



**SEDİMENTER KAYAÇ ORTAMINDA İNŞA
EDİLMESİ PLANLANAN KARAYOLU
TÜNELİNİN SAYISAL MODELLEMESİ**

Neşe IŞIK

Doktora Tezi

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU**

2020

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SEDİMENTER KAYAÇ ORTAMINDA İNŞA EDİLMESİ PLANLANAN KARAYOLU
TÜNELİNİN SAYISAL MODELLEMESİ**

(Numerical Modeling of the Highway Tunnel Planned to Be Built in Sedimentary Rock
Environment)

DOKTORA TEZİ

Neşe IŞIK

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

Erzurum
Aralık, 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Neşe IŞIK tarafından hazırlanan “SEDİMENTER KAYAÇ ORTAMINDA İNŞA EDİLMESİ PLANLANAN KARAYOLU TÜNELİNİN SAYISAL MODELLEMESİ” başlıklı çalışması .. / .. / 20.. tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA <i>T.C. Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	
Danışman:	Prof.Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU <i>T.C. Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Sadri ŞEN <i>T.C. Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Semet ÇELİK <i>T.C. Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Prof.Dr. Murat OLGUN <i>T.C. Konya Teknik Üniversitesi</i>	

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Unvan Ad SOYAD

Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAİMOĞLU* danışmanlığında sunulan “Sedimenter Kayaç Ortamında İnşa Edilmesi Planlanan Karayolu Tünelinin Sayısal Modellemesi ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	10	30
Kuramsal Temeller	8	30
Materyal ve Yöntem	11	35
Bulgular	0	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	14	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Neşe IŞIK	Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAİMOĞLU
18.1.2021	18.1.2021
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIÑOĞLU 'na içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmasındaki arazi ve laboratuvar çalışmaları konusunda Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı ve Karayolları 18. Bölge Müdürlüğü tarafından desteklenmiştir.

Her zaman ve her konuda beni asla yalnız bırakmayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme ve değerli arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Neşe IŞIK



ÖZET

DOKTORA TEZİ

ZEMİN VE KAYA ORTAMINDA AÇILACAK OLAN TÜNELLERDE DESTEK SİSTEMLERİNİN PROJE VE YAPIM AŞAMASINDA İNCELENMESİ

Neşe IŞIK

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAİMOĞLU

Amaç: Tünellerin tasarımı farklı ampirik ve sayısal yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Tünel kazısına ait ortamın mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde, malzemelerin göçme kriterlerinin seçilmesinde ve sayısal modellemenin yapılmasında uygun olmayan seçimlerden dolayı öngörülen deplasman değerleri uygulamada sağlanamayabilir. Bu durum, tünel tasarımında ya yüksek güvenlik katsayısının kullanılarak ekonomik olmayan tasarımlara ya da gerekli destek elemanlarından daha az eleman ile kazı ortamının desteklenmesi sonucunda tünel kesitinde yakınsama hatta göçmeye neden olmaktadır. Bu olumsuzlukların önlenmesi amacıyla tünel tasarımında optimum modelleme çalışmalarının yapılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Tez çalışmasında, sedimenter kayaç ortamında açılması planlanan karayolu tüneli için sonlu elemanlar yöntemi ile analizler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla tünelin açılacağı ortamın mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde literatür, arazi ve laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen nitel ve nicel veriler sayısal modelleme çalışmalarında girdi parametresi ve uygun malzeme modelinin oluşturulması amacıyla kullanılmıştır. Tünel destek elemanlarının seçimlerinde farklı boyutlardaki elemanlar ve göçme kriterleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda uygun destek elemanlarının seçilmesi amacıyla çalışmalar yürütülmüştür.

Bulgular: Tez çalışması sonucunda, PG bulonu ile geçici invert uygulaması yapılmadan oluşturulan tünel kazısında birincil destek elemanlarında yenilmenin olduğu gözlemlenmiştir. Ancak ön yüklemeli IBO türü kaya bulonu ile yapay kemerlenmenin oluşturulması sağlanmıştır. Ayrıca tünelin açılacağı ortama ait malzemenin göçme kriterinin değişmesi ile bulon yük değeri daha düşük miktarda hesaplanmıştır.

Sonuç: Elde edilen bulgular çerçevesinde tünel inşaatının daha kısa bir sürede yapılabilmesi ve kazı sonrası gerilme koşullarının stabil kalması amacıyla tünel kazısı etrafında suni kemerlenme etkisi sağlanmıştır. Kazı ortamına ait malzemenin göçme kriterinin uygunluğunun arazi ölçümleri ile doğrulanması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sedimenter kayaç, karayolu tüneli, malzeme modellemesi, sayısal modelleme

Aralık 2020, 198 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

NUMERICAL MODELING OF THE HIGHWAY TUNNEL PLANNED TO BE BUILT IN SEDIMENTARY ROCK ENVIRONMENT

Neşe IŞIK

Supervisor: Prof. Dr.Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

Purpose: Tunnels are designed using different empirical and numerical methods. In determining the engineering properties of the tunnel excavation ground, selecting the failure criteria of materials, and making appropriate numerical modeling, the predicted displacement values may not be achieved in practice. This situation causes either uneconomical designs by using the high safety coefficient in tunnel design or convergence or even collapse in the tunnel section as a result of supporting the excavation ground with fewer elements than the required support elements. In order to prevent the mentioned unfavourableness, it is aimed to make optimum modeling studies in tunnel design.

Method: In this study, for a road tunnel planned to be opened in sedimentary ground, analyzes were carried out using the finite-element method. For this purpose, literature, field and laboratory studies have been carried out to determine the engineering properties of the ground where the tunnel will be opened for the aforementioned unsuitable choices. The qualitative and quantitative data obtained were used to create the input parameter and suitable material model for numerical modeling studies. In the selection of the tunnel support elements, analyzes were carried out for elements of different sizes and failure criteria. As a result of the analysis, it was managed to select the appropriate support elements.

Findings: As a result of the study, it was observed that the primary support elements were defeated in the tunnel excavation where temporary invert was not applied to the PG bolt. However, artificial arching was achieved with the preloaded IBO type rock bolt. In addition, with the change of the failure criteria of the material belonging to the environment where the tunnel will be opened, the bolt load value was calculated at a lower amount.

Results: Within the framework of the findings obtained, it has been determined that the artificial arching effect around the tunnel excavation is important in order to make the tunnel construction in a shorter time and to stabilize the post-excavation stress conditions. The compliance of the material belonging to the excavation environment with the failure criteria must be verified by field measurements.

Keywords: Sedimentary rock, highway tunnel, material modeling, numerical modelling

December 2020, 198 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
GİRİŞ.....	1
Amaç ve Kapsam	4
Kaynak Özetleri	4
KURAMSAL TEMELLER.....	17
Karayolu Tünelleri	17
Tünel Tasarımı ve Jeolojik Araştırmalarının Yapılmasının Amacı	19
Jeofizik Çalışmalar.....	20
Elektrik rezistivite	22
Sismik yöntemler	24
Kaya sondajı.....	28
Zemin sondajı.....	29
Tünel Tasarımında Genel Yaklaşımlar	29
Görgül tasarım yöntemleri	32
Tünel tasarımında sayısal modelleme	38
MİDAS GTS NX Yazılımı	41
Tünel Açılması Esnasında Karşılaşılan Olaylar.....	42
Jeolojik Yapının Gerilme Durumuna Etkisi.....	46
Denge Koşullarında Destek Sisteminin Etkisi	47
Malzeme Yapısal Modelleri.....	49
MATERYAL VE METOD	52
Materyal	52
Tünel Lokasyonuna Ait Jeolojik Oluşum	52
Kızıllar formasyonu	55
Yamaç molozu	56

Kaya tuzu – anhidrit birimi	56
Jeomorfoloji	57
Yapısal Jeoloji.....	57
Depremsellik	59
Hidrojeoloji	60
Metod	61
Jeofizik Çalışmalar.....	61
Elektrik özdirenç çalışması	61
Sismik çalışma	64
Sondaj ve Laboratuvar çalışmaları.....	66
Arazi Modellenmesi	70
Kaya Kütle Sınıflaması	70
Kiltaş birimi mühendislik özelliklerinin belirlenmesi	71
Kaya tuzu – anhidrit birimin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi	79
Yamaç molozu birimin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi.....	83
Yapısal Modellerin Belirlenmesi	85
Kazı Etki Alanı.....	89
Sınır Koşullarının Belirlenmesi (Ağ Boyutları).....	90
Analiz için Eleman Boyutları.....	91
K ₀ Değerinin Seçimi	92
Yük Dağıtma Faktörü.....	93
İmalat Aşamaları	95
Sayısal Modelleme	95
BULGULAR	99
İki Boyutlu Tek Tüp Analiz Çalışması	99
İki Boyutlu Çift Tüp Analiz Çalışması	113
TARTIŞMA.....	127
KAYNAKLAR	128
EKLER	134
EK-1. Karot Sandıkları.....	134
EK-2. Sondaj Logları	146
EK-3. Model Boyut Analizleri.....	164
ÖZGEÇMİŞ.....	178

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Tünel geometrisi	2
Tablo 2. Özetlenmiş jeofizik yöntemler	21
Tablo 3. Sedimenter kayaların elektrik rezistivite değeri.	24
Tablo 4. Tipik basınç dalgası (P) hızları (kayaların ve zeminlerin)	26
Tablo 5. Kaya sondaj çalışmalarında olması gereken bilgiler	29
Tablo 6. Zemin sondaj çalışmalarında olması gereken bilgiler	29
Tablo 7. Kaya kütle sınıflama sistemleri	32
Tablo 8. Terzaghi'nin kaya yükü teorisinin kaya sınıflamasının tanımı.	33
Tablo 9. RMR destek ölçüleri.....	35
Tablo 10. Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu kaya sınıflandırma sistemi	37
Tablo 11. Sondaj kuyularına ait yeraltı suyu seviyeleri).	61
Tablo 12. Yapılan elektrik öz direnç lokasyon koordinatları	62
Tablo 13. Giriş portalinde yapılan sismik lokasyon koordinatları.....	64
Tablo 14. Yamaç molozu birimine ait özellikler	66
Tablo 15. Laboratuvar deneyleri (kayalar ve zemin numuneleri için).....	66
Tablo 16. Zemin indeks özellikleri (SPT ile alınan örnekler)	67
Tablo 17. Elastisite modülü ve poisson oranı deney sonuçları	68
Tablo 18. Nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları (Kayaçalarda).....	69
Tablo 19. Kilitaşı RMR sınıflaması.	71
Tablo 20. Kaya kütlelerinin tasarım parametreleri ve mühendislik özellikleri	72
Tablo 21. Kilitaşı Q sınıflaması	72
Tablo 22. Kaya sınıflandırma sistemlerinin karşılaştırılması	73
Tablo 23. Farklı durumlar altında RMR ve Q sistemleri arasındaki korelasyonlar	74
Tablo 24. YATM teknik şartnamesi	75
Tablo 25. Kaya kütle sınıflaması ve kaya kütlelerinin özellikleri arasındaki direkt ilişkiler.....	76
Tablo 26. Kaya kütleleri için değişik özellikler için α_0 , α_{100} ve β değerleri	76
Tablo 27. Tablo 25' e göre hesaplanan kilitaşı Kütle Elastisite Modülü Değerleri (E_m).....	76
Tablo 28. Tablo 19'a göre hesaplanan Kaya kütlelerinin Dayanımı (σ_{cm}).....	77
Tablo 29. Tablo 19'a göre hesaplanan Kaya kütlelerinin Poisson oranı (ν_m)	77
Tablo 30. Kilit taşı için Roclab programı girdi ve çıktı değerleri (Roclab).....	79
Tablo 31. Tek eksenli basınç deneyi sonuçları	80
Tablo 32. Farklı gerilmeler altında numunelerin elastik parametreleri.	80
Tablo 33. Kaya tuzu – anhidrit için RMR değerlendirmesi.....	80

Tablo 34. Tablo 25' e göre hesaplanan kaya tuzu – anhidrit için Kütle Elastisite Modülü Değerleri (E_m).	81
Tablo 35. Tablo 25' e göre kaya tuzu – anhidrit için hesaplanan kaya kütlelerinin dayanımı (σ_{cm}).	81
Tablo 36. Tablo 25' e göre kaya tuzu – anhidrit için hesaplanan kaya kütlelerinin poisson oranı (ν_m).	81
Tablo 37. Kaya Tuzu - Anhidrit için Roclab programı girdi ve çıktı değerleri (Roclab)	83
Tablo 38. Zemin için değerlendirilen parametreler	83
Tablo 39. Zemin ve kayaç türü malzemelere ait mekanik özellikler.	85
Tablo 40. Püskürtme betona ait mekanik özellikler.	86
Tablo 41. Kaya bulonuna ait boyutsal ve mühendislik özellikleri	87
Tablo 42. İksa (IPN 300) imalatına ait boyutsal ve mekanik özellikler.	88
Tablo 43. Modellemede kullanılacak olan malzeme modellemeleri	89
Tablo 44. Tez çalışmasında kullanılan iki boyutlu model sınır boyutları.	91
Tablo 45. İki boyutlu modellerin zemin /kayaç tabakaları için eleman boyutları	92
Tablo 46. Yapısal elemanlar için parça sayısı	92
Tablo 47. Birinci modele ait yapısal elemanlara ait özellikler.	100
Tablo 48. Yapısal elemanlara ait özellikler (ikinci aşama).	104
Tablo 49. Üçüncü model tasarımına ait yapısal elemanlara ait özellikler.	106
Tablo 50. Dördüncü model tasarımına ait yapısal elemanlara ait özellikler.	110
Tablo 51. Altıncı model tasarımına ait yapısal elemanlara ait özellikler.	116
Tablo 52. Sekizinci model tasarımına ait yapısal elemanlara ait özellikler.	122
Tablo 53. İki boyutlu analiz sonuçları	125

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Proje güzergâhında tünelli geçişte uygulanacak tip kesit	3
Şekil 2. Tünel lokasyonu	3
Şekil 3. Güzergâha ait yer bulduru haritası	3
Şekil 4. Tünel güzergâhının araziye applike edilmiş görünümü	4
Şekil 5. Tünel kesitinin bölümleri	18
Şekil 6. Tünel ilerlemesinin boyuna kesiti	18
Şekil 7. PIARC (The Permanent International Association of Road Congresses)'a göre yol tünellerinin bölümleri	18
Şekil 8. Tünel tasarım prosedürü.....	19
Şekil 9. Arazi karakterizasyon programının aşamaları	20
Şekil 10. Elektrik direnç çalışmaları	22
Şekil 11. Homojen olmayan bir ortamda yapılan elektrik direnç çalışması için iki elektrot arasındaki akım geçişi ve eşpotansiyel yüzeyler	23
Şekil 12. Bilgisayar kontrollü çok elektrotlu görüntüleme sisteminden tipik elektriksel görüntü.....	23
Şekil 13. Zemin ve kaya türlerine ait tipik elektrik rezistivite aralıkları.....	23
Şekil 14. Elastik dalgaların yayılma yolları (a – direkt, b – yansıma, c - kırılma sığ yeraltı boyunca oluşan sismik dalgalar).....	25
Şekil 15. Tekli kanal kırılma sismografi ve metal plakaya balyozla vuran çalışan sismik dalgalarda üretmektedir.	27
Şekil 16. Dalgaformlarının sismogramları 25 ft aralıkta 300 lb ağırlıktaki düşüşle neden olan kayıtlardır.	27
Şekil 17. Görgül yöntemlerin akış şeması.....	31
Şekil 18. Tünel kaya yükü basitleştirilmiş diyagramı	33
Şekil 19. Q- destekleme abağı.....	36
Şekil 20. Tünel mühendisliği için sayısal yöntemler ve modeller	38
Şekil 21. Tünel mühendisliği için sonlu elemanlar yöntemi	39
Şekil 22. Elastik mesnetli giriş eleman modeli	41
Şekil 23. GTS NX programı sonlu eleman modelleri	42
Şekil 24. Gerilme dağılımı	42
Şekil 25. Kazının ilerlemesi ile meydana gelen ortamdaki örselenmesinin yayılımı	43
Şekil 26. Kazı aynasının oluşumu ve kazı duvarındaki gerilme değişimleri	44
Şekil 27. Tünel açıklığı etrafındaki kemerlenme etkisi.....	45

Şekil 28. Tünel ve göçük profili	46
Şekil 29. Kıvrım eksenini ile tabaka doğrultusunun dik olması hali. $P_1 < P_3 < P_2$: Tünele etkiyen basınçlar.	46
Şekil 30. Tünel ve kıvrım eksenlerinin birbirine dik olmaları halinde, yeraltı su seviyesi, gerilme dağılımı ve çatlakların durumu. A-Antiklinal, B-Senklinal	47
Şekil 31. Tünel eksenini ile kıvrım eksenine paralel olması, a-Kanatta, b, c- eksen üzerinde açılan tüneller	47
Şekil 32. Tüneldeki gerilme durumları	48
Şekil 33. Efektif gerilme bölgesinde Mohr – Coulomb dayanımı (a. üç eksenli basınç altında kayma yenilmesi düzlemi ve kayma düzlemi b. Mohr daireleri ve dayanım kriteri)	50
Şekil 34. Tünel ekseninin geçirileceği bölgeye ait yüzey görüntüsü	52
Şekil 35. Proje alanı ve yakın çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti	53
Şekil 36. Tünel güzergâhı ve çevresinin genel jeoloji haritası.....	54
Şekil 37. Kızıllar Formasyonu ve Kağızman Volkanitlerinden görünüm.....	54
Şekil 38. Kızıllar formasyonu	55
Şekil 39. Yamaç Molozu.....	56
Şekil 40. Kızıllar Formasyonunda gözlemlenen tabakalanma ve kıvrımlanmanın görünümü.....	57
Şekil 41. Kağızman yöresinde gözlenen antiklinal, senklinal, birimlerin D/E değerini ve uyumsuzlukları gösteren jeolojik harita	58
Şekil 42. Heyelan haritası ve tünel lokasyonu	58
Şekil 43. Aktif heyelana ait arazi görseli	59
Şekil 44. Türkiye Deprem Tehlike Haritası.	59
Şekil 45. MTA fay haritası ve Koçyiğit (2013)’e göre değerlendirilen tünel lokasyonu ve fayların konumları.	60
Şekil 46. Elektrik öz direnç ölçüm ekipmanı	62
Şekil 47. Elektrik öz direnç ölçümü arazi çalışması	62
Şekil 48. Elektrik öz direnç ve sondaj çalışmalarına ait kmz görüntü	62
Şekil 49. Tünel aksına paralel olarak yapılan elektrik resistivite ölçümleri	63
Şekil 50. İki boyutlu profil model (çalışma alanı)	64
Şekil 51. Sismik ölçüm arazi çalışması	65
Şekil 52. Arazi sondaj çalışması.....	66
Şekil 53. Kıl taşı GSI değerinin seçilmesi (Roclab).....	77
Şekil 54. Kıl taşı m_i değerinin seçilmesi (Roclab).	78

Şekil 55. Kıltaşı için asal gerilmeler ve normal gerilme - kayma gerilmesi eğrileri.....	78
Şekil 56. Kaya tuzu – Anhidrit için GSI değerinin seçilmesi	81
Şekil 57. Kaya tuzu – Anhidrit m_i değerinin seçilmesi	82
Şekil 58. Kaya Tuzu -anhidrit için GSI ve Hoek & Brown Görgül Yenilme Özellikleri	82
Şekil 59. Plastisite indeksi - f_1 ilişkisi	84
Şekil 60. Plastisite indeksi – içsel sürtünme açısı değerleri	84
Şekil 61. C20/25 sınıfındaki püskürtme betonun basınç dayanım gelişim hızı	85
Şekil 62. Kaya yenilmesinin farklı durumları için bulonlama prensipleri (a) sınırlı yenilme zonu için (b) büyük yenilme zonu için	86
Şekil 63. Çeliğin gerilme - birim deformasyon ilişkisi.	88
Şekil 64. Mohr-Coulomb modeli malzeme davranışı	89
Şekil 65. Çift tüp kazı etki zonu	90
Şekil 66. Notasyonların şekil üzerinde gösterimi.....	91
Şekil 67. Farklı Ko Değerleri için tünel ekseninde gerçekleşen oturma değerleri.....	93
Şekil 68. Farklı Ko değerleri için yerdeğiştirmeler	93
Şekil 69. Bir tünel etrafında kayadaki ana gerilmelerin dağılımı.....	94
Şekil 70. Farklı yük dağılım oranı altında tünel yükü.	95
Şekil 71. Geleneksel tünelleme için adım adım yapım metodu.....	95
Şekil 72. Tünel kesitlerine ait geometri	96
Şekil 73. Malzeme parametrelerinin atanması	97
Şekil 74. Modele ait ağ yapısı.	97
Şekil 75. Modele ait yapım aşamaları	98
Şekil 76. Tek tüp tünel ağ yapısı genel görünümü (2B).....	99
Şekil 77. Tek tüp tünel birincil destek elemanları (sırasıyla püskürtme beton, önyüklemeli kaya bulonları ve iksa elemanı, 2B)	99
Şekil 78. Tek tüp tünel kazı aşamaları (2B)	100
Şekil 79. Toplam maksimum ve minimum deplasman değerleri (birinci aşama).....	100
Şekil 80. Bulon yükleri (birinci aşama).....	101
Şekil 81. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (birinci aşama).....	102
Şekil 82. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (birinci aşama).....	102
Şekil 83. Toplam minimum ve maksimum iksa elemanı deplasman değerleri (birinci aşama).....	102
Şekil 84. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (birinci aşama).....	103

Şekil 85. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanında oluşan deplasmanlar (birinci aşama)	103
Şekil 86. Sistemin yenilme şekli (birinci aşama)	103
Şekil 87. İkinci model toplam maksimum ve minimum deplasman	104
Şekil 88. Bulon yükleri (ikinci aşama)	105
Şekil 89. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (ikinci aşama)	105
Şekil 90. Toplam minimum ve maksimum iksa eleman yükleri (ikinci aşama)	105
Şekil 91. Toplam minimum ve maksimum iksa deplasman değerleri (ikinci aşama)	106
Şekil 92. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (ikinci aşama)	106
Şekil 93. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (ikinci aşama)	106
Şekil 94. Toplam maksimum ve minimum deplasman değerleri (üçüncü aşama)	107
Şekil 95. Bulon yükleri (üçüncü aşama)	108
Şekil 96. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (üçüncü aşama)	108
Şekil 97. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (üçüncü aşama)	108
Şekil 98. Toplam minimumve maksimum iksa elemanı deplasman değerleri (üçüncü aşama)	109
Şekil 99. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (üçüncü aşama)	109
Şekil 100. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (üçüncü aşama)	109
Şekil 101. Toplam maksimum ve minimum deplasman (dördüncü aşama)	110
Şekil 102. Bulon yükleri (dördüncü aşama)	111
Şekil 103. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (dördüncü aşama)	111
Şekil 104. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (dördüncü aşama)	111
Şekil 105. Toplam minimumve maksimum iksa elemanı deplasman değerleri (dördüncü aşama)	112
Şekil 106. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (dördüncü aşama)	112
Şekil 107. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (dördüncü aşama)	112
Şekil 108. 2B analiz çift tüp tünel için ağ yapısı genel görünümü	113
Şekil 109. Toplam maksimum ve minimum deplasman (beşinci aşama)	114

Şekil 110. Bulon yükleri (beşinci aşama).....	115
Şekil 111. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (Beşinci aşama)	115
Şekil 112. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (beşinci aşama).....	115
Şekil 113. Toplam minimumve maksimum iksa elemanı deplasman değerleri (beşinci aşama).....	115
Şekil 114. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (beşinci aşama).....	116
Şekil 115. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (beşinci aşama)	116
Şekil 116. Toplam maksimum ve minimum deplasman (altıncı aşama)	117
Şekil 117. Bulon yükleri (altıncı aşama)	117
Şekil 118. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (altıncı aşama)	118
Şekil 119. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (altıncı aşama)	118
Şekil 120. Toplam minimumve maksimum iksa elemanı deplasman değerleri (altıncı aşama).....	118
Şekil 121. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (altıncı aşama).....	118
Şekil 122. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (altıncı aşama)	119
Şekil 123. Toplam maksimum ve minimum deplasman (yedinci aşama).....	119
Şekil 124. Bulon yükleri (yedinci aşama)	120
Şekil 125. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (yedinci aşama)	120
Şekil 126. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (yedinci aşama)	121
Şekil 127. Toplam minimumve maksimum iksa eleman deplasman değerleri (yedinci aşama).....	121
Şekil 128. Toplam minimumve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (yedinci aşama).....	121
Şekil 129. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (yedinci aşama).....	121
Şekil 130. Toplam maksimum ve minimum deplasman (sekizinci aşama)	122
Şekil 131. Bulon yükleri (sekizinci aşama).....	123
Şekil 132. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (sekizinci aşama)..	123
Şekil 133. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (sekizinci aşama).....	124
Şekil 134. Toplam minimumve maksimum iksa eleman deplasman değerleri (sekizinci aşama).....	124

Şekil 135. Toplam minimumve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (sekizinci aşama).....	124
Şekil 136. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (sekizinci aşama)	124
Şekil 137. Farklı birim şekil değiştirme değerleri ile tünellerde meydana gelebilecek sorunların değerlendirilmesi	126



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Kesit Alanı (cm ²)
a	: İvme (m/s ²)
AEM	: Ayrık Elemanlar Metodu
B	: Tünel çapı (m)
c _u	: Drenajsız kayma dayanımı
c'	: Drenajlı kayma dayanımı
CH	: Yüksek plastisiteli kil
c _i	: İntakt kayanın kohezyon değeri
c _M	: Kütle kohezyon değeri
d	: Numune Çapı (mm)
D/E	: Doğrultu/eğim
D _E	: Kazı etki mesafesi (m)
D _f	: Tünel kazı çevresi örselenme faktörü
DP	: Drucker – Prager
E	: Elastisite modülü(MPa)
E _i	: Kaya numunesi elastisite modülü
E _M	: Kütle Elastisite Modülü
E _{rt}	: Elektrik rezistivite hattı
F	: Boyut düzeltme Faktörü
f ₁	: Katsayı
F	: Tünel altı derinlik
G	: Kayma modülü(MPa)
GSI	: Jeolojik dayanım indeksi
H	: Örtü yükü (m)
HB	: Hoek – Brown
Is (50)	: Nokta yük dayanımı (MPa)
Is	: Nokta yük dayanımı için katsayı (MPa)
J _a	: Ekleme alterasyon sayısı
J _n	: Ekleme set sayısı
J _r	: Ekleme pürüzlülük sayısı
J _w	: Ekleme su azaltma sayısı
K _o	: Sukunetteki ortam basıncıL : Boy
LL	: Likit limit

L_R	: Round uzunluğu
MC	: Mohr – Coulomb
ml	: Üst Miyosen
of	: Mesozoik
P	: Yenilme Yüğü (kg)
PI	: Plastite indeksi
PL	: Plastik limit
Q(b)	: Kuvaterner
qu	: Tek eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
r	: Kazı etki alanı yarıçapı
RMR	: Kaya kalite oranı
RQD	: Kaya kalite derecesi
R_t	: Tünel yarıçapı
R_y	: Yenilme zonu yarıçapı
SEM	: Sonlu elemanlar metodu için
SEY	: Sınır Eleman Yöntemi
SK	: Sondaj kuyusu
SPT-N	: Standart penetrasyon deneyi darbe sayısı
SRF	: Gerilme azaltma faktörü
Tk	: Kızıllar Formasyonu
Tv	: Kağızman Volkanitleri
V_p	: P dalgası hızı (m/sn)
V_s	: S dalgası hızı (m/sn)
wn	: Doğal su muhtevası
YASS	: Yeraltı suyu seviyesi (m)
YATM	: Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu
$\alpha_0, \alpha_{100}, \beta$	: Kaya kütlesi için değişik özellikleri için değişik katsayılar
γ	: Birim hacim ağırlık (kN/m ³)
Δd	: Çaptaki değişim miktarı (mm)
Δl	: Kayaç numunesi boy değiştirme miktarı (mm)
ϵ_a	: Eksenel Birim şekil değiştirme
ϵ_d	: Yanal birim şekil değiştirme
ν	: Poisson oranı
σ	: Normal gerilme (MPa)
σ_1	: Düşey gerilme

σ_3	: Yatay gerilme
σ_i	: İntakt kayanın tek eksenli dayanımı
σ_M	: Kütle tek eksenli dayanımı
σ_{SM}	: Kütle çekme dayanımı
τ	: Kayma dayanımı (MPa)
ν_i	: İntakt kayanın poisson oranı
ν_M	: Kütle poisson oranı
Φ	: İçsel sürtünme açısı (°)
φ_i	: İntakt kayanın içsel sürtünme açısı
φ_M	: Kütle içsel sürtünme açısı



GİRİŞ

Tünellerin gerekliliği ve getirdikleri faydalar tahmin edilemeyecek kadar fazladır. Tüneller yol standartlarını arttırmakta ve yol hatlarının kısalmasını sağlamaktadırlar. Trafiğin yeraltında hareket etmesine, yaşam kalitesinin yerin üstünde iyileşmesine ve muazzam bir ekonomik etkiye sahip olunabilmesini sağlayabilir. Sınırlı alan, güvenli çalışma, çevre koruma ve enerji tasarrufu açısından depolama, enerji ve su arıtma tesisleri, sivil savunma ve diğer faaliyetler için yeraltının kullanılması genellikle bir zorunluluktur. Tünellerin inşaatı genellikle riskli ve pahalı olup yüksek düzeyde teknik beceri gerektirmektedir (Kolymbas 2005).

Tünel inşaatı, etüt aşaması, zemin/kaya koşulları ve farklı tünel kesitlerinin oluşturulması temelinde birçok karışıklığa sahiptir. Doğal gerilmelerin etkisi altında bulunan bu ortamlarda yapılan kazılar sonucunda, doğal gerilmeler yön, şiddet ve yer değiştirerek yeni gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu gerilmelerin etkisi ile tünel duvar, taban ve tavanlarında kaya fırlaması, patlaması ve kapak atmalar daha çok sert ve sağlam kayalarda meydana gelirken, şişme ve kabarma türü olaylar ise daha çok ayrışmış ve yumuşak kayalarda oluşmaktadır (Tarhan 2002). Ayrıca kazı çevresinde, kazılan kaya tarafından taşınan yüklerin kazı açıklığının etrafına iletilmesi veya kemerlenme etkisi ile kazı hattı çevresinde yeni bir dağılım oluşmaktadır. Birçok durumda, kazı hattının çevresindeki ortam mukavemeti bu değişikliklere dayanmak için yetersiz olabilmekte ve duvarların aşırı deformasyonu veya çökmesi ile sonuçlanmaktadır (Türkoğlu 2013). Bu durum değerlendirildiğinde zayıf/yumuşak kaya kütlelerinin davranışı tünelin yapımı ve kullanımı süresince önemli bir etken olmaktadır. Zayıf kaya kütlelerinde tünel kazısı, kaya kütleindeki doğal gerilmeleri bozar ve sonuç olarak tünel duvarında kapanmaya neden olan deformasyona ve destek sistemi üzerine ortam basıncının artmasına neden olur. Gerilme değişiminin bu süreci yapılan imalatın kaybına ve iş kazalarına sebep olabilecek duraysızlıklara yol açabilir. Genel olarak mühendislik amacıyla kaya davranışını karakterize etmek için, elastik ve elasto-plastik modeller kullanılmaktadır (Roy et al. 2015).

Aktaş (2009) tarafından yapılan çalışmaya göre örtü kalınlığı 15 m' ye kadar olan tüneller sığ, 45 m' ye kadar olan orta ve 65 m' ye kadar olan tüneller ise derin tüneller olarak sınıflandırılmıştır. Üçer (2006)'ya göre tünel tasarımında düzlem gerilme ya da eksenel simetri yaklaşımları çoğu durumda yeterli olmadığı bunun yerine 3 boyutlu modeller aracılığı ile analiz edilmesinin daha uygun olduğu belirtilmektedir. Bundan dolayı karışık bir jeolojik yapıya sahip

olan ortamlarda açılacak olan derin tünellerde hesaplanan deplasmanların gerçeği yansıtabilmesi için üç boyutlu tasarımın yapılması önem arz etmektedir.

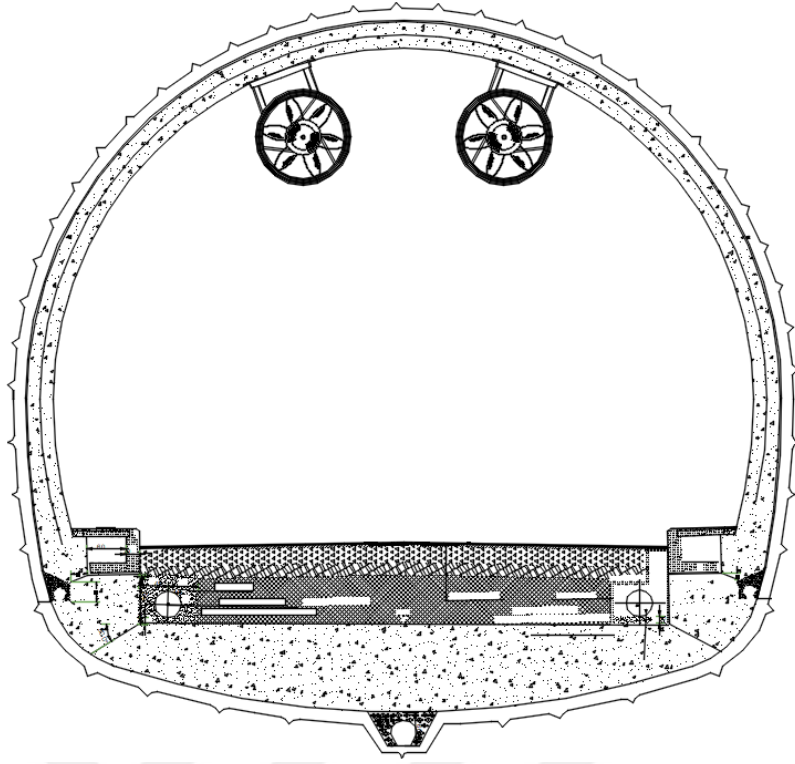
Tünelin etrafını çevreleyen kaya/zemin ortamının basınç dayanımı, kayma dayanımı, elastisite modülü gibi mekanik parametrelerin belirlenmesinde arazi ve laboratuvar ortamında yeterince çalışmanın yapılmasının mümkün olduğu durumda, tünel ortamı ile ilgili hesaplamalar bazı kabullere dayalı olarak yapılabilmektedir. Bu kabuller, destek sistemlerinin gereğinden fazla seçilmesine neden olabileceği gibi, bazen yetersiz desteklemelere de neden olabilmektedir.

Bu amaçla tez çalışmasında tünelin inşa edileceği ortama ait mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesinde basınç dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı vb. parametrelerinin belirlenmesi amacıyla tünel aksı boyunca sondaj, jeofizik çalışmalar ve laboratuvar deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar gerçek ortam şartları oluşturulması amaçlanarak tasarım yapılmaya çalışılmıştır.

Çalışma konusu olarak T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolları 18. Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde bulunan Kağızman – (Digor – Tuzluca) Ayrım Yolu Km: 23+020 – 23+940 arasında inşa edilmesi planlanan karayolu tüneli seçilmiştir. Çift Tüp olarak planlanan tünelin uzunluğu 920 metredir. Projenin geometrik özelliklerine ait bilgiler Tablo 1’de verilmektedir. Tünele ait enkesit tipi Şekil 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Tünel geometrisi (Karayolları Tünel Araştırma Raporu 2016).

Bölünmüş Devlet Yolu	
Şerit Sayısı	2x2
Şerit Genişliği	3.5 m
Orta Refüj	4.0 m
Banket Genişliği	İç=1.5 – Dış=2.5 m
Platform Genişliği	26.0 m



Şekil 1. Proje güzergâhında tünelli geçişte uygulanacak tip kesit (Tünel Araştırma Raporu 2016).

İnşa edilmesi planlanan tünele ait Google Earth görüntüsü Şekil 2’de, yer bulduru haritası Şekil 3’de görülmekte olup ayrıca tünele ait kmz görüntüsünün araziye aplanmış hali Şekil 4’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Tünel lokasyonu



Şekil 3. Güzergâha ait yer bulduru haritası



Şekil 4. Tünel güzergâhının araziye applike edilmiş görünümü

Amaç ve Kapsam

Doktora tez çalışmasında, sedimenter bir ortamda açılması planlanan karayolu tüneli için iki boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilerek stabilite davranışları ve deplasman değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla;

- Tünelin inşa edileceği ortamlar zor arazi koşullarına (basınç zonları, kayma zonları, kıvrımlı kaya sıralanması, yüksek arazi gerilmeleri, kaya yükü, su girişi, gaz girişi, jeotermal gradyan, yüksek seviyede sismisite v.s.) sahip olabileceğinden dolayı bu tür sorunlar açısından tünel hattı ve yakın çevresi için geniş kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır.
- Tünel hattı boyunca sondajlar yapılmış ve gerekli arazi ve laboratuvar deneyleri sonuçlarından mekanik özellikler belirlenmiştir. Buna ilaveten birim sınırlarının ve mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla jeofizik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tüm bu çalışmalar birlikte değerlendirilerek jeolojik ve geoteknik model oluşturulmuştur.
- Elde edilen veriler ile tünel kazı ortamına ait tasarım parametreleri belirlenmiştir. MİDAS GTS NX ticari sonlu elemanlar yazılımı ile iki ve üç boyutlu geoteknik tasarım yapılarak birincil destek sistemine gelebilecek olan yükler elde edilmiştir.

Kaynak Özetleri

Şeker (2008) Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi prensiplerine göre tünel kaplama tasarımı ile ilgili çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Cezayir’de bulunan Doğu Batı Otoyolu Projesi kapsamında açılmakta olan ve iki tüpten oluşan Bouira Karayolu Tüneli uygulaması incelenmiş, daha sonrasında ise tünellerden elde edilen verilerle Plaxis 2D yazılımı kullanılarak tünel tasarımları yapılmıştır. Çalışmanın yapıldığı zemin/kaya ortamı foliasyonlu marn, şeyl marn, fay kili, yamaç molozu olup kuru birim hacim ağırlık (γ_k), kohezyon (c), kayma mukavemeti açısı (ϕ), elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) tasarım parametreleri

olarak seçilmiştir. Tünellerin farklı kademelerde inşası modellenerek tünel kaplamalarında ve zemin yüzeyinde oluşacak etkiler ile tünellerin birbirlerine olan etkileri araştırılmıştır. Tünel kaplamaları etrafında oluşan kesit tesirleri gözlemlenerek tünel kaplaması statik olarak kontrol edilmiştir. Modelleme çalışması sonucunda tünellerin inşası sırasında Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemine uygun kademeli kazı yöntemlerinin uygulanmasıyla tünel etrafında oluşan deplasman değerlerinin azaldığı belirlenmiş olup kademeli kazılar sonrasında oluşan zemin oturmaları incelenmiştir. Tünellerin inşa sırasının değişmesi sonucunda oluşacak olan deplasman değerlerinin de değiştiği gözlemlenmiştir. Yapılan bu analizler ile tünel kaplamasındaki ön boyutlandırmalar kontrol edilerek tekrar boyutlandırılmıştır. Tasarımda kullanılacak olan kaplama türlerinin fiziksel özelliklerinin ve uygulama sırasının çok iyi bir şekilde bilinmesi gerektiği çalışma ile tespit edilmiştir.

Farklı şartlar için derin kaya tünelleriyle yakınsama - sınırlama yöntemi uygulanması başlıklı Alper (2016)'ın yapmış olduğu çalışmasında kapanma-sınırlama yöntemi, analitik yaklaşım ve sonlu elemanlar yaklaşımlarıyla yapılan analizler sonucu elde edilen verilerin karşılaştırılması yapılmıştır. Hazırlanan tez çalışmasında farklı geometri, uniform olmayan gerilme koşulları ($K_0 = 0.6$ ve $K_0 = 1.2$) ve farklı sayıda kazı aşamaları değişken olarak kullanılmış olup çalışma ortamı marn ve kireç taşı olarak seçilmiştir. Analizler ile bu çalışmada yer alan kaya birimi ve tünel çapı için, tünel çeperinde oluşan hacimsel deformasyon değerlerinin, tünel kazısının dairesel kesit yerine dairesel yay şeklinde yapıldığında ve K_0 oranının artmasıyla $[0.6, 1.2]$ arttığı sonucuna varılmıştır. Destek sistemlerinin kullanılmadığı durum için analitik ve sayısal yaklaşımla yapılan analizlerin benzer sonuçlar verdiği, ancak bu durumun aynı değerlendirmenin destek sistemlerinin de kullanıldığı tünel tasarımında mümkün olmadığı ifade edilmiştir.

Karamanlı (2009) çalışmasında tünel ilerlemesine bağlı yüzey oturmalarının ve tünel kaplaması üzerindeki yüklerin belirlenmesinin etkisini araştırmıştır. Yapılan parametrik çalışmada Plaxis 3D ticari yazılımı kullanılmıştır. Kısa-dönem ve uzun-dönem kil davranışlarını da göz önünde bulundurarak, tünel açım aşamalarının, açım uzunluklarının, zemin rijitliğinin ve tünel derinliğinin, yüzey oturmaları ve tünel kaplaması üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma killi ortamda yapılmış olup, tünel çapı, tünel derinliği, açım uzunluğu ve zemin rijitliği parametre olarak seçilmiştir. Çalışma yöntemi olarak, tünel açım aşamaları ve tünel kaplaması üzerindeki gerilme dağılımlarının belirlenmesi amacıyla üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayalı analizler gerçekleştirilerek tünel açımı ile oluşan yüzey oturmaları ve tünel kaplaması üzerindeki yüklerin tahmini amacıyla kullanılan mevcut yöntemler gözden geçirilmiştir. Kullanılan yöntemlerin verdiği tahminler, sayısal analizler

sonucu elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, mevcut yöntemlerin performansının değerlendirilmesi için bir olanak sunmuş olup bu yöntemler sonucu elde edilen sonuçlar arasındaki farklılıkların nedenleri tartışılmış ve yöntemlerdeki kısıtlamaların, bu sonuçlar arasındaki farklılıkların temel nedeni olduğu çıkarılmıştır. Ayrıca analitik ve görgül bağıntılar sayısal analiz sonuçları için referans değerlendirmede önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Türkoğlu (2013) yapmış olduğu tez çalışmasında olumsuz zemin koşullarında açılmış tünel göçüğünün iki boyutlu sayısal analizini konu etmiştir. Tünel inşaatı sırasında zemin hakkındaki yetersiz bilgi ciddi problemlere hatta çökmeye sebep olabileceğini ifade etmiştir. Çalışmada, Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi kapsamında açılan BT24 Tüneli'nin çökmesinin nedenleri araştırılmıştır. Tünel davranışını ve çökme mekanizmasını anlamak için, inşaat aşamaları yapım sırası iki boyutlu düzlemsel birim deformasyon ve aksisimetrik sonlu eleman modelleri kullanılarak modellenmiştir. Çok ayrılmış ve zayıf – orta dayanımlı kaya kütlesi ortamında çalışma değerlendirilmiştir. Analizlerde, püskürtme beton kaplamalı, invert kapanmalı ve kaplamasız durumlar için gerçekleştirilmiştir. Olası olumsuz zemin koşullarının tünel davranışı üzerindeki etkisini modelleyebilmek amacıyla, bu iki alternatifle birlikte bir dizi fay senaryoları ve sünme etkileri de ayrıca dikkate alınmıştır. Sonuç olarak tünel çeperindeki deplasmanlar, birincil kaplamadaki kuvvet ve momentler, ayrıca çevreleyen zemindeki plastik deformasyon bölgeleri her bir vaka için belirlenmiş ve bu doğrultuda kıyaslamalar yapılmıştır. Öngörülmeleyen zemin koşullarının deformasyonları büyük oranda artırmış olabileceği ve invertteki birincil kaplamada halka kapanması uygulanmayışının çökmeye anahtar rol oynadığı ifade edilmiştir.

Yıldırım (2009) tarafından şişen killer ve tünel tasarımına etkisi konulu bir tez çalışması yapılmıştır. Türkiye’de, özellikle İstanbul ve Ankara’da yapılmakta olan metro inşaatlarında uygulanan tünel kesitleri ve kil zemin koşullarındaki davranışları çevresel koşullar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ankara’daki metro inşaatında çift hatlı metro tünelleri ve İstanbul’da aynı güzergahta bulunan farklı kil koşullarındaki çift hatlı metro tünelleri esas alınarak konu irdelenmiştir. İstanbul’daki tünellerden Yenikapı bölgesi tünel uygulaması ile Ankara metrosu tünel uygulaması şişme özelliği yüksek olan kil koşullarında, Süleymaniye Bölgesi’nde ise farklı tip tünel kesitleri kullanılarak, normal durumları ile iyileştirme koşulları dâhil edilerek toplam yedi adet analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları, kildeki değişimler baz alınarak değerlendirilmiştir. Plaxis programı kullanılarak yapılmıştır. Birim hacim ağırlığı, elastisite modülü, poisson oranı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı çalışma parametreleri olarak seçilmiştir. Çalışmanın yapıldığı zemin ortamı ise marn, şişen kil birim olarak tespit edilmiştir.

Kil zeminlerin tünel tavanına yaptığı basınç ve sebep olduğu yer değiştirme hareketleri, tünel inşaatına engel çıkarmakla birlikte yüzeyde kalıcı hasarlara neden olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar ve grafikleri, tünel kesitinde kemerlenmenin hızlıca sağlanması gerektiği, tünel taşıyıcı tabakasının (orta duvar, nihai kaplama) boyutlarının dışarıdan gelen basınç ve yük dağılımına karşı dayanım göstermesinin ne kadar önemli olduğu belirtilmiştir. Tünel açılırken zemin içindeki gerilmelerin değiştirilmeye çalışılması, özellikle şişen killer gibi hareket etme kabiliyeti yüksek olan zeminlerde ilave tedbirler alınması gerektiğine işaret edilmiştir. Yenikapı örneği, kalın bir kil katmanındaki tünelin, destekleme sistemi sırasında nasıl zarar gördüğünü açık bir şekilde göstermiş olduğu ifade edilmiştir

Yoshida *et al.* (1997) Çamurtaşının bozulması ve tünel performansına olan etkisini analizi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Tersiyer çamurtaşı kaya tabakalarında tünel açımında sıklıkla yüksek kaya basıncı veya tünel duvarlarının aşırı yer değiştirmesi bakımından uzun dönemde stabilite sorunları ile karşılaşmaktadır. Bu tür sedimenter ortamlar zamanla bozulma, ayrışma, nem/nemlilik değişimleri, yük boşaltımı akabinde su absorpsiyonundan dolayı yumuşamaya eğilimlidir. Bu çalışmada, çamurtaşının yumuşamasından dolayı dayanım kaybı ve tünel performansı ile etkileşimi özetlenerek tartışılmaktadır. Daha sonra bir sonlu eleman analizi tünel davranışı üzerine dayanım azalmasının etkisini gösterebilmek için örnek olarak sunulmaktadır. Hatta yumuşamadan dolayı progresif yenilme ile birlikte tünel etrafındaki gerilme dağılımı açıklanmaktadır.

Wang *et al.* (2002) güneybatı Tayvan da çamurtaşı alanlarında tünelcilik deneyimleri üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Planlanan ulaşım, enerji ve su altyapı projelerinin büyük taleplerini karşılamak için Tayvan'ın güneybatısında birçok tünel inşa edileceği 1000 km' den fazla bir alanı kaplayan çamurtaşı tabakaları, esas olarak büyük iki çamurtaşı ya da altere çamurtaşı ve kumlu tabaka içeriği ile olumsuz jeolojik ve hidrolojik özellikler sergiler ve tünel açmayı son derece zorlaştırdığı belirtilmiştir. Bu makale, 1990'lı yıllarda bir çamurtaşı alanındaki üç tünel projesinden gözlemleri sunulmaktadır. Tünel çevresindeki kaya davranışını ve göçme modellerini tartışmanın yanı sıra, tünel açma sırasındaki izleme verileri de sunulmaktadır. Son olarak, çamurtaşı alanında tünel açma için etkili tasarım ve yapım yöntemleri önerilmektedir.

Zhou *et al.* (2014) derin tünellerde stabilite kontrolü ve yumuşak kayaların mekanik davranışının analizleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Klorit şistinin mekanik özelliklerindeki zayıflık ve Jinping II hidroelektrik istasyonundaki yüksek arazi gerilmelerinden dolayı, klorit şistinde bulunan derivasyon tünellerini çevreleyen kaya kütlelerinde son derece büyük deformasyonlar gözlenmiştir. Bu, kazı sırasında tünel stabilite

riskini önemli ölçüde artırabileceği ifade edilmiştir. Derivasyon tünellerinin stabilitesini değerlendirmek için klorit şistinin petrofiziksel özellikleri, mekanik davranışları ve sudan etkilenme özellikleri ile ilişkili olarak laboratuvar testleri yapılmıştır. Tünelleri çevreleyen kaya kütlelerinin sürekli deformasyonu, destek yapısının tahrip olması ve zayıf klorit şistinin neden olduğu büyük ölçekli çökme ve yüksek arazi gerilmeleri analiz edilmiştir. Büyük deformasyonlarla kazı bölgesindeki basınç deformasyon dağılımları da incelenmiştir. Bu bağlamda, derivasyon tüneli alt bölümünün kazılması için iki takviye şeması buna göre önerilmiştir. Bu çalışma benzer jeolojik koşullarda derin tünel inşası için teorik bir temel olarak önerilmiştir.

Kısmi doymuş kayaların zamana bağlı davranışının yapısal modellemesi üzerine Bui *et al.* (2016) tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu makale, kısmen doymuş kayaların zamana bağlı davranışları için yeni bir kurucu model sunmaktadır. Hidromekanik bağlantı, gözenekli ortam çerçevesinde formüle edilmiştir. Viskoplastik ve izotropik hasar yasaları, eşdeğer bir gözenek basıncı ve etkili bir stres değişkeni kullanılarak orijinal Lemaitre' nin modelinden genişletilmiştir. Model, tipik laboratuvar deneylerinin sonuçlarından tanımlanabilen uygun sayıda parametre içermektedir. Bu model, doymuş ve doymamış kayaları birleştirilmiş bir şekilde simüle etmek için kullanılabilir. Bazı kayalardan elde edilen deneysel verilerle onaylanmıştır. Aynı zamanda termodinamik tutarlılığı da tartışılmıştır.

Çin'in Hubei bölgesinde ultra derindeki bir formasyondaki kaya tuzu gaz deposu üzerine Wang *et al.* (2018) tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Qianjiang şehri, Jianghan tuz bölgesinde yeraltı gaz depolama inşaatı 1800 m' den fazla bir derinliğe sahiptir. Mağara, Asya'daki en derin tuz mağarası gaz deposu olacağı ifade edilmiştir. Önerilen tuz mağarası gaz deposunun 3D jeomekanik modeli, hedef oluşumun jeolojik karakteristiklerine ve mekanik parametrelerine dayanılarak oluşturulmuştur. Jianghan tuz mağarası gaz deposunun güvenliğini kantitatif olarak değerlendirmek için deplasman, hacim büzülmesi, plastik bölge, hacimsel değişim güvenlik faktörü ve eşdeğer birim şekil değiştirmeden oluşan yeni bir indeks sistemi önerilmektedir. Her göstergenin eşik değerleri, Çin' deki kaya tuzu özelliklerine dayanılarak önerilmektedir. Önerilen endeksler sistemi kullanılarak, mağara şekli, boyutları, çalışma parametreleri ve sütun genişliği optimize edilmiştir.

Tabakalı kaya tuzu formasyonda oluşturulan derin gaz depolama mağara grubunu stabilite analizleri için fiziksel model deneyi ve nümerik simülasyonu üzerine Zhang *et al.* (2017) tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tabakalı tuz kaya oluşumunda inşa edilen gaz depolama mağara kompleksinin stabilitesi, operasyon prosesi sırasında birçok faktörden etkilenebileceği belirtilmiştir. Bu etkileri değerlendirmek için bu çalışmada üç boyutlu reolojik

model testleri yapılmıştır. Dört elipsoid mağaraya sahip fiziksel model, bağımsız hidrolik krik setleri ve dijital kontrollü lateks balonlar tarafından uygulanan iç basınç yoluyla uygulanan ölçekli yerinde gerilmelerle oluşturulmuştur. Gaz geri kazanımı ve enjeksiyon oranı, basınç kaybı, aşırı düşük ve yüksek gaz basıncı ve bitişik oyuklar arasındaki sütun genişliği ve basınç farkı dahil olmak üzere, çevredeki kayaçların deformasyon özellikleri üzerindeki farklı faktörlerin etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Test sonuçları, gaz çıkarma / enjeksiyon oranı 0,65 MPa/gün' ü aştığında mağara duvarının deformasyonunun hızlandığını ortaya koyulmuştur. İç basınç kaybı deformasyonu önemli ölçüde artırmış olduğunu belirtilmiştir. Ters basınç sünme aşaması, iç basınç çok düşük (3 MPa) veya çok yüksek (22 MPa) olduğunda ortaya çıkarılmıştır. İç basınç farkı ve sütun genişliği deformasyon özelliklerini etkilemek için birlikte çalışılmıştır. Bu çalışmada elde edilen test sonuçları, mağara grubunun güvenlik analizi, tasarım ve işletme planının optimizasyonu için fiziksel kanıt sağlanmıştır. Bu sonuçlar aynı zamanda sayısal modellerin doğrulanması için bir ölçüt görevi de görebileceği ifade edilmiştir.

Pellet *et al.* (2009) kazı sonrası ve kazı süresince yeraltı galerilerinin etrafındaki hasar zonunun zamana bağlı gelişiminin üç boyutlu olarak modellenmesi üzerine bir araştırma yapmıştır. Bu makale, Kazı Hasar Bölgesi'nin (EDZ) zamana bağlı gelişimine özel bir vurgu yaparak derin yeraltı galerilerinin mekanik davranışının 3D sayısal bir simülasyonunu sunmaktadır. Kaya kütlesi davranışı, hem viskoz hem de hasar parametrelerinin dikkate alındığı hasar görülebilir viskoplastik yapısal kanunu ile modellenmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile galerinin ardışık yapım süreci sırasında kazı etrafındaki zondaki gerilmelerin gelişimi, hasar bölgesinin aşamalı gelişimi ve gecikmeli yer değiştirmeleri araştırılmıştır. Galeri eksenine göre yerinde gerilmelerin yöneliminin etkisi de vurgulanmaktadır. Ayrıca, destek sisteminin, hasar bölgesini ve galeri çevresindeki yer değiştirmeleri azalttığı gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yeraltı açıklıklarının tasarımının bilgisayar destekli analizi için bazı öneriler sunmaktadır.

Pellet (2004) yeraltı kazılarının uzun dönem davranışının modellenmesinde kaya hasarı ve viskoplasite özellikleri üzerine bir araştırma yürütmüştür. Yapılan çalışmada sunulan deneysel sonuçlar, bazı kayaların viskoz özelliklerini vurgulamakta ve hasardaki zamana bağlı değişimi karakterize etmektedir. Bu fenomenlerin anlaşılmasına ana katkı sıralanan tespitler ile ilgilidir: birincisi, viskoplastik deformasyonların gelişimi ile ilişkili hacimdeki bir artışın (dilatantlık) zamanla ortaya çıkmasının tanımı; ikincisi, ya yönlü modüllerde bir değişiklik ya da ana eksenler üzerinde ölçülen biriken geri dönüşümsüz deformasyonlar ile tarif edilebilen hasar anizotropisinin kanıtı olduğu ifade edilmiştir. Viskoplastik davranış için, temel noktalardan biri, zaman içinde hiçbir değişimin algılanamayacağı eşiği temsil eden sınırlayıcı

kaya birim şekil değiştirme eğrisinin belirlenmesinden oluşmaktadır. Sonuç olarak, yeraltı çalışmalarının uzun dönem davranışının sayısal olarak modellenmesi için, viskoplastik hacim değişimlerini ve aynı zamanda çekme tipi hasar değişimini de dikkate alarak yapısal bir yasa kullanılması tavsiye edilmektedir.

