



**YER ALTI TÜNELLERİNİN DEPREM YÜKLERİ
ALTINDA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
ANALİZİ**

Mohammed Kusay Ebrahim AL-DULAYME

Danışman: Prof. Dr. Ahmet BUDAK

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2024**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YER ALTI TÜNELLERİNİN DEPREM YÜKLERİ ALTINDA SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

(The Analysis of Underground Tunnels Subjected To Earthquake Loads Using the Finite
Element Method)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mohammed Kusay Ebrahim AL-DULAYME

Danışman: Prof. Dr. Ahmet BUDAK

Erzurum
Eylül, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Mohammed Kusay Ebrahim AL-DULAYME tarafından hazırlanan “Yer Altı Tünellerinin Deprem Yükleri Altında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi” başlıklı çalışması 06 / 09 / 2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Danışman: Prof. Dr. Ahmet BUDAK
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU
Erzurum Teknik Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

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

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

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

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Ahmet BUDAK danışmanlığında sunulan “Yer Altı Tünellerinin Deprem Yükleri Altında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi” 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	16	30
Materyal ve Yöntem	10	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuç ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	8	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
Mohammed Kusey Ebrahim AL-DULAYME	Prof. Dr. Ahmet BUDAK
19.9.2024	19.9.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, bu güzel ülkeye gelme ve yüksek lisans programımı tamamlama şansı veren Türk Hükümetine sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışma konusunun belirlenmesinde ve çalışmanın hazırlanma sürecinin her aşamasında bilgisini, tecrübesini ve değerli zamanını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet BUDAK’a teşekkürü bir borç bilirim. Çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mohammed Kusay Ebrahim AL-DULAYME

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YER ALTI TÜNELLERİNİN DEPREM YÜKLERİ ALTINDA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Mohammed Kusay Ebrahim AL-DULAYME

Danışman: Prof. Dr. Ahmet BUDAK

Amaç: Bu tez çalışmasında tünellerin deprem davranışı incelenerek yapısal bütünlüklerinin değerlendirilmesi, geliştirilmiş tasarımları ve güvenlikleri için öneriler sunulması amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışmada temsili bir tünel yapısında deprem koşullarının simüle edilebilmesi için geliştirilmiş sayısal modelleme teknikleri ve sonlu eleman analizi kullanılmıştır. Frekans, genlik gibi çeşitli deprem girdisi parametrelerinin tünelin sismik tepkisi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için çalışma yapılmıştır. Deprem yüklemelerinin tünellere etkisini incelemek amacıyla geniş kapsamlı simülasyonlar ve analizler gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte tünel içindeki gerilme ve deformasyon dağılımlarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu veri kullanılarak incelenen tünel yapısının deprem performansı değerlendirilmiştir.

Bulgular: Analiz, sismik yükün öncelikle tünelin tepesinde maksimum yer değiştirmeye neden olacağını göstermektedir. Ek olarak, tünelin kenarlarının sismik kuvvetlerin etkisi altında en yüksek stres seviyelerini deneyimleyeceği beklenmektedir ve bu da potansiyel riskleri azaltmak için sağlam destek yapıları tasarlanmanın önemini vurgulamaktadır.

Sonuç: Analizler deprem yükünün öncelikle tünelin üst kısmında maksimum yer değiştirmeye neden olacağını göstermiştir. Çalışma sonuçları deprem kuvvetlerinin etkisi altında tünelin yan taraflarının en yüksek düzeyde gerilmeye maruz kaldığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar potansiyel riskleri azaltmak için sağlam destek yapıları tasarlanmanın önemini vurgular niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Tünel, Tünel-zemin etkileşimi, Deprem davranışı, Yapısal bütünlük, Sayısal modelleme, Sonlu eleman analizi.

2024, 96 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

THE ANALYSIS OF UNDERGROUND TUNNELS SUBJECTED TO EARTHQUAKE LOADS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Mohammed Kusay Ebrahim AL-DULAYME

Supervisor: Prof. Dr Ahmet BUDAK

Purpose: In this thesis, it is aimed to evaluate the structural integrity of the tunnels by examining the earthquake behavior and to present suggestions for their improved designs and safety.

Method: In this study, numerical modeling techniques and finite element analysis developed to simulate earthquake conditions in a representative tunnel structure were used. A study was conducted to evaluate the effects of various earthquake input parameters such as frequency and amplitude on the seismic response of the tunnel. Extensive simulations and analyses were performed to examine the effects of earthquake loading on the tunnels. In this process, the stress and deformation distributions within the tunnel were evaluated. The earthquake performance of the tunnel structure was evaluated using this data.

Findings: The analysis showed that the earthquake load would primarily cause maximum displacement in the upper part of the tunnel. The study results revealed that the sides of the tunnel were subjected to the highest level of stress under the influence of earthquake forces. These results emphasize the importance of designing solid support structures to reduce potential risks.

Results: The analysis showed that the earthquake load would primarily cause maximum displacement in the upper part of the tunnel. The study results revealed that the sides of the tunnel were subjected to the highest level of stress under the influence of earthquake forces. These results emphasize the importance of designing solid support structures to reduce potential risks.

Keywords: Tunnel, Tunnel-soil interaction, Seismic behavior, Structural integrity, Numerical modeling, Finite element analysis.

2024, 96 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	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xiii
GİRİŞ.....	1
Genel Bilgi	1
Tünel İnşaatı ve Tasarım Analizi	2
Tünel Açma Yöntemleri.....	4
Tünel İnşasını Etkileyen Önemli Faktörler	6
Araştırmanın Amacı	6
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	6
İlgili Literatür	7
KURAMSAL TEMELLER.....	13
Tünel Tasarım Yaklaşımı ve Yöntemleri.....	13
Homojen Zeminlerde Tünel Analizi	14
Heterojen Zeminlerde Tünel Analizi	15
Tünel Tasarımında Ampirik Yöntemler	16
Tünellerde Sayısal Modelleme Yöntemleri	18
Kapalı-Form Analitik Yöntemler	20
İki Boyutlu ve Üç Boyutlu Modelleme Karşılaştırması.....	20
Sonlu Elemanlar Ağ Oluşturma	21
Sınır koşulları	22
MATERYAL VE METOT	24
Sonlu Elemanlar Yöntemi	24
Tanjant Rijitlik Matrisi.....	26
Kararlılık Kriteri.....	26

Doğrusal Olmayan Analiz.....	28
Zemin Modelleme Yöntemleri.....	29
Mohr-Coulomb Yöntemi.....	29
Drucker-Prager Yöntemi.....	31
Su Modelleme Yöntemleri	33
Euler Yöntemi	34
Lagrange Yöntemi.....	34
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde Zaman Adımının Önemi	35
Birleşik Euler-Lagrange Yöntemi	35
Deprem Yüğü Etkisinde Kanyon Altında Bulunan Tünelin Dinamik Analizi	37
Kanyon Altında Tünel Model Tanıtımı	37
ARAŞTIRMA BULGULARI	45
Deprem Yüğüleri Altında Tünel Modelinin Doğrulanması.....	45
İstinat Duvar Analizi Doğrulanması	49
Deprem Yüğüleri Altında Baraj Modelinin Doğrulanması.....	53
Kanyon Altında Tünel Modelinin Malzeme Özellikleri	59
Kanyon Altında Tünelin Modelinin Analiz Sonuçları	60
Kanyon Altında Tünel Modeli Üzerinde Yapılan Analizler	62
Kanyon Altında Tünel Modelinin Elastik Analizi	64
Kanyon Altında Tünelin Plastik Analizi.....	69
Farklı Tünel Kalınlıkları İçin Yapılan Analizler.....	75
Boş, Su Dolu ve Zemin Dolu Kanyonların Analizi	81
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	88
Öneriler	90
KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	96

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Homojen zeminler için tasarım yöntemleri	14
Tablo 2. Heterojen zeminler için tasarım yöntemleri	15
Tablo 3. Kaya kütlesi sınıflandırma sistemlerini uygulama genel prosedürleri	17
Tablo 4. RMR ve Q-sistemlerinin sınırlamaları	18
Tablo 5. Mohr-Coulomb malzeme modeli için zemin tanımlama parametreleri	30
Tablo 6. 6.7 Büyüklüğündeki Northridge depremi parametreleri	39
Tablo 7. Kanyon Altında Tünel Modelinin Modal Analiz Sonuçları	41
Tablo 8. (Khan et al., 2022) çalışmasında sunulan tünel modelinin analizinde kullanılan malzeme özellikleri	46
Tablo 9. İstinat duvarı modelinin analizinde kullanılan malzeme özellikleri	50
Tablo 10. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında sunulan baraj modelinin analizinde kullanılan malzeme özellikleri	55
Tablo 11. Kanyon altında tünel modelinin analizinde kullanılan malzeme özellikleri	59
Tablo 12. Sönümlleme parametreleri	59
Tablo 13. Drucker-Prager Zemin Özellikleri	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kaya tüneli için tasarım yaklaşımı (ITA,1998)	3
Şekil 2. Tünel açma makinesi (TAM)	4
Şekil 3. Tünel tasarım aşamaları ve yaklaşımları (Society, 2004)	5
Şekil 4. Sayısal model için ağ boyutları (R = tünel yarıçapı, Z_0 = yüzeyden tünel eksenine derinlik)	22
Şekil 5. Mohr-Coulomb modeli elastik ve plastik varsayımı	29
Şekil 6. Mohr-Coulomb modeline ait üç boyutlu gerilmeler	30
Şekil 7. Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb karşılaştırması	32
Şekil 8. Euler ve Lagrange (Shadloo et al., 2016)	33
Şekil 9. Euler ve Lagrange analizinde deformasyon (Qiu et al., 2011)	34
Şekil 10. Kanyon altındaki tünel modeline ait kesitin dış boyutları	38
Şekil 11. Kanyon altındaki tünel modeline ait kesitin iç boyutları	38
Şekil 12. Uygulanan yer hareketi ivme - zaman grafiği	39
Şekil 13. 1.28 Hz doğal frekanslı mod şekli	40
Şekil 14. 1.97 Hz doğal frekanslı mod şekli	40
Şekil 15. 2.20 Hz doğal frekanslı mod şekli	40
Şekil 16. 2.42 Hz doğal frekanslı mod şekli	40
Şekil 17. Kanyon altında tünel modelinin bileşenleri	42
Şekil 18. CIN3D8 sonsuz eleman	42
Şekil 19. C3D8R, EC3D8R eleman	42
Şekil 20. Kanyon altındaki tünel modelinde yer değiştirme hesap için kullanılan noktalar	43
Şekil 21. Kanyon altındaki tünel modelinde gerilme hesap için kullanılan elemanlar	44
Şekil 22. (Khan et al., 2022) çalışmasında yer alan tünel modelinin boyutları	45
Şekil 23. CINPE4 sonsuz eleman	45
Şekil 24. CPE4R eleman	46
Şekil 25. (Khan et al., 2022) çalışmasında yer alan tünel modelinin Sonlu eleman ağı (yeşil alan sonsuz elemanlar)	46
Şekil 26. Khan et al. (2022) çalışmasında yer alan tünel modeline ilişkin noktaların seçiminde kullanılan yöntem	47
Şekil 27. Khan et al. (2022) çalışmasında yer alan tünel modeline uygulanan sismik yük	47
Şekil 28. Khan et al. (2022) çalışmasında yer alan tünel modelinin sınır koşulları	48

Şekil 29. Sayısal ve Literatür Verilerinin Karşılaştırılması: Yer Değiştirme ve Açık İlişkisi	48
Şekil 30. Beton istinat duvarı- desteklenen 3 m yüksekliğinde kum dolgusu	49
Şekil 31. İstinat duvarı modeline uygulanan yükler ve sınır koşulları	50
Şekil 32. İstinat duvarı modelinde kullanılan sonlu eleman ağı	51
Şekil 33. İstinat duvarı modeli üzerinde hesaplanan serbest durumdaki yanal zemin basıncı değerlerinin karşılaştırılması	51
Şekil 34. İstinat duvarı modeli üzerinde hesaplanan aktif yanal zemin basıncı değerlerinin karşılaştırılması	52
Şekil 35. İstinat duvarı modeli üzerinde hesaplanan pasif yanal zemin basıncı değerlerinin karşılaştırılması	53
Şekil 36. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında yer alan baraj gövdesi modelinin boyutları	54
Şekil 37. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında yer alan baraj problemine ilişkin sonlu eleman modeli detayları	54
Şekil 38. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında sunulan baraj modelinin bileşenleri	55
Şekil 39. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında sunulan baraj modeline ait sonlu eleman ağı	56
Şekil 40. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında sunulan baraj modelinin yükleri ve sınır koşulları	57
Şekil 41. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında sunulan baraj modelinin analizi sonucunda hesaplanan şekil değiştirmeler ve suyun sıçrama etkisi	58
Şekil 42. Baraj modeli doğrulama amacıyla yapılan analiz sonucunda Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında elde edilen yer değiştirme ile zaman ilişkisi ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar	58
Şekil 43. Kahramanmaraş depremi sonrası tünellerde oluşan zararlar	60
Şekil 44. Kanyon altındaki tünel modelinin analizi (Von Mises gerilmesi üzerine 3 boyutlu inceleme)	61
Şekil 45. Kanyon altındaki tünel modelinin analizi (Von Mises gerilmesine 2 boyutlu inceleme)	61
Şekil 46. Sismik yük altında tünelde meydana gelen oval deformasyonun (Siyah: Orijinal şekil; Beyaz: Deforme olmuş şekil)	62
Şekil 47. Kanyon altındaki tünel modelinin analizi (tünel yapısındaki Von Mises gerilmesi)	62
Şekil 48. Siltli kil zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi	64
Şekil 49. Siltli kil zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi	64
Şekil 50. Siltli kum zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi	65

Şekil 51. Siltli kum zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi	65
Şekil 52. Siltli taş zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi	66
Şekil 53. Siltli taş zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi	66
Şekil 54. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde A noktasındaki yer değiştirme	67
Şekil 55. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde A elemanındaki gerilme	67
Şekil 56. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde B noktasındaki yer değiştirme	68
Şekil 57. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde B elemanındaki gerilme	68
Şekil 58. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde C noktasındaki yer değiştirme	68
Şekil 59. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde C elemanındaki gerilme	69
Şekil 60. Siltli kil zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi	70
Şekil 61. Siltli kil zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi	70
Şekil 62. Siltli kum zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi	71
Şekil 63. Siltli kum zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi	71
Şekil 64. Siltli taş zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi	72
Şekil 65. Siltli taş zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi	72
Şekil 66. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde A noktasındaki plastik yer değiştirme	73
Şekil 67. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde A elemanındaki plastik gerilme	73
Şekil 68. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde B noktasındaki plastik yer değiştirme	74
Şekil 69. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde B elemanındaki plastik gerilme	74
Şekil 70. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde C noktasındaki plastik yer değiştirme	74
Şekil 71. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde C elemanındaki plastik gerilme	75
Şekil 72. 400, 800 ve 1200 mm kalınlı tünel kesitlerinin model görünüşleri	75
Şekil 73. 400 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki gerilme - zaman ilişkisi	76
Şekil 74. 400 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki şekil değiştirme - zaman ilişkisi	76
Şekil 75. 800 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki gerilme - zaman ilişkisi	77
Şekil 76. 800 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki şekil değiştirme - zaman ilişkisi	77
Şekil 77. 1200 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki gerilme - zaman ilişkisi	78
Şekil 78. 1200 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki şekil değiştirme - zaman ilişkisi	78
Şekil 79. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için B elemandaki gerilme - zaman ilişkisi	79
Şekil 80. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için B elemandaki şekil değiştirme - zaman ilişkisi	79
Şekil 81. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için C elemandaki gerilme - zaman ilişkisi	80
Şekil 82. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için C elemandaki şekil değiştirme - zaman ilişkisi	80

Şekil 83. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için A elemandaki gerilme - zaman ilişkisi	80
Şekil 84. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için A elemandaki şekil değiştirme - zaman ilişkisi	81
Şekil 85. Boş, su dolu ve deminle dolu kanyon modelleri	81
Şekil 86. Kanyonun su ile doldurulması durumunda (A, B ve C) noktalarının yer değiştirmesi ile zaman arasındaki ilişki	82
Şekil 87. Kanyonun su ile doldurulması durumunda (A, B ve C) elemanlarında hesaplanan Von-Mises gerilmesi ile zaman arasındaki ilişki	82
Şekil 88. Boş kanyonun (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi	83
Şekil 89. Boş kanyonun (A, B ve C) elemanlarının Von Mises gerilme - zaman ilişkisi	83
Şekil 90. Zeminle doldurulmuş kanyonun (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi	84
Şekil 91. Zeminle doldurulmuş kanyonun (A, B ve C) elemanlarının Von Mises gerilme - zaman ilişkisi	84
Şekil 92. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında A noktasında hesaplanan yer plastik değiştirme değerleri	85
Şekil 93. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında A elemanında hesaplanan plastik gerilme değerleri	85
Şekil 94. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında B noktasında hesaplanan plastik yer değiştirme değerleri	86
Şekil 95. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında B elemanında hesaplanan plastik gerilme değerleri	86
Şekil 96. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında C noktasında hesaplanan plastik yer değiştirme değerleri	86
Şekil 97. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında C elemanında hesaplanan plastik gerilme değerleri	87

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

2D	: İki boyutlu analiz
3D	: Üç boyutlu analiz
Mü(t)	: Sismik harekete bağlı ivme vektörü
C	: Sönüm matrisi
K	: Rijitlik matrisi
u(t)	: Yer değiştirme vektörü
P(t)	: Dış kuvvet vektörü
CCM	: Yakınsama-Sıkıştırma yöntemi
TAM	: Tünel açma makinesi
FE	: Sonlu elemanlar yöntemi
FD	: Sonlu farklar yöntemi
Δt	: Zaman arttırma
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
ρ	: Malzemenin yoğunluğu
L_{min}	: Ağdaki en küçük eleman boyutu
c_d	: Dalga hızı
τ	: Kayma gerilme
σ	: Normal gerilme
C	: Kohezyon
φ	: İçsel sürtünme açısı
M	: Kütle matrisi
ü	: İvme vektörü
P	: Dış kuvvet vektörü
I	: İç kuvvet vektörü
w₁	: Birinci dairesel frekans
w₂	: İkinci dairesel frekans
f₁	: Sistemin birinci doğal frekans
f₂	: Sistemin ikinci doğal frekans
α	: Kütle oransal sönümleme için Rayleigh sönümleme katsayısı

β	: Direnç oransal sönümleme için Rayleigh sönümleme katsayısı
ζ	: Sönüm oranı
σ_v	: Von Mises gerilmesi
σ_x	: x yönündeki normal gerilme
σ_y	: y yönündeki normal gerilme
σ_z	: z yönündeki normal gerilme
τ_{xy}	: xy yüzey kayma gerilmesi
τ_{yz}	: yz yüzey kayma gerilmesi
τ_{zx}	: zx yüzey kayma gerilmesi



GİRİŞ

Bu çalışma deprem yükleri altında temsili bir tünel davranışını konu edinmektedir. Çalışmada öncelikle tünel inşaatı ve deprem mühendisliği ile ilgili mevcut literatürü incelemektedir. Daha sonra; temsili tünel projesinin planlama ve temel hazırlık aşamalarını detaylı bir şekilde ele almaktadır.

Araştırmanın ana odağı, deprem yükleri altında tünel davranışının incelenmesidir. Farklı dinamik kuvvetlere karşı direnç sağlamak için çeşitli mühendislik yaklaşımları ve bu koşullar altında tünel yapısal bütünlüğünü değerlendirmek için kullanılan yöntemler araştırılmıştır.

Sonuçlar, çeşitli araştırma makalelerinden ve çalışmalardan elde edilen verilerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve tutarlılıkları irdelenmiştir.

Analitik bulgulara ek olarak, çalışma gelecekteki tünel mühendisliği araştırmaları için önerilerde bulunmaktadır. Bu çalışma, tünel inşaat uygulamalarının geliştirilmesine ve deprem gibi zorluklara dayanıklı sağlam altyapıların geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Genel Bilgi

Tüneller, insanlığın tarihi boyunca en önemli yapılardan biri olmuştur ve birçok açıdan fayda sağlamıştır. İlk tüneller uzun zaman önce kayalara oyularak inşa edilmiş ve zamanla farklı amaçlar için kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde tüneller, taşımacılık, madencilik, askerî, depolama ve koruma gibi çeşitli alanlarda önemli rol oynamaktadır. Tünel yapısının tünel boşluğu ve bu boşluğa uygulanan taşıyıcı kaplama yapısından oluştuğunu ifade etmek mümkündür. Yapı mühendisliği alanı konusu olan tünel kaplamasının iki temel amacı vardır:

1. Zemini tutmak ve yeraltı sularının girmesini engellemek: Tünel kaplaması, tünelin etrafındaki toprağın çökmesini ve yeraltı sularının tünele girmesini önler. Bu sayede tünelin yapısal bütünlüğü ve güvenliği korunur.
2. Farklı amaçlar için güvenli alan sağlamak: Tüneller, taşımacılık, depolama veya koruma gibi çeşitli amaçlar için güvenli ve kontrollü bir ortam sunar. Bu sayede insanlar ve

mallar, hava koşullarından ve diğer dış etkenlerden korunarak taşınabilir veya depolanabilir (Rawlings et al., 1998).

Herhangi bir inşaat projesinde olduğu gibi, tünel inşaatında da bazı riskler söz konusudur. Risklerin önceden kestirilmesi ve bunlara karşın önlemler alınması yapısal güvenliğin en temel unsurudur. Bu riskler iki ana kategoriye ayrılabilir:

1. Çevresel riskler: Bu riskler, insan faaliyetleri (kirlilik) veya doğal afetler (deprem, sel) gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Bu tür riskler, çevreye zarar verebilir veya tünel yapısına zarar verebilir.
2. Jeolojik riskler: Bu riskler, tünelin inşa edildiği zemin veya kayalardaki dengesizlik veya sorunlardan kaynaklanabilir. Su sızıntıları da jeolojik bir risk olarak değerlendirilebilir (Reilly, 2000).

Tasarımcılar ve inşaatçılar tünel projelerinin güvenliğini sağlamak için çeşitli risk yönetimi stratejileri uygulayabilirler. Bu stratejilerden bazıları şunlardır:

1. Riskten kaçınma: Mümkün olduğunca, potansiyel risklerin önceden tespit edilmesi ve bu risklerden kaçınılması önemlidir. Tehlikeli durumların belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması gerekir.
2. Bilgilendirme: İşçilere ve projede yer alan diğer kişilere kullanılan malzemeler, potansiyel tehlikeler ve alınması gereken güvenlik önlemleri hakkında bilgi verilmelidir. Bu sayede herkes bilinçli bir şekilde hareket edebilir.
3. İzleme ve kayıt tutma: İnşaat sürecinin her aşaması dikkatlice izlenmeli ve herhangi bir olay veya kaza kayıt altına alınmalıdır. Bu bilgiler, gelecekteki projelerde riskleri daha iyi anlamak ve gerekli önlemleri almak için kullanılabilir (Health and Commission, 1995).

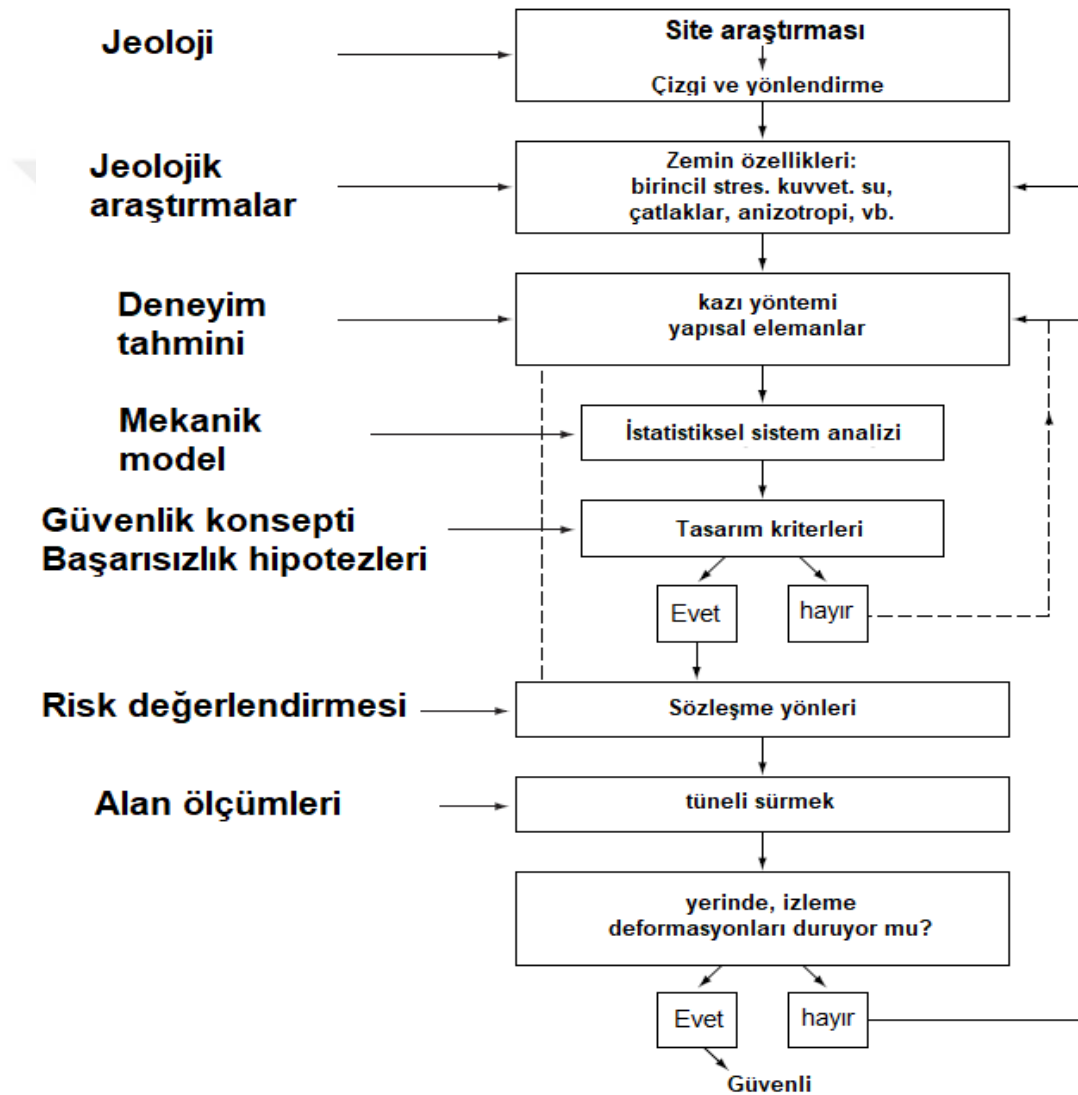
Tünel İnşaatı ve Tasarım Analizi

Tünellerin güvenli bir şekilde inşa edilebilmesi için kapsamlı analizlerin büyük önemi vardır. Bu analizler, jeolojik araştırmalar, deneyim tahmini, mekanik modelleme ve güvenlik konsepti başarısızlık hipotezleri gibi çeşitli faktörleri içerir. Böylece tasarımcılar, tünel inşası sırasında zeminin davranışını anlayabilir ve olası riskleri önceden belirleyebilirler. Risk değerlendirmesi ve alan ölçümleri de tasarım sürecinin kritik aşamalarını oluşturur.

Tasarım analizleri, tünel kaplamasının davranışını tahmin etmeye yönelik çabalar içerir. Ancak bu analizler kesin çözümler sunmaz. Zemin kaynaklı yüklerin çoğundan dolayı, benzer

tünellerde elde edilen veriler ve bilgiler tasarımcılara yol gösterici olabilir. Her ne kadar tüm tüneller için tek bir analiz yöntemi olmasa da, tasarımcıların zemin ve destek arasındaki etkileşimi anlamak için çeşitli yöntemlere başvurmaları gerekmektedir (Barrett and McCreath, 1995).

Şekil 1'de kaya tünelleri için tasarım yaklaşımını ve takip edilen yöntemin önemli adımlarını açıkça göstermektedir. Jeolojik araştırmalar, deneyim tahmini ve güvenlik konsepti başarısızlık hipotezleri gibi unsurların bir araya getirilerek kullanılması, güçlü ve güvenli bir tünel tasarımının temelini oluşturabilir (Addenbrooke and Potts, 1996).



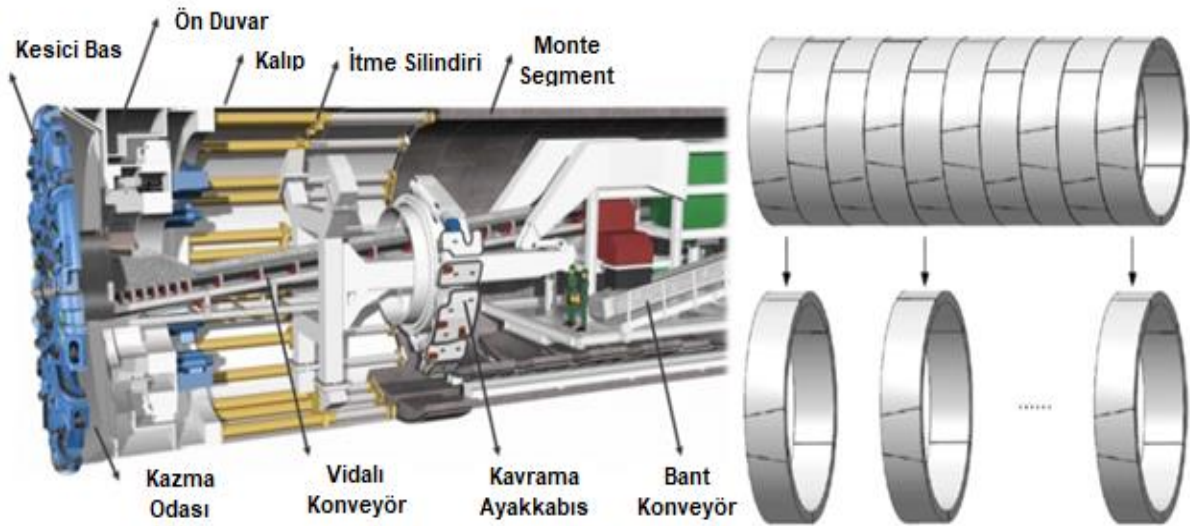
Şekil 1. Kaya tüneli için tasarım yaklaşımı (ITA,1998)

Tünel Açma Yöntemleri

Tünellerin inşasında el kazısı, kontrollü patlatmalar ya da tünel açma makineleri kullanılır. Kontrollü patlatmaların yerleşim yeri dışında, tünel açma makinelerinin ise daha ziyade yerleşim alanlarında yapılan tünel açma çalışmalarında tercih edildiği ifade edilebilir.

Tünel açma makineleri (TAM) ile tünel kazma, en mekanize inşaat süreçlerinden biridir. Mekanizasyon, geçici kazı desteğinin ve nihai kaplamanın kurulumu için de geçerlidir. TAM'lar, yumuşak zeminler, kaya veya karışık zemin gibi çeşitli jeolojik koşullarda tüneller inşa etmek için tasarlanmıştır Şekil 2'da. Bu makineler, kazı işlemini gerçekleştirerek ve aynı zamanda tünel döşemesini yerleştirerek dairesel bir tünel profili oluşturur (Barton, 1978). Tünel döşemesi, TAM'da birleştirilen prefabrike beton segmentlerden oluşan halka şeklinde bir yapıdır ve tünelin stabilizesini sağlayarak zemin çökmesini önler.

TAM'ın ilerlemesi için yüksek bir güç gereklidir. Bu güç, zemin tipi, makinenin çapı ve ilerleme hızı gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Tünel döşemesinin tasarımı, pistonların konumlarını ve uyguladıkları yükleri dikkate alarak yapılmalıdır. Böylece segmentlere herhangi bir zarar verilmez (Broch, 1984). Segmentlerin TAM'da yerleştirilmesi, pistonlardan gelen kuvvetin eşitsiz bir şekilde dağılımına neden olabilir. Bu durum, tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2. Tünel açma makinesi (TAM)

El kazısı yöntemi, işçilerin kürek gibi el aletlerini kullanarak toprağı veya kayayı manuel olarak kazdığı bir tünel açma yöntemidir. Delme-patlatma kazısı yöntemi, kaya yüzeyine delikler açıldıktan sonra patlayıcılar yerleştirilerek patlatılır ve kaya parçalara ayrılır, ardından çıkarılır (Nicholson et al., 1999). Sıralı kazı yöntemi ise, kazı aşamalarının veya

Tünel İnşasını Etkileyen Önemli Faktörler

Zemin içine ya da üstüne yapısal sistem inşa edilen yerkabuğu parçası olarak tanımlanabilir. Tüneller zemin içerisine inşa edilen yapısal sistemler grubundadır. Zeminlerin doğadaki oluşumu ve dağılımı bölgeden bölgeye değişiklik göstermektedir. Zemin tipi, kayaç türüne, mineral bileşenlerine ve bölgenin iklim rejimine bağlıdır. Zeminlerin jeoteknik özellikleri, inşaat mühendisliği yapılarının stabilitesini etkiler. Dolayısıyla, zeminin durumu bazen iyi, bazen de kötü olabilir ve bu durum zeminin özelliklerinin büyük önem taşıdığını gösterir. Tasarım yapmadan önce, zeminin özelliklerini ve çeşitlerini dikkatlice analiz etmek gerekmektedir. Yapı inşası öncesinde gerekli testler yapılmalıdır, çünkü zeminin özellikleri yapının maliyetini büyük ölçüde etkileyebilir (Roy and Bhalla, 2017).

Yapının inşası sırasında yer altı suyu ile karşılaşılması mümkündür ve bu durum yapının derinliğine bağlı olarak değişir. Bu durum, yapının etkilenmesine yol açabilir. Bu nedenle, yer altı suyu basıncını değiştirebileceği için çalışırken yer altı suyu seviyesini dikkate almak önemlidir. Bu etki, yapı üzerinde de dinamik açık şekilde hissedilebilir (Preene and Brassington, 2003).

Yer altında yapılan tasarımlar, genellikle yer üstündeki yapılardan farklılık göstermektedir. Bu durum, yer altında taşıyacakları yüklerin farklı olmasından ve zeminin basınç dayanımı ile yer altı suyu basıncının sismik etkilerden farklı bir şekilde etkilenmesinden kaynaklanır. Bu nedenle, yer altına yönelik tasarımlar, zemin özelliklerinin ve bağlantı noktalarının her yönden dikkate alınması gereken çeşitli durumlarla karşı karşıya kalabilir. Tasarımlar bu bilgilere göre ayarlamalı ve planlamalıdır.

Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın ilk aşamasında yer altı tünellerinin tasarımında kullanılan farklı yaklaşımlar ve bu yaklaşımların hangi yöntemleri veya türleri içerdiği incelenmiştir. Sonrasında, yer altı tünellerinin iki katmanlı durumu (su ve zemin) için deprem yükleri altında sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılarak analizi yapılmıştır. Bu model üzerinde sınır koşulları ile malzeme özellikleri değiştirilerek analizler tekrarlanarak analize en uygun model belirlenmiştir. Nihai model üzerinde deprem yükleri etkisi altında yapısal analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanarak üzerinde su kütlesi bulunan temsili tünel sismik davranışın daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Deprem olgusu inşaat mühendisliğinin karşı karşıya olduğu büyük bir problemdir ve Türkiye sismik açıdan dünyanın en tehlikeli bölgelerinden birisi üzerindedir. 6 Şubat 2023

tarihinde art arda meydana gelen ve Kahramanmaraş depremleri olarak anılan iki büyük deprem esnasında hasar alan tüneller olduğu rapor edilmiştir. Gerek Türkiye’de gerekse dünyada son yıllarda artan ulaştırma yatırımları beraberinde çok sayıda tünel inşaatı projesini uygulamaya geçirmektedir. Tüneller yatırım maliyetleri oldukça yüksek projelerdir. Bu nedenle; tasarım süreçlerinde başta deprem olmak üzere her türlü yük etkisi altındaki davranışlarının anlaşılması ve muhtemel risklerin analizleri hayati önem taşımaktadır. Bu tez çalışması kapsamında üzerinde su kütlesi bulunan zeminlerde inşa edilecek tünellerin sismik davranışları araştırılmış ve sonuçları irdelenmiştir. Üretilen bilginin tünel projelendirme çalışmalarında önemli veri niteliğinde olacağı düşünülmektedir. Tüneller gibi yer altı yapıları üzerinde deprem etkilerinin anlaşılması; bu yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını artırmak için kritik bir gerekliliktir.

İlgili Literatür

Hashash et al. (2001) raporunda yer altı yapılarının tasarımına ilişkin mevcut bilgi durumunu açıklamaktadır. Çalışma, yeraltı yapılarının deprem etkilerini incelemek için farklı yöntemler ve zemin sarsıntısının ölçülmesi gibi konuları tartışmaktadır. Ayrıca, tünel ve yapılar arasındaki bağlantılar için özel tasarım düşünceleri ve pratik örnekler sunmaktadır. Bu çalışmalar, yeraltı yapıları için deprem tasarım ve uygulamalarını iyileştirmeye katkı sağlayabilir. Ayrıca, sunulan tasarım düşünceleri, yeraltı yapılarının depreme karşı daha dayanıklı olmasını sağlayacaktır.

Pakbaz and Yareevand (2005) çalışmasında temel olarak aşağıdaki genel sonuçlara varılmıştır, Depremın tünel-zemin etkileşimi üzerindeki etkisi, en yüksek ivme, depremin şiddeti ve süresi ve tünel ile zemin arasındaki bağıl rijitlik gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Statik tasarımda kaplamanın yapısal boyutlarının artırılması, deprem yüklemelerine karşı her zaman güvenilir bir yöntem olmayabilir. Çünkü bu kaplamanın rijitliğini artıracak ve dolayısıyla deprem yükünün etkisini artıracaktır. Deprem etkilerinin, tünel boyutları, zemin koşulları ve deprem parametreleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu belirtilmiştir. Dairesel tünellerin analizinde kapalı form çözümlerin etkili olduğu ve maksimum eğilme momentini hesaplamak için ilişkiler sunulmuştur. Çalışmanın bulguları, zemin-tünel etkileşiminin yeraltı yapılarının depreme karşı dayanıklılığını önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, yeraltı yapılarının depreme karşı tasarımında zemin-tünel etkileşiminin dikkate alınması önemlidir.

Legay et al. (2006) makalesinde akışkan-yapı etkileşimi problemlerine yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Temel fikirler, ara yüzün akışkan alan içerisinde hareket etmesine izin vermek ve ara yüzü bir seviye seti ile tanımlamaktır. Ara yüzün seviye seti açıklaması, akışkan-yapı etkileşim problemini formüle etmenin zarif bir yolunu sunar. Akışkan alanını modellemek için

bir Euler tanımı kullanılır ve katı için bir Lagrange tanımı kullanılır. Her alan (akışkan ve yapı) kendi ağıyla ayrıştırılır; bu iki ağ uyumsuz olabilir ve üst üste gelebilir. Gerilme ve hız süreklilikleri Lagrange çarpan yöntemi, ceza yöntemi veya artırılmış Lagrange yöntemi ile sağlanır. Sıvı ve katı denklemleri aynı anda çözülür. Açık bir zaman entegrasyon şeması kullanıldığından, $n + 1$ zaman adımına ait değişkenler, n zaman adımında belirlenen seviye kullanılarak değerlendirilir. Düzenli zaman entegrasyon şemasıyla uygulanan yöntem sağlamdır, ancak ek serbestlik derecelerinin güçlendirilmesi ve karmaşık yapılar için işaretli mesafe aralıklarının oluşturulması gibi bazı eksiklikler içermektedir. Yöntemin geçerliliği sıkıştırılabilir katmanlar ve elastik katılma ile devam etmekte olup, sıkıştırılamaz dolgulara ve elastik-plastik katı genleşmeye kadar genişletilebilir.

Sedarat et al. (2009) çalışması yeraltı yapılarının sismik kayma analizini gerçekleştirirken zemin-tünel ara yüzünün daha gerçekçi bir temsilinin önemini vurgulamaktadır. Çalışmada, dairesel ve dikdörtgen tünellerde ortaya çıkan deformasyonlar, bu gerilmelerin bir sonucu olarak gösterilmektedir. Analiz, kapalı form çözümlerinin sınırlılığına dikkat çekerek sayısal modellemenin gerekliliğini vurgulamaktadır. Doğru bir şekilde tanımlanmış zemin-tünel ara yüzü, tünellerin deprem tepkisini simüle etmek için uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, farklı tünel şekilleri ve zemin profilleri için sayısal yaklaşımların kullanılabileceğine dikkat çekilmektedir. Gelecekteki çalışmalarda zeminin doğrusal olmayan davranışının ve kayma ile normal gerilmelerin dikkate alınmasının önemi vurgulanmaktadır.

Azadiab (2011) çalışmasında yumuşak doygun zeminin tünel kaplama kuvvetleri ve eğilme momenti üzerindeki sismik etkileri FLAC yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla 6 (m) çapında ve merkezi yer yüzeyinden 10 (m) aşağıda bulunan tünel düşünüldü. Çalışma, deprem sırasında tünelin 42,7 cm yukarı doğru hareket edebileceğini ve üzerindeki zemin yüzeyinin 24,5 cm yükseldiğini göstermiştir. Ayrıca, tünel kaplamasındaki eğilme kuvvetlerinin yaklaşık %33 arttığını ve sonra azaldığını, tünelin sonundaki eksenel ve kayma kuvvetlerinin sırasıyla %15,5 ve %57,9 arttığını ortaya koymuştur.

Kontoe et al. (2011) makalesinde, 1999 Düzce depreminde ağır hasar gören Bolu tünellerinin bir bölümü, Rayleigh sönümlü ve Rayleigh sönümsüz, basit bir elasto-plastik yapısal model olan, değişen karmaşıklığa sahip dört kurucu modelleme yaklaşımı kullanılarak sonlu eleman koduyla analiz edilmiştir, aynı model, ön verim doğrusal olmayan elastik histerezis simüle edebilen döngüsel doğrusal olmayan bir modelle birleştirilmiş ve son olarak gelişmiş bir kinematik sertleşme modeli ortaya konulmuştur. Bu bulgular, güvenilir deprem analizi için gelişmiş mukavemet modellerinin kullanılmasının ve tünellerdeki zemin tepkisinin

anlaşılmasının önemini vurgulamaktadır. Çalışma sonuçları depreme maruz kalan tünellerin tasarımı ve güçlendirilmesi için önemli bir bilgi kaynağı olarak değerlendirilebilir.

Labuz and Zang (2012) çalışmasında kayaların mekanik davranışlarının incelenmesi çerçevesinde; Mohr-Coulomb kırılma kriterinin avantajları matematiksel basitliği, malzeme parametrelerinin açık fiziksel anlamı ve genel kabul düzeyi konusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Mohr-Coulomb yenilme kriterinin izotropik malzemelerin yenilme koşullarını tanımladığını, büyük ve küçük asal gerilmeleri veya normal ve kayma gerilmelerini hesaba kattığını belirtmişlerdir. Orta düzeydeki gerilme ihmal eden bu kriter, basınç asal gerilmelerine sahip kayalar için uygundur ve çekme gerilmelerinin varlığında karmaşık hale gelir. Sınırlı bir basınç gerilmesi aralığı için Mohr-Coulomb, kaya davranışının birinci dereceden bir yaklaşımını sunarak tavsiye edilir. Orta gerilme etkilerini değerlendirmek için ise üç eksenli test yapılması önerilir.

Lanzano et al. (2015) makalesinde kumdaki dairesel bir tünelin küçültülmüş ölçekli modelleri üzerinde yapılan santrifüj testlerinin sonuçları yorumlanmış ve geriye dönük analiz yapılmıştır. Çalışmanın amacı deneysel sonuçları basitleştirilmiş yöntemlerin tahminleri ve sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırmak olarak ifade edilmektedir. Çalışma kapsamında, zemin kuvveti ve sönüm davranışını ölçmüş ve bilgisayar modellerini gerçek deneyleri çoğaltmak için kullanmıştır. Araştırma, tünel duvarlarının depremler sırasında nasıl deforme olduğunu doğru bir şekilde tahmin etmiştir. Ancak, kumlu zeminin sarsılmalar sırasında çok yoğun hâle gelmesi durumunda kalıcı değişikliklerin tahmininde sınırlamalar olduğunu belirtmiştir. Bu yönün daha fazla araştırma gerektirdiğini vurgulamıştır. Bu bulgular da yukarıda sıralanan çalışmalara benzer şekilde deprem bölgelerinde tünellerin tasarımı ve inşası için önemli bir bilgi kaynağıdır.

Lin et al. (2016) çalışmasında benimsenen varsayımlara, yapılan sayısal analize ve analizde kullanılan tünel, zemin ve deprem verilerine dayanarak aşağıdaki sonuçlara varılmıştır. Çalışmada depremi simüle etmek için geliştirilen prosedür, her bir depremin, serbest bir alanın zeminine monte edilen sismometreler tarafından kaydedilen ivme verileri aracılığıyla elde edildiği varsayımına dayanmaktadır. Bu çalışmada, 2.5D sonlu eleman yöntemi kullanılarak yakın ve uzak alanlar modellenmiştir. Deprem spektrumuna dayalı olarak eşdeğer deprem kuvvetleri belirlenmiştir. Tünel bölümündeki gerilme desenleri, farklı dalga tipleri altında 2.5D ve 2D yaklaşımları kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın önemli bulgularından biri, düşük frekans aralığında 2.5D yaklaşımının minör gerilme değişikliği gösterdiğidir. Bu, 2.5D yaklaşımının bu frekans aralığında daha doğru olduğunu göstermektedir. Diğer bir bulgu ise daha derin tünel derinliğinin daha yüksek gerilmelere neden

olduğudur. Bu, daha derin tünellerin depreme karşı daha savunmasız olduğu anlamına gelmektedir.

Meduri et al. (2017) çalışmasında akışkan yapı etkileşimi sorunlarını çözmek için tamamen açık bir Lagrange bölümlenmiş yöntem önerilmektedir. Lagrange açıklaması özellikle serbest yüzey akışlarını içeren uygulamalar için etkilidir ve çok büyük yapısal yerleşimler durumunda bile akışkan-yapı ara yüzünün anında tanımlanmasına olanak tanır. Akış-yapı etkileşimi problemlerini simüle etmek için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, akış alanı için. Lagrange yaklaşımı ve açık entegrasyon, serbest yüzey akışlarını ve gelişmiş malzeme modellerini destekler. Yöntem, hızlı dinamiklere sahip doğrusal olmayan problemler için doğrulanmış olup, gelecekteki çalışmalarda 3D'ye genelleştirilmesi hedeflenmiştir.

Singh et al. (2017) teknik metninde Delhi metro tünellerinin 1991 Uttarkashi depreminin yatay bileşenine sismik tepkisi üzerine gerçekleştirilen bir çalışma detayları sunulmaktadır. Deprem esnasında tünel ve zemin yapısında hesaplanan yatay yer değiştirmelerin statik durumdaki değerlerin oldukça üzerinde olduğu ifade edilmektedir. Araştırma, artan sönümlemenin deprem tepkilerini hafiflettiğini göstermiştir. Ayrıca, depremler sırasında yatay yer değiştirmelerin dikey olanlardan daha Dinamik açık olduğunu vurgulamıştır. Çalışma, tünel tasarımında güvenliği artırmak için hem yatay hem de dikey deprem bileşenlerinin dikkate alınmasının önemini vurgulaması bakımından kayda değerdir.

Babu et al. (2018) çalışmasında su yatağının altına gömülü tek ve ikiz tünellerin statik ve dinamik yükleme koşulları altındaki davranışı analiz edilmiştir. Değişen örtü örtüsü, yanal yöndeki aralık ve tünel derinliğinin ikiz tünel modellerinin sismik tepkisi üzerindeki etkisini içeren parametrik çalışmalar yürütülmektedir. Su altı tünellerinin davranışını anlamak için sayısal yöntemler kullanmıştır. Çalışma, su altı tünellerinin inşasında kullanılan çeşitli malzemelerin statik ve dinamik analizlerini içermektedir. Araştırma, farklı malzemelerin çeşitli koşullara maruz kaldığında nasıl tepki verdiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, su altı tünel altyapısının tasarımını ve bakımını bilgilendirebilecek temel bilgiler sunmaktadır. Tünellerin yapısal tepkisinin anlaşılması, özellikle su altı koşullarının sunduğu zorlu ve dinamik ortamda güvenilirlik ve dayanıklılık sağlamak açısından hayati öneme sahiptir.

Zaid and Rehan Sadique (2020) çalışmasında kaya tünellerinin davranışını hava etkileri dikkate alınarak incelemek için iki boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonlu eleman analizi ve Mohr-Coulomb modeli kullanarak yapılan analizler sonucunda, kemer şeklindeki tünellerin genel olarak kararlı olduğu, at nalı şeklindeki tünellerin ise en az kararlı olduğu belirlenmiştir. Artan üst yükseklik derinliğinin tünel kararlılığını artırdığı gözlemlenmiştir.

Kaya aşınması tünel deformasyonlarını etkilemiş ve kararsızlığı artırabilmiştir. Bu bulgular, deprem bölgelerinde tünellerin tasarımı ve inşası için önemli bir bilgi kaynağıdır.

Nikakhtar and Zare (2021) tünel açmanın en önemli aşamalarından birinin destek sisteminin tasarımı olduğunu ve projenin ömrü boyunca yeterli yüklere dayanması gerektiğini ifade ettikleri çalışmalarında; su ve zeminler arasındaki etkileşimin yapısal davranış üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır. Elde edilen bulgular, çift tünel tasarımı bağlamında dikkate değer sonuçlar sunmaktadır. Özellikle, su ve zeminler yüklerinin etkisiyle eksenel kuvvetin arttığı ve eğilme momentinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu değişiklikler, su ve zeminler yüklerinin yapısal mekaniği üzerindeki karmaşık etkileşimini ve yeraltı tünel sistemlerinin yapısal davranışı üzerindeki sonuçlarını vurgulamaktadır. Dinamik yük koşulları altında eksenel kuvvetin arttığı ve eğilme momentinin azaldığı gösterilmiştir. Bu dinamik tepkiler, güçlendirilmiş beton yapıların detaylı tasarımında su ve zeminler etkileşimlerinin kapsamlı bir şekilde hesaba katılmasının önemini vurgulamaktadır.

Khan et al. (2022) çalışmasında 120x5 m boyutlarında, 8 m çapında ve 350 mm kalınlığında betonarme astarı (kaplama) temsil eden bir geometrik model üzerinde iki boyutlu sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Zemin alanı homojen, izotrop elastik-plastik davranışa sahip kabul edilmiş ve modellemede Mohr-Coulomb metodu kullanılmıştır. Bu parametrik çalışmanın amacı, tünel modelinde tabakalaşmayı, mevsimsel su seviyesi değişimini ve dinamik tepkiyi seçerek tünel açma sırasında ve sonrasında ortaya çıkabilecek kritik sorunları incelenmesidir. Çalışma, tünellerin stabilitesini etkileyen çeşitli faktörleri bilgisayar simülasyonlarını kullanarak incelemiştir. Araştırma, zemin türlerindeki değişikliklerin, su seviyelerindeki dalgalanmaların ve deprem aktivitesinin tünellerin gerilme ve deformasyon özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, eliptik deformasyonlar deprem olayları sırasında tünellerde dinamik açık bir sonuç olarak ortaya çıkabileceğine dair kanıtlar sunmuştur. Bu bulgular, mühendislerin tüneller için sağlam destek sistemleri tasarlarlarken değişen jeolojik koşulları dikkate almasının önemini vurgulamaktadır.

Tünellerin dinamik yükler, *genel olarak deprem*, etkisi altındaki davranışlarının incelendiği, tasarım süreçlerinin detaylandırıldığı çalışmalara ilgili literatürde erişim sağlanabilmekte; yukarıda bu konuya ilişkin nispeten güncel çalışmalardan bir derleme sunulmaktadır. Bununla birlikte, ilgili literatür incelendikten sonra üzerinde su kütlesi bulunan zeminler altında inşa edilecek tünel yapılarının deprem etkisi altındaki davranışları konusunda yeterli düzeyde çalışma olmadığı ve bu konuda çalışma yapılması gerektiği sonucuna varılarak bu tez çalışması kurgulanmıştır. Literatürde konuya ilişkin yeterli çalışma olmaması bu tez çalışmasının ilgili literatüre katkı sunacağına anlamına geliyor olsa da vurgu yapılması gereken

esas husus bu çalışmanın gerekliliğidir. Zira dünya nüfusu arttıkça ve ulaştırma ihtiyacı büyüdükçe daha çok yeraltı ulaşım yapısına ihtiyaç duyulmakta ve her türlü zeminde tünel yapılması yoluna gidilmektedir. Üzerinde su kütlesi olan zemin içerisinde tünel inşa edilmesi durumunda sistemin statik ve dinamik yükler (deprem) mekanik davranışının anlaşılmasına yönelik bu tez çalışmasının bu bakımdan bir gereklilik olduğu düşünülerek çalışma gerçekleştirilmiştir.



KURAMSAL TEMELLER

Tez çalışması kapsamında temel olarak üzerinde su kütlesi bulunan bir zemin içerisinde konumlandırılmış tünel yapısının deprem yükleri altındaki davranışı incelenmektedir. Bu nedenle, tünel tasarımı ve imalatına dair genel bilgi sunulmasında yarar görülmektedir.

Tünel Tasarım Yaklaşımı ve Yöntemleri

Tünellerin güvenli ve verimli bir şekilde inşa edilebilmesi için tasarım aşamasında birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Bu faktörler şunlardır.

Tünel yapım amacı: Tünel, ulaşım, enerji, savunma veya başka bir amaç için mi kullanılacak? Kullanım amacı, tünelin boyutunu, şeklini ve kullanılan malzemeleri etkileyecektir.

Tünel Boyutları: Tünel ne kadar geniş ve uzun olacak? Boyutlar, zemin koşullarına ve tünelin kullanım amacına bağlı olarak belirlenir.

Zemin Koşulları: Tünel hangi tip zeminde inşa edilecek? Zemin tipi, tünel kaplamasının tasarımını ve inşaat yöntemini etkileyecektir.

Yeraltı Suyu Seviyesi: Yeraltı suyu seviyesi nedir? Yüksek yeraltı suyu seviyesi, tünel inşaatını zorlaştırabilir ve ek drenaj çalışmaları gerektirebilir.

Tünel tasarım yöntemleri temel olarak yukarıda sıralanan bu faktörleri dikkate alarak tünel çevresi ve kaplaması üzerindeki yükleri ve deformasyonları tahmin etmek için kullanılır. Çoğu 'kapalı form' analitik çözüm, tek bir dairesel tünele dayanmaktadır. Ancak birçok ulaşım projesi karmaşık kesit geometrileri, kavşaklar ve çatallanmalar gerektirir. Ayrıca yapılar birbirine veya mevcut yapılara yakın olarak inşa edilebilir. Basit analitik çözümlerde, tünelin önündeki zemindeki üç boyutlu gerilimi yeniden dağılımını hesaba katmak için zemin gerilmelerinde ampirik bir azalma gereklidir (British Tunnelling Society, 2004).

Bir tünel sisteminin 'kapalı form' analitik veya sayısal modelini formüle etmenin ilk adımı, zeminin tek bir cisim olarak mı, yani bir süreklilik olarak mı, yoksa ayrık cisimlerin bir toplamı olarak mı, yani bir süreksizlik olarak mı davrandığına karar vermektir. Bazen zemin her iki davranış türünün unsurlarını da sergiler. Örneğin, sert çatlaklı kil genel olarak bir süreklilik gibi davranabilir ama aynı zamanda ayrı parçalar gibi de davranabilir. Sofistike kurucu modeller kullanılırken, sonuçlardaki herhangi bir hatayı tanımlamak için teoremin ve

tasarım aracındaki (örneğin sayısal modelleme programı) modelin formülasyonunun kapsamlı bir şekilde anlaşılması gerekir.

Homojen Zeminlerde Tünel Analizi

Homojen zeminlerde, tünel çevresindeki zemin aynı mukavemet ve deformasyon özelliklerine sahip bölgelerden oluşabilir. Bu durumda, tünel tasarımı için Tablo 1’de sunulan yöntemler kullanılabilir.

Tablo 1. Homojen zeminler için tasarım yöntemleri

Yöntem	Kaynak	Malzeme modeller	2D veya 3D	Zaman etkileri	Yeraltı suyu etkileri (*)	Tünel şekil	Delme aletleri / TAM
Ampirik yöntemler							
ADECO-RS	Lunardi, 1997	CCM ve sayısal analizlere	2D	Hiçbiri	-	-	Delme aletleri
Kapalı form analitik yöntemler							
CCM	Muir wood 1975 Curtis, 1976 Einstein ve Schwartz, 1979	Elastik. Plastik. Sürünme	2D	Yere sürün	Bazı	Dairesel	İkisi birden
	Panel and Guonol, 1982	Elastik. Plastik. Sürünme	2D eksen	Sürünme, destek zamanı	Hayır	Dairesel	İkisi birden
Yataklı kiriş yayı	ITA, 1998	Elastik	2D	Hiçbir	Hayır	Herhangi	İkisi birden
Kararlılık analizi	Mair and Taylor, 1993	Plastik	2D ve 3D	Hiçbir	Hayır	Dairesel	İkisi birden
Sayısal yöntemler							
FE	ABAQUS	Tüm	2D/3D	Tüm	Evet	Herhangi	İkisi birden
FD	FLAC	Tüm	2D/3D	Tüm	Evet	Herhangi	İkisi birden
FE ve FD	PHASES	Tüm	2D/3D	Tüm	Evet	Herhangi	İkisi birden
CCM: Yakınsama-Sıkıştırma Yöntemi TAM: Tünel açma makinesi Elastik: elastik malzeme davranışı Plastik: plastik malzeme davranışı Delme aletleri: delme ve patlatma veya tahrikli başlık Sürünme: sürünme malzemesi davranışı				(*) Bu sütun, yöntemin yeraltı suyunun etkileri veya yeraltı suyu üzerindeki etkileri (örneğin boşluk suyu değişiklikleri veya konsolidasyon oturmaları) hakkında herhangi bir bilgi sağlayıp sağlamadığını belirtir. FE: sonlu elemanlar yöntemi FD: sonlu farklar yöntemi ABAQUS, FLAC, PHASES: uygulama yazılımını analiz etme			

Analitik Yöntemler, zemin özelliklerini ve tünel geometrisini kullanarak tünel çevresindeki yükleri ve deformasyonları analitik olarak tahmin eder. Basit ve hızlı olmaları

nedeniyle ilk aşamada sıklıkla tercih edilirler. Ancak, karmaşık zemin koşullarında veya değişken yüklerde yetersiz kalabilirler.

Nümerik Yöntemler ise zemin ve tünel geometrisini bilgisayar ortamında modelleyerek tünel çevresindeki yükleri ve deformasyonları sayısal olarak tahmin eder. Karmaşık zemin koşullarını ve değişken yükleri daha doğru tahmin edebildikleri için daha güvenilirdirler. Ancak, analitik yöntemlere göre daha karmaşık ve hesaplama süresi daha uzundur.

Heterojen Zeminlerde Tünel Analizi

Heterojen zeminlerde, tünel çevresindeki zemin farklı mukavemet ve deformasyon özelliklerine sahip bölgelerden oluşabilir. Bu durumda, tünel tasarımı için Tablo 2’de sunulan yöntemler kullanılabilir.

Tablo 2. Heterojen zeminler için tasarım yöntemleri

Yöntem	Kaynak	Malzeme modeller	2D veya 3D	Zaman etkileri	Yeraltı suyu etkileri (*)	Tünel şekil	Delme aletleri / TAM
Ampirik yöntemler							
RMR	Bieniawski, 1984	-	-	Evet	Hiçbiri	Herhangi	Delme aletleri
Q-sistemi	Barton, 1974	-	-	Hayır	Hiçbiri	Herhangi	Delme aletleri
RMi	Palmstrom, 1996	-	-	Evet	Hiçbiri	Herhangi	Delme aletleri
Analitik yöntemler							
Stabilite analizleri	Barrett ve McCreath, 1995	Plastik	2D	Bazı	Hiçbiri	Yok	Delme aletleri
Sayısal yöntemler							
DE	UDEC/3DEC	Tüm	2D/3D	Evet	Sürünme	Herhangi	İkisi birden
BE	-	Elastik	2D/3D	Evet	Herhangi	Herhangi	İkisi birden
CCM: Yakınsama-Sıkıştırma Yöntemi TAM: Tünel açma makinesi Elastik: elastik malzeme davranışı Plastik: plastik malzeme davranışı Delme aletleri: delme ve patlatma veya tahrikli başlık Sürünme: sürünme malzemesi davranış				DE: Diferansiyel Denklemler BE: Sınır Denklemleri RMR, Q-sistemi, RMi: Ampirik yöntemler ileride açıklanacak Stabilite analizleri: önceki tabloda açıklanmıştır			

Sınır Eleman Analizi Yöntemi zemin özelliklerini ve tünel geometrisini kullanarak tünel çevresindeki yükleri ve deformasyonları adım adım tahmin eder. Basit ve hızlı olmaları

nedeniyle ilk aşamada sıklıkla tercih edilirler. Ancak, karmaşık zemin koşullarında veya değişken yüklerde yetersiz kalabilirler.

Dinamik Elastik Teori Yöntemi zemin özelliklerini ve tünel geometrisini kullanarak tünel çevresindeki yükleri ve deformasyonları doğrusal olarak tahmin eder. Bu yöntem karmaşık zemin koşullarını doğru bir şekilde tahmin edebilmesine rağmen, yalnızca doğrusal yükler için geçerlidir.

Hesaplamaların yapılması genellikle oldukça basittir ancak sonuçların bir tünel destek sistemi için etkili bir tasarıma dönüştürülmesi daha zordur. Kullanılan tasarım yöntemlerinin sınırlamalarının ve proje kısıtlamalarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, herhangi bir tutarsızlığı ortaya çıkarmalıdır. Emsal uygulamalar ek bir kontrol sağlayabilir. Mühendislik muhakemesi her zaman gereklidir ve bunu yalnızca deneyimli tünel mühendisleri sağlayabileceği unutulmamalıdır. (British Tunnelling Society, 2004).

Tünel tasarımı, proje gereksinimlerini ve zemin koşullarını dikkatlice değerlendirerek en uygun yöntemin seçilmesini gerektirir. Bu analiz yöntemlerinin karmaşık olabileceğini ve her projenin kendine özgü ihtiyaçları olduğunu unutmamak önemlidir. Bu nedenle, mühendisler her bir yöntemin avantajlarını ve dezavantajlarını titizlikle değerlendirmelidirler (Pöttler, 1985).

Sismik dalgaların ana kayadan zeminler katmanlarına yayılması, yalnızca zeminler yüzeyindeki yapılarda değil, aynı zamanda yeraltı yapılarında da ciddi hasarlara neden olabilir. Önceki çalışmalar, kuvvetli yer hareketi verilerinin özelliklerinin değiştirilmesinde ve değiştirilmesinde saha koşullarının önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Dinamik yükler, tünel tasarımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek yoğunluklu zeminler deprem frekansını artırırken, düşük yoğunluklu zeminler deprem frekansını azaltır. Tünelin farklı bölgelerinde gerilme ve şekil değiştirme miktarı değişir ve minimum değerler tünelin üst ve alt bölgelerinde meydana gelir (Asheghabadi and Matinmanesh, 2011).

Tünel Tasarımında Ampirik Yöntemler

Tünel tasarımında ortaya konulan ampirik yöntemler, önceki uygulamaların değerlendirilmesine dayanır ve genellikle kaya tünellerinde başarılı bir geçmişe sahiptir. İdeal olarak, destek önerileri, geniş bir yelpazede tünel koşulları ve tünel boyutları için fiili performansa karşı 'kalibre edilmiştir'. Bazı yumuşak zemin ampirik kuralları da oluşturulmuştur, ancak bunlar evrensel olarak uygulanabilir olmaktan ziyade yerel deneyimlere dayanmaktadır.

Kaya Kitle Sınıflandırma (RMR) ve Q sistemleri Tablo 3'te, kaya gücü, kalitesi ve yer altı suyu koşulları gibi farklı parametreleri dikkate alarak gerekli destek tedbirlerini belirleyen en yaygın kullanılan ampirik tasarım yöntemleridir. Plastisitenin yer hareketi tahmini üzerinde önemli bir etkisi vardır (Mair and Taylor, 1992). Bu yöntemler, zamanla doğruluk ve etkinliklerini artırmak için değiştirilmiş ve zayıf kayalar ve sığ tüneller için jeolojik mukavemet indeksi (GSI) sistemi tanıtılmıştır (Tablo 4).

Bu yöntemler, kaya tünellerinde başarılı olmuş olsalar da daha yumuşak zeminlerde daha az güvenilir olabilirler. Bu yöntemlerin ön tasarım aşamalarında kullanımı basit, hızlı ve ucuz olduğundan avantajlıdır. Ancak bu yöntemler ve destek ihtiyaçlarını belirlemek için kaya kitlesinin özelliklerinin ortalamalarına dayandığından daha karmaşık tasarımlar için uygun olmayabilirler.

Tablo 3. Kaya kütlesi sınıflandırma sistemlerini uygulama genel prosedürleri

Kaya Tünelleri Tasarım Yaklaşımı
1. Kaya tipi sınıflandırılır (tercihen RMR veya Q-sistem sınıflandırmalarını kullan)
2. RMR veya Q-sistem tasarım çizelgelerini kullanarak destek için ön bir tahmin yapılır
3. Genel kararlığı ve olası gerilme kararsızlığı düşünülür
(i) Yerindeki gerilme düşünülür
(ii) Kazı geometrisi düşünülür
(iii) Kama kararlılığı düşünülür
4. Kazı sırası ve destek zamanlaması düşünülür
5. Kaya çivisi tasarımı diğer ampirik kurallara karşı kontrol edilir
6. Desteği ve potansiyel arıza mekanizmalarını göstermek için desteğin ve tünelin ölçekli bir çizimi oluşturulur.
(Not: Bu, üç boyutlu bir problem olduğunda yapılması zordur)

Tablo 4. RMR ve Q-sistemlerinin sınırlamaları

RMR	Q-sistemi
Tüneller ve madenler için uygundur	Sadece tüneller için uygundur
Eklemler setlerinin yönelimini dikkate alır	Eklemlerin yönelimini açıkça dikkate almaz
Ayakta kalma süresi hakkında bilgi sağlar	Ayakta kalma süresi sağlamaz
Yalnızca kalıcı destek için uygundur	Geçici ve kalıcı destek için uygundur
Bazı bilgileri kaplama yükleri hakkında sağlar	Bazı bilgileri kaplama yükleri hakkında sağlar
Gerilme/mukavemet oranını dikkate almaz	Gerilme/mukavemet oranını dikkate alır
Destek tablosu güncel değildir	Destek tablosu günceldir
Zaman bağımlı zemin davranışını veya sıkışan kaya davranışını dikkate almaz	Zaman bağımlı zemin davranışını veya sıkışan kaya davranışını dikkate almaz
Anahtar: $RMR \approx 9 \ln(Q) + 44$ (Yaklaşık olarak) (Bieniawski, 1994)	

Yıllar boyunca, kaya destek tasarımında kullanılan bu yöntemlerin tecrübeli tünel mühendisleri tarafından genellikle başarılı olduğu görülmüştür. Ancak dikkate alınması gereken bazı dezavantajlar bulunmaktadır (Lee and Rowe, 1989). Bunlar:

- Çok kırılmış, zayıf kaya durumlarında iyi çalışmayabilir ve destek önerileri, tahmin edilen yer davranışıyla uyumsuz olabilir.
- Tasarımda güvenlik faktörü bilinmemektedir.
- Desteklerin ne zaman takılacağına dair bir yönlendirme yoktur.
- Yakındaki yapılara, ya insan yapımı (tünel gibi) ya da doğal (fay hatları gibi) etkiler dikkate alınmaz.

Bu kısıtlamaların anlaşılması ve daha ileri analiz yöntemlerinin gerekip gerekmediğinin belirlenmesi önemlidir. Ampirik yöntemleri başarıyla kullanmak için, mühendislerin tünel inşaatı sürecinde düzenli olarak denetleme ve izleme yapmaları gerekmektedir. Bu sürekli bir süreçtir ve tünel koşullarının değerlendirilmesini içerir (Riedmüller and Schubert, 1999). Bu şekilde, tasarımda herhangi bir değişiklik yapılması gerekip gerekmediği belirlenebilir ve proje için minimum maliyet ve maksimum güvenlik sağlanabilir.

Tünellerde Sayısal Modelleme Yöntemleri

Halihazırda özetlenen tasarım yöntemlerinin aksine, sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemlerini kullananlar gibi sayısal analizler; bitişik yapılar, farklı jeolojik katmanlar, karmaşık kurucu davranış, geçici ve dinamik yüklemeler dahil olmak üzere karmaşık yapıları açıkça modelleme yeteneği sunar. Bu, yer desteği etkileşimini simüle etmek için benzersiz bir kapasite sağlamış ve diğer analiz yöntemlerinin yerini sayısal yöntemlerin almasına yol

açmıştır. Ticari olarak temin edilebilen sayısal analiz programları geniş bir yelpazede kurucu modeller ve unsurlar sunar ve hemen hemen her durumu modellemek mümkündür. Ancak, daha önce de belirtildiği gibi, tünel kaplama tasarımı deterministik bir süreç değildir ve sonuçlar, saha incelemesinin kalitesi ve tahmini jeomekanik özellikler aralığı bağlamında değerlendirilmelidir. Bu yöntemler, yeraltı yapılarını, çevresel yapıları ve tünelleri etkileyebilecek farklı kuvvet türlerini modelleyebilir. Tünellerin incelenmesinde sayısal modelleme oldukça gerekli ve faydalıdır; çünkü neredeyse her durumu modelleyebilir. Bu sayede tünelin davranışı ve performansı hakkında detaylı bilgi edinmek mümkündür. Ancak, sayısal modelleme sonuçlarının doğruluğu, bilgisayara girilen verilerin kalitesine bağlıdır. (Mair and Taylor, 1992).

Yumuşak ve düzgün zeminlerde sonlu eleman, hibrit sonlu eleman, sınır elemanı veya sonlu fark gibi yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler, zeminin homojen ve izotropik özelliklerine sahip olduğu durumlarda etkin sonuçlar sağlar. Kayalık ve kırık/parçalı zeminlerde zemin içerisindeki çatlaklar ve düzensizlikler nedeniyle daha karmaşık analiz tekniklerine ihtiyaç duyulur. Kayalık ve parçalı zeminlerde ise ayrık eleman ve sınır eleman yöntemleri daha uygun olacaktır.

Sonlu Elemanlar ve Sonlu Farklar Yöntemleri yapısal analize esas modeller oluşturmak için kullanılan iki önemli sayısal yöntemdir. Her ikisi de incelenen nesneyi elemanlar veya bölgeler adı verilen daha küçük parçalara bölmeyi içerir. Her elemana malzeme özellikleri, davranışı, yükler ve sınır koşulları atanır (Brown and Hoek, 1980).

Sonlu Elemanlar Yöntemi yer değiştirmeleri gerilmelerle ilişkilendiren bir rijitlik matrisi kullanır ve sonrasında gerekli çıktıyı elde etmek için bu matris çözümünü esas alır.

Sonlu Farklar Yöntemi ise 'dinamik rahatlama' adı verilen bir teknik kullanılarak üretilen denklerin çözümü ile yer değiştirmelerin hesabını esas alır. Bu hesaplama, ağdaki her eleman için dengeye ulaşılan kadar tekrarlanır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi, doğrusal ve orta dereceli doğrusal olmayan problemleri Sonlu Farklar Yöntemi'ne göre daha hızlı çözebilir. Sonlu Farklar yöntemi ise malzeme ve geometrik doğrusallığı daha kolay modelleyebilir ve dengesizlik Sonlu Elemanlar yönteminden daha iyi bir şekilde tespit edebilir (Groen and De Borst, 1997).

Sayısal modelleme, tünel tasarımı ve analizi için güçlü bir araçtır. Farklı zemin türlerine ve zemin koşullarına uygun çeşitli yöntemler mevcuttur. Doğru yöntem seçimi ve modelleme tekniklerinin kullanımı ile tünelin davranışı ve performansı hakkında detaylı bilgi edinmek ve güvenli ve ekonomik tasarımlar yapmak mümkün hale gelir.

Kapalı-Form Analitik Yöntemler

Bu yöntemler, zeminin homojen olduğunu ve tünelin dairesel bir kesite sahip olduğunu varsayar. Bu varsayımlar altında, toprağın nasıl hareket edeceğini, destek eklenmeden önce gerilmelerin nasıl değişeceğini ve tünelin zeminle nasıl etkileşeceğini tahmin edebilirler. Ayrıca bu modeller, *Konsantrasyon-Rahatlama Yöntemi hariç*, inşaat yüklerini (örneğin, TAM'deki hidrolik iticilerden kaynaklanan yükler) veya destek yerleştirme zamanlamasını dikkate almaz. Bununla birlikte, bu yöntemler yumuşak zeminlerde kanıtlanmış bir geçmişe sahiptir ve basit durumlarda tünel kaplamalarının boyutlandırılması için hala yaygın olarak kullanılmaktadır (British Tunnelling Society, 2004).

Sürekli Analitik Modeller, yumuşak zeminlerde tünellerin tasarımında kullanılan matematiksel modelleme yöntemleridir. Zeminin homojen olduğunu ve tünelin dairesel bir kesite sahip olduğunu varsayarlar. Ayrıca, elastik bir kaplamaya sahip olduklarını da varsayarlar. Bu modeller, kil gibi yumuşak zeminlerde basit tünel kaplamalarının tasarımı için faydalıdır.

Yaklaşma-Sıkıştırma Yöntemi, tünel kaplamasının yaklaşmasını ve zemin tarafından sağlanan sıkıştırmayı kullanarak ilk destek sistemini tasarlamak ve tünelin uzun vadeli davranışını tahmin etmek için kullanılan bir ampirik yöntemdir. Bu yöntem basit ve kullanımı kolaydır, ancak karmaşık zemin koşullarında veya değişken yükler altında yetersiz kalabilir.

Limit Denge Yöntemleri, tünelin ve çevreleyen zeminin kararlılığını analiz etmek için kullanılır. Bu yöntemler, tünelin çökmesini önlemek için gereken minimum destek miktarını belirlemek için faydalıdır.

Yataklı Kiriş-Yaylı Modeller, zemin hareketine maruz kalan bir tünel kaplamasının davranışını analiz etmek için kullanılır. Bu modeller, kaplamanın çevreleyen zeminde yerleştirilmiş bir dizi birleşik kiriş ve yay olduğunu varsayar. Zemin ve kaplama arasındaki etkileşimi hesaplayabilen bu modeller, zorlu zemin koşullarında tünellerin performansını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılır.

İki Boyutlu ve Üç Boyutlu Modelleme Karşılaştırması

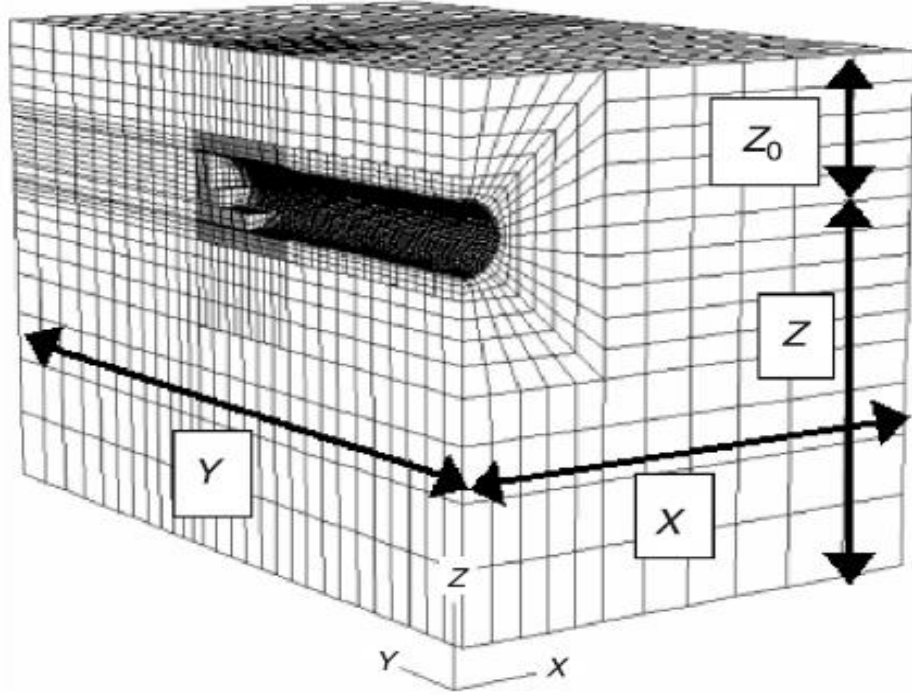
Tüm yapısal sistemlerin olduğu gibi; tünel sistemlerinin analizinde iki ya da üç boyutlu modeller oluşturulabilmektedir. Analizde kullanılacak modelleme tekniği (2B, 3B) ve programın seçimi, zeminin sürekli bir şekilde modellenebilir olup olmadığına veya kesintilerin, örneğin fay hatları, tabakalı yüzeyler, kayma zonları vb., bağımsız blok hareketlerinin değerlendirilmesini gerektirip gerektirmediğine bağlıdır.

Tünellerin incelenmesinde genellikle zeminin tüm yönlerde homojen olduğu varsayımıyla iki boyutlu (2B) modeller kullanılır. Ancak, bu varsayım her zaman doğru değildir çünkü tünelin etrafındaki gerilme ve deformasyon dağılımı, üç boyutlu (3B) olabilir. Bu yöntemler zeminde belirli deformasyonlara izin verir, ancak tasarımcının bu deformasyon miktarını tahmin etmesi gerekmektedir. Ancak, bu yöntemler mükemmel değildir ve tünel gerçekten nasıl davranacak göstermeyebilir.

Tünel normalde enine düzlem gerilme ve eksen simetrisini varsayan iki boyutlu bir model olarak temsil edilir. Özellikle ilerleyen yüzdeki gerçek gerilme yeniden dağıtımı üç boyutludur ve en iyi uygulama üç boyutlu modelleme olacaktır. Bu tür üç boyutlu modellerin oluşturulması karmaşıktır ve analiz edilmesi zaman alıcıdır. Hesaplama gücü sınırlıysa, üç boyutlu modellerde, modelin boyutunu küçültmek için gereken basitleştirmelerin, iki boyutlu bir modeldeki üç boyutlu etkilerin yönlendirilmesindeki potansiyel hatadan daha önemli olması riski vardır. Üç boyutlu modeller, daha doğru sonuçlar sağlayabilmekle birlikte, yapımı ve analizi daha uzun zaman alır. Bu yüzden, (2B) modeller, hız ve maliyet açısından genellikle tercih edilmektedir (Muir Wood, 1976).

Sonlu Elemanlar Ağ Oluşturma

Gerçekçi sonuçların elde edilmesine yardımcı olacak iyi bir ağ oluşturulmasına yol açan ağın ince detayı sonuçların doğruluğunu etkiler, Büyük gerilme veya daha yüksek çözünürlüğün gerektiği bölgelerde daha fazla eleman olmalıdır. Eleman ve bölgeler için en-boy oranları 5:1'den az olmalıdır ve mümkünse simetri kullanılarak ağın boyutu azaltılmalıdır. Objeleri elemanlara veya bölgelere ayırarak bir ağ oluşturulur (Duddeck and Erdmann, 1985). Ayrıca, Şekil 4'te örnek bir sonlu eleman ağ gösterilmektedir.



X	Y	Z	Source
$15 \times R = 3.5 \times Z_0$	$15 \times R$	$3 \times Z_0$	Van der Berg, 1999
$3 \times Z_0$	—	$2 \times Z_0$	Gunn, 1993

Şekil 4. Sayısal model için ağ boyutları (R = tünel yarıçapı, Z_0 = yüzeyden tünel eksenine derinlik)

Sınır koşulları

Kaplama tasarımı için, ana ilgi tünel kaplaması ve tünele yakın çevredeki zemindir. Modelin sınırları, analiz sonuçlarını etkilememek için yeterince uzak olmalıdır.

Bu sınırlamayı sağlamak için bazı yöntemler modelin yanlarında özel elemanlar veya sonsuz elemanlar kullanır. Ayrıca, analizimiz için doğru koşulları korumak ve modelin hareket etmesini önlemek amacıyla sınır koşullarında sabitleme uygulanması gerekmektedir. Sınır koşullarında uygulanabilecek sabitleme türleri çeşitli olup, bunların seçiminde dikkatli olunmalıdır.

Yer Değiştirme Sabitliği Yöntemi'nde sınır bölgelerinde yer değiştirmeler sabit tutulur. Bu yaklaşım genellikle sınır bölgelerindeki gerilmeleri küçümseyebilir, bu yüzden dikkatli bir şekilde uygulanmalıdır. Örneğin, sınırların tamamen hareket edemez hale getirilmesi, modelin genel davranışını etkileyebilir ve gerilmelerin hatalı bir şekilde daha düşük seviyelerde hesaplanmasına neden olabilir.

Gerilme Sabitliği Yöntemi'nde, sınır bölgelerindeki gerilmeler sabit tutulur. Bu yaklaşım, sınır bölgelerindeki gerilmeleri abartma eğiliminde olabilir. Bu, özellikle sınır koşullarında gerilme dağılımının yüksek olduğu durumlarda, modelin genel gerilme analizini olumsuz etkileyebilir ve sonuçların daha yüksek gerilme değeriyle ifade edilmesine yol açabilir.

Yer Değiştirme ve Gerilme Sabitliği Yöntemleri arasında dengeli bir yaklaşım benimsemek, modelin doğruluğunu artırmak için önemlidir. Eisenstein and Branco (1991) tarafından belirtildiği gibi, yer değiştirme ve gerilme sabitliği arasındaki farkın küçük olması, modelimizin iyi yapılandırıldığının bir göstergesidir. Bu durum, modelin daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar üretebileceği anlamına gelir.

Tünel kaplaması tasarımında sınır koşullarının doğru bir şekilde belirlenmesi ve uygulanması, modelin gerçek durumu daha iyi yansıtabilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Uygun sınırlandırma ve sabitleme teknikleri kullanarak, analiz sonuçlarının güvenilirliğini artırabilir ve mühendislik çözümlerinin doğruluğunu sağlayabiliriz. Bu, tünel kaplaması gibi karmaşık yapıların tasarımında, güvenlik ve performans açısından önemli katkılar sunar.

MATERYAL VE METOT

Tez çalışması kapsamında çapı 6 m, kaplama kalınlığı 400 mm olan bir tünel yapısı ele alınmış ve temel olarak üzerinde su barındıran bir zemin içerisinde modellenerek dinamik yükler etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. İçerisinde su barındıran bölüm kanyon olarak adlandırılmış, analizlerde ABAQUS /Explicit yazılım paketi kullanılmıştır. Çalışmada Sonlu Eleman Yöntemi ile model oluşturulmuş, malzeme davranışı Drucker-Prager Yöntemi ile tanımlanmış, göçme kriteri olarak da Mohr-Coulomb Kriteri benimsenmiştir.

Bu bölümde öncelikle modellemede benimsenen yöntem ve analiz tekniği detaylandırılmış, devamında ise analize esas model hakkında bilgi sunulmuştur.

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi, problemin bir diferansiyel ifadesi ile başlar ve ardından türevleri, onların ayırık analogları (*Ayrık analog, matematikte ve ilgili alanlarda kullanılan sürekli kavramın ayırık bir versiyonudur ve problemlerin sürekli değerler yerine farklı değerlerle modellenmesine olanak tanır. Bu analoglar, diferansiyel denklemler yerine fark denklemleri veya sürekli olanlar yerine ayırık olasılık dağılımları kullanmak gibi yöntemlerin ve teorilerin sürekli alanlardan ayırık ayarlara çevrilmesine yardımcı olur.*) ile değiştirir. Dinamik problemlerde, sonlu eleman denklemleri, Sonlu Elemanlar teknikleri kullanılarak zaman boyunca ileriye doğru entegre edilir ve sonuçlar üreten entegrasyon şeması yerine bir eleman üzerinde bir zaman boyutu kullanılmaz. Sonlu Elemanlar yaklaşımlarının, öz-toplam diferansiyel denklemler sisteminin kesikli analogunu üretmede sonlu eleman yönteminin varyasyonel yaklaşımını yararlı bulmuştur. Sonlu Eleman Yöntemi'nde amaç, belirli bölgelerde parçalı tanımlara sahip bir fonksiyon ailesi oluşturmaktır, bu durumda, gerçek çözüm istenilen kadar yakın bir şekilde yaklaştırılabilir karakterde. Bu yöntem, yer değiştirmeleri her zaman adımında günceller ve mevcut ve önceki zaman adımlarından gelen bilgileri kullanır. İvmeleri hesaplamak için rijitlik matrisi (K) ve kütle matrisi (M) gereklidir, bu ivmeler daha sonra yer değiştirmeleri güncellemek için kullanılır (Wu et al., 2005).

Hareket Denklemi:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = P(t) \quad (1)$$

Burada M kütle matrisi, C sönüm matrisi (genellikle dinamik açık yöntemlerde sıfır kabul edilir), K rijitlik matrisi, $u(t)$ yer değiştirme vektörü ve $P(t)$ dış kuvvet vektörüdür.

Zaman İçinde Ayırıklaştırma:

İvme Hesaplama:

$$\ddot{u}_i = M^{-1}(P_i - Ku_i) \quad (2)$$

Bu denklem, mevcut zaman adımındaki (i) hızlanmasını hesaplar.

Yer Değiştirme Güncellemesi:

$$u_i + 1 = 2u_i - u_{i-1} + \Delta t^2 \ddot{u}_i \quad (3)$$

Başlangıç Koşulları:

u_0 = başlangıç yer değiştirmesi

$$u_1 = u_0 + \Delta t \dot{u}_0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_0 \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemlerden görüldüğü gibi, bu yöntemde tek zaman adımı kullanılır. Ancak, ABAQUS Dinamik açık analizinde yer değiştirme ve hızlanma denklemleri yarım zaman adımı için sonuçları hesaplamak üzere değiştirilmiştir (Manual, 2012).

Yarım Adım İvme Güncellemesi:

$$\ddot{u}_{(i+\frac{1}{2})}^N = \ddot{u}_{(i+\frac{1}{2})}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_{(i)}^N \quad (5)$$

Bu denklemde hız ve ivme kullanıldığı yerde.

Yarım Adım Yer Değiştirme Güncellemesi:

$$u_{(i+\frac{1}{2})}^N = u_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{(i+\frac{1}{2})}^N \quad (6)$$

Yer değiştirme, yarım adımda hız kullanılarak güncellenir.

Sonlu elemanlar analizinde kullanılanlar gibi sayısal analizdeki Dinamik Açık Entegrasyon Yöntemleri, yer değiştirmeleri ve hızları yineleme gerektirmeden doğrudan günceller. Bu yöntemler, zaman artışının başlangıcındaki bilinen yer değiştirme, hız ve ivme değerlerini, sonundaki değerlerini hesaplamak için kullanır. Bu yaklaşım, eş zamanlı denklemlerin çözülmesini önler, her bir artışı hesaplama açısından ucuz hale getirir; ancak doğru sonuçlar için birçok küçük zaman artışına ihtiyaç vardır. Diyagonal kütle matrisi kullanıldığında özellikle vermelidirler. ABAQUS programı, diyagonal kütle matrisi kullanılarak elde edilen hesaplama verimliliğini vurgular (Tan, 1996).

Bu yöntemde kütle matrisi, değerlerin yalnızca matrisin köşegeninde yer aldığı ve geri kalanının sıfır olduğu matris olarak ifade edilir. Bu, sistemdeki her serbestlik derecesine ait

kütlenin diğer serbestlik dereceleriyle bağımsız olduğunu ima eder. Diyagonal kütle matrisleri, hesaplamaları basitleştirdikleri için hesaplama yöntemlerinde tercih edilir. Bu basitleştirme, hızlanmaların verimli bir şekilde hesaplanmasını sağlar (Wu, 2006).

İç kuvvet vektörü I' elemanların rijitliği nedeniyle oluşan kuvvetleri hesaba katan iç kuvvet vektörüdür. Dinamik açık yöntemlerde, iç kuvvet vektörü genellikle eleman bazında hesaplanır ve global bir vektöre monte edilir (Fedosin, 2016).

Tanjant Rijitlik Matrisi

Matris, büyük rijit cisim deplasmanlarının elastik ve yerel olarak doğrusal olmayan etkilerden katkılarını açıkça ayırmak için böyle bir formda verilmiştir. Merkezi Fark Yöntemi gibi Dinamik açık yöntemler, global bir rijitlik matrisi oluşturulmasını gerektirmez (Soares Jr, 2019). Bunun nedenleri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Zaman Entegrasyon Şeması: Dinamik açık yöntemler, hareket denklemlerini her zaman adımında açıkça çözer. Çözümü iterasyon olmadan zamanda ilerletirler. Örtülü yöntemler gibi doğrusal olmayan denklemleri iteratif olarak çözmek yerine, Dinamik açık yöntemler yeni yer değiştirmeleri mevcut duruma dayanarak doğrudan hesaplar ve tanjant rijitlik matrisini içeren bir matris denklemini çözmeye gerek duymaz.

Algoritmik Prosedür: Dinamik açık yöntemlerde, iç kuvvetler mevcut yer değiştirmeler ve hızlar temel alınarak hesaplanır. Bu iç kuvvetler, bir sonraki zaman adımındaki yer değiştirmeleri güncellemek için kullanılır. Bu süreç, tanjant rijitlik matrisinin oluşturulması ve manipüle edilmesi ihtiyacını ortadan kaldırır.

Kararlılık: Dinamik Açık Yöntemlerin, zaman adımı boyutuyla ilgili kararlılık gereksinimleri vardır. Yeterince küçük bir zaman adımı boyutunun sağlanması, Dinamik Açık Yöntemler'in sistemin dinamik davranışını doğru bir şekilde yakalamasına olanak tanır ve stabilite için rijitlik özelliklerine güvenmez, Dinamik Kapalı Yöntemler'de olduğu gibi stabilite rijitlik matrisi özellikleriyle yakından ilişkilidir.

Kararlılık Kriteri

Dinamik Açık Dinamik Analiz'de zaman artımı Δt 'nin kararlılık sınırı, özellikle en küçük eleman boyutu ve seyreden dalga hızı kullanılarak belirlenir. Bu yaklaşım, zaman adımının ağdaki en küçük eleman boyunca en hızlı dalga yayılımını yakalayacak kadar küçük olmasını sağlar, böylece sayısal kararlılık korunur. Bir malzemedeki dalga hızı c_d şu şekilde verilir:

$$c_d = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (7)$$

Burada,

E : Elastisite modülü,

ν : Poisson oranı,

ρ : Malzemenin yoğunluğu.

Kararlılık zaman artımı Δt şu şekilde yaklaşık olarak hesaplanır:

$$\Delta t \approx \frac{L_{\min}}{c_d} \quad (8)$$

Burada,

$L_{\min}$: Ağdaki en küçük eleman boyutudur,

c_d : Dalga hızı

ABAQUS yazılımında tercih edilen Dinamik Açık Yöntemi aşağıdaki dört eleman içeren 2 boyutlu dikdörtgen için çözüm bu parçaları içerecektir:

1. Seyrelen Dalga Hızının Hesaplanması
2. Kararlı Zaman Artımının Hesaplanması
3. Zaman Adımı Büyüklüğü

$$\Delta t = 0.9 \times \Delta t$$

4. Rijitlik Matrisinin Hesaplanması [K]

$$K_{\text{elem}} = \sum_{i=1}^4 B_i^T D B_i \det(J_i) w_i \quad (9)$$

B_i : Gauss noktasında değerlendirilen şekil değiştirme-deplasman matrisi

D : Malzeme özellikleri matrisi

$\det(J_i)$: Gauss noktasında Jacobian matrisinin determinanı

w_i : Gauss noktasıyla ilişkilendirilen ağırlık

5. Yığılmış Kütle Matrisinin Hesaplanması [M]
6. Yığılmış Kütle Matrisinin Ters
7. Başlangıç Koşulları:

Yer Değiştirme (u): 0

Hız (v): 0

İvme (a): Başlangıç dış kuvvetine bağlı olarak hesaplanan

8. Belirli zaman adımları için dış kuvvet uygulanır

9. Başlangıç İvmesi.

10. Zaman Adımı Döngüsü Her zaman adımı (i) için:

11. Yer değiştirmeyi güncelleme:

$$u[i] = u[i - 1] + \Delta t * v[i - 1] + 0.5\Delta t^2 * a[i - 1] \quad (10)$$

12. İç kuvvetleri hesaplama:

$$I = Ku[i] \quad (11)$$

13. İvmenin güncellenmesi:

$$a[i] = M^{-1}(P[i] - I) \quad (12)$$

14. Hızın güncellenmesi:

$$v[i] = v[i - 1] + \Delta t * a[i - 1] \quad (13)$$

Her zaman adımı için nihai yer değiştirmeler, hızlar ve ivmeler, kararlı zaman artımıyla birlikte çıktı olarak verilir.

Doğrusal Olmayan Analiz

Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi malzeme özellikleri, geometrik konfigürasyonlar ve sınır koşulları gibi çeşitli kaynaklardan gelen doğrusal olmayan durumları birleştirerek doğrusal varsayımların yetersiz olduğu karmaşık senaryoları ele alır. Örneğin, Drucker-Prager malzeme modellerinin dahil edilmesi, kohezyon ve sürtünmeden kaynaklanan doğrusal olmayan iç kuvvetlerin hesaba katılmasını gerektirir, bu da yer değiştirme-kuvvet ilişkisini karmaşıklaştırır ve doğrusal olmayan analiz gerektirir (Aubin and Ekeland, 2006).

Doğrusal Olmayan Analiz, bir yapının deprem sırasında yaşananlar gibi aşırı yüklere tepkisini etkileyen birden fazla faktörü birleştirir. Plastisite gibi malzeme doğrusal olmama durumlarını ve beton çatlamasına bağlı olarak sertlikteki değişiklikler gibi geometrik doğrusal olmama durumlarını içerir ve bu tür koşullar altında yapısal davranışın daha doğru tahminlerini sağlar. Bu yaklaşım hasar değerlendirmelerinin güvenilirliğini arttırmakta ve depreme dayanıklı tasarımı desteklemektedir (Zhang vd., 2023; Krawinkler, 2006).

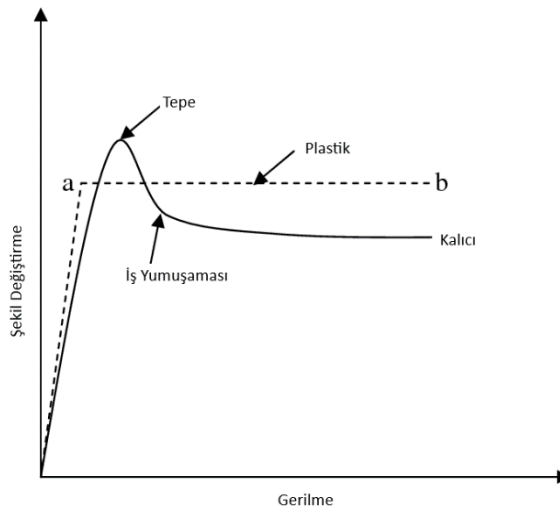
Ayrıca Doğrusal Olmayan Analiz, doğrusal yöntemlerin gözden kaçırabileceği kritik zayıflıkları ve potansiyel hata türlerini belirler. Hesaplama yoğunluğuna rağmen bu analiz, malzeme kullanımını optimize ederek ve doğrusal yöntemlerin doğasında bulunan aşırı muhafazakâr varsayımları azaltarak daha verimli yapısal tasarımların geliştirilmesini kolaylaştırır (Kaveh ve Rahami, 2006).

Zemin Modelleme Yöntemleri

Zemin modellemesi için birçok farklı yöntem bulunmaktadır ve bu yöntemlerin seçimi, modellemesi yapılacak problemin ihtiyaçlarına ve elde etmek istediğimiz kesin sonuçlara bağlıdır. Problemin doğasına ve gereksinimlerine göre en uygun modelleme yaklaşımını belirlemek, analizlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak açısından kritiktir.

Mohr-Coulomb Yöntemi

Mohr-Coulomb modeli, zemin materyaller ve özellikle zeminler bağlamında en yaygın modeldir. Bu modelin karakteristiği ve akma kriteri tipik olarak bir düzlemdeki kayma mukavemeti ile ona etki eden normal gerilme arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsayan Coulomb hipotezini içerir. Kayma Dayanımı Azaltma Yöntemi'ni kullanan bu model, limit denge yaklaşımına dayalı olarak hesaplananlara eşdeğer güvenlik faktörlerini değerlendirebilir ve bazı durumlarda hasar modlarının ve güvenlik faktörlerinin daha iyi tahmin edilmesini sağlar. Ayrıca çakıl, kum ve kaya gibi zemin materyaller yer aldığı simülasyonlarda yük-deplasman hesaplamalarında da başarıyla kullanılabilir. Model, genel gerilme durumunu belirleyerek başlar, burada gerilme-gerinme ilişkileri elastik aralık içinde doğrusallık gösterir ve Hooke kanununa uyar ve gerilme yolunun oldukça uygun bir şekilde doğrudan belirlenebileceği ve Poisson oranının ve sürtünme açısının göreceli büyüklüğüne bağlı olarak saptırıcı gerilme düzleminde basit, parçalı düz çizgilerden oluştuğu bulunmuştur. Şekil 5'te Mohr-Coulomb modelinin elastik ve plastik davranış kabulleri gösterilmektedir (Dawson et al., 1999).



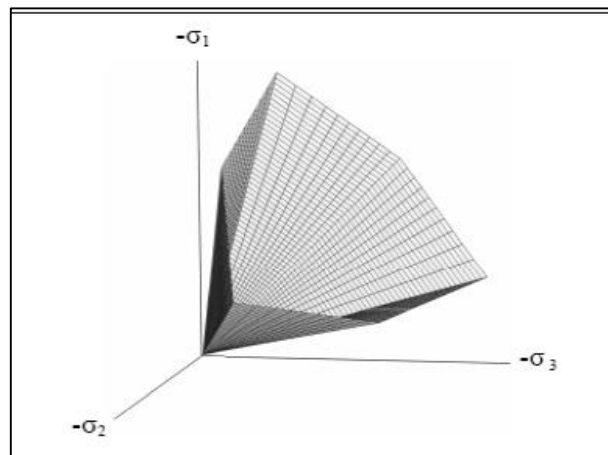
Şekil 5. Mohr-Coulomb modeli elastik ve plastik varsayımı

Mohr-Coulomb Modeli'nin temel hedefi, çökmek malzemelerin kayma gerilme maruz kaldığında hasar davranışını tahmin etmektir. Mühendislere malzemelerin ne zaman deforme olacağı veya dayanım kaybedeceği konusunda çok değerli bilgiler sunar (Kahlström, 2013). Tablo 5'te Mohr-Coulomb malzeme modeli için tanımlanması gereken zemin parametreleri sunulmaktadır.

Tablo 5. Mohr-Coulomb malzeme modeli için zemin tanımlama parametreleri

Parametre	Birim
Poisson oranı	-
Sürtünme açısı	Derece
Dilatasyon açısı	Derece
Kohezyon	kPa
Elastisite modülü	kPa

Mohr-Coulomb Modeli Şekil 6'da gösterildiği gibi üç boyutlu gerilme uzaylarında son derece uyarlanabilir olduğu kanıtlanmıştır. Bu model, plastik davranışı etkili bir şekilde yakalamak için yalnızca iki dayanıklılık parametresine dayanır. Gerçek zemin örneklerindeki başarısızlığa yol açan gerilme kombinasyonlarının, başarısızlık konturunun altıgen şekli ile yakından uyumlu olduğunu içeren gerçek üç eksenli testleri içeren araştırmalar, bu modelin barajların, yamaçların ve temellerin kararlılığını analiz etmek için uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Mohr-Coulomb modeline ait üç boyutlu gerilmeler

Mohr-Coulomb kriteri, çeşitli yükleme koşulları altında zemin davranışını modelleme konusunda mühendislikte geniş kabul görmüş bir yöntemdir. Bu model, temelde zeminlerin kayma gerilmesi kritik bir değere ulaştığında dayanımını kaybettiğini önerir ve bu değer,

zeminin sürtünme mukavemeti ve kohezyon yapıştırıcı özellikleri tarafından belirlenir (Ti et al., 2009). Bu prensip, izotrop malzemeler için matematiksel olarak aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir:

$$\tau = c + \sigma * \tan(\varphi) \quad (14)$$

Burada:

τ : Kayma gerilmesi

σ : Normal gerilme

c : Kohezyon

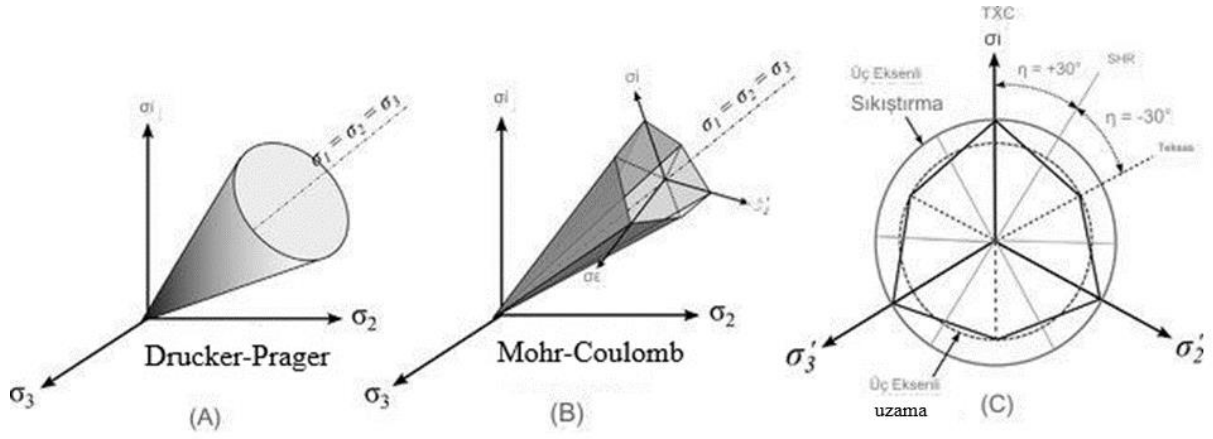
φ : İçsel sürtünme açısı

Mühendisler Mohr-Coulomb kriterini kullanarak, yamaçların kararlılığını, temellerin taşıma kapasitesini belirleyebilir, istinat duvarları ve diğer geoteknik mühendisliği tasarımı ile başa çıkabilirler (Labuz and Zang, 2012). Bu, zemin davranışını anlama ve bilinçli mühendislik kararları verme konusunda değerli bir çerçeve sunar.

Drucker-Prager Yöntemi

Bu yöntem malzeme davranışının modellenmesindeki son derece çok yönlülüğü ve doğruluğu nedeniyle, plastisite teorisi, pratik geoteknik mühendisliği problemlerinin sayısal simülasyonlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kaya, beton, zeminler de dahil olmak üzere çok çeşitli geoteknik malzemeler, basınca bağlı plastik akma davranışı ve elastik olmayan hacimsel genleşme sergiler. Modern eğilim, zemin materyaller davranışına daha yakından benzeyen, giderek daha ayrıntılı ve karmaşık elasto-plastik kurucu modellerin geliştirilmesi yönünde olmuştur. Drucker-Prager Modeli, malzemenin farklı yükleme koşulları altında nasıl davrandığını simüle etmek için değerli bir araç olarak hizmet eder. Bu model, özellikle plastik deformasyona yatkın malzemeleri, metalleri, kayaları, betonu ve zeminleri modellemek için son derece uygundur.

Drucker-Prager modeli Mohr-Coulomb kriterinin temelini genişleterek anahtar parametreler olan kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (φ) ve isteğe bağlı olarak akış gerilme oranını (genleşme açısı) içeren basınca bağlı bir akma yüzeyini tanıtır (Drucker and Prager, 1952). Bu parametreler, malzemenin dış kuvvetlere ve deformasyona verdiği yanıtı kapsamlı bir şekilde sağlar, modelin çok yönlülüğünü ve doğruluğunu garanti eder. Şekil 7'de, Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin karşılaştırmasını göstermektedir.



Şekil 7. Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb karşılaştırması

Kohezyon (c) malzemenin kayma karşı direncini temsil eder. Drucker-Prager modeli içinde kohezyon, akma yüzeyinin devitir gerilme eksenini üzerindeki kesişimini tanımlar. Daha yüksek bir kohezyon değeri, kayma başarısına karşı daha güçlü bir direnci gösterir.

İçsel Sürtünme Açısı (φ) malzemenin kesme deformasyona karşı direnme yeteneğini temsil eder. Bu, gerilme uzayı içinde akma yüzeyinin eğimini belirler. Daha yüksek bir içsel sürtünme açısı, malzemenin çoğu kez derece cinsinden ifade edilen kayma gerilme karşı daha fazla direnme kapasitesini gösterir.

Akış Gerilme Oranı veya Genleşme Açısı, malzemenin hacimsel deformasyona nasıl yanıt verdiğini hesaba katar. Bu açı, etkili gerilme ile hidrostatik gerilme arasındaki açıyı ölçer. Genleşme açısı, malzemenin plastik deformasyon sırasında genişlemesi veya daralmasını gösterir.

Mohr-Coulomb özelliklerini Drucker-Prager'a dönüştürmek için aşağıdaki denklemleri kullanır:

Zeminin Mohr-Coulomb parametrelerini (φ ve c).

Drucker-Prager Kohezyon (c) aşağıdaki denklemi kullanarak hesaplanır:

$$c = 2c \sqrt{\frac{\sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)}} \quad (15)$$

Drucker-Prager içsel sürtünme açısını (φ) aşağıdaki denklemi kullanarak hesaplanır:

$$\tan(\varphi) = \frac{2 * \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \quad (16)$$

Drucker-Prager kriteri malzemenin özelliklerine eklenmesi sonucu çözümde meydana gelecek değişiklikler aşağıda açıklanmaktadır.

İç kuvvetler (I), Drucker-Prager akma kriterini içerecek şekilde değiştirilir:

Gerilme Hesaplama (σ):

$$\sigma = Ku[i] \quad (17)$$

Etkili Gerilme (σ_{eff}):

$$\sigma_{eff} = \sqrt{\frac{3}{2} + s^2} \quad (18)$$

Burada (s), gerilme tensörü, malzeme bozulması veya deformasyonu ile ilişkili gerilmeni bileşenini temsil eder.

Akma Kriteri:

$$\sigma_{eff} = \alpha p + k \quad (19)$$

Burada:

P: Ortalama gerilmeyi temsil eder.

α ve k , Kohezyon (c) ve sürtünme açısı (ϕ) ile ilgili Drucker-Prager parametreleridir.

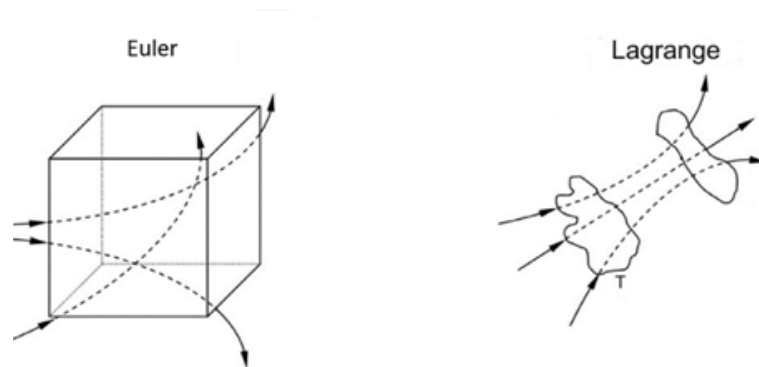
Parametreler α ve k :

$$\alpha = \frac{2\sin(\phi)}{\sqrt{3}(3 - \sin(\phi))} \quad (20)$$

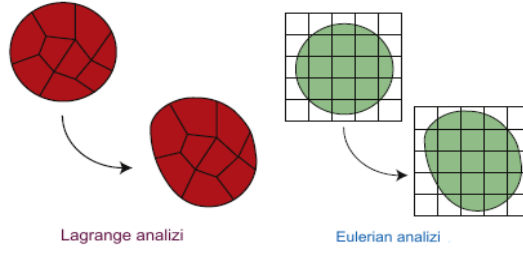
$$k = \frac{6c \cos(\phi)}{\sqrt{3}(3 - \sin(\phi))} \quad (21)$$

Su Modelleme Yöntemleri

Su modelleme için iki farklı araç kullanır. Şekil 8'da, Euler ve Lagrange gösterimini sunarken; Şekil 9'da ise Euler ve Lagrange analizinde sürekliliğin deformasyonunu göstermektedir.



Şekil 8. Euler ve Lagrange (Shadloo et al., 2016)



Şekil 9. Euler ve Lagrange analizinde deformasyon (Qiu et al., 2011)

Euler Yöntemi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri, kapalı alanlarda parçacık taşınımı ve dağılımının modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Euler yöntemi parçacık fazını bir süreklilik olarak ele alır ve korunum denklemlerini kontrol hacmi bazında ve akışkan fazdakine benzer bir biçimde geliştirir. Euler yöntemi popülerliğini iç ortamlardaki parçacık konsantrasyon dağılımlarının incelenmesinde kazanmıştır. Parçacık modellerinin her türünde, parçacık hareketinin ve dağılımının çeşitli özelliklerini ele alan birçok farklı model vardır. Euler yöntemi, parçacık konsantrasyonundaki değişikliği zaman içinde tanımlamak için bir taşıma denklemi kullanır (Legay et al., 2006).

Euler yöntemi, parçacık taşınmasını modellemenin nispeten basit ve hesaplama açısından verimli bir yoldur. Genellikle çalışmalarında kullanılır, burada parçacıklar genellikle küçüktür ve türbülans etkileri baskındır (Zhang and Chen, 2007).

Lagrange Yöntemi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri, kapalı alanlarda parçacık taşınımı ve dağılımının modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Lagrange yöntemi, parçacıkları ayrı bir faz olarak kabul eder ve her bir parçacığın yolunu izler. Parçacık yörüngelerinin istatistiklerini inceleyerek Lagrange yöntemi aynı zamanda parçacık konsantrasyonunu ve diğer faz verilerini de hesaplayabilir. Lagrange yöntemi temel olarak genel parçacık dağılım modelini ve ortalama konsantrasyonun zamansal gelişimini tahmin etmek için kullanılır. Parçacık modellerinin her türünde, parçacık hareketinin ve dağılımının çeşitli özelliklerini ele alan birçok farklı model vardır. Yakın zamanda parçacık konsantrasyon dağılımlarını tahmin etmek için bir Lagrange yöntemi kullanmıştır ve sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Lagrange yöntemi, ayrıntılı parçacık dağılımlarını tahmin edebilirken, önemli miktarda hesaplama çabası gerekmiştir ve bu da uygulamasını sınırlayabilmiştir (Rakhsha et al., 2021).

Ancak birçok durumda parçacık sayısı sınırlı olabilir. Ayrıca, parçacık oluşturma hızı sabit olmayabilir. Lagrange yöntemi, her zaman adımında yeni görüntülemeler oluşturarak bu

tür durumlarla başa çıkabilir. Oluşturulan izlemelerin toplam sayısı, her zaman adımında oluşturulan izlemelerin sayısı ve zaman adımlarının sayısı tarafından belirlenir (Rakhsha et al., 2021).

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde Zaman Adımının Önemi

Zaman adımının, hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında kritik bir rol oynadığı; bu adımın doğru ve kararlı sonuçlar elde etmek için dikkatlice seçilmesi gerekmektedir. Euler-Lagrange yönteminde, zaman adımı, akışkanın parçacık hareketlerini takip etmek için kullanılır; bu, her parçacığın hareketini koordine etmeyi gerektiren karmaşık bir görevdir. Parçacık izleme, dinamikleri simülasyonlarında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir; burada çok sayıda parçacık, akışkanın özelliklerini temsil eder ve zaman adımı, parçacık hareketini takip etmek için kullanılır. Sınır koşulları ise akışkanın sınırlarını belirler ve bu sınırlarla etkileşimini kontrol eder; özellikle karmaşık sınır koşulları, zaman adımı seçimini daha da zorlaştırabilir. Genel olarak, zaman adımı seçimi, dinamik simülasyonlarının başarısı için hayati bir öneme sahiptir, çünkü doğru ve kararlı sonuçlar elde etmek için dikkatlice seçilmelidir (Meduri et al., 2018).

Birleşik Euler-Lagrange Yöntemi

Başlangıçta sonlu elemanlar yöntemindeki iki temel matematiksel formülasyon nedeniyle Euler ve Lagrange olmak üzere iki tür modelle karşılaşılmıştır. Euler Formülasyonda ağ uzayda sabitlenmiştir ve malzeme bunun içinde hareket eder, Lagrange formülasyonunda ağ malzemeye birlikte deforme olur. Birleşik Euler-Lagrange tekniği hem Euler hem de Lagrange formülasyonlarını içerir. Genellikle akışkan yapı etkileşimlerini incelemek için kullanılır. Birleşik Euler-Lagrange yönteminin, klasik Lagrange yöntemini kullanırken zorluklar ortaya çıkan büyük deformasyonları içeren problemleri çözmek için çok uygun olduğuna dikkat edin. Ayrıca yöntemin ağ hassasiyetini de vurgularlar (Qiu et al., 2011).

İlk olarak, tüm sıvıyı incelemek amacıyla, bir kafes sistem oluşturulur. Daha sonra, sıvıya küçük parçacıklar veya nesneler eklenir. Bu küçük parçacıklar belirli kurallara uyarak etrafta hareket ederler. Hareket ettikleri sırada ağ sabit kalır ve bu ağ noktalarındaki tüm sıvı hakkında bilgi sağlar.

Küçük parçacıklar ve ağ birlikte çalışır ve birbirleriyle önemli bilgileri paylaşırlar. Bu yöntem, sıvıların nesnelerin etrafında nasıl hareket ettiğini veya küçük parçacıkların geniş bir sıvı alanında nasıl hareket ettiğini öğrenmek istediğimiz durumlarda bize yardımcı olur.

Birleşik Euler-Lagrange Yöntemi, aşırı deformasyonlar, parçalanma ve malzeme karışımı karşısında kendini gösterir. Diğer yöntemlerin aksine, bu karmaşıklıkları mesh

distorsiyonu olmadan ele alır ve en ufak hataların bile felaket olabileceği simülasyonlar için bile hassas malzeme temsili sağlar (Ducobu et al., 2016).

Dinamik sonlu eleman analizi için Birleşik Euler-Lagrange formülasyonunu ve $\beta=0$ ve $\gamma=1/2$ değerlerine sahip Newmark Zaman Entegrasyon Yöntemi'ni kullanarak açık çözüm yönteminin matematiksel gösterimi yapılabilir. (*Newmark Zaman Entegrasyon Yöntemi Yapıların zaman içindeki dinamik tepkisini simüle etmek için güvenilir ve etkili bir yol sağlayarak onu yapı dinamiği ve deprem mühendisliği alanında bir temel taşı haline gelmiştir.*)

Dinamik sonlu eleman ayrıklaştırması şu şekilde yazılabilir:

$$M\ddot{u} = P - I \quad (22)$$

Burada:

M: Kütle matrisi

$\ddot{u}$: İvme vektörü

P: Dış kuvvet vektörü

I: İç kuvvet vektörü

Zaman Entegrasyon Şeması $\beta=0$ ve $\gamma=1/2$ parametrelerine sahip Newmark Zaman Entegrasyon Şeması kullanılarak, yer değiştirme ve hız güncelleme denklemleri şu şekildedir:

Yer değiştirme güncelleme:

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \dot{u}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{u}_n \quad (23)$$

Hız güncelleme:

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \Delta t ((1 - \gamma) \ddot{u}_n + \gamma \ddot{u}_{n+1}) \quad (24)$$

$\gamma=1/2$ olduğunda, bu şu şekilde basitleştirilir:

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \Delta t \ddot{u}_{n+1} \quad (25)$$

Başlangıç Koşulları Başlangıç yer değiştirme, hız ve ivme sıfır kabul edilir:

$$u_0=0, \dot{u}_0=0, \ddot{u}_0=0$$

Kararlı Zaman Artırımının Hesaplanması

Eleman Matrisleri rijitlik Matrisi K ve Toplam kütlesi matrisi M

Zaman Adımlama Prosedürü

Başlangıç ivmesi:

$$\ddot{u}_0 = M^{-1}(P_0 - Ku_0) \quad (26)$$

Her zaman adımı n için 0 'dan N-1 'e kadar:

Yer değiştirme güncelleme:

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \dot{u}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{u}_n \quad (27)$$

İç kuvvetlerin hesaplanması:

$$I_{n+1} = Ku_{n+1} \quad (28)$$

İvmenin güncellenmesi:

$$\ddot{u}_{n+1} = M^{-1}(P_{n+1} - I_{n+1}) \quad (29)$$

Hızın güncellenmesi:

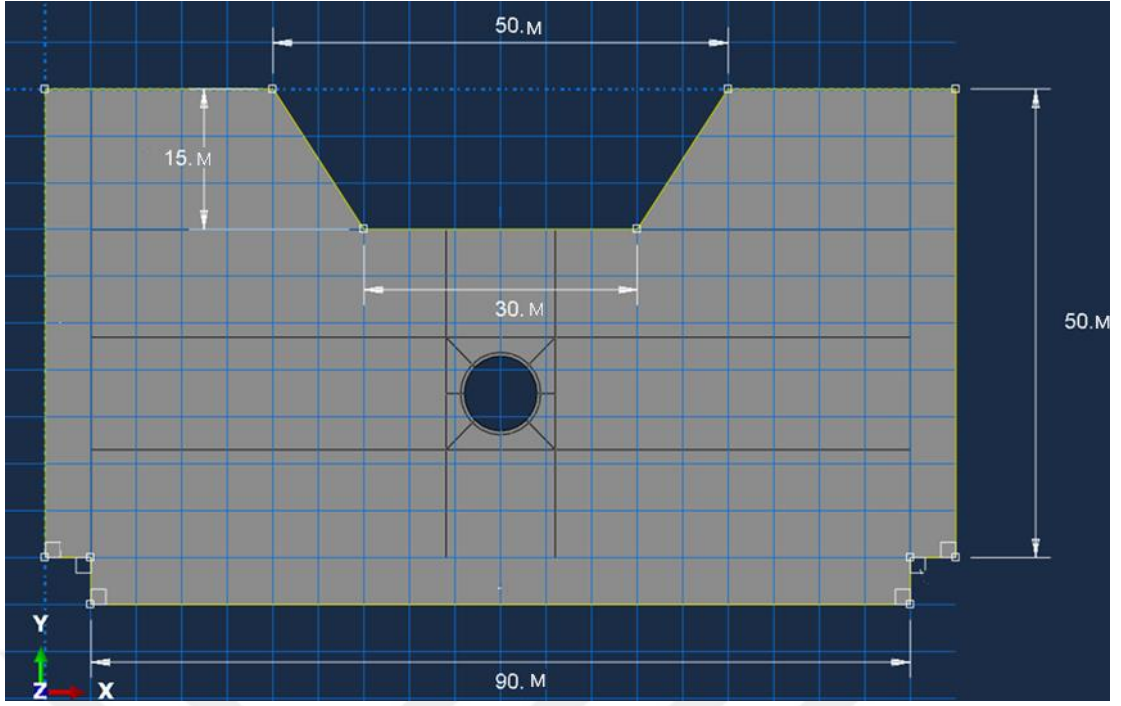
$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \Delta t \ddot{u}_{n+1} \quad (30)$$

Deprem Yüğü Etkisinde Kanyon Altında Bulunan Tünelin Dinamik Analizi

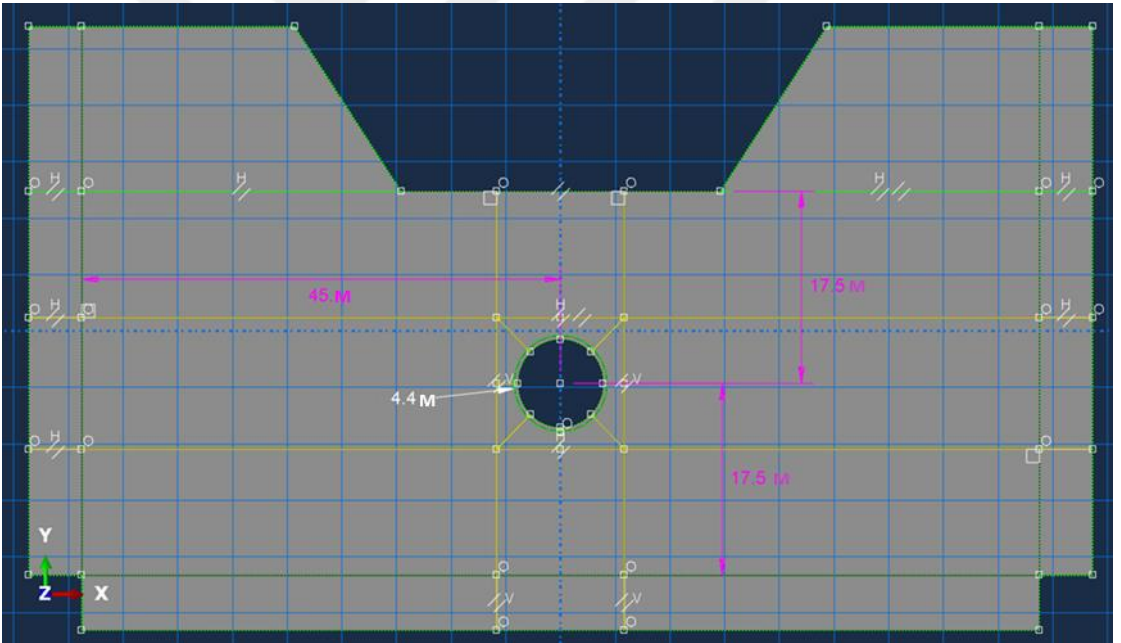
Bu tez çalışması ABAQUS /Explicit yazılım paketi içinde gelişmiş doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemlerini kullanmaktadır. Bu, karmaşık 3 boyutlu tünel davranışının titiz bir şekilde incelenmesini sağlamaktadır. ABAQUS kullanıcı arayüzü aracılığıyla oluşturulan sonlu eleman modelleri, bir zemin alanı içine gömülü tünel yapısını içerir. Sınırsız bir alanı gerçekçi bir şekilde simüle etmek için sol, sağ ve alt sınırlara sonsuz elemanlar uygulanır. Ek olarak, modelde kapsamlı bir analiz için kanyon şeklindeki bir topografya tanımlanmıştır.

Kanyon Altında Tünel Model Tanıtımı

Çalışmada Şekil 10'da kesiti gösterilen bir model kullanılmıştır. Ayrıca, Şekil 11'de iç çap yapısı detaylı bir şekilde gösterilmekte problem alanının kapsamlı bir görünümü sunulmaktadır. İlerleyen adımlar hem zemini hem de tünel yapısını temsil etmek için bir model oluşturmayı içermektedir. Tünel, bu 3 boyutlu yapıda olup 400 mm kalınlığa sahiptir ve tünelin çapı 6 metredir. Analize esas hesaplamada matematiksel sorunlar olabileceğinden modelin alt köşe noktalarından köşe elemanlar çıkarılmıştır.



Şekil 10. Kanyon altındaki tünel modeline ait kesitin dış boyutları



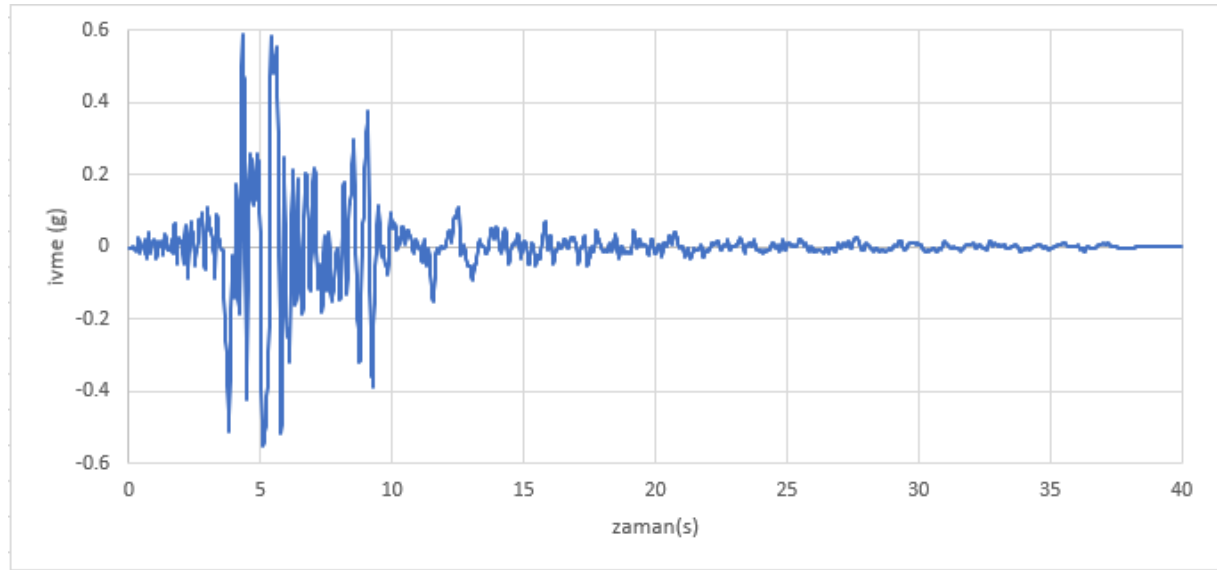
Şekil 11. Kanyon altındaki tünel modeline ait kesitin iç boyutları

Bu çalışmada kullanılan tüm modellere uygulanan deprem yükü, 17 Ocak 1994'te meydana gelen ve önemli büyüklükte ve etkiye sahip olan Northridge depremi ivme kayıtları olmuştur. Bu deprem, Kaliforniya'nın Los Angeles bölgesindeki San Fernando Vadisi'nde gerçekleşmiştir. Depremi moment büyüklüğü 6.7 olarak hesaplanmıştır. Bu yer hareketi kaydı, problem kapsamında yapılar tarafından deprem kuvvetleri altında deneyimlenen dinamik yük koşullarını simüle etmek için kritik öneme sahiptir ve ilgili parametreleri Tablo 6'da sunulmaktadır.

Tablo 6. 6.7 Büyüklüğündeki Northridge depremi parametreleri

Bileşen	İstasyon	Faya mesafe (km)	PGA (g)	PGV (cm/sn)	PGD (cm)	PGV/PGA
NWH360	Newhall	7.1	0.590	97.2	38.05	0.168

Şekil 12’de dinamik analizler kullanılan deprem kaydına ilişkin ivme-zaman grafiği sunulmaktadır.



Şekil 12. Uygulanan yer hareketi ivme - zaman grafiği

Sönümlenme titreşen sistemin enerjisini kademeli olarak azalmasıdır. Enerji sönümlenme malzemeler içindeki içsel sürtünme veya sönümlenme mekanizmalarının tanıtılması ile gerçekleştirilebilir. Sönümlenme, yapıların dinamik yük etkileri altındaki istikrarını ve güvenliğini sağlamak için ayrılmaz bir rol oynar. Bu nedenle, yapısal tasarımda ve mühendislikte sönümlenme mekanizmalarının kullanımı önemli bir konudur.

İlk olarak sabit sönümlleme aralığını hesaplanır:

$$w_1 = f_1 * 2 * \pi \quad (31)$$

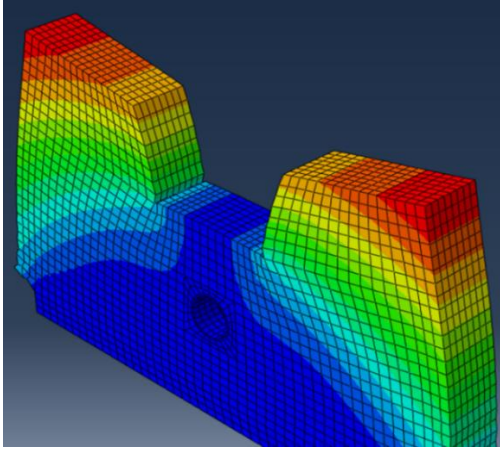
$$w_2 = f_2 * 2 * \pi \quad (32)$$

w_1 : Birinci frekans temsil eder.

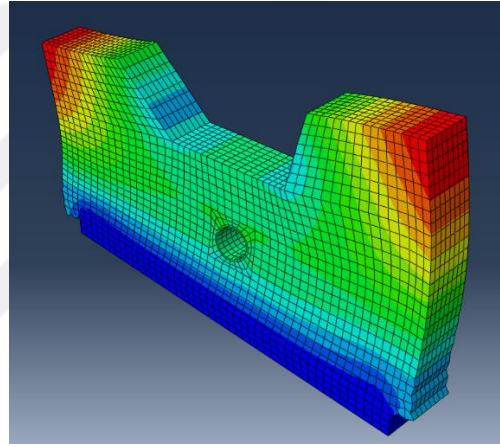
w_2 : İkinci frekans temsil eder.

f_1, f_2 : Bu değerler, sistemin doğal frekansını temsil eder.

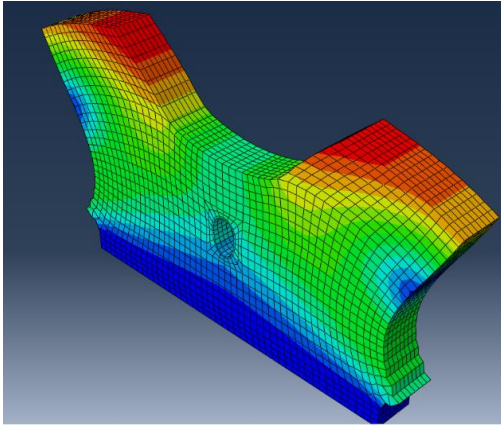
Kanyon Altında Tünel Modelinin teorik modal analizleri ve mod şekilleri Şekil 13, Şekil 14, Şekil 15, Şekil 16'de ve Tablo 7'de sunulmaktadır.



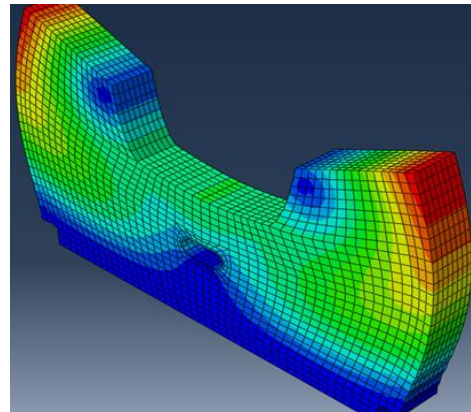
Şekil 13. 1.28 Hz doğal frekanslı mod şekli



Şekil 14. 1.97 Hz doğal frekanslı mod şekli



Şekil 15. 2.20 Hz doğal frekanslı mod şekli



Şekil 16. 2.42 Hz doğal frekanslı mod şekli

Tablo 7. Kanyon Altında Tünel Modelinin Modal Analiz Sonuçları

Mod No	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	1.28	Kanyon kenar duvarlarının aynı anda kanyon içine doğru kapanma/eğilme hareketi
2	1.97	Tüm sistemin düşey doğrultuda Burulma hareketi
3	2.20	Kanyon kenar duvarlarının aynı anda kanyon dışına doğru açılma/eğilme hareketi
4	2.42	Modelin bütün olarak uzun doğrultuya paralel yönde yanal eğilme hareketi

Hesaplamalarda kullanılacak sönüm parametreleri hesabında birinci ve ikinci mod şekli için hesaplanan f_1 , f_2 değerleri dikkate alınmıştır. Bu değerler kullanılarak; W_1 ve W_2 ve devamında aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibi α ve β değerlerini hesaplanmıştır.

Sönümleme oranı:

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2 \cdot w_1} + \frac{\beta \cdot w_2}{2} \quad (33)$$

$$\alpha = 2 * \zeta \left(\frac{w_1 \cdot w_2}{(w_1 + w_2)} \right) \quad (34)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot \zeta}{(w_1 + w_2)} \quad (35)$$

α : Kütle oransal sönümleme için Rayleigh sönümleme katsayısı

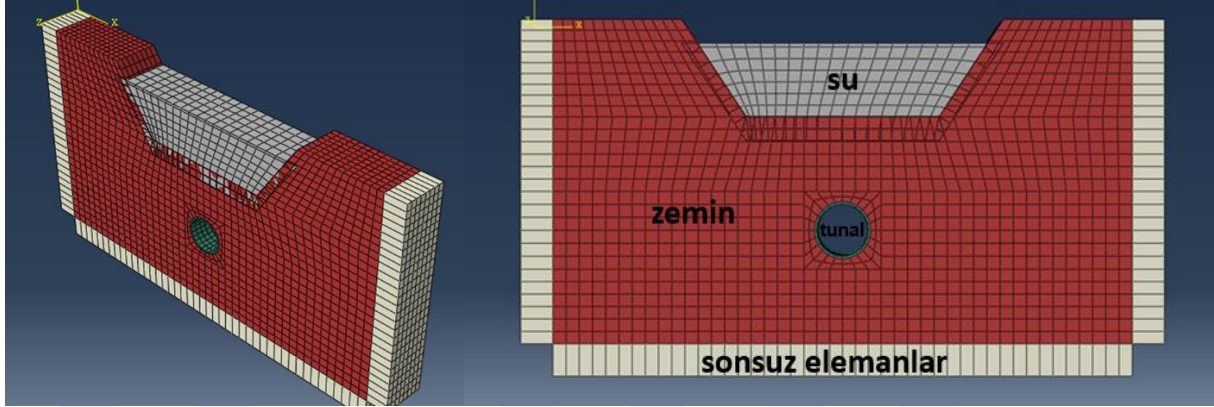
β : Direnç oransal sönümleme için Rayleigh sönümleme katsayısı

ζ : Sönüm oranı

α ve β , modelin şeklinin aynı olması nedeniyle aynı doğal frekanslara sahip oldukları için tüm modeller için kullanılacaktır (Jaimes, 2017).

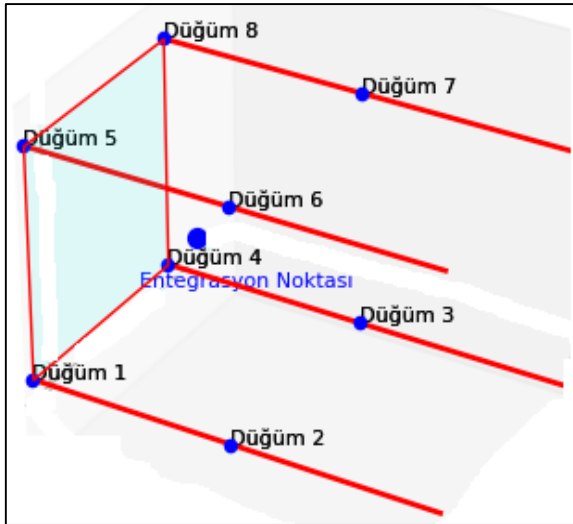
Modeller sadece malzeme özelliklerinde farklılık gösterecekleri için homojen bir yapı paylaşacaktır. Bu farklı malzeme özellikleri, her bir zemin özelliğindeki değişiklikleri vurgulayan bir tabloda sıralanacaktır. Bu bölümdeki odak, modelin yapısını sunmaya yöneliktir. Ardından, modelleme sürecinin her adımında, üzerinde durulan belirli zeminler özellikleri ile bu zeminler parametrelerinden elde edilen ilgili sonuçları detaylandırılacaktır.

Sonlu eleman modeli dört ana ögeyi içermektedir. Bunlar; zemin, su, beton tünel ve sonsuz elemanlardır. Bu konfigürasyon Şekil 17'de görsel olarak tasvir edilmiştir. Ağ yaklaşımımızda, modelimizin farklı bileşenlerine özgü olarak uyarlanmış belirli sonlu eleman tipleri kullanılmıştır.

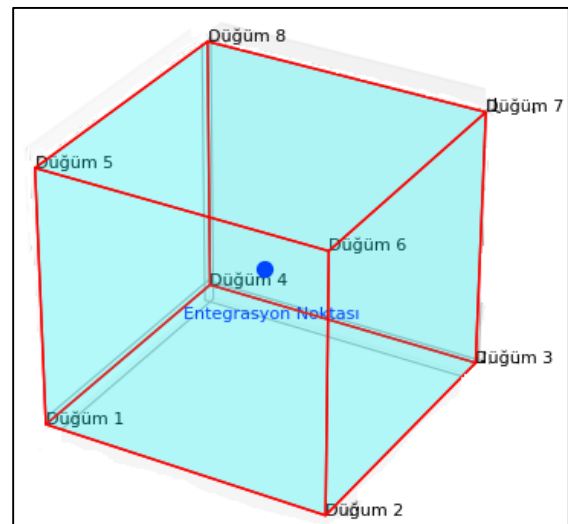


Şekil 17. Kanyon altında tünel modelinin bileşenleri

Sonsuz eleman azaltılmış entegrasyon içeren CIN3D8 Şekil 18'de, 8 düğümlü lineer eleman kullanılarak elde edilmiştir. Zemin ve beton modellenirken azaltılmış entegrasyon (hesaplama verimliliğini ve bazen doğruluğu artırmak için sonlu elemanlar yönteminde daha az entegrasyon noktasının kullanılmasını ifade eder) içeren C3D8R Şekil 19'de, 8 düğümlü lineer elemanı kullanılmıştır. Suyun doğru bir temsili için azaltılmış entegrasyon içeren EC3D8R Şekil 19'de, 8 düğümlü lineer Euler elemanı kullanılmıştır.



Şekil 18. CIN3D8 sonsuz eleman

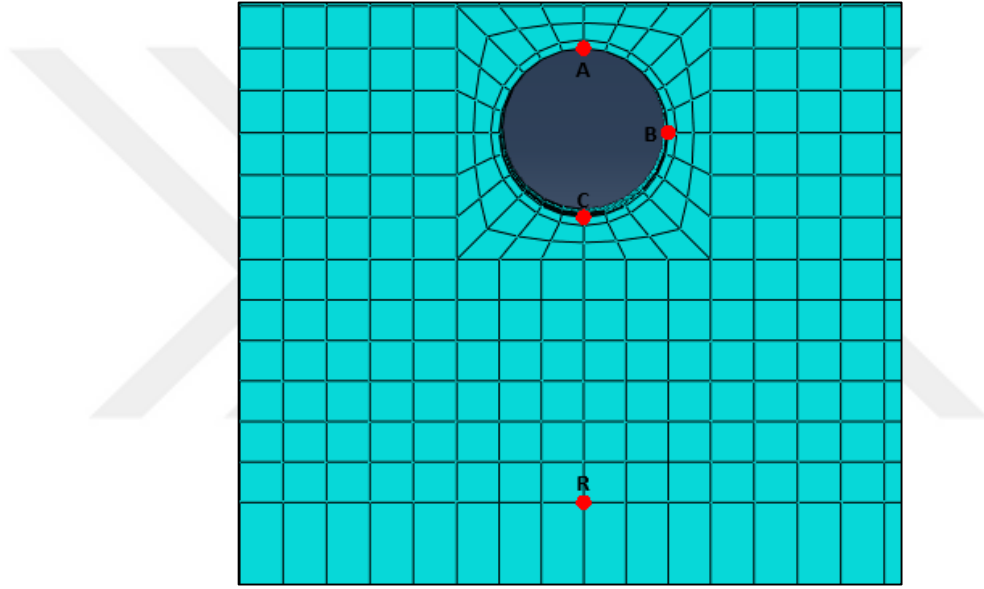


Şekil 19. C3D8R, EC3D8R eleman

Bu kapsamlı ağ stratejisi, analizde her ögenin benzersiz özelliklerini yakalamamıza olanak tanımış, böylece tüm sistemin güçlü ve doğru bir simülasyonu sağlanabilmiştir.

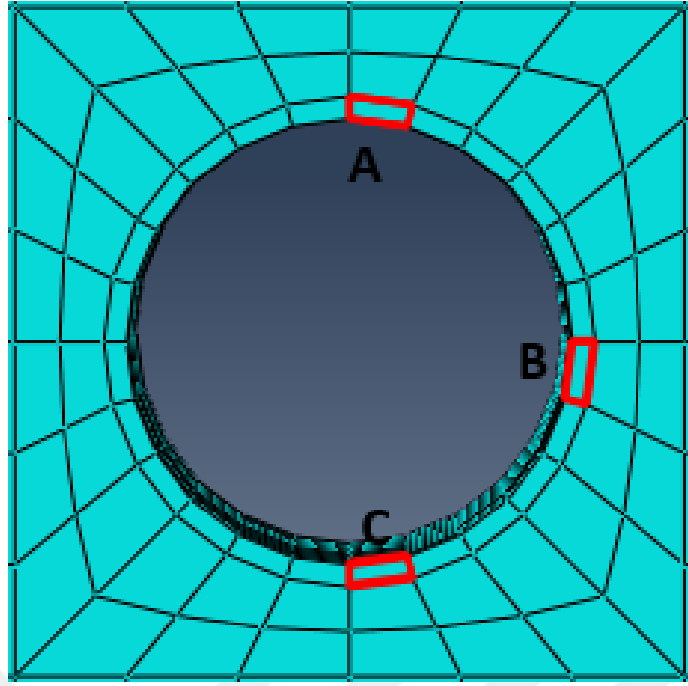
Tünel betonu toplam 240 sonlu eleman ile 950 sonsuz eleman; zemin bileşeni 8090 su 945 eleman ile temsil edilmiştir. Modelin uzunluğu 10 m'dir. Bu elemanların çeşitli bileşenler arasındaki dağılımı, analizde tünel sisteminin detaylı ve kapsamlı bir sayısal temsilini sağlar, böylece farklı koşullar ve yük senaryoları altında davranışının derinlemesine incelenmesine olanak tanır.

Yer değiştirme hesapları tünelin iç çapı boyunca üç noktada (A, B ve C) ve sismik yükün uygulandığı tabanında bir referans nokta (R) yapılmıştır. Yer değiştirme değerlerinin alındığı noktaların model kesiti üzerindeki görünüşleri Şekil 20'de sunulmaktadır. Her noktanın yer değiştirmesi, referans noktasından çıkarılarak, her bir nokta için yer değiştirme ayrı ayrı belirlenmiştir.



Şekil 20. Kanyon altındaki tünel modelinde yer değiştirme hesap için kullanılan noktalar

Benzer şekilde ortalama Von Mises gerilme hesapları da Şekil 21'de gösterilen noktalarda (A, B ve C) yapılmıştır. Bu noktalara karşılık gelen her bir eleman için ayrı ayrı gerilme hesapları yapılmıştır.



Şekil 21. Kanyon altındaki tünel modelinde gerilme hesap için kullanılan elemanlar

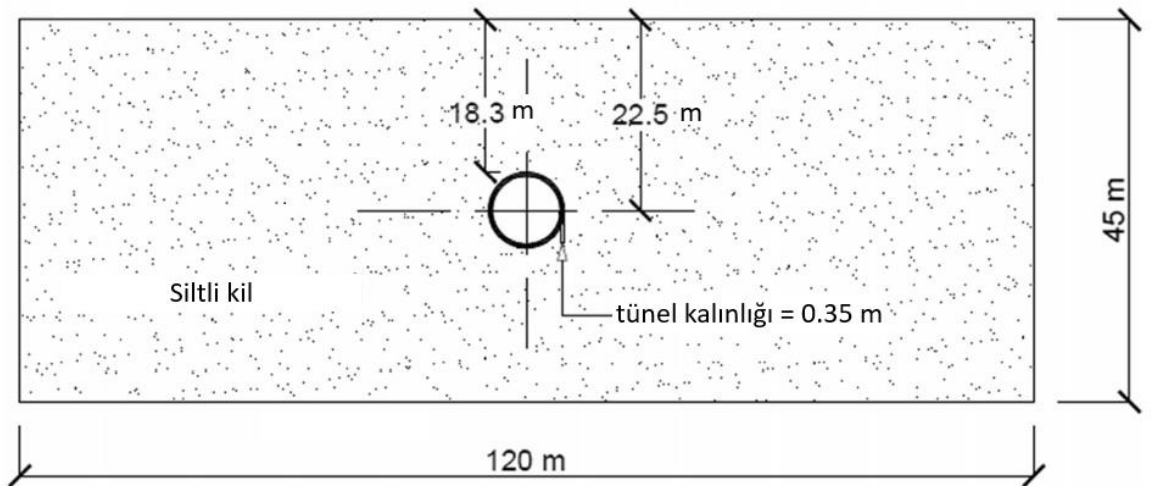
Analitik zmlleme süreci iki ardışık adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda yer çekimi yükü uygulanmış ve ardından ikinci adımda deprem yükü etki ettirilmiştir. İlk adım, başlıca yer çekimi kuvvetlerinin etkilerine odaklanan iki saniyelik bir süreyi kapsamaktadır. İkinci adım ise 10 saniyelik bir süre boyunca, yapının deprem kuvvetleri etkisi altındaki tepkisine derinlemesine inmektedir. Bu adım adım yaklaşım, yapısal davranışın kapsamlı bir şekilde incelenmesine olanak tanır, analizin farklı aşamalarında hem yer çekimi hem de deprem yüklerini dikkate alır.

ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, önce model doğrulamaları tartışılacak ve her bir doğrulamanın problemin modellenmesine nasıl yardımcı olduğu açıklanacaktır. Bu çalışmada dikkate alınan doğrulamalar üç ana başlık altındadır. İlk doğrulama, deprem yükü altındaki bir tünelin modellenmesidir. Bu doğrulama, böyle bir problemi modellemenin temel adımlarını öğrenmemize yardımcı olur, özellikle de geçerli sonuçlar elde etmek için ağ yapısının iyi bir şekilde oluşturulma yöntemini öğretir. İkinci doğrulama, çeşitli yük varyasyonları altında istinat duvarının modellenmesidir. Bu doğrulama, yük uygulamasını daha iyi anlamamızı sağlar, özellikle de zemin ve beton arasındaki etkileşimi ve bu etkileşimin etkilerini nasıl modelleyeceğimizi öğretir. Üçüncü doğrulama ise deprem yükü altındaki bir baraj problemidir. Bu doğrulama zemin, su ve betonun etkileşimini ve sismik yükün bu unsurlar üzerindeki etkisini içerir. Bu doğrulama, suyun etkilerini doğru bir şekilde temsil etmek için su modelleme sürecine özellikle vurgu yapar.

Deprem Yükleri Altında Tünel Modelinin Doğrulanması

Khan et al. (2022) yılında yaptıkları çalışmada, çeşitli zemin türleri ve farklı doygunluk seviyelerini kullanarak bir tünel modelini çevreleyen zeminlere deprem yükleri uygulamışlardır. Bu doğrulama sürecinde kuru zemin koşulları kullanılmıştır. Şekil 22’de modelin görsel temsili ve boyutları sunulmaktadır (Khan et al., 2022).



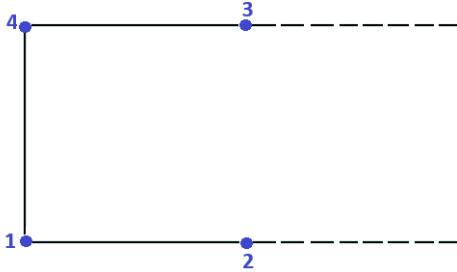
Şekil 22. (Khan et al., 2022) çalışmasında yer alan tünel modelinin boyutları

(Khan et al., 2022) çalışmasında sunulan tünelin modellenmesinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 8'de verilmektedir.

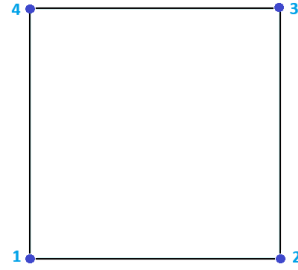
Tablo 8. (Khan et al., 2022) çalışmasında sunulan tünel modelinin analizinde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme tipi	Kuru yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı (ν)	Kohezyon (C) (KPa)	Sürtünme açısı (°)
Siltli kil	1680	25	0.35	17	25
Betonarme	2500	25,200	0.2	0	

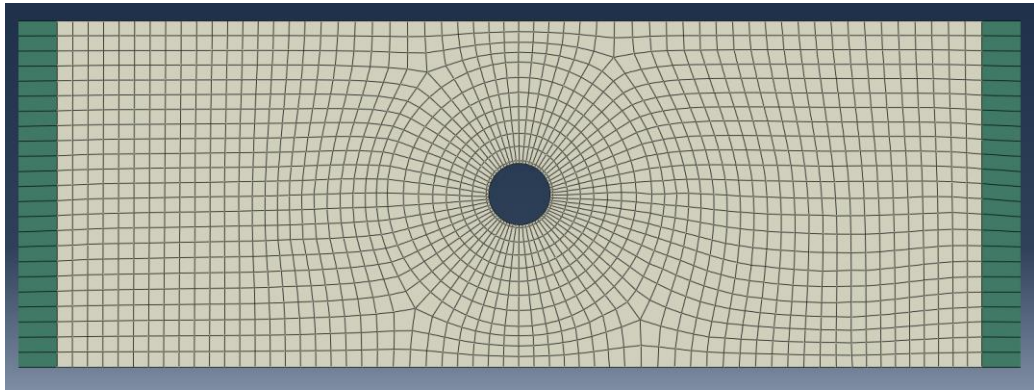
Bu çalışmada, tünel bölgelerinin uygun oranlara sahip olduğundan emin olmak için düzlem gerilme modeli kurulmuştur. Deformasyonların doğru temsilini sağlamak için azaltılmış entegrasyon ve kontrolüne sahip 4 düğümlü düzlem gerilme dörtgen elemanı CPE4R, Şekil 23'te görüldüğü gibi seçilmiştir. Ayrıca, simülasyon sürecine kapsamlılık katmak için 4 düğümlü lineer, tek yönlü sonsuz tip eleman CINPE4, Şekil 24'te gösterildiği üzere modele dahil edilmiştir. Bu kapsamlı yaklaşım, tünelin farklı yük koşulları altındaki yapısal davranışının sağlam bir şekilde analiz edilmesini sağlamıştır. Tünel modelinin sonlu eleman ağı Şekil 25'te gösterilmiştir.



Şekil 23. CINPE4 sonsuz eleman

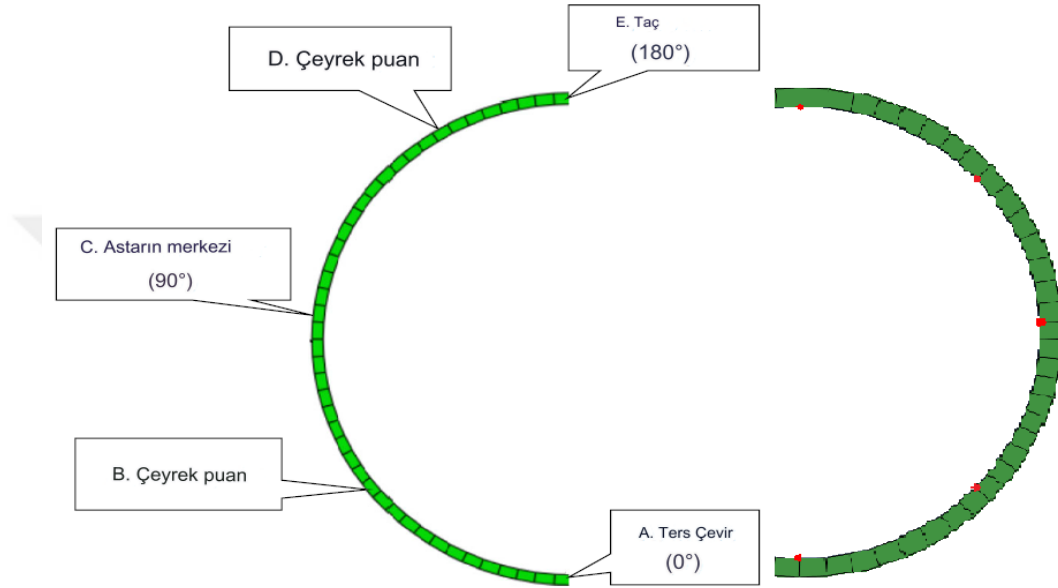


Şekil 24. CPE4R eleman



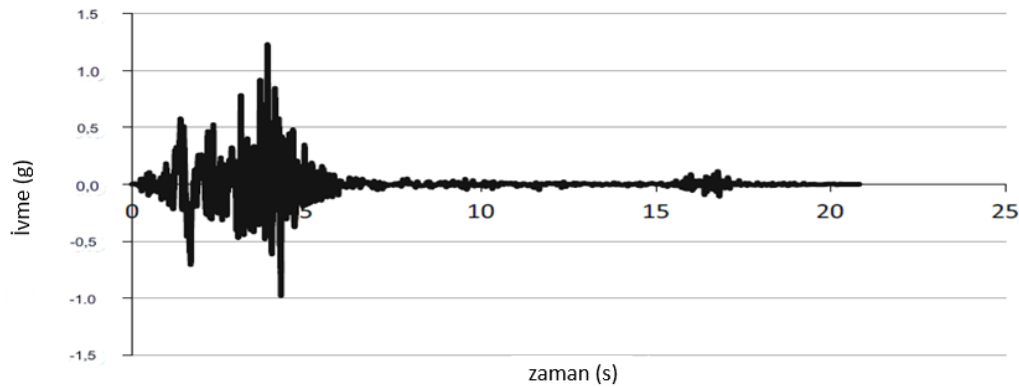
Şekil 25. (Khan et al., 2022) çalışmasında yer alan tünel modelinin Sonlu eleman ağı (yeşil alan sonsuz elemanlar)

Tünelin iç çapı boyunca düğüm seçimi analizde kritik bir adımdır. Bu düğümler, tünelin geometrik özelliklerine uygun şekilde yönlendirilmiş olan yönlendirme açısına göre titizlikle yerleştirilmiştir. Yaklaşımımızın doğruluğunu ve sonuçlarımızın güvenilirliğini teyit etmek için tercih edilen düğüm atama yöntemi Şekil 26’da sunulmaktadır. Bu çalışmada da bu düğüm yerleştirme stratejisi kullanılarak sonuçların anlamlı bir karşılaştırmasının yapılması ve nihayetinde tünelin deprem ve diğer yük koşulları altındaki yapısal davranışının irdelenmesi amaçlanmıştır.

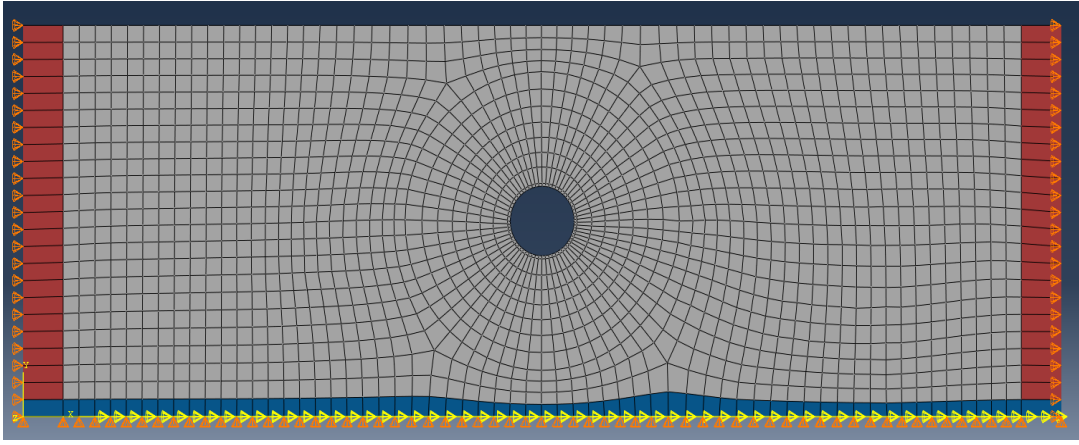


Şekil 26. Khan et al. (2022) çalışmasında yer alan tünel modeline ilişkin noktaların seçiminde kullanılan yöntem

Ağ oluşturulduktan sonra modele yerçekimi ve Şekil 27’de sunulan deprem yükleri uygulanmıştır. Şekil 28’de model sınır koşulları sunulmaktadır. Deprem yükünün uygulanması, sonraki dinamik analizleri yönlendirmede kritik bir rol oynamaktadır. Elde edilen analiz sonuçları Khan et al. (2022) çalışmasında sunulan veri ile birlikte değerlendirilmiş ve modelin doğruluğu çalışılmıştır.

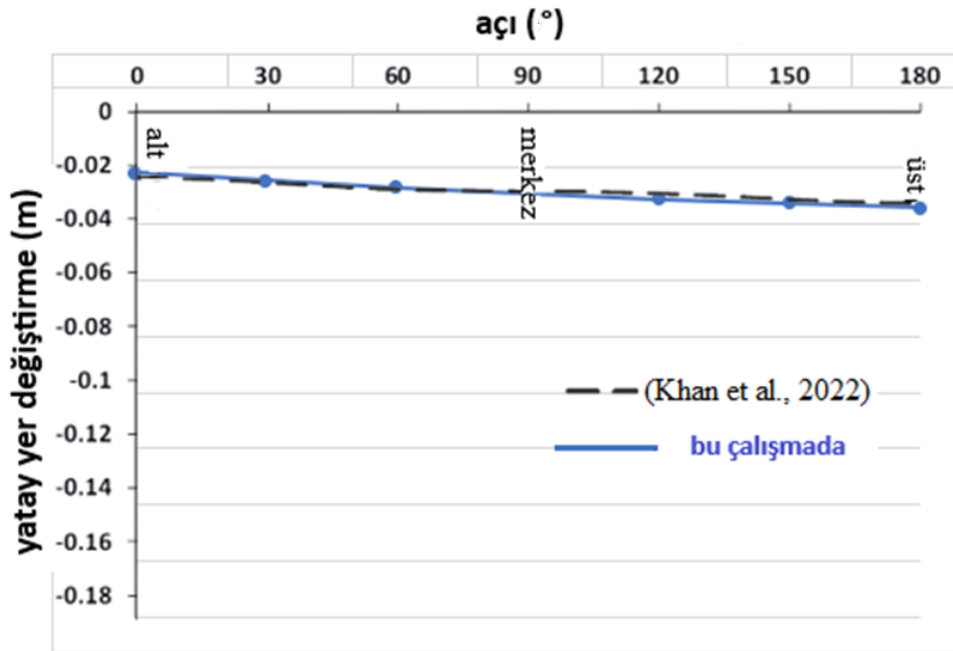


Şekil 27. Khan et al. (2022) çalışmasında yer alan tünel modeline uygulanan sismik yük



Şekil 28. Khan et al. (2022) çalışmasında yer alan tünel modelinin sınır koşulları

Şekil 29'da (Khan et al., 2022) çalışmasında yer alan tünel modeli için elde edilen yer değiştirme sonuçları ile bu tez kapsamında yapılan modelleme ve analiz neticesinde elde edilen sonuçlar birlikte gösterilmektedir. Yapılan modellemenin Khan et al. (2022) çalışmasında yer alan tünel çalışmasında sunulan sonuçlarla aynı analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle, tünel kaplamasında gözlemlenen ovalleşme (yuvarlaklaşma) deformasyonları, orijinal araştırma makalesinde rapor edilen bulgularla önemli ölçüde örtüşen bir sonuç olarak tespit edilmiştir. Doygun zemin koşullarında, üst kısımda 384 mm ve alt kısımda 254 mm'lik yer değiştirme değerleri elde edilmiş olup, bu değerler önceki çalışmada bildirilenlerle uyum içindedir. Hesaplanan sonuçlar ile literatürdeki bulgular arasındaki bu paralellik, kullanılan simülasyon yönteminin geçerliliğini ve doğruluğunu kanıtlamakta, tünelin deprem yükleri altındaki davranışına ilişkin ortaya konulan anlayışı pekiştirmektedir.



Şekil 29. Sayısal ve Literatür Verilerinin Karşılaştırılması: Yer Değiştirme ve Açı İlişkisi

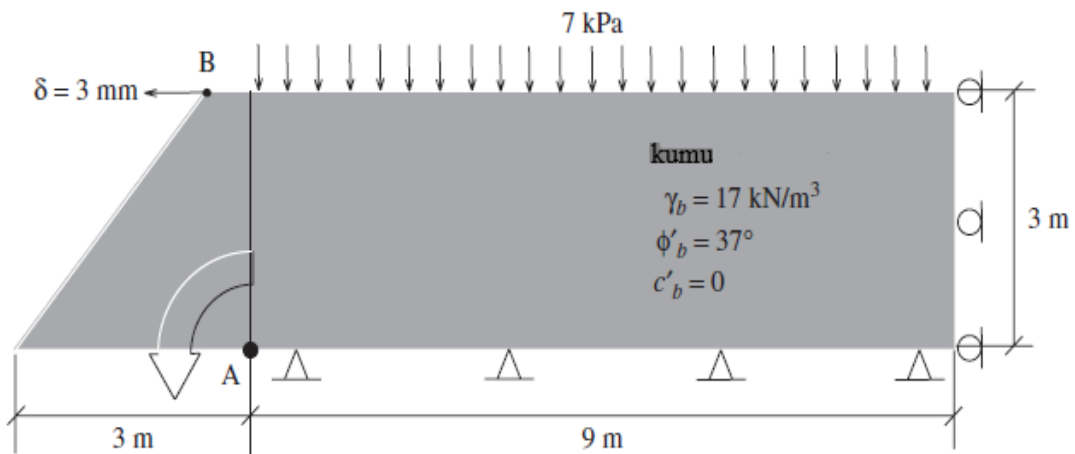
İstinat Duvar Analizi Doğrulanması

Tez çalışmasında yapılan ikinci model doğrulama çalışması bir istinat duvarı için yapılmıştır. Burada amaç özellikle istinat duvarı arkasındaki toprak/zemin modellemesi için kullanılacak matematiksel unsurların doğrulanmasıdır. Bu çalışmada, "Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications" adlı kitapta sunulan bir problem temel alınarak, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanılarak kum dolgulu bir istinat duvarının davranışı analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı, kitaptaki parametrelerin yeniden modellenmesi ve hesaplanması, ardından elde edilen sonuçların literatürdeki referans çözümlerle karşılaştırılmasıdır (Helwany, 2007).

Helwany (2007) tarafından vurgulanan problemin önemi yan yüklerin karmaşık hesaplanmasıdır. Bu senaryoda, 3 metre yüksekliğinde bir kum dolgusu ve bu dolguyu destekleyen bir beton duvar bulunmaktadır. Ayrıca, kum dolgusunun yüzeyine 7 kPa'lık bir yük uygulanmaktadır. Problemin çözümü şu adımları içermektedir:

1. 3 metre yüksekliğindeki destek duvarındaki zemin basıncının dağılımının belirlenmesi.
2. İstinat duvarının dönerek kum dolgusundan uzaklaştığı durumda aktif zemin basıncının hesaplanması ve Rankine'in aktif zemin basıncı teorisi ile karşılaştırılması.
3. İstinat duvarının dönerek kum dolgusuna doğru hareket ettiği durumda pasif zemin basıncının hesaplanması ve Rankine'in pasif zemin basıncı teorisi ile karşılaştırılması.

Şekil 30'da Helwany (2007) kitabında sunulan probleme ilişkin analizde kullanılan model ve yüklerin genel bir görünümü sunulmaktadır.



Şekil 30. Beton istinat duvarı- desteklenen 3 m yüksekliğinde kum dolgusu

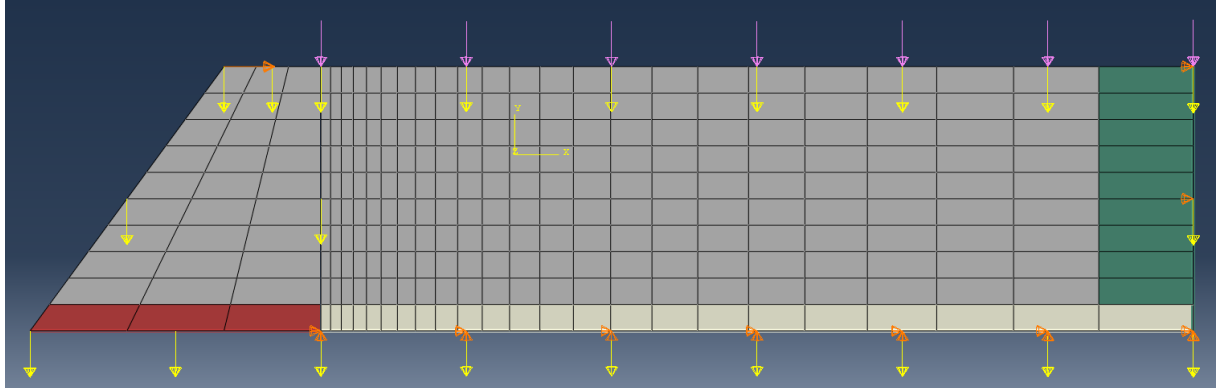
Bu örneğin amacı, beton bir istinat duvarı tarafından desteklenen kum tabakası için sınır denge analizini gerçekleştirmektir. Geri doldurma kumunun davranışını simüle etmek amacıyla model parametreleri, klasik Mohr-Coulomb akma kriteri ile uyumlu hale getirilmiştir. Analiz iki boyutlu düzlem gerilme modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kum tabakasının

yüksekliği 3 metre olup, zemin yan desteği 3 metre yüksekliğindeki bir istinat duvarı tarafından sağlanmaktadır. Modellemede kullanılan malzeme özellikleri Tablo 9'da sunulmaktadır.

Tablo 9. İstinat duvarı modelinin analizinde kullanılan malzeme özellikleri

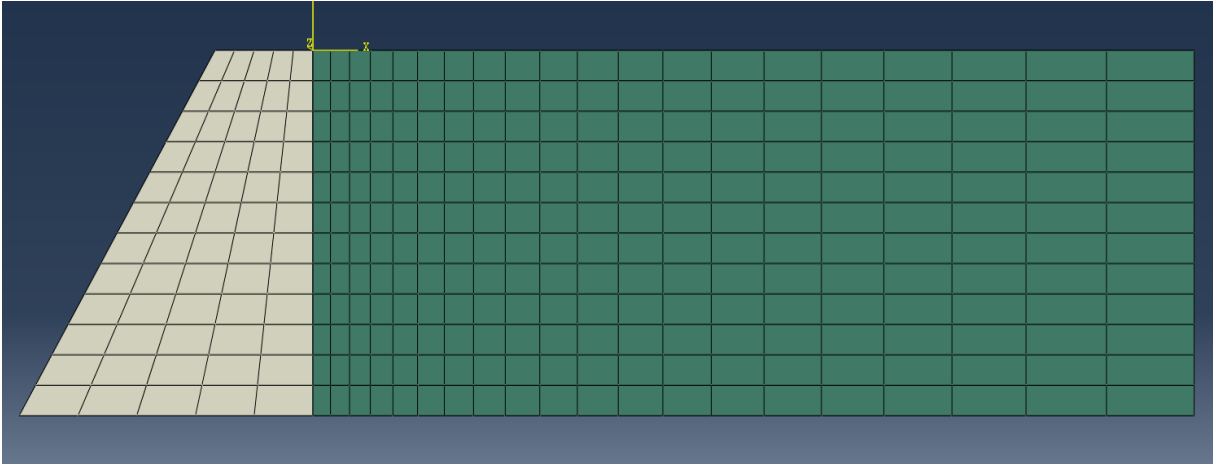
Malzeme tipi	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı (ν)	Kohezyon (C) (KPa)	Sürtünme açısı (°)
Kum	182	0.3	0	37
Betonarme	21,300	0.2	0	0

Yapılan simülasyonun doğruluğunu artırmak amacıyla çeşitli unsurlar kullanılmaktadır. Yapının yerçekimi kuvvetine gerçekçi bir şekilde tepki vermesini sağlamak için yerçekimi yükleri uygulanmaktadır. Gerçek zemin koşullarını ve bu koşulların yapının davranışı üzerindeki etkilerini simüle etmek amacıyla, kum veya diğer malzemelere basınç dağılımları uygulanır. Sınır koşulları, problemin tanımına uygun olarak belirlenir ve bu, yapının dış yükler ve kısıtlamalarla olan etkileşiminin doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlar. Şekil 31'de istinat duvarı modeline etki ettirilen yükler ve sınır koşulları gösterilmektedir. Şekil 31'deki sarı oklar yerçekimi kuvvetini, mor oklar uygulanan basıncı ve küçük turuncu oklar sınır koşullarını temsil etmektedir; sağdaki ok ise eklenen yer değiştirme konumunu göstermektedir.



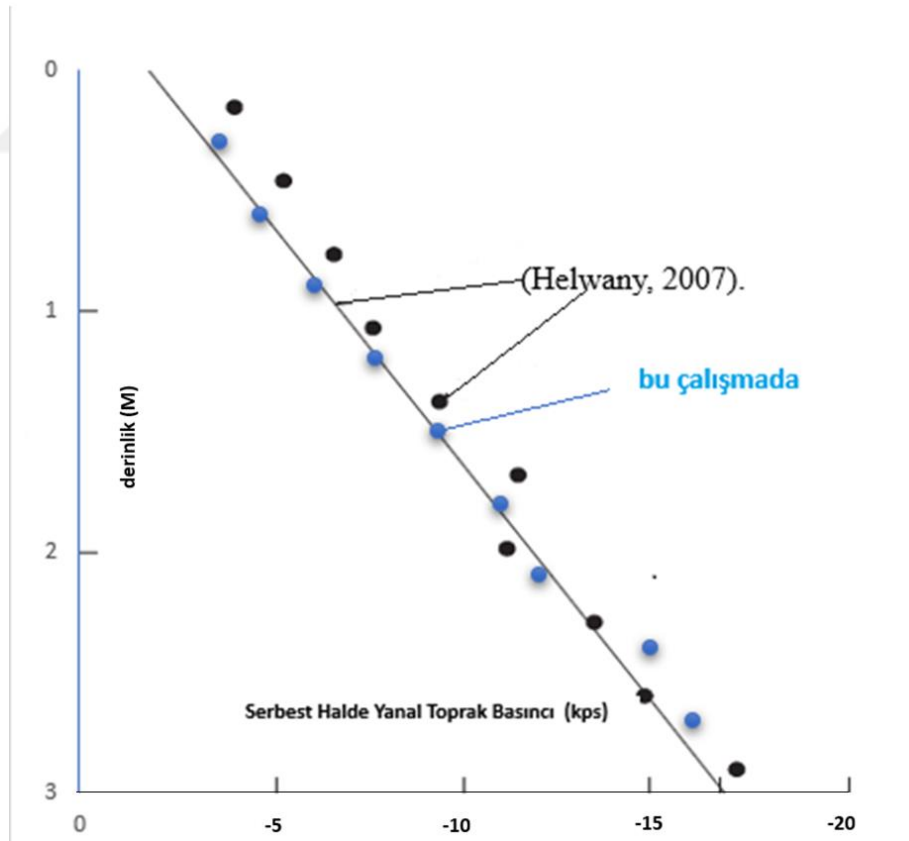
Şekil 31. İstinat duvarı modeline uygulanan yükler ve sınır koşullar

İstinat duvarı modelinde hem beton hem de zemin için 4 düğümlü düzlem gerilme dörtgeni CPE4R elemanı kullanılarak bir ağ örüntüsü oluşturulmuştur. Bu eleman, azaltılmış integrasyon ve zaman yönlendirme kontrolüne sahip olup Şekil 32'de gösterilmektedir. CPE4R elemanı, deformasyonların doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlayarak modelin hassasiyetini ve güvenilirliğini artırmaktadır.



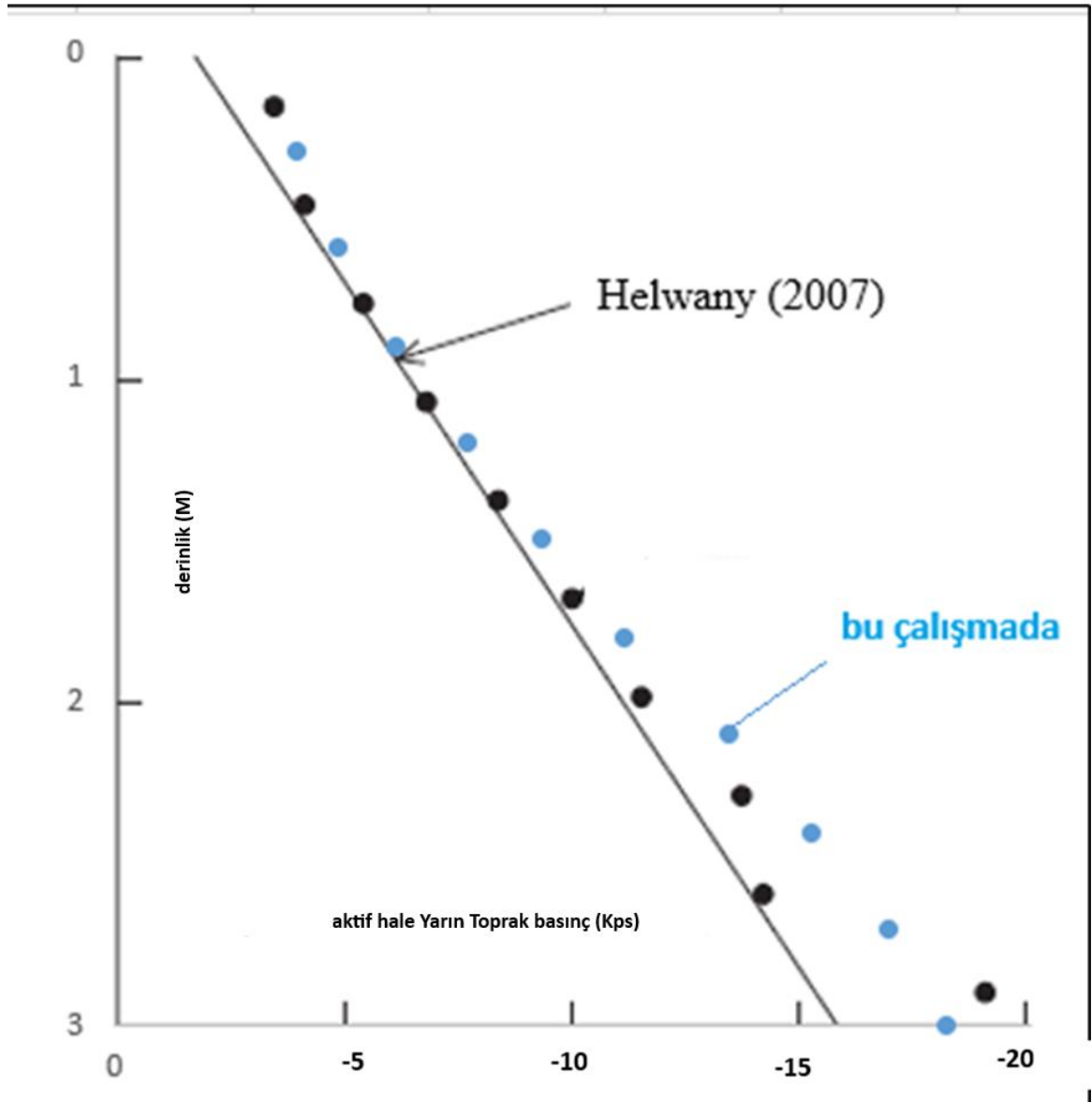
Şekil 32. İstinat duvarı modelinde kullanılan sonlu eleman ağı

İlk analizde, serbest durumda ve aktif koşullar altında beton duvara etki eden yanal zemin basıncı belirlenmektedir. Şekil 33'te, Helwany (2007) çalışmasında elde edilen sonuçlarla bu tez çalışması kapsamında oluşturulan model üzerinde hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma, elde edilen sonuçlar arasındaki benzerlikleri vurgulamayı amaçlamaktadır.



Şekil 33. İstinat duvarı modeli üzerinde hesaplanan serbest durumdaki yanal zemin basıncı değerlerinin karşılaştırılması

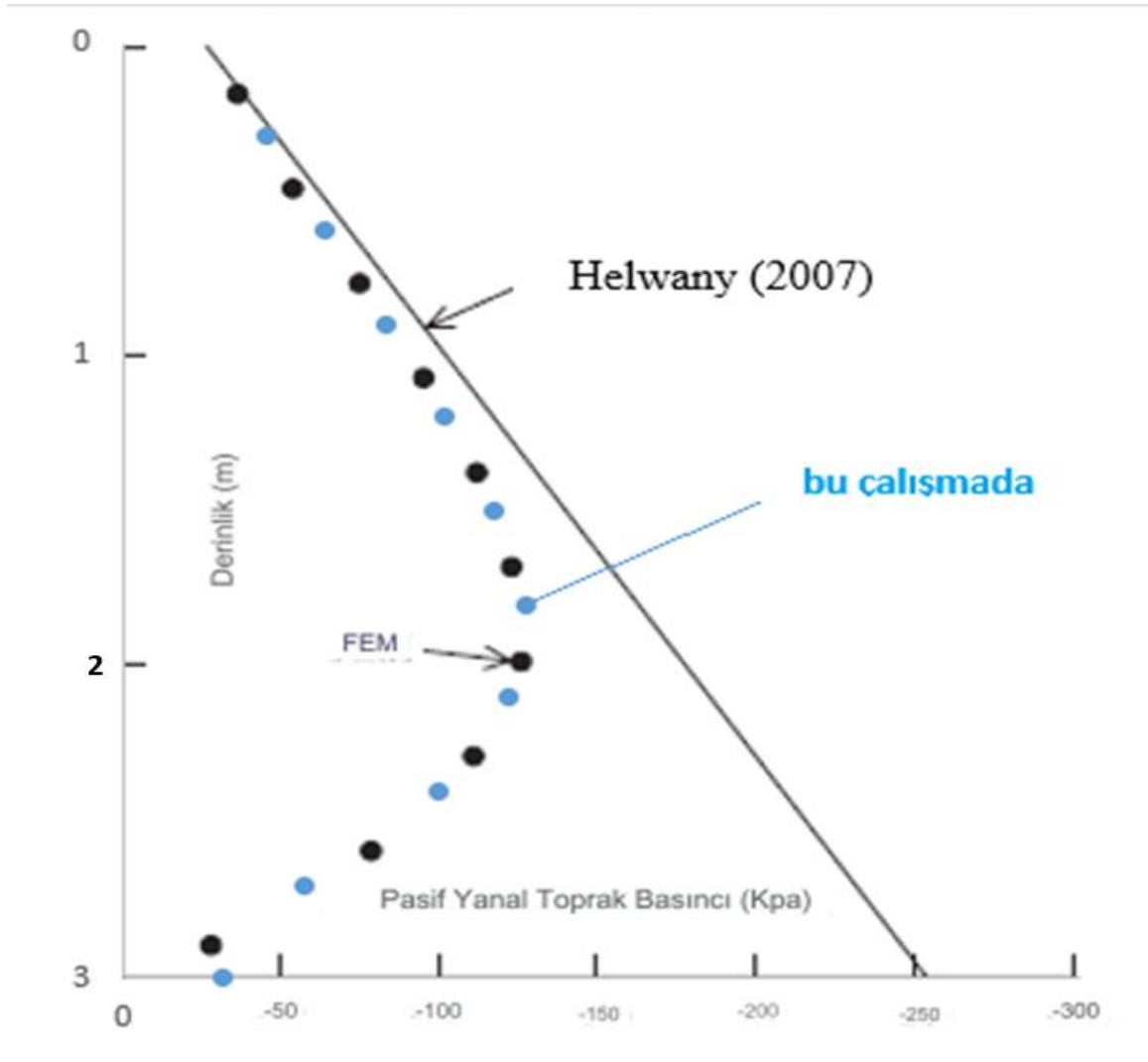
Aktif zemin basıncı analizinde, sürecin farklı aşamalarını içeren adımlar bulunmaktadır. İlk adımda, B noktasının yan hareketleri kısıtlanmış olup hem yerçekimi hem de yüzey yükleri kum tabakasına uygulanmıştır. Şekil 34'te, Helwany (2007) çalışmasında elde edilen sonuçlar ve bu çalışmada üretilen değerler sunulmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda Helwany (2007) çalışmasında elde edilen sonuçlarla tez çalışmasında üretilen sonuçların son derece yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 34. İstinat duvarı modeli üzerinde hesaplanan aktif yanal zemin basıncı değerlerinin karşılaştırılması

Çalışmanın ikinci adımında pasif yer basıncı analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu adımda, B noktasının yan hareketleri kısıtlanmış olup hem yerçekimi hem de yüzey yükleri kum tabakasına uygulanmıştır. Şekil 35'te, Helwany (2007) çalışmasında elde edilen sonuçlar ve bu çalışmada üretilen değerler sunulmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda Helwany (2007)

çalışmasında elde edilen sonuçlarla tez çalışmasında üretilen sonuçların son derece yakın olduğu görülmektedir.



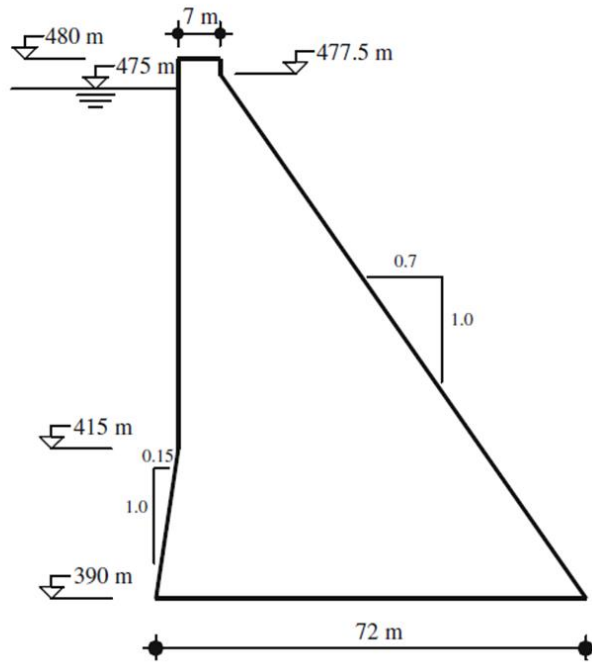
Şekil 35. İstinat duvarı modeli üzerinde hesaplanan pasif yanal zemin basıncı değerlerinin karşılaştırılması

Deprem Yükleri Altında Baraj Modelinin Doğrulanması

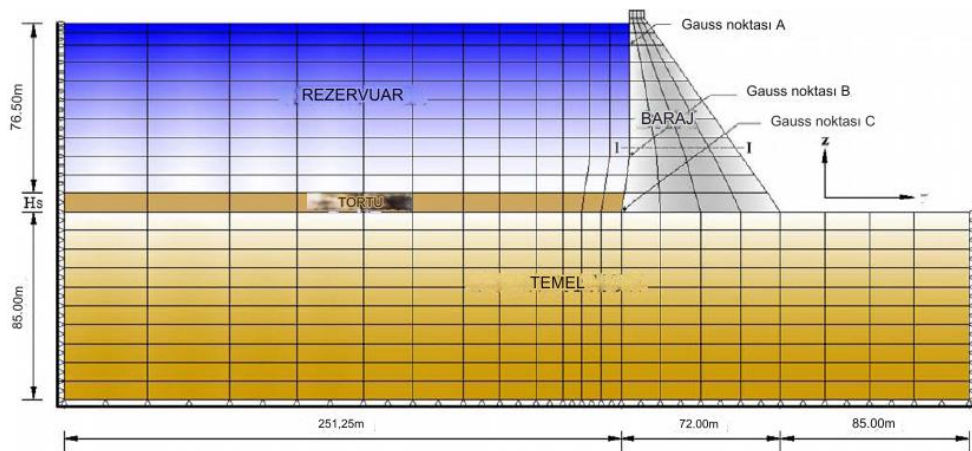
Bu çalışma, bir barajın deprem sarsıntısının etkilerine maruz kalması durumunda göstereceği mekanik davranışı incelemek amacıyla Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasına konu olan baraj modelinin doğrulamasını amaçlamaktadır. Derinlemesine araştırmada, büyük bir beton kütle barajının doğrusal olmayan deprem tepkisi incelenirken, baraj yapısının çevresel su, tortu ve temel kaya ile olan karmaşık etkileşimleri dikkate alınmaktadır. Bu analizler yer hareketlerinin etkisi altında sistemin dinamik davranışını yakalamayı hedeflemektedir. Barajın depremden kaynaklanan kuvvetler altındaki karmaşık davranışını analiz etmek için, talep analizini karşılayacak şekilde uyarlanan doğrusal olmayan SAP2000 programı kullanılmıştır. Bu çalışma barajın tepkisinin derinlemesine anlaşılmasına ve deprem sonrası baraj

mühendisliği konusundaki anlayışın geliştirilmesine katkı sağlamıştır (Akköse ve Şimşek, 2010).

Doğrulama problemini ve incelenen konfigürasyonu kapsamlı bir şekilde açıklamak için, baraj gövdesi boyutları ve sonlu eleman modeli detayları sırasıyla Şekil 36 ve Şekil 37'de sunulmaktadır. Barajın yüksekliği, tepe genişliği, taban genişliği ve rezervuar boyutları gibi temel parametreler, yapısal davranışının anlaşılmasında önemli unsurlar olarak öne çıkmaktadır.



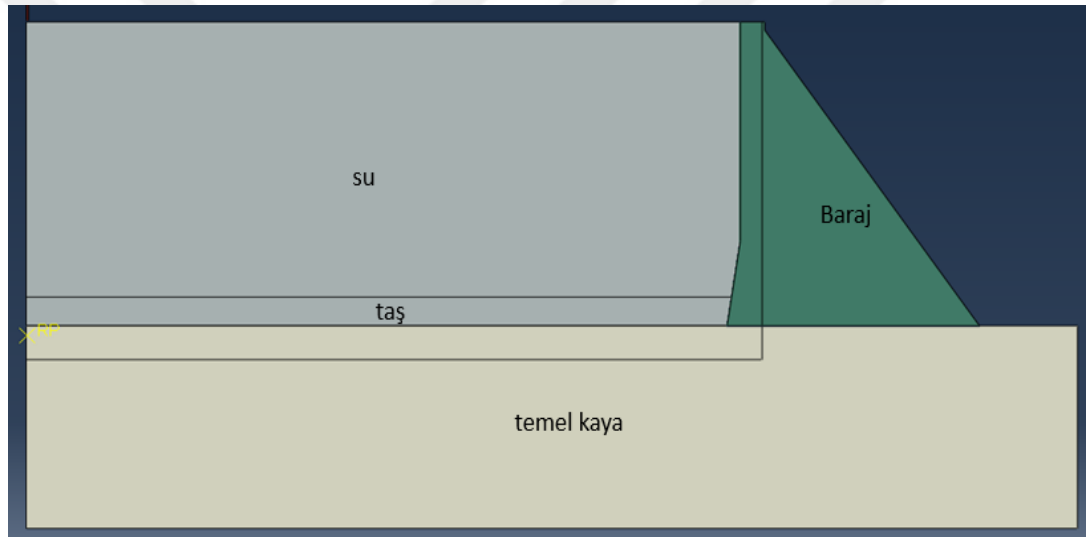
Şekil 36. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında yer alan baraj gövdesi modelinin boyutları



Şekil 37. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında yer alan baraj problemine ilişkin sonlu eleman modeli detayları

ABAQUS programındaki dönüşüm aşaması, baraj-su-taş-temel kaya sisteminin dinamiklerini doğru bir şekilde yansıtmak için kritik bir öneme sahiptir. Bu aşama, sonlu eleman ağı, malzeme özellikleri ve sınır koşulları gibi önemli bileşenleri içeren Şekil 38’ de gösterilen hesaplama modelinin oluşturulmasında merkezi bir rol oynamaktadır. Baraj modelinin analizinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 10’da sunulmuştur.

Barajın geometrisinin gerçekçi temsili, beton yapı, su kütlesi, tortu birikintileri ve temel kaya tabakalarını kapsamakta olup, modelin doğruluğu açısından kritik bir unsurdur. Bu sistemdeki doğrusal olmayan etkileşimler ve davranışlar, dönüşüm aşamasında ele alınarak, deprem yükleri altında doğrusal olmayan tepkilerin simülasyonu için güçlü bir platform oluşturulması hedeflenmektedir.



Şekil 38. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında sunulan baraj modelinin bileşenleri

Tablo 10. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında sunulan baraj modelinin analizinde kullanılan malzeme özellikleri

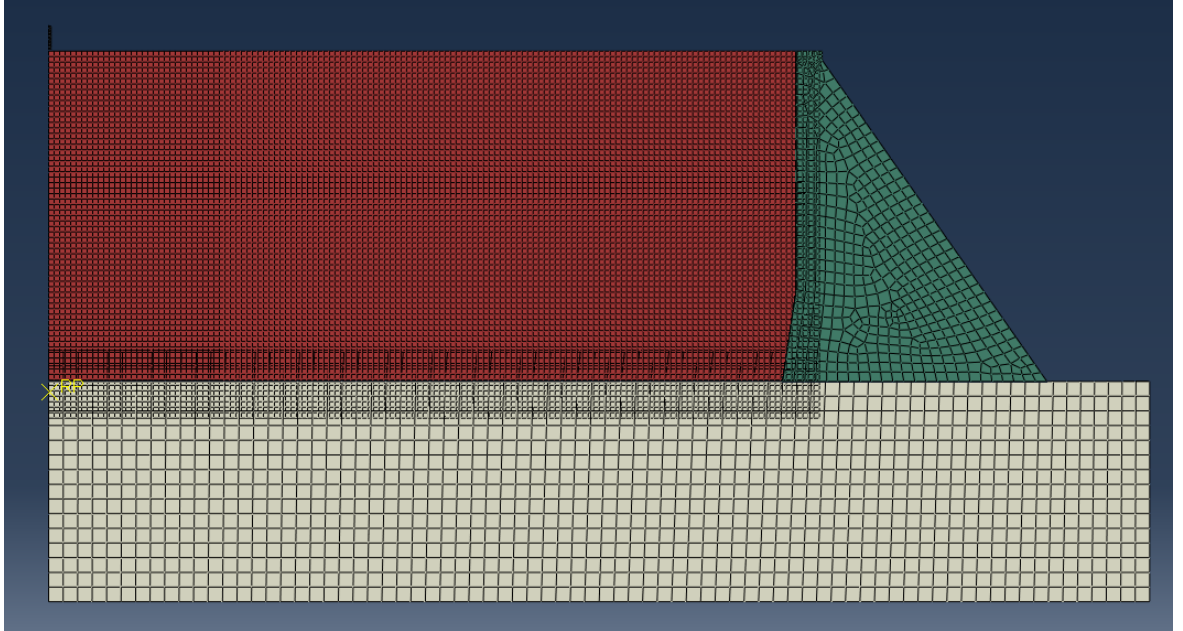
Parametre	Baraj betonu	Temel taşı	Su	Tortu
Elastisite modülü (MPa)	30.000	30.000	2027	252
Poisson oranı	0.15	0.20	-	0.30
Yoğunluk (kg/m ³)	2446.48	-	1000	2038.76
Kohezyon (MPa)	3.1	-	-	-
Sürtünme açısı (°)	37	-	-	-

Bu çalışmada oluşturulan model Northridge depremi kaydı altında analiz edilmiştir. Analizce yer hareketi kaydı hem barajın hem de temelinin tepkisini etkileyen kilit bir rol oynamaktadır. Barajın yapısal bileşenleri ve temeli, zemin davranışını karmaşık gerilme koşulları altında dikkate alan iyi kurulmuş bir yaklaşım olan Mohr-Coulomb yöntemi ile titizlikle modellenmiştir. Ayrıca, su ve tortunun temsili, bu akışkan unsurlar ile çevredeki katılar arasındaki etkileşimi hassas bir şekilde yakalayan sofistike bir teknik olan Euler-Lagrange yöntemini kullanmaktadır.

Bu karmaşık simülasyonu kolaylaştırmak amacıyla belirli bir sonlu eleman ağı stratejisi benimsenmiştir. Baraj ve temel için, Şekil 39'da gösterilen C3D8R olarak adlandırılan 8 düğmeli lineer eleman kullanılmıştır. Bu ağ stratejisi, yapısal bileşenlerin sonlu eleman modelinde doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır.

Su ve birikinti/tortu için, EC3D8R olarak adlandırılan 8 düğümlü lineer Euler elemanı seçilmiştir. Bu eleman türü, akışkan-katı etkileşiminin etkili bir şekilde modellenmