirme esasları temel alınmıştır. Söz konusu çalışma doğrultusunda, jet grout kolonlarının oluşturduğu iyileştirilmiş zemin özellikleri dikkate alınarak, analizlerde kullanılacak elastisite modülü, kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri hesaplanmış ve modelleme sürecine tanımlanmıştır. Vaka 2 için elde edilen sonuçlar Tablo 6.12’de yer almaktadır.

Tablo 6.12. *Vaka 2 alansal iyileştirme jet grout uygulanmış iyileştirilmiş zemine ait mühendislik parametreleri*

İyileştirilmiş Zeminin Mühendislik Parametreleri		
Parametre	Birim	Kabul edilen
Alan oranı	--	0,8
Zeminin İçsel Sürtünme Açısı	$\phi, ^\circ$	41,0
Zeminin Efektif Kohezyonu	kPa	970,0
Zeminin Elastisite Modülü	E, kPa	1370000,0

Uygulanan alansal jet grout iyileştirmesi, tünel tavanının üzerindeki yaklaşık 20 metrelik bölgeyi ve bu kısmın altında kalan taban bölgesini kapsayacak şekilde tünelin içinden daha önce açılmış olan tünel üst yarının olduğu bölgede gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.16). İlk olarak NATM yöntemiyle açılan tünelde kazı işlemi gerçekleşmeden tünel çevresi ve tünel hattı jet grout ile iyileştirilmiştir. Ardından üç aşamalı NATM yöntemi

ile kazı gerçekleştirilmiş olup iksa destekleme sistemi olarak Şekil 6.1’de yer alan yapısal elemanlar kullanılmıştır. Uygulanan jet grout zemin iyileştirme yöntemi alansal olması sebebiyle iyileştirilen bölgeye jet grout iyileştirilmiş zemin malzeme tipi, “Mohr-Colomb” ve drenaj tipi “Undrained A” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.16. Vaka 2 için uygulanan alansal jet grout aşamaları

Vaka 2’de Jet Grout metoduyla alansal zemin iyileştirme uygulaması gerçekleştirilen statik analize ait düşey yöndeki yer değiştirme verileri Tablo 6.13’te yer almaktadır. A, B, C noktalarının bulunduğu üst yarı bölgesinde 49 mm; D, E noktalarının bulunduğu alt yarı bölgesinde 7 mm ve F, G noktalarının bulunduğu taban bölgesinde 5 mm değerinde düşey deformasyon meydana gelmiştir.

Tablo 6.13. Vaka 2-Alansal jet grout uygulaması düşey yer değiştirme (statik analiz)

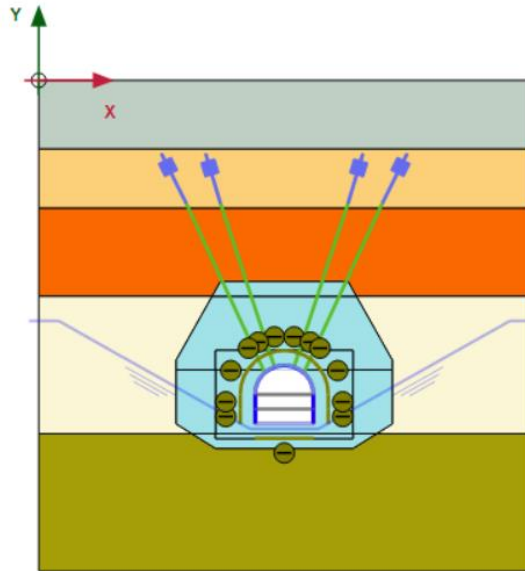
Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme
			(mm)
Vaka 2	Üst Yarı	A-B-C	49
	Alt Yarı	D-E	7
	Taban	F-G	5

Vaka 2’de tünel hattı ve çevresinde uygulanan alansal jet grout ile zemin iyileştirmesi analizi neticesinde, ilk haline göre (zemin iyileştirme olmaksızın) düşey yer değiştirme değerlerini azaltmakta etkili olduğu belirlenmiştir. Jet grout kolonlarının

zemin rijitliğini arttırarak deformasyonları (Tablo 6.13) sınırladığı ve bu sayede yüzeyde oluşabilecek oturmaların kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. Elde edilen mühendislik verileri ve analiz sonuçları doğrultusunda, söz konusu uygulamanın yapısal performansa olumlu katkı sağladığı değerlendirilmiş ve uygulama uygun bulunmuştur.

6.2.3. Vaka 2 jet grout metodu ardından ankraj ile zemin iyileştirme statik analiz

Vaka 2’de uygulanan alansal jet grout (Tablo 6.12) uygulaması ardından ankraj uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ankraj kök bölgesinde 1,2 m aralıkla, 0,6 m çapında ve 10 m uzunluğunda jet grout kolon olarak uygulanmıştır. Ankraj serbest bölgesinde ise 1,2 m aralıkla, 3 adet 0,6 inç süper tendon, 37 m uzunluğunda kullanılarak uygulanmıştır. Ayrıca söz konusu ankraj yönteminde, ankraj kök bölgesi Vaka 2’de yüzeyden itibaren ikinci tabaka olan Killi SİLT olan bölgede olmasına özen gösterilmiştir (Şekil 6.17). İlk olarak NATM yöntemiyle açılan tünelde kazı işlemi gerçekleşmeden tünel çevresi ve tünel hattı alansal olarak jet grout metodu ile iyileştirilmiştir. Ardından ankraj uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu esnada tünelde üç aşamalı NATM yöntemi ile kazı gerçekleştirilmiş olup iksa destekleme sistemi olarak Şekil 6.1’de yer alan yapısal elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 6.17. Vaka 2 – uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait ayna kesiti

Vaka 2’de alansal jet grout metodu ardından ankraj uygulaması gerçekleştirildiği

statik analize ait düşey yöndeki yer değiştirme verileri Tablo 6.14'te yer almaktadır. A, B, C noktalarının bulunduğu üst yarı bölgesinde 50 mm; D, E noktalarının bulunduğu alt yarı bölgesinde 8 mm ve F, G noktalarının bulunduğu taban bölgesinde 5 mm değerinde düşey deformasyon meydana gelmiştir.

Tablo 6.14. *Vaka 2 – Uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait düşey yer değiştirme (statik analiz)*

Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme
			(mm)
Vaka 2	Üst Yarı	A-B-C	50
	Alt Yarı	D-E	8
	Taban	F-G	5

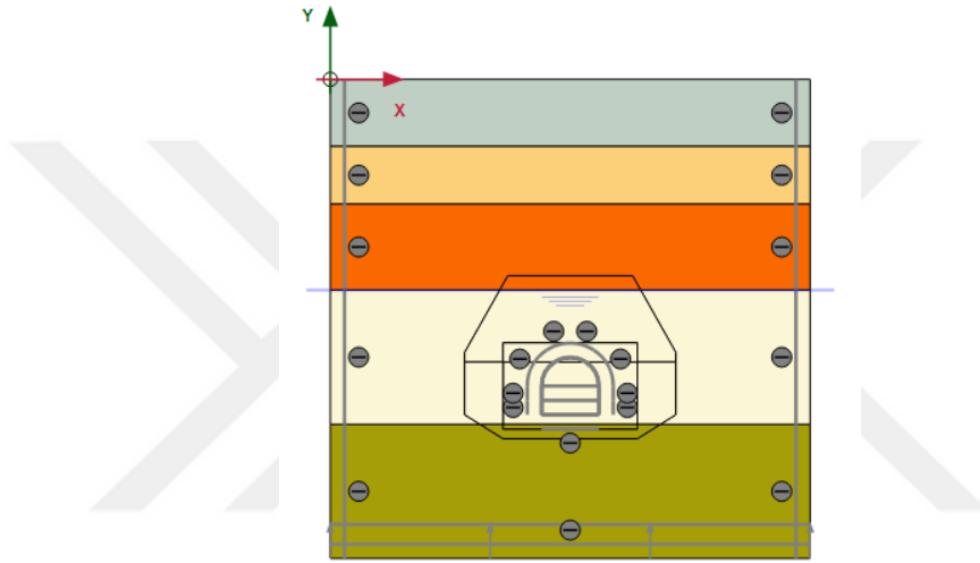
Vaka 2’de tünel hattı ve çevresine alansal jet grout metodu uygulandıktan sonra tünel hattı üzerine uygulanan ankraj metodu kullanılarak Plaxis 2D ile yapılan çözümleme neticesinde ankraj uygulamasının düşey yer değiştirme değerleri üzerinde anlamlı bir iyileşme sağlamadığı belirlenmiştir. Ayrıca sisteme entegre edilen ilave malzemelerin yapıya ek ölü yük getirmesi nedeniyle taşıyıcı sistem üzerindeki yüklemeyi artırdığı ve bu durumun yapısal verimliliği olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, söz konusu uygulamanın sistem performansına kayda değer bir katkı sunmadığı ve aksine yapısal etkinliği azaltabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle statik durum için ankraj uygulamasının gerçekleştirilmemesi gerektiğine karar verilmiştir.

6.2.4. Vaka 2 alansal jet grout ile zemin iyileştirme dinamik analiz

Vaka 2’de tünel hattı ve çevresinde uygulanan alansal jet grout (Tablo 6.12) ile zemin iyileştirmesinin sismik performansını değerlendirmek amacıyla Mw: 7 olan deprem etkisi altında ivme-zaman değerleri ile Plaxis 2D programıyla dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, uygulamanın yapı-zemin etkileşimi ve düşey yer değiştirme üzerindeki etkileri Tablo 6.15’te yer almaktadır. Dinamik analiz gerçekleştirilecek zemin profili Şekil 6.18’de görülmektedir.

Tablo 6.15. Vaka 2 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait düşey yer değiştirme (dinamik analiz)

Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme (mm)
Vaka 2	Üst Yarı	A-B-C	20
	Alt Yarı	D-E	13
	Taban	F-G	6



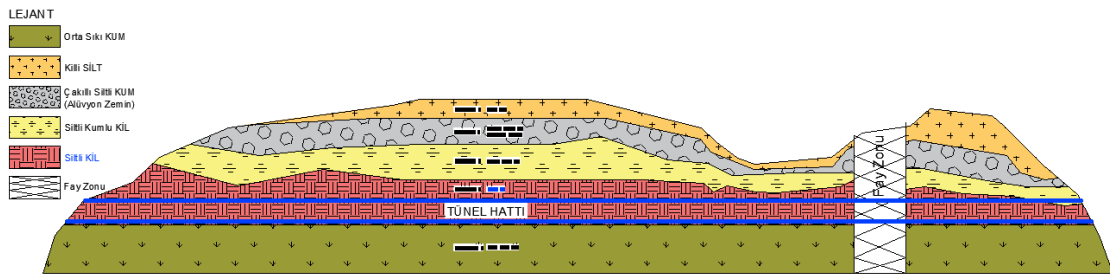
Şekil 6.18. Vaka 2 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait ayna kesiti (dinamik analiz)

Vaka 2’de tünel hattı ve çevresinde uygulanan alansal jet grout iyileştirmesi sonrası Mw: 7 büyüklüğündeki deprem senaryosu altında gerçekleştirilen dinamik analizlerde, Tablo 6.15’te görüldüğü gibi üst yarıda 20 mm, alt yarıda 13 mm, tabanda ise 6 mm düzeyinde düşey yer değiştirme değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu değer, mühendislik açısından kabul edilebilir düzeydedir. Bu sonuçlar, alansal jet grout uygulamasının zemin rijitliğini arttırarak sismik yükler altındaki düşey yer değiştirmeleri etkin biçimde sınırlandırdığı görülmektedir.

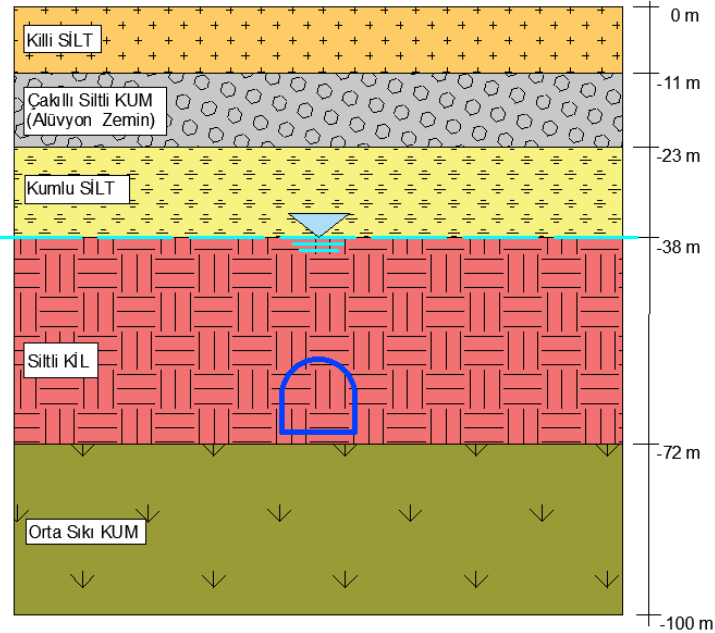
6.3. Üçüncü Vaka (Yumuşak Zemin)

Üçüncü vakada; özellikle tünel hattı ve çevresinde oturma potansiyeli olabilecek Siltli KİL zemin tabakası mevcuttur. Tünel tabanından itibaren zemin üst kotuna kadar 70 m zemin yüksekliğine sahip, at nalı kesitli tünelin ebatları 12mx12m’dir. Su seviyesi

-38 m’de belirlenmiştir. İlk 11m’de Killi SİLT (SPT-N: 34, c: 10 kPa, ϕ : 38 °, γ unsat: 16 kN/m³), ardından 23 m’ye kadar olan tabakada Çakıllı Siltli KUM (SPT-N: 30, c: 6 kPa, ϕ : 40 °, γ unsat: 19 kN/m³) ve 38 m’ye kadar Kumlu SİLT (SPT-N: 10, c: 4 kPa, ϕ : 8 °, γ unsat: 16 kN/m³) tabakaları olup, 70 m’ye kadar sıvılaştıran zemin olan Siltli KİL (SPT-N: 10, c: 10 kPa, ϕ : 8 °, γ unsat: 16 kN/m³) ve devamında 100 m’ye Orta Sıkı KUM (SPT-N: 40, c: 3 kPa, ϕ : 40 °, γ unsat: 20 kN/m³) birimi yer almaktadır. Şekil 6.19’de tünel inşaatının gerçekleştirileceği dağa ait jeolojik profil ve Şekil 6.20’de tünelde analizi gerçekleştirilecek ayna kesiti görülmektedir.



Şekil 6.19. Vaka 3- Zemin profilini içeren dağa ait jeolojik profil



Şekil 6.20. Vaka 3- Ayna kesiti

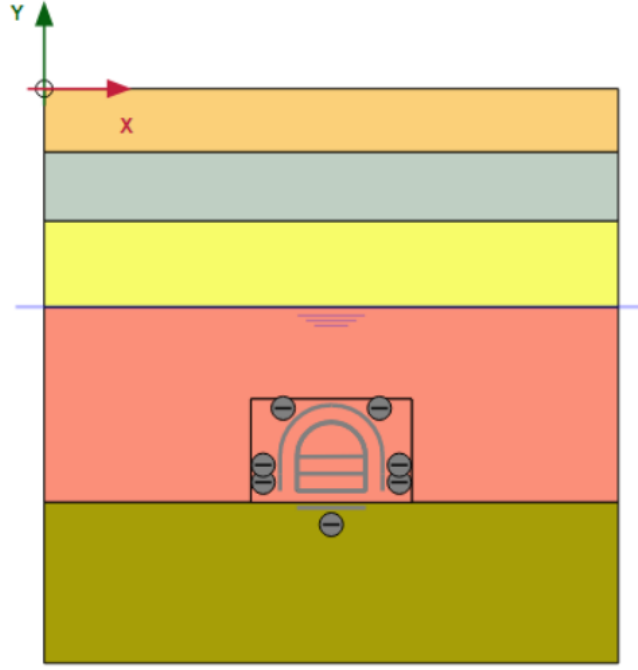
Zemin parametrelerinin belirlenmesinde, doğadaki olumsuz koşullar göz önünde bulundurularak model oluşturulmuştur. Standart penetrasyon testi (SPT) verileri ve zemin sınıfı, zemin profili ve mukavemet değerleri belirlenmiştir. Özellikle zemin yüzeyinden

itibaren 23-72 m’de bulunan Kumlu SİLT ve Siltli KİL tabakaları tünel hattı ve üzerinde bulunan yaklaşık 49 metrelik zemin tabakası, düşük SPT-N değerleri (gevşek ve yumuşak zemin koşulları) dikkate alınarak modellenmiştir. Yeraltı su seviyesi -38 m’dedir. Tablo 6.16’da üçüncü vaka için belirlenen zemin profiline ait mukavemet parametreleri yer almaktadır.

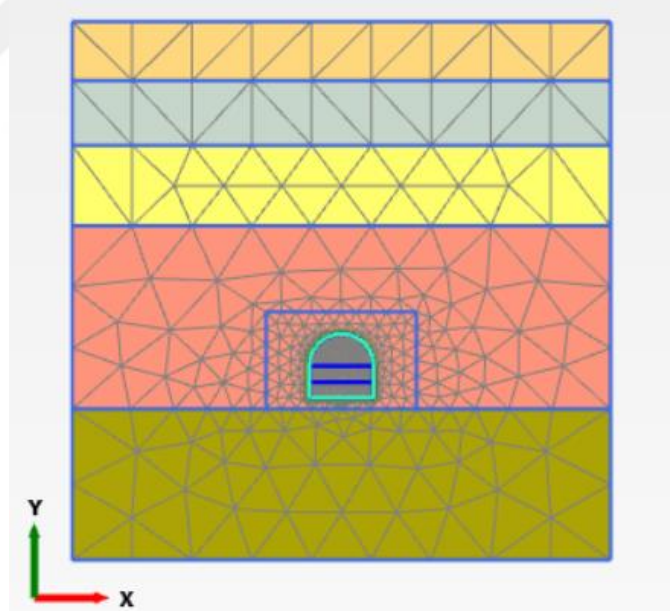
Tablo 6.16. Üçüncü vaka profiline ait mukavemet parametreleri

Zemin Profili Yüksekliği	Zemin Profiline Tünel Hattı Konumu	Zemin Üst Yüzeyinden İtibaran Kot	Zemin Tabaka Yüksekliği	Zemin Türü	SPT-N	V_{sat}	Parametreler		
(m)	--	(m)	(m)	--	--	(kN/m ³)	c’	ϕ	ψ
							kPa	(°)	(°)
		0							
		-11	11	Kıllı SİLT	34	16	10	38	8
		-23	12	Çakılı Siltli KUM	30	20	6	40	10
70	Tünel Hattı Üstü (Yükselik 58 m)	-38	15	Kumlu SİLT	12	17	4	12	0
		-58	20	Siltli KİL	10	16	10	8	0
	Tünel Hattı (Yükselik 12 m)	-70	12	Siltli KİL	10	16	10	8	0
		-78	8	Siltli KİL	10	16	10	8	0
30	Tünel Hattı Altı (Yükselik 30 m)	-100	28	Orta Sıkı KUM	30	18	3	36	6

Plaxis 2D programından çözüm için oluşturulan modelin Vaka 3 için Şekil 6.21’da model geometrisi, Şekil 6.22’de ise model ağı(mesh) görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 6.21. Vaka3- Çözümleme için oluşturulan model geometrisi

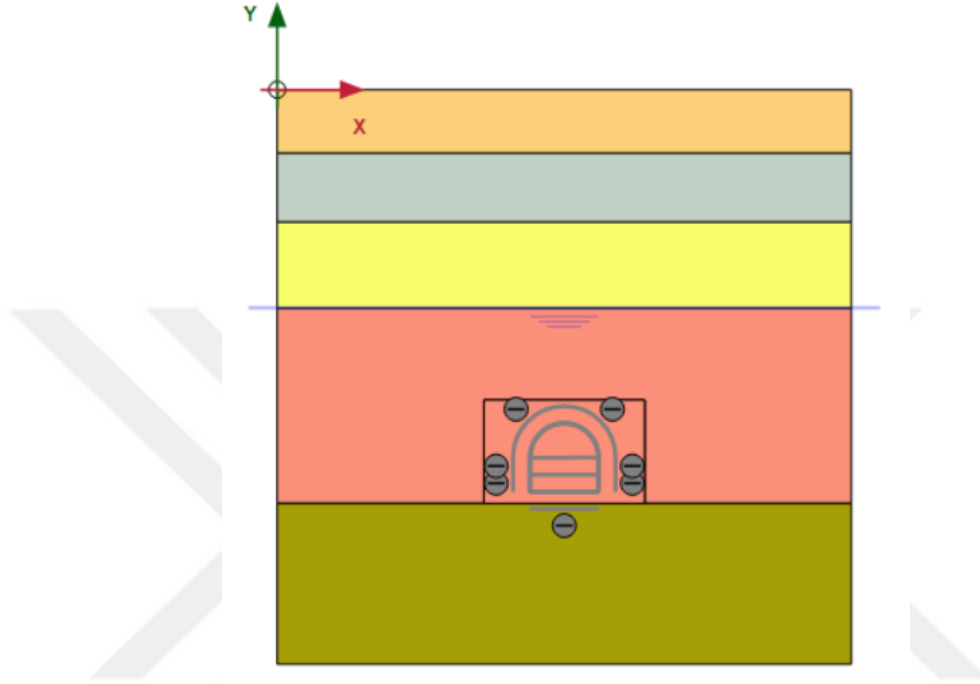


Şekil 6.22. Vaka 3- Çözümleme için oluşturulan model ağı (mesh) görüntüsü

6.3.1. Vaka 3 Plaxis 2D ile çözümleme

Vaka 3, NATM yöntemi ile at nalı kesitli üç aşamalı tünel açma analizinde üst yarı, alt yarı ve taban bölgeleri için çözümleme gerçekleştirilmiştir. Vaka 3'te zemin iyileştirmesi olmaksızın (Şekil 6.23), tünelin destekleme sistemi ile açıldığı ilk hal ile

gerçekleştirilen statik analize ait düşey yöndeki yer değiştirme verileri Tablo 6.17’de yer almaktadır. A, B, C noktalarının bulunduğu üst yarı bölgesinde 252 mm; D, E noktalarının bulunduğu alt yarı bölgesinde 68 mm ve F, G noktalarının bulunduğu taban bölgesinde 1 mm değerinde düşey deformasyon meydana gelmiştir.



Şekil 6.23. Vaka 3 – İlk Hal (Zemin İyileştirme yapılmaksızın) açılan tünele ait ayna kesiti

Tablo 6.17. Vaka 3-İlk hal (zemin iyileştirme olmaksızın) düşey yer değiştirme (statik analiz)

Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme
			(mm)
Vaka 3	Üst Yarı	A-B-C	252
	Alt Yarı	D-E	68
	Taban	F-G	1

Vaka 3’te tüneli çevreleyen ve üzerinde yer alan yaklaşık 49 m mühendislik özellikleri zayıf olan gevşek ve yumuşak zemin tabakaları mevcuttur. Söz konusu zemin tabakalarında, deformasyon değerlerinin olumsuz zemin koşullarında, yüksek çıkması nedeniyle zemin iyileştirme yöntemleri araştırılmıştır.

İlk aşamada, zeminin ilk hali (zemin iyileştirmesiz) ile yalnızca kazı ve destekleme elemanları sebebiyle meydana gelen düşey yer değiştirme etkisi değerlendirilmiş olup deformasyonların gevşek zemin profili için yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum

üzerine, tünel hattı ve çevresinde deformasyonları azaltmaya yönelik olarak; tünel kesiti ile çevreleyen bölgede alansal iyileştirme ile jet grout uygulaması ve ayrıca alansal jet grout iyileştirme yöntemi ardından ankraj uygulamalarının yapılması planlanmıştır.

6.3.2. Vaka 3 jet grout metodu ile iyileştirme

Vaka 3’te uygulanacak olan alansal jet grout uygulaması için 0,60 m çapında, 0,60 m eksenden eksene mesafeli (0,20 m kesişimli kolonlar), 20 m uzunluğunda kolonlar ile alansal bir iyileştirme yapılması tercih edilmiştir.

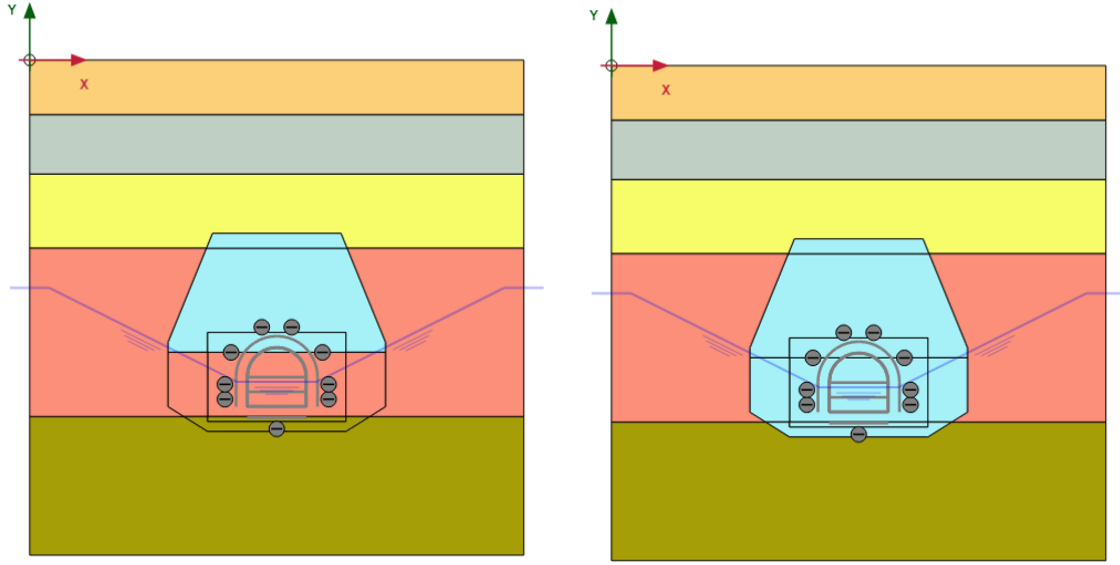
Alansal jet grout uygulamasına ilişkin mühendislik parametrelerinin belirlenmesinde, Durgunoğlu (2004) tarafından sunulan deneysel veriler ve önerilen zemin iyileştirme esasları temel alınmıştır. Söz konusu çalışma doğrultusunda, jet grout kolonlarının oluşturduğu iyileştirilmiş zemin özellikleri dikkate alınarak, analizlerde kullanılacak elastisite modülü, kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri hesaplanmış ve modelleme sürecine tanımlanmıştır. Vaka 3 için elde edilen sonuçlar Tablo 6.18’de yer almaktadır.

Tablo 6.18. Vaka 3 alansal iyileştirme jet grout uygulanmış iyileştirilmiş zemine ait mühendislik parametreleri

İyileştirilmiş Zeminin Mühendislik Parametreleri		
Parametre	Birim	Kabul edilen
Alan oranı	--	0,8
Zeminin İçsel Sürtünme Açısı	$\phi, ^\circ$	41
Zeminin Efektif Kohezyonu	kPa	470
Zeminin Elastisite Modülü	E, kPa	590000

Uygulanan alansal jet grout iyileştirmesi, tünel tavanının üzerindeki yaklaşık 20 metrelik bölgeyi ve bu kısmın altında kalan taban bölgesini kapsayacak şekilde tünelin içinden daha önce açılmış olan tünel üst yarının olduğu bölgede gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.24). İlk olarak NATM yöntemiyle açılan tünelde kazı işlemi gerçekleşmeden tünel çevresi ve tünel hattı jet grout ile iyileştirilmiştir. Ardından üç aşamalı NATM yöntemi ile kazı gerçekleştirilmiş olup iksa destekleme sistemi olarak Şekil 6.1’de yer alan yapısal elemanlar kullanılmıştır. Uygulanan jet grout zemin iyileştirme yöntemi alansal olması sebebiyle iyileştirilen bölgeye jet grout iyileştirilmiş zemin malzeme tipi, “Mohr-

Colomb” ve drenaj tipi “Undrained A” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.24. Vaka 3 için uygulanan alansal jet grout aşamaları

Vaka 3’te Jet Grout metoduyla alansal zemin iyileştirme uygulaması gerçekleştirilen statik analize ait düşey yöndeki yer değiştirme verileri Tablo 6.19’da yer almaktadır. A, B, C noktalarının bulunduğu üst yarı bölgesinde 56 mm; D, E noktalarının bulunduğu alt yarı bölgesinde 4 mm ve F, G noktalarının bulunduğu taban bölgesinde 6 mm değerinde düşey deformasyon meydana gelmiştir.

Tablo 6.19. Vaka 3-Alansal jet grout uygulaması düşey yer değiştirme (statik analiz)

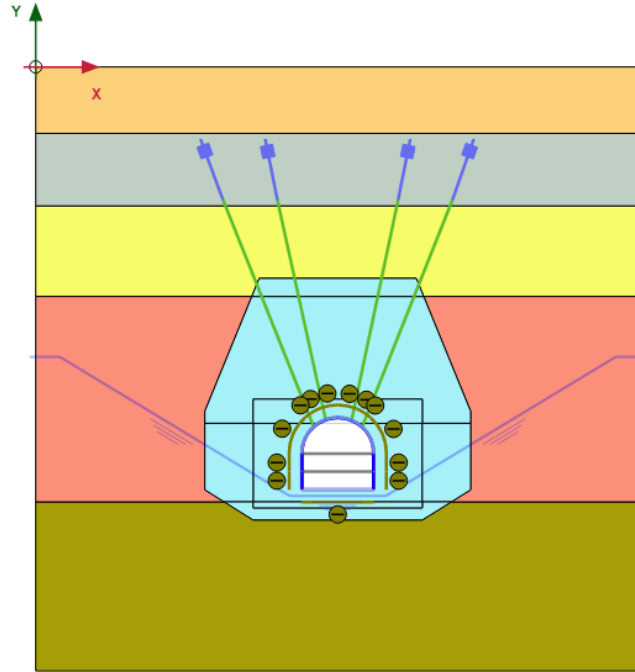
Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme
			(mm)
Vaka 3	Üst Yarı	A-B-C	56
	Alt Yarı	D-E	4
	Taban	F-G	6

Vaka 3’te tünel hattı ve çevresinde uygulanan alansal jet grout ile zemin iyileştirmesi analizi neticesinde, ilk haline göre (zemin iyileştirme olmaksızın) düşey yer değiştirme değerlerini azaltmakta etkili olduğu belirlenmiştir. Jet grout kolonlarının zemin rijitliğini artırarak deformasyonları (Tablo 6.18) sınırladığı ve bu sayede yüzeyde oluşabilecek oturmaların kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. Elde

edilen mühendislik verileri ve analiz sonuçları doğrultusunda, söz konusu uygulamanın yapısal performansa olumlu katkı sağladığı değerlendirilmiş ve uygulama uygun bulunmuştur.

6.3.3. Vaka 3 jet grout metodu ardından ankraj ile zemin iyileştirme statik analiz

Vaka 3'te uygulanan alansal jet grout (Tablo 6.17) uygulaması ardından ankraj uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ankraj kök bölgesinde 1,2 m aralıkla, 0,6 m çapında ve 10 m uzunluğunda jet grout kolon olarak uygulanmıştır. Ankraj serbest bölgesinde ise 1,2 m aralıkla, 3 adet 0,6 inç süper tendon, 42 m uzunluğunda kullanılarak uygulanmıştır. Ayrıca söz konusu ankraj yönteminde, ankraj kök bölgesi Vaka 3'te yüzeyden itibaren ikinci tabaka olan Çakıllı Siltli KUM olan bölgede olmasına özen gösterilmiştir (Şekil 6.25). İlk olarak NATM yöntemiyle açılan tünelde kazı işlemi gerçekleşmeden tünel çevresi ve tünel hattı alansal olarak jet grout metodu ile iyileştirilmiştir. Ardından ankraj uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu esnada tünelde üç aşamalı NATM yöntemi ile kazı gerçekleştirilmiş olup iksa destekleme sistemi olarak Şekil 6.1'de yer alan yapısal elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 6.25. Vaka 3 – Uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait ayna kesiti

Vaka 3'te alansal jet grout metodu ardından ankraj uygulaması gerçekleştirildiği statik analize ait düşey yöndeki yer değiştirme verileri Tablo 6.20'de yer almaktadır. A, B, C noktalarının bulunduğu üst yarı bölgesinde 51 mm; D, E noktalarının bulunduğu alt yarı bölgesinde 5 mm ve F, G noktalarının bulunduğu taban bölgesinde 6 mm değerinde düşey deformasyon meydana gelmiştir.

Tablo 6.20. *Vaka 3 – Uygulanan alansal jet grout ardından ankraj metoduna ait düşey yer değiştirme (statik analiz)*

Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme (mm)
Vaka 3	Üst Yarı	A-B-C	51
	Alt Yarı	D-E	5
	Taban	F-G	6

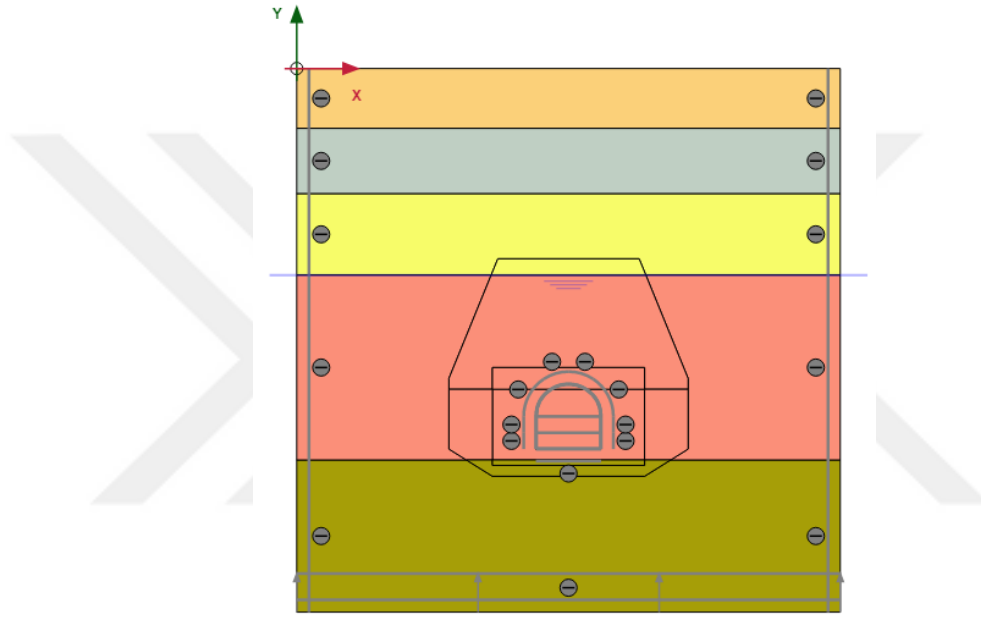
Vaka 3'te tünel hattı ve çevresine alansal jet grout metodu uygulandıktan sonra tünel hattı üzerine uygulanan ankraj metodu kullanılarak Plaxis 2D ile yapılan çözümleme neticesinde ankraj uygulamasının düşey yer değiştirme değerleri üzerinde anlamlı bir iyileşme sağlamadığı belirlenmiştir. Ayrıca sisteme entegre edilen ilave malzemelerin yapıya ek ölü yük getirmesi nedeniyle taşıyıcı sistem üzerindeki yüklemeyi artırdığı ve bu durumun yapısal verimliliği olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, söz konusu uygulamanın sistem performansına kayda değer bir katkı sunmadığı ve aksine yapısal etkinliği azaltabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle statik durum için ankraj uygulamasının gerçekleştirilmemesi gerektiğine karar verilmiştir.

6.3.4. Vaka 3 alansal jet grout ile zemin iyileştirme dinamik analiz

Vaka 3'te tünel hattı ve çevresinde uygulanan alansal jet grout (Tablo 6.12) ile zemin iyileştirmesinin sismik performansını değerlendirmek amacıyla Mw: 7 olan deprem etkisi altında ivme-zaman değerleri ile Plaxis 2D programıyla dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, uygulamanın yapı-zemin etkileşimi ve düşey yer değiştirme üzerindeki etkileri Tablo 6.21'de yer almaktadır. Dinamik analiz gerçekleştirilecek zemin profili Şekil 6.26'de görülmektedir.

Tablo 6.21. Vaka 3 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait düşey yer değiştirme (dinamik analiz)

Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	Her Bir Kazı Aşamasında Oluşan Düşey Yer Değiştirme (mm)
Vaka 3	Üst Yarı	A-B-C	39
	Alt Yarı	D-E	34
	Taban	F-G	30



Şekil 6.26. Vaka 3 – Uygulanan alansal jet grout metoduna ait ayna kesiti (dinamik analiz)

Vaka 3’te tünel hattı ve çevresinde uygulanan alansal jet grout iyileştirmesi sonrası Mw: 7 büyüklüğündeki deprem senaryosu altında gerçekleştirilen dinamik analizlerde, Tablo 6.20’te görüldüğü gibi üst yarıda 39 mm, alt yarıda 34 mm ve taban bölgesinde 30 mm düzeyinde düşey yer değiştirme değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu değer, mühendislik açısından kabul edilebilir düzeydedir. Bu sonuçlar, alansal jet grout uygulamasının zemin rijitliğini arttırarak sismik yükler altındaki düşey yer değiştirmeleri etkin biçimde sınırladığı görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 12 m × 12 m boyutlarında at nalı kesitli bir tünelin NATM yöntemi ile üç aşamada (üst yarı, alt yarı ve taban) kazılarak inşası, üç farklı zemin profili (vaka) üzerinden Plaxis 2D ile modellenmiş ve analiz edilmiştir. Her aşamada uygun geçici destekleme sistemleri (H profil ve püskürtme beton-Q221 hasır çelik) uygulanmış; Vaka 3'te alt yarıda yetersiz destek sebebiyle kaplama kalınlığı artırılmıştır. Tünel kazısından önce su seviyesi düşürülerek kazı güvenliği sağlanmıştır. Analizlerde “Ko prosedürü”, “Steady-State” yeraltı suyu akışı ve “Hardening Soil” modeli kullanılarak daha gerçekçi deformasyon (düşey yer değiştirme) sonuçları elde edilmiştir. Tünel çevresine yerleştirilen referans noktaları (A–G) aracılığıyla her aşamada sadece düşey yer değiştirme takibi yapılmıştır. Üç farklı iyileştirme senaryosu değerlendirilmiştir: iyileştirmesiz durum (ilk hal), jet grout uygulaması (alansal) ve jet grout (alansal) + ankraj (tünel hattı üstü) kombinasyonu. Statik açıdan en uygun iyileştirme yöntemi belirlendikten sonra, Loma Prieta 1989 Mw 6,93 büyüklüğünde deprem senaryosu ile dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.1. Vaka 1, Vaka 2, Vaka 3 için Plaxis 2D ile gerçekleştirilen analiz sonuçları

Vaka Adı	Tünel Hattında Seçilen Bölge	Tünel Etrafında Seçilen Referans Nokta	İlk hal (zemin iyileştirme olmaksızın) (mm)	Düşey Yer Değiştirme		
				Statik Durum Alansal jet grout uygulaması (mm)	Alansal jet grout uygulaması ardından ankraj uygulaması (mm)	Dinamik Durum Alansal jet grout uygulaması (mm)
Vaka 1	Üst Yarı	A-B-C	104	67	68	28
	Alt Yan	D-E	294	9	9	31
	Taban	F-G	9	5	5	14
Vaka 2	Üst Yarı	A-B-C	68	49	50	20
	Alt Yan	D-E	483	7	8	13
	Taban	F-G	6	5	5	6
Vaka 3	Üst Yarı	A-B-C	252	56	51	39
	Alt Yan	D-E	68	4	5	34
	Taban	F-G	1	6	6	30

Tablo 7.1’de görüldüğü üzere;

- Plaxis 2D ile elde yapılan analizlerde sadece kazı ve destekleme sistemi kurulduğu aşamalardaki düşey yer değiştirme değerleri okunmuştur.
- Vaka 1, Vaka 2 ve Vaka 3’te, tüneli çevreleyen ve yaklaşık 40-50 m kalınlığında zayıf mühendislik özelliklerine sahip gevşek ve yumuşak zemin tabakalarının varlığı nedeniyle, tünel kazısı sırasında önemli düzeyde düşey deformasyonlar gözlemlenmiştir. İlk olarak, yalnızca kazı ve geçici destekleme

elemanları etkisiyle oluşan deformasyonlar değerlendirilmiş; zemin iyileştirmesiz durumda deformasyonların yüksek seviyelere ulaştığı tespit edilmiştir.

- Alansal jet grout uygulaması ile özellikle alt yarıda oluşan deformasyon değerleri azalmıştır.
- Alansal jet grout ardından tünel hattı üstü ankraj uygulaması ile özellikle düşey deformasyon değerlerinde etkili bir değişim olmadığı görülmüştür. Yapıya entegre edilen ankraj sisteminin, ek ölü yük oluşturma ihtimali ile taşıyıcı sistem üzerindeki yüklemeyi artırabilir ve bu durum yapısal verimliliği olumsuz etkileyebilir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, statik analizler kapsamında ankraj uygulamasının sistem performansına anlamlı bir katkı sağlamadığı, hatta yapısal etkinliği azaltabileceği sonucuna varılmış; bu nedenle statik durumda ankraj kullanılmaması gerektiği değerlendirilmiştir.
- Mw: 6,93 büyüklüğündeki Loma Prieta depremi ile yapılan dinamik analizde göçme olmadığı için 5 ve 6 deprem büyüklüğündeki depremler için ayrıca analiz gerçekleştirilmemiştir.

KAYNAKÇA

- Abdelhamid, M., Ali, N., and Abdelaziz, T. (2023) A Literature Review of Factors Affecting the Behavior of Encased Stone Columns. *Geotechnical and Geological Engineering*, Volume 41, Page 3253-3288.
- Al-Khadaar, R.M. and Ahmed, M.D. (2023). Review of Jet Grouting Practice around the World. *Journal of Engineering*, Volume 29, No. 7.
- Bao, X., Jin, Z., Cui, H., Chen, X., Xie, X. (2019). Soil liquefaction mitigation in geotechnical engineering: An overview of recently developed methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Volume 120, Pages 273-291.
- Barley, T. and Mothersille D. (2007). Engineering assessment of the grease-filled annulus of sheathed prestressing strand for use in permanent ground anchorages. *ICE International Conference on Ground Anchors and Anchored Structures*, London, UK, November 26-27, 1-10
- Behnen, G., Nevrlý, T. and Fischer, O. (2015). Soil-structure interaction in tunnel lining analyses. *Geotechnik*, Volume 38, Issue 2 pp. 96-106.
- Bentley Systems. (2020). *PLAXIS 2D Reference Manual*.
- Bešinović, N. (2020). Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda. *Transport Reviews*, Volume 40, Issue 4, Pages 457-478.
- Bickel, J.O., Kuesel, T.R. and King, E.H. (1996). *Tunnel Engineering Handbook*. Second Edition.
- Canto-Perello, J. and Curiel-Esparza, J. (2006). An analysis of utility tunnel viability in urban areas. *Civil Engineering and Environmental Systems*, Volume 23, Issue 1.
- Chapman, D.N., Metje, N. and Stark, A. (2017). *Introduction to Tunnel Construction*. 2nd edition. CRC Press.
- Croce, P., Flora, A. and Modoni G. (2014). *Jet Grouting Technology, Design and Control*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Dasari, G.R., Rawlings, C.G. and Bolton M.D. (1996). Numerical modelling of a NATM tunnel construction in London Clay. *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, 491-496.
- Dawson, R.F., Morgenstern, N.R. and Stokes, A.W. (1998). Liquefaction flowslides in RockyMountain coal mine waste dumps. *Can. Geotech. J.* 35 (2), 328–343.
- Diamantidis, D., Zuccarelli, F. Westhäuser, A. (2000). Safety of long railway tunnels. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 67, Issue 2, February 2000, Pages 135-145.

- Durgunoğlu, H. T. (2004). Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı, *TMH- Türkiye Mühendislik Haberleri* Sayı 431, 3.
- Düzgün, M. (2001). Elastik Zemin Oturan Sürekli Temellerin Kuvvet Yöntemi İle Analizi ve Sayısal Hesabı İçin Geliştirilen Bilgisayar Programı, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(3), 33-50.
- Edil, T.B. (2003). Recent advances in geotechnical characterization and construction over peat and organic soils. *Proceedings 2nd International Conference on Advances in Soft Soil Engineering and Technology*. Putrajaya, Malaysia, p. 3–25.
- Elton, D.J. and Whitbeck J.E. (1997). Tieback wall design and construction. *Final Report to Alabama Highway Research Center*, September 24, 1-4
- Fang, W., Wu, J., Bai, Y., Zhang, L., Reniers, G. (2019). Quantitative risk assessment of a natural gas pipeline in an underground utility tunnel. *Process Safety Progress*, Volume 38, Issue 4 e12051.
- Gupta, T., Singh, T.N. and Verma, D. (2019). Dump slope stability. In: *Landslides: Theory, Practice and Modelling*. Springer, Cham, pp. 21–40.
- Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. (1973). *Soil Stabilization*. John Wiley and Sons, New York.
- Karakuş, M. and Fowell, R.J. (2004). An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). *KAYAMEK'2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu / ROCKMEK'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas, Türkiye*.
- Kavvadas, M.J. (2005). Monitoring ground deformation in tunnelling: Current practice in transportation tunnels. *Engineering Geology*, Volume 79, Issues 1–2, Pages 93-113.
- Kazemain, S. and Barghchi, M. (2012). Review of soft soils stabilization by grouting and injection methods with different chemical binders. *Scientific Research and Essays*, Vol. 7 (24), pp. 2104-2111.
- Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series.
- Masini, L., Bergamo, F. and Rampello, S. (2025). Effect of soil improvement on ground movements induced by conventional tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 155, Part 1, 106163.
- Mishra, B. (2016). A Study on Ground Improvement Techniques and Its Applications A Study on Ground Improvement Techniques and Its Applications. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*., Vol. 5, Issue 1.
- Njock, P.G.A., Chen, J., Modoni, G., Arulrajah, A., Kim, Y.H. (2018). A review of jet grouting practice and development. *Arabian Journal of Geosciences*, 11 (16), 459.

- Phadke, V. and Titirmare, N. (2017). Construction of tunnels, by new austrian tunnelling method (natm) and by tunnel boring machine (tbm). *International Journal of Civil Engineering*, 6 (6), 25-36.
- Pichler, C., Lacker, R., Martak, L., Mang. H.A. (2004). Optimization of jet-grouted support in NATM tunnelling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28 (7-8), 781-796.
- Pradhan, B. and Tiwari, S.K. (2024). Granular Pile Settlement Prediction on Varying Soil Strata: FEM Approach. *Transportain Infrastructure Geotechnology*, 11, 4161-4186.
- Pujades, E., Jing, M., Lu, C., Jurado, A. (2023). *Tunnel Engineering- Modelling, Construction and Monitoring Techniques*. Chapter-Underground Excavations Below the Water Table by the Cut-and-Cover Method. IntechOpen. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.109752>
- Qian, H., Zong, Z., Wu, C., Li, J., Gan, L. (2021). Numerical study on the behavior of utility tunnel subjected to ground surface explosion. *Thin-Walled Structures*, Volume 161, April 2021, 107422.
- Raison, C.A. (2004). *Ground improvement method*. Thomas Telford, 1 Heron Quay, London. ISBN: 0 72773170.
- Rawlings, C.G., Hellawell, E.E., Kilkenny, W.M. (2000). *Grouting for ground engineering*. CIRIA C 514, ISBN 0 86017 514 6.
- Sabatini, P.J., Pass, D.G. and Bachus, R.C. (1999). *Geotechnical Engineering Circular No.4 Ground Anchors and Anchored Systems*. Office of Bridge Technology, Federeal Highway Administration.
- Sadikon, S.F., Eshri, N.A. and Idrus, J. (2024). A study on the Potential of Sand Liquefaction Hazard at Chukai Sentral, Terengganu Using Plaxis 2D. *Jurnal Kejuruteraan*, 36 (1): 29-36.
- Shakya, S., Hontani, Y., Chao, K.C., Inazumi, S. (2025). Comprehensive Guidelines for Numerical Simulation of Jet Grouting Technology Using MPS-CAE. *Geosciences* 15,36.
- Sharma, A.K. (2021). Tunnel boring machine (tbm)-an integrated mechanized method. iarjset, *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, Vol. 8, Issue 3.
- Strom, R.W. and Ebeling R.M. (2001). State of the practice in the design of tall, stiff, and flexible tieback retaining walls. *Innovations for Navigation Projects Research Program*, Us Army Corps of Engineers-Engineer Research and Development Center, December, 1-4

- Thuro, K. and Plinninger, R.J. (2003). Hard Rock Tunnel Boring, Cutting, Drilling And Blasting: Rock Parameters For Excavatability, *10th ISRM Congress*, South Africa.
- Tonon, F. (2010). Sequential excavation, NATM and ADECO: What they have in common and how they differ. *Technology*, Volume 25, Issue 3, Pages 245-265.
- Tyagi, A. (2025). Tunnelling and Underground Construction in Soils: Challenges and Design Framework for Ground Improvement. *Indian Geotechnical Journal*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40098-025-01345-w> (Erişim Tarihi: 10.06.2025)
- Wang, S., Fu, J., Zhang, C. and Yang, J. (2021). Shield Tunnel Engineering *From Theory to Practice*. ISBN: 978-0-12-823992-6.
- Wang, Z.F., Shen, S.L., Ho, C.E., Kim, Y.H. (2013). Jet Grouting Practice: an Overview. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol. 44 No 4 ISSN 0046-5828.
- Xanthakos P. (1991). *Ground Anchors and Anchored Structures* John Wiley & Sons, INC. Canada., 1-44.
- Yao, Y., Shi, X. and Han, D. (2024). Lateral Effects of Jet Grouting on Surrounding Soil and Circular Diaphragm Walls. *Structure*. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/11/3587> (Erişim Tarihi: 10.06.2025)
- Yeo, C.H., Lee, F.H., Tan, S.C., Hasegawa, O., Suzuki, H., Shinji, M. (2009). Three dimensional numerical modelling of a NATM tunnel. *International Journal of the JCRM*, vol.5, pp.33-38.
- Yun, B. (2019). *Underground Engineering: Planning, Design, Construction and Operation of the Underground Space*. Academic Press. Pages 117-204.
- Zare, S. and Bruland, A. (2007). Progress of drill and blast tunnelling efficiency with relation to excavation time and costs. *Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises*. ISBN 978-0-415-40807-3.
- Zhang, Y., Zhou, J., Qiu, Y., Armaghani, D.J., Xie, Q., Yang, P., Xu, C. (2024). A Visual Survey of Tunnel Boring Machine (TBM) Performance in Tunneling Excavation: Mainstream Direction, Brief Review and Future Prospects. *Appl. Sci.*, 14(11), 4512. http-1:https://www.arpnjournals.com/jes/research_papers/rp_2012/jes_1112_07.pdf (Erişim Tarihi :20.07.2025)
- http-2: https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_11484/objava_74467/fajlovi/02_cut_cover_technique.pdf (Erişim Tarihi: 26.07.2025)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO : 0009-0007-0511-7805

Adı Soyadı : Betül KAMA

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Geçmişi:

- 2022-2025, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans,
- 2014-2019, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans,
- 2010-2014, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Lisans (Çevre Mühendisliği Bölümü üzerinden Çift Anadal Programı ile başvuruldu.),
- 2008-2013, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Lisans.

Mesleki Geçmişi:

- 11/2024-05/2025, İnşaat Mühendisi, Unitek-Tümaş İş Ortaklığı, Sapanca-Geyve Arası Yüksek Hızlı Tren Projesi Müşavirlik ve Kontrollük Hizmetleri, İnşaat Mühendisi (Sapanca/Sakarya),
- 11/2021-03/2022, Geoteknik Mühendisi, KMG Proje Mühendislik, Müşavirlik, Bilişim Teknolojileri LTD. ŞTİ. (Çankaya/Ankara),
- 03/2021-08/2021, Gönüllü Stajyer Geoteknik Mühendisi, Dünya Zemin (Şişli/İstanbul),
- 10/2020-01/2021, Gönüllü Stajyer Geoteknik Mühendisi, A.R.K Zemin Analiz Mühendislik LTD. ŞTİ. (Nilüfer/Bursa).

-

Kuruluş Üyelikleri:

- 2023, Zemin Mekaniği Geoteknik Mühendisliği,
- 2022, İnşaat Mühendisleri Odası, Sakarya.