Pellet (2009) tünel kaplaması ve hasara duyarlı viskoplastik ortam arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu çalışmada, tünel kaplama desteği ve hasara duyarlı bir viskoplastik ortam arasındaki temas ve etkileşim araştırılmıştır. İlk olarak, büyük gecikmeli yer değiştirmeler sergileyen karbonifer kaya kütlesi boyunca kazılan bir açıklığın zamana bağlı davranışının geri analizi gerçekleştirilmiştir. Açıklığın kapanması dayanımının azalma sürecini içeren bir elasto-viskoplastik yapısal model kullanılarak simüle edilmiştir. 3D sayısal simülasyon hem yapım aşaması sıralaması hem de kazı ilerleme oranı göz önüne alınarak yapılmıştır. Arazide ölçülen veriler ile nümerik analizlerin karşılaştırılması model parametrelerinin kalibrasyonunu sağlamıştır. Daha sonra, beton kaplamanın inşası kaya kütlesiyle teması hesaba katılarak simüle edilmiştir. Bu örnek sayısal simülasyon ile tünel kesitini optimize etmeyi ve uygun bir beton destek kaplaması boyutlarının oluşturulması amaçlanmıştır. Beton kaplamanın inşasından üç ay sonra, beton kaplamada ölçülen gerilmeler sayısal olarak tahmin edilen gerilmeler ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Satıcı (2018) yaptığı tez çalışmasında tünel kazıları sırasında yakınsamaların ve plastik bölge kalınlığının gelişimini, gerçek saha ölçümleri, istatistiksel ve sayısal analizler kullanılarak özellikle zayıf ile orta kaliteli kaya kütleleri için değerlendirmiştir. Tünel yakınsamalarına göre plastik zon kalınlıkları da belirlenmiştir. Karar ağacı yöntemi, en iyi yakınsama tahmin yöntemi olarak seçilmiştir, bu yöntem bu tür için bir ilktir ve tek bir bağımlı değişken ile içinde doğrusal bir ilişkinin olmadığı çoklu bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin belirlenmesinin uygun olduğunu tespit etmiştir. Sonuç olarak, kullanışlı ve kullanıcı dostu bir yakınsama tahmin modeli oluşturulmuştur. Ayrıca yakınsamaların plastik bölge kalınlığı ile ilişkisi de görgül denklemler yardımıyla sonlu elemanlar analizi kullanılarak ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, tünel duvar kapanışlarının tahmini için yeni bir görgül denklem de tanımlanmıştır. Bu denklemin, özellikle üç veya daha fazla tünel duvarı yakınsaması değeri biliniyorsa ve benzer tünel kesitlerinde ölçülmemiş yakınsamaların tahmin edilebilmesi için kullanılabileceğini belirtmiştir.

Vitali *et al.* (2018) çalışmasında doğrusal olmayan bir zemin modeli ile üç boyutlu tünel modelleme çalışması yapmışlardır. Mühendislik hesaplamaların doğruluğunu sağlamak amacıyla yapılan tekrarlı denemelerin uzun zamanda gerçekleştirildiğini değerlendirmişlerdir. Sonlu elemanlar ağının optimizasyonu son derece önemlidir. Tünellerin üç boyutlu

modellemesine yönelik mevcut eğilime rağmen, çok az çalışmanın model boyutu, grid iyileştirmesi ve elemanların sırasını dikkate alan ağ optimizasyonu ile ilgili olduğunu tespit etmiştir. Çalışmasında tünellerin üç boyutlu modellemesini etkileyen temel sorunların anlaşılmasını sağlamıştır. Elde ettikleri sonuçlar şunu göstermiştir: (1) 2. mertebeden elemanlar malzeme doğrusal olmama durumunda daha verimlidir ve tercih edilmelidir; (2) plastik bölge boyutu, model boyutları üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir ve şu anda kabul edilenlerden çok daha büyük ayrıtlıklar gerektirebilir. Yapılan çalışma azaltılmış hesaplama maliyetiyle doğru üç boyutlu modeller için plastik bölge boyutunun bir fonksiyonu olarak sonlu eleman boyutlarının küçültmesi ve model boyutları (genişlik ve uzunluk) için öneriler sunmaktadırlar.

Swoboda *et al.* (1994) tünelcilik çalışmalarının yakın bir geleceğe kadar deneyime dayalı bir uygulama alanı iken son yıllarda sayısal yöntemlerin yaygınlaşması ile tünel tasarımında önemli bir noktaya geldiğini belirtmişlerdir. Özellikle, sonlu elemanlar metodunun tünellerdeki gerilme ve deformasyon hesaplamalarında bir standart haline geldiğini ifade etmektedirler. İki boyutlu düzlem deformasyon hesaplamaları ve gerekli yaklaşımların tünel kazısı için halen en uygun ve en kullanışlı modeli sunuyor olduğuna değinmişlerdir. En önemli yüklemeler ile beraber önemli modelleme konularına işaret etmişlerdir ve bir metro tüneli ile konuyu açıklamaya çalışmışlardır.

Oke *et al.* (2014) yaptıkları çalışmada yapılacak olan bir geomeknik analiz için gerekli olan sayısal analiz yaklaşımının, tamamen yapısal veya mekanik bir analize kıyasla çok daha karmaşık olduğunu belirtmişlerdir. Bu karmaşıklık, yeraltı yapısının yapı - zemin etkileşimi karşısında doğru davranışını yakalamak için üç boyutlu (3B) analiz gerektirdiğini ifade etmişlerdir. Yapılan çalışma, tünel mühendisinin bir yeraltı tüneli kazısında sayısal analiz sürecini güvenle yürütebilmesi için gerekli kontrolleri sistematik bir şekilde özetlemektedir. Bu makale aynı zamanda bir 3B sayısal analiz oluştururken ve çalıştırırken uygulanabilir prosedürler ve hususlar aracılığıyla tünel mühendisi için bir rehber görevi görürken, aynı zamanda çok sayıda ilgili referansa da atıfta bulunmaktadır.

Alejano *et al.* (2009) kaya kütlesi davranış modeli seçimi ve özellikle kaya kütlesi çökme sonrası davranışı, özellikle yakınsama-hapsetme yöntemi ve ayrıca sayısal modelleme gibi tasarım tekniklerinin doğru uygulanmasının tünel stabilitesini analiz etmede anahtar konular olduğuna işaret etmişlerdir. Yapılan çalışmada simüle edilmiş standart tünellerin kazıldığı üç farklı kalitede kaya kütlesi (iyi, ortalama ve zayıf) tanımlanmıştır. Her tip kaya kütlesi için elastik mükemmel plastik, elastik kırılğan ve üç birim şekil değiştirme yumuşatma davranışı dâhil olmak üzere farklı davranışlar modellenmiş olup ve ilgili zemin reaksiyon eğrileriyle birlikte giderek daha gerçekçi parametreler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar,

tünel analizi için uygun göçme sonrası davranış modeli seçiminin önemini göstermektedir. Ayrıca standart destek ve kazı ortamının güçlendirilmesinin etkileri de değerlendirilmiştir.

Kabwe (2020) makalesinde yakınsama - hapsetme yöntemlerinin, dairesel tünellerde yakınsamayı tahmin etmek için kullanılan çözümlerden biri olduğuna ve bu yöntemin çoğunlukla Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown göçme kriterleri ile modellendiğine işaret etmiştir. Bununla birlikte, bu kriterlere dayalı çözümler, zemin veya kaya ortamının reaksiyonunun tahmininde ara asal gerilme olan σ_2 'nin sınırlayıcı etkisinin ihmal edildiğini ifade etmiştir. Bu nedenle, bu makalede, Lode açısı parametresiyle entegre bir Drucker-Prager (DP) göçme kriteri yönetimli çözüm kullanılmıştır. Göçme karakteri üzerindeki parameterenin kritik etkisini ve ara ana gerilme etkisi incelenmektedir. Daha sonra, FLAC3D içinde birleştirici olmayan bir akış kuralı ile elastik, mükemmel bir plastik yapısal kanunu dikkate alan sayısal simülasyonlardan elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır. Sonuçlardan, ortam reaksiyonunun ve plastik evrimin sınırlayıcı gerilmeden etkilendiği anlaşılmıştır. Ayrıca, uygun bir göçme kriterinin dikkate alınması gerçekçi yakınsama ve plastik evrim tahminine yol açmaktadır. Lode açısı parametre değeri (0.8) ile sınırlandırılmış DP kriteri ile yönetilen çözüm, üç boyutlu (3B) gerilme durumunu kaya kütlelerinde gerçekçi ortam reaksiyonu tahmini için uygun kabul edilebileceğini belirtmiştir. Klasik çözümlere (% 5) kıyasla tünel yakınsamasının yaklaşık % 3.4'ünü ve 2.84 m'ye kıyasla yaklaşık 2.45 m olduğu tahmin edilen plastik yarıçapı tespit etmiştir.

Mazek *et al.* (2013) yayın yılı itibari ile yapım aşamasında olan Mısır'ın Kahire kentindeki metro tüneli için bir modelleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Kahire metro tünelinin inşası sırasında kum zeminden tünel açma makinesi ile geçilirken zemin hareketi beklendiğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada, vaka çalışmasına dayalı olarak tünel sistemi performansını modellemek için sonlu eleman modeli kullanmışlardır. Tüneli çevreleyen zemin davranışını temsil etmek için bir elasto-plastik yapı modeli benimsenmiştir. Etkiler, yüzey deplasmanı ve tünel açmanın neden olduğu zemin gerilme değişimi olarak ifade edilir. Yer altındaki gerilmeler üç aşamalı değişimden geçmektedir. Bu aşamalarda, tünel inşaatının yükleme aşamaları 2 boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılarak tahmin edilmiştir. Kazı ortamının deplasmanları ve inşaat etkisi sayısal modelle elde edilmiştir. Hesaplanan tünel performansı ile gözlemlenen davranış arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma ile hesaplanan ve gözlemlenen değerler arasında iyi bir uyum olduğunu ortaya koymuşlardır.

Janin *et al.* (2015) zemin güçlendirme ile ilişkili tam ayna kazısı, yumuşak kaya veya sert zemindeki büyük tünelleri inşa etmek için yaygın bir tekniktir. Kazı süreci, destek elemanları ve ortam reaksiyonu arasındaki etkileşim olgusunun üç boyutlu (3B) bir problem

olduğunu ifade etmişlerdir. Günümüzde, software and hardware'lerdeki gelişmeler, makul bir hesaplama süresi içinde bir üç boyutlu tünel kazısının sayısal analizi seçeneği sunmaktadır; ancak, basitleştirilmiş yakınsama-hapsetme yöntemine dayanan iki boyutlu hesaplamalar, tasarım aşamasında halen mevcut projelerde mühendislerin en yaygın yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir. Yapılan çalışmada, Fransa' daki güney Toulon tüneline bir izleme bölümü kurulumunun sayısal geri analizi sunulmuştur. İlgili çalışmanın birincil amacı olarak, iki sayısal yaklaşımın (yani, 2B ve 3B) yerinde ölçülen tünelin gerçek davranışını yeniden üretme yeteneğini araştırmayı ve karşılaştırmayı hedeflenmiştir. Üç boyutlu hesaplama ile yerinde verileri doğru bir şekilde simüle etmişlerdir ve bu yöntemin bir tünel kazısının karmaşıklığını temsil edebileceğini doğrulamışlardır. 2B hesaplamaların 3B sonuçlara uydurulması, Toulon projesinde benimsenen gerçek kazı sürecine karşılık gelen gerilme rahatlatma değerlerinin belirlenmesini de sağladı. Bu analiz sonuçları ile, ortam deplasmanları dikkate alındığında genel olarak iki boyutlu analiz sonuçlarının tatmin edici sonuçlar ürettiğini tespit etmişlerdir.

Karakus *et al.* (2007) yaptıkları makale çalışmasında Ankara Büyükşehir Belediyesi'ndeki 9.325 m genişliğindeki çift tüp tünel metro hattının geoteknik özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Tünel inşaatı sırasında alınan yakınsama ölçümlerini sunmuşlar ve elde edilen verileri tartışmışlardır. Ayrıca, çift tüp metro tünellerinin yakınsaması bir 2D düzlem gerilme halinde sonlu eleman (FE) yöntemi ile analiz etmişlerdir. Bu kapsamda elde edilen sonlu elemanlar analiz sonuçları ile saha ölçümlerini karşılaştırmışlardır.

Koungelis *et al.* (2008) üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (SE) modelleri kullanarak, özellikle yer altı yapıları, yüzey yapıları ve yükleme gibi özellikler dâhil olmak üzere, bir tünelin (veya tünellerin) aşamalı kazı ve destek sisteminin simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Üç boyutlu sonlu elemanlar modellerinin kullanımında önemli bir husus olarak ağ yapısının oluşturulması ve ilgili geometriler nedeniyle özellikle tünel yapım aşamalarının modellenmesinde dikkat edilmesi gereken aşamalardan biri olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışma ile, ücretsiz bir sonlu eleman ağı oluşturan bir software ile oldukça karmaşık tünel inşaatının otomatik bir şekilde üç boyutlu sonlu eleman ağının oluşturulma şeklini sunmuşlardır. Karşılaştırmaları, ticari sonlu eleman yazılımı ile elde edilen ağlar ile yapmışlardır.

Lu (2014) çalışmasında Mohr - Coulomb mükemmel elastoplastisite modeli ile sonlu elemanlar simülasyonu sayesinde, destek basıncı ile kalkan tüneli yüzünün yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi değerlendirmiştir. Göçme durumundaki plastik birim şekil değiştirme dağılımına göre, üst sınır limit analizi için uygun bir göçme mekanizmasını önermiş ve sınır

destek basıncını hesaplamak için bir formül üretmiştir. Limit destek basıncı, zemin kohezyonu c , sürüşarj yükü q ve zemin yerçekimi γ toplamına karşılık gelen N_c , N_q ve N_γ katsayıları ile çarpımı olacak şekilde yeniden düzenlenmiş ve bu katsayılar üzerinde parametrik çalışmalar yapmıştır. Sızıntının yüzey stabilitesi üzerindeki etkisini dikkate almak için, tünel yüzeyindeki boşluk suyu basıncı dağılımı ve sızıntı kuvveti sonlu elemanlar simülasyonu ile elde etmiştir. Üst sınır limit analizinin denklemine sızıntı kuvvetinin gücü eklendikten sonra, sızıntı durumu altında tünel yüzünü stabilize etmek için toplam limit destek basıncını elde etmiştir. Toplam limit destek basıncının su tablasıyla neredeyse doğrusal olarak arttığını tespit etmiştir.

Satıcı *et al.* (2015) yaptıkları çalışmada Türkiye'deki bir karayolu tüneline yapılan karşılaştırmalı sayısal model çalışmasının sonuçlarını sunmaktadırlar. Tünel, açık sistematik süreksizlik setlerine sahip kumtaşı-silttaşı kaya kütlesi içinde açılmıştır. Uygulamada, kaya kütlesinin süreksizliklerinin tünel stabilitesi üzerindeki etkileri genellikle yer altı yapılarının tasarımında yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar (SE) modellerinde göz ardı edildiği ifade edilmiştir. Bu eksikliği telafi etmek için, sonlu eleman modellerindeki süreksizliklerin etkisini simüle etmek için kaya kütlelerinin mekanik özellikleri azaltılmıştır. Yapılan çalışmanın temel amacı, sistematik ve kalıcı süreksizlik setlerinin, süreksizlikler mevcut olduğunda sonlu eleman sayısal modellemesine etkisi gösterilmiştir. Bu nedenle, stabilite koşullarını karşılaştırmalı bir şekilde analiz etmek için iki farklı koşul modellenmiştir. Modelleme için sonlu elemanlar sayısal analiz yazılımı "Phase2 8.0" kullanılmıştır. Sonuçlar, süreksizliklerin varlığının, süreksiz ortam için sonlu elemanlar metodu yazılımı kullanıldığında tünel stabilitesi ve model sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, süreksizlikler hesaba katılmadan sonlu eleman sayısal modellerin kullanılması durumunda, tünel stabilitesinin değerlendirilmesinde kesinlikle hatalı sonuçlara yol açacağını tespit etmişlerdir.

Jiang *et al.* (2001) yumuşak kayalarda tünellerin etrafındaki plastik bölgelerin gelişimini ve ilerlemesini tahmin ederek birincil destek sistemleri tarafından karşılanacak olan gevşeme basıncını belirleyen teorik bir yöntem sunmuşlardır. Yumuşak kayaların mekanik özelliklerinin gevşeme basıncına etkisi incelenmiş ve tartışılmıştır. Kaya yenilmesini boyutunu değerlendirmek için kullanılan değerlendirme yöntemi, ortam (zemin/kaya) karakteristik eğrisine göre sunulmuştur. Yeterlilik faktörü amaçlanan teorik eşitliklerden tahmin edilebilen kritik değerden daha küçük olduğunda, ortam karakteristik eğrisinin en düşük noktası minimum destek basıncı ve kontrollü tünel duvarı birim şekil değiştirmesini ifade etmektedir.

Liu *et al.* (2013) sonlu elemanlar analizlerinde ağ yoğunluğunun etkileri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar analizlerinde, ağ yoğunluğunun doğrudan komplekslik seviyesini belirleyen sonlu elemanlar modelinin hassasiyeti ile yakından ilgili

kritik bir mesele olduğunu belirtmişlerdir. Oluşturulan çalışma ile, elde edilen sonlu eleman modellemesinde en iyi ağ stratejisinin seçilmesi amaçlanarak, sayısal analiz sonuçlarının doğruluğunda ağ yoğunluğunun etkisi üzerine elde edilen bulgular sistematik bir çalışma halinde sunulmuştur. Yazarlar statik model ve etki analizleri sonlu elemanlar analizlerinde eleman boyutunun etkileri tartışmak için ilgili çalışmaya dâhil etmişlerdir.

Augarde *et al.* (2001) kaplamalı tünellerin üç boyutlu sonlu elemanlar analizini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, killi bir zemine sığ bir tünel inşa edildiğinde meydana gelen yer hareketlerini modellemek için geliştirilen sonlu eleman prosedürlerini açıklamışlardır. Bu kapsamda sığ tünellilikten kaynaklanan olumsuzluklardan dolayı yüzey yapılarında meydana gelebilecek hasarın olası boyutunu tahmin etmek için yeni yöntemlerin geliştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, bu özel makale yalnızca tünel inşasının sayısal modeli ile ilgilidir. Beton/betonarme kaplama, bu tünel kurulum modelinin önemli bir bileşenidir; Bu makalede, kaplamayı modellemenin iki farklı yolunu (süreklilik elemanları ve kabuk elemanlara dayalı olarak) tartışmışlardır. Elastik bir süreklilik içinde kaplamalı bir tünelin inşasından oluşan deneysel bir problemi, farklı yaklaşımların yararlarını araştırmak için kullanmışlardır. Kaplamayı modellemek için süreklilik elemanları kullanıldığında, sayısal sonuçlar soruna yönelik analitik bir çözümle uyumludur. Bununla birlikte, kaplamayı modellemek için kabuk elemanları kullanıldığında, sonuçların, kabuk elemanları için benimsenen özel formülasyon tarafından önemli ölçüde etkilendiği bulmuşlardır. Zeminin kinematik bir sertleştirme plastisite modeli kullanılarak modellenen killi bir zeminde artan tünel inşasını içeren örnek analizleri açıklamışlardır. Bu analizler, bu türden bir zemin - yapı etkileşim analizinde tünel kaplamalarını modellemek için ince bir sürekli eleman tabakasının tatmin edici bir şekilde kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

Do *et al.* (2014) yumuşak kazı ortamında mekanize olarak açılan çift tüp tünellerin üç boyutlu analizi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Büyük şehirlerdeki trafik yoğunluğundaki artıştan dolayı yüzeysel derinliklerdeki tünellerin inşasının zorunlu hale geldiğine işaret etmişlerdir. Böylece, halihazırda var olan tüneller üzerinde yeni inşa edilen tünellerin etkisini tahmin etmek için optimum bir tasarım ile yeni tünelin kazılmasından sonra ve kazı süresince varolan tünelde herhangi bir hasardan kaçınmak için paralel kalkan tüneller kilit bir rol oynamaktadır. Çift tüp ve mekanize olarak yapılan tünel kazısı üzerine literatürde çok sayıda rapor edilen vaka analizi kazı ortamı koşulları, tünel boyutu, tünel derinliği, yüzey yükleri ve iki tünelin birbirine göre rölatif pozisyonu ile ilgili tünel davranışı üzerine çalışmalara odaklanılmış olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada gerçekleştirilen sayısal analiz araştırması, FLAC 3D sonlu farklar elemanı programı kullanılarak, iki tünel arasındaki yapım

sürecinin etkisini dâhil ederek oluşturmuşlardır. Her iki tüneldeki tetiklenen yapısal kuvvetler ve kazı ortamının etrafında gelişen deplasman zonunun gelişimini vurgulamışlardır. Sayısal analizlerin sonuçları var olan bir tünel üzerinde yeni inşa edilen bir tünelin çok büyük etkilerinin olduğunu göstermiştir. İki tünelin kazı aynaları arasındaki mesafenin önemine de dikkat çekmişlerdir. Genellikle, çift tüp tünellerin eş zamanlı kazıları ve kaplama deformasyonları çok uzak mesafede kazılan çift tüp tünel durumunda tetiklenen deplasmandan ve yapısal yüklerden daha küçük olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Ancak, çift tüp tünellerin eş zamanlı kazılarının tünellerin üzerinde çok büyük deformasyonlara neden olabileceği de vurgulamışlardır.

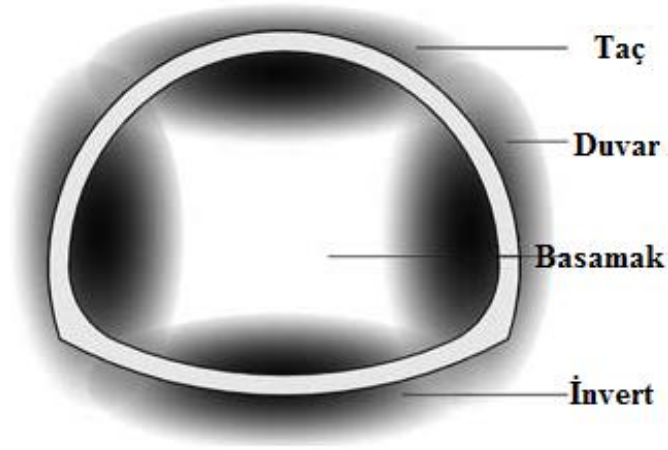
Yeraltı yapılarının tasarımları hakkında çalışmalar literatürde farklı zemin ve kaya koşullarının görgül ve sayısal modellemeler temelinde incelenmiş olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar genel olarak arazi, laboratuvar ve malzeme modellemesi çalışmaları temelinde gerçekleştirilmiş olup bilgisayar destekli uygulamalar ile de farklı yazılımlar ile çözümlemeler yapılması yoluna gidilmektedir. Ancak ülkemizde yapılan zayıf kaya ortamında tünelticilik üzerine yapılan çalışmaların yeterli miktarda olmadığı belirlenmiştir. Bu bölümde araştırma konusu ile ilgili çalışmalar farklı başlıklar altında değerlendirilecek olup çalışmalar ile ilgili özet bilgiler sunulmaktadır.

KURAMSAL TEMELLER

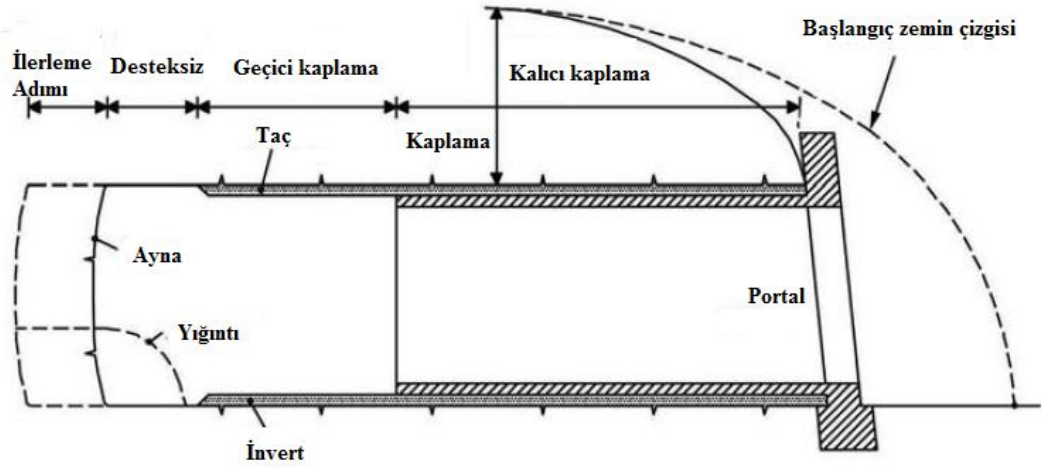
Tüneller inşa amaçlarına göre alt yapı tünelleri, enerji ve su tünelleri, ulaştırma tünelleri, demiryolu tünelleri, yaya tünelleri, metro tünelleri, karayolu tünelleri gibi değişik amaçlarla inşa edilmektedirler. Yapılan tez çalışması kapsamında inşa edilmesi planlanan bir karayolu tüneline ait tasarım esasları değerlendirilmiş olup ilgili çalışmalar ilerleyen başlıklar altında verilmektedir.

Karayolu Tünelleri

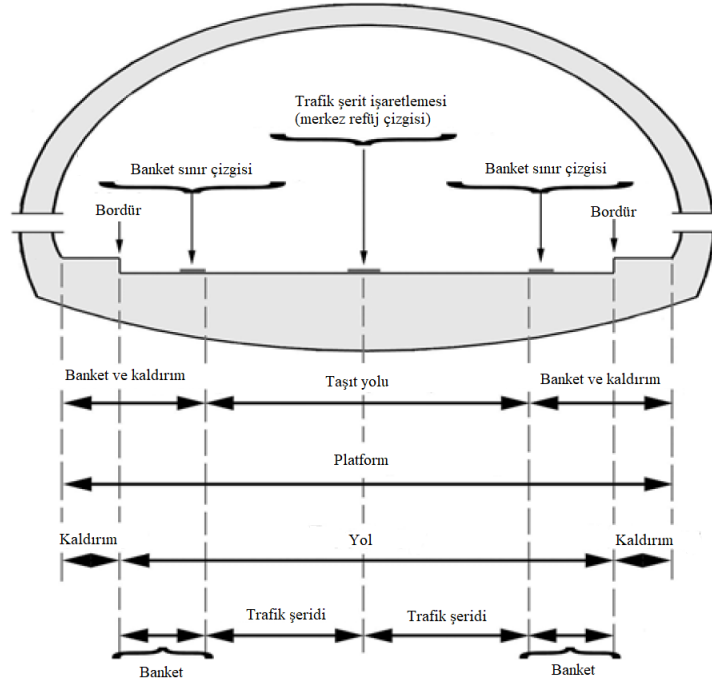
Artan hızlı ulaşım ihtiyacını karşılayabilmek için, dünyada gittikçe çoğalan bir oranda karayolu ve tren yolları yapılmaktadır. Çoğunlukla dağlık araziye sahip olan topoğrafyalarda yol hatlarının inşası çok zordur. Bu sorunu çözmek için genellikle tünel hatları ile zorlu topoğrafyanın olduğu kesimler geçilmektedir (Zhou vd. 2014). Bir tünelin doğasını, şeklini ve maliyetini belirleyen en önemli faktör jeolojidir. Örnek olarak, bir tünelin güzergâh, tasarım ve inşaatı büyük ölçüde jeolojik değerlendirmelere bağlıdır. Buna göre, saha incelemesi ne kadar iyi yapılırsa yapılsın, güzergâh boyunca yer koşullarına ait bilgiler hiçbir zaman tam olmadığından, tünel açma belirsiz bazen de tehlikeli bir girişimdir. Bu nedenle, özellikle jeolojik açıdan karmaşık alanlarda tünel inşaatı maliyetinin hesaplanması belirsizlikler içermektedir (Bell 2012). Tüneller hem zemin hem de kaya ortamlarda açılmaktadır. Zemin ve kaya arasındaki geçiş keskin değildir, zemin ve yumuşak kaya olarak düşünülebilen çok sayıda kaya türü bulunmaktadır. Eğer tünel mühendisi eklem dizisinin ayrımından emin değilse, kayanın dayanımı genellikle zemin dayanımı ile aynı yolla modellenmektedir. Farklılıklar sayısaldır ama niteliksel değildir. Öte yandan, tekli kaya bloklarının boyutu tünel çapı ile karşılaştırılırsa, sürekli ortam mekaniği düşüncesi uygun değildir ve tünel mühendisi tekli blokları göz önüne almak zorundadır. Her bir eklemlerin pozisyonunlarını önceden bildiğimizden dolayı bu gereksinim oldukça akademik düşünmeyi gerektirmektedir. Böylece, çoğu eklemlili kaya durumunda bir dereceye kadar varsayılan mekanik özellikleri ile homojen ortam olarak düşünülmektedir (Kolymbas 2005). Genel olarak tünellere ait geometriler Şekil 5 - 7’de verilmektedir.



Şekil 5. Tünel kesitinin bölümleri (Kolymbas 2005)



Şekil 6. Tünel ilerlemesinin boyuna kesiti (Kolymbas 2005)



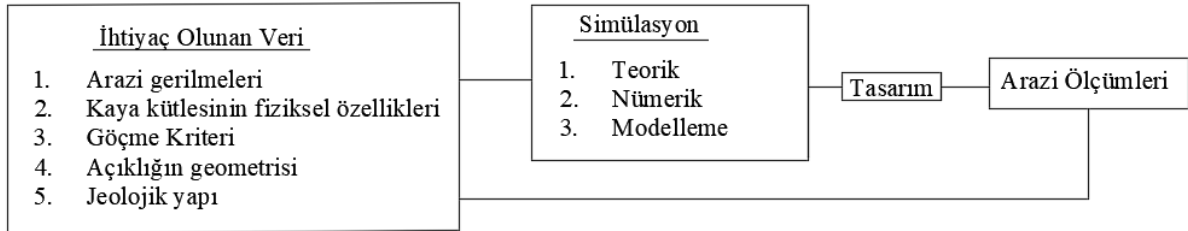
Şekil 7. PIARC (The Permanent International Association of Road Congresses)'a göre yol tünellerinin bölümleri (Kolymbas 2005)

Tünel Tasarımı ve Jeolojik Araştırmalarının Yapılmasının Amacı

Kayada tünel yapısının tasarımı veya mevcut bir yapının kararlılığının ve güvenliğinin değerlendirilmesi;

- (i) Yapıya uygulanan dış yüklerden kaynaklanan yapıdaki deformasyon ve/veya gerilmelerin,
- (ii) Açıklığın yakınındaki kayaçların fiziksel özellikleri,
- (iii) Yapının uygulanan gerilmelere veya deformasyonlara dayanma kabiliyeti,
- (iv) Açıklığın geometrisi,
- (v) Bölgesel jeoloji ve açıklığın çevresindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımının etkisi'ne bağlıdır (Singh *et al.* 2006).

Bu verileri tasarımın ilk aşamasına dâhil etmek için sonlu eleman veya ayırık eleman metodu gibi uygun analitik metotlar, model çalışmaları ve/veya sayısal prosedürler kullanılmalıdır. Bununla birlikte, başlangıç tasarımı, tam ölçekli arazi deneyleri yapılarak ve daha sonra arazi verileri ile öngörülen sonuçların ilişkilendirilmesiyle sık sık değerlendirilmelidir. Tasarımın girdi verileri içinde arazi verisinin tekrarlı geri beslemesi güvenilir tasarım tekniklerinin gelişimine yardım etmektedir. Böylece, enstrümantasyon ve deneyim sonuçlarına göre belirlenen tasarımda değişikliklere gidilebilir. Bu prosedürün prensipleri Şekil 8' de gösterilmiştir (Singh *et al.* 2006).



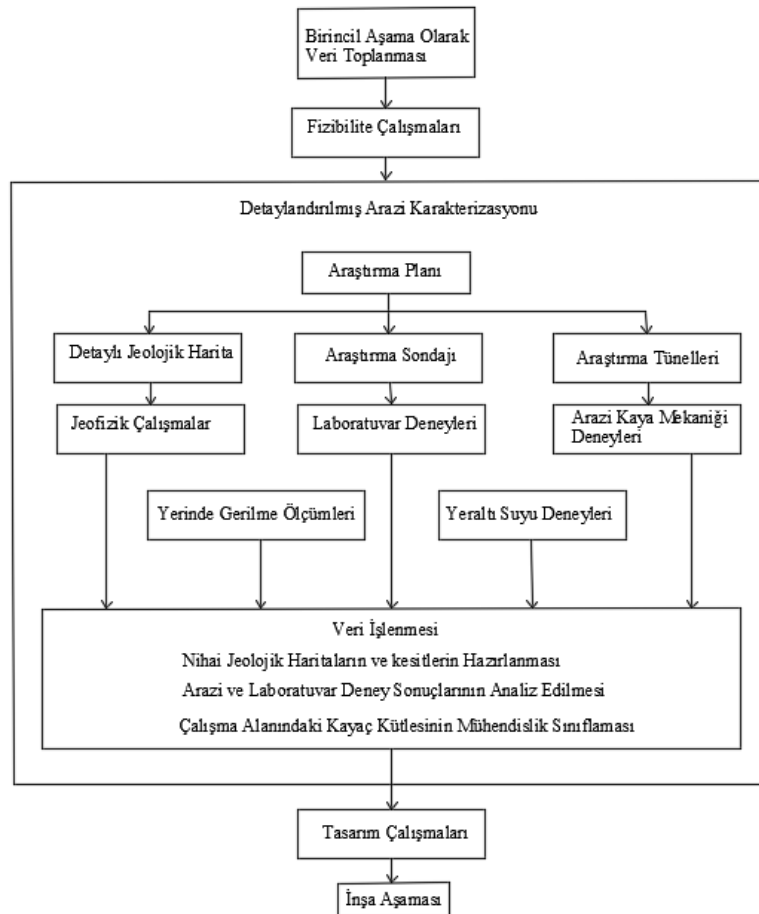
Şekil 8. Tünel tasarım prosedürü (Singh *et al.* 2006).

Kazı yapılacak olan kaya/zemin ortamının depremden nasıl etkileneceğinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi amacıyla, bu bölgelere ait jeolojik tanımlamanın yapılması ve yerel ortam koşullarının ayrıntılı bir şekilde etüt edilmesi gerekmektedir. Tünel yapımına uygunluk açısından değerlendirilecek bir bölgedeki kaya/zemin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla arazi ve laboratuvar çalışmaları yapılarak inceleme alanının statik ve dinamik özellikleri belirlenmektedir (Köse vd. 1987).

Tünel boyunca tünel kazısının yapılacağı kaya/zeminin tanımlanması amacıyla jeofizik etüd, düşey/yatay sondaj, pressiyometre deneyi, basınçlı su testleri, laboratuvar deneyleri, yüzey jeolojisi, mühendislik jeolojisi ve özellikle yapısal jeoloji ile hidrojeolojik çalışmalar yapılmaktadır (Anonim 1997). Tünel sondajları yerindeki jeolojik – geoteknik etütlerle

belirlenen zayıf zonlar (fay, birim kontağı v.b.), kaya kütle sınıflamasına veri toplamak amacı ile değişen her jeolojik birimde ve gerekli görülen diğer yerlerde de planlanmakta ve bu sondajlar tünel kırmızı kotunun 20 m altına inecek şekilde tamamı karotlu olarak yapılmaktadır (Anonim 2005). Tünel hattının jeolojisini belirlemek için araştırma çalışmalarında aşağıdaki bölgelerin öncelikli olarak göz önüne alınması gerekmektedir:

- Tünel üzerinde genelde zayıf zemin/kaya koşullarının olduğu sığ örtü kalınlığının bulunduğu kesimler
- Derin kırılma, sık eklem ve ayrışma potansiyeli olan kaya/zemin birimleri
- Su taşıyıcı zonlar, akifer özelliği olan litolojiler
- Fay zonları ve özellikleri
- Uyumsuzluk yüzeyleri ve şişme potansiyeli olan düzeyler (Anonim 1997). Yukarıda izah edilen tünel tasarımına ait arazi karakterizasyon programının aşamalarının algoritması Şekil 9’da gösterilmektedir.



Şekil 9. Arazi karakterizasyon programının aşamaları (Bieniawski 1989).

Jeofizik Çalışmalar

Yeraltı inşaatında modern teknik, yeniliğin özü olan modern bilginin kullanımına ihtiyaç duymaktadır. Yeraltı kazılarının artan sayısı ile kazıların ekonomik bir şekilde

yapılabilmesi ve güvenli olabilmesi daha önemli hale gelmiştir. Yeryüzünün altındaki jeolojik yapıyı belirlemek için ilk jeofizik tekniklerinin gelişmesi potansiyel petrol ve doğal gaz rezervlerinin araştırılması amacıyla geliştirilmiştir. Bugün, jeofizik teknikler yalnızca petrol ya da gaz rezervlerinin belirlenmesi amacıyla değil aynı zamanda yeraltı boşluğunun etkin kullanımına ihtiyaç duyulduğunda açılan yüzeyden ihtiyaç olunan derinliklerdeki yeraltı açıklıklarında da kullanılmaktadır (Singh et al. 2006).

Garvimetreler, manyetometreler ve elektrik resistivitenin kullanımını içeren jeofizik metotlar kayaç kütlelerinin porozite, yoğunluk ve magnetik gibi özelliklerini belirlemek için kullanılabilirler. Ancak, bu metotlar çok az oranda göreceli olarak kayaç kütlelerinin yapısal karakteristiklerini verirler ve bazen sonuçları yorumlamak çok zor olabilir. Diğer yandan, jeolojik koşullar uygun olduğunda, sismik metotlar yapısal durum, kaya tabakalarının konfigürasyonu ve faylar gibi ana jeolojik süreksizliklerin lokasyonu üzerine değerli bilgiler verebilir. Jeofiziksel ve sismik ölçümlerin her ikisinde yorumlanması kompleks bir süreçtir ve sonuçların güvenilebilir olabilmesi için çok fazla pratik deneyime sahip olan operatöre ihtiyaç duyulmaktadır (Hoek et al. 1980). Çok yaygın olan jeofizik metotlar, uygulama yeri ve değerlendirme kriterleri Tablo 2’de özetlenmektedir.

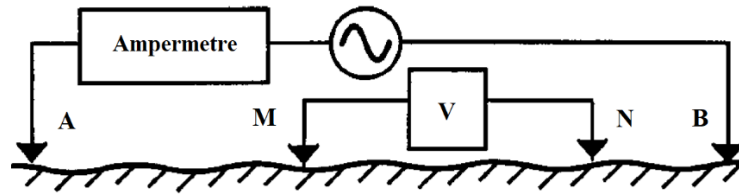
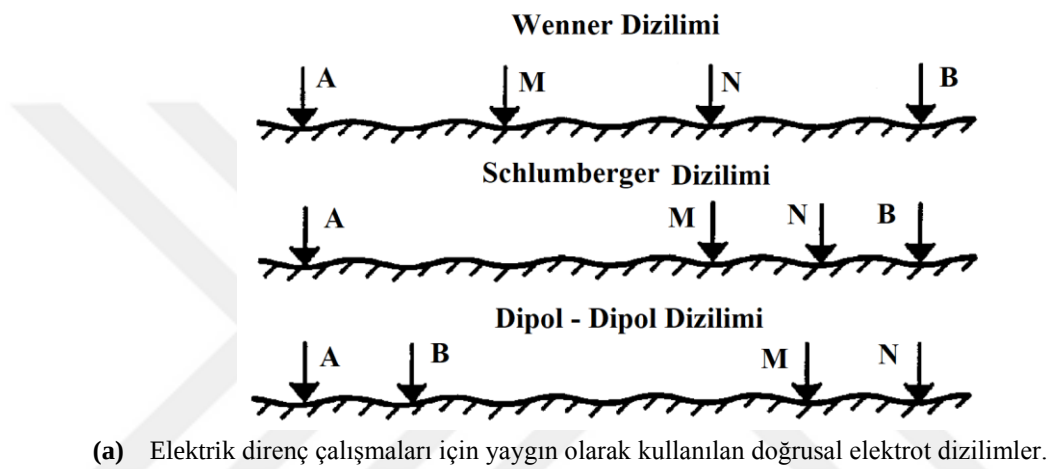
Tablo 2. Özetlenmiş jeofizik yöntemler (Hunt 2005).

Metot	Uygulama Yeri	Değerlendirme
Sismik kırılma	Tabaka derinlikleri ve hızları, zemin veya su durumunu belirlemek ve jeolojik kesitleri yorumlamak için.	Hızlar derinlikle ve kaya yüzeyinden düzenli olarak artıyorsa kullanılabilecek yöntemdir.
Direkt sismik (karşıt kuyu, kuyu yukarı, kuyu aşağı)	Belli bir tabaka için hızları, dinamik özellikleri, kaya kütle kalitesini belirlemek.	Sondaj kuyularına ihtiyaç duyulmaktadır. Karşıt kuyu en iyi sonuçları üretmektedir, maliyetlidir.
Sismik yansıma	Genel olarak yeraltı kesitini betimlemektedir. Su varlığı en temiz kesitleri üretmektedir.	Zeminden elde edilen sonuçların yorumlanması zordur. Hızlar elde edilemez. Tabaka derinliğini değerlendirmek için başka veriler gerektirir.
Elektriksel resistivite	Tuzlu su sınırlarını, temiz granül malzemeyi ve kil tabakalarını, kaya derinliğini ve anomalilikleri ölçerek yeraltı madenlerini bulmak için.	Çok fazla değişkene maruzdur. Mühendislik özellikleri elde edilemez. İnceleme yapılandırılmaları değişkenlik göstermektedir.
Elektriksel iletim	Verinin yorumlanmasıyla yer altı kesitlerinin elde edilmesi. Anomalilerin ölçülmesiyle kirlilik yükseltilerinin belirlenmesi.	Yorumlanması zordur. Çok fazla değişkene maruzdur. Mühendislik özellikleri elde edilemez.
Gravimetre	Anomalileri ölçerek faylar, domlar, tabakalar arasına giren kayalar, boşlukları, gömülü vadileri belirlemektedir.	İhtiyaç duyulan Hassas yüzey yükseklikleridir. Yoğunluk farklılıklarını ölçmektedir.
Magnetometre	Mineral araştırmaları, büyük magmatik kütlelerin lokasyonunun araştırılması.	Normalde yeraltı suyu ve mühendislik çalışmalarında kullanılmamaktadır.
Yer Radarı	Genel yeraltı kesitini belirlemektedir. Hacim sınırlarını, kaya yatağını, gömülü boruları göstermek için en kullanışlısıdır.	Yorumlanması zordur. Mühendislik özellikleri elde edilemez.
Tomografi	Yüzeysel yeraltı kesitini belirlemektedir. Su boru hatlarının kaçakları için kullanışlıdır.	Yorumlanması zordur. Yüzeysel derinlikle sınırlıdır. Mühendislik özellikleri elde edilir.

Elektrik rezistivite

Bu yöntem genellikle boşlukları veya yerel olarak farklı malzemeleri bulmak amacıyla kullanılmaktadır. Karayolu uygulamaları ile ilgili olarak, bu yöntemler potansiyel bir yol güzergâhı boyunca karstik boşlukların aktivitesini değerlendirmek veya belirli yeraltı boşluklarını bulmak için uygulanabilir. Teknikler yalnızca nitel bilgi sağlar ve genellikle iki veya üç aşamalı bir araştırma programının parçasıdır (Sabatini et al. 2002).

Elektrik özdirenç etüdünde, iki toprak bağlantısı (elektrotlar) aracılığıyla bir elektrik akımı (I) toprağa geçirilir ve voltaj potansiyel farkı (V) ikinci bir elektrot çifti boyunca ölçülür. Bu işle arazide üç farklı şekilde yapılabilmektedir (Şekil 10).



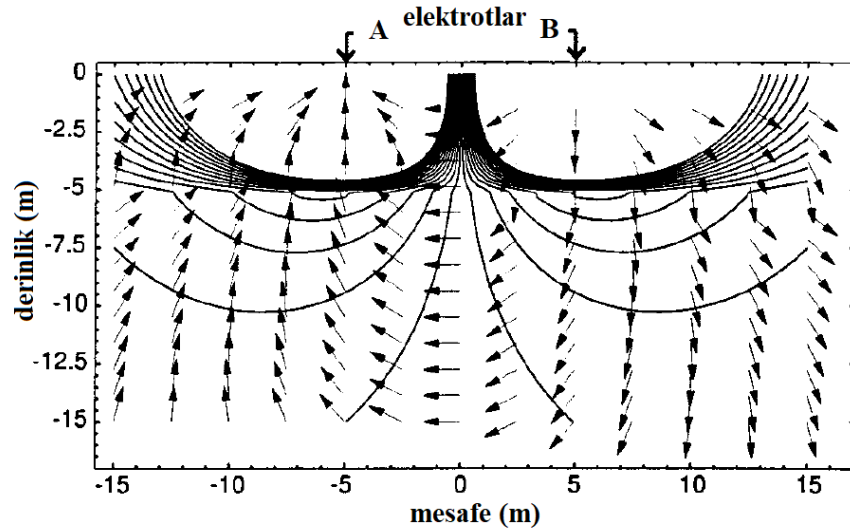
(b) Elektrik direnç araştırmalarında dört yüzey elektrotunun genel konfigürasyonu. Akım, A ve B elektrotları aracılığıyla iletilir ve gerilim okumaları M ve N elektrotlarıyla yapılır (Herman 2001).

Şekil 10. Elektrik direnç çalışmaları

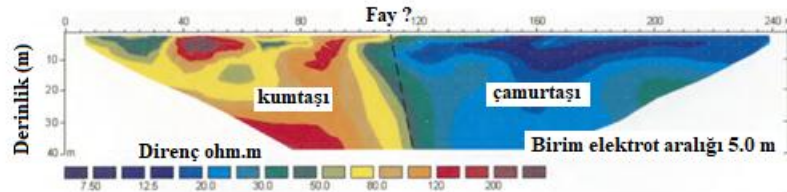
Gerilimin akıma oranı, elektrotlar arasındaki mesafeyi hesaba katan bir faktörle çarpıldığında, görünür özdirenç olarak bilinen bir parametreyi verir. Ölçüm homojen bir yüzey üzerinde yapıldığında, görünen özdirenç zeminin gerçek özdirençine eşittir. Bununla birlikte, direnç karmaşık bir yeraltı yapısı üzerinde uygulandığında, görünen özdirenç, yüzeyin altındaki çeşitli kayaların özdirençlerinin ağırlıklı ortalamasıdır (McDowell et al. 2002).

1980' lerin sonunda geliştirilen bir dizi ekipman, elektrot dizilerinin bilgisayar kontrolünü ve sahadaki verilerin otomatik olarak işlenmesini kapsamaktadır. Bu bilgisayar kontrollü çoklu elektrot dizileri ve yinelemeli modelleme teknikleri artık hızla jeolojik

tabakaların elektriksel görüntüsünü (veya tomogramını) üretebilmektedir (Şekil 11 ve 12) (McDowell et al. 2002).

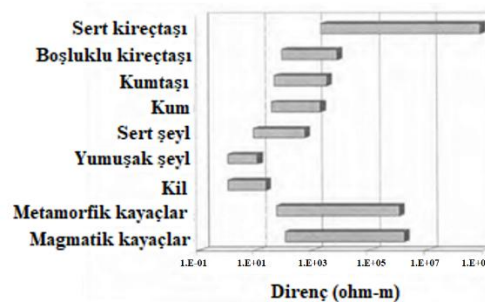


Şekil 11. Homojen olmayan bir ortamda yapılan elektrik direnç çalışması için iki elektrot arasındaki akım geçişi ve eşpotansiyel yüzeyler (Herman 2001).



Şekil 12. Bilgisayar kontrollü çok elektrotlu görüntüleme sisteminden tipik elektriksel görüntü (McDowell et al. 2002).

Elde edilen kesitlerin yorumu, mevcut jeolojik yapısıda dikkate alınarak yapılmalıdır. Yapılan yorumlar sonucunda, formasyon elektrik rezistivite değerlerine göre kaya türlerine çevrilerek sınırlar beirlenir. Zemin ve kaya türlerine ait tipik direnç aralıkları Şekil 13' de gösterilmektedir (McDowell et al. 2002).



Şekil 13. Zemin ve kaya türlerine ait tipik elektrik rezistivite aralıkları (McDowell et al. 2002).

Jeolojik birimlerin geçirdikleri veya geçirmekte oldukları evrelerin elektrik rezistivite değerlerine etkileri sonucu küçülme ve büyümesi de aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Keçeli 2009). Bazı jeolojik malzemeler için tipik resistivite değerleri Tablo 3'de verilmektedir.

Kil alterasyonu	↓	Atmosferik Etki	↑
Çözünme	↓	Genç jeolojik oluşum	↑
Faylanma	↓	Karbonatlaşma	↑
Tuzlu Su Girişimi	↓	Silikatleşme	↑
Makaslanma	↓	Metamorfizma	↕
Özdirenç: Küçülür: ↓ Büyür: ↑ Büyür veya küçülür: ↕			

Tablo 3. Sedimenter kayaların elektrik rezistivite değeri (McDowell et al. 2002).

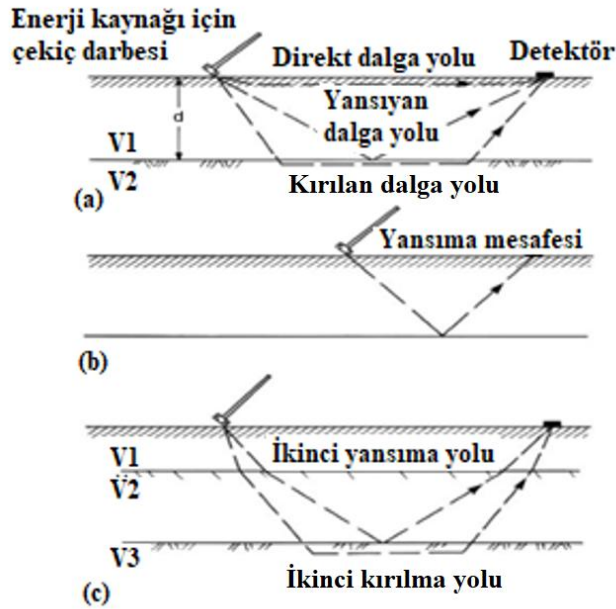
Kayaç Türü (Sedimenter Kayaç)	Rezistivite Aralığı (Ωm)
Arjilit (Kiltaşı)	$10 - 8 \times 10^2$
Killer	$1 - 10^2$
Konglomera	$2 \times 10^3 - 10^4$
Dolomit	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Kireçtaşı	$50 - 10^7$
Marl	$3 - 70$
Petrol kumu	$4 - 8 \times 10^8$
Kumtaşı	$1 - 6.4 \times 10^8$
Kireçtaşı	$50 - 10^7$
Konsolide olmamış ıslak kil	20

Sismik yöntemler

Bu yöntemler, yeraltı malzemelerinin kayma dalgası hızı ile ilgili nicel veriler sağlama potansiyeline sahip oldukları için karayolu ve genel geoteknik mühendislik uygulamalarında giderek popüler hale gelmektedir. Kayma dalgası hızı, doğrudan mukavemet ve zemin/kaya tipi ile ilişkili olan birim şekil değiştirme ve malzeme sertliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, bu teknikler genellikle bir zemin kesitindeki dikey sertlik profilini ve zemin ile kaya arasındaki arayüzü değerlendirmek için kullanılmaktadır (Sabatini et al. 2002).

Kırılma teknikleri, her bir jeolojik tabakadaki malzeme türünü, yeraltı su tablasının yerini gösteren basınç dalga (P) hızlarını, çeşitli alt tabakaların derinliklerini, fayların yerlerini ve büyük mağaraları belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Sismik yöntemler ile kırılma yoğunluğu ve ayrışma derecesi gibi kaya kütlesi özellikleri, Young modülü, Poisson oranı, kayma modülü ve yığın modülü gibi dinamik zemin ve kaya özellikleri hakkında bilgi sağlamaktadır. Yansıma teknikleri öncelikle deniz araştırmalarında kullanılmıştır. Tabakalarda,

tuz kubbelerinde, faylarda ve deniz heyelanlarındaki değişiklikleri gösteren deniz tabanı profilinin resimli bir kaydını sağlamaktadırlar. Sismik yansımadan daha ziyade sismik kırılma teknikleri kullanılmaktadır. Çünkü doğrudan ve kırılan dalgalar önce gelir ve yansıyan dalgaları maskeleyebilir. Yansıma sismolojisi normalde derin araştırmalar ve profil oluşturmak amacıyla deniz çalışmaları için kullanılır, ancak kırılma ve doğrudan teknikler gibi hız verilerini doğrudan üretmemektedir. Hızlar doğrudan ölçülmediği için, tabakaların malzeme tipleri ve derinlikleri, ancak diğer verilerle korelasyonlar yapıldığında ortaya çıkartılabilir. Bazı enerji kaynakları tarafından oluşturulan elastik dalgalar, jeolojik ortamlardan karakteristik hızlarda geçerler ve malzemenin değişmesi ile kırılır, yansıtılır veya doğrudan malzeme içinde ilerler. Sonuç olarak bu dalgalar cihazlarla tespit edildikleri ve kaydedildikleri yüzeye geri dönerler (Şekil 14) (Hunt 2005).



Şekil 14. Elastik dalgaların yayılma yolları (a – direkt, b – yansıma, c - kırılma sıg yeraltı boyunca oluşan sismik dalgalar) (Hunt 2005).

Birkaç tür elastik dalga vardır. Basınç veya birincil (P) dalgalar, yüzey boyunca ve yeraltında yayılabilen, yansıma ve kırılma ile yüzeye geri dönen veya malzemelerden doğrudan dalgalar olarak geçebilen cisim dalgalarıdır. P dalgaları en yüksek hızlara (V_p) sahiptir ve kayıt cihazına ilk gelen dalgalarlardır. Kayma (S) dalgaları aynı zamanda P dalgalarına benzer şekilde ilerleyen ve hareket eden cisim dalgalarıdır. S dalgaları iyi konsolide malzemeler için yaklaşık $0.58V_p$, kötü konsolide zeminler için $0.45V_p$ hızlarında yayılır. Suyun içinde ilerlemezler ve hava boşluklarını geçemezler. Rayleigh (R) dalgaları, yüzeyin yakınında sadece genliği derinlikle hızlı bir şekilde zayıflayan ve yaklaşık $0.9V_p$ hızında hareket eden bir bozulma ile yayılır. Kaydedilen hız daha düşük olabilir, çünkü R dalgaları normalde düşük hız değerine sahip malzemenin yüzeye yakın yerlerde hareket eder ve genellikle uzun bir zaman aralığında

yayılmış düşük frekanslı dalgaların bir izinden oluşur (Hunt 2005). Hunt (2005) ve Waltham (2009)'a göre kayaların ve zeminlerin tipik basınç dalgası (P) hızları sırasıyla Tablo 4'de verilmektedir.

Tablo 4. Tipik basınç dalgası (P) hızları (kayaların ve zeminlerin) (Waltham 2009).

Kaya ya da Zemin	Sismik Hız (P Dalgası)
Birikinti ve zemin	500 – 1500 (m/s)
Şeyl ve kumtaşı	1500 – 4000
Kireçtaşı	3000 – 5000
Granit	4500 – 5500
Parçalanmış kayaç	$V \text{ (parçalanmamış)} \times RQD / 100$

Balyoz darbeleri veya patlamalarla üretilen şok dalgaları jeolojik sınırlara yansır veya kırılır. Yansıma sismiği, sismik dalgaların derin tabakaların sınırlarından yansımasıyla oluşan bir tekniktir. Kırılma sismiği ise sismik dalgaların sıkı jeolojik sınırlardan kırılarak ve yüzeye dönmesiyle oluşmaktadır. Kırılma, derinlikteki tabakada daha hızlıdır. Zemin tabakasında yavaş yayılan dalga kaya tabakasında hızlı bir şekilde yayıldığından dolayı kaya ile zemin tabakalarının kontağının belirlenmesi için ideal bir yöntemdir. İlk dalga gelişlerinin grafiksel çizimi, sınırlarla ve hızlarla (dolayısıyla mukavemet özellikleri) derinlikleri ortaya çıkarır. Yüzey Dalgası Sismik Dikey Rayleigh dalgaları, ardışık derinliklerde yaklaşık 50 m' ye kadar zemin sertliğindeki değişiklikleri değerlendirmek için kullanılır. Sismik hız (kayadan şok dalgasının hızı) kaya dayanımı ile artar ve RQD ile ilişkili olarak daha fazla kırılma ile azalır (Waltham 2009).

Genellikle sismik kırılma yöntemleri ile değişik derinliklerde bulunan zemin ya da kaya birimlerinin farklı hız değerlerine sahip olması ile birimlere ait fiziksel ve mekanik özellikler belirlenebilmektedir. Temel ekipman bir enerji kaynağı (balyoz veya patlayıcılar); arazi keşfi için elastik dalga detektörleri (sismometreler) yani jeofonlar (elektromekanik transdüserler) veya su araştırması için hidrofondlar (basınca duyarlı transdüserler) olan ve bir güç kaynağı, amplifikatörler, zamanlama cihazları ve bir kayıt cihazı içeren bir kayıt sismografıdır. Ekipman, tekli veya çoklu kayıt kanalları sağlayabilir. Kaydedilen elastik dalga formları sismogram olarak sunulur. Çalıştırma prosedürleri tek kanallı sismograf işlemi, alete kısa bir mesafede, zemine yerleştirilmiş tek bir jeofon kullanır. Yerde bulunan aletten yaklaşık 3 m uzakta bir metal plakaya bir balyozla vurulur (Şekil 15). Darbe anı balyozu cihaza bağlayan bir tel aracılığıyla kaydedilmektedir. Şok dalgaları incelenen ortamdan geçer ve varış zamanları sismogram veya dijital okuma olarak kaydedilmektedir. Plaka dönüşümlü olarak jeofondan yaklaşık 3 m' lik aralıklarla yerleştirilir ve balyozla her aralıkta vurulmaktadır. Tek kanallı

üniteler, basit jeolojik koşullar altında sığ araştırma çalışması için kullanılmaktadır. Çok kanallı sismograf, aynı anda ve sürekli olarak iletilen ve kaydedilen sismik dalgaları tespit etmek için bir diziye yerleştirilmiş 6 ile 24 veya daha fazla jeofon kullanılmaktadır (Hunt 2005).



Şekil 15. Tekli kanal kırılma sismografı ve metal plakaya balyozla vuran çalışan sismik dalgalar üretmektedir (Hunt 2005).

Normal yayılma hız eğrilerini tanımlamak için 30 ft (10 m) aralıklarla jeofonlar ile 100 ft (30 m) derinlikleri araştırmak için yaklaşık 300 ft (100 m) olacaktır. Jeofizikçi beklenen jeolojik koşullara uyacak şekilde yayılma uzunluğunu ve jeofon aralığını belirler. Uygulamada, genellikle formasyonun değişimlerini ve eğimli kaya yüzeylerini tespit etmek için formasyonun bir ucundan ve daha sonra diğer ucundan (ters profil) bir atış yapılır. Bazen, enerji serilimin ortasında ya da diğer lokasyonlarda tetiklenmektedir. Sismik dalga formları genellikle özel bir kâğıda sismogram olarak kaydedilir. Şekil 16' da, en yüksek hızda hareket eden P dalgası, ilk kaydedilecek olan dalgadır ve bundan dolayı ilk farkedilecek olan dalga türüdür. Karakteristik iletim hızlarına göre çeşitli tabakalara derinlikleri belirlemek için kullanılır. S dalgası daha sonra dalga dizisinde büyük bir darbe olarak görünür ve genellikle tanınması zordur. İlgili şekilde, yayılmayı ilk gelişlerden itibaren ara bir açıda geçerek daha düşük bir hızı gösterir. S dalga hızları, ileten ortamın dinamik özelliklerini hesaplamak için P dalga hızlarıyla birlikte kullanılır (Hunt 2005).



Şekil 16. Dalgaformlarının sismogramları 25 ft aralıkta 300 lb ağırlıktaki düşüşle neden olan kayıtlardır (Hunt 2005).

Yöntemin zayıflıkları değerlendirilecek olursa eğer;

- Daha yumuşak, daha düşük hızdaki malzeme, daha yoğun, daha yüksek hızdaki malzeme ile maskelenir ve doğrudan açıklanamaz.
- Zemin yüzeyinden tabakanın tepesine kadar derinliği yaklaşık dörtte birinden daha az olan bir tabaka ayırt edilemez.
- Ayırılmış kaya parçalarının oluşumlarında, düzensiz anakaya yüzeylerinde veya daha yumuşak kayaya daldırılmış ince, sert katmanları olan kayalarda düzensiz veya "ortalama" sonuçlar elde edilir.
- İyi tanımlanmış tabaka arayüzleri, hızın derinlikle birlikte kademeli olarak arttığı yerlerde örneğin zemin ile kayanın birim kontağında olduğu gibi elde edilemez.
- Donmuş zeminde, atış noktası ve jeofonlar donmuş bölgenin altında olmalıdır, çünkü şok dalgaları donda alttaki katmanlara göre çok daha hızlı hareket eder.
- Kullanım alanları yabancı gürültü kaynakları nedeniyle kentsel alanlarda uygulama sınırlıdır (Hunt 2005).

Kaya ve Zeminde Yapılan Sondaj Çalışmaları

Sondaj araştırmalarının yapılmasının amacı;

- ✓ Jeolojik yorumlamaları doğrulamak,
- ✓ Kaya kütlelerinin kalitesini ve karakteristiklerini belirlemek için sondaj kuyularını ve karotları incelemek,
- ✓ Yeraltı suyu çalışmalarını yapmak,
- ✓ Kayaçların petrografik analizleri yapmak
- ✓ Kayaçların ve zeminlerin mekanik deneylerini yapmak amacıyla numune elde etmek için yapılmalıdır (Bieniawski 1989).

Kaya sondajı

Yapılan sondaj çalışmaları ile kayalar genellikle;

- | | |
|------------------|---------------------------|
| ✓ Sondaj Bilgisi | ✓ Yapı |
| ✓ Kayaç Türü | ✓ Kaya Kalite Oranı (RQD) |
| ✓ Bozunma | ✓ Dayanım |
| ✓ Renk | ✓ Kusurlar |

belirlenmesi neticesinde tanımlanmaktadır (Look 2007).

Yapılacak olan kaya sondaj çalışmalarında Look (2007)'ye göre olması gereken bilgiler Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Kaya sondaj çalışmalarında olması gereken bilgiler (Look 2007).

Sondaj Bilgisi				Kaya Tanımlaması				İntakt dayanım				Kaya kütle eklemleri		Tabaka Bilgisi				
Derinlik	Sondaj metodu	Karot verimi	Su seviyesi	Bozunma Derecesi	Renk	Yapı	Kaya Kalite Değeri	Nem	Tahmini Dayanım	Nokta yük indeksi (eksenel)	Nokta yük indeksi (çapsal)	Tek eksenli basınç dayanımı	Eklemler aralığı	Eklemler tanımlaması (derinlik, tür, açı, sertlik, dolgu malzemesi, kalınlık)	Köken	Grafiksel log	Yükseklik	Derinlik

Zemin sondajı

Yapılan sondaj çalışmaları ile zeminler genellikle;

- ✓ Sondaj Bilgisi
- ✓ Zemin Türü
- ✓ Birleştirilmiş zemin sınıflaması sembolü (USC)
- ✓ Renk – Plastisite/Partikül tanımlaması
- ✓ Yapı – yoğunluk (Dayanım)
- ✓ Nem Durumu
- ✓ Köken
- ✓ Su seviyesi

belirlenmesi neticesinde tanımlanmaktadır (Look 2007).

Yapılacak olan zemin sondaj çalışmalarında Look (2007)'ye göre olması gereken bilgiler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Zemin sondaj çalışmalarında olması gereken bilgiler (Look 2007).

Sondaj Bilgisi				Zemin Tanımlaması					Arazi Deneyleri				Tabaka Bilgisi				
Derinlik	Sondaj metodu	Su seviyesi	Numune türü	USCS sembolü/zemin türü	Renk	Plastisite/partikül türü	Yapı	Yoğunluk	Nem	Standart Penetrasyon Türü	Veyn Deneyi	Cep penetrometresi	Dinamik konik penetrometre	Köken	Grafiksel log	Yükseklik	Derinlik

Tünel Tasarımında Genel Yaklaşımlar

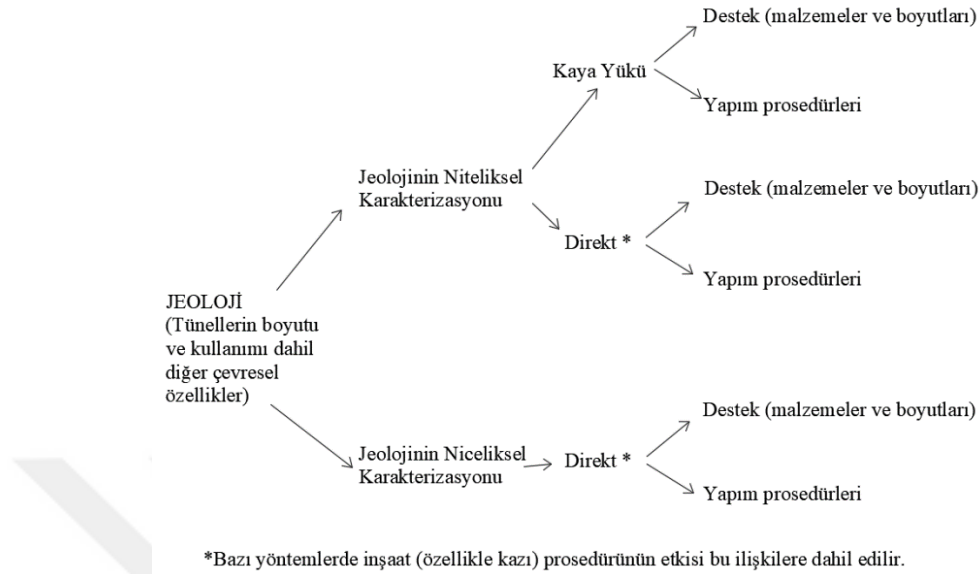
Bir yapının tasarımını yapmak için, yapıyı etkileyecek olan yükleri ve deformasyonları bilmek kadar malzemelerin özelliklerini bilmekte zorunludur. Bu değerler kolaylıkla iyi bilinen ya da test edilebilen özelliklere sahip malzemelerden üretilen yapılar için belirlenebilir. Tünel

tasarımcısı için temel sorun kısmi olarak özellikleri bilinen malzemeler ile tasarım yapmak zorunda olmasıdır. Kazı ortamının davranışı, tünel için ana yapı malzemesi olarak, tasarımın başlangıcında yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Bu duruma ek olarak, malzemelerin parametreleri tünel hattı boyunca özellikleri sürekli olarak değişmektedir. Jeolojik araştırmaların sonuçlarını yorumlamak, kazı ortamı ile destek sistemlerinin malzeme parametrelerini seçmek ve uygun tasarım modelleri ve metotlarının en iyi şekilde kullanılması tasarımcının görevidir. Açıktır ki araziye yansıtmayan malzeme özelliklerine ait girdi mükemmel hesaplama modelleri olsa dahi en iyi tasarımcı bile yalnızca gerçeğe çok az yaklaşan tasarım sonucuna ulaşabilir. Bu durumdan dolayıdır ki her zaman arazi ölçümleri aracılığı ile inşa süresince tünel tasarımının doğruluğunun kanıtlanması önerilmektedir (Anonymous 1988).

Kaya mühendisliğini de içerecek şekilde ve daha genel anlamda geoteknik çalışmalarda tasarım yöntemleri farklı başlıklar altında değerlendirilebilir. Bunlardan görgül ve sayısal yöntemlerden yapıların ve kazıların duraylılık koşullarının araştırılması ve kazı çevresindeki gerilme – deformasyon ilişkilerinin analizi için yararlanılır. Görgül yöntemler, kazılarda yapılan gözlemler ve elde edilen verilerin genellikle istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmesi sonucunda mühendislik deneyimi esas alınarak geliştirilmiş yöntemlerdir (Ulusay vd. 2007). tünel tasarımlarında yönelik görgül ve analitik yaklaşımlar, kaya kütle koşullarını gereksinimleri veya inşaat prosedürlerini desteklemek için ilişkilendirilmeye çalışılır. Görgül yaklaşımlar açık bir davranış modeli olmadan geliştirilirken, analitik yaklaşımlar malzemenin davranış modeline ihtiyaç duymaktadır. Görgül yaklaşımlar prototip gözlemlerin toplamından elde edilmektedir; analitik yaklaşımlar "birincil ilkelerden" türetilmektedir. Bununla birlikte, görgül yaklaşımlar, davranışsal bir modele dayanmaktadır. Görgül ve analitik yöntemlerin her ikisinde tünel desteğinin boyutlarını, miktarlarını ve inşaat prosedürlerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Görgül yöntemler, açık bir model oluşturmak için yeterli bilgi bulunmadığında, bir modelin parametre durumları tahmin edilemediğinde veya zaman ve maliyet sınırlamalarında engellemeler bulunduğu kullanılmaktadır. Bu durum görgül yöntemlerin öncelikle iki uygulamada kullanılmakta olduğu anlamına gelmektedir:

- i. İnşaattan önce (sınırlı jeolojik bilgi): ilk desteğin tasarımı, inşaat prosedürünün belirlenmesi, nihai desteğin ön tasarımı.
- ii. İnşaat sırasında (sınırlı bir süre): ilk desteğin belirlenmesi (başlangıç) veya ilk desteğin uyarlanması, yapım prosedürünün belirlenmesi, nadir durumlarda nihai desteğin tasarımı.

Görgül yöntemlerin tahmini niteliksel olmasına rağmen, bunlara yol açan prosedür nicel veya nitel olabilir. Bu prosedür, tekniklerin geçerliliğinin değerlendirilmesinde önemlidir. Görgül yöntemlerin akış şeması Şekil 17’de gösterilmiştir (Einstain 1979).



Şekil 17. Görgül yöntemlerin akış şeması (Einstain 1979).

Yeraltı yapılarının inşasında, çalışma yapılan ortam hakkında bilgi (çevre kayanın jeolojik – geoteknik özellikleri, basınç koşulları, asal gerilmeler vb.) yapım aşamasına geçildikten sonra daha belirgin hale gelmeye başlamaktadır. Çalışma ortamının tanımlanması ve modellenmesine yönelik çalışmalar, belirli bilimsel temellere dayalı öngörülerdir. Ancak jeolojik koşullar karışık ortam koşullarını barındırmaktadır ve her zaman sistematik modellerle açıklanamazlar. Ancak bu belirsizlikleri minimize etmek için kaya kütle sınıflama sistemleri geliştirilmiştir. Kaya kütle sınıflama sistemi mühendislik uygulamasında aşağıda sıralanan amaçlardan bir ya da daha fazla nedenden dolayı kullanılmaktadır:

- ✓ Benzer davranış gruplarında belirli kaya gruplarına bölmek
- ✓ Her bir grubun karakteristiklerini anlamak için dayanak sağlamak
- ✓ Mühendislik tasarımı için sayısal veri oluşturmak
- ✓ İletişim için genel bir temel oluşumunu sağlamak

Güncel olarak kullanımda olan ana kaya sınıflama sistemleri Tablo 12’de verilmektedir (Shroff *et al.* 2003). Tablo 7’de verilen kaya kütle sınıflama sistemlerinden temel olan ve tez çalışması kapsamında değinilecek olan sistemler ilgili başlıklar altında değerlendirilmiştir.

Tablo 7. Kaya kütlesel sınıflama sistemleri (Shroff *et al.* 2003 ve Anonymous 1988).

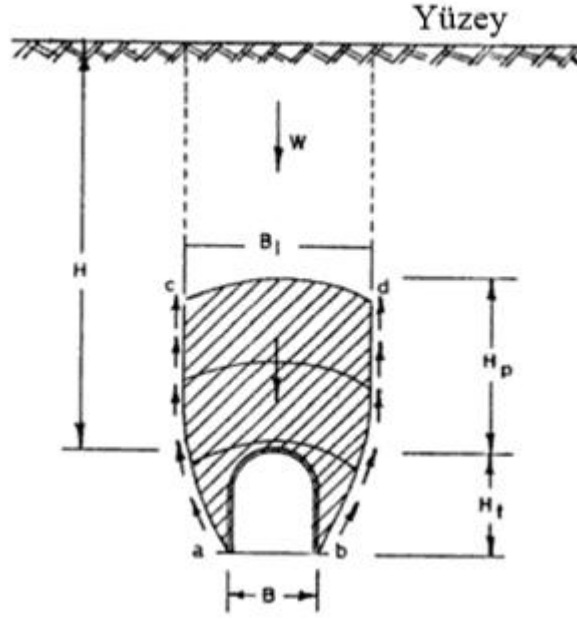
Sınıflama Türü	Geliştiren kişi	Köken ülke	Uygulamalar
Kaya yükleri	Terzaghi, 1946	ABD	Çelik destekli tüneller
Ayakta kalma süresi	Lauffer, 1958	Avusturya	Tünel İnşası
Kaya kalitesi belirleme (RQD)	Deere, 1964	ABD	Karot loglama,
Sağlam kaya dayanımı	Deere ve Miller, 1966	ABD	İletişim
RSR Konsepti	Wickham ve diğ., 1972	ABD	Tünel İnşası
Jeomekanik-Sınıflama RMR Sistemi)	Bieniawski, 1973	Güney Afrika ve ABD	Tüneller, madenler ve temeller
Q-Sistemi	Barton ve diğ., 1973	Norveç	Tünelcilik (büyük açıklıklar)
Dayanım/Blok boyutu	Franklin, 1975	Kanada	Tünelcilik
Temel jeomekaniksel sınıflama	ISRM- 1981	Uluslararası	Genel
ÖNORM, Avusturya	Rabcewicz/Pacher, 1972	Avusturya	Tünelcilik

Görgül tasarım yöntemleri

Terzaghi yaklaşımı

Mühendislik amaçları için kaya yığınlarını sınıflandırmada ilk başarılı girişim muhtemelen Karl Terzaghi tarafından yapılmıştır. Terzaghi (1946) çelik sürenlerin taşıyacağı tünel çatısının üzerindeki zayıflamış zonun yüksekliği olan kaya yük faktörünü (H_p) tanımlamıştır. Bu kaya yük faktörü 20. yy'ın sonları süresince Alplerde 5.5 m genişliğinde çelik sürenlerle desteklenmiş olan Tren/Y-1 tünellerinden Terzaghi tarafından tahmin edilmiştir. Bu araştırmalarda, bilinen dayanıma sahip ahşap blokları çevrelenen kaya yığını için çelik sürenleri kilitlemeye kullanmıştır. Kaya yükleri yenilmiş ahşap bloklarının bilinen dayanımından tahmin edilmiştir. Terzaghi desteklerde kaya yüklerinin hareketlerinin geri analizini yapmak için bu gözlemleri kullanmıştır (Singh *et al.* 2006). Terzaghi'nin yaklaşımı kayalar; sağlam, tabakalı, orta derece eklemlili, bloklu veya kenetli, parçalı ve sıkışan kaya olarak gruplara ayırmıştır.

Terzaghi (1946) çelik sürenlerin dizaynına uygun olarak kaya yüklerinin değerlendirilmesinin ilk rasyonel metodunu formüle etmiştir. Bu sınıflama çelik sürenlerin dizaynı için uygun iken püskürtme beton ve kaya bulonlarının kullanıldığı modern tünelcilik yöntemleri için uygun değildir. Ancak çelik yaylar ile desteklenen tünellerde kaya yüklerini tahmin etmek için bu sistem yavaş yavaş gelişmiştir. Kaya yüklerinin ana özellikleri Şekil 18'de gösterilmiştir. (Shroff *et al.* 2003).



Şekil 18. Tünel kaya yükü basitleştirilmiş diyagramı (Shroff *et al.* 2003).

Bir tünelin yapımı süresince, kaya yığınınındaki rahatlama tünelin kenar duvarları üzerinde meydana gelecektir. Şekil 18’de verilen acdb alanı içerisinde zayıflayan kaya/zemin tünel içerisine doğru hareket etme eğiliminde olacaktır. Bu harekete ac ve bd yanıl sınırları boyuncaki sürtünme kuvveti tarafından karşı konulacaktır. Bu sürtünme kuvvetleri tünelin her bir kenarındaki malzemenin üzerine zemin ağırlığının büyük bölümünü aktaracaktır. Tünelin kenarları ve taç kısmı yalnızca tünelin boyutlarına H_t ve B ’ye ve kaya yığınının karakteristiklerine bağılı olarak hareketin meydana geldiğı kaya/zemin zonunun genişliğı B_1 ve H_p yüksekliğine eşit bölgenin dengesini sağlamaya ihtiyaç duymaktadır (Shroff *et al.* 2003). Terzaghi (1946) kaya yığınlarının yapısal süreksizliklerini incemiş olup ve yapılan çalışmalar Tablo 8’de verilmektedir (Singh 2006).

Tablo 8. Terzaghi’nin kaya yükü teorisinin kaya sınıflamasının tanımı (Singh 2006).

Sert ve bütün	Kaya bozulmamıştır ne eklem ne de çatlak sistemi vardır. Eğer fragmentasyon oluşmuşsa, bütün kayayı boydan boya parçalar. Kazıdan sonra, kaya biraz çiçeklenmeye ve taç kısmından kabarak yenilmelere sahip olabilir. Yüksek basınç altında, kaya tabakasında rastgele ve şiddetli kabarıp dökölme taç kısmından ya da duvarlardan oluşabilir. Tek eksenli basınç dayanımı 100 MPa veya daha fazladır.
Sert tabakalı ve şistoziteli	Kaya sert ve tabakalıdır. Tabakalar genellikle büyük ölçüde ayrılmaktadır. Kaya zayıflık düzlemlerine sahip olabilir veya olmayabilir. Böyle kayalarda, kabarıp dökölme genelde yaygındır.
Bütün, kısmen eklemli	Eklemli kaya, eklemli büyük ölçüde aralıklıdır. Eklemli bağlayıcı olabilir veya olmayabilir. Hatta çok ince çatlaklar içerebilir ama eklemli arası devasa bloklar derinlemesine kenetlenmişlerdir. Bundan dolayı düşey duvarlar yanıl desteğe ihtiyaç duymazlar. Kabarıp dökölme meydana gelebilir.
Bir dereceye kadar bloklu ve bozulmuş	Eklemli daha az boşlukludur. Bloklar yaklaşık 1 m boyutundadır. Kaya sert olabilir veya olmayabilir. Eklemli kapanmış olabilir veya olmayabilir. Ama içsel kenetlenme tamdır ki yan basınç ortaya çıkmaz ya da beklenmez.
Çok bloklu ve bozulmuş	Yakın bir Şekilde yerleşmiş eklemli. Blok boyutları 1m den daha küçüktür. Bunlar birbirinden tamamiyle ayrılmış ve kusurlu bir Şekilde tutturulmuş olan sağlam(intakt) kaya bölümlerinden neredeyse kimyasal olarak oluşmaktadır. Düşük büyüklükteki bir miktar yanıl basınç beklenir. Düşey duvarlar destek gerektirebilir.

Tablo 8. (devamı)

Tamamen parçalanmış ama kimyasal olarak kenetleme var	Tüvenan agrega karakterine sahip intakt kayanın kimyasal olarak tutunmasından oluşmaktadır. İçsel kilitlenme yoktur. Dikkate değer yanıl basınç tünel desteklemelerine beklenir. Blok boyutu birkaç cm ile 30 cm olabilir.
Sıkışan kaya – orta derinlikli	Baskı yapma kayanın hacimde farkedilebilen artış olmaksızın açılan tünelin olduğu mekanik bir süreçtir. Ortalama derinlik göreceli bir terimdir ve 150 m den 1000 m ye kadar olabilir.
Sıkışan kaya – devasa derinlik	Derinlik 150 m’den fazla olabilir. Maksimum önerilen tünel derinliği 1000 m’ dir.
Şişen kaya	Şişme hacim değişimi ile bağlantılıdır ve genellikle su ya da nemin varlığındaki kayanın kimyasal değişiminden dolayıdır. Bazı şeyler havadan nemi absorbe eder ve şişer. Montmorillonit, illit, kaolinit vs. gibi şişen mineralleri içere kayalar şişebilir ve kayadaki desteklerde ağır basınçlar çıkabilir.

Jeomekanik sınıflama

Jeomekanik Sınıflama olarak bilinen RMR sınıflama sistemi, 1972-1973 yılları süresince geliştirilmiştir. Yıllar geçtikçe daha fazla arazi çalışması uygun bir şekilde yapıldıkça modifiye edilmiş olup uluslararası standartlar ve prosedürler ile uyumlu hale getirilmiştir. RMR sistemi popülerliğini korumakta olup dünya çapındaki birçok araştırmacı tarafından uygulanarak ve farklı eklemeler yapılarak geliştirilmiştir. Bu çeşitli uygulamalar, 351 sayıda arazi çalışması geçmiş ile, sistemin kabul edilebilirliği, kullanım kolaylığı ve mühendislik uygulamalarındaki (tüneller, şaftlar, madenler, şevler ve temeller gibi) çok yönlülüğüne işaret etmektedir. RMR sistemi bütün tasarım problemlerine cevap verememesine rağmen mühendislik uygulamaları için geliştirilmiştir. Aşağıda sıralanan altı parametre RMR sistemini kullanmak için kayayı sınıflamada kullanılmaktadır:

- i. Kayanın tek eksenli basınç dayanımı
- ii. RQD değeri
- iii. Süreksizliklerin açıklığı
- iv. Süreksizliklerin durumu
- v. Yeraltı suyu koşulları
- vi. Süreksizliklerin konumu

RMR sınıflamasında, kaya kütlesi birkaç alana bölünmekte ve her bir alan içerisinde az yada çok üniform olan belli özelliklerdeki yapısal bölgelere bölünmektedir. Kaya kütleleri doğal olarak süreksizlikler içermesine rağmen bu bölgelerde homojenlik olabilir. Kaya türü ya da süreksizlik açıklıkları ayrılan bölgede aynıdır. Çoğu durumda, yapısal alanların sınırları ana geoteknik özelliklere (faylar, dayklar, kesme zonları, vb.) denk gelmektedir. Yapısal alanlar tanımlandıktan sonra, herbir yapısal alan için sınıflama parametreleri arazideki ölçümlerden elde edilmekte ve ilgili çizelgeler kullanılarak verilen değerlerin karşılıkları işaretlenmektedir. İlk kez 1976 yılında önerilen sistemde; kayanın tek eksenli basınç dayanımı, RQD değeri,

süreksizliklerin açıklığı, süreksizliklerin durumu, yeraltısuyu koşulları ve süreksizliklerin konumuna bağlı olarak bir puanlama yapılmakta ve kaya kütlesi 5 sınıfa ayrılmaktadır. Buna bağlı olarak da kazı ve destek sistemleri önerilmektedir. Tünelcilik uygulamalarında süreksizlikler ile ilgili parametreler dışında kazı öncesinde diğer parametreler hakkında oldukça objektif fikir sahibi olunabilen bu sistemde, süreksizliklerin durumu ile ilgili değerlendirmeler yapılırken mostra veren kesimler değerlendirmeye alınabilmektedir. Ancak süreksizliklerin devamlılığı ve yüzey koşullarının derinlerdeki durumu tünel kazısı başlamadan önce sağlıklı bir şekilde değerlendirilememektedir (Bieniawski 1989). İlgili kaya/zemin ortamına ait değerlendirmeler yapıldıktan sonra elde edilen RMR puanlamasına göre, ilerleme, kaya bulonu, püskürtme beton ve çelik iksa gibi destekleme sistemleri seçilmektedir. Bu bilgiler Tablo 9’da verilmektedir.

Tablo 9. RMR destek ölçüleri (Bieniawski 1989).

RMR	İlerleme	Kaya Bulonu (20 mm çapında, enjeksiyonlu) tamamı	Püskürtme Beton	Çelik İksa
81 – 100	Tam ayna ilerleme adımı 3 m	Noktasal bulonlar hariç desteklemeye gerek yoktur.		
61 – 80	Tam ayna ilerleme adımı 1 – 1.5 m, aynadan 20. m de desteği tamamla	Lokal olarak, taçta 2.5 m aralıklı 3 m uzunluğunda bulon, ara ara çelik ağ ile.	İhtiyaç olduğu yerde taçta 50 mm	Yok
41 – 60	Taç ve altyarı ilerlemesi: taç ilerlemesinde 1.5 – 3 m, herbir patlamadan sonra desteğe başla, aynadan 10.m de desteklemeyi tamamla	Taç kısmındaki hasır çelik ile beraber duvarlar ve taçta 1.5 – 2 m aralıklı 4 m uzunluğunda sistematik bulon.	Taç kısmında 50 – 100 mm ve duvarlarda 30 mm	Yok
21 – 40	Taç ve altyarı ilerlemesi: taç ilerlemesinde 1 – 1.5m, kazı ile eş zamanlı olarak desteklemeyi inşa et, aynadan 10.m de	Hasır çelik ile beraber duvarlar ve taçta 1 – 1.5 m aralıklı 4 – 5 m uzunluğunda sistematik bulon.	Taç kısmında 100 – 150 mm ve duvarlarda 100 mm	İhtiyaç olunan yerde 1.5 m aralıklı hafif ile orta çelik iksa
≤ 20	Çoklu kazı: taç ilerlemesinde 1.5 – 3 m kazıyla beraber desteklemeninde yapılması gerekiyor. Püskürtme beton patlatmadan hemen sonra	Hasır çelik ile beraber duvarlar ve taçta 1 – 1.5 m aralıklı 5 – 6 m uzunluğunda sistematik bulon. Bulonlu invert.	Taç kısmında 150 – 200 mm, duvarlarda 150 mm ve 50 mm aynada	Orta ile ağır aralığında iksa, Çelik kaplama ile beraber 0.75 m aralıklı ve ihtiyaç duyulan yerde süren. Yakın invert.

Q sınıflama sistemi

Norveç Geoteknik Enstitüsü (NGI) sınıflaması ya da Q sistemi 1974’de NGI’de Barton, Lien ve Lunde tarafından geliştirilmiştir. Bu sistem 200 tünelin vaka analizinden elde edilen sonuçlar temelinde oluşturulmuştur. Tünel desteklerinin dizaynına uygun olan sayısal sınıflama sistemidir. Q sistemi 6 farklı parametreyi kullanarak kaya kütle kalitesinin sayısal değerlendirmesidir. Bu altı parametre aşağıdaki formülde belirtildiği gibi bütün kaya kütlelerinin kalitesini vererek 3 bölümde gruplandırılmıştır (Ulusay 2007).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2.1)$$

RQD: Kaya kalite göstergesi

J_n : Eklem set sayısı

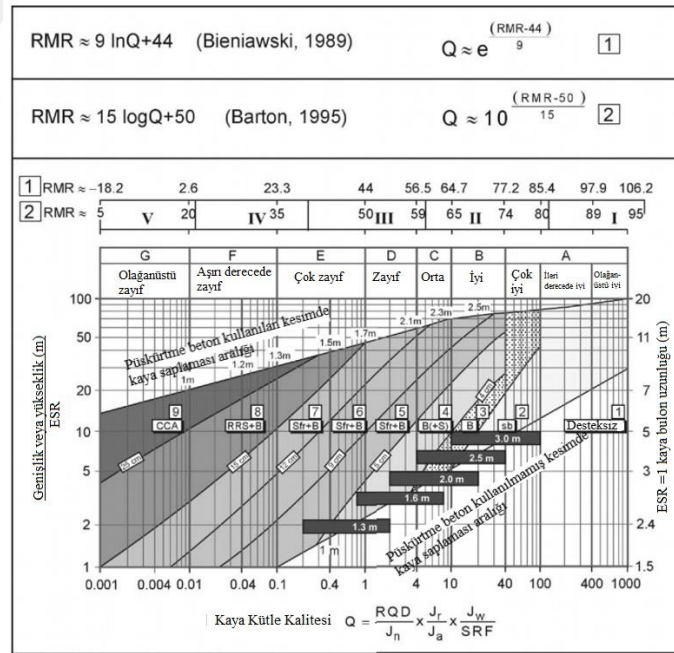
J_r : Eklem pürüzlülük sayısı

J_a : Eklem alterasyon sayısı

J_w : Eklem su azaltma sayısı

SRF: Gerilme azaltma faktörü

Kâğıt üzerinde oldukça sayısal görünen bu sistemin arazide tüneller açısından, özellikle eklemlerle ilgili değerlendirmelerin yapılabilmesi için çeşitli kısıtları bulunmaktadır. Bu sistemin en büyük kısıtlarından biri RMR’de olduğu gibi süreksizliklerin derinlere indikçe yüzey koşullarının durumu ile devamlılıkları hakkında net değerlendirme yapma güçlüğü ve SRF ile ilgili puanlama yapılırken, uygulamada yerinde ölçümler yapılmamasından ötürü bu değerinin tahmine dayalı ve hatalı belirlenmesidir. SRF değerinin yüksek seçilmesi Q puanını önemli ölçüde düşürmektedir (Barton 2002). Kaya kalitesi ve boşluğun boyutlarına bağlı olarak önerilen Q- destekleme abağı Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19. Q- destekleme abağı (Barton 2002; Ulusay vd. 2007).

Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (YATM)

Singh et al. (2011) Yeni Avustralya Tünelcilik Metodu’ nu bir strateji olarak nitelendirmektedirler. YATM aşağıdaki esasları göz önüne alarak "ilerlerken inşa et" yaklaşımını benimsemektedir:

→ *Ne çok sert, ne de çok esnek*

→ *Ne çok erken, ne de çok geç*

YATM, kontrollü gerilme rahatlamasıyla tünel stabilizasyonunu bir araya getirmektedir. YATM ile kazıyı çevreleyen kaya ortamının bir miktar dayanımının kaybıyla sonuçlanan hasar verici zayıflamanın önlenerek destek elemanlarının inşa edilmesiyle birlikte kompleks yük sisteminden kendi kendini destekleyen yapı sistemine geçilmektedir. Kontrollü gerilme rahatlamasıyla oluşturulan stabilite, püskürtme beton tabakası ve sistematik kaya bulonuyla oluşturulan "yarı – rijit kaplama" ile elde edilmektedir. Radyal deformasyonlar ile gerilme rahatlamasına izin verildikten sonra gecikmesiz ve esnek destek uygulaması yapılmaktadır. Böylece tünel tavanındaki püskürtme beton kaplamasında oluşacak kayma gerilmelerinin gelişimi minimuma indirilmektedir (Singh et al. 2011).

Geleneksel tünel desteğinde çelik iksalar, kaya bulonları, çelik hasır ve püskürtme beton kullanılarak uygulanmaktadır. Bu destek kombinasyonu uzun yıllar boyunca kullanılmasına rağmen, genellikle Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (YATM) olarak adlandırılmaktadır. Püskürtme beton, ince bir destek tabakası oluşturmak için kazı duvarlarına püskürtülen beton şeklindedir. Çekme mukavemetini arttırmak amacıyla püskürtme betona yüksek mukavemetli lifler eklenmektedir. (Pariseau 2017). YATM kaya sınıflaması Tablo 10' da verilmiştir.

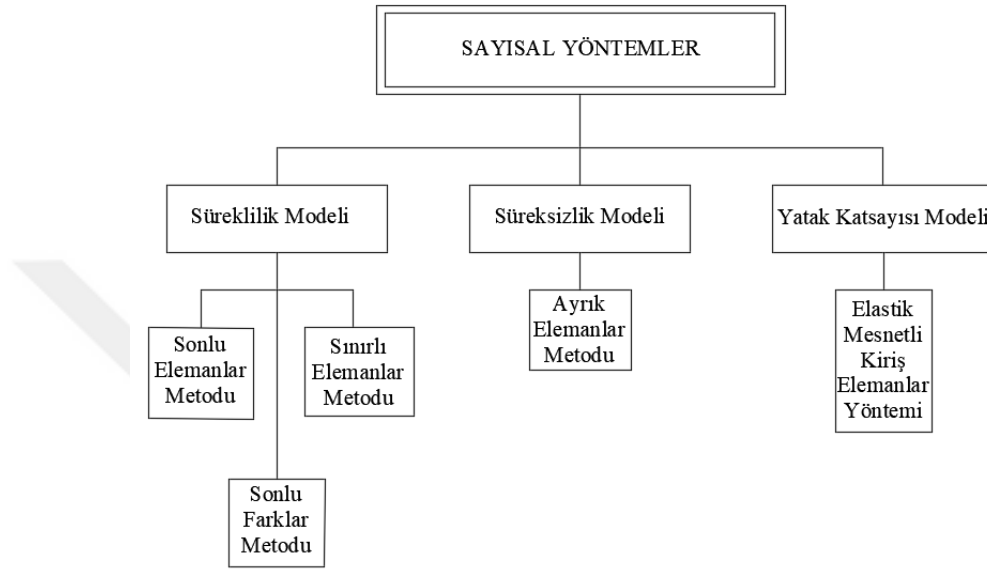
Tablo 10. Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu kaya sınıflandırma sistemi (Karayolları Teknik Şartnamesi 2013).

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

Tünel tasarımında sayısal modelleme

Sayısal modellemede, malzeme modeli ve girdi parametreleri analiz sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Esasında, oluşturulacak olan modeller, malzeme davranışını önemli oranda etkileyen, malzemenin mekanik davranışının matematiksel tanımıdır (Çelik 2017).

Tünel mühendisliği için kullanılan sayısal metotlar Şekil 20’de gösterilmiştir. Bu modeller süreklilik modeli, süreksizlik modeli ve yatak katsayısı modelidir (Sinha 1989).



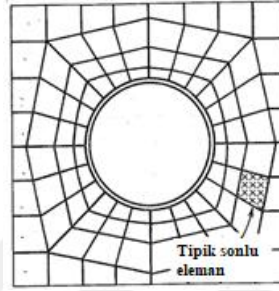
Şekil 20. Tünel mühendisliği için sayısal yöntemler ve modeller (Sinha 1989).

Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, sonlu elemanlar adı verilen birbirine bağlı küçük elemanlar kullanarak yapının modifiye edilmesini içerir. Her sonlu eleman ile bir yer değiştirme fonksiyonu ilişkilidir. Birbirine bağlı her eleman, doğrudan ve dolaylı olarak, düğümler, sınır çizgileri ve yüzeyler dâhil olmak üzere ortak (veya paylaşılan) arayüzler aracılığıyla diğer tüm elemanlara bağlanır. Yapıyı oluşturan malzemenin bilinen gerilme - birim şekil değiştirme ilişkisi kullanılarak, belirli bir düğümün yapıdaki diğer her elemanın özellikleri açısından davranışını belirleyebiliriz. Davranış veya her bir düğümü tanımlayan toplam denklemler seti, matris notasyonunda en iyi ifade edilen bir dizi cebirsel denklemlerle sonuçlanır (Logan 2011).

Sonlu elemanlar metodu (Şekil 21), yeraltını büyük çoğunlukla sürekli bir ortam olarak modellemektedir. Düzensizlikler münferit olarak modellenenebilir. Problemin etki alanı, örneğin kazı ortamı, düğüm noktalarında birbirine bağlı sınırlı sayıda elemanlara ayrıştırılmaktadır. Her bir eleman, geometrik olarak tanımlı ve boyut olarak sınırlıdır. Bu özellik metodun adının sonlu elemanlar metodu olarak isimlendirilmesine sebep olmuştur. Kazı ortamının gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi uygun malzeme davranışı ile tanımlanmaktadır. Analiz edilen gerilme,

birim şekil değiştirme ve deformasyon başlangıç yeraltı koşullarının değişmesiyle oluşmaktadır. Böylesi bir değişim, tünel açımı işleminin başlamasıyla meydana gelmektedir. Bir elemanda oluşan gerilme, birim şekil değiştirme ve deformasyon komşu elemanların ve diğerlerinin davranışını etkilemektedir. İçsel olarak bağlanmış olan elemanlar arasındaki karışık içsel ilişki yüksek oranda matematiksel problem oluşturmaktadır. Analizler sınırlı sayıdaki elemanlarla oluşan ağ yapısını modelleyen eşitlik matrisinin çözülmesiyle oluşturulmaktadır. Bir eşitlik sistemi global sertlik matrisi aracılığıyla bilinen nicelikler bilinmeyen nicelikler arasındaki ilişki ile kurulmaktadır (Sinha 1989).



Şekil 21. Tünel mühendisliği için sonlu elemanlar yöntemi (Sinha 1989).

Örneğin, düğüm kuvvetleri ile yer değiştirmelerin ilişkisi sonlu elemanlar ağının her tarafında bu yolla analiz edilmektedir. Tek seferde bütün düğüm noktalarında bilinmeyen değerler için çözüm konsepti örtülü yaklaşım olarak ifade edilmektedir (Sinha 1989).

Sonlu farklar yöntemi

Sonlu elemanlar programları büyük oranda daha çok bilinmektedir. Ancak sonlu farklar yöntemi belki de diferansiyel denklem kümelerini çözmek için kullanılan en eski sayısal tekniktir. Hem sonlu elemanlar hem de sonlu fark yöntemleri çözüm için bir dizi cebirsel denklemler üretmektedirler. Denklemleri elde etmek için kullanılan yöntemler farklı olmakla birlikte, elde edilen denklemler aynıdır. Sonlu fark programları genellikle denklemleri çözmek için "açık" zamanla ilerleyen bir şema kullanır, oysa sonlu eleman yöntemleri genellikle matris biçimindeki denklem sistemlerini çözmektedir (Wyllie et al. 2004).

Sınır eleman yöntemleri

Sınır Eleman Yöntemi (SEY) geomekanikteki problemlerin modellenmesi için bazı belirgin avantajlar önermektedir. Çünkü sonsuz ve yarı sonsuz ortamlara kolayca uygulanabilirler. Sınır eleman yöntemi, sonlu elemanlar metodu için (SEM) ihtiyaç olunandan daha küçük bir boyut düzeni olan ayırma etkisine ihtiyaç duymaktadır. Klasik SEY için ortamın homojen, izotropik, eklemsiz ve elastik olduğu kabul edilmektedir. SEY, geomekanikteki problemler ile metodun uygulanabilirliğinde sınırlamalar oluşturmaktadır. Ancak, çoklu alanlı

rijit – plastik SEY ile bu zorlukların bazılarının üstesinden gelinebilmektedir. Bu metotla, zemin/kaya desteği (ör. kaya ankrajları), kademeli kazı ve geri dolgu, sünme ve şişme, viskoplastik davranış gibi geomekanikte gerekli olan diğer özellikleri modellemek halen daha imkânsız ve çok zordur. Burada SEM ile bir kombinasyonun en iyi durum olduğu belirtilmektedir (Zaman et al. 2000).

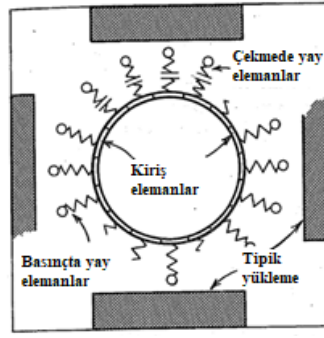
SEY yöntemi ile kompleks kazı ve destek sıralaması simülasyonu oldukça zordur. Bu durumlar neredeyse sığ tüneller için SEY’i yetersiz hale getirmektedir. SEY metodu SEM’den çok daha fazla matematiksel olmasının yanında çok zor bütünsellik sağlanmaktadır. Şöyle ki her iki modelin avantajlarından (SEY ile uzak alanları ve SEM ile yakın alanları) fayda elde etmek için SEY ve SEM’i kombine eden bazı girişimler bulunmaktadır. Ancak çoğu ticari bilgisayar kodları böylesi özelliklere sahip değildirler (Kolymbas 2001).

Ayrık Elemanlar Metodu (AEM)

Ayrık Elemanlar Metodu (AEM) sürekli ortamın yerine ayrık sistem olarak probleme uygulanır. Kazı ortamının davranışı ayrık eklemlerle yönetildiği yerde daha ziyade derin tünellere öncelikli olarak alınabilen ve yeni geliştirilmiş olan bir metottur. Metot yumuşak kazı ortamı için uygun değildir. Yapım sıralaması, kazı ve destek sistemi uygun bir şekilde AEM ile modellenemez. AEM’in yayılımı ve etkisi SEM ve SEY’den çok daha azdır ve yalnızca çok az ticari bilgisayar kodları bulunmaktadır. Nümerik sonuçların doğrulaması çok zordur. Sonuç olarak, yazılımın kalitesi garanti edilememektedir (Kolymbas 2001).

Elastik mesnetli kiriş elemanlar yöntemi

Kiriş – yay modeli SEM’in ortaya çıkışından önce öncü bir çalışma olarak hizmet etmiş ve yumuşak kazı ortamında açılan kalkan tünellerin segmentli tabakaları için geliştirilmiştir (Şekil 22). Kazı ortamı bir seri elastik yay tarafından ve tünel kaplaması ise elastik yaylar tarafından temsil edilmektedir. Yay – kiriş modeli göreceli olarak ilkel bir yöntemdir. Model gerilmesini yeniden dağılımını ya da plastik ortam özelliklerini göz önüne almamaktadır. Yük yer değiştirmelerden bağımsızdır ve büyük oranda rastlantısal olarak kabul edilmektedir. Sonuç olarak zemin – yapı etkileşimi yalnızca çok sınırlı ölçüde simüle edilebilmektedir. Herşeye rağmen, bu metottan basitliğinden dolayı faydalanılmaktadır. Özellikle, nihai kaplama tabakası genellikle kiriş – yay modeli temelinde ölçülendirilmektedir (Kolymbas 2001).



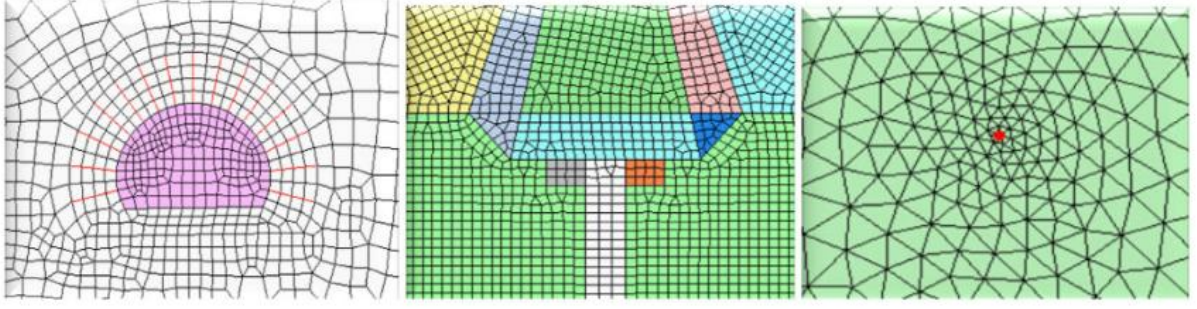
Şekil 22. Elastik mesnetli kiriş eleman modeli (Sinha 1989).

Hibrit yöntem

Hibrit yöntem, genellikle sınır elemanlar yönteminin sonlu elemanlar ya da ayrık elemanlar yöntemleriyle matematiksel olarak birleştirilmesinden oluşur (Nasuf vd. 1993). Hem sonsuzdaki sınır şartlarının otomatik olarak saptanması hem de bütün kaya kütesinin sonlu elemanlara ayrılması önlenerek zamandan ve gerekli olan bilgisayar hafızasından elde edilen kazanç yöntemin en önemli avantajlarından biridir. Yöntemde kazı alanı etrafında sonlu elemanlar yönteminden faydalanılırken, sonsuzda sınır değer şartları otomatik olarak hesaplanmaktadır. Hibrit yöntemler bu nedenle günümüzde de hem sonlu elemanlar hem de sınır eleman yönteminin avantajlı yanlarına sahip olduğu için tercih edilen yöntemler arasındadır (Kun 2010).

MİDAS GTS NX Yazılımı

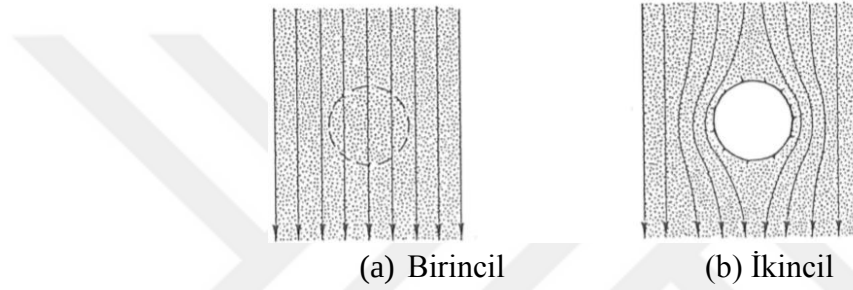
GTS NX, sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak zemin-yapı etkileşiminin değerlendirilmesi için geliştirilmiş bir simülasyon programıdır. GTS NX, mühendislerin kazı, yapı yerleşimi, yükleme ve tasarım ve inşaatı doğrudan etkileyen diğer faktörlerin adım adım analizini yapmalarına yardımcı olmaktadır. Program, gerçek olayları simüle etmek için çeşitli koşulları (zemin/kaya özellikleri, su seviyesi vb.) ve analitik metodolojileri desteklemektedir. Her türlü saha koşulu için ayarlar, doğrusal olmayan analiz yöntemleri (doğrusal/doğrusal olmayan statik analiz, doğrusal/doğrusal olmayan dinamik analiz, sızma ve konsolidasyon analizi, şev güvenliği analizi) ve çeşitli birleştirilmiş analizler (sızma-gerilme, gerilme-eğim, sızma-eğim ve doğrusal olmayan dinamik eğim birleştirilmiş analizi olarak) için simüle edilebilmektedir. İlgili yazılım için verilen sonlu eleman modelleri Şekil 23’de gösterilmektedir (GTS NX Manuel).



Şekil 23. GTS NX programı sonlu eleman modelleri (GTS NX Manuel).

Tünel Açılması Esnasında Karşılaşılan Olaylar

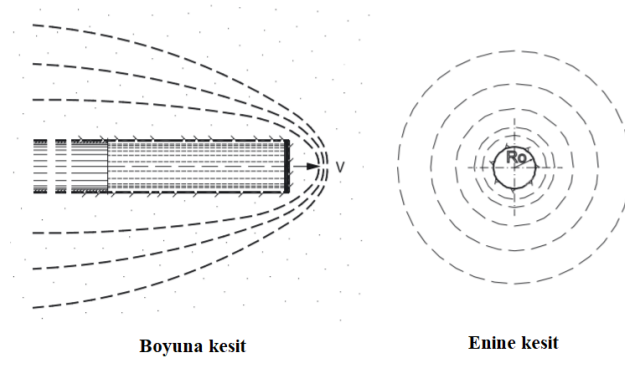
Kayada ya da zeminde bir yeraltı açıklığı oluşturulduğunda, kazı alanında daha önce var olan gerilmeler tünelin her iki yanında yeniden dağılmaktadır (Şekil 24) (Anonymous 1988).



Şekil 24. Gerilme dağılımı (Anonymous 1988).

Elastik malzemedeki kazıların etrafında etkilenen gerilmeleri, birim şekil değiştirmeleri ve yer değiştirmeleri hesaplamak için, elastisitenin matematiksel teorisine dönmek gerekmektedir. Bu durum bir grup denge ve yerdeğiştirme uyumluluk eşitlikleri, malzeme için yapısal eşitlikleri ve verilen sınır koşulları için çözülmektedir. Yanal ve kayma gerilmeleri kaplama tabakası oluşturulmadığı sürece açıklığın sınırında sıfır değerini almaktadırlar (Anonymous 1988).

Reaksiyon, ortamın kazı etkisine karşı deformasyon olarak tepkisidir. Aynı zamanda reaksiyon kazı boşluğunun çevresindeki ortamda daha fazla gerilme oluşumunu takiben örselenmiş olan bölgedeki kazı aynasının önünde oluşmaktadır (Lunardi 2008). Kazı esnasında oluşan gerilmelerin yönü ve dağılımı genel olarak Şekil 25’de gösterilmektedir.

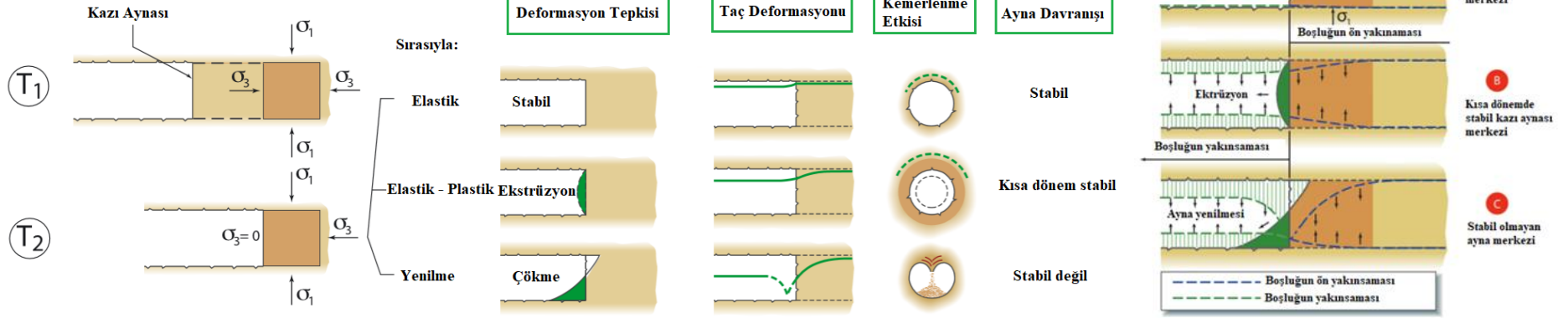


Şekil 25. Kazının ilerlemesi ile meydana gelen ortamdaki örselenmesinin yayılımı (Lunardi 2008).

Kazının teorik kesiti, içine giren malzeme girişi ile belirlenebilir. Kesite giren malzeme sıklıkla tünel duvarlarının stabilite kaybı ile eş anlamlıdır. Bunun için üç durum söz konusudur (Şekil 26) (Lunardi 2008).

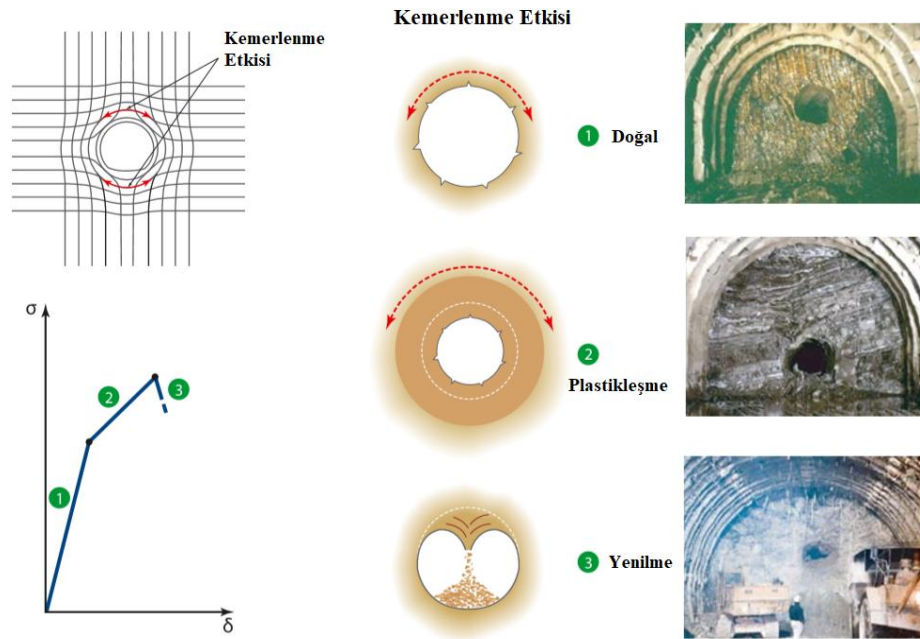
REAKSİYON

Kazı aynasının oluşumu kazı duvarındaki minor ana gerilmeyi sıfıra kadar azaltarak gerilme alanını değiştirmektedir.



Şekil 26. Kazı aynasının oluşumu ve kazı duvarındaki gerilme değişimleri (Lunardi 2008).

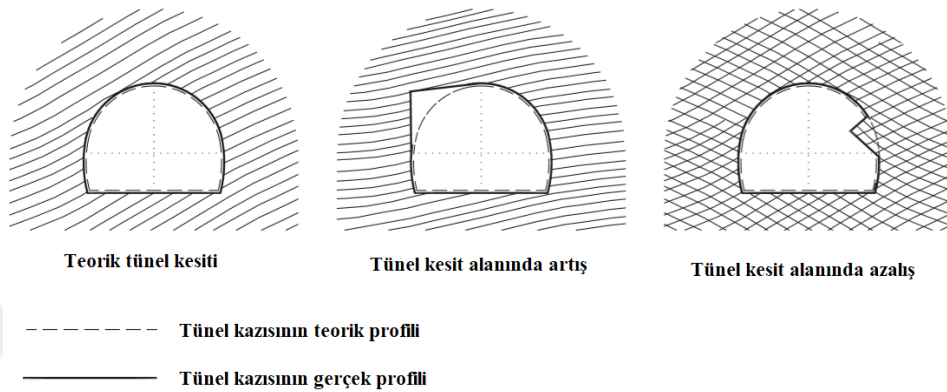
Tünel ilerlemesi sırasında üç eksenli gerilmeden düzlem gerilme durumuna geçilirse, kazı aynasında çevreleyici gerilmedeki sürekli azalma ($\sigma_3 = 0$) kazı aynasının önünde elastik aralıkta gerilme üretmektedir. Daha sonra kazıyla serbest kalan duvar (kazı aynası) sınırlı ve neredeyse ihmal edilebilecek deformasyonla stabil olarak kalmaktadır. Bu durumda kazı boşluğunun etrafındaki gerilme değişimleri (kemerlenme etkisi) kazı profilinin yakınında doğal yollarla üretilmektedir. Diğer yandan, kazı aynasında çevreleyici gerilmedeki sürekli azalma ($\sigma_3 = 0$), ayna ilerisindeki ortamda elasto – plastik aralıkta gerilme üretmektedir. Reaksiyon önemli hale gelmektedir ve kazıyla serbest kalan ayna, boşluğun içine doğru elasto – plastik aralıkta gerilme üretmektedir (Şekil 27). Bunun sonucunda kısa dönem stabilite koşullarına ulaşılmaktadır. Bu durum, müdahalenin yokluğunda, plastikleşmenin yayılması anlamına gelmektedir. Kazı duvarlarından radyal ve uzunlamasına yayılan plastikleşme ile "kemerlenme etkisi" nin tünel kesitinden uzaklaşarak kaya kütesinin içine doğru ilerlemektedir. Tünelin teorik kesitinden uzaklaşan bu hareket yalnızca kazı ortamını stabilize etmek için müdahale ile kontrol altına alınabilir (Lunardi 2008).



Şekil 27. Tünel açıklığı etrafındaki kemerlenme etkisi (Lunardi 2008).

Sonuç olarak kazı aynasında çevre gerilmesindeki sürekli azalma ($\sigma_3 = 0$), aynanın ilerisinde ki ortamda yenilme aralığında gerilme üretirse, deformasyon tepkisi kabul edilemez olur ve kazı aynasının ilerisinde bulunan ortamda stabilite kaybı koşulları meydana gelmektedir. Ve "kemerlenme etkisi" nin şekillenmesini imkânsız hale getirmektedir. Bu durum kohezyonlu olmayan ya da zayıf dayanımlı kazı ortamlarında oluşmaktadır ve "kemerlenme etkisi" doğal yollarla oluşmadığından dolayı yapay yollarla oluşturulması gerekmektedir. Bundan dolayı, statik durumda göçükleri önlemek ve tünelin teorik profilini sağlamak özellikle

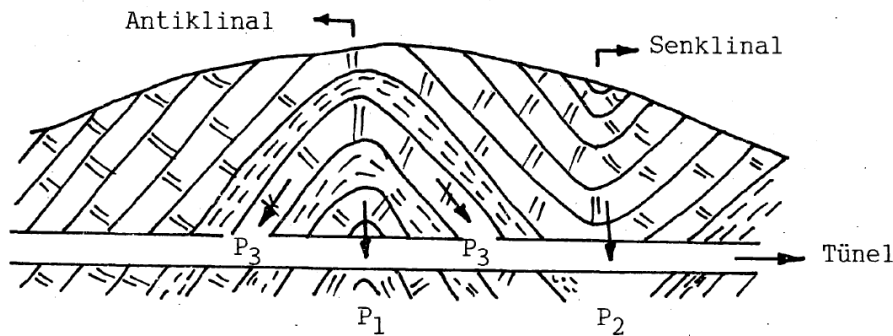
parçalanmış ve tabakalı kaya kütlelerinde önemlidir. Çoğunlukla kazı ortamının jeolojik yapısıyla ilgili olan kazara oluşan göçükler, kazı boşluğunun kemerlenme etkisinin değişimine neden olmaktadır ve bu durum ise tünel stabilitesini azaltmaktadır (Şekil 28). Ancak, belirtilmesi gereken en önemli sonuç kazı boşluğunu göz önüne alarak kemerlenme etkisinin pozisyonu ve şekillenmesi kazı eylemi ile kazı ortamının kalitesi ve "deformasyon tepkisinin" boyutu ile işaret edilmektedir (Lunardi 2008).



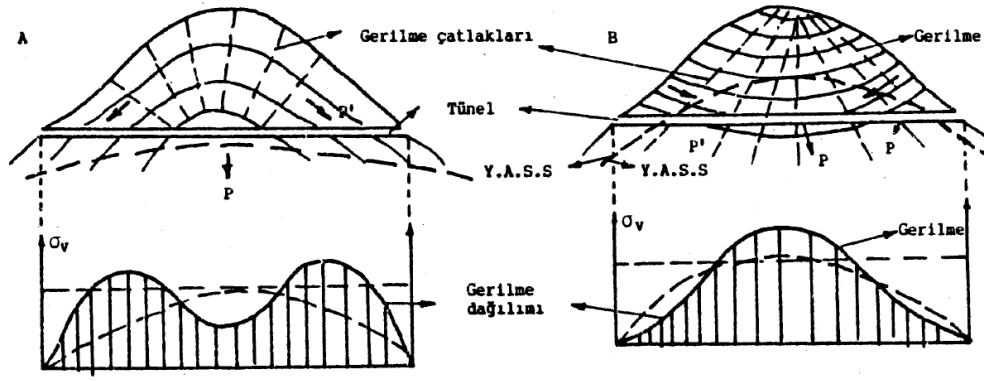
Şekil 28. Tünel ve göçük profili (Lunardi 2008).

Jeolojik Yapının Gerilme Durumuna Etkisi

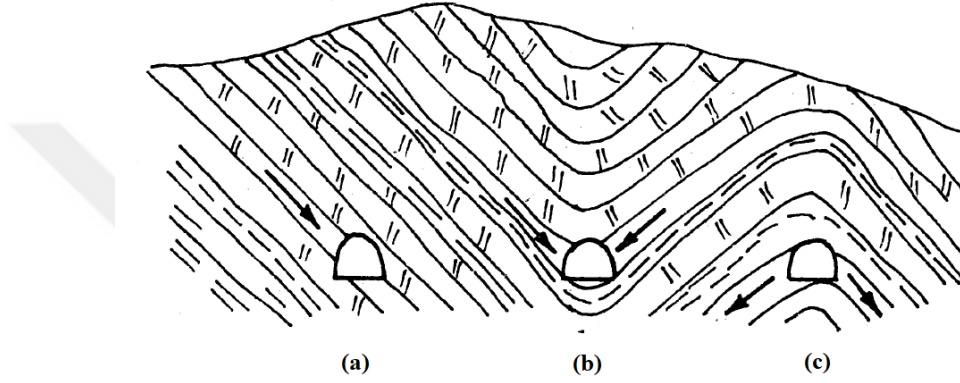
Jeolojik yapının gerilme durumuna etkisi büyüktür. Kıvrımlar, senklinaller, antiklinaller, faylar (graben, horst ve basamak faylar) gerilmelerin dağılımında önemli rol oynarlar. Gerilme büyüklüklerinin (şiddet ve doğrultu) ve yeraltı yapısının yerinin, konumunun, boyutlarının ve geçeceği güzergâhın belirlenmesi gerekmektedir. Jeolojik yapının tünel üzerinde meydana getireceği basınç durumları Şekil 29-31’de gösterilmiştir (Tarhan 2002).



Şekil 29. Kıvrım eksenine göre tabaka doğrultusunun dik olması hali. $P_1 < P_3 < P_2$: Tüneli etkileyen basınçlar (Tarhan 2002).



Şekil 30. Tünel ve kıvrım eksenlerinin birbirine dik olmaları halinde, yeraltı su seviyesi, gerilme dağılımı ve çatlakların durumu. A-Antiklinal, B-Senklinel (Tarhan 2022).



Şekil 31. Tünel eksenini ile kıvrım eksenine paralel olması, a-Kanatta, b, c- eksen üzerinde açılan tüneller (Tarhan 2022).

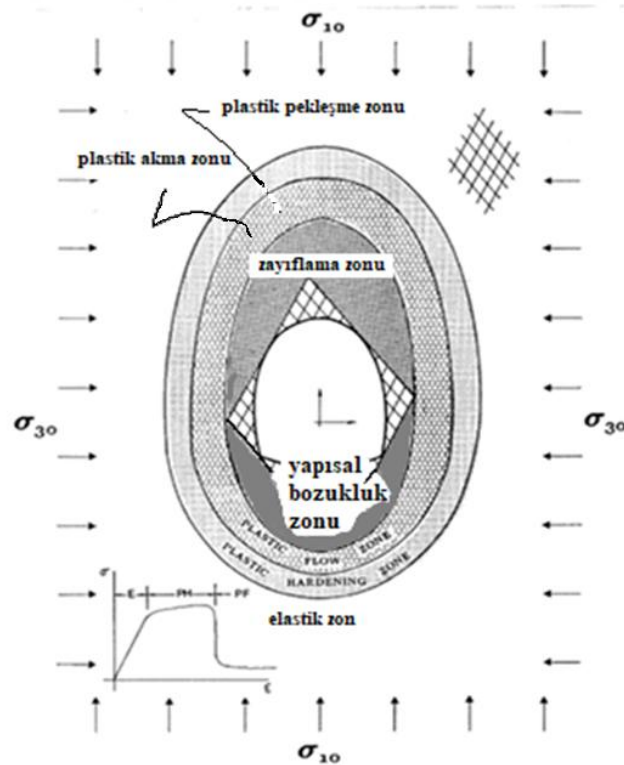
Denge Koşullarında Destek Sisteminin Etkisi

Tünel açıklıklarının çoğu yapım aşamalarında desteklenmektedir. Tünel açıklığının ve destek sisteminin davranışı zamana, destek sisteminin yerleştirilmesine ve deformasyon karakteristiklerine bağlıdır. Destek sisteminin oluşturulmasının nedenleri çeşitlidir. Bazen destek sistemine açıklığın anlık stabilitesini sağlamak için ihtiyaç duyulabilmekteyken bazende tünel kazısı yapılmadan önce destek sistemi oluşturulabilir (süren/şemsiye sistemi). Bu şartlar altında kazı ortamı ile destek sistemi arasındaki etki kazıya başlamadan önce ya da kazı süresince mobilize olmaktadır. Anında destekleme değil uzun dönemde desteklemeye ihtiyaç olduğu yerde destek, tünel aynasının arkasında uygun mesafede inşa edilmektedir. Daha sonra kazı ortamı ile destek arasındaki etkileşimden önce kısmi rahatlama meydana gelmektedir. Bundan dolayı genellikle kaplama kazı ortamı ile beraber inşa edilmekte ve kazı ortamı ile kontakt halinde oluşturulmaktadır (Hung et al. 2009).

Kısmi rahatlama, kaplama ve kazı ortamının her ikisinde gerilme oluşturarak deformasyonları tetiklemektedir. Hatta genel olarak deformasyonları kontrol altına almak için açıklığın stabilite kaybı ya da göçmesinin muhtemel olduğu yerde, açıklığın tamamen

kapanmasını engellemek amacıyla destek sistemi gerekli olabilmektedir. Büyük miktarda oluşan deformasyonlar kazı yüzeyi üzerinde istenmeyen oturmalara neden olacağından dolayı diğer mühendislik yapıları üzerinde olumsuz etkiler meydana getirebilmektedir. Böylesi deformasyonlar uygun bir şekilde erken aşamada sınırlandırılmalıdır. Zemin ya da kaya kütlelerinin deformasyonları, genellikle kazı ortamının bütünlüğünün bozulmasına ve dayanımında istenmeyen azalmaya neden olmaktadır. Eklemlili ya da zayıf kayada, açıklık üzerindeki malzeme zayıflama eğiliminde olup destekler üzerinde ciddi oranda yük uygulamaktadır. Oluşan bu yüklerin etkileri uygun destek sistemleri yapıldığında azaltılabilmektedir (Hung et al. 2009).

Kayanın dayanımı ve elastisite modülünün azalması sonucunda, tünel duvarlarında ek yanal hareket meydana gelmektedir. Tünel kesiti dışındaki zonda, kaya özellikleri önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir. Özellikle, elastisite modülü ve serbest basınç dayanımı değerleri lineer olmayan bir şekilde sürekli olarak örselenmemiş zondan tünel duvarına doğru azalma eğilimi göstermektedir. Zayıflayan malzeme tünel sınırına doğru sünme hareketi yaptığından dolayı tünel kesitinde daralma meydana gelmektedir. Kesit daralması uygulanan yük ile orantılı olarak değişmektedir (Hung et al. 2009). Genel olarak bir tünel kesitindeki gerilmeler Şekil 32’de görülmektedir.



Şekil 32. Tüneldeki gerilme durumları (Aydan 2019).

Gelen yükün bir miktarı kısmi rahatlama ile kazı ortamına taşıtılmaktadır (yani tünel boşluğu açıldıktan sonra yeniden oluşan gerilmelerden kaynaklı meydana gelecek olan deformasyonların bir kısmının kayaç ortamı içerisinde meydana gelmesi istenmektedir. Kayaç tarafından karşılanan bu deformasyon tünel desteğinin tasarımı açısından faydalı bir deformasyondur). Çünkü oluşan ek gerilmelerin hepsinin tünel desteği tarafından karşılanması durumunda çok büyük kesitlerde destek sistemleri gerektirmektedir. Bu şekilde gelen yükün bir miktarı kısmi rahatlama ile kazı ortamına taşıtılmaktadır. Yükün kalan kısmı ise daha düşük kesitlerde inşa edilecek destek sistemleri tarafından karşılanmaktadır. Ancak, göçmeye sebep olabilecek sıkışma, kayma yenilmeleri ve dilatasyona bağlı olarak tünel duvarlarında ve çatısında ilerleyen dönemde stabilite kayıpları ile sonuçlanabilmektedir. Böylesi yenilmelerin miktarı, lokasyonu ve zamanı kesin bir nitelendirmeye bağlı olmadığından dolayı, potansiyel hareketin tümü oluşmadan önce, destek sistemi genellikle iyi bir şekilde inşa edilmektedir (Hung et al. 2009).

Yumuşak kazı ortamlarında meydana gelecek olan deformasyonlardan kaçınmak mümkün değildir. Bazı hareketler destek sistemi ile kazı ortamı arasında yükün uygun bir şekilde dağılımını elde etmek için gereklidir. Bu durumlar destek sistemlerinin uygulanıp uygulanmayacağına ve uygulanması gerekiyor ise yerinin tespitinde göz önünde bulundurulmaktadır Bundan dolayı, destek sisteminin hızlı bir şekilde inşa edilmesi gerekmektedir. Ayrıca çoğu faktör yalnızca yapısal nedenlerden dolayı destek sisteminin yapılıp yapılmamasına ve nerede yapılması gerektiğini belirlemektedir (Hung et al. 2009).

Destek sistemlerinin kullanılmasının sebebi ne olursa olsun, bir desteğin maruz kalacağı yükler, desteğin oluşturulduğu anda geçerli olan denge şartına bağlıdır. Böylece, eğer nihai dengeye destek sistemi oluşturulmadan önce varılırsa, destekler kazı ortamından hiçbir şekilde yükü almayacaktır. Diğer taraftan, nihai denge oluşmadan önce destek sağlandığında, destek oluşturulduğu anda mevcut koşullara yeni sınır koşulları eklenir. Yeni nihai şartlar desteğin sağlandığı ana bağlıdır, destek ve kazı ortamı arasındaki etkileşimi içermektedir. Eğer büyük kesitlere sahip bir destek sistemi kazı aynasının dışındaki kesitte herhangi bir şekilde etkilenmeyen bir hayali süreçle kazı öncesi ortama yerleştirilebilseydi, kazı öncesi var olan arazi gerilmelerine benzeyen gerilmelere maruz kalacaktı (Hung et al. 2009).

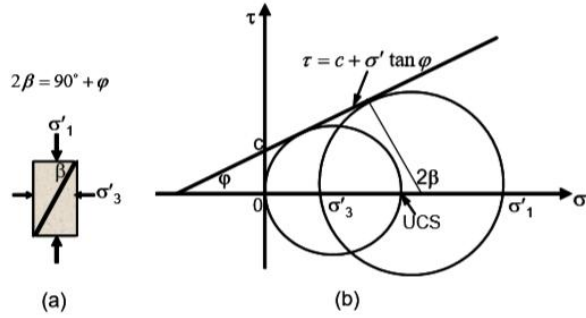
Malzeme Yapısal Modelleri

Zemin ve kaya mekaniğinde tercih edilen en popüler modeller aşağıda sıralanmakta olup tez çalışması kapsamında kullanılacak olan model yöntem başlığı altında detaylı bir şekilde izah edilecektir (Pariseau 2017):

1. Mohr – Coulomb (MC)
2. Hoek – Brown (HB)
3. Drucker – Prager (DP)

Asal düzlemde, (σ'_1 , σ'_2 , σ'_3) Mohr – Coulomb göçme kriteri aşağıdaki şekilde olduğu gibi ifade edilebilir:

Şekil 33' de Mohr – Coulomb dayanım zarfı ve Mohr dairesi gösterilmektedir. Göçme σ' ve τ değerleri dayanım zarfının altında olursa gerçekleşmeyecektir. Mohr – Coulomb kriterinde, iki sonuca dikkat etmek gerekiyor: (i) aradaki asal gerilme σ'_2 göçmeyi etkilememektir (ii) kayma kırılması düzlemi aradaki asal gerilmenin yönü doğrultusunda gerçekleşmektedir. Bu şekilde gerilme rejimi bilindiğinde, aradaki gerilmenin yönü belirlenebilir (Pang et al. 2007).



Şekil 33. Efektif gerilme bölgesinde Mohr – Coulomb dayanımı (a. üç eksenli basınç altında kayma yenilmesi düzlemi ve kayma düzlemi b. Mohr daireleri ve dayanım kriteri) (Pang et al. 2007).

Mohr-Coulomb göçme kriteri;

$$|\tau| = \sigma \tan(\varphi) + c \quad (2.2)$$

$$\tan 2\beta = -1/\tan \varphi \quad (2.3)$$

Burada τ ve σ potansiyel bir göçme yüzeyi üzerindeki bir noktadaki kayma ve normal gerilmelerdir ve basınç pozitifdir. φ açısı içsel sürtünme açısıdır; c ise kohezyondur.

Kaya kütleleri için Hoek-Brown yenilme kriteri yaygın olarak kabul görmektedir ve dünya çapında çok sayıda projede uygulanmıştır. Genel olarak, tatmin edici olduğu görülmekle birlikte, sayısal modellere ve limit denge programları ile beraber çalışmasında ve uygulanmasında bazı belirsizlikler ve hatalar vardır. Özellikle, belirli bir kaya kütlesi için kabul edilebilir bir eşdeğer içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerini bulma zorluğu, 1980' de kriterin yayınlanmasından bu yana bir sorun olmuştur. Hoek et al. (2002) yaptıkları çalışma ile bahsi geçen sorunları çözmekte ve ölçütün uygulanması için önerilen bir dizi hesaplama ortaya koymaktadır. Ayrıca ilgili çalışmada sunulan denklemleri çözmenin ve çizmenin uygun bir

yolunu sağlamak için “RocLab” adlı ilişkili bir Windows programı geliştirilmiştir (Hoek et al. 2002).

Drucker – Prager göçme kriteri, kayanın nihai gücüne ulaştığı üç boyutlu gerilme durumunu tahmin etmek için basınca bağımlı modeldir. Kriter, göçmedeki oktahedral kayma gerilmesinin, malzeme sabitleri aracılığı ile oktahedral normal gerilme ile lineer olarak bağı olduğu varsayımına dayanmaktadır (Alejano *et al.* 2012).



MATERYAL VE METOD

Materyal

T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Karayolları 18. Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde bulunan Kağızman – (Digor – Tuzluca) Ayrım Yolu Km: 23+020 – 23+940 arasında proje çalışmaları kapsamında çift tüp olarak planlanan tünelin boyu 920 metre uzunluğundadır. Jeolojik birimlerin alansal yayılımları ile mühendislik jeolojisi açısından değerlendirmeleri yapılmış olup tünel tasarımını etkilemesi düşünülen mühendislik özelliklerinin ortaya konulması çalışılmıştır. Öncelikle proje alanı için genel jeolojik araştırma çalışması yapılmıştır. Daha sonrasında jeomorfolojik özellikler, yapısal jeoloji ve tektonik özellikler değerlendirilmiştir. Çalışmanın devamında tünel aksının geçeceği birimlerin jeolojik ve geoteknik özelliklerini belirlemek amacı ile jeofizik ve sondaj çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün çalışmalar birlikte değerlendirilerek jeolojik yapının gerçeğe yakın bir şekilde yorumlanması amaçlanmıştır. Çalışma alanına ait görseller detaylı olarak Şekil 34 verilmektedir.

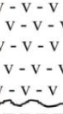
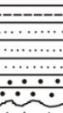


Şekil 34. Tünel ekseninin geçirileceği bölgeye ait yüzey görüntüsü

Tünel Lokasyonuna Ait Jeolojik Oluşum

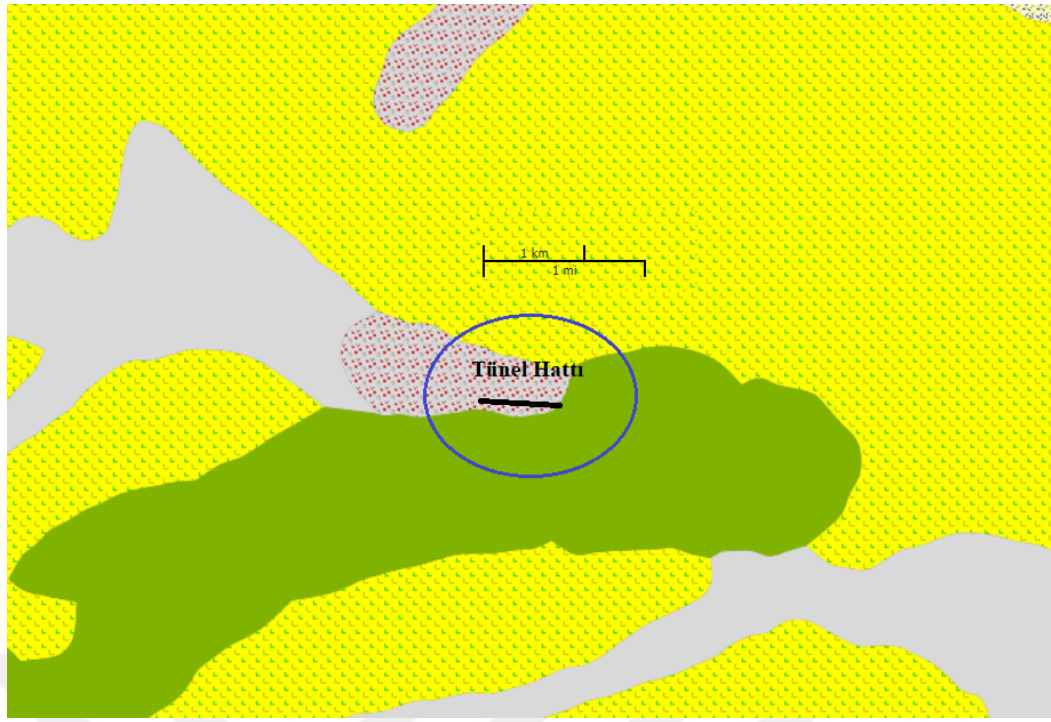
Doğu Anadolu' nun kuzeydoğusunda yer alan bu havza, yaklaşık doğu – batı uzanımlıdır. Güneyde Tendürek ve Ağrı dağları, kuzeyde ise Kars platosu ile sınırlanmıştır. Çok kalın bir Pliyosen istifini bulundurmaktadır. Havzada denizel Alt Miyosenin yer almayışı, neotektonik dönem başında bölgenin paleocoğrafik sınırlarını tanıma açısından ayrı bir önem taşımaktadır. Havza, neotektonik dönemde gelişmeye başlamış olup, günümüzde diri olduğu bilinen doğrultu atımlı fayların kontrolünde olan bir çek –ayır (pull-apart) havza olması

nedeniyle de ayrı bir önem taşımaktadır. Eosen yaşlı havza paleotektonik dönemlere ait en genç kayalardan çakıltası, kumtaşı, marn, silttaşı ve kireçtaşıdan meydana gelmektedir. Neotektonik döneme ait çökeltme Pliyosende başlamış olup, çökelen birim tuz, jips, çamurtaşı tekrarlanmasından üste doğru çakıltası, kumtaşı düzeylerine kadar değişik kayaları içermektedir. Tuzluca formasyonu olarak adlandırılmış olan Pliyosen yaşlı formasyonunun bazı yüzeylerinin sığ deniz veya göl çökelleri şeklinde olabilecekleri görüşü bazı araştırmacılar tarafından ileri sürülmüştür (Şaroğlu vd. 1986). Proje alanı ve yakın çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti (Şekil 35)'de gösterilmiştir.

Yaş	Formasyon	Kalınlık (m)	Litoloji	Açıklama
Holosen	Taraça / Yamaç Molozu Alüvyon	100		Kil, silt, kum ve çakıldan oluşan, pekleşmemiş alüvyon/yamaç molozu
Pleistosen	Tuf ve bazalt	500		Kahverengi-siyah renkli, masif bazalt ve krem, beyaz renkli tuf.
Pliyosen	Tuzluca Formasyonu	4730		Uyumsuzluk — Grimsi yeşil renkli Kilitaşı, tuz, jips ardalması.
	Kızıllar Formasyonu			Çamurtaşı, kumtaşı ve çakıltası
Eosen	Kağızman Karmaşığı			Uyumsuzluk — Yeşil, mor-yeşil renkte peridotit, serpantin, gabro, bazalt ve kireçtaşı blokları.

Şekil 35. Proje alanı ve yakın çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti (Yılmaz 2007).

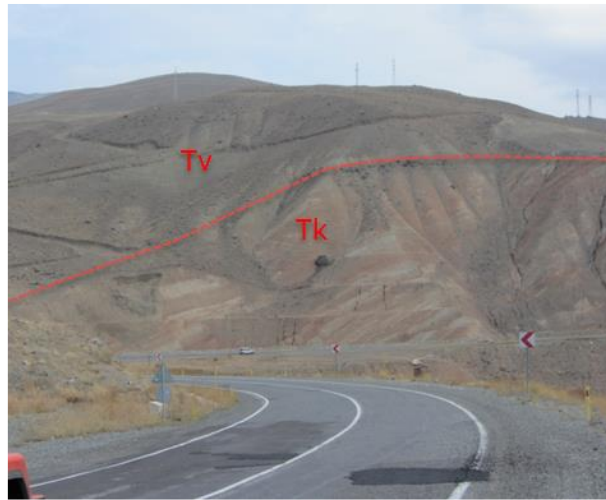
Çalışma alanında, Üst Kretase – Paleosen yaşlı Kağızman ofiyolitik serisi, Erken Pliyosen yaşlı Kızıllar formasyonu ve aynı yaşlı Çincevat Formasyonu, Geç Pliyosen yaşlı Tuzluca formasyonu, Kuvaterner yaşlı Kağızman volkanitleri ve Kuvaterner yaşlı taraça / yamaç molozu ve alüvyon birimi ayırtlanmıştır. Şekil 36'da tünel güzergâhı ve çevresinin genel jeoloji haritası gösterilmektedir (Tünel Araştırma Raporu 2016).



-  Evaporitli Sedimenter Kayalar – (yer yer orta miyosen) – m1 – Üst Miyosen
-  Bazalt – Qb - Kuvaterner
-  Ayrışmış bazik ve ultrabazik kayalar – of -mesozoik
-  Q(b): alüvyon yelpazesi, yamaç molozu, moren vs. – Q – Kuvaterner

Şekil 36. Tünel güzergâhı ve çevresinin genel jeoloji haritası (MTA 2020).

Tünelin hattının geçtiği üst kotlar genelde Kağızman Volkanitleri içerisinde yer almaktadır. Alt kotlardaki Kızıllar Formasyonunun çamurtaşları koyu kırmızı ile kahverengi olup tabakalanmalar belirsizdir. İçerisinde bol miktarda jips kristalleri gözlenmiştir. Yamacın üst kotlarında Kızıllar Formasyonu (Tk) üzerinde uyumsuz olarak şapka şeklinde gelen Kağızman Volkanitleri (Tv) gözlenmiştir (Şekil 37).



Şekil 37. Kızıllar Formasyonu ve Kağızman Volkanitlerinden görünüm (Tünel Araştırma Raporu 2016).

Mevcut yol şevlerinde düzenleme yapılmasına rağmen kaymalar ve küçük çaplı akmlar olmuştur. Kayma yüzeylerinde tabakaların şev içine doğru olduğu gözlenmiştir. Buna rağmen oluşan kaymanın nedeni şevlerin dik açılmasıdır. Mevcut şevler 44 – 45° civarındadır. Bu şevler üstündeki ayrılmış malzeme derinliği 3 – 4 metreyi geçmeyen dairesel kayma yüzeyleri oluşturmuştur. Kağızman volkanitleri birim olarak beyazımsı krem renkli, ince katmanlı tüfler ve koyu kahve, siyahımsı kahverengi ve siyah renkli bazaltlardan oluşmuştur. Bazı bazaltlarda cüruf benzeri boşluklu yapı gözlenmektedir. Kağızman Volkanitleri tünel kesiminde Kızıllar formasyonuna ait Çamurtaş – Kıltaşı ardalanmasının üzerinde çok sık kalınlıklarda olduğu gözlenmiştir. Ayrıca bu kesimde her iki birim arasında çok kısa mesafelerle yanal geçişlerde mevcuttur. Tüflü kesimlerde şevlerde yüzey suyundan kalan sellenme izleri yer almaktadır (Tünel Araştırma Raporu 2016). Tünel kazı hattının tamamı Kızıllar Formasyonu, kaya tuzu ve yamaç molozu birimlerinden etkileneceğinden dolayı ilgili birimler ilerleyen başlıklar altında değerlendirilmiştir.

Kızıllar formasyonu

Yaklaşık olarak 10 – 12 km²'lik bir alanı kapsamaktadır. Genel olarak çok kalın çakıltaşı ve kumtaşı halindedir. Kumtaşı ve çakıltaşı çimentosu içerisinde dağınık halde jips kristalleri yer almaktadır. Tamamen karasal karakterde çökellerdir. Bu birim ilk defa Yılmaz (2007) tarafından yapılan çalışmada adlandırılmıştır (Şekil 38).



Şekil 38. Kızıllar formasyonu (Yılmaz 2007).

Litoloji, dokanak ve yaş açısından değerlendirildiğinde:

Birimin kırmızı renkte oluşu çökel ortamının çok sık olduğunu belirtir. Kızıllar Formasyonundaki istif çamurtaş – kumtaşı – çakıltaşı ardalanması şeklindedir. Çakıltaşları koyu kırmızı renkli, orta- kalın katmanlı, kötü boylanmalı ve gevşek tutturulmuştur. Serpantin ve kuvarsın değişik boydaki elemanlarından meydana gelmiştir. Kumtaşları kırmızı, gri ve

grimsi yeşil renklidir, orta katmanlı, yer yer kaba taneli, genellikle kötü boyanmalıdır. Çamurtaşları koyu kırmızı ile kahverengi olup katmanlanma belirsizdir. İçerisinde bol miktarda jips kristalleri gözlenmiştir (Tünel Araştırma Raporu 2016).

Kızıllar formasyonunun Tuzluca formasyonu ile olan dokanağı uyumlu ve geçişlidir. Kağızman çevresinde yapılan çalışmalarda, Kızıllar formasyonunun Tuzluca Bölgesindeki Çinçevat Formasyonu ile eş yaşı olduğu görülmüş ve yaşının Erken Pliyosen olduğu belirtilmiştir (Tünel Araştırma Raporu 2016).

Yamaç molozu

Aras nehri çevresinde gözlenen alüvyon birimi çalışma alanı içerisinde yayılım gösterir. ofiyolit, çakıltası, kumtaşı, kıltaşı – marn aralanmalarından türemiş blok, çakıl, kum, silt ve killerden oluşur. Bileşenler serbest ve gevşek bir yapıda gözlenir (Şekil 39) (Tünel Araştırma Raporu 2016).



Şekil 39. Yamaç Molozu (Tünel Araştırma Raporu 2016).

Kaya tuzu – anhidrit birimi

Anadolu'daki jipsli ve tuzlu formasyonun (Oligosen-Miosen)'e ait oldukları söylenebilir. Kaya tuzu yatakları bilindiği gibi sıcak bölgelerde tuzlu su havzalarındaki suların buharlaşması neticesinde meydana gelmiş "kimyevî birikim" oluşumlarıdır. Belirli bir sedimatasyon çevrimine tâbi olmakla beraber çevredeki sıcaklık – buharlaşma derecesiyle çökelme şartlarının zaman zaman değişmesine uygun ve çok defa "Periodique" bir şekilde husule gelen bu çökelme yatakları umumiyetle jips ve benzeri tuzları içeren sarı yeşilimsi killerin arasında bulunurlar. Formasyonun diğer seviyelerini, yerin çökelme şartlarına ve oluşum özelliklerine göre değişen, konglomera – breş, gre, jips' li – tuzlu killer, hatta bazen de marnlar teşkil eder. Tuz yataklarımızın oluşum özellikleri ve ana hatları ile jeolojik durumları birbirinin benzerdir. Kaya tuzu yatakları, aralarında birkaç santim kalınlığında anhidrit, tuzlu jipsli kil ara katkıları bulunan ve kalınlıkları birkaç santim ile 1 m arasında değişen

halindeki tabaka topluluğundan oluşmaktadır. Yatakta oluşan tuz kalınlığı 10-15 m ve bazılarında 50 hatta 77 m kadardır Çalışma alanının bulunduğu kesimde yer alan Kağızman Tuzlası 60 milyon ton rezerve sahiptir (Barutoğlu 1968).

Jeomorfoloji

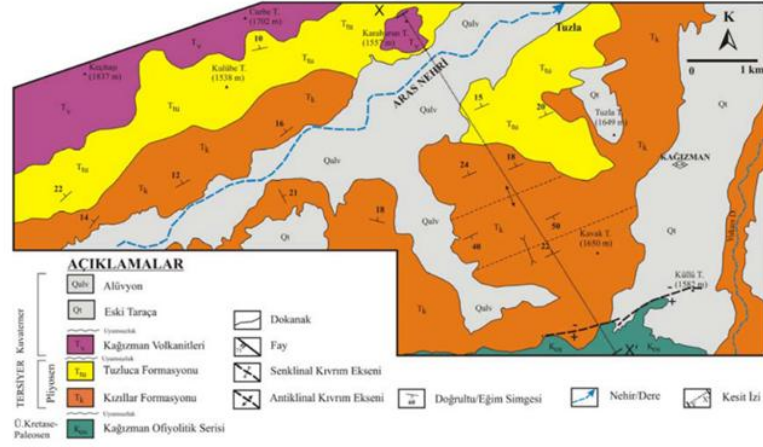
Yükselen topoğrafya ile birlikte dalgalı bir araziye geçişler bulunmaktadır. Bu arazi ile birlikte tünel hattının kotunda artış meydana gelmektedir. Km: 23+020 – 23+940 arasındaki 1230 m kotuna sahip iki tepe tünel hattı ile geçilmektedir. Arazi kotunda azalmalar meydana gelerek arazi kotu 1045 m kotuna ulaşmaktadır. Proje güzergâhında Kağızman Volkanitleri hariç Kızıllar formasyonu genelde zayıf ve çok zayıf kaya klasındadır. Bu sebeple kimyasal ve fiziksel ayrışmaya müsait bir yapıdadır (Tünel Araştırma Raporu 2016).

Yapısal Jeoloji

Yılmaz' ın (2007) yapmış olduğu araştırmalar kapsamında çalışma alanında antiklinal, senklinal şeklinde kıvrımlar, katman D/E (doğrultu/eğim) değerleri ölçülmüş, birimler arasındaki uyumsuzluklar ve faylanmalar gözlemlenmiştir. Gözlemler sonucunda elde edilen veriler şu şekildedir. Çalışma alanında GD'sunda bulunan Kızıllar formasyonu içerisinde antiklinal ve senklinal şeklinde kıvrımlar mevcuttur. Aynı formasyondan alınan D/E değerleri sonucunda Kavak Tepe (1650 m)'nin KB'sında senklinal gözlemlenmiştir. Çalışma alanımızda bulunan Kızıllar Formasyonunda çeşitli D/E değerleri ölçülmüştür ve bu değerler jeolojik haritaya aktarılmıştır. Kızıllar Formasyonundaki birimler genelde K 45 – 60 D veya K 20 – 75 B / 40 – 50 GB veya 18 – 20 KD, 18 – 21 KD konumludur. (Şekil 40 – 41) (Yılmaz 2007).

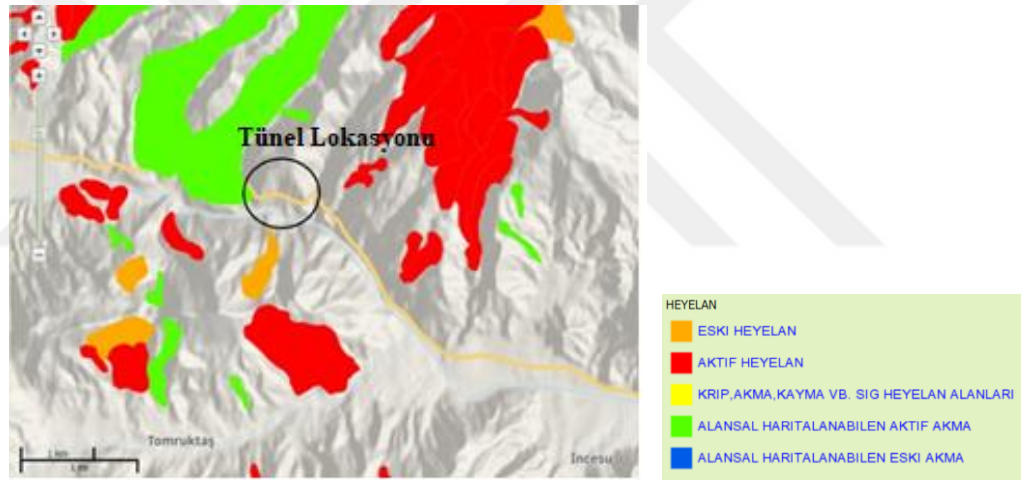


Şekil 40. Kızıllar Formasyonunda gözlemlenen tabakalanma ve kıvrımlanmanın görünümü (Yılmaz 2007).

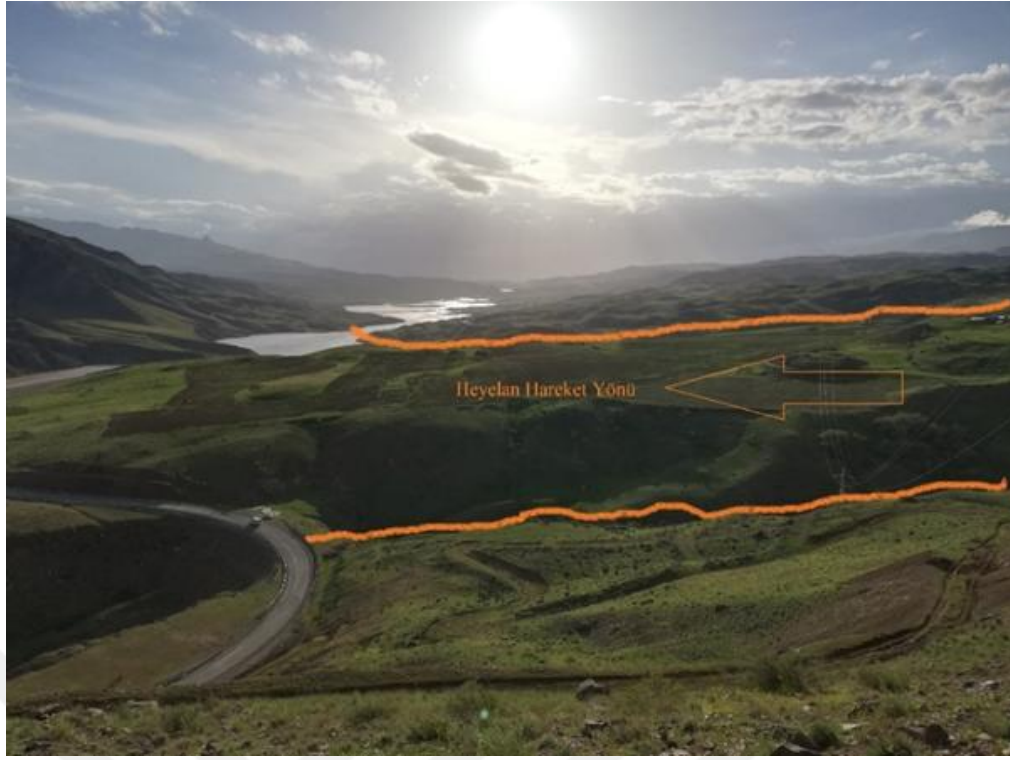


Şekil 41. Kağızman yöresinde gözlenen antiklinal, senklinal, birimlerin D/E değerini ve uyumsuzlukları gösteren jeolojik harita (Yılmaz 2007).

Ayrıca yapısal değerlendirme kapsamında tünel giriş portalı yaklaşık kilometrelerinde aktif kayma halinde olan heyelan oluşumu tespit edilmiş olup MTA'dan elde edilen haritalar ile bu durum Şekil 42'de ve arazide heyelana ait görünüm ise Şekil 43' de gösterilmektedir.



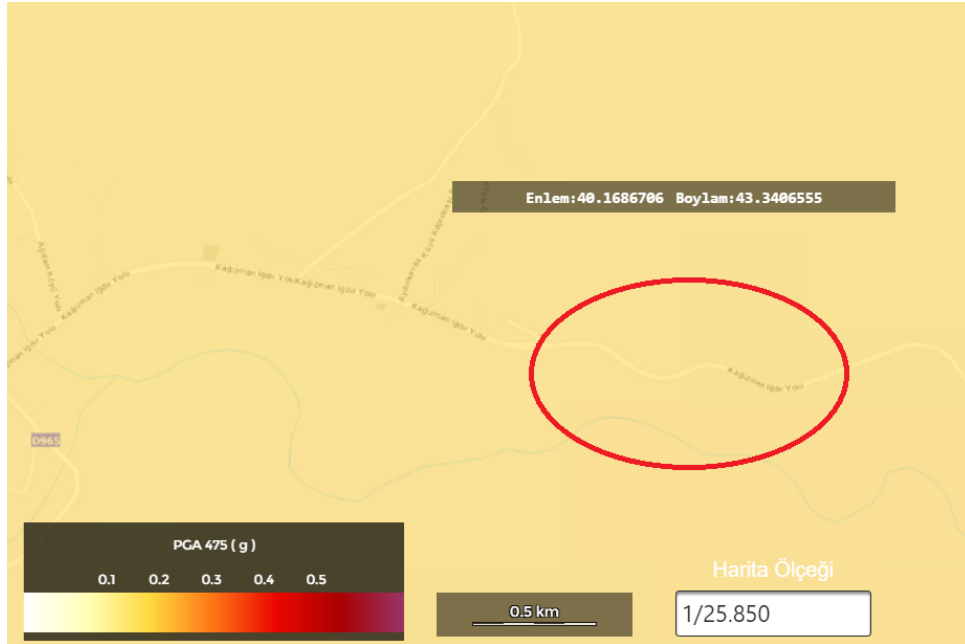
Şekil 42. Heyelan haritası ve tünel lokasyonu (MTA 2020).



Şekil 43. Aktif heyelana ait arazi görseli (2020).

Depremsellik

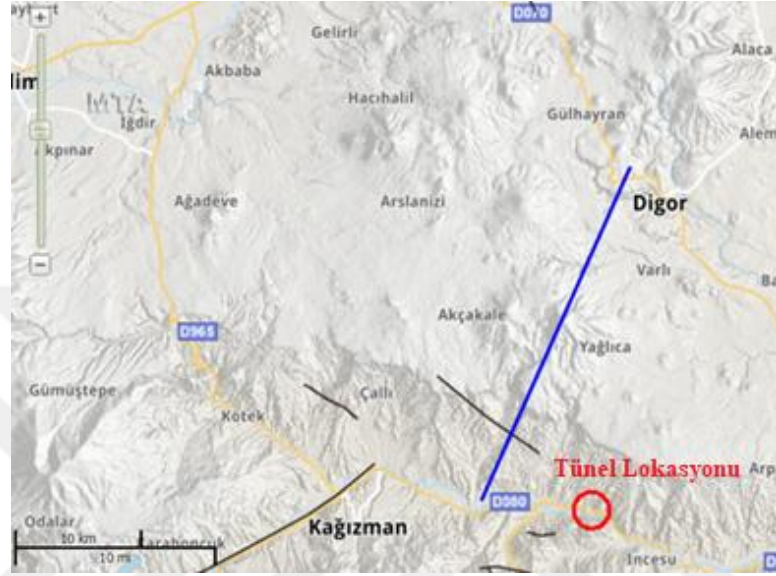
Proje güzergâhı ve yakın çevresi Türkiye Deprem Tehlike Haritası'na göre tünel sahasının etkin yer ivmesi katsayısı $a=0.1-0.2$ g değerindedir (Şekil 44). Ancak tez çalışması kapsamında statik durum incelenecektir.



Şekil 44. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD 2020).

Tünel hattı ve yakın çevresindeki fay durumu incelendiğinde:

MTA'dan elde edilen veriler ve Koçyiğit (2013) tarafından yapılan çalışma birlikte incelendiğinde tünel aksı ve giriş portalinden yaklaşık 9 km uzakta fayın varlığı tespit edilmiş olup ilgili fayın tünel üzerinde oluşacak olan gerilmeler ve gerilme değişimleri üzerinde etkili olmayacağı düşünülmektedir. Çalışma alanına ait fay/dirifay haritası ve Koçyiğit'in 2013'de belirlemiş olduğu yeni fayın tünel hattına göre konumu Şekil 45' de gösterilmiştir.



Şekil 45. MTA fay haritası ve Koçyiğit (2013)'e göre değerlendirilen tünel lokasyonu ve fayların konumları.

Hidrojeoloji

İnceleme alanı ve yakın çevresindeki en önemli akarsu kaynağı Aras nehri olup güzergâhın tamamında, tünel hattına paralel bir şekilde devam etmektedir. Tünel güzergâhının son kısmı Kızıllar Formasyonunun kırmızı renkli, çamurtaşı – kıltaşı ardalanmasında yer alacaktır. Birim olarak geçirimsiz özellikler gösteren Formasyonda herhangi bir su çıkışı ve kaynak tespit edilmemiştir. Kızıllar formasyonu birim olarak suya hassas bir birimdir. Sudan dolayı birimin mostra verdiği yamaçlarda ayrışma ve sellenmeler gözlenmektedir. Kızıllar Formasyonunun çakıllı seviyeleri ise az – orta geçirimlidir. Şapka şeklinde Kızıllar formasyonu üzerine gelen Volkanitler geçirimsiz olup sadece çatlaklarında su bulundurabilir. Bu birimin çatlaklarından gelecek su Kızıllar formasyonunda ayrışma ve dayanım kaybına neden olabilir. Birim içerisindeki tüfler geçirimsizdir. Araştırma sondaj kuyularına ait bilgiler Tablo 11'de verilmektedir (Tünel Araştırma Raporu 2016).

Tablo 11. Sondaj kuyularına ait yeraltı suyu seviyeleri (Tünel Araştırma Raporu 2016).

Sondaj No	Derinlik (m)	YASS (m)
SK-23+040 (Sol Tüp)	45	8,10
SK-23+040 (Sağ Tüp)	45	14,60
SK-23+080	52	45,30
SK-23+145	80	39,30
SK-23+510	80	27,40
SK-23+985 (Yatay Sondaj)	31	-

Metod

Jeofizik Çalışmalar

Muhtelif kilometreler arasında 2 boyutlu elektrik özdirenç ve sismik çalışmalar, jeolojik birim sınırlarının belirlenmesi ve geoteknik parametrelerin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tünel kesitinin analizinin yapılacağı lokasyonlar olarak örtü yükünün en fazla olduğu kesitler seçilmiştir. Bu değerlendirme kapsamında yaklaşık Km: 23+300 – 23+500 arasında bulunan kesitin jeolojik yapısı değerlendirmeye alınarak elektrik özdirenç ve sismik çalışmalar yapılmıştır.

Elektrik özdirenç çalışması

Elektrik özdirenç yöntemi ile yeraltındaki yapıların dizilimi, yapısı, bileşimi, matris yapısı, gözenekliliği, su içeriği, süreksizliği vb. fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Elektrik özdirenç yönteminde kullanılan ekipmanlar; bir akım kaynağı (akü ve/veya jeneratör), transmitter (kontrollü akım verici ünite), akım ve potansiyel kabloları ve elektrotlardır (bakır alaşımlı). Çalışmada Agi Supersting Rezistivite ölçüm ekipmanı (Şekil 46) kullanılmıştır. Yapılan elektrik özdirenç çalışmasına ait araziden bir görüntü Şekil 47’ de gösterilmiştir. Bu amaç doğrultusunda çalışma sahasında analizi yapılması amaçlanan kesimlerde 3 profilde arazi koşullarına göre değişik elektrot sayısı ve elektrot aralığında hatlar alınmıştır (Şekil 48). Yapılan çalışmalara ait başlangıç ve bitiş koordinat değerleri Tablo 12’de verilmektedir. Elde edilen arazi ölçümleri ve sondaj verilerine göre yorumlanan elektrik rezistivite profilleri Şekil 49’da gösterilmiştir. Analizlere esas olan birim sınırlarına ait elde edilen profil ise Şekil 50’ de gösterilmiştir.

Tablo 12. Yapılan elektrik öz direnç lokasyon koordinatları

No	Başlangıç koordinatları		Bitiş koordinatları	
	X	Y	X	Y
Ert*-1	38 T 359287	4445834	38 T 359564	4445768
Ert*-2	38 T 359292	4445845	38 T 359570	4445776
Ert*-3	38 T 359295	4445857	38 T 359574	4445783

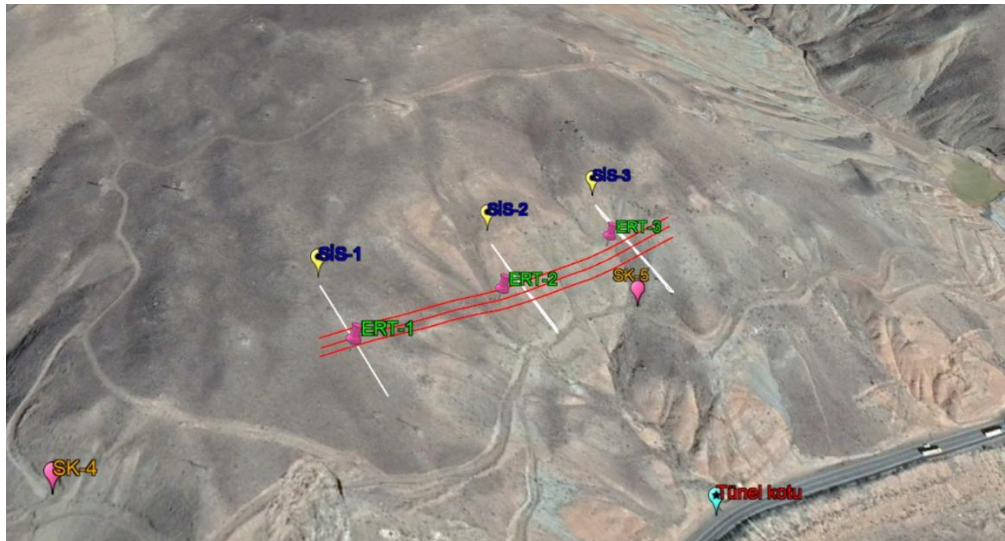
*Ert: Elektrik rezistivite hattı



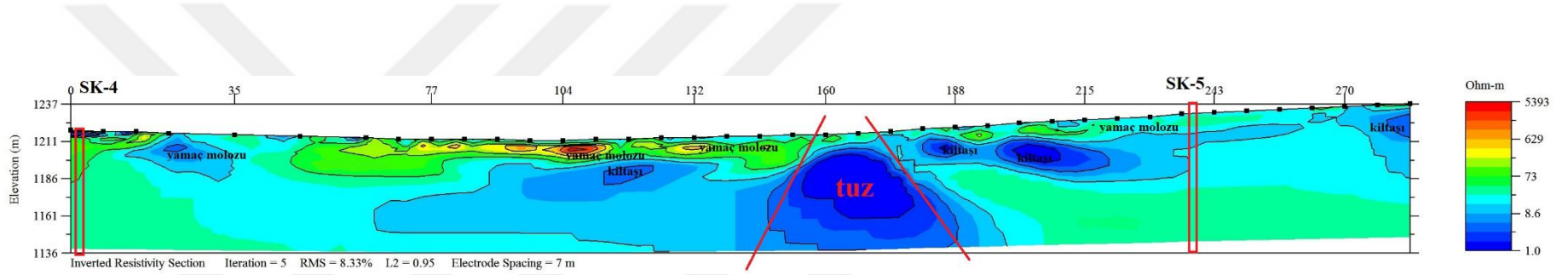
Şekil 46. Elektrik öz direnç ölçüm ekipmanı



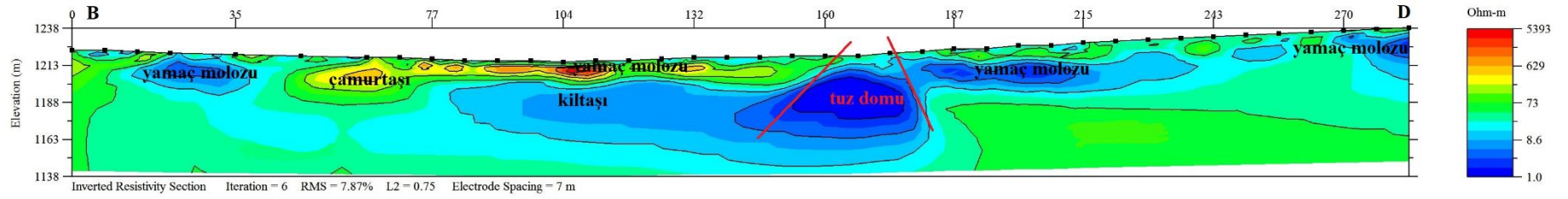
Şekil 47. Elektrik öz direnç ölçümü arazi çalışması



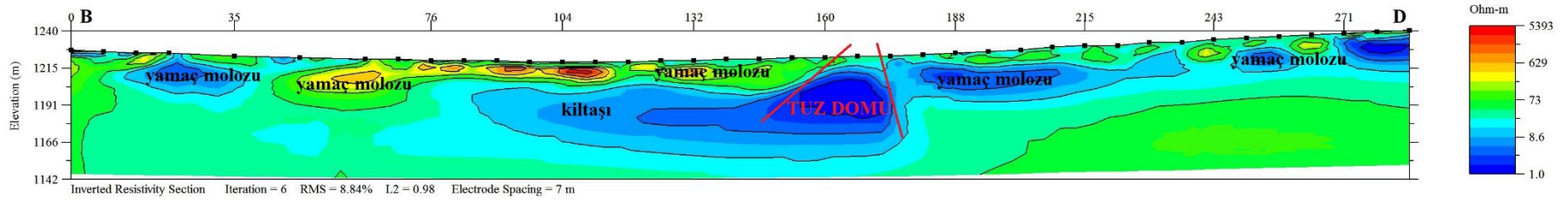
Şekil 48. Elektrik öz direnç ve sondaj çalışmalarına ait kmz görüntü



(a) Ert – 1 ölçüm profili

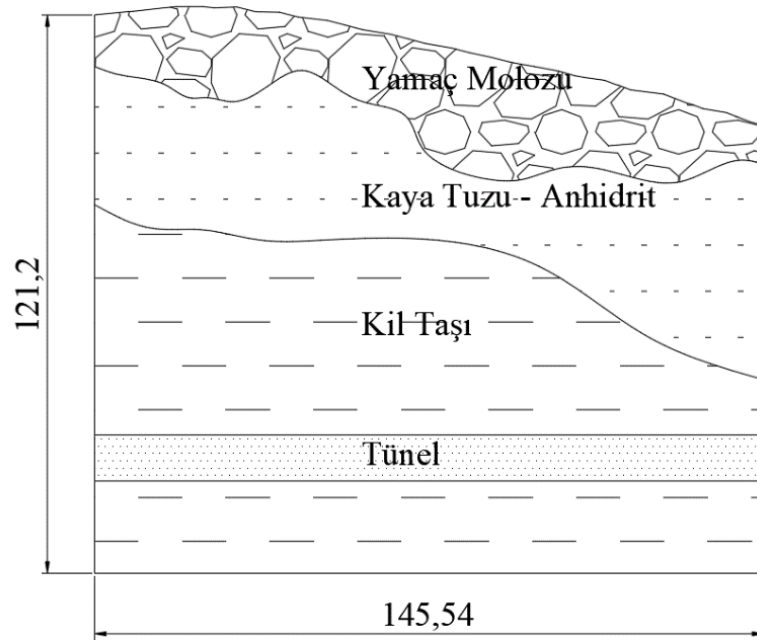


(b) Ert – 2 ölçüm profili



(c) Ert – 3 ölçüm profili

Şekil 49. Tünel aksına paralel olarak yapılan elektrik resistivite ölçümleri



Şekil 50. İki boyutlu profil model (çalışma alanı)

Sismik çalışma

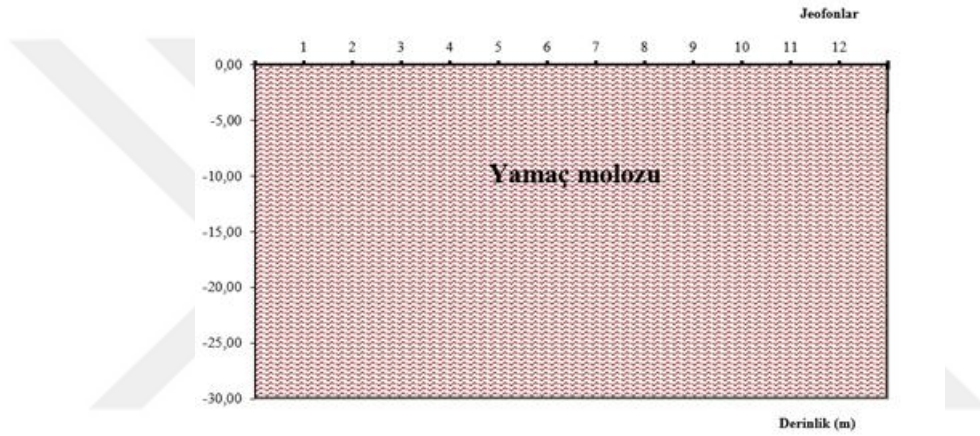
Çalışmada 12 kanallı Seistronik RAS24 marka kayıt cihazı kullanılmıştır. Sistem kayıtları almaya yarayan diz üstü bilgisayar, sismik izleri algılamaya yarayan sensör, 9 kg. ağırlığındaki balyoz, 12 adet 14 Hz yatay jeofon ve özel bağlantı ünitelerinden oluşmaktadır. 12 kanal sayısı, dokunmatik ekran seçeneği ve araziye dayanıklı kasasıyla uzun yıllar kullanılabilecek bir sismik ünitelerdir. Arazi çalışmaları kapsamında, 8 adet 60 metre açılımlı (P ve S dalgaları) 5 metre jeofon aralıklı 15 metre ofset aralıklı sismik kırılma P Dalgası (düz – ters) çalışması yapılmıştır (Şekil 51). Alıcı olarak; 12 adet 14 Hz P (düşey – bileşenli) jeofonu, kaynak olarak 9 kg’lık bir balyoz ve rijit demir plakanın kullanıldığı çalışmada ölçümlere bağlı olarak tabakalanma, yeraltı hız yapısı, ortama ait dinamik – elastik mühendislik parametreleri, taşıma gücü, kaya/zemin sınıfları, hâkim titreşim periyotları ayrıca ortama ait yanal ve düşey süreksizliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Jeofizik ölçümler, alanı en iyi şekilde temsil edecek yerlerde alınmıştır. Veri toplama işlemleri sırasında jeofonlar arası mesafeler 5 m, atış mesafesi 2.5 m olarak seçilmiş ve bu şekilde veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir (Tablo 13).

Tablo 13. Giriş portalinde yapılan sismik lokasyon koordinatları

No	Başlangıç koordinatları		Bitiş koordinatları	
	X	Y	X	Y
Sis-1	38 T 359301	4445869	38 T 359282	4445816
Sis-2	38 T 359406	4445843	38 T 359390	4445788
Sis-3	38 T 359506	4445811	38 T 359520	4445750



(a)



(b)

Şekil 51. Sismik ölçüm arazi çalışması

Yapılan jeofizik etüt neticesinde V_p ve V_s dalga hızları ölçülmüş, sismik iz sinyallerinden varış zamanları okunmuş ve bunlardan yol zaman grafiği çizilerek sismik hızlar elde edilmiştir. Bu hızların ortalamaları ve bu hızlara ait dinamik parametreler her bir serilim için ayrı ayrı hesaplanmış olup ilerleyen kısımlarda söz konusu edilmiştir. S dalga hızları, malzemedeki şekil bozumuna karşı direnç ile orantılı olarak ölçülmüştür. Burada alınan S kayma dalgası hızları değerlendirilirken formasyonlar göz önünde bulundurularak değerlendirme yapılmış RAS24 programı kullanılarak zeminin cinsine en uygun hızlar tespit edilmiştir. Sahada gerçekleştirilen jeofizik çalışmalardan S dalga hızlarını belirlemek yerin dinamik – esneklik özelliklerini belirlemek amacıyla yamaç molozu birimi için bu verilerden yararlanılarak her bir tabaka için birim hacim ağırlık (γ), maksimum kayma modülü (G_{max}), elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), sismik hız oranı (V_s/V_p) değerleri hesaplanmıştır (Tablo 14).

Tablo 14. Yamaç molozu birimine ait özellikler

	Vs (m/sn)	Vp (m/sn)	E (MPa)	G (MPa)	v	γ (kN/m ³)	Vs/Vp
	Ortalama Değerler						
Yamaç molozu	845	1700	2429	911	0.34	19	0.49

Sondaj ve Laboratuvar çalışmaları

Sondaj ve laboratuvar çalışmaları Karayolları Mühendislik Hizmetleri Teknik Şartnamesi çerçevesinde yapılmış olup tünel kırmızı kotunun 20 m altına kadar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda çalışma alanında toplam 6 adet karotlu sondaj çalışması yapılarak zemin/kaya ortamına ait parametreler ve jeolojik sınırlar belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan sondaj çalışmaları (Şekil 52) sonucunda elde edilen karot sandıkları ve sondaj logları **EK 1** ve **EK 2** de verilmiştir. Sondajlardan elde edilen örnekler üzerinde laboratuvarda Tablo 15’de verilen kaya ve zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 16-18’de sunulmaktadır.

**Şekil 52.** Arazi sondaj çalışması**Tablo 15.** Laboratuvar deneyleri (kayalar ve zemin numuneleri için)

	Parametre	Test Metodu
Kaya deneyleri	Index Özellikleri	· Yoğunluk
		· Nokta yükü indeksi
	Dayanım	· Tek eksenli basınç dayanımı
	Deformasyon	· Elastisite Modülü ve poisson oranı
Zemin deneyleri	Index Özellikleri	Su muhtevası
		Elek analizi
		Kıvam limitleri

Tablo 16. Zemin indeks özellikleri (SPT ile alınan örnekler)

Yöntem Metot		TS 1900-1							Birleştirilmiş zemin sınıflaması USCS
Kuyu No	Derinlik	Su Muhtevası	Atterberg Limitleri			Elekt Analizi			
	m	wn	LL	PL	PI	Çakıl	Kum	Kil-silt	
		%	%	%	%	%	%	%	
SK-1	1.50-1.95	12.0	38.5	26.4	12.1	0.9	20.4	78.7	ML
SK-1	3.00-3.18	14.3	56.9	25.5	31.3	4.4	12.8	82.7	CH
SK-1	4.50-4.95	18.5	57.3	26.4	31.0	0.0	14.8	85.2	CH
SK-1	6.00-6.45	19.4	57.8	26.3	31.6	2.0	9.9	88.1	CH
SK-1	7.50-7.95	22.4	45.9	25.7	20.3	6.5	9.9	83.6	CL
SK-1	9.00-9.10	13.3	44.9	25.2	19.7	36.8	20.7	42.4	GC
SK-1	10.50-10.95	16.7	42.7	24.4	18.2	37.1	16.7	46.2	GC
SK-1	13.50-13.65	15.5	41.4	23.5	17.8	42.7	17.6	39.8	GC
SK-1	15.00-15.45	20.5	55.2	24.6	30.6	0.00	10.9	89.1	CH
SK-1	16.50-16.95	18.9	59.1	26.4	32.7	2.1	10.3	87.6	CH
SK-2	7.50-7.60	17.2	58.2	27.0	31.2	2.1	7.0	90.9	CH
SK-2	16.50-16.60	18.6	59.4	26.3	33.1	1.7	11.4	86.9	CH

Tablo 17. Elastisite modülü ve poisson oranı deney sonuçları (Kayaçlarda tek eksenli basınç dayanımı)

Deney standardı TS 2030 - ISRM															
Sondaj No	Numune No	Derinlik (m)	Numune Boyu (cm)	Numune Çapı (mm)	Δl (mm)	Eksenel Birim şekil değiştirme ϵ_a	Δd (mm)	Yanal birim şekil değiştirme ϵ_d	Elastisite Modülü E GPa	Poisson Oranı ν	Numune Ağırlığı (g)	Birim Hacim ağırlık(g/cm ³)	Kesit Alanı A (cm ²)	Yenilme Yüğü P (kg)	Tek eksenli Basınç Dayanımı q_u (MPa)
SK – 3	K3	30.00-31.00	13.74	62.44	0.0480	0.00349	0.0630	0.00101	1.59	0.29	909.6	2.16	30.61	1641	5.3
SK – 3	K6	38.00-39.00	13.47	61.22	0.0480	0.00356	0.0600	0.00098	1.80	0.28	941.9	2.38	29.42	1835	6.1
SK – 4	K1	28.00-29.00	12.15	60.75	0.0450	0.00370	0.0675	0.00111	1.35	0.30	819.1	2.33	28.97	1312	4.4
SK – 4	K4	36.00-37.00	14.93	59.70	0.0525	0.00352	0.0510	0.00085	9.58	0.24	1032.5	2.47	27.98	9034	31.7
SK – 4	K5	40.00-41.00	11.76	58.80	0.0420	0.00357	0.0495	0.00084	7.14	0.24	768.7	2.41	27.14	6691	24.2
SK – 4	K6	42.00-43.00	13.70	62.25	0.0510	0.00372	0.0645	0.00104	1.50	0.28	1009.1	2.42	30.42	1638	6.3
SK – 4	K7	43.00-44.00	13.58	59.05	0.0450	0.00331	0.0450	0.00076	10.28	0.23	894.2	2.41	27.37	9477	34.0
SK – 4	K8	44.00-45.00	11.86	59.30	0.0435	0.00367	0.0555	0.00094	4.19	0.26	806.1	2.46	27.60	4099	14.6
SK – 4	K9	46.00-47.00	13.86	60.26	0.0510	0.00368	0.0600	0.00100	2.48	0.27	965.7	2.44	28.51	2522	8.7
SK – 5	K1	52.00-53.00	15.69	62.75	0.0570	0.00363	0.0570	0.00091	3.28	0.25	1154.8	2.38	30.91	3564	11.3
SK – 5	K3	56.50-57.00	13.83	62.88	0.0480	0.00347	0.0630	0.00100	4.49	0.25	996.7	2.32	31.04	4702	14.9
SK – 5	K7	69.00-70.00	13.82	62.82	0.0495	0.00358	0.0600	0.00096	1.81	0.27	979.2	2.29	30.98	1943	6.1
SK – 5	K8	70.00-71.00	12.39	61.95	0.0450	0.00363	0.0630	0.00102	2.01	0.28	848.7	2.27	30.13	2024	6.6
SK – 5	K9	72.50-73.50	15.74	62.96	0.0540	0.00343	0.0585	0.00093	1.81	0.27	1124.3	2.30	31.12	1882	5.9
SK – 5	K11	77.00-78.00	12.37	61.84	0.0420	0.00340	0.0570	0.00092	2.33	0.27	891.7	2.40	30.02	2365	7.7.
SK – 7	K2	2.50-3.50	13.72	62.35	0.0510	0.00372	0.0675	0.000108	1.35	0.29	939.3	2.24	30.52	1483	4.8
SK – 7	K3	4.00-5.50	14.24	61.93	0.0495	0.00348	0.0600	0.00097	1.41	0.28	953.5	2.22	30.11	1432	4.7

* $\epsilon_a = \Delta l / L$, $\epsilon_d = \Delta d / d$, $\nu = \epsilon_y / \epsilon_x$, $E = (P/A) / (\Delta l / l)$, $G = E / 2(1 + \nu)$

Tablo 18. Nokta yükü dayanım indeksi deney sonuçları (Kayaçalarda)

Deney standardı TS 699 – Deney 6.38														
Sondaj No	Numune No	Derinlik (m)	Deney Türü	Numune Çapı d (mm)	Boy L (cm)	Hacim (cm ³)	Numune ağırlığı (g)	Yenilme Yüğü P (kg)	Birim Hacim ağırlık (g/m ³)	De (mm)	De ² (mm ²)	Is (MPa)	Boyut düzeltme Faktörü F	Is (50) (MPa)
SK – 2	K1	18.00-19.00	Z.D. DİK	62.30	9.53	290.4	532.3	95	1.833	62.30	3881.3	0.24	1.10	0.27
SK – 2	K2	20.00-21.00	"	61.85	5.02	150.7	285.0	89	1.891	61.85	3825.4	0.23	1.10	0.25
SK – 2	K3	21.00-22.00	"	61.09	4.23	123.9	252.4	88	2.037	61.09	3732.0	0.23	1.09	0.25
SK – 2	K4	23.50-25.00	"	61.05	4.05	118.5	236.6	86	1.997	61.05	3727.1	0.23	1.09	0.25
SK – 2	K5	25.00-26.00	"	62.60	6.79	208.9	407.1	90	1.949	62.60	3918.8	0.23	1.11	0.25
SK – 3	K1	5.00-6.00	"	62.52	6.20	190.2	385.7	89	2.027	62.52	3908.8	0.22	1.11	0.25
SK – 3	K2	24.00-25.00	"	62.85	4.15	128.7	252.0	92	1.958	62.85	3950.1	0.23	1.11	0.25
SK – 3	K4	31.00-32.00	"	61.73	8.13	243.2	546.1	99.5	2.246	61.73	3810.6	0.26	1.10	0.28
SK – 3	K5	37.00-38.00	"	61.34	9.70	286.5	628.5	89	2.194	61.34	3762.6	0.23	1.10	0.25
SK – 4	K2	31.00-32.00	"	60.99	11.42	333.5	646.7	86	1.939	60.99	3719.8	0.23	1.09	0.25
SK – 4	K3	35.00-36.00	"	60.40	7.02	201.0	404.4	416	2.012	60.40	3648.2	1.12	1.09	1.22
SK – 5	K2	53.00-54.00	"	60.80	8.43	244.6	595.5	104	2.434	60.80	3696.6	0.28	1.09	0.30
SK – 5	K4	57.00-58.00	"	60.89	5.28	153.7	341.6	95	2.223	60.89	3707.6	0.25	1.09	0.27
SK – 5	K5	64.50-65.00	"	60.74	10.80	312.8	668.2	100	2.136	60.74	3689.3	0.27	1.09	0.29
SK – 5	K6	67.00-68.00	"	62.81	10.92	338.2	807.0	139	2.386	62.81	3945.1	0.35	1.11	0.38
SK – 5	K10	75.00-76.00	"	62.77	11.51	356.0	832.6	140	2.339	62.77	3940.1	0.35	1.11	0.39
SK – 5	K12	79.00-80.00	"	62.33	10.46	319.0	768.0	125	2.407	62.33	3885.0	0.32	1.10	0.35
SK – 5	K13	81.00-82.00	"	60.44	11.79	338.1	775.8	130	2.295	60.44	3653.0	0.35	1.09	0.38
SK – 5	K14	82.00-83.00	"	62.70	11.86	366.0	847.0	92	2.314	62.70	3931.3	0.23	1.11	0.25
SK – 7	K1	1.50-2.00	"	60.75	8.87	257.0	566.2	88	2.203	60.75	3690.6	0.23	1.09	0.26

Arazi Modellenmesi

Yapılan sondajların tamamında oldukça zayıf dayanımlı, çok ayrılmış, killeşmiş metamorfik şist birimi geçilmiştir. Güzergahta bu birimin yüzlek veren seviyeleri tamamen killeşmiş olduğundan herhangi bir süreksizlik ölçümü yapılamamıştır (Tünel araştırma raporu 2016). Analizi yapılması planlanan kesime ait yapılan sondajlardan SK – 23+145 sondajında 80 – 40. m ve SK – 23+510 sondajında ise 60 – 100 m. arası elde edilen numuneler tünel tasarımına yönelik olarak çalışmalar kapsamında değerlendirilmiştir. Arazi çalışmaları sürecinde yapılan sondaj çalışmalarında örselenmiş numune ve karot numuneleri alınmıştır. Ayrıca sondajlardan elde edilen karot sandıkları ve jeofizik veriler değerlendirildiğinde analiz kesitinde ilk tabaka olarak karşımıza yamaç molozu birimi çıkmaktadır. İkinci tabaka olarak kaya tuzu – anhidrit ve üçüncü tabaka ise kil taşı olarak aralanmıştır. Analizin yapılacağı tünel kıltaşı birim içerisinde ilerleyeceği tespit edilmiştir. Tünel kazı ortamı ve üst kotlara doğru birimlere ait özelliklerin değerlendirilmesi ilerleyen başlıklar altında sunulmuştur.

Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (YATM) ilkelerine uygun olarak, belirli kaya kütle kalitesi sınıflarına göre birincil destek tipinin seçimi, büyük ölçüde, kaya kütle kalitesinin en son jeolojik ve mühendislik değerlendirmesine bağlıdır. Bu nedenle, tünel açımı süresince, kaya kütle kalitesinin mühendislik özelliklerinin ve kalitesinin değerlendirilmesi gerçekleştirilmekte ve tünel desteğinin deformasyon derecesi sürekli olarak izlenmektedir. Kaya kütle kalitesinin ön değerlendirmesi tasarımı amaçlanan tünelin ekseni boyunca yapılan ancak tünele ait tüm kesitleri içermeyen sondajlara dayanmaktadır (Niedbalski et al. 2018).

Literatürde birçok kaya sınıflama sistemi yer almaktadır. Tez çalışması kapsamında bu yöntemlerden RMR, Q ve GSI kaya kütle sınıflamaları kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Kaya Kütle Sınıflaması

Ampirik tararım yaklaşımlarında kaya kütle sınıflaması büyük bir öneme sahiptir. Bu sınıflamanın önemini üç başlık altında toplayabiliriz:

1. Nitelikli arazi araştırmasının minimum veriyle geliştirmek,
2. Tasarımlar için niceliksel bilgi sağlamak,
3. Proje süresince etkin bir iletişim ve daha iyi mühendislik yaklaşımını desteklemektir (Jeong et al. 2014).

Bununla birlikte kaya kütle dayanımını değerlendirmek için güncel olarak dört mühendislik yaklaşımı bulunmaktadır:

1. Arazi deneyleri

2. Kaya kütlesinin elastik dalga hızı temelinde ampirik ilişkiler
3. Kaya kütle sınıflamaları indeksleri temelindeki ampirik ilişkiler
4. Kaya numunesinin ve kaya kütlesinin özelliklerinin elastik dalga hızı kullanılarak geliştirilen azaltma faktörü (Aydan 2019).

Kaya numunesinin dayanım ve deformasyon özellikleri birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörlerin en önemlileri şunlardır:

- Anizotropi
- Nem içeriği/boşluk suyu basıncı
- Çevre basıncı
- Zamana bağlı deformasyon (sünme) ve yükleme oranı
- Örnek boyutu ve şekli (Anonymous 1988).

İlerleyen başlıklar altında kaya ve zemin ortamlarına ait mühendislik değerlendirmeleri yapılmaktadır. Çalışma ortamındaki birimlere ait kaya kütle sınıflaması ve bu sınıflamalardan yararlanılarak elde edilen mühendislik özellikleri aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

Kiltaşı birimi mühendislik özelliklerinin belirlenmesi

Bieniawski (1989) tarafından verilen değerlendirme ölçütleri dikkate alınarak kiltaşı birimine ait Kaya Kütle Değeri (RMR) Tablo 19'da sunulduğu gibidir.

Tablo 19. Kiltaşı RMR sınıflaması (Tünel Araştırma Raporu 2016).

Parametre	Belirlenen Değer	Puan
1.Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	12.4	2
2.Kaya Kalite Göstergesi RQD (%)	20	3
3.Süreksizlik Aralığı (mm)	< 60	8
4.Süreksizliklerin Durumu		
Devamlılık (m)	10-20	2
Açıklık (mm)	1 - 5 mm	1
Pürüzlülük	Az Pürüzlü	3
Dolgu	Yumuşak dolgu < 5 mm	2
Bozunma	Çok ayrışmalı	3
5.Yeraltı Suyu	Nemli	7
Temel RMR		31
Temel RMR ₈₉ (Tamamen Kuru)		39
Süreksizlik Yönelimi		-5
Nihai RMR		26

Tablo 19'daki kil taşı birimine ait kaya kütle sınıflaması değerleri kullanılarak elde edilen tasarım parametreleri ve mühendislik özellikleri Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 20. Kaya kütlelerinin tasarım parametreleri ve mühendislik özellikleri (Bieniawski 1989).

Kayaç kütlelerinin parametresi/özellikleri	Kayaç Kütle Oranlaması (RMR) (Kaya Sınıfı)				
	100 – 81 (I)	80 – 60 (II)	60 – 41 (III)	40 – 21 (IV)	<20 (V)
1. Kayaç kütlelerinin sınıflandırması	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
2. Ortalama dayanma süresi	15 m açıklık için 20 yıl	10 m açıklık için 1 yıl	5 m açıklık için 1 hafta	2.5 m açıklık için 10 saat	1 m açıklık için 30 dakika
3. Kayaç kütlelerinin kohezyonu(kPa)*	> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
4. Kayaç kütlelerinin içsel sürtünme açısı (°)	> 45	35 – 45	25 – 35	15 – 25	< 15

Tablo 20 incelendiğinde kiltası biriminin RMR kaya sınıflama sistemine göre "Zayıf Kaya" sınıfında olduğu belirlenmiştir.

Barton et al. (1974)'a göre hazırlanan Tünel araştırma raporu (2016)'daki Q sınıflama sisteminde kullanılacak olan parametreler Tablo 21'de verilmiştir.

Tablo 21. Kiltası Q sınıflaması (Tünel araştırma raporu 2016)

Parametre	Puan
RQD	20
Jn (Eklem Takım Sayısı)	15
Jr (Eklem Pürüzlülük Sayısı)	3.0
Ja (Eklem Yüzeyi Araştırma Sayısı)	4.0
Jw (Eklem Su Azaltma Faktörü)	0.66
SRF (Gerilim Azaltma Faktörü)	10
ESR (Kazı Destekleme Oranı)	1.0
$Q = (RQD/Jn) \times (Jr/Ja) \times (Jw/SRF)$	0.06
YATM	C1

Barton et al. (1974), (Bieniawski 1989) ve YATM'ye göre verilen kaya sınıflama sistemleri karşılaştırmalı olarak Tablo 22'de verilmiştir.

Tablo 22. Kaya sınıflandırma sistemlerinin karşılaştırılması (Barton et al. 1974, Bieniawski 1989, YATM).

	Barton Kaya Kütle Kalitesi (Q)	Bieniawski Kaya Kalite Oranı (R M R)	ÖNORM B 2203 Ekim 1994 Öncesi	ÖNORM B 2203 Ekim 1994 Sonrası
1000		101		
	Olağanüstü iyi			
400		94		
	İleri derecede iyi	Çok iyi kaya	A 1 Stabil	A 1 Sağlam
100		82.7		
	Çok iyi	80		80
40				
	İyi	İyi kaya	A 2 Aşırı Sökülen	A 2 Sonradan sökülen
10		65		10
	Orta			B1 Gevrek
4		58		4
	Zayıf	Orta kaya	B1 Gevrek	B2 Çok gevrek
1		47		1
	Çok Zayıf		45	
		40	B2 Çok gevrek	B3 Taneli
0.1		Zayıf kaya	29	0.1
	Aşırı derecede zayıf	20	C1 Baskılı	C1 Dağ atma
			17	0.03
0.01			C2 Çok baskılı	C2 Baskılı
			10	0.015
	Olağanüstü zayıf	Çok zayıf kaya	L1 Gevşek zemin yüksek kohezyon	C3 Çok baskılı
			5	0.08
0.001			L2 Gevşek zemin düşük kohezyon	C4 Akıcı
				0.002
				C5 Şişen

Kiltaşı birimi nin Tablo 22'ye göre değerlendirildiğinde RMR puanına göre “Zayıf Kaya” Q değerine göre ise "Aşırı Derecede Zayıf Kaya" sınıfına girdiği gözlemlenmektedir.

Literatürde Chaqaet et al. (1993) tarafından verilen RMR ve Q kaya sınıflama sistemleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla verilen amprik bağıntılar kullanılarak kıltaşı için belirlenen bu değerler arasındaki korelasyonlar Tablo 23’de verilmiştir. Yapılan çalışmalar ışığında RMR ve Q kaya sınıflama sistemleri için Tablo 23’de yer alan korelasyonlar kullanılarak elde edilen RMR değerleri sunulmaktadır.

Tablo 23. Farklı durumlar altında RMR ve Q sistemleri arasındaki korelasyonlar (Choqaet et al. 1993)

Korelasyon	Hesaplanan RMR	Ülke	Kazı Türü
$RMR = 13.5 \log Q + 43$	27	Y. Zelanda	İnş.Müh.Tünelleri
$RMR = 9 \ln Q + 44$	18	Farklı Ülkeler	İnş.Müh. Tünelleri
$RMR = 12.5 \log Q + 55.2$	40	İspanya	İnş.Müh. Tünelleri
$RMR = 5 \ln Q + 60.8$	48	G. Afrika	İnş.Müh. Tünelleri
$RMR = 43.89 - 9.19 \ln Q$	70	İspanya	Maden tünelleri – Yumuşak kaya
$RMR = 10.5 \ln Q + 41.8$	12	İspanya	Maden tünelleri –Yumuşak kaya
$RMR = 12.11 \log Q + 50.81$	36	Kanada	Maden tünelleri – Sert kaya
$RMR = 8.7 \ln Q + 38$	14	Kanada	İnş.Müh.Tün.-sedimenter kayaçlar
$RMR = 10 \ln Q + 39$	11	Kanada	Maden tün. – Sert kaya

RMR ve Q korelasyonları ile elde edilen değerler incelendiğinde, inşa edilecek olan inşaat mühendisliği tünelleri için elde edilen RMR değerlerinin ortalaması alındığında değeri hesaplanan RMR değeri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. RMR ve Q’ya göre yapılan değerlendirmelerin sonucunda kazı yapılacak ortam için Nihai RMR değeri 26 seçilmiştir. RMR ve Q değerlerine göre C1 sınıfında bir kazı ortamı olduğu belirlenmiştir. Seçilen kaya sınıfı için YATM teknik şartnamesine göre yapılan değerlendirme Tablo 24’de sunulmaktadır.

Tablo 24. YATM teknik şartnamesi

Destek Sınıfı: C1	
Kaya Kütlesinin Davranışı	Yüksek örtü kalınlığı altında masif kayada yüksek ön gerilmeler kırılğan kaya kütlesinde elastik enerji depolanmasına neden olur. Bu enerjinin aniden yer değiştirmesiyle kayada kesme ve kaya yapısının ezilmesi ile birlikte kırılmalar olur. Desteksiz bırakılan kısımlarda fırlayan kayalar parçalanmaya müsaittir. Kaya kütlesindeki kırılmalar derinlere ulaşır.
Su Etkisi	Bozuşmuş veya ayrıışmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışının kaya kütlesinin dayanımı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır.
Kazı	Bölünmüş kazı ile ilerlemelidir. Taban kazısı gereklidir. İlerleme adımı uzunluğu üstyarıda 1.5-2.0 m altyarıda 3 m'den fazla olmayacaktır. Kazı düzgün patlatma veya mekanik kazı metotları ile yapılabilir.
Destekleme ve Zamanlaması	Destekleme elemanları olarak kısa ama sık yerleştirilmiş kaya bulonları, çelik hasır gereklidir. Ek tedbir olarak kaya kütlesindeki basıncı azaltıcı delikler açılabilir. Bu yöntemle dağ atmaları da önlenabilir. Jeolojik şartlara göre üstyarı aynasından 100-150 m'den daha geride olmamak üzere yerinde dökme bir taban kemeri betonu yapmak gerekebilir.

Analiz kesitinde kaya kütlesine ait mühendislik özellikleri Tablo 25 ve Tablo 26'da verilen farklı yaklaşımlarla hesaplanarak elde edilen sonuçlar optimize edilmiştir. Hesaplanan değerler Tablo 27 – 29' da verilmiştir.

Tablo 25'de verilen ampirik formüllerde bulunan GSI'nin belirlenmesi için RMR_{89} 'un kullanılması durumunda yeraltı su puanı olarak 15, süreksizlik yönelimi puanı için ise 0 değeri esas alınmıştır (Hoek et al. 1997).

$RMR_{89} > 23$ koşulu ile; $GSI = RMR_{89} - 5$ eşitliğinden $GSI=34$ olarak hesaplanmıştır.

GSI'nin tahmini amacıyla Q sisteminin klasik ifadesi aşağıdaki şekilde olduğu gibi düzenlenmiştir (Ulusay vd. 2007).

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (4.1)$$

$GSI = 9\log_e Q' + 44 \rightarrow GSI = 44$ olarak hesaplanabilir.

Ancak yapılan değerlendirmelerde güvenli tarafta kalmak amacıyla $GSI = 34$ olarak kullanılması uygun görülmüştür.

Tablo 25. Kaya kütlesine sınıflandırma ve kaya kütlesinin özellikleri arasındaki direkt ilişkiler (Aydan 2019).

Özellik	Bağıntı	Kaynak
Deformasyon Modülü, E_M	$\frac{E_M}{E_i} = 0.009e^{RMR/22.82} + 0.000028RMR^2$	Nicolson ve Bieniawski (1990)
	$\frac{E_M}{E_i} = \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)}$	Aydan ve Kawamoto (2000)
	$\frac{E_M}{E_i} = 0.02 + \frac{(1 - 0.5D)}{1 + e^{((60 + 15D - GSI)/11)}}$	Hoek ve Diederichs (2006)
	$\frac{E_M}{E_i} = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\Pi \left(\frac{RMR}{100} \right) \right) \right)$	Mitri et al. (1994)
	$\frac{E_M}{E_i} = 10^{0.0186RQD - 1.91}$	Zhang ve Einstein (2004)
	$\frac{E_M}{E_i} = e^{(RMR - 100)/36}$	Galera et al. (2005)
Tek Eksenli Basınç Dayanımı, σ_M	$\frac{\sigma_M}{\sigma_i} = s^{\wedge} \left(\frac{1}{2} \right) \quad s = e^{(RMR - 100)/9}$	Hoek ve Brown (1980)
	$\frac{\sigma_M}{\sigma_i} = e^{(RMR - 100)/24}$	Kalamaras ve Bieniawski (1995)
	$\frac{\sigma_M}{\sigma_i} = RMR / ((RMR + 6x(100 - RMR)))$	Aydan ve Dalgıç (1998)
Kohezyon, c_M	$\frac{c_M}{c_i} = RMR / ((RMR + 6(100 - RMR)))$	Aydan et al. (2012)
İçsel sürtünme açısı, Φ_M	$\frac{\Phi_M}{\Phi_i} = 0.3 + 0.7 RMR / ((RMR + \beta * (100 - RMR)))$	Aydan ve Kawamoto (2000)
Poisson Oranı, ν_M	$\frac{\nu_M}{\nu_i} = 2.5 - 1.5RMR / ((RMR + (100 - RMR)))$	Aydan et al. (2012)
Çekme dayanımı, σ_{SM}	$\frac{\sigma_{SM}}{\sigma_i} = RMR / (RMR + 6(100 - RMR))$	Tokashiki (2011)

Tablo 26. Kaya kütlesi için değişik özellikler için α_0 , α_{100} ve β değerleri (Aydan 2019).

Özellik (α)	α_0	α_{100}	β
Deformasyon modülleri	0.0	1.0	6
Poisson oranı	2.5	1.0	0.3
Tek eksenli basınç dayanımı	0.0	1.0	6
Çekme dayanımı	0.0	1.0	6
Kohezyon	0.0	1.0	6
İçsel sürtünme açısı	0.3	1.0	1.0

Tablo 27. Tablo 25' e göre hesaplanan kıltaşı Kütle Elastisite Modülü Değerleri (E_m).

Araştırmacı	Kütle Elastisite Modülü (E_m) (MPa)
Nicholson ve Bieniawski (1990)	315
Aydan ve Kawamoto (2000)	328
Hoek ve Diederich (2006)	361
Mitri et al. 1994	651
Zhang and Einstein (2004)	98.79
Galara et al. (2005)	626
E_{ort}	408

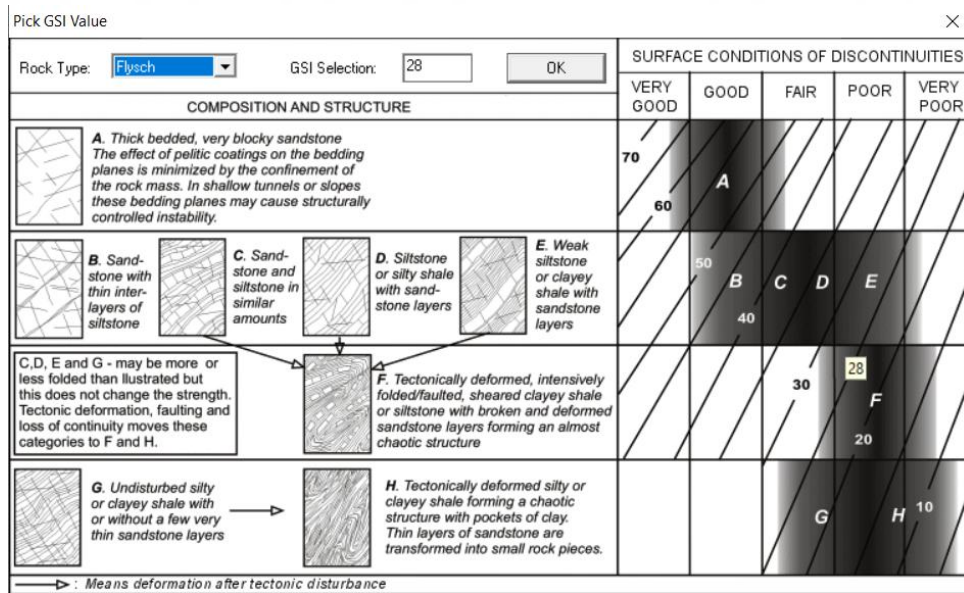
Tablo 28. Tablo 19’a göre hesaplanan Kaya kütlesinin Dayanımı (σ_{cm})

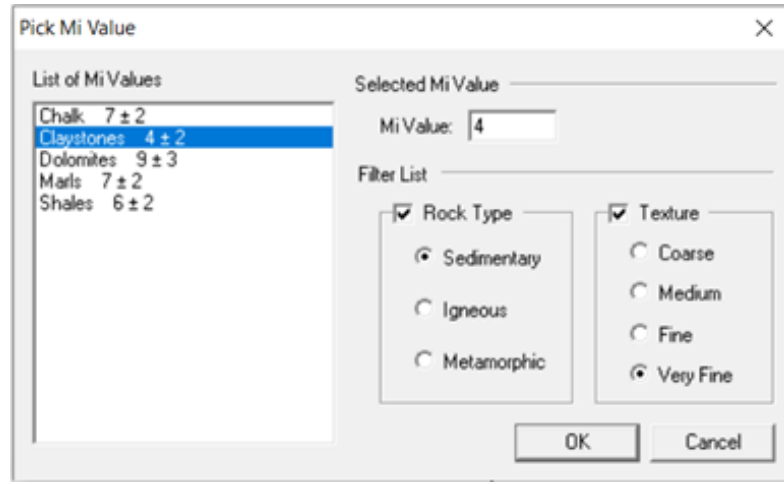
Araştırmacı	Kaya kütlesinin dayanımı (σ_{cm}) (MPa)
Hoek ve Brown (1980)	0.418
Kalamaras ve Bieniawski (1995)	0.976
Aydan ve Dalgıç (1998)	1.19

Tablo 29. Tablo 19’a göre hesaplanan Kaya kütlesinin Poisson oranı (ν_m)

Araştırmacı	Kaya kütlesinin Poisson oranı (ν_m) (MPa)
Aydan et al. (2012)	0.38

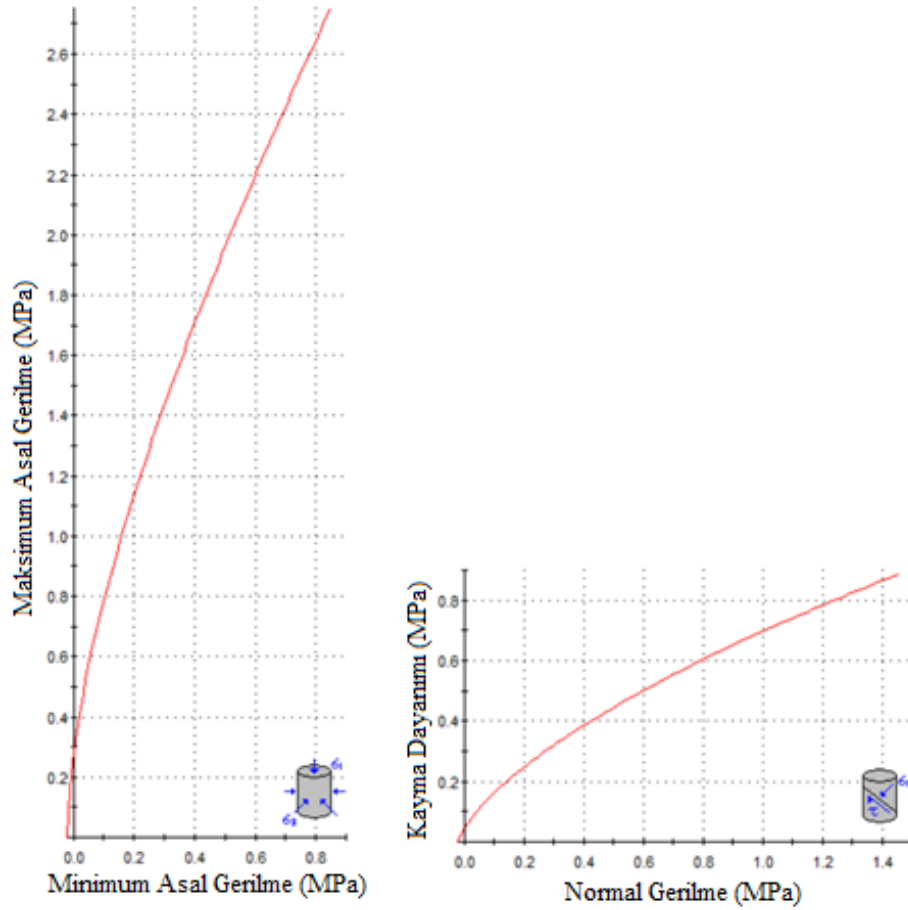
Kayaç ortamlarının kütle parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yukarıda yapılan hesaplamalara ek olarak Hoek & Brown yenilme ölçütü’ne göre de değerlendirme yapılmıştır. Bu amaçla laboratuvar deney sonuçları kullanılmış olup modelleme girdi parametreleri olarak, GSI (jeolojik dayanım indeksi) (Şekil 53), σ_i (kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı), E_i (sağlam kayacın elastisite modülü) ve m_i (kaya malzemesine ait boyutsuz malzeme sabiti) kullanılmıştır (Şekil 54). İlgili parametrelerle Roclab yazılımında geoteknik parametreler üretilmiştir. Kıltaşı birimi için malzeme sabiti (m_i) değeri $m_i = 4$ olarak alınmıştır. Ayrıca açılacak tünel kazı tekniğinin mekanik kazı olduğunda örselenme zonunda örselenme faktörü $D=0$ değerleri için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 53.** Kıl taşı GSI değerinin seçilmesi (Roclab).



Şekil 54. Kıl taşı m_i değerinin seçilmesi (Roclab).

Roclab programı kullanılarak Örselenme faktörü (D_f) sıfır durumunda kıl taşı için girdi ile belirlenen kaya parametrelerine ait değerler Tablo 30' da verilmiştir. Program çıktısında verilen asal gerilmeler ve normal gerilme - kayma gerilmesi eğrileri Şekil 55' de sunulmaktadır.



Şekil 55. Kıltaşı için asal gerilmeler ve normal gerilme - kayma gerilmesi eğrileri (Roclab).

Tablo 30. Kil taşı için Roclab programı girdi ve çıktı değerleri (Roclab).

Hoek Brown Sınıflaması		Birim
σ_i	12.4	MPa
GSI	34	
m_i	4	
Df	0	
E_i	3410	MPa
Hoek Brown Kriterleri		
m_b	0.378762	
s	0.000653392	
a	0.517064	
Yenilme Zarfı		
Uygulama türü	Tünel	
σ_{3max}	0.850736	MPa
Birim Hacim Ağırlık	0.023	MN/m ³
Tünel Derinliği	82	m
Mohr-Coulomb parametreleri		
c	0.155891	MPa
Φ	28.0225	°
Rock Kütle parametreleri		
σ_t	-0.0213909	MPa
σ_c	0.279681	MPa
σ_{cm}	0.950884	MPa
E_m	361.419	MPa

Kaya tuzu – anhidrit birimin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi

SK 4 sondaj çalışması ve literatür verisi (Anonymous 1982) beraber değerlendirildiğinde ikinci tabakanın büyük çoğunlukla kaya tuzu – anhidrit ve kil taşı aralanmalı kaya tuzu olduğu gözlemlenmiş olup, Roclab yazılımında kaya tuzu- anhidrit tabakalarına ait parametre seçimi yapılırken bu husus göz önünde bulundurulmuştur. Kaya tuzu – anhidrit birimi için literatür verilerinden de faydalanılarak Tablo 31 ve 32’ de verilen değerler ile laboratuvar çalışması sonucunda elde edilen dayanım değerleri kıyaslanarak optimum değerlerin seçilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca ilgili birim için yapılan RMR değerlendirmesi Tablo 33’ de sunulmakta olup devamında RMR’a bağlı GSI değeri hesaplanmıştır. İlgili tabakaya ait yapılan hesaplamalar ve değerlendirmeler aşağıda sunulmaktadır. Kaya tuzu – anhidrit birimi içerisinde tünel açımı gerçekleştirilmeyeceği için mühendislik parametrelerinin belirlenmesinde yalnızca RMR değeri kullanılmıştır.

Tablo 31. Tek eksenli basınç deneyi sonuçları (Liang et al. 2007).

Numune	Litoloji	Pik dayanım, UCS (MPa)	Yenilmedeki eksenel birim şekil değiştirme (%)	Elastik Modül (GPa)	Poisson Oranı
116-24	Kaya tuzu	20.27	0.54	4.4	0.31
117-4	Kaya tuzu	17.06	0.52	5.9	0.31
163-23-1	Anhidrit	23.72	0.11	20.9	0.20
163-23-2	Anhidrit	24.11	0.16	22.6	0.27
128-15	Anhidrit ara tabakalı kaya tuzu	23.29	0.47	7.6	0.16
140-21-1	Anhidrit ara tabakalı kaya tuzu	17.29	0.52	5.3	0.30

Tablo 32. Farklı gerilmeler altında numunelerin elastik parametreleri (Liang et al. 2007).

Çevre Basıncı (MPa)	Kaya tuzu		Anhidrit		Kaya tuzu – Anhidrit kompoziti	
	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı
0	4.4-5.9	0.31	20.9-22.6	0.20-0.27	5.3-7.6	0.16-0.30
5	20.4	0.59*	61.8	0.43	10.3	0.21
10	20.8	0.59*	17.3	0.15	19.6	0.12
15	25.2	0.44	32.7	0.29	24.1	0.69*

*Ölçülen değerler Poisson oranının maksimum 0.5 değerinden çok daha büyüktür. Bu durum kaya tuzu minerali zonlarında viskoplastik birim şekil değiştirmenin ek bileşeni olarak içsel hasar ve dilatasyonu yansıtmaktadır.

Tablo 33. Kaya tuzu – anhidrit için RMR değerlendirmesi

Parametre	Belirlenen Değer	Puan
1.Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	28	4
2.Kaya Kalite Göstergesi RQD (%)	38	8
3.Süreksizlik Aralığı (mm)	60 – 200 mm	8
4.Süreksizliklerin Durumu		
Devamlılık (m)	3-10 m	2
Açıklık (mm)	1 - 5 mm	1
Pürüzlülük	Az Pürüzlü	3
Dolgu	Yumuşak dolgu < 5 mm	2
Bozunma	Orta Derecede Bozunmuş	3
5.Yeraltı Suyu	Tamamen kuru	15
Temel RMR		46
Temel RMR ₈₉ (Tamamen Kuru)		46
Süreksizlik Yönelimi		0
Nihai RMR		46

$RMR_{89} > 23$ koşulu ile; $GSI = RMR_{89} - 5$ eşitliğinden $GSI=41$ olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen RMR ve GSI değerlerine göre Aydan (2019) ve Hoek et al. (2002) tarafından geliştirilen Raclab programında GSI (Şekil 56), m_i (Şekil 57) ve $D_f=0$ durumu için diğer girdi değerleri ile beraber analiz edilmiştir ve elde edilen değerler Tablo 34 - 36' da verilmektedir. Elde edilen asal gerilmelere ait eğri ve normal gerilmeye karşılık kayma gerilmesinin elde

edildiği eğri Şekil 58’ da sunulmaktadır. Ayrıca elde edilen sismik çalışmaya ait sayısal veriler optimize edildiğinde Tablo 37’ de elde edilen bütün değerler ile beraber özetlenmektedir.

Tablo 34. Tablo 25’ e göre hesaplanan kaya tuzu – anhidrit için Kütle Elastisite Modülü Değerleri (E_m).

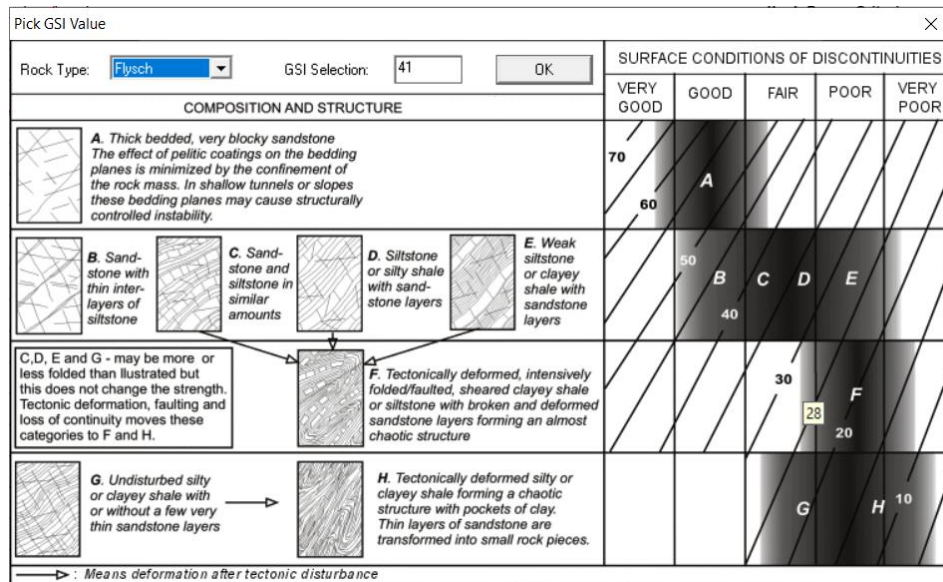
Araştırmacı	Kütle Elastisite Modülü (E_m) (MPa)
Nicholson ve Bieniawski (1990)	1060
Aydan ve Kawamoto (2000)	1040
Hoek ve Diederich (2006)	1430
Mitri et al. 1994	3594
Zhang and Einstein (2004)	501
Galara et al. (2005)	1865

Tablo 35. Tablo 25’ e göre kaya tuzu – anhidrit için hesaplanan kaya kütlelerinin dayanımı (σ_{cm}).

Araştırmacı	Kaya kütlelerinin dayanımı (σ_{cm}) (MPa)
Hoek ve Brown (1980)	0.418
Kalamaras ve Bieniawski (1995)	0.976
Aydan ve Dalgıç (1998)	1.19

Tablo 36. Tablo 25’ e göre kaya tuzu – anhidrit için hesaplanan kaya kütlelerinin poisson oranı (ν_m).

Araştırmacı	Kaya kütlelerinin Poisson oranı (ν_m) (MPa)
Aydan et al. (2012)	0.43



Şekil 56. Kaya tuzu – Anhidrit için GSI değerinin seçilmesi (Roclab)

Pick Mi Value

List of Mi Values

Anhydrite	12 ± 2
Greywackes	18 ± 3
Micritic Limestones	8 ± 3
Siltstones	7 ± 2

Selected Mi Value

Mi Value: 12

Filter List

☒ Rock Type

☒ Sedimentary

☐ Igneous

☐ Metamorphic

☒ Texture

☐ Coarse

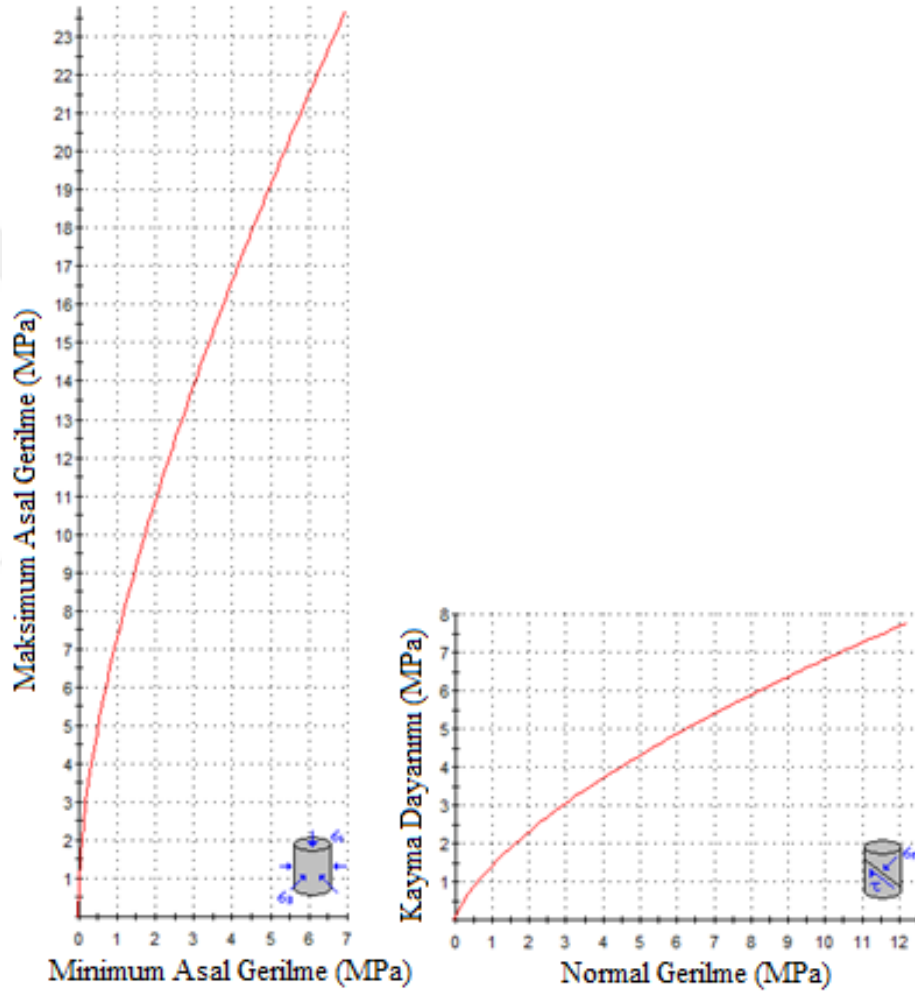
☐ Medium

☒ Fine

☐ Very Fine

OK Cancel

Şekil 57. Kaya tuzu – Anhidrit m_i değerinin seçilmesi (Roclab)



Şekil 58. Kaya Tuzu -anhidrit için GSI ve Hoek & Brown Görgül Yenilme Özellikleri (Roclab).

Tablo 37. Kaya Tuzu - Anhidrit için Roclab programı girdi ve çıktı değerleri (Roclab)

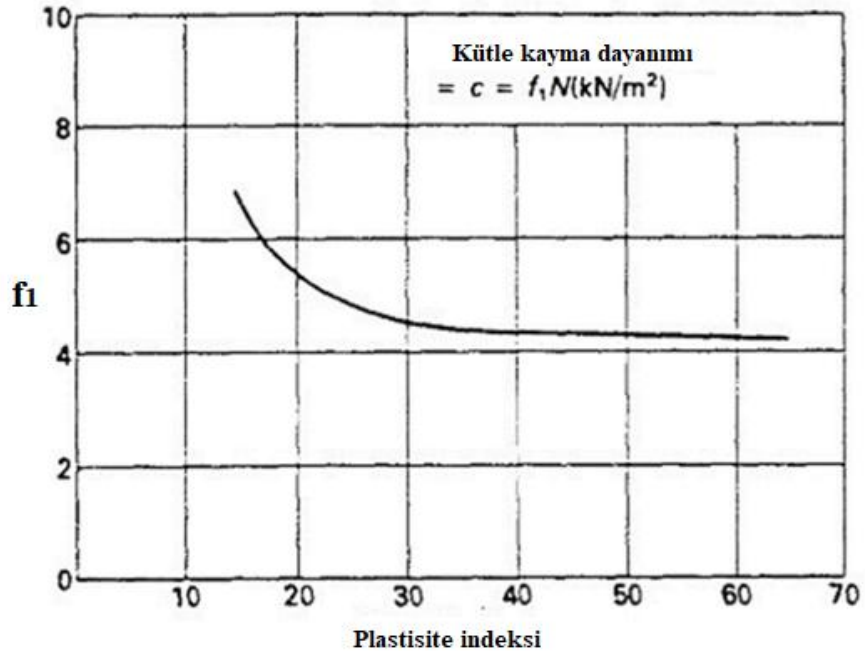
Hoek Brown Sınıflaması		
σ_i	28	MPa
GSI	41	
m_i	12	
Df	0	
E_i	8360	MPa
Hoek Brown Kriterleri		
m_b	1.45902	
s	0.00142219	
a	0.510622	
Yenilme Zarfı		
Uygulama türü	Genel	
σ_{3max}	7	MPa
Mohr-Coulomb parametreleri		
c	1280	kPa
Φ	29	°
Rock Mass parametreleri		
σ_t	-0.0272933	MPa
σ_c	0.984911	MPa
σ_{cm}	4.3788	MPa
E_m	1429.03	MPa

Yamaç molozu birimin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi

Yamaç molozu birimi için laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen mühendislik özellikleri, SPT-N değeri ve f_1 değerleri Tablo 38’ de verilmiştir. f_1 değeri Şekil 59’ da gösterilen plastisite indeksi - f_1 ilişkisinden elde edilmiştir. f_1 değeri elde edildikten sonra $c_u = f_1 \times N$ ampirik formülünden yamaç molozu kütesine ait drenajsız kayma mukavemeti değeri elde edilmiştir. Drenajlı kayma mukavemeti değeri ise elde edilen drenajsız kayma mukavemeti ile olan $c' \sim c_u / 10$ (Sorensen et al. 2013) ilişkisinden yararlanılarak değerlendirilmiştir.

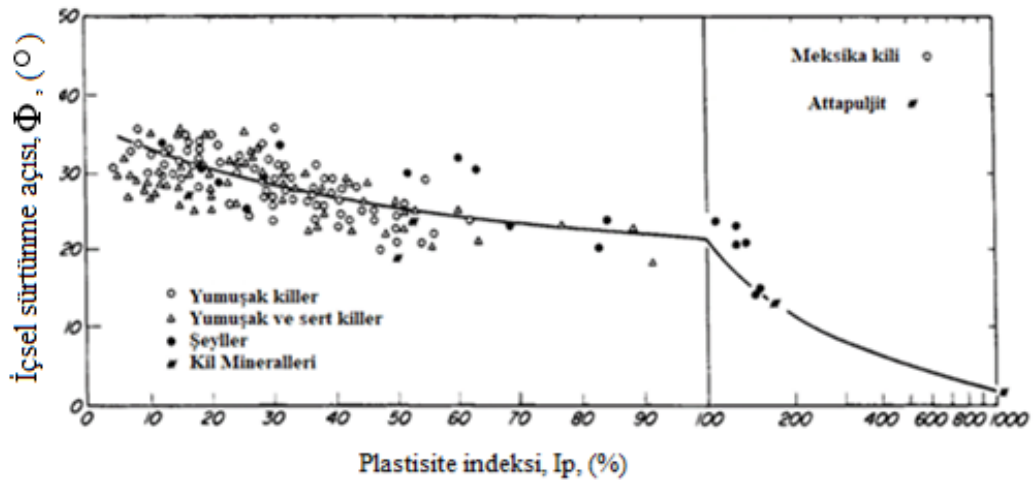
Tablo 38. Zemin için değerlendirilen parametreler

Ortalama Plastisite indeksi (PI)	Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması (USCS)	Ortalama SPT- N	f_1
26	CH	40	5.1



Şekil 59. Plastisite indeksi - f_1 ilişkisi (Stroud 1974)

Ayrıca (Terzaghi et al. 1996) tarafından verilen plastisite indeksine – içsel sürtünme açısı ilişkisi kullanılarak bağlı olarak yamaç molozu biriminin içsel sürtünme açısı 30° olarak belirlenmiştir (Şekil 60).



Şekil 60. Plastisite indeksi – içsel sürtünme açısı değerleri (Terzaghi et al. 1996)

Yamaç molozu kütesine ait elastisite modülü değeri Bowles (1996)'a göre 4.2 ve 4.3 eşitlikleri kullanılarak hesaplanmış olup hesaplanmıştır.

$$E_s = Kx s_u \quad (4.2)$$

$$K = 4200 - 142.54 \times PI + 1.73 PI^2 - 0.0071 \times PI^3 \quad (4.3)$$

Üç farklı birime ait yapılan değerlendirmeler sonucunda mühendislik özellikleri Tablo 39'da özetlenmektedir.

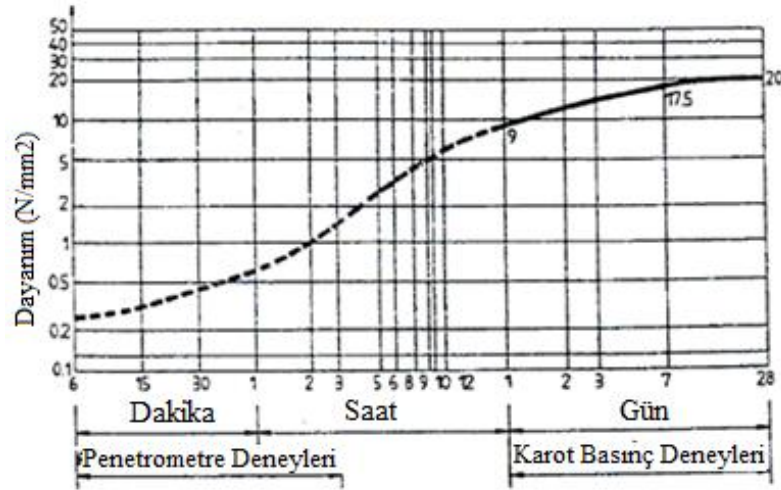
Tablo 39. Zemin ve kayaç türü malzemelere ait mekanik özellikler.

Zemin/Kaya	Kil Taşı	Kaya Tuzu – Anhidrit	Yamaç Molozu
Malzeme	İzotropik	İzotropik	İzotropik
Model Tipi	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Genel Parametreler			
Elastisite Modülü (E) [kN/m ²]	316000	1429000	314000
Poisson oranı	0.38	0.43	0.37
Birim Ağırlık (γ) [kN/m ³]	23	24	17
Doygun Birim Ağırlık (γ) [kN/m ³]	24	24	18
Kohezyon (c') [kN/m ²]	156	1280	20
İçsel Sürtünme Açısı (Φ') [°]	28	29	30

Yapısal Modellerin Belirlenmesi

Tünel yükleri için değerlendirme prosedürü, ortam kazılırken birincil desteklerin kurulduğunu varsayar. İkincil destekler, birincil destekler ve çevresindeki ortam denge koşullarına ulaştıktan sonra dikkate alınır (Jeong et al. 2014). Birincil destek elemanları kaya bulonu, iksa, püskürtme beton vb., ikincil destek elemanı ise kaplama betonu olarak sıralanabilir.

Püskürtme betonuna ait mekanik özellikler değerlendirilirken Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) (Şekil 61) ve TS 500 kaynaklarından yararlanılmıştır. Püskürtme beton için Çalışmada kullanılan parametreler Tablo 40' da sunulmaktadır.



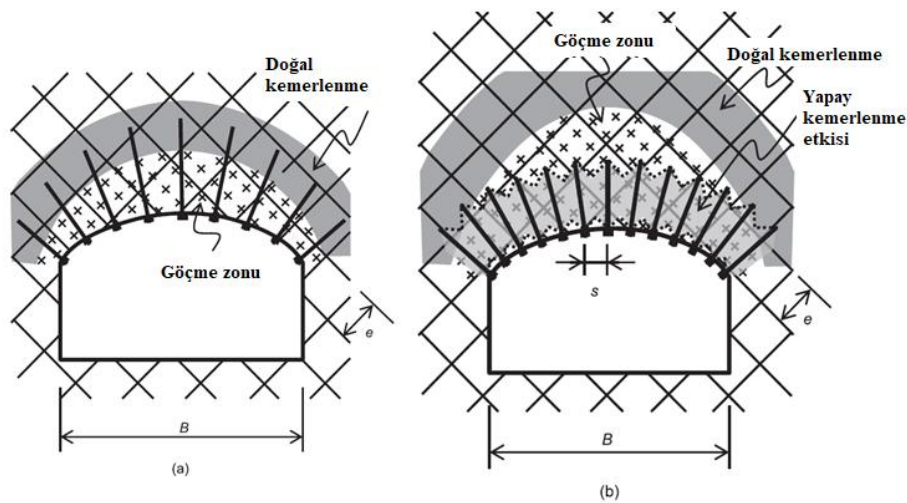
Şekil 61. C20/25 sınıfındaki püskürtme betonun basınç dayanım gelişim hızı (Karayolları Teknik Şartnamesi 2013).

Tablo 40. Püskürtme betona ait mekanik özellikler.

Yapısal Malzemeler	Taze Püskürtme Beton (C20/25)	Sertleşmiş Püskürtme Beton (C20/25)	Birim	İlgili Standart
Malzeme	İzotropik	İzotropik	-	-
Model Tipi	Elastik	Elastik	-	-
Elastisite Modülü(E)	12.6×10^5	28×10^6	MPa	TS 500;
Poisson oranı(ν)	0.20	0.20	-	Karayolları
Birim Ağırlık(γ)	2.4	2.4	kN/m ³	Teknik
Kalınlık	30	30	cm	Şartnamesi (2013)

SG, PG, IBO ve swellex bulon tipleri (Karayolları Teknik Şartnamesi 2013) olmak üzere tünelcilikte genel olarak dört farklı bulon tipi bulunmaktadır. Bu bulon türleri kazı koşullarının ihtiyaçları çerçevesinde farklı yapım teknikleri ve kapasite değerlerine sahiptirler.

Doğal kemerlenme etkisi, kaya içinde tünel duvarının arkasında belirli bir mesafede oluşmaktadır. Sağlam kayalar içerisinde açılan boşlukların etrafında sınırlı bir yenilme zonu oluşmaktadır (Şekil 62 a). Bulonlama işlemi ise yenilme zonundan en az 1 m daha fazla uzunlukta olacak şekilde yapılması gerekmektedir. Ancak zayıf kaya koşullarında yenilme zonu çok daha fazla olmaktadır (Şekil 62 b). Bu durumda bulon uzunlukları devasa miktarlara ulaşabilmektedir. İlgili durum için yenilme zonu içerisinde yapay kemerlenme etkisi oluşturulması gerekmektedir. Norveç Yol Merkezi göçme zonu içerisinde yapay kemerlenmeyi oluşturmak için göreceli olarak kısa öngermeli kaya bulonunun kullanımını önermektedir. Seçilen bulon uzunluğu ve aralığının yapay kemerlenme zonu için uygun olması gerekmektedir (Li 2017). Ancak Satıcı (2018) yaptığı çalışmada tünel kazılarında zayıf ve orta dayanımlı kayaç kütlelerinin stabilizasyonu için 6 ile 10 m uzunluğunda kaya bulonlarının uygun olabileceğini belirtmiştir. Bu tez çalışmasında kaya bulonu uzunluğu 8 m olarak seçilmiştir.



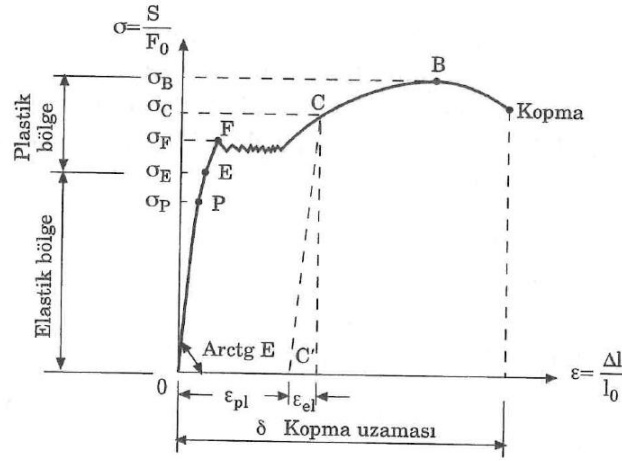
Şekil 62. Kaya yenilmesinin farklı durumları için bulonlama prensipleri (a) sınırlı yenilme zonu için (b) büyük yenilme zonu için (Li 2017).

Kaya bulonunda ön germe yükleri düşükse veya yoksa nispeten büyük bir kayma hacmi mevcut olacaktır. Kaya bulonlarının gerilmesiyle, kaya kütlesi sınırlandırılarak deformasyonların azalması sağlanmaktadır (Goodmann *et al.* 1971). Hosseinitoudeshki *et. al.* (2014) yaptıkları çalışmada 12 m çapında dairesel kesite sahip tünel için farklı uzunluklardaki kaya bulonlarını değerlendirmiş olup elde ettikleri verilere göre ön gerilme değerini optimize ederek 90 kN olarak belirlemişlerdir. Ön germe yükü bulon yenilmesinin yaklaşık olarak %50'si olarak alınabilir (Goodmann *et al.* 1971). Bu bilgiler ışığında modellemede kullanılan kaya bulonları öngermeli olarak düşünülmüştür. Düşünülen kaya bulonu için tasarım parametreleri Tablo 41' de sunulmaktadır.

Tablo 41. Kaya bulonuna ait boyutsal ve mühendislik özellikleri

Özellik (S 420)	Değer	Birim	İlgili Standart
Malzeme	İzotropik	-	-
Model Tipi	Elastik	-	-
Bulon Çapı/Et kalınlığı	76/9	mm	-
Uzunluk	8	m	-
Bulon türü	IBO	-	-
Elastisite Modülü (E)	206182	MPa	TS 648
Kayma Modülü (G)	79434	MPa	TS 648
Poisson oranı(ν)	0.297	-	$G=E/2(1+\nu)$
Birim Ağırlık(γ)	77	[kN/m ³]	TS 708
Öngörme Yüğü	-120	kN	Goodmann <i>et al.</i> (1971)
Bulon kapasitesi	1000	kN	
Kayaç Yenilmesi	712	kPa	
Adhezif göçme; kayaç – enjeksiyon	358	kPa	Malm <i>et al.</i> (2017)
Adhezif göçme; çelik çubuk – enjeksiyon	897	kPa	
Çekme yenilmesi; çelik çubuk	259	kPa	

Çelik malzemelerinin yenilmeden önce elastik deformasyon limitlerine ulaşması ile başlayan plastik deformasyonun önemli bir bölümü akma şeklinde gerçekleşmektedir. Tipik bir çelik tahkimat malzemesi için gerilme ve birim deformasyon ilişkisi Şekil 63' de gösterilmiştir. Çeliğin mekanik özellikleri kimyasal birleşimine bağlı olarak değişebilmekle birlikte, çoğu zaman akma sınırına %2 dolaylarında birim deformasyon ile ulaşılmaktadır. Güvenli bir iksa tasarımı için çeliğin dayanım parametresi olarak akmaya başladığı gerilme dikkate alınmalıdır (Aksoy vd. 2017).



Şekil 63. Çeliğin gerilme - birim deformasyon ilişkisi (Deren vd. 2012).

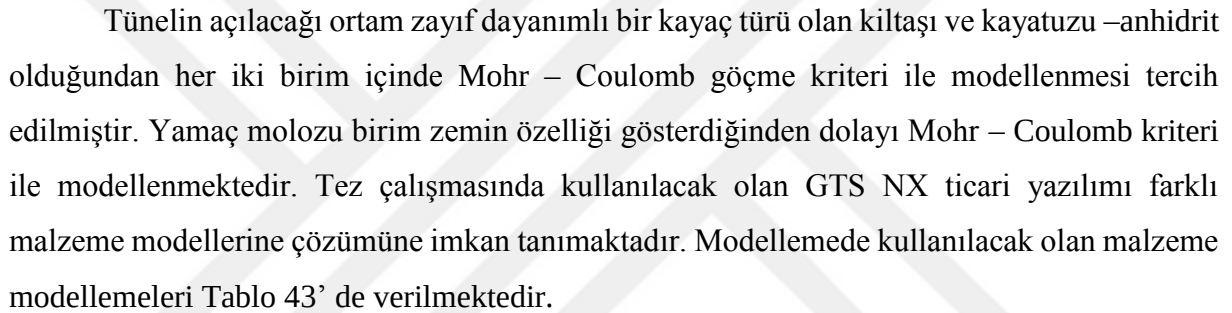
Yapılan literatür çalışması ve ilgili standartlar göz önüne alınarak iksa imalatı için belirlenen boyutsal ve mekanik özellikler Tablo 42’ de sunulmaktadır.

Tablo 42. İksa (IPN 300) imalatına ait boyutsal ve mekanik özellikler.

Özellik (S 420)	Değer	Birim	İlgili Standart
Malzeme	İzotropik	-	-
Model Tipi	Elastik	-	TS 648
Aralık	4	m	
Genişlik (B)	300	mm	DIN 1025
Yükseklik (H)	125	mm	
$t_{w1/2}$	16.2	mm	
s	10.8	mm	
Elastisite Modülü (E)	206182	MPa	TS 648
Kayma Modülü (G)	79434	MPa	
Poisson oranı(ν)	0.297	-	$G=E/2(1+\nu)$
Birim Ağırlık(γ)	77	[kN/m ³]	
Akma dayanımı (en az) (R_e)	420	(N/mm ²)	TS 708
Çekme dayanımı (en az) (R_m)	500	(N/mm ²)	
Çekme dayanımı/akma dayanımı oranı R_m/R_e (en az)	1.15	-	
DeneySEL akma dayanımı/karakteristik akma dayanımı oranı $R_{e\ act}/R_{e\ nom}$ (max)	1.3	-	
Kopma uzaması (en az) A_5 (%)	10	-	

Beton kaplama ve birincil destek elemanları her zaman lineer elastik malzemeler olarak düşünülmektedir (Jeong et al. 2014). Zayıf kayaçların, geoteknik davranışlarından dolayı, bir yandan (kohezif) zeminler ve diğer yandan sert kayalar arasında bir ara aşama oluşturmaktadır (Nickmann et al. 2006). Zayıf dayanımlı kaya kütlesi için elastik mükemmel plastik davranış beklenmektedir (Alejano et al. 2009). Çok zayıf kalitedeki yumuşak kaya kütlesi için önerilen

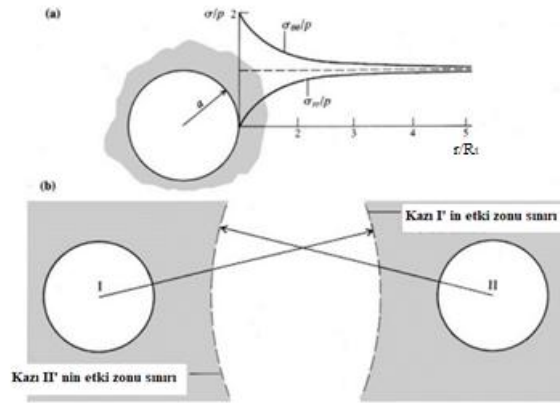
Şekil 64. Mohr-Coulomb modeli malzeme davranışı (Hoek et al. 1997).



Malzeme Türü	Zemin/Kayaç türü	Model türü	Zemin/kaya	Yapısal malzeme	Malzeme davranış özellikleri
İzotropik	Bulon, İksa	Elastik	√	√	Lineer elastik
	Yamaç Molozu	Mohr - Coulomb	√	√	Elasto-Plastik
	Kayatuзу –Anhidrit	Mohr - Coulomb	√	√	Elasto-Plastik
	Kiltaşı	Mohr – Coulomb ve Hoek&Brown	√	√	Elasto-Plastik

89

$$D_E \geq 6R_t \quad (4.5)$$



Şekil 65. Çift tıp kazı etki zonu (Brady et al. 2005).

Sınır Koşullarının Belirlenmesi (Ağ Boyutları)

Sayısal analizlerde, yanal sınır türü ve ağ boyutunu içeren geometrik model parametrelerini seçmek sonuçların hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Düşey sınırlar tünel açımından etkilenen ortam deplasmanlarının sıfır olması istenmesinden dolayı tünel merkezinden çok daha uzak bir mesafeye konumlandırılır (Mousivand et al. 2017).

Katzenbach et al. (1981) yaptıkları 3D tünel çalışmasında 59 m uzunluk 35 m yükseklik ve 35 m genişlikte oluşturdukları blok üzerinde çalışma yapmışlardır. R_t tünelin yarıçapı olarak, model genişliğinin ortalama $10R_t$ 'lik standart sapmayla $17.8R_t$ ve model uzunluğu, $15.2R_t$ 'lik standart sapmayla ve $27.2R_t$ değerindedir. Augarde et al. (2001) çalışması incelendiğinde ağ genişlik ve uzunluğu için $10R_t$ olarak değerlendirildiği gözlemlenmektedir. Mödlhammer (2011) yaptığı çalışmada açıklık sınırlarından itibaren tünel yarıçapının beş katı kadar bir mesafeyi sınır koşulu olarak belirlemiştir. Mazek et al. (2013) metro tüneli için yaptıkları 2D çalışmada optimum ağ genişliğini 100 m olarak değerlendirmişlerdir. Janin et al. (2015) geometrik simetrik ve 3D olarak yaptıkları tünel analiz değerlendirmesinde sınır etkisini minimize etmek için ağ genişliğini 150 m, uzunluğu 150 m ve derinliği ise 70 m olarak seçmişlerdir. Paternesi et al. (2017) incelemesini yaptıkları arazi uygulamasına ait sayısal çözümleme için ağ sınırlar boyutlarını genişlik için $15D$, uzunluk için $23D$ olarak boyutları seçmişlerdir. Bu istatistikler, literatürde bulunan model boyutlarıdır. Sınırlardaki gerilmeler, birim şekil değiştirme ve yer değiştirmeler göz önüne alındığında, model boyutunda önerilerilen değerler genişlik için hataları minimize etmek amacıyla Möller (2006) ve Vitalli et al. (2018) tarafından belirtildiği üzere $8R_t - 10R_t$ olarak değerlendirilebilir. Ancak bahse konu çalışmada genel bir kural olarak tünel açıklığından itibaren $10R_t$ olarak seçileceği ifade edilmektedir. Bununla birlikte, bu öneri sınırların başlangıçtaki gerilmeler, plastikleşme sınırı ve/veya jeolojik özellikler gibi diğer değişkenlerden değil, sadece tünelin büyüklüğünden

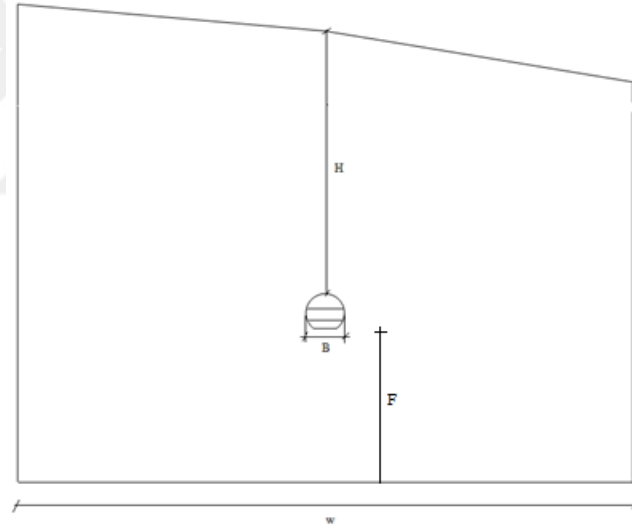
etkilendiğini göstermektedir. Buna ilaveten Möller (2006) yapmış olduğu 2D ve 3D modeller için gerekli ağ genişliğinin aynı olduğunu belirlemiştir (Vitali et al. 2018). Möller (2006) 4.6’ da verilen formüller analize esas ağ boyutları için önermektedir Ayrıca Janin et al. (2015) 2D ve 3D yaptıkları çalışmada elde edilen sonuçları kıyaslayabilmek için aynı ağ yoğunluğa sahip olmasına özen göstermişlerdir.

$$w=2B (1+H/B) \quad (4.6)$$

Tez çalışmasında kullanılacak olan sınır şartları yukarıda sunulan literatür çalışmaları göz önünde tutularak seçilmiş ayrıca EK-3’ de yapılan analiz çalışmaları doğrultusunda Tablo 44’ de verilmektedir. Notasyonların açıklaması ise Şekil 66’da gösterilmektedir.

Tablo 44. Tez çalışmasında kullanılan iki boyutlu model sınır boyutları

B	H	w	F	Birim	Kaynak
12	82	192	48	m	Vitali et al. (2018); Möller (2006)



Şekil 66. Notasyonların şekil üzerinde gösterimi

Analiz için Eleman Boyutları

Temel olarak, ağ elemanları gerilme yoğunluğunun fazla ve önemli detayların olduğu bölgelerde küçük boyutta olmalıdır. Çünkü tünel kazısı süresince bu alanlarda gerilme çok daha fazla olmaktadır. Bu nedenle tünel kazı çevresinde mümkün mertebede küçük ağlar kullanılmalıdır. Tünel kesitinden uzaklaştıkça mümkün mertebede ağların yoğunluğu azaltılmalıdır (Mousivand et al. 2017). Bu bağlamda Jeong et al. (2014) yaptıkları çalışmada tünel hattına yakın çevrede plastik deformasyonları yakalayabilmek için ince ağlar dış sınırlara doğru gidildikçe daha büyük ölçüde ağlar kullanmışlardır. Mazek et al. (2013) yaptıkları çalışmada eleman boyutu olarak, zemin bloğunun dış sınırı boyunca üç metre ve tünel

kaplaması etrafında bir metre olarak seçmişlerdir. Janin et al. (2015) 3D tünel çalışması için eleman boyutlarını değerlendirirken daha doğru sonuçlar elde edebilmek için tünel etrafında daha küçük sınırlara doğru gidildikçe daha büyük boyutlardaki ağ elemanları seçmişlerdir. Literatürde 3D için yapılan çalışmaların çoğunluğu 2D model boyutunun 3D taşınması ile gerçekleştirilmiştir (Vitali et al. 2018).

Tez çalışmasında 2D modellerinin analiz sonuçları beraber değerlendirileceğinden dolayı önyüz ağ yoğunluğunun aynı olmasına özen gösterilmiştir. Yukarıdaki literatür bilgileri birlikte değerlendirildiğinde tez çalışmasında kullanılacak eleman boyutları Tablo 45’ de verilmiştir.

Tablo 45. İki boyutlu modellerin zemin /kayaç tabakaları için eleman boyutları

Tabaka/Yapısal Eleman	Eleman Boyutu	Birim
Kiltaşı	5	m
Kayatuzu – Anhidrit	5	
Yamaç Molozu	5	

Ayrıca Liu et al. (2013) profil giriş üzerinde yaptıkları çalışmada optimum parça sayısının 10 olması durumunda hata oranının %0.04 değerinde olacağını belirtmiştir. Bu bilgi ışığında tez çalışmasında kullanılacak olan bulonlarında benzer bir yaklaşımla eleman boyutları belirlenmiştir. Öte yandan iksa elemanı Midas GTS NX programında gömülü giriş olarak seçilmiş olup program tarafından otomatik olarak boyutları eğrisel elemana uygun ağ elemanları oluşturmuştur (Tablo 46).

Tablo 46. Yapısal elemanlar için parça sayısı

Yapısal Eleman	Parça boyutu (m)
Bulon	1

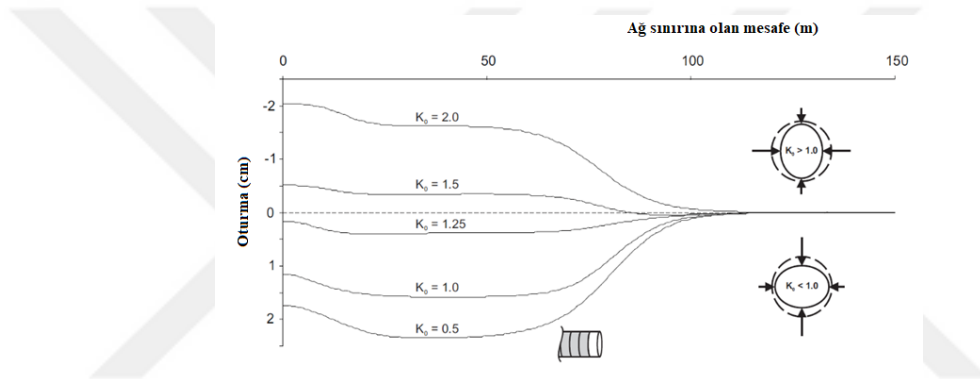
K₀ Değerinin Seçimi

Arazi gerilmelerinin ana kaynağı, bölgenin jeolojik koşulları ve jeolojik geçmişidir. Kaya kütleindeki arazi gerilmelerinin büyüklüğü, kaya mukavemeti gibi sıfırdan başlayarak çok büyük değerlere ulaşabilir. Ghiasi et al. (2011) yaptığı çalışmanın daha iyi anlaşılabilmesi için Hoek (2003) tarafından önerilen yatay gerilmenin düşey gerilmeye eşit olduğu varsayılmışlardır. Sıkışan kaya koşulları geri dönülemez deviatorik sünme birim şekil değiştirmeleri oluşturmaktadır (Saticı 2018).

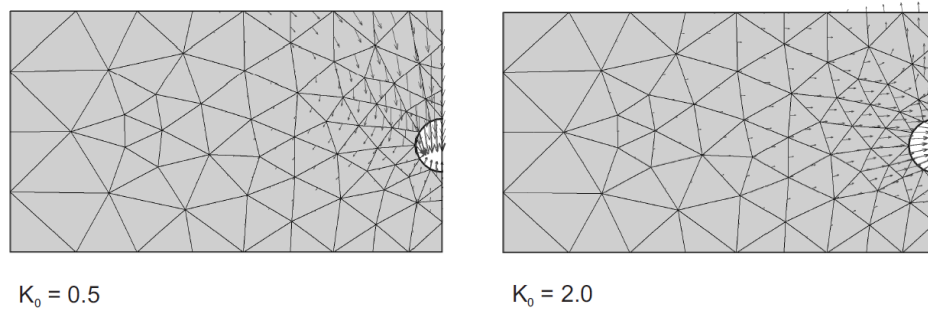
Möller (2006)’da yapmış olduğu çalışmada elde ettiği farklı K₀ değerleri için tünel eksenini üzerinde gerçekleşen şekil değiştirme durumu Şekil 67’ de ve farklı K₀ değerleri için

gerilmelerin yönelimleri ise Şekil 68’ de gösterilmiştir. Şekil 67 incelendiğinde K_0 koşullarının değişmesi ile tünel eksenine üzerinde gerçekleşen oturma değerlerinin de değiştiği gözlenmektedir. Şekil 68 dikkate alındığında ise farklı gerilme koşulları altında tünel açıklığı etrafında meydana gelen gerilme yönelimlerinin değiştiği anlaşılmaktadır.

Çalışma alanında tünel hattını kesen herhangi bir fay veya benzeri yapı belirlenmemiştir. Vitali et al. (2018); Möller (2006); Ghiasi et al. (2011) yaptıkları çalışmalar referans alınarak tez çalışması kapsamında analizin yapılacağı kesit ortamı benzer özellikler gösterdiğinden dolayı hali hazırdaki gerilme durumu hidrostatik ve eksenel simetrik olarak değerlendirilmiştir. Bu koşullarda $K_0=1$ olarak kabul edilmiştir. Yapılan bu varsayım, kritik sorunları belirleme ve basit sonuçlara ulaşmak için faydalı olsa da, gerçekte geostatik gerilmeler anizotropiktir (Vitali et al. 2018).



Şekil 67. Farklı K_0 Değerleri için tünel ekseninde gerçekleşen oturma değerleri (Möller 2006).

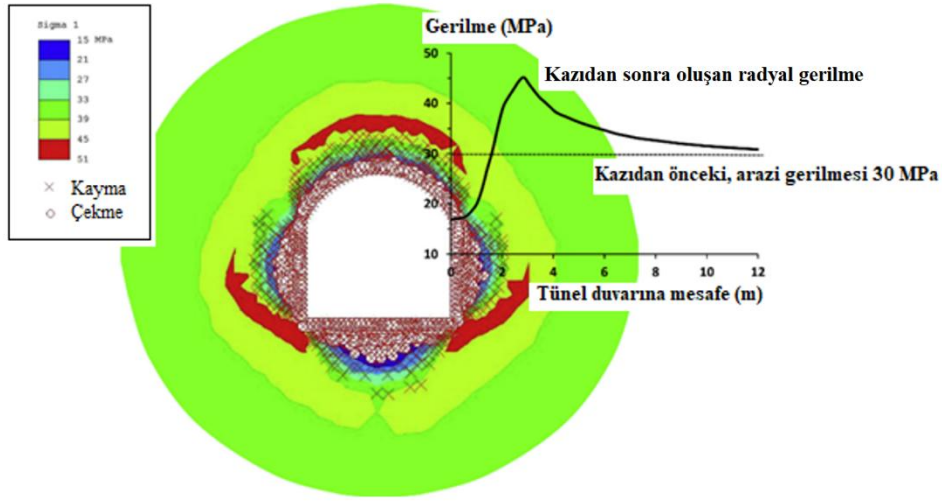


Şekil 68. Farklı K_0 değerleri için yerdeğiştirmeler (Möller 2006).

Yük Dağıtma Faktörü

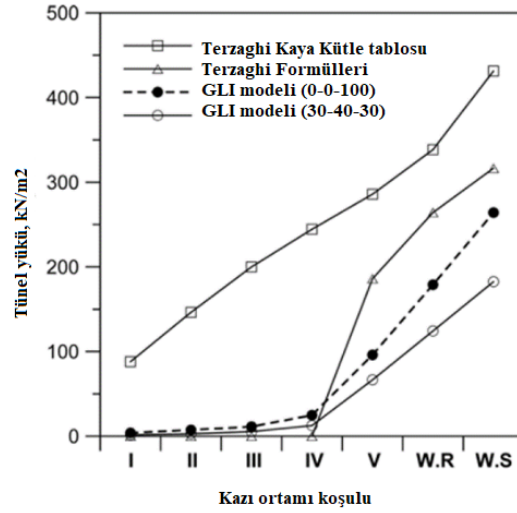
Li (2017)’nin yapmış olduğu çalışmada ifade ettiği tünel etrafında kayadaki ana gerilmelerin dağılımı Şekil 69’ de gösterilmiştir. Şekil 69 dikkate alındığında tünel hattının yaklaşık 2 m kadar mesafesinde plastik zonun oluşmuş olduğu gözlemlenmektedir. Bu zonun ötesinde, yaklaşık 4m civarında, kemerlenme etkisi oluşmaktadır. Elastik zona yaklaştıkça arazi gerilmelerine ulaşılmaktadır (Li 2017). Plastik zon tünel yükünün hareket ettiği alanı belirtmektedir. Daha büyük plastik zon oluşması stabil olmayan kazı ortamı olarak göz önüne

alınabilir. Bu nedenle plastik zon minimize etmek kritik öneme sahip olacaktır. Ancak, destek elemanlarının taşıma gücünde azalma meydana geldiğinde , tünel etrafındaki plastik zon genişlemeye devam edecektir (Jeong et al. 2014).



Şekil 69. Bir tünel etrafında kayadaki ana gerilmelerin dağılımı (Li 2017).

Tünel mühendisleri, ekonomik ve rasyonel bir tasarımı kolaylaştırmak için her durumda beton kaplama üzerine etki eden uygun tünel yüklerini değerlendirmelidir. Tünel yapım aşamasında, kaya bulonları ve püskürtme beton gibi birincil destek elemanları ile kazı ortamı desteklenmektedir. Bu nedenle, nihai beton kaplama oluşturulduğunda, kazı ortamı ile birincil destek elemanları arasında bir denge durumuna ulaşıldığında ortam yükleri nihai beton kaplamaya etki etmeyecektir. Yük dağılım oranı, zeminde, birincil destek elemanında ve beton kaplamada göreceli yük taşıma oranıdır. Yük dağılım oranını 0-0-100 (kazı ortamı-birincil destek-ikincil destek) olarak ayarlanır. Bu durumda ikincil destek elemanı ve beton kaplama genel tünel yüküne direnir. Bu prosedürü kullanarak, beton kaplamaya etki eden aşırı yükleri sayısal analizlerle değerlendirmek mümkündür. Şekil 70, tipik bir tünel tasarımı olan 30-40-30 (kazı ortamı-birincil destek-ikincil destek)' luk bir yük dağılım oranı altında tahmin edilen sonuçlarla, 0-0-100' lük bir yük dağılım oranı altında bir tünel yükünün sonuçları karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur (Jeong et al. 2014).

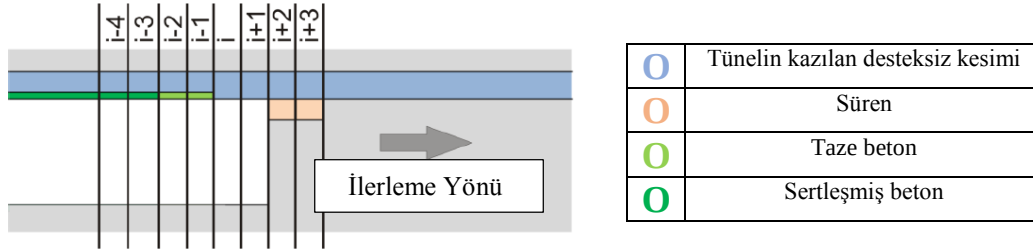


Şekil 70. Farklı yük dağılım oranı altında tünel yükü (Jeong et al. 2014).

Tez çalışması kapsamında farklı yük dağıtma faktörleri için analizler değerlendirilmiştir. En uygun değer olarak 0.4 - 0.3 - 0.3 olarak seçilmiştir.

İmalat Aşamaları

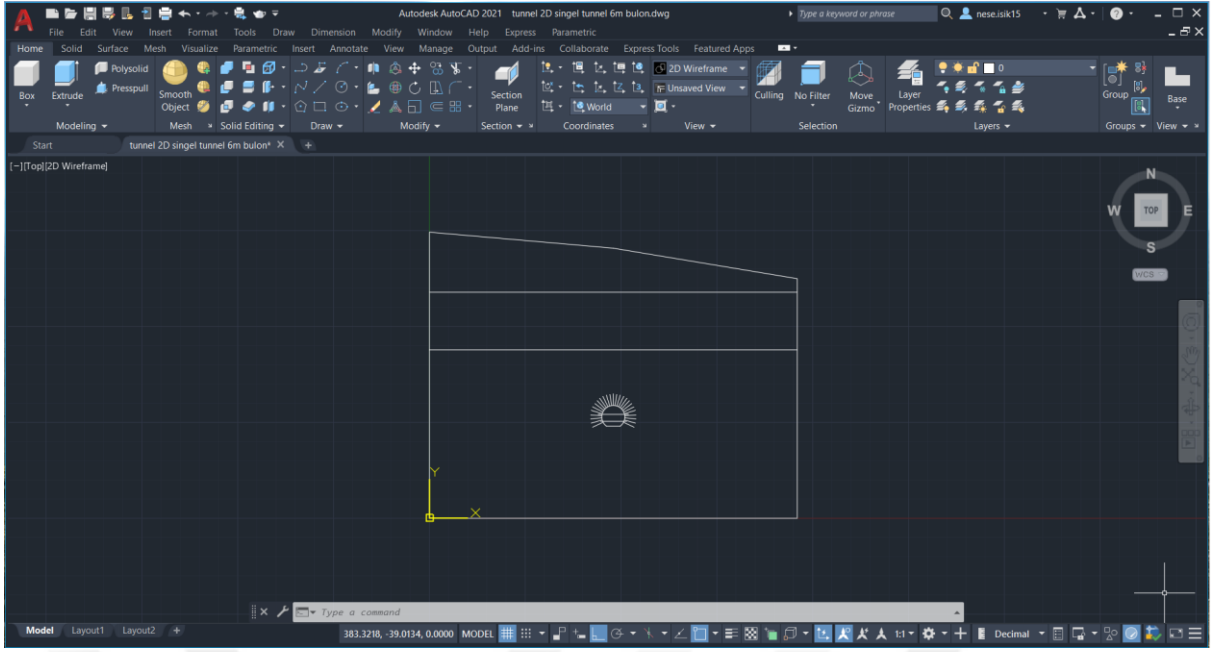
Analizler esnasında, her bir hesaplama aşaması (i) kazı elemanlarının her bir dilimi olduğu yerde pasif edilir. Yeni kaplama elemanları ring oluşturacak şekilde, aynı aşamada aktif edilir ($i-1$). Bu hesaplama aşamaları $i+1$ ile $i+n$ adımlarında temsili denge durumu sağlanıncaya kadar tekrarlanmaktadır (Möller 2006). Bahsi geçen çözüm yöntemi Şekil 71’de verilmektedir.



Şekil 71. Geleneksel tünelcilik için adım adım yapım metodu (Wohlfahrt 2010).

Sayısal Modelleme

İlgili başlıklar altında yapılan incelemeler sonucunda sayısal modeller yapılmıştır. Tünel kesiti için Autocad de oluşturulan geometri Şekil 72’de gösterilmiştir.



Şekil 72. Tünel kesitlerine ait geometri

Önceden belirlenen yapısal elemanlar ve kazı ortamına ait malzeme parametreleri sonlu elemanlar yöntemine atanmıştır (Şekil 73). Tez çalışmasında kullanılacak modele ait ağ yapısı belirlenen bilgiler ışığında oluşturulmuştur (Şekil 74).

Material

ID: 7 Name: rock bolt Color: █

Model Type: Elastic ☒ Structure

General Thermal Time Dependent Temperature Dependent

Elastic Modulus(E): 206182000 kN/m²

Inc. of Elastic Modulus: 0 kN/m³

Inc. of Elastic Modulus Ref. Height: 0 m

Poisson's Ratio(v): 0.3

Unit Weight(y): 77 kN/m³

Initial Stress Parameters

Ko Determination: 1

☐ Automatic ☒ Manual ☐ Anisotropy

Thermal Parameter

Thermal Coefficient: 1e-006 1/[T]

Molecular vapor diffusion coefficient: 0 m²/sec

Thermal diffusion enhancement: 0

Damping Ratio(For Dynamic)

Damping Ratio: 0.05

☐ Safety Result(Mohr-Coulomb)

Cohesion(C): 30 kN/m²

Frictional Angle(Φ): 36 [deg]

☐ Tensile Strength: 0 kN/m²

OK Cancel Apply

Material

ID: 25 Name: claystone Color: █

Model Type: Mohr-Coulomb ☐ Structure

General Porous Non-Linear Thermal Time Dependent

Elastic Modulus(E): 361000 kN/m²

Inc. of Elastic Modulus: 0 kN/m³

Inc. of Elastic Modulus Ref. Height: 0 m

Poisson's Ratio(v): 0.38

Unit Weight(y): 24 kN/m³

Initial Stress Parameters

Ko Determination: 1

☐ Automatic ☒ Manual ☐ Anisotropy

Thermal Parameter

Thermal Coefficient: 1e-006 1/[T]

Molecular vapor diffusion coefficient: 0 m²/sec

Thermal diffusion enhancement: 0

Damping Ratio(For Dynamic)

Damping Ratio: 0.05

☐ Safety Result(Mohr-Coulomb)

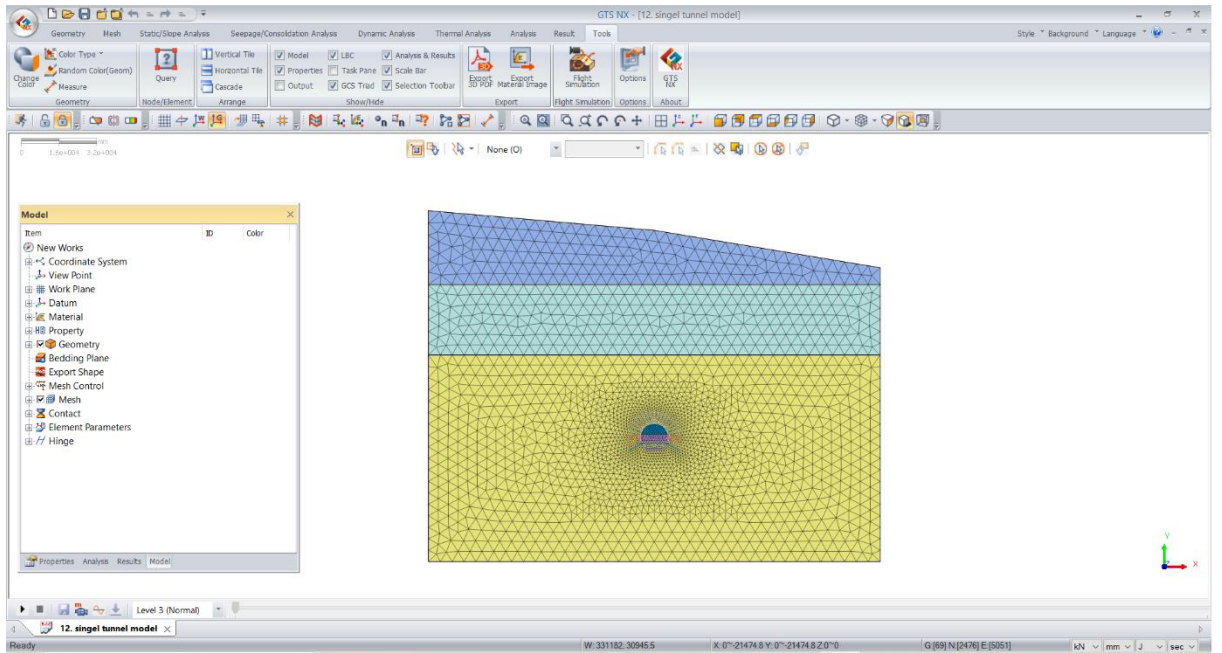
Cohesion(C): 30 kN/m²

Frictional Angle(Φ): 36 [deg]

☐ Tensile Strength: 0 kN/m²

OK Cancel Apply

Şekil 73. Malzeme parametrelerinin atanması



Şekil 74. Modele ait ağ yapısı.

Yapılan modelleme çalışmalarında kullanılan yapım aşamaları toplu olarak Şekil 75’ de gösterilmiştir.

Stage Definition Wizard

Element, Boundary, Load

- invert soft s/c
- invert TMB.
- rocksalt -anhydrit
- scree
- Boundary Condition
 - bench hard s/c
 - crown hard s/c
 - invert hard s/c
 - sinir kosulu
- Static Load
 - bench pre
 - crown pre
 - invert pre
 - self weight
- Contact

Construction Stage Set: Construction Stage Set-1

Set Assignment Rules

	Set Type	Set Name Prefix	A/R	Start Postfix	F	End Postfix	Postfi Inc.
*							

Apply Assignment Rules OK Cancel

Element, Boundary, Load Activation Status

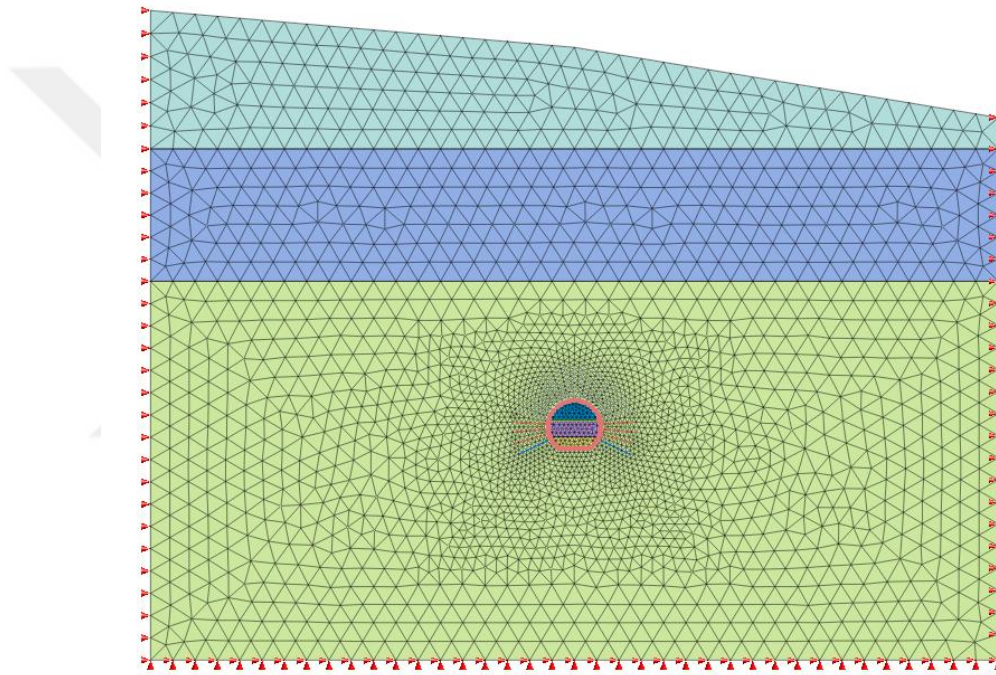
	Set Type	Set Name Prefix	I.S.	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Mesh set	bench ex.	A: -					R: -							
Boundary Set	bench hard s/c							A: -						
Load Set	bench pre						A: -							
Mesh set	bench R.B.						A: -							
Mesh set	bench soft s/c						A: -							
Mesh set	bench TMB.						A: -							
Mesh set	claystone	A: -												
Mesh set	crown ex.	A: -			R: -									
Boundary Set	crown hard s/c					A: -								
Load Set	crown pre				A: -									
Mesh set	crown R.B.				A: -									
Mesh set	crown soft s/c				A: -									
Mesh set	crown TMB.				A: -									
Mesh set	Default Mesh Set													
Mesh set	invert ex.	A: -							R: -					
Boundary Set	invert hard s/c									A: -				
Load Set	invert pre								A: -					
Mesh set	invert R.B.								A: -					
Mesh set	invert soft s/c								A: -					
Mesh set	invert TMB.								A: -					
Mesh set	rocksalt -anhydrit	A: -												
Mesh set	scree	A: -												

Şekil 75. Modele ait yapım aşamaları

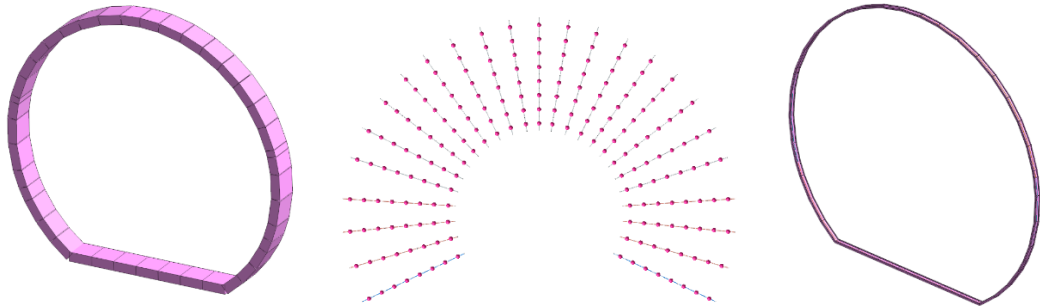
BULGULAR

İki Boyutlu Tek Tüp Analiz Çalışması

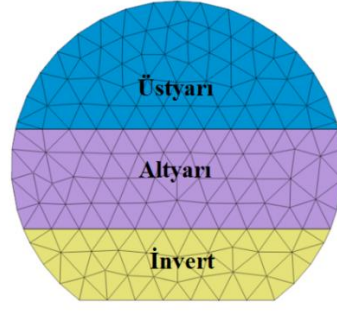
Tek tüp tünel için yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde Şekil 76'da gösterilen iki boyutlu (2B) sayısal model oluşturulmuştur. Yapısal elemanlara ait görseller Şekil 77'de verilmektedir. Tünel kazısı üç aşamada oluşturulmuştur. Sırasıyla taç kısmın kazısı üstyarı, topuk kısmı kazısı olan altyarı ve taban kazısı olan invert kazıları şeklinde teşkil edilmiştir (Şekil 78).



Şekil 76. Tek tüp tünel ağ yapısı genel görünümü (2B)



Şekil 77. Tek tüp tünel birincil destek elemanları (sırasıyla püskürtme beton, önyüklemeli kaya bulonları ve iksa elemanı, 2B)



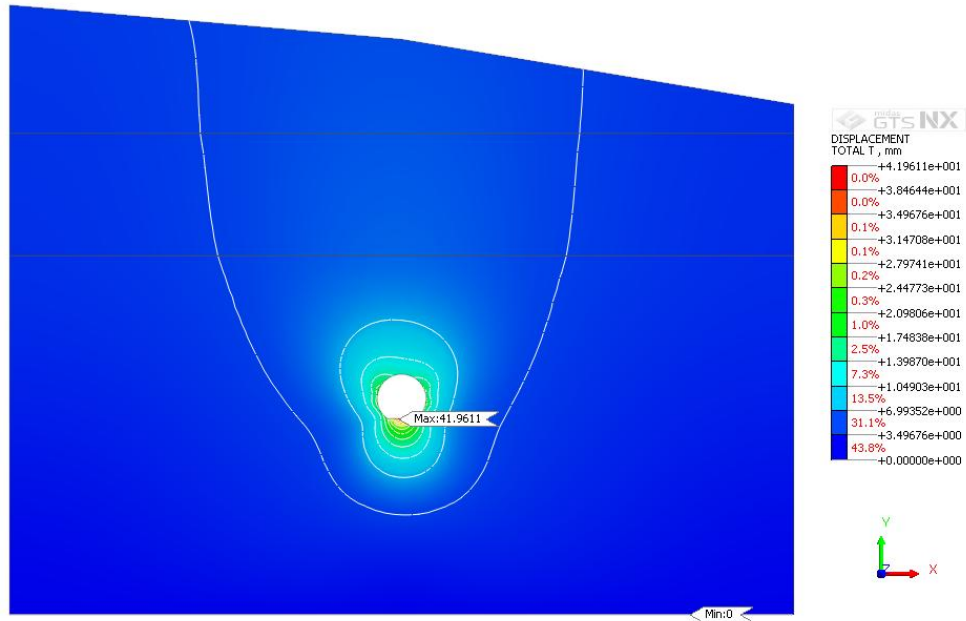
Şekil 78. Tek tüp tünel kazı aşamaları (2B)

İki boyutlu tünel tasarım modellemesi altı aşamada gerçekleştirilmiştir. Ön tasarımın değerlendirilmesi amacıyla modellemenin birinci aşamasında Tablo 47’ de verilen yapısal elemanlara ait özellikler kullanılmıştır.

Tablo 47. Birinci modele ait yapısal elemanlara ait özellikler.

Yapısal Malzemeler	Çap (mm)	Uzunluk (m)	Genişlik (cm)	Tür	Önyük (kN)	Kapasite
Kaya bulonu	28	6	-	PG	0	157 kN
Püskürtme beton	-	-	40	-	-	20 N/mm ²
İksa	-	-	-	IPN300	-	420 N/mm ²

Tablo 47’ de verilen yapısal elemanlara ait özellikler kullanılarak yapılan analiz çalışması sonucunda elde edilen toplam minimum deformasyon 0 mm toplam maksimum deplasman değeri tabanda kabarma olacak şekilde 41.96 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 79).



Şekil 79. Toplam maksimum ve minimum deplasman değerleri (birinci aşama)

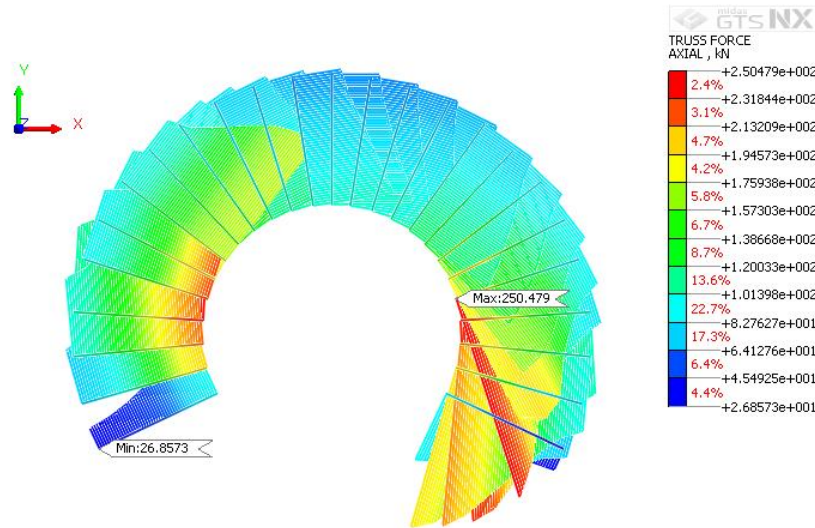
Yapısal elemanlara gelen yükler değerlendirildiğinde:

Bulonlar için minimum eksenel kuvvet 26.86 kN ve maksimum eksenel kuvvet 250.47 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 80). Bulonlardaki toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri sırasıyla 6.6 mm ve maksimum 19.20 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 81).

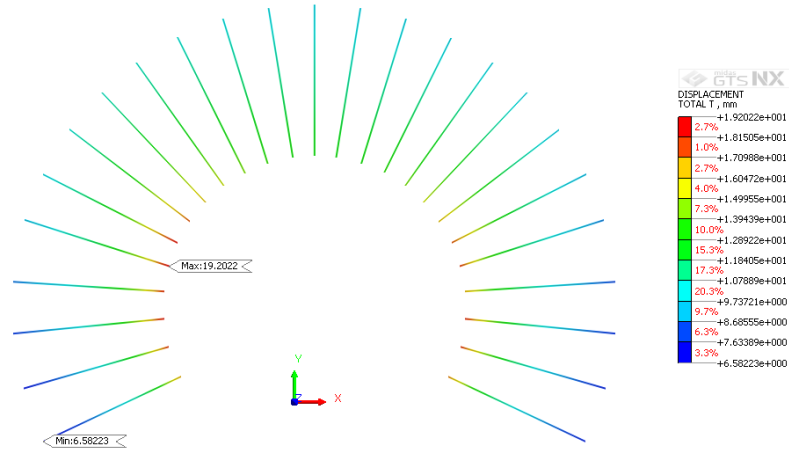
İksa elemanı için maksimum ve minimum gerilmeler sırasıyla -189.61 N/mm^2 ve -66.98 N/mm^2 (Şekil 82) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla 13.02 mm ve maksimum 41.96 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 83).

Püskürtme beton elemanı için maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla -19.52 N/mm^2 ve -5.15 N/mm^2 (Şekil 84) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla 13.02 mm ve 41.96 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 85).

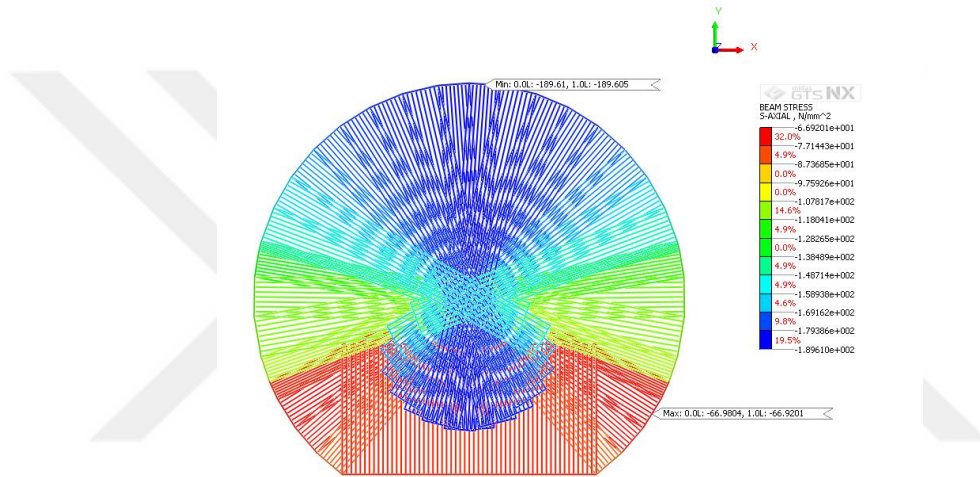
Modellemenin birinci aşama analiz sonuçları Tablo 47’ de verilen yapısal elemanlara ait özellikler ile karşılaştırıldığında kaya bulonlarında kapasite değeri aşıldığı için kopma meydana gelmiştir. İksa elemanında akma sınırının çok altında kaldığı için yenilme gerçekleşmemiştir. Püskürtme beton yükü için beton dayanımına yakın bir değer elde edilmiştir. Tüm bu sonuçlar beraber değerlendirildiğinde sistemde yenilme gerçekleşmiştir (Şekil 86)



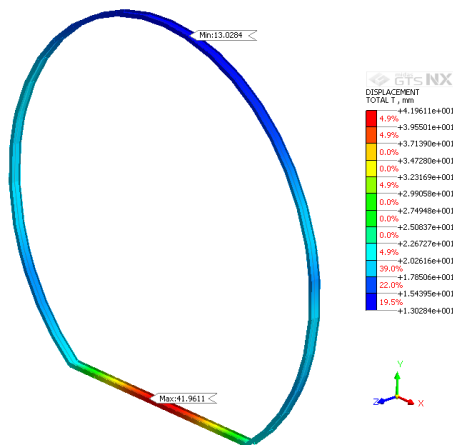
Şekil 80. Bulon yükleri (birinci aşama)



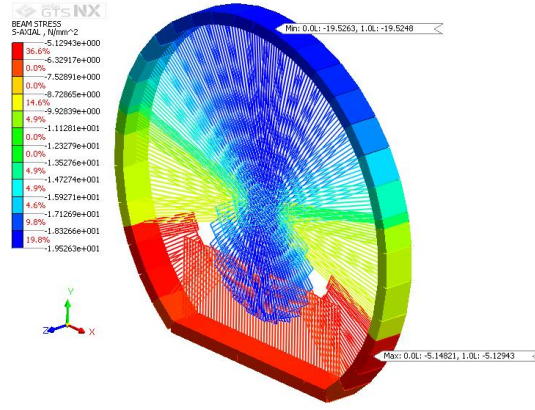
Şekil 81. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (birinci aşama)



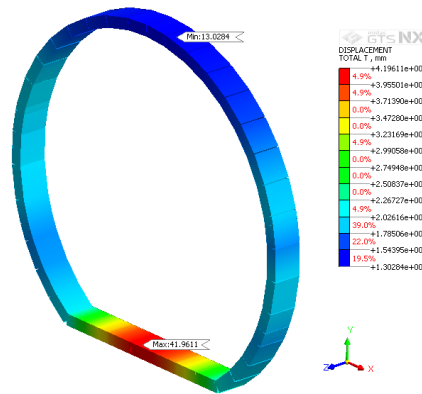
Şekil 82. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (birinci aşama)



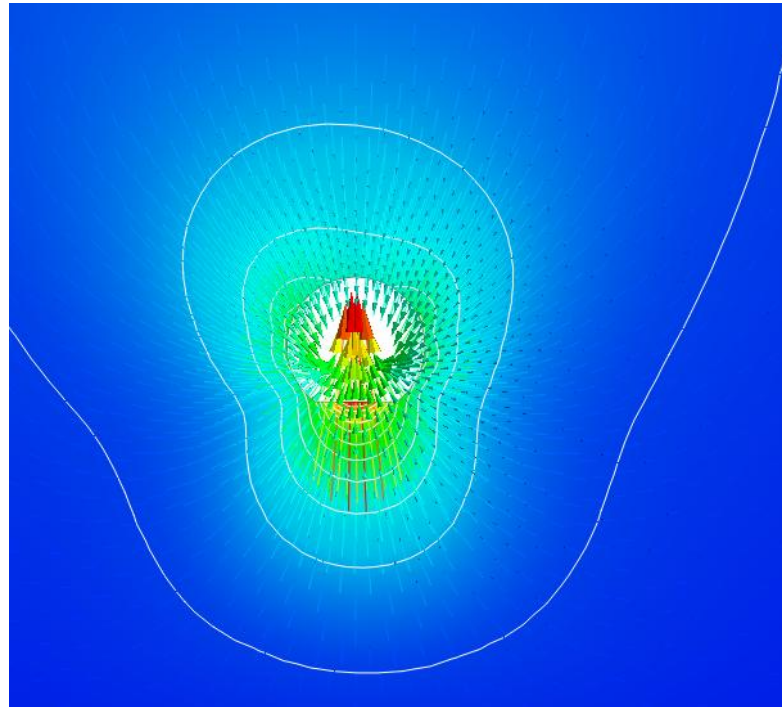
Şekil 83. Toplam minimum ve maksimum iksa elemanı deplasman değerleri (birinci aşama)



Şekil 84. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (birinci aşama)



Şekil 85. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanında oluşan deplasmanlar (birinci aşama)



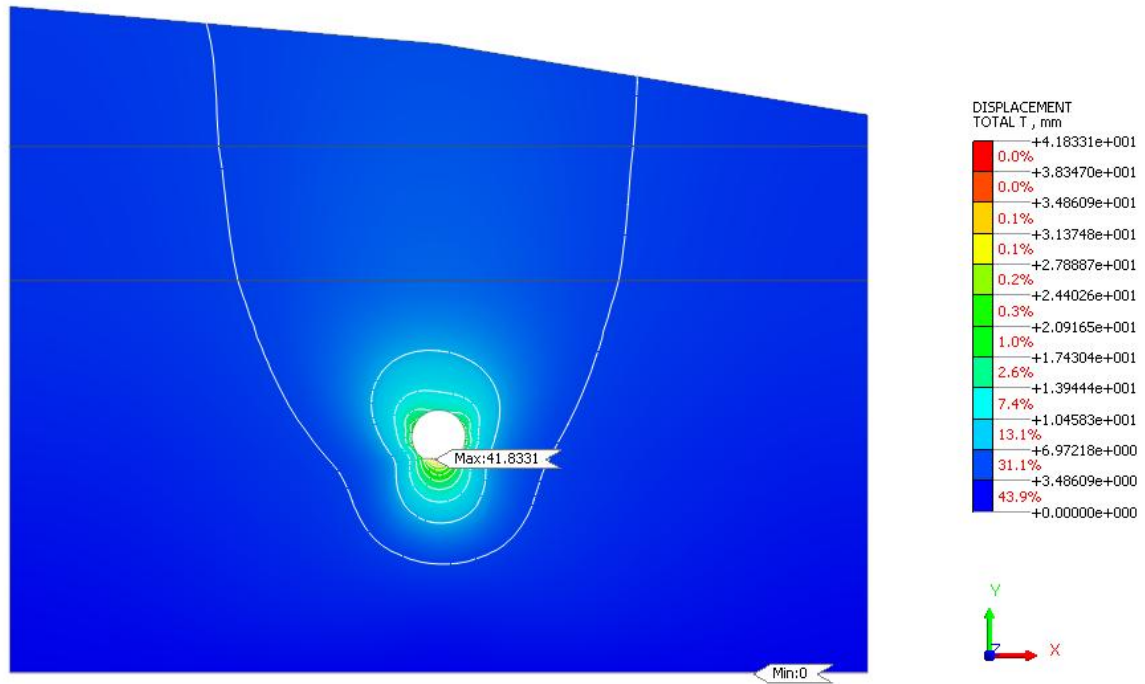
Şekil 86. Sistemin yenilme şekli (birinci aşama)

Modellemenin birinci aşamasında yenilme gerçekleştiği için ikinci aşamada yapısal elemanlara ait Tablo 48' de verilen özellikler kullanılmıştır.

Tablo 48. Yapısal elemanlara ait özellikler (ikinci aşama).

Yapısal Malzemeler	Çap (mm)	Uzunluk (m)	Genişlik (cm)	Tür	Önyük (kN)	Kapasite
Kaya bulonu	28	6	-	PG	-60	157 kN
Püskürtme beton	-	-	40	-	-	20 N/mm ²
İksa	-	-	-	IPN300	-	420 N/mm ²

Tablo 48’ de verilen yapısal elemanlara ait özellikler kullanılarak yapılan analiz çalışması sonucunda elde edilen toplam minimum deplasman 0 mm toplam maksimum deplasman değeri 41.83 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 87).



Şekil 87. İkinci model toplam maksimum ve minimum deplasman

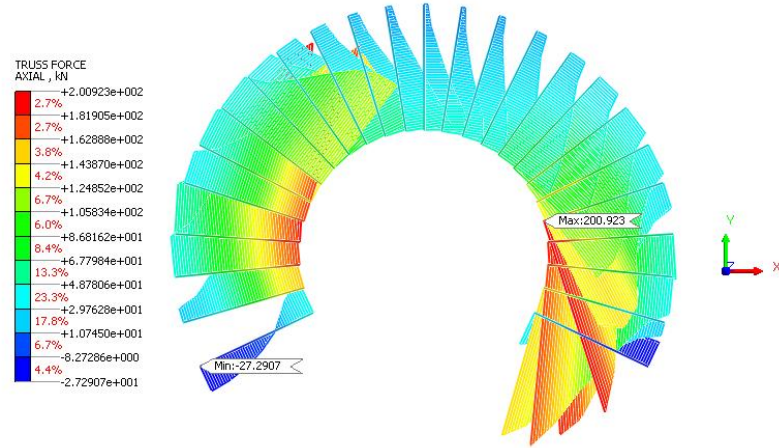
Yapısal elemanlara gelen yükler değerlendirildiğinde:

Bulonlar için minimum eksenel kuvvet 27.30 kN ve maksimum eksenel kuvvet 200.92 kN (Şekil 88) olarak elde edilmiştir. Bulonlardaki toplam minimum ve maksimum toplam deplasman değerleri minimum 6.4 mm ve maksimum 19.56 mm deplasman (Şekil 89) olarak gerçekleşmiştir.

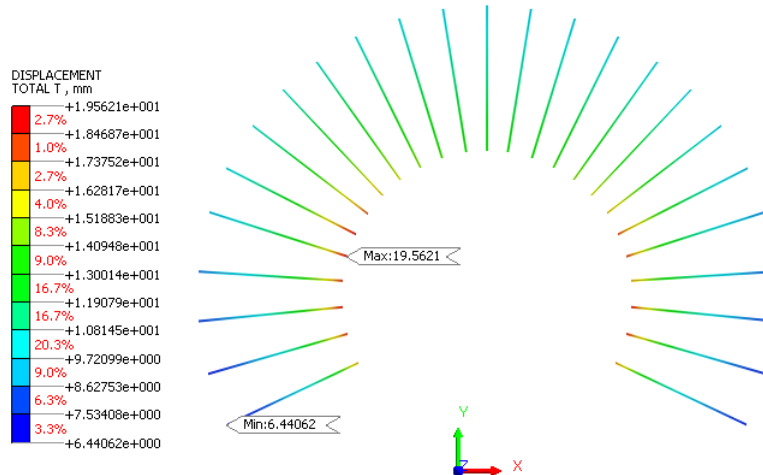
İksa elemanı için maksimum -193.46 N/mm² ve minimum gerilme -67.66 N/mm² (Şekil 90) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla 13.30 mm ve maksimum 41.83 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 91).

Püskürtme beton elemanı için maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla -19.78 N/mm² ve -5.19 N/mm² (Şekil 92) ve minimum ve maksimum toplam deplasman değerleri sırasıyla 13.30 mm ve maksimum 41.83 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 93).

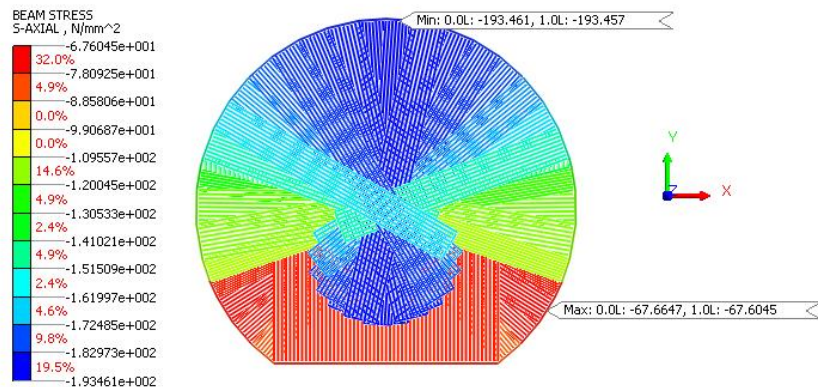
Modellemenin ikinci aşama analiz sonuçları Tablo 48’ de verilen yapısal elemanlara ait özellikler ile karşılaştırıldığında kaya bulonları kapasite değeri aşıldığı için kopma meydana gelmiştir. İksa elemanı akma sınırının çok altında kaldığı için yenilme gerçekleşmemiştir. Püskürtme beton yükü için beton dayanım değerinin altında bir değer elde edilmiştir.



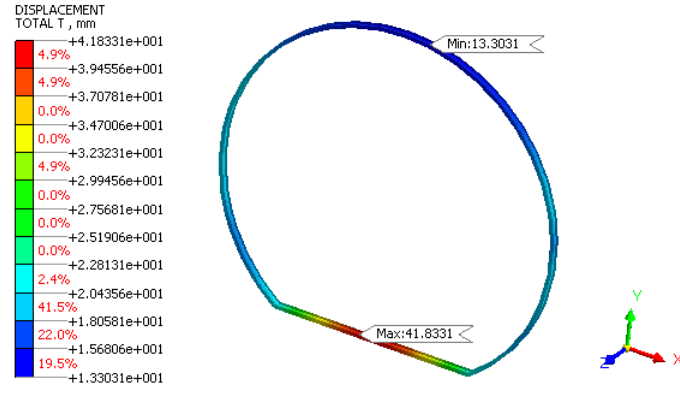
Şekil 88. Bulon yükleri (ikinci aşama)



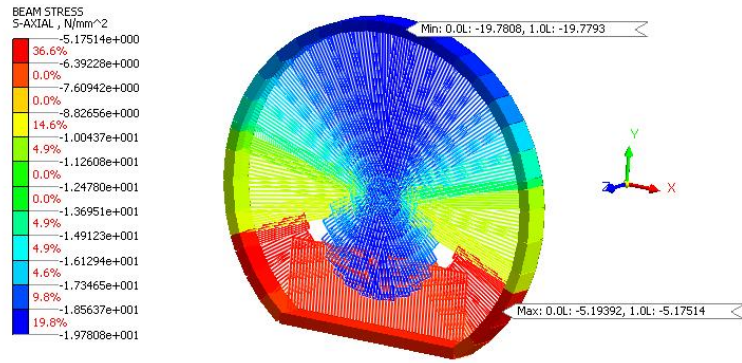
Şekil 89. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (ikinci aşama)



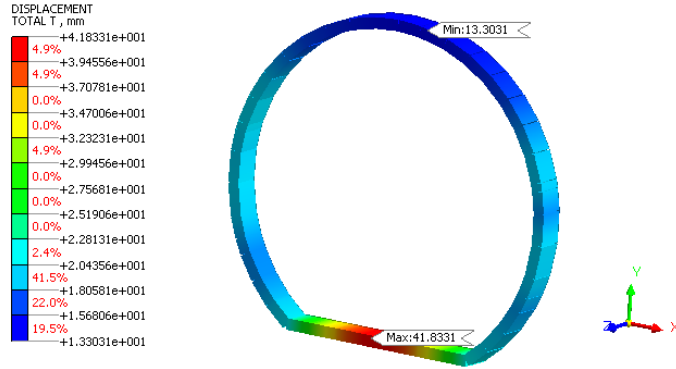
Şekil 90. Toplam minimum ve maksimum iksa eleman yükleri (ikinci aşama)



Şekil 91. Toplam minimum ve maksimum iksa deplasman değerleri (ikinci aşama)



Şekil 92. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (ikinci aşama)



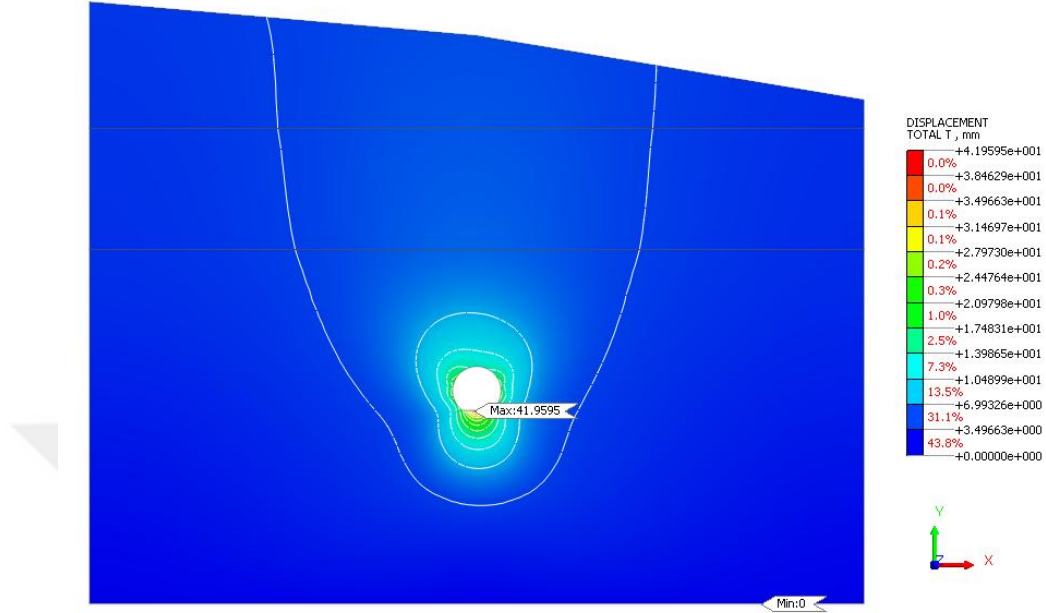
Şekil 93. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (ikinci aşama)

Modellemenin ikinci aşamasında yenilme gerçekleştiği için üçüncü aşamada yapısal elemanlara ait Tablo 49’ da verilen özellikler kullanılmıştır.

Tablo 49. Üçüncü model tasarımına ait yapısal elemanlara ait özellikler.

Yapısal Malzemeler	Çap/Et kalınlığı (mm)	Uzunluk (m)	Genişlik (cm)	Tür	Önyük (kN)	Kapasite
Kaya bulonu	30/9.5	6	-	IBO	0	260 kN
Püskürtme beton	-	-	40	-	-	20 N/mm ²
İksa	-	-	-	IPN300	-	420 N/mm ²

Tablo 49’da verilen yapısal elemanlara ait özellikler kullanılarak yapılan analiz çalışması sonucunda elde edilen toplam minimum deplasman 0 mm toplam maksimum deplasman değeri 41.95 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 94).



Şekil 94. Toplam maksimum ve minimum deplasman değerleri (üçüncü aşama)

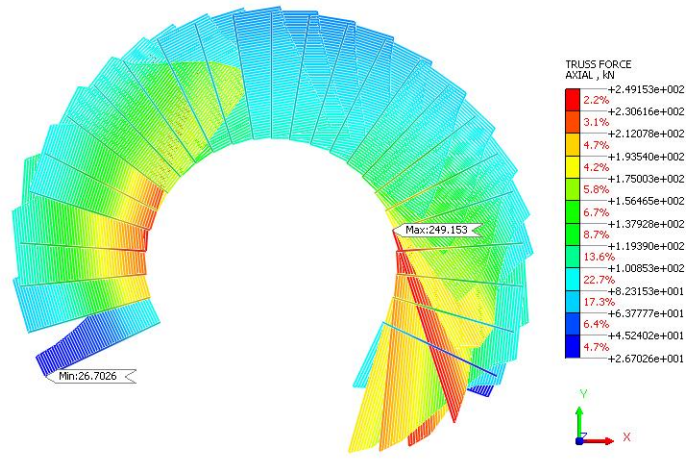
Yapısal elemanlara gelen yükler değerlendirildiğinde:

Bulonlar için minimum eksenel kuvvet 26.70 kN ve maksimum eksenel kuvvet 249.15 kN (Şekil 95) olarak elde edilmiştir. Bulonlardaki toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri sırasıyla 6.58 mm ve 19.20 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 96).

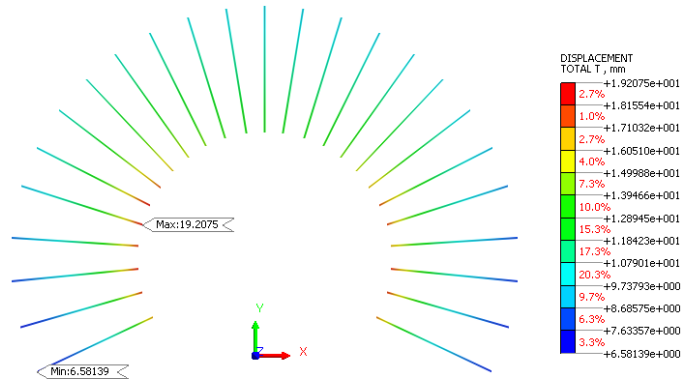
İksa elemanı için maksimum ve minimum gerilmeler sırasıyla -189.65 N/mm^2 ve -66.99 N/mm^2 (Şekil 97) ve minimum ve maksimum toplam deplasman değerleri ise 13.02 mm ve maksimum 41.96 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 98).

Püskürtme beton elemanı için maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla -19.52 N/mm^2 ve -5.15 N/mm^2 (Şekil 99) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri 13.03 mm ve maksimum 41.96 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 100).

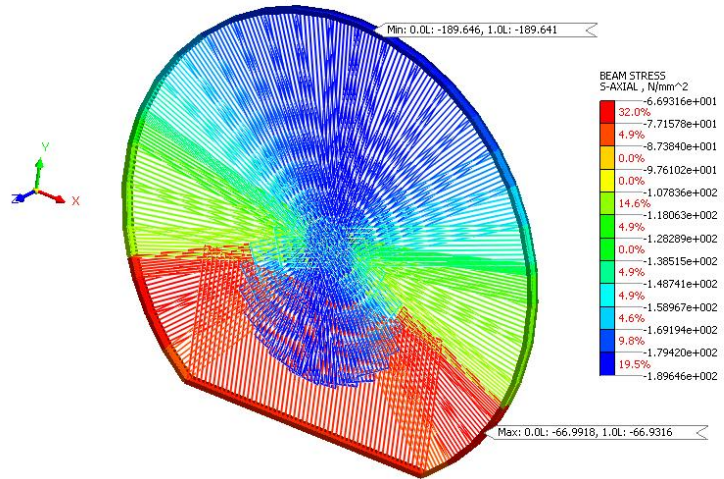
Modellemenin üçüncü aşama analiz sonuçları Tablo 49’ da verilen yapısal elemanına ait özellikler ile karşılaştırıldığında kaya bulonları kapasite değerine yaklaşmış olduğundan dolayı yeniden değerlendirme yapılmıştır. İksa elemanı akma sınırının çok altında kaldığı için yenilme gerçekleşmemiştir. Püskürtme beton yükü için beton dayanım değerinin altında bir değer elde edilmiştir.



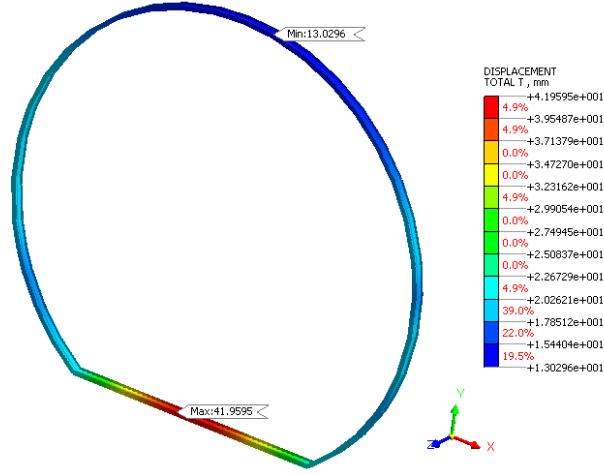
Şekil 95. Bulon yükleri (üçüncü aşama)



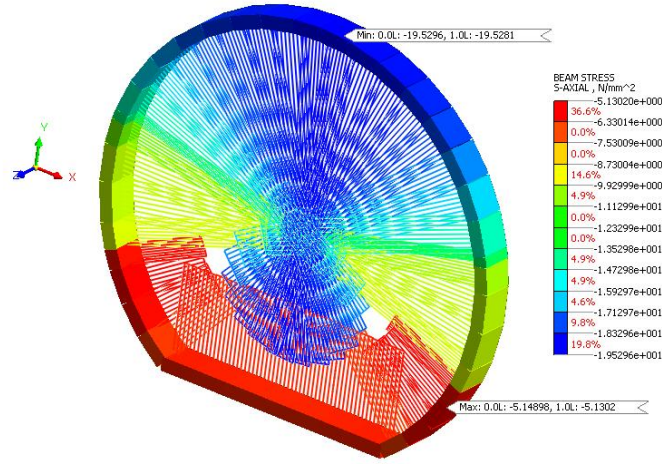
Şekil 96. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (üçüncü aşama)



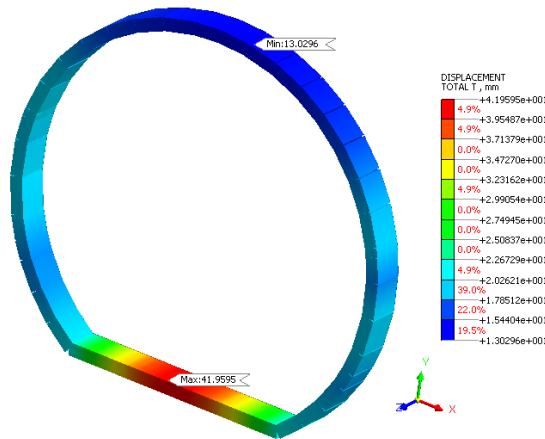
Şekil 97. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (üçüncü aşama)



Şekil 98. Toplam minimumve maksimum iksa elemanı deplasman değerleri (üçüncü aşama)



Şekil 99. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (üçüncü aşama)



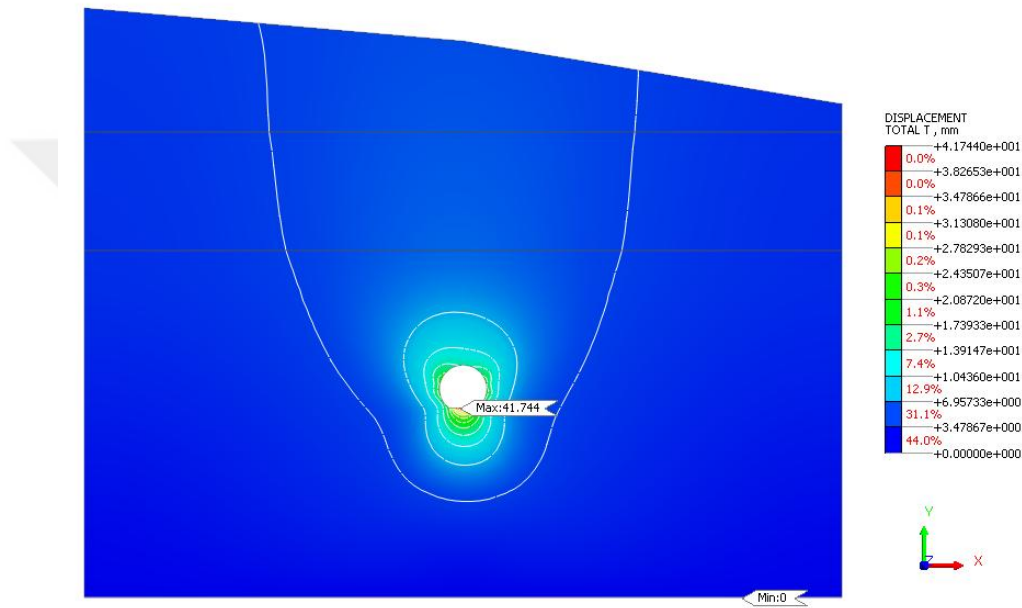
Şekil 100. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (üçüncü aşama)

Modellemenin üçüncü aşamasında yenilme gerçekleştiği için dördüncü aşamada yapısal elemanlara ait Tablo 50' de verilen özellikler kullanılmıştır.

Tablo 50. Dördüncü model tasarımına ait yapısal elemanlara ait özellikler.

Yapısal Malzemeler	Çap/Et kalınlığı (mm)	Uzunluk (m)	Genişlik (cm)	Tür	Önyük (kN)	Kapasite
Kaya bulonu	30/9.5	6	-	IBO	- 120	260 kN
Püskürtme beton	-	-	40	-	-	20 N/mm ²
İksa	-	-	-	IPN300	-	420 N/mm ²

Tablo 50’ de verilen yapısal elemanlara ait özellikler kullanılarak yapılan analiz çalışması sonucunda elde edilen toplam minimum deplasman 0 mm toplam maksimum deplasman değeri 41.74 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 101).



Şekil 101. Toplam maksimum ve minimum deplasman (dördüncü aşama)

Yapısal elemanlara gelen yükler değerlendirildiğinde:

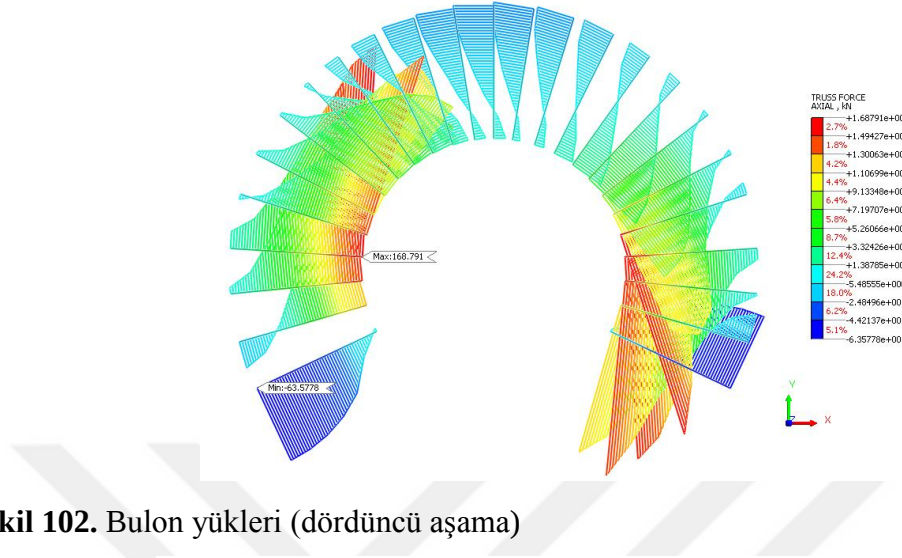
Bulonlar için minimum eksenel kuvvet -63.58 kN ve maksimum eksenel kuvvet 168.8 kN (Şekil 102) olarak elde edilmiştir. Bulonlardaki toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri sırasıyla 6.35 mm ve 19.81 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 103).

İksa elemanı için maksimum ve minimum gerilmeler sırasıyla -196.06 N/mm² ve maksimum gerilme -68.10 N/mm² (Şekil 104) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla 13.48 mm ve 41.74 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 105).

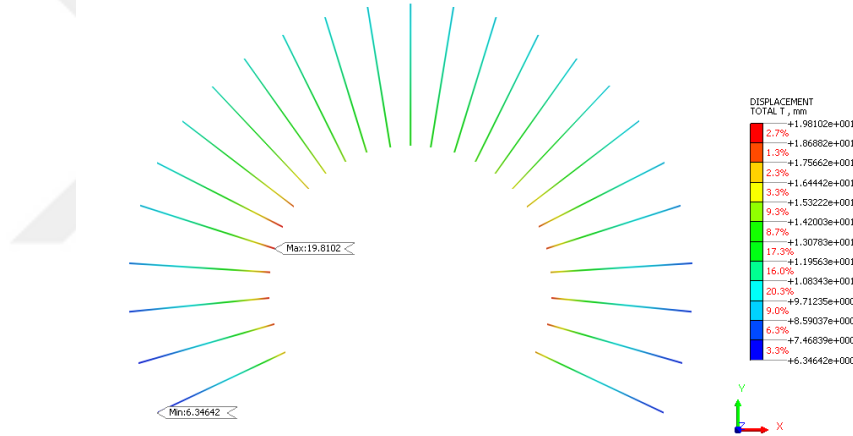
Püskürtme beton elemanı için maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla -19.95 N/mm² ve -5.22 N/mm² (Şekil 106) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla minimum 13.48 mm ve 41.74 mm (Şekil 107) olarak elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde kaya bulonları kapasite değerinin altında değerler elde edilmiştir. İksa elemanı akma sınırının çok altında kaldığı için yenilme

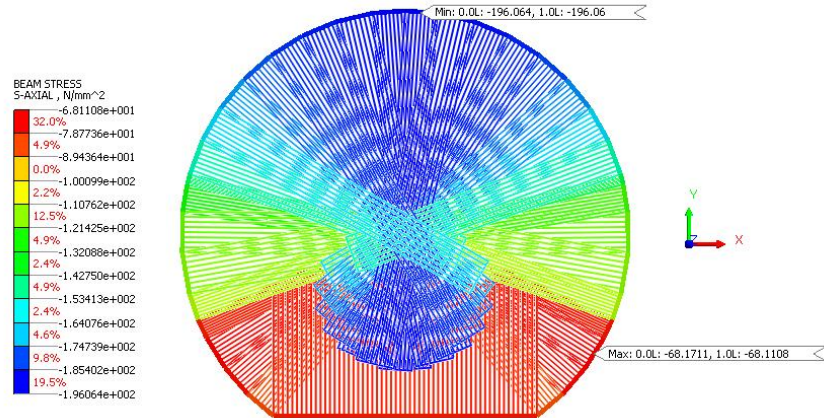
gerçekleşmemiştir. Püskürtme beton yükü için beton dayanım değerinin altında bir değer elde edilmiştir. İki boyutlu tasarımda elde sonuçlar değerlendirildiğinde yapılan son sonuçlara göre çift tüp tünel tasarımı yapılmıştır.



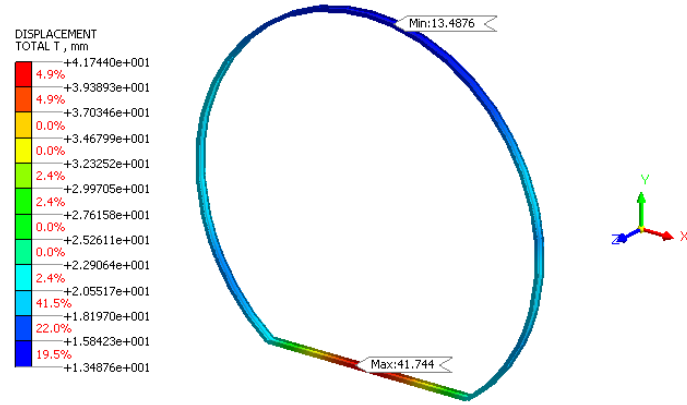
Şekil 102. Bulon yükleri (dördüncü aşama)



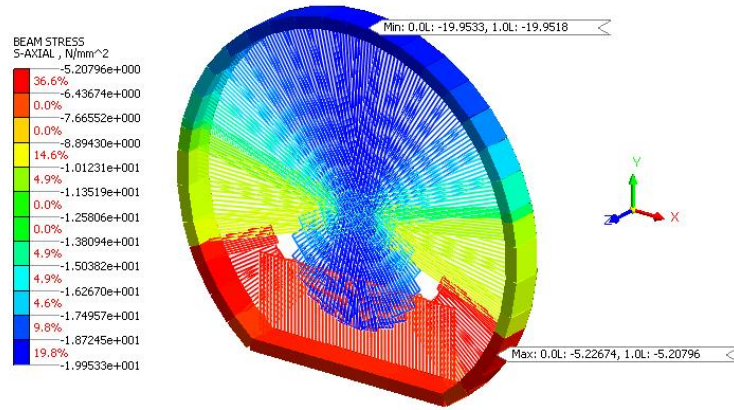
Şekil 103. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (dördüncü aşama)



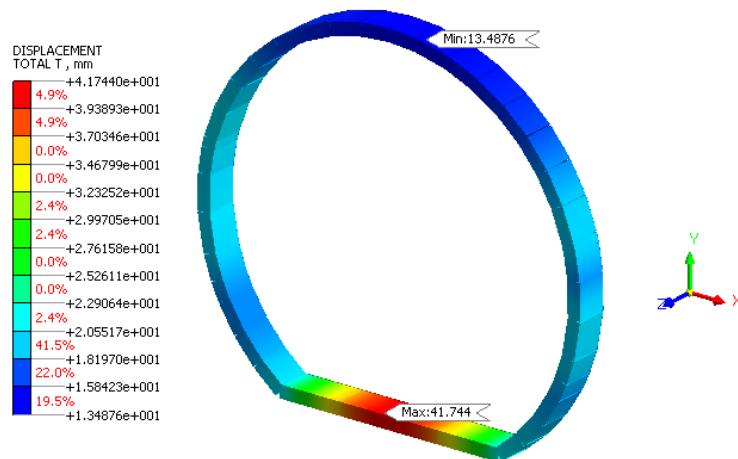
Şekil 104. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (dördüncü aşama)



Şekil 105. Toplam minimumve maksimum iksa elemanı deplasman değerleri (dördüncü aşama)



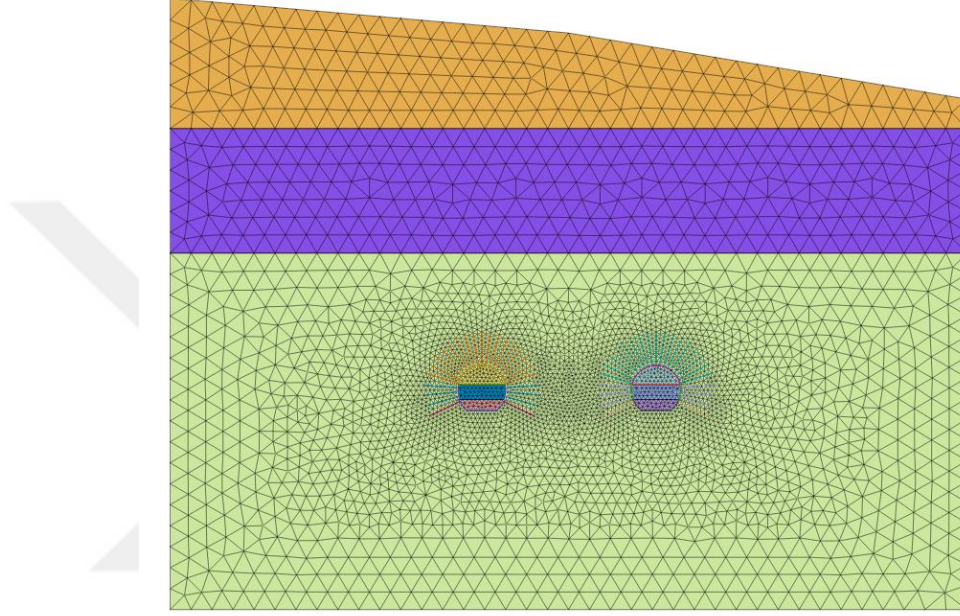
Şekil 106. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (dördüncü aşama)



Şekil 107. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (dördüncü aşama)

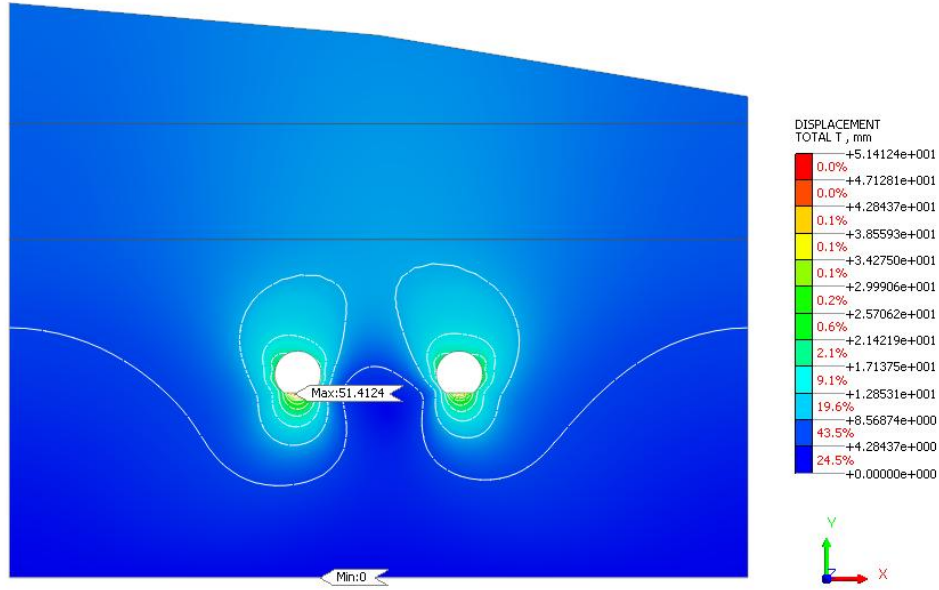
İki Boyutlu Çift Tüp Analiz Çalışması

Çift tüp tünel için yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde Şekil 108’ de verilen sayısal model oluşturulmuştur. Tek tüp tünel tasarımı için kullanılan aynı özelliklerde yapısal elemanlar kullanılmıştır. Tünel kazısı her iki tüp için ayrı ayrı olarak üç aşamada oluşturulmuştur. Taç kısmın kazısı üstyarı, topuk kısmı kazısı olan altyarı ve taban kazısı olan invert kazıları şeklinde teşkil edilmiştir. Yapım aşaması modellenirken sol tüpün destek sistemi tamamlandıktan sonra sağ tüpün kazı aşamasına geçilmiştir.



Şekil 108. 2B analiz çift tüp tünel için ağ yapısı genel görünümü

Tablo 50’ de verilen yapısal elemanlara ait özellikler kullanılarak yapılan beşinci aşama analiz çalışması sonucunda elde edilen toplam minimum deplasman 0 mm toplam maksimum deplasman değeri 51.41 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 109).



Şekil 109. Toplam maksimum ve minimum deplasman (beşinci aşama)

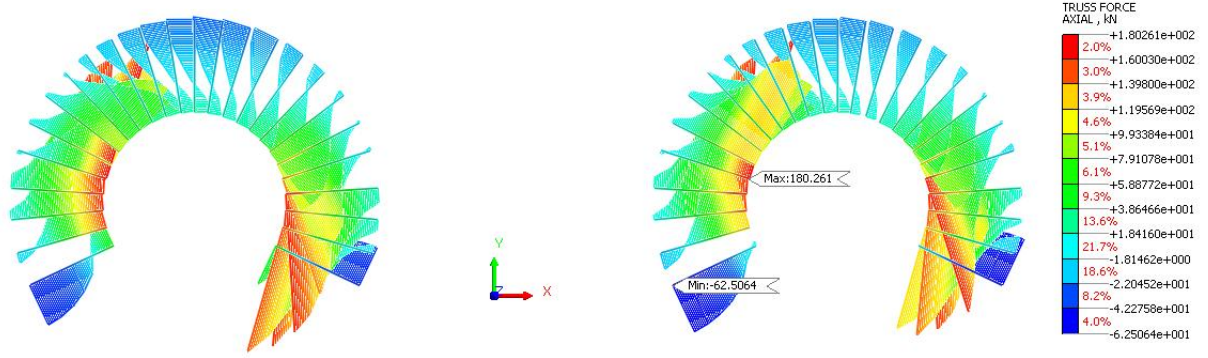
Yapısal elemanlara gelen yükler değerlendirildiğinde:

Bulonlar için minimum eksenel kuvvet -62.50 kN ve maksimum eksenel kuvvet 180.26 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 110). Bulonlardaki toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri sırasıyla 3.58 mm ve 21.60 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 111).

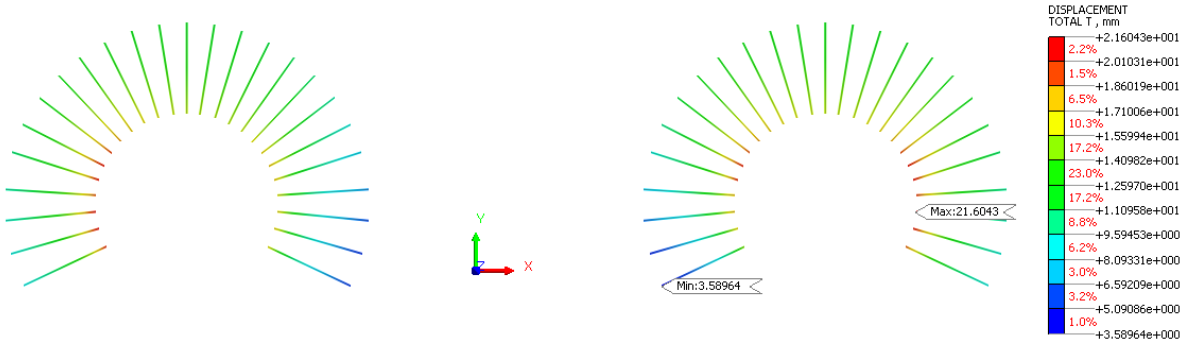
İksa elemanı için maksimum ve minimum gerilmeler sırasıyla -216.25 N/mm² ve maksimum gerilme -75.12 N/mm² (Şekil 112) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri 15.00 mm ve 51.41 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 113).

Püskürtme beton elemanı için maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla -21.85 N/mm² ve maksimum gerilme -5.71 N/mm² (Şekil 114) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri sırasıyla 15.00 mm ve 51.41 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 115).

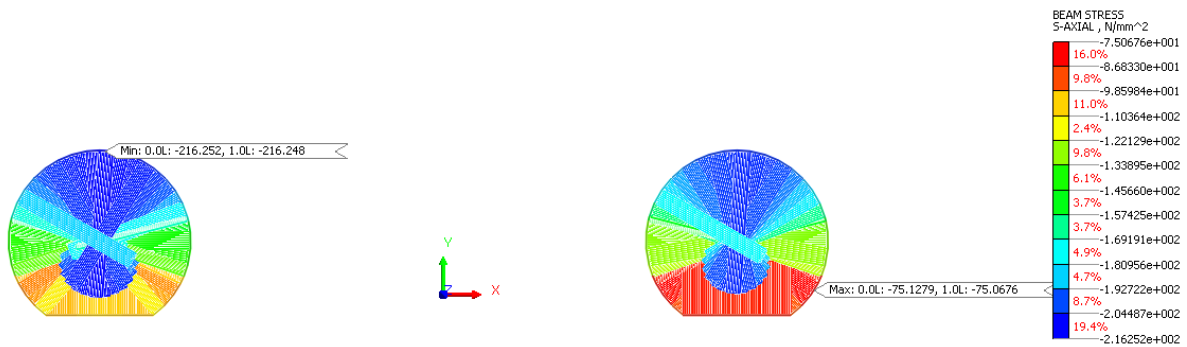
Modellemenin beşinci aşama analiz sonuçları Tablo 50' de verilen yapısal elemanlara ait özellikler ile karşılaştırıldığında kaya bulonları kapasite değerinin altında değerler elde edilmiştir. İksa elemanı akma sınırının çok altında kaldığı için yenilme gerçekleşmemiştir. Püskürtme beton yükü için beton dayanım değerinin üzerinde bir değer elde edildiği için tasarım yenilenmiştir. İki boyutlu tasarımda elde sonuçlar değerlendirildiğinde yapılan son sonuçlara göre çift tüp tünel tasarımı yapılmıştır.



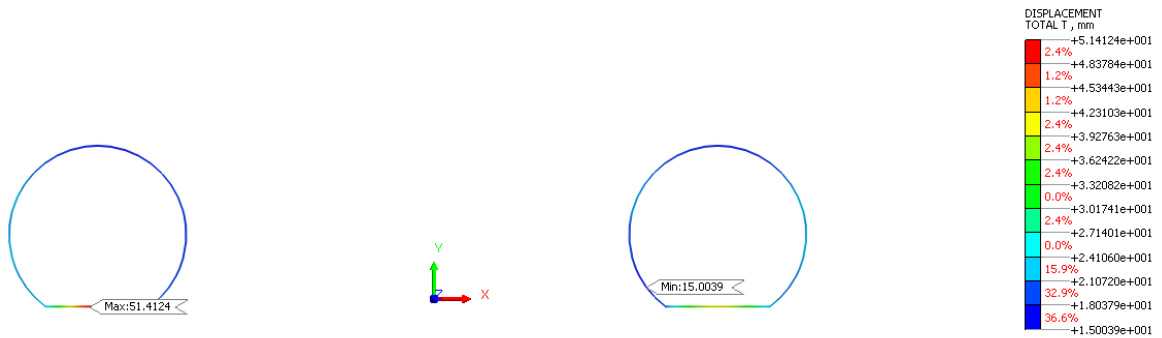
Şekil 110. Bulon yükleri (beşinci aşama)



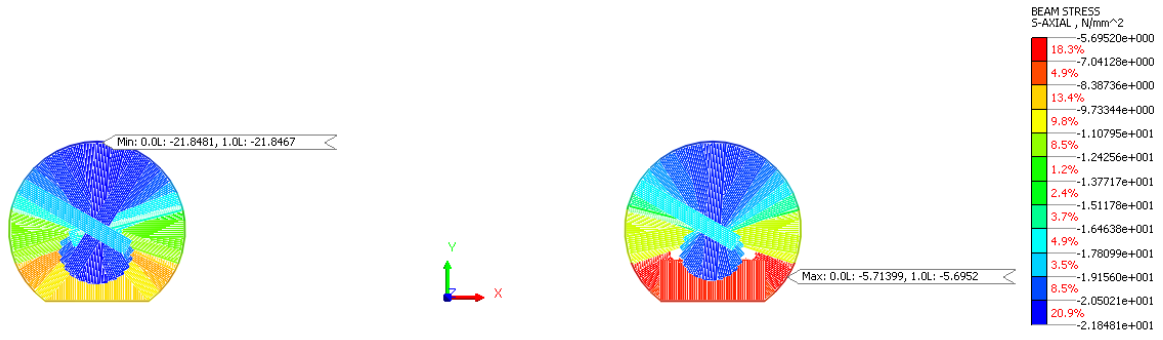
Şekil 111. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (Beşinci aşama)



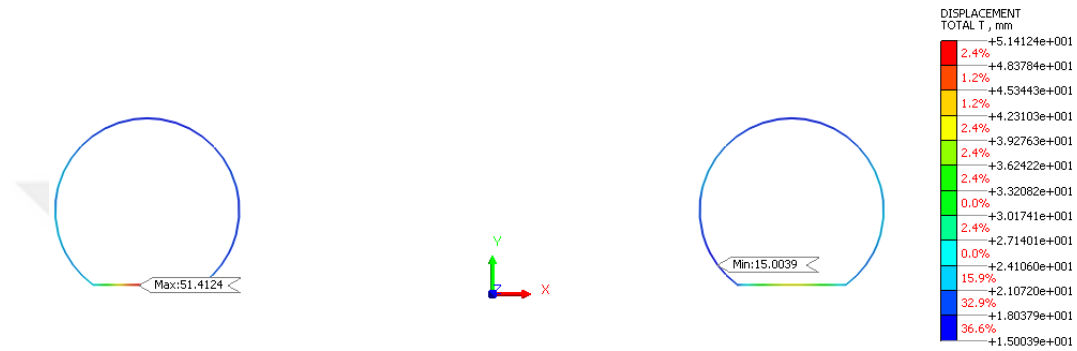
Şekil 112. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (beşinci aşama)



Şekil 113. Toplam minimumve maksimum iksa elemanı deplasman değerleri (beşinci aşama)



Şekil 114. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (beşinci aşama)



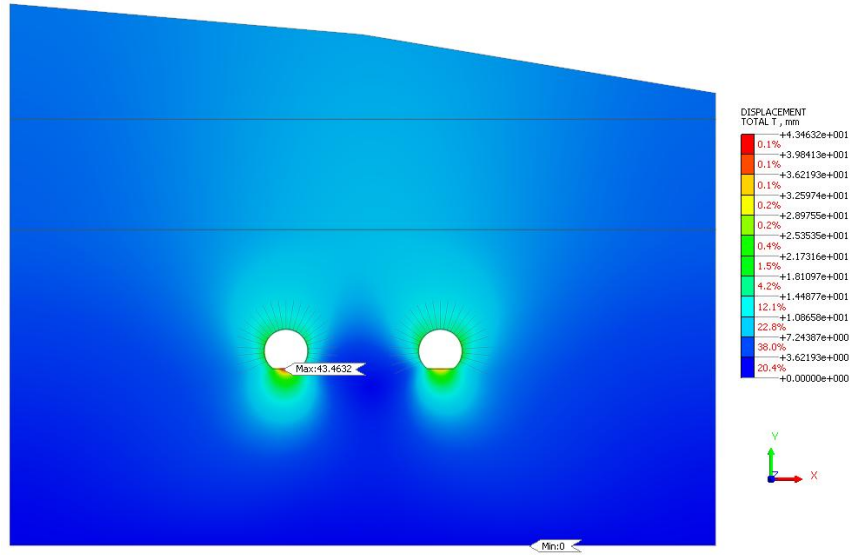
Şekil 115. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (beşinci aşama)

Modellemenin beşinci aşamasında yenilme gerçekleştiği için altıncı aşamada yapısal elemanlara ait tablo 51’ de verilen özellikler kullanılmıştır.

Tablo 51. Altıncı model tasarımına ait yapısal elemanlara ait özellikler.

Yapısal Malzemeler	Çap/Et kalınlığı (mm)	Uzunluk (m)	Genişlik (cm)	Tür	Önyük (kN)	Kapasite
Kaya bulonu	30/9.5	8	-	IBO	- 100	260 kN
Püskürtme beton	-	-	50	-	-	20 N/mm ²
İksa	-	-	-	IPN300	-	420 N/mm ²

İki boyutlu ve tek tüp tünel için yapılan analiz çalışmasına ait sonuçlar için toplam deplasmanlar değerlendirildiğinde minimum 0 mm ve maksimum 43.46 mm deplasman (Şekil 116) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 116. Toplam maksimum ve minimum deplasman (altıncı aşama)

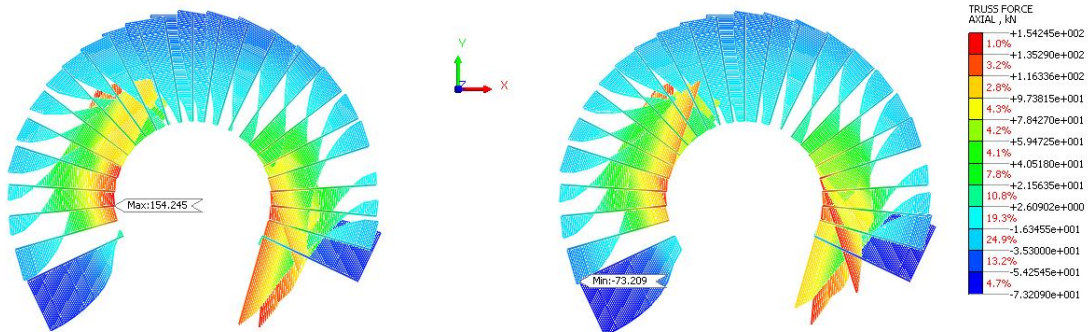
Yapısal elemanlara gelen yükler değerlendirildiğinde:

Bulonlar için minimum eksenel kuvvet -73.21 kN ve maksimum eksenel kuvvet 154.25 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 117). Bulonlardaki toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri sırasıyla 2.15 mm ve 20.23 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 118).

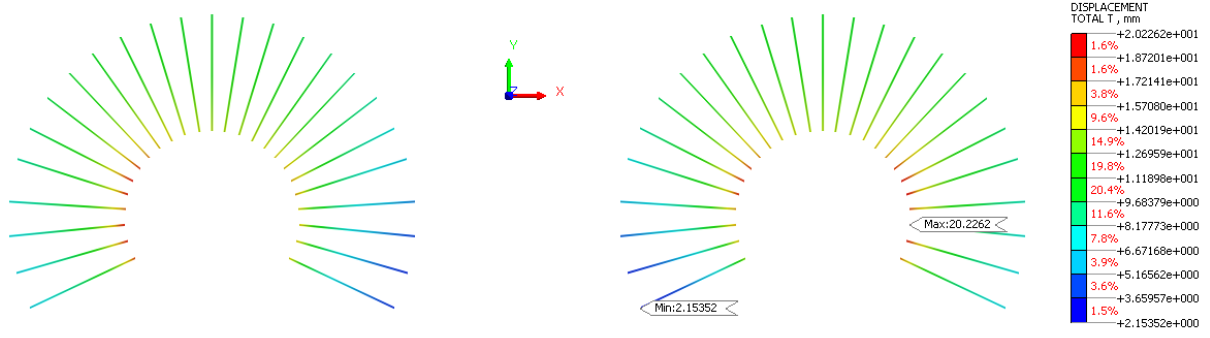
İksa elemanı için maksimum ve minimum gerilmeler sırasıyla -167.53 N/mm² ve -57.39 N/mm² (Şekil 119) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla 13.66 mm ve 43.46 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 120).

Püskürtme beton elemanı için maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla -16.90 N/mm² ve gerilme -4.38 N/mm² (Şekil 121) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla 13.66 mm ve 43.46 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 121).

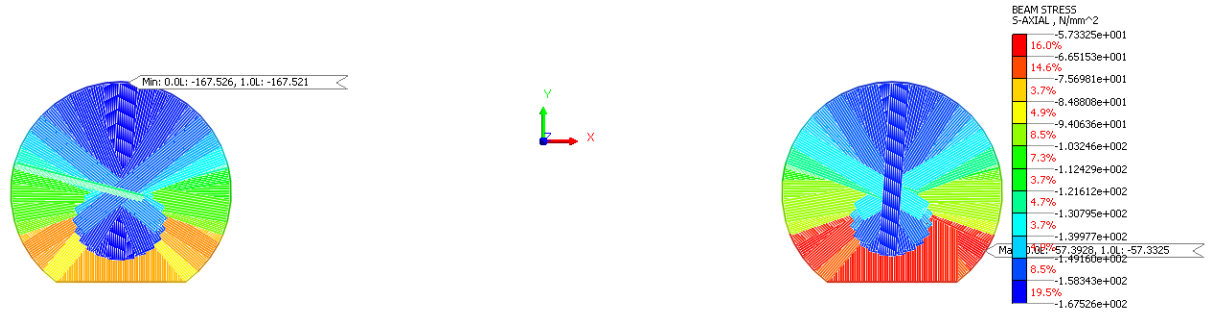
Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde kaya bulonları kapasite değerinin altında değerler elde edilmiştir. İksa elemanı akma sınırının çok altında kaldığı için yenilme gerçekleşmemiştir. Püskürtme beton yükü için beton dayanım değerinin altında değerler elde edilmiştir.



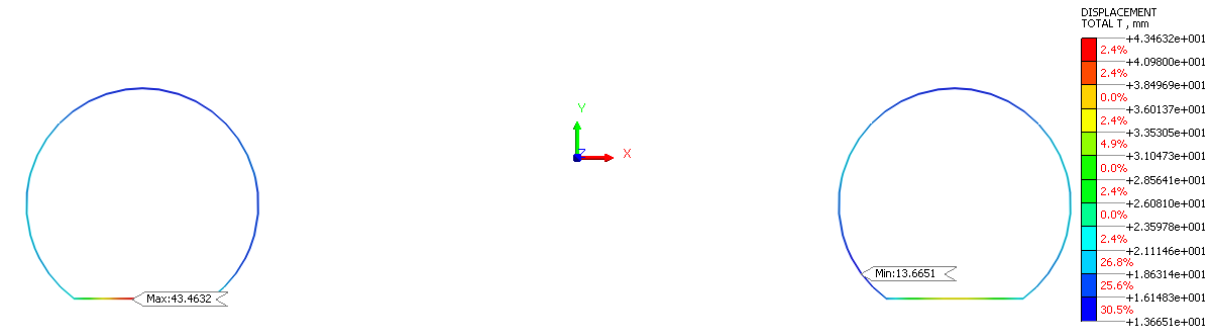
Şekil 117. Bulon yükleri (altıncı aşama)



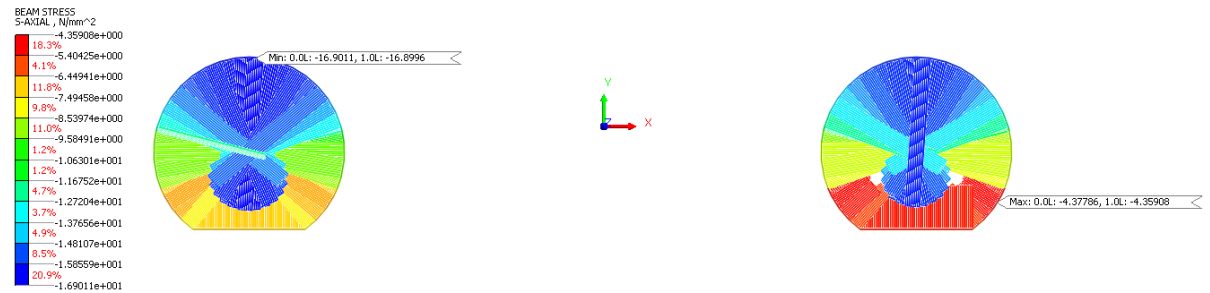
Şekil 118. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (altıncı aşama)



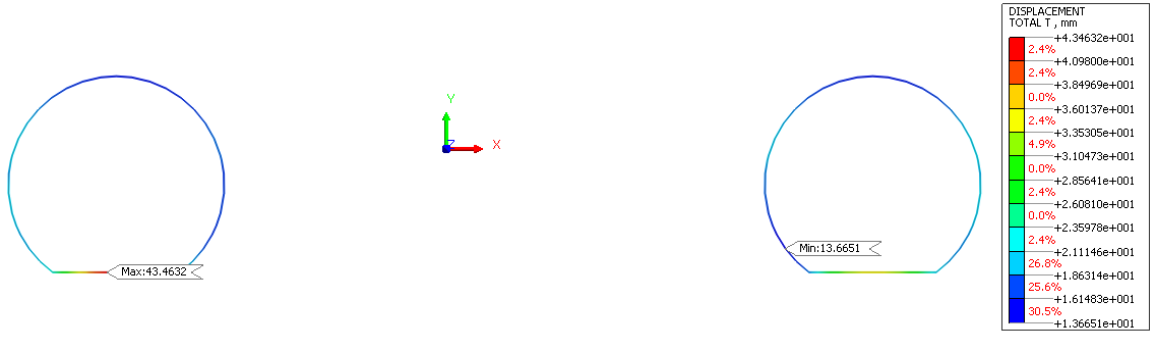
Şekil 119. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (altıncı aşama)



Şekil 120. Toplam minimumve maksimum iksa elemanı deplasman değerleri (altıncı aşama)

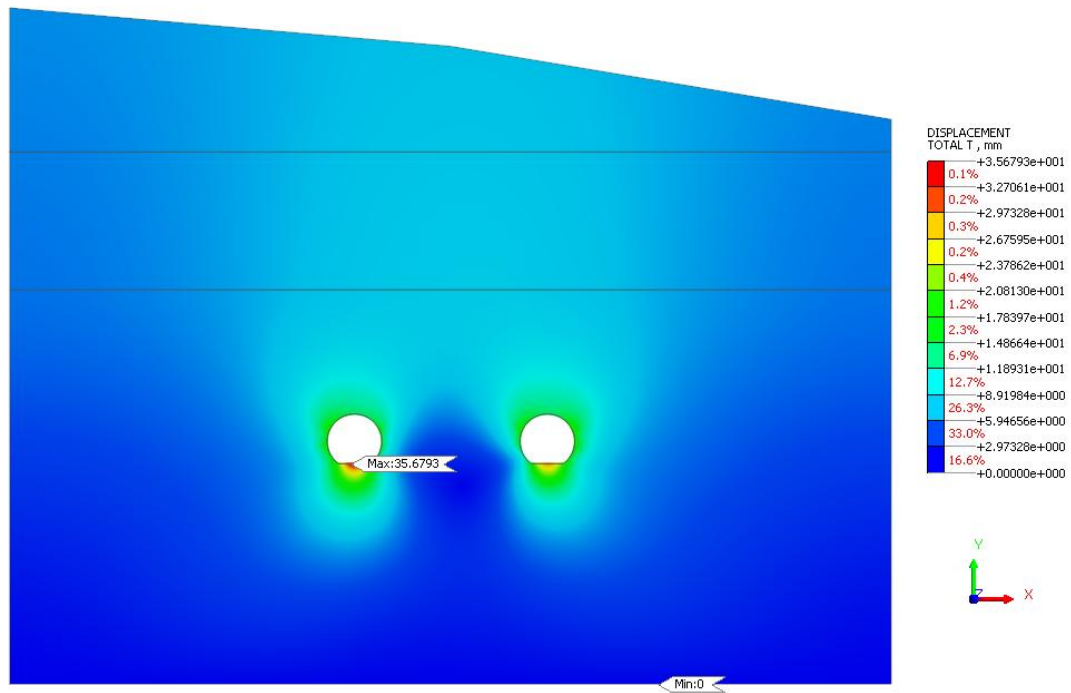


Şekil 121. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (altıncı aşama)



Şekil 122. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (altıncı aşama)

Tünel kazı ortamı kıltaşı olduğu için Mohr-Coulomb Göçme kriterine ek olarak Genelleştirilmiş Hoek&Brown göçme kriteri ile altıncı model yeniden değerlendirilmiş olup elde edilen analiz çıktıları aşağıda verilmektedir. Yedinci model tasarımı için yapılan analiz çalışmasına ait sonuçlar için toplam deplasmanlar değerlendirildiğinde minimum 0 mm ve maksimum 35.68 mm deplasman (Şekil 123) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 123. Toplam maksimum ve minimum deplasman (yedinci aşama)

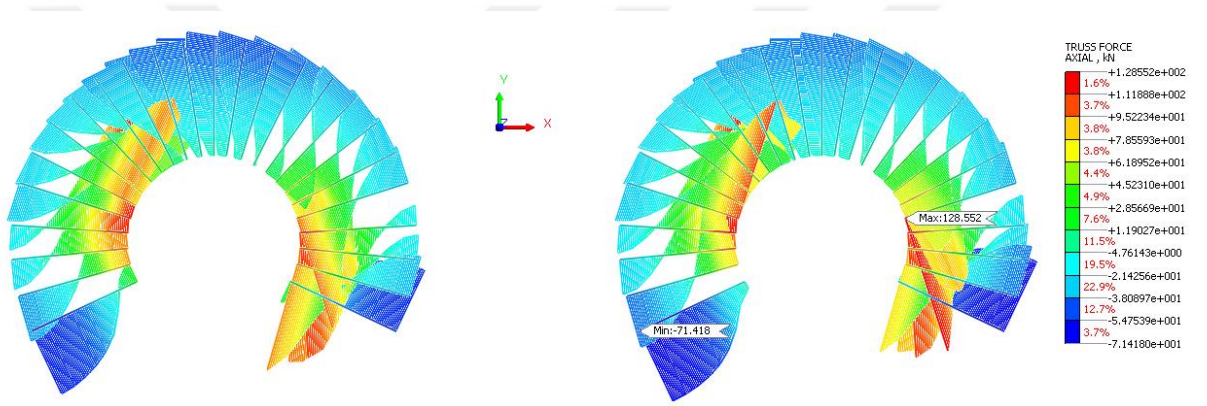
Yapısal elemanlara gelen yükler değerlendirildiğinde:

Bulonlar için minimum eksenel kuvvet -71.42 kN ve maksimum eksenel kuvvet 128.55 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 124). Bulonlardaki toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri sırasıyla 1.96 mm ve 19.05 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 125).

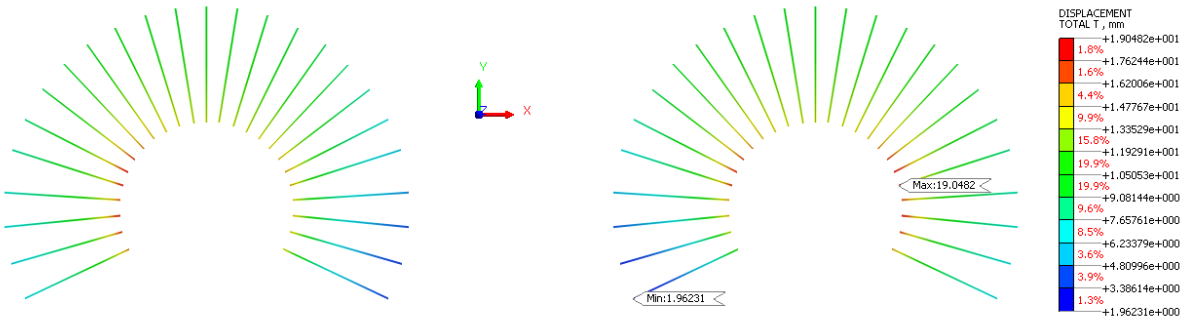
İksa elemanı için maksimum ve minimum gerilmeler sırasıyla -167.61 N/mm^2 ve -50.96 N/mm^2 (Şekil 126) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla 11.89 mm ve 35.68 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 127).

Püskürtme beton elemanı için maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla -16.91 N/mm^2 ve gerilme -3.91 N/mm^2 (Şekil 128) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla 11.89 mm ve 35.68 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 129).

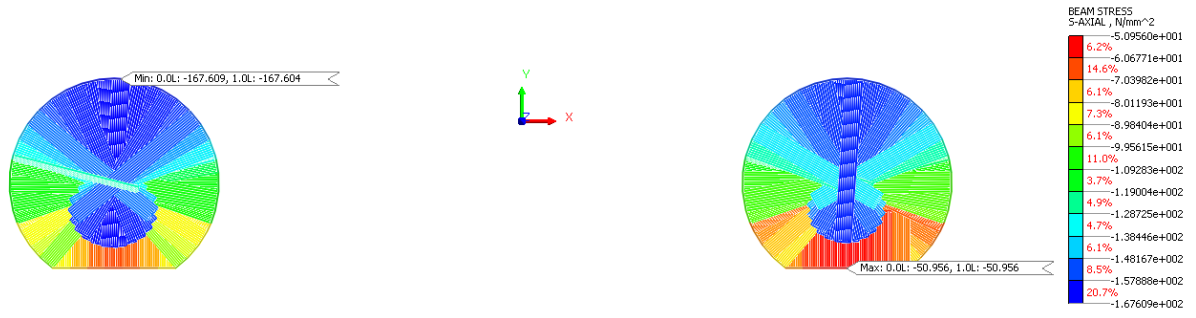
Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde kaya bulonları kapasite değerinin altında değerler elde edilmiştir. İksa elemanı akma sınırının çok altında kaldığı için yenilme gerçekleşmemiştir. Püskürtme beton yükü için beton dayanım değerinin altında değerler elde edilmiştir.



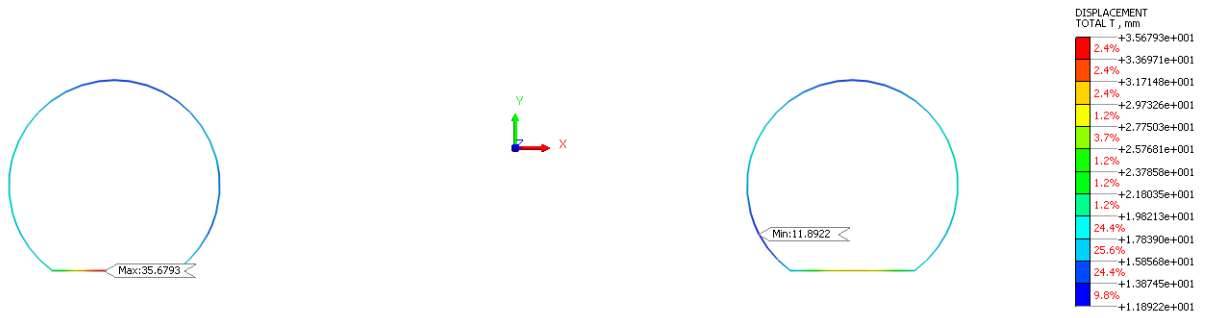
Şekil 124. Bulon yükleri (yedinci aşama)



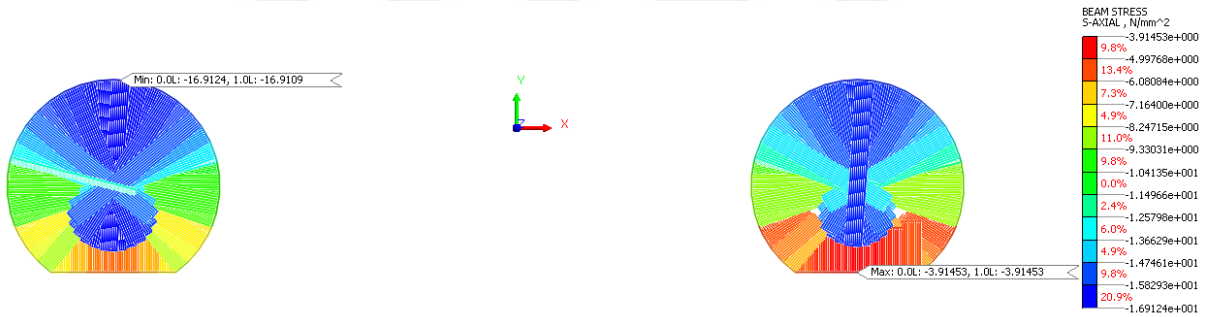
Şekil 125. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (yedinci aşama)



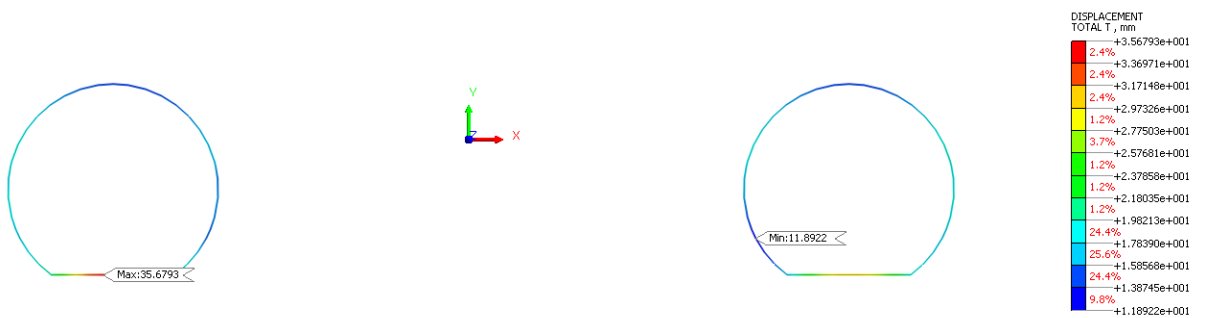
Şekil 126. Toplam minimumve maksimum iksa eleman yükleri (yedinci aşama)



Şekil 127. Toplam minimumve maksimum iksa eleman deplasman değerleri (yedinci aşama)



Şekil 128. Toplam minimumve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (yedinci aşama)



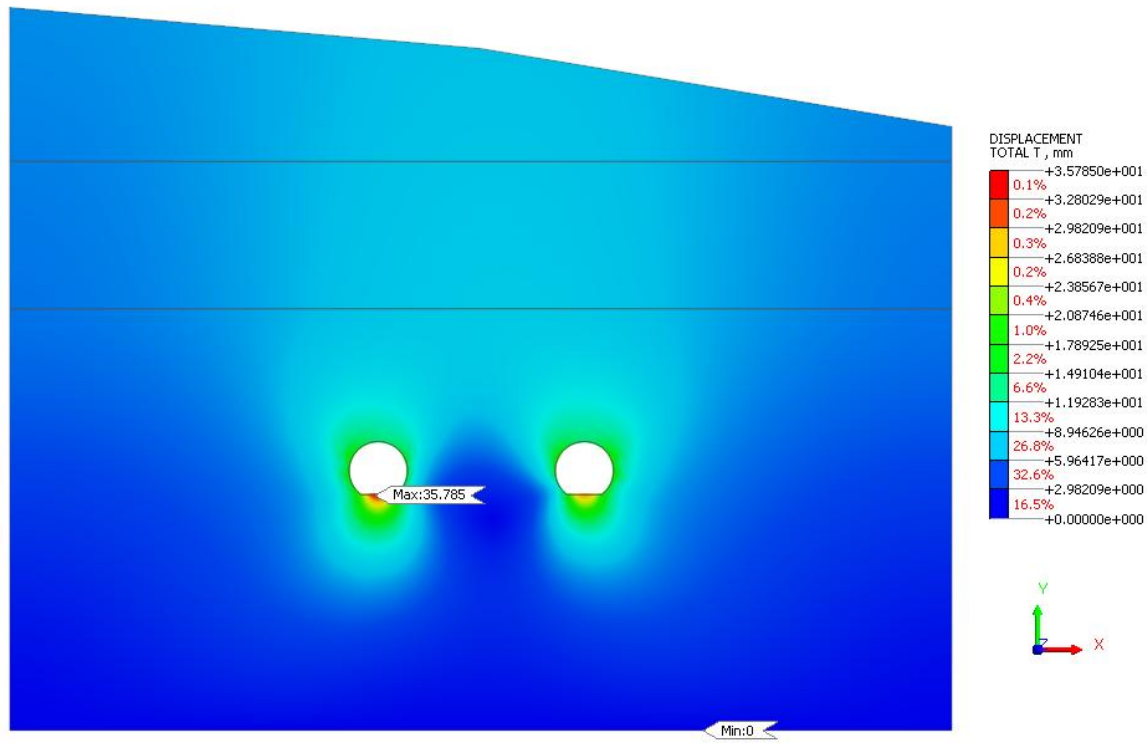
Şekil 129. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (yedinci aşama)

Modellemenin yedinci aşamasında elde edilen bulon yükleri değerlendirildiğinde kapasite değerinin çok altında olduğu gözlemlenmiştir. Bulon uzunluğu 6 m olarak farklı bir analiz benzer özellikler ile değerlendirilmiş olup püskürtme beton yükünde artış meydana

gelmiştir. Bu nedenden dolayı her iki göçme kriteri için bulon uzunluğunun 8 m olarak seçilmesinde karar kılınmıştır. Ek olarak Hoek&Brown kriteri için önyüklem değeri azaltılarak yapılan çalışma kapsamında birincil destek sistemleri için optimuma yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu kapsamda yapılan sekizinci aşamada yapısal elemanlar için tablo 52’ de verilen özellikler kullanılmıştır. Sekizinci model tasarımında yapılan analiz çalışmasına ait sonuçlar için toplam deplasmanlar değerlendirildiğinde minimum 0 mm ve maksimum 35.79 mm deplasman (Şekil 130) değerleri elde edilmiştir.

Tablo 52. Sekizinci model tasarımına ait yapısal elemanlara ait özellikler.

Yapısal Malzemeler	Çap/Et kalınlığı (mm)	Uzunluk (m)	Genişlik (cm)	Tür	Önyük (kN)	Kapasite
Kaya bulonu	30/9.5	8	-	IBO	- 40	260 kN
Püskürtme beton	-	-	50	-	-	20 N/mm ²
İksa	-	-	-	IPN300	-	420 N/mm ²



Şekil 130. Toplam maksimum ve minimum deplasman (sekizinci aşama)

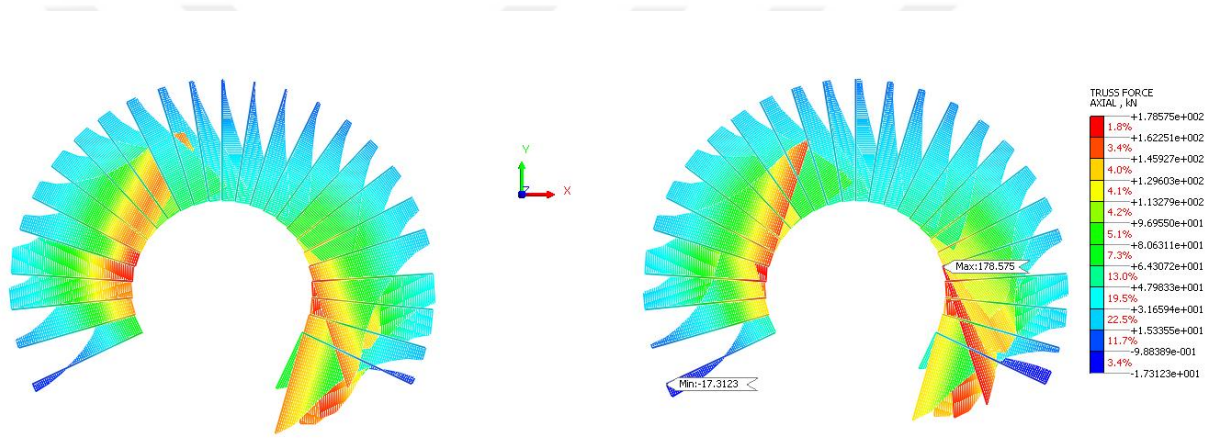
Yapısal elemanlara gelen yükler değerlendirildiğinde:

Bulonlar için minimum eksenel kuvvet -17.31 kN ve maksimum eksenel kuvvet 178.57 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 131). Bulonlardaki toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri sırasıyla 2.08 mm ve 18.64 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 132).

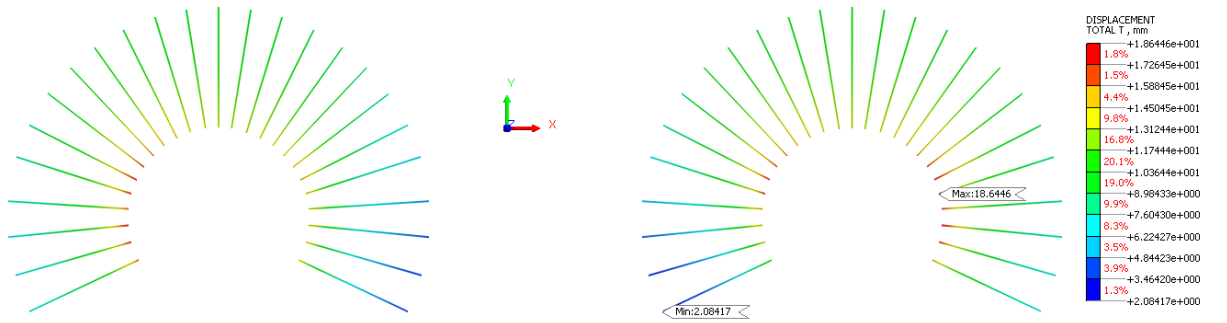
İksa elemanı için maksimum ve minimum gerilmeler sırasıyla -163.76 N/mm^2 ve -50.54 N/mm^2 (Şekil 133) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla 11.71 mm ve 35.78 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 134).

Püskürtme beton elemanı için maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla -16.65 N/mm^2 ve gerilme -3.89 N/mm^2 (Şekil 135) ve toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri ise sırasıyla 11.71 mm ve 35.78 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 136).

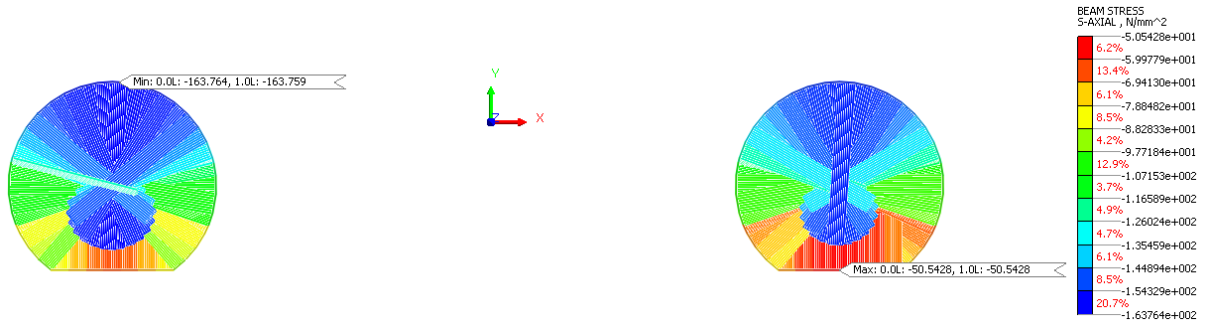
Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde kaya bulonları kapasite değerinin altında değerler elde edilmiştir. İksa elemanı akma sınırının çok altında kaldığı için yenilme gerçekleşmemiştir. Püskürtme beton yükü için beton dayanım değerinin altında değerler elde edilmiştir.



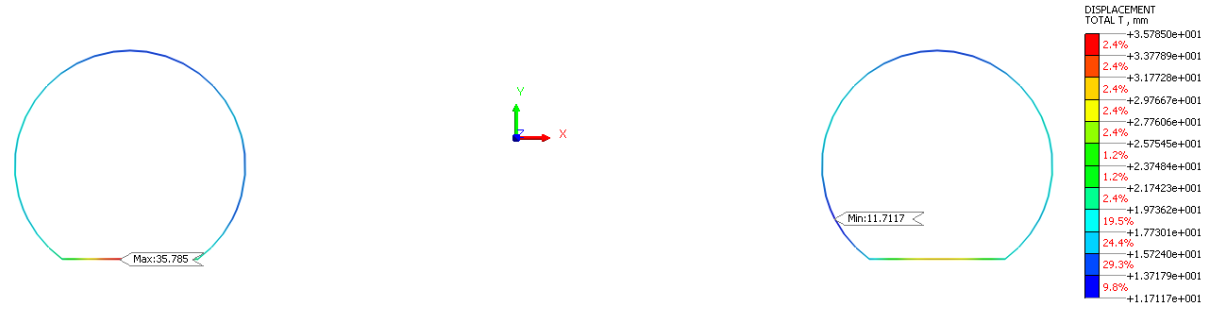
Şekil 131. Bulon yükleri (sekizinci aşama)



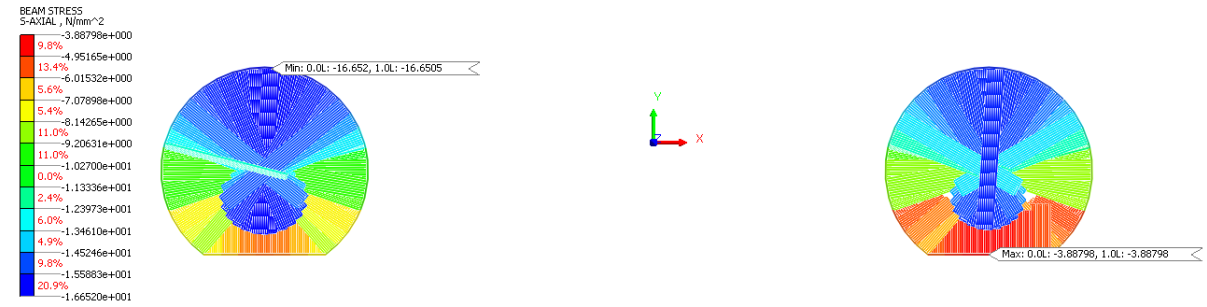
Şekil 132. Toplam minimum ve maksimum bulon deplasman değerleri (sekizinci aşama)



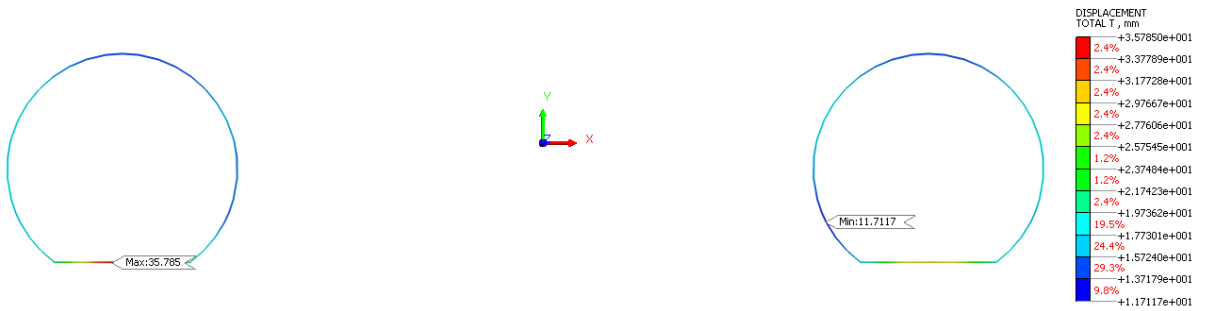
Şekil 133. Toplam minimum ve maksimum iksa eleman yükleri (sekizinci aşama)



Şekil 134. Toplam minimum ve maksimum iksa eleman deplasman değerleri (sekizinci aşama)



Şekil 135. Toplam minimum ve maksimum taze beton elemanına gelen yükler (sekizinci aşama)



Şekil 136. Taze beton elemanında oluşan toplam minimum ve maksimum deplasman değerleri (sekizinci aşama)

Elde edilen sonuçlara ait özet bilgiler Tablo 52’de verilmektedir.

Tablo 53. İki boyutlu analiz sonuçları

		Deplasman(mm)		Gerilme (N/mm ²)		Eksenel Kuvvet (kN)	Kapasite	Sonuç*
		maksimum	minimum	maksimum	minimum			
1. Model	Model		0.00					
	Püskürtme Beton	41.96		-19.52	-5.15		20 N/mm ²	√
	İksa		13.02	-189.61	-66.98		420 N/mm ²	√
	Bulon	19.20	6.6			250.47	157 kN	X
2. Model	Model		0.00					
	Püskürtme Beton	41.83		-19.78	-5.19		20 N/mm ²	√
	İksa		13.30	-193.46	-67.66		420 N/mm ²	√
	Bulon	19.56	6.4			200.92	157 kN	X
3. Model	Model		0.00					
	Püskürtme Beton	41.96		-19.52	-5.15		20 N/mm ²	√
	İksa		13.02	-189.65	-66.99		420 N/mm ²	√
	Bulon	19.20	6.58			249.15	260 kN	X
4. Model	Model		0.00					
	Püskürtme Beton	41.74		-19.95	-5.22		20 N/mm ²	√
	İksa		13.48	-196.06	-68.10		420 N/mm ²	√
	Bulon	19.81	6.35			169.00	260 kN	√
5. Model	Model		0.00					
	Püskürtme Beton	51.41		-21.85	-5.71		20 N/mm ²	X
	İksa		15.00	-216.85	-75.12		420 N/mm ²	√
	Bulon	21.60	3.58			180.26	260 kN	√
6. Model	Model		0.00					
	Püskürtme Beton	43.46		-16.90	-4.38		20 N/mm ²	√
	İksa		13.66	-167.53	-57.39		420 N/mm ²	√
	Bulon	20.23	2.15			154.25	260 kN	√
7. Model	Model		0.00					
	Püskürtme Beton	35.68		-16.91	-3.91		20 N/mm ²	√
	İksa		11.89	-167.61	-50.96		420 N/mm ²	√
	Bulon	19.05	1.96			128.55	260 kN	√
8. Model	Model		0.00					
	Püskürtme Beton	35.79		-16.65	-3.89		20 N/mm ²	√
	İksa		11.71	-163.76	-50.54		420 N/mm ²	√
	Bulon	18.64	2.08			178.57	260 kN	√

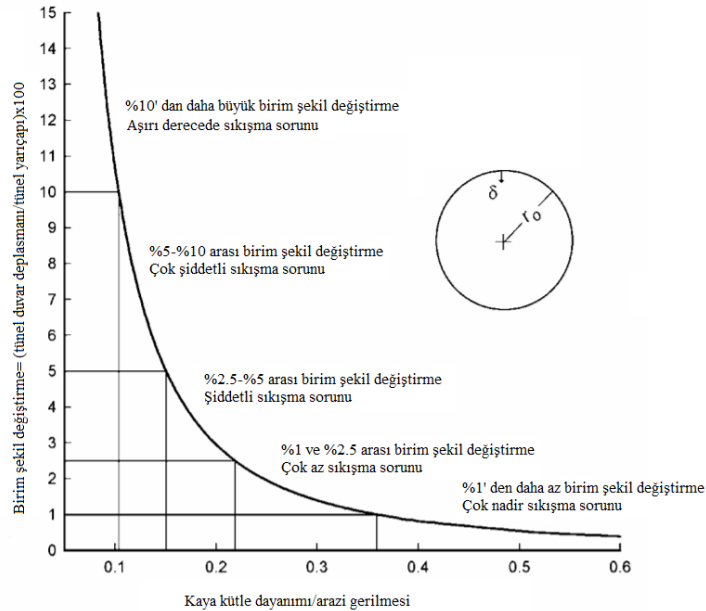
* X: Yenilme, √: Başarılı

Birinci ve ikinci aşama model denemeleri için 6 m uzunluğunda 28'lik PG bulonu ile yapılan tek tüp tünel tasarımlarında öngermeli (-60 kN) ve öngermesiz yüklemelerde bulon kapasite değerinin çok fazla aşıldığı tespit edilmiştir. Diğer birincil destek elemanlarında yenilme gözlemlenmemiştir.

Üçüncü aşama model denemesi için bulon kapasite değerinin arttırılması amacıyla bulon türü değiştirilmiştir. Bu amaçla IBO 30/9.5 mm boyutlarında 6 m uzunluğunda bulon öngermeli (-100 kN) kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalara göre birincil destek elemanlarında yenilme gözlenmemiştir. Ancak bulon yükü yenilme sınırına yaklaştığından dolayı dördüncü model aşamasında öngörme yükü -120 kN olarak alınarak farklı bir deneme yapılmıştır. Dördüncü aşama model denemesi sonucunda birincil destek elemanlarında yenilme gözlemlenmemiştir. Bu durumda çift tüp analizleri için dördüncü aşamada elde edilen birincil destek elemanlarına ait özellikler ile çift tüp tünel modellemeleri gerçekleştirilmiştir.

Beşinci aşama modellemede elde edilen değerler incelendiğinde püskürtme betonda yenilmenin meydana gelmiş olduğu gözlemlenmiştir. Altıncı aşama modellemede yenilmenin önüne geçilmesi amacıyla püskürtme beton kalınlığı ve bulon uzunluğu arttırılmış ayrıca bulon öngörme yükü -100 kN olarak değerlendirildiğinde birincil destek sisteminde yenilmenin önüne geçilmiştir. Elde edilen deplasman değerleri incelendiğinde (Şekil 137) tünelde herhangi sıkışma sorunu tespit edilmemiştir.

Ayrıca Mohr-Coulomb Göçme kriterine ek olarak Genelleştirilmiş Hoek&Brown göçme kriteri ile altıncı model yeniden değerlendirilmiş olup yedinci ve sekizinci model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan modelleme çalışmaları sonucunda Mohr-Coulomb Göçme kriterine nazaran daha düşük destek basınçları elde edilmiştir.



Şekil 137. Farklı birim şekil değiştirme değerleri ile tünellerde meydana gelebilecek sorunların değerlendirilmesi (Hoek 2001)

TARTIŞMA

Doktora tez çalışması kapsamında sedimenter ortamda açılması planlanan bir karayolu tüneli için birincil destek sisteminin tasarımını amacıyla arazi, laboratuvar ve modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmuştur.

1. Çalışma alanının jeolojik yapısını, birimlerin derinlikleri ve sınırlarını gerçeğe yakın bir şekilde belirlemek amacıyla jeofizik çalışmalar yapılmıştır. Ancak sismik kırılma yerine sismik yansıma yönteminin uygulanamamış olmasından dolayı yalnızca yamaç molozuna ait mekanik ve fiziksel özellikler belirlenebilmiştir.
2. Çalışma alanında tünel yapısında fazladan gerilme meydana getirecek jeolojik yapısal olumsuzluklar (fay, kırık vs. gibi) rastlanılmamıştır.
3. Modellemelerde tünelin hidrostatik koşullarda oluşturulacağı değerlendirilmiştir.
4. Kazı ortamı zayıf kaya-sağlam zemin geçişi olduğundan dolayı Mohr-Coulomb göçme kriteri ile modellenmiştir. Mohr-Coulomb göçme kriteri ile beraber Hoek&Brown kriteri de değerlendirilmiştir.
5. Kazı ortamı zayıf kaya ortamı olduğundan plastik zonun genişliğinin 40 m olabileceği hesaplanmıştır. Bu nedenden dolayı suni kemerlenmenin sağlanması amacıyla IBO bulon türü seçilmiş ve önyükleme uygulanmıştır.
6. Tasarımda önyüklemeli bulon tasarımı ile suni kemerlenme etsinin sağlanabildiğinden tünel kazısında geçici invert uygulaması yapılmamıştır.
7. Deplasman değerleri incelendiğinde tünelde herhangi sıkışma sorunu tespit edilmemiştir.
8. Tasarım sonucunda 8m uzunluğunda öngerme yükü uygulanmış IBO bulon kullanılarak tünel ortamının emniyetli bir şekilde açılacağı tespit edilmiştir.
9. Sonuç olarak yapılan iki boyutlu analiz sonucuna göre üçüncül gerilmeler oluşarak sistem dengeye gelmiştir.
10. Farklı göçme kriterlerine göre yapılan analizler sonucunda elde edilen tünel destek elemanları için sonuçların doğruluğunu belirlemek amacıyla tünel inşa aşamasındaki ölçüm sonuçları ile beraber değerlendirilmelidir.

İleride yapılacak olan çalışmalarda arazideki rezidüel gerilmelerin belirlenmesine yönelik ilgili yöntemlerin ve daha derinlerdeki birimlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin tespit amacıyla daha uygun jeofizik yöntemlerin kullanılmasının daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi açısından önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aksoy, O., C., Kömürlü, E., Yaman, H., E., 2017. Temel Madencilik Bilgileri, Mayeb Basın Yayın, Ankara.
- Aktaş, S. Ş. *Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntem ile inşa edilen bir tünelin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi ve değerlendirilmesi*. Diss. Yüksek Lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- Alejano, L.R., Dono, R.A., Alonso, E., Manín, F.G., 2009, Ground Reaction Curves For Tunnels Excavated in Different Quality Rock Masses Showing Several Types Of Post-Failure Behavior, *Tunneling and Underground Space Technology*, v24, p;689-705.
- Alper, C., 2016. An Investigation On The Applicability Of The Convergence Confinement Method To A Deep Rock Tunnel For Different Conditions. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Anonim 1997. Karayolu Uygulama Projesi (Kesin Proje) Teknik Şartnamesi. Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara-Temmuz.
- Anonim 2020. MTA, Maden Tetkik ve Arama, <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx> (03.02.2020 11:04)
- Anonim 2020. MTA, Maden Tetkik ve Arama, <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>, (03.02.2020 10:37)
- Anonim 2020. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, <https://tdth.afad.gov.tr/main.xhtml> (03.02.2020 15:20)
- Anonymous, 1988. Geoconsult Consulting Engineer, Training Lectures IOT/CECI, Salzburg, June.
- Augarde, C. E., and H. J. Burd. "Three-dimensional finite element analysis of lined tunnels." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 25.3 (2001): 243-262.
- Aydan, Ömer. *Rock Mechanics and Rock Engineering: Volume 1: Fundamentals of Rock Mechanics*. CRC Press, 2019.
- Aydan, Ömer. *Rock Mechanics and Rock Engineering: Volume 2: Applications of Rock Mechanics-Rock Engineering*. CRC Press, 2019.
- Barton, Nicholas, Reidar Lien, and J. Lunde. "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support." *Rock mechanics* 6.4 (1974): 189-236.
- Barton, Nick. "Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design." *International journal of rock mechanics and mining sciences* 39.2 (2002): 185-216.
- Barutoğlu, Ö., 1968. Türkiye Tuz Yatakları <http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/22.pdf>, 03.02.2020, 16:41.
- Bell, F. G. "Mühendislik Jeolojisi ve İnşaat (Çeviren K. Kayabalı, Engineering Geology and Construction, 2004)." *Ankara, Sistem Ofset* (2012).
- Bieinawski, Z. T. "Kaya Kütlesinin Davranışlarını Önceden Saptamak İçin Geliştirilen Jeomekanik Sınıflama Sistemi." *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 1.3: 45-49.

- Bieniawski, Zdzisław Tadeusz. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, 1989.
- Bowles, L. E. *Foundation analysis and design*. McGraw-hill, 1996.
- Brady, Barry HG, and Edwin T. Brown. *Rock mechanics: for underground mining*. Springer science & business media, 2005.
- Bui, T. A., Wong, H., Deleruyelle, F., & Zhou, A. (2016). Constitutive modelling of the time-dependent behaviour of partially saturated rocks. *Computers and Geotechnics*, 78, 123-133.
- Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et du Gaz Naturel. Comité des Techniciens. (1982). *Geological and mud logging in drilling control: catalogue of typical cases*. Editions TECHNIP.
- Choquet, P., J. Hadjigergiou. (1993). The Design of Support for Underground Excavations. In: *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice, and Projects*. Pergamon Pres. 4, 313-345.
- Çelik, Semet. Comparison of mohr-coulomb and hardening soil models' numerical estimation of ground surface settlement caused by tunneling. *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*, 2017, 96-102.
- Deren, Hilmi, Erdoğan Uzgider, and Filiz Piroğlu. *Çelik yapılar*. Çağlayan Kitabevi, 2012.
- Dimitrios, Kolymbas. "Tunelling and tunnel mechanics." *Spring-verlag berlin Heudelberg Germany* (2005).
- Do, Ngoc-Anh, Daniel Dias, and Pierpaolo Oreste. "Three-dimensional numerical simulation of mechanized twin stacked tunnels in soft ground." *Journal of Zhejiang University Science A* 15.11 (2014): 896-913.
- Einstein, H. H., and Baecher GB. "Assessment of empirical design methods for tunnels in rock." (1979).
- Einstein, Herbert H., and Charles W. Schwartz. "Simplified analysis for tunnel supports." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 105.ASCE 14541 (1979).
- Ghiasi, V., Omar, H., Rostami, J., Yusoff, Z. B. M., Ghiasi, S., Huat, B. K., & Muni, R. (2011). Geotechnical and geological studies of NWCT tunnel in Iran focusing on the stabilization analysis and design of support: A case study. *Scientific Research and Essays*, 6(1), 79-97.
- Ghosh Roy, M., and K. S. Rao. "Analysis of creep behaviour of soft rocks in tunneling." ISEG-EGNM, 2015.
- Goodman, Richard E., and Jacques Dubois (1971), "Static And Dynamic Analysis Of Rock Bolt Support-Research On Rock Bolt Reinforcement."
- GTS NX Geotechnical analysis System New Experience, Finite Element solutions for geotechnical engineering.
- Heim, Albert. *Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung im Anschluss an die geologische Monographie der Tödi-Windgällen-Gruppe: mit einem Atlas*. Vol. 1. Schwabe, 1878.
- Herman, Rhett. "An introduction to electrical resistivity in geophysics." *American Journal of Physics* 69.9 (2001): 943-952.

- Hoek, E., Brown, E.T., 1997, Practical Estimates of Rock Mass Strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v34, p; 1165-1186.
- Hoek, Evert, and Edwin T. Brown. *Underground excavations in rock*. No. Monograph. 1980.
- Hoek, Evert. "Big tunnels in bad rock." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127.9 (2001): 726-740.
- Hoek, Evert, Carlos Carranza-Torres, and Brent Corkum. "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition." *Proceedings of NARMS-Tac 1.1* (2002): 267-273.
- Hosseinitoudeshki, Vahid, and Sasan Fazeli. "The effect of pretensioning in the rockbolts on the displacement around tunnels." (2014).
- Hung, J. C., Monsees, J., Munfah, N., & Wisniewski, J. (2009). *Technical manual for design and construction of road tunnels-civil elements. Prepared for the US Department of Transportation. Publication No. FHWA-NHI-10-034*.
- Hunt, Roy E. *Geotechnical engineering investigation handbook*. Crc Press, 2005.
- Janin, J. P., et al. "Numerical back-analysis of the southern Toulon tunnel measurements: A comparison of 3D and 2D approaches." *Engineering Geology* 195 (2015): 42-52.
- Jeong, S. S., Han, Y. C., Kim, Y. M., & Kim, D. H. (2014). Evaluation of the NATM tunnel load on concrete lining using the ground lining interaction model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(2), 672-682.
- Jiang, Yujing, H. Yoneda, and Y. Tanabashi. "Theoretical estimation of loosening pressure on tunnels in soft rocks." *Tunnelling and Underground Space Technology* 16.2 (2001): 99-105.
- Kabwe, Eugie. "Confining stress effect on the elastoplastic ground reaction considering the Lode angle dependence." *International Journal of Mining Science and Technology* (2020).
- Karakus, Murat, Aydın Ozsan, and Hakan Başarır. "Finite element analysis for the twin metro tunnel constructed in Ankara Clay, Turkey." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66.1 (2007): 71-79.
- Karamanlı, Ö., 2009. Tünel İlerlemesine Bağlı Yüzey Oturmalarının Ve Tünel Kaplaması Üzerindeki Yüklerin Belirlenmesi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Karayolları Teknik Şartnamesi; Ulaştırma, Denizcilik; Bakanlığı, Haberleşme. Karayolları Genel Müdürlüğü. *TC Bayındırlık ve İskân Bakanlığı*, 2013.
- Katzenbach, R., and H. Breth. "Nonlinear 3-D analysis for NATM in Frankfurt Clay." *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 10th..* Vol. 1. No. Conf Paper. 1981.
- Keçeli, A. D., 2009. "Uygulamalı Jeofizik, TMMOB Jeofizik Müh." *Odası Eğitim yayınları* 9 s 479
- Koçyiğit, A. (2013). New field and seismic data about the intraplate strike-slip deformation in Van region, East Anatolian plateau, E. Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 586-605.
- Kolymbas, D., *Advances Geotechnical Engineering and Tunnelling*, University of Insbruck, Institute of Geotechnical and Tunnelling Engineering, 2001.
- Koungelis, D. K., and C. E. Augarde. "Parameterised mesh generation for finite element analysis of tunnelling." *Computers and Geomechanics* (2008): 1-41.

- Köse, H., Gürgen, S., (1987). Tünel ve kuyu açma. *İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları*, (145).
- Kun, M. (2010). *Zayıf kayalarda ve faylı zonlarda tünel açma tasarım ve yapım gereksinimlerinin araştırılması ve çözümlenmesi* (Doctoral dissertation, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Li, Charlie C. "Principles of rockbolting design." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9.3 (2017): 396-414.
- Liang, W. G., Yang, C. H., Zhao, Y. S., Dusseault, M. B., & Liu, J. (2007). Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(3), 400-411.
- Liu, Yucheng, and Gary Glass. *Effects of mesh density on finite element analysis*. No. 2013-01-1375. SAE Technical Paper, 2013.
- Logan, Daryl L. *A first course in the finite element method*. Cengage Learning, 2011.
- Look, Burt. "G. 2007. Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables."
- Lunardi, Pietro. *Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS)*. Springer Science & Business Media, 2008.
- Malm, R., Johansson, F., Hellgren, R., & Ríos Bayona, F. (2017). Load Capacity of Grouted Rock Bolts Due to Degradation: 2017: 374.
- Mazek, S. A., and H. A. Almannaei. "Finite element model of Cairo metro tunnel-Line 3 performance." *Ain Shams Engineering Journal* 4.4 (2013): 709-716.
- McDowell, P. W., Barker, R. D., Butcher, A. P., Culshaw, M. G., Jackson, P. D., McCann, D. M., ... & Arthur, J. C. R. (2002). *Geophysics in engineering investigations* (Vol. 19). London: Ciria.
- Mousivand, M., Maleki, M., Nekooei, M., & Mansoori, M. R. (2017). Application of Convergence–Confinement Method in Analysis of Shallow Non-circular Tunnels. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(3), 1185-1198.
- Mödlhammer, Heiko-Marc. *Numerical methods for tunneling using ABAQUS and investigations of long-time-effects of the shotcrete shell and its impact on the combined support system*. na, 2011.
- Möller, Sven Christian. *Tunnel induced settlements and structural forces in linings*. Stuttgart, Germany: Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik, 2006.
- Nasuf, E. (1993). Arazi Kontrolunda Sayısal Modelleme. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 32(4), 5-14.
- Nickmann, Marion; Spaun, Georg; Thuro, Kurosch. Engineering geological classification of weak rocks. In: *Proceedings of the 10th International IAEG Congress*. 2006. p. 1-9.
- Niedbalski, Zbigniew, Piotr Małkowski, and Tadeusz Majcherczyk. "Application of the NATM method in the road tunneling works in difficult geological conditions–The Carpathian flysch." *Tunnelling and Underground Space Technology* 74 (2018): 41-59.
- Oke, J., and N. Vlachopoulos, 2014. "Procedure and Considerations when Creating a Geomechanical Three Dimensional Numerical Analysis for Construction of Tunnel Infrastructure."
- Pariseau, William G. *Design analysis in rock mechanics*. CRC Press, 2017.

- Paternesı, Alessandra, Helmut F. Schweiger, and Giuseppe Scarpelli. "Parameter calibration and numerical analysis of twin shallow tunnels." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 50.5 (2017): 1243-1262.
- Pellet, Frederic, Mohsen Roosefid, and Frédéric Deleruyelle. "On the 3D numerical modelling of the time-dependent development of the damage zone around underground galleries during and after excavation." *Tunnelling and Underground Space Technology* 24.6 (2009): 665-674.
- Peng, Suping, and Jincai Zhang. *Engineering geology for underground rocks*. Springer Science & Business Media, 2007.
- RS2 user manuel, 1989-2020. 2D finite element program for stress analysis and support design around excavations in soil and rock, Stress Analysis Verification Manual, Part I.
- Sabatini, P. J., Bachus, R. C., Mayne, P. W., Schneider, J. A., & Zettler, T. E. (2002).
- Satıcı, Özgür, and Bahtiyar Ünver. "Assessment of tunnel portal stability at jointed rock mass: a comparative case study." *Computers and Geotechnics* 64 (2015): 72-82.
- Satıcı, Özgür. *Assessment of plastic zone thickness and convergences for tunnels excavated in weak to fair quality rocks in Turkey*. Diss. Middle East Technical University, 2018.
- Singh, Bhawani, and Rajendra Kumar Goel. *Engineering rock mass classification: tunneling, foundations, and landslides*. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann,, 2011.
- Singh, Tatla Dar, and Bhawani Singh. *Elsevier Geo-Engineering Book 5: Tunnelling In Weak Rocks*. Vol. 5. Elsevier, 2006.
- Sinha, Raghupati S., ed. *Underground structures: design and instrumentation*. Elsevier, 1989.
- Sorensen, K. K., & Okkels, N. (2013, September). Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris* (Vol. 1, pp. 423-428).
- Stroud, M. A. (1974). The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks. In *Proceedings of the 1st European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, Sweden* (Vol. 2, No. 2, pp. 367-375).
- Swoboda, Gunter, Miroslav Marenc, and Ingo Mader. "Finite element modelling of tunnel excavation." *International Journal of Engineering Modelling* 6 (1994): 51-63.
- Şaroğlu, F., & Yılmaz, Y. (1986). Doğu Anadolu'da neotektonik dönemdeki jeolojik evrim ve havza modelleri. *MTA dergisi*, 107, 73-94.
- Şeker, Ö. (2008). *Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi Prensiplerine Göre Tünel Kaplama Tasarımı* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Tarhan, F. "Mühendislik Jeolojisi Prensipleri." *KT Ü Yayınları, Trabzon* (2002).
- Terzaghi, Karl, Ralph B. Peck, and Gholamreza Mesri. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, 1996.
- Terzaghi, Karl. *Rock defects and loads on tunnel supports*. No. BOOK. Harvard Univ., 1946.
- TS 500, Enstitüsü, Türk Standartları. "TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları." *Ankara, Türkiye* (2000).
- TSE, Çelik Yapıların Hesap, and Yapım Kuralları. "TS-648." *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara* (1982).

- Tünel araştırma Raporu, Kağızman-(Digor-Tuzluca) Ayr. Devlet Yolu Km: 23+010 – 23+950 Arası Tünel Etüdü Proje Ve Araştırma Mühendislik Hizmetleri İşi Kesin Proje Jeolojik- Jeoteknik Etüt Raporu, 2016
- Türk Standardı, T. S. "708, 2010." *Türk Standartları Enstitüsü*.
- Türkoğlu, M. (2013). *Two-dimensional numerical analysis of tunnel collapse driven in poor ground conditions* (Doctoral dissertation, Middle East Technical University, Turkey).
- Ulusay, Reşat, and Harun Sönmez. "Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri." (2007).
- Üçer, S. "Comparison of 2D and 3D finite element models of tunnel advance in soft ground: A case study on Bolu tunnels." *Unpublished M. Sc. thesis, Middle East Technical University, Turkey* (2006).
- Vitali, Osvaldo PM, Tarcisio B. Celestino, and Antonio Bobet. "3D finite element modelling optimization for deep tunnels with material nonlinearity." *Underground Space* 3.2 (2018): 125-139.
- Waltham, Tony. *Foundations of engineering geology*. CRC Press, 2009.
- Wang, G., Guo, K., Christianson, M., & Konietzky, H. (2011). Deformation characteristics of rock salt with mudstone interbeds surrounding gas and oil storage cavern. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(6), 871-877.
- Wang, T. T., & Huang, T. H. (2002). An experience of tunnelling in mudstone area in southwestern Taiwan. *Tunnelling and underground space technology*, 17(4), 425-436.
- Wang, T. T., Ma, H. L., Shi, X. L., Yang, C. H., Zhang, N., Li, J. L., ... & Daemen, J. J. K. (2018). Salt cavern gas storage in an ultra-deep formation in Hubei, China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 102, 57-70.
- Wohlfahrt, Markus Wohlfahrt, 2010. Numerische Studie zu Vorentlastungsfaktoren bei oberflächennahen Tunneln, eingereicht am, Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz im Mai 2010.
- Wyllie, Duncan C., and Chris Mah. *Rock slope engineering*. CRC Press, 2004.
- Yatm, Natm Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Yıldırım, Ü. E. (2009). *Şişen Killer ve Tünel Tasarımına Etkisi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yılmaz, O., 2007. Kağızman (Kars) – Tuzluca (Iğdır) Tuz Yataklarının Jeolojisi, Mineralojisi Ve Petrografisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yoshida, N., Nishi, M., Kitamura, M., & Adachi, T. (1997). Analysis of mudstone deterioration and its effect on tunnel performance. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), 353-e1.
- Zhang, Q. Y., Duan, K., Jiao, Y. Y., & Xiang, W. (2017). Physical model test and numerical simulation for the stability analysis of deep gas storage cavern group located in bedded rock salt formation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 94, 43-54.
- Zhou, Hui, et al. "Analysis of mechanical behavior of soft rocks and stability control in deep tunnels." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6.3 (2014): 219-226.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı: Neşe IŞIK	
Doğum tarihi: 01.08.1984	
Doğum Yeri: Erzurum	
Uyruğu: T.C.	
Adres: Karayolları 18. Bölge Müdürlüğü araştırma ve Geliştirme Başmühendisliği	
Tel: 0 545 450 1984	
E-mail: nese.isik15@ogr.atauni.edu.tr	
Eğitim	
Lise: Erzurum Mehmet Akif Ersoy Lisesi	
Lisans: T.C. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği	
Yüksek lisans: T.C. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği/Geoteknik	
Doktora: T.C. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği/Geoteknik	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Almanca:	Temel
Rusça:	Temel
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
-	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
-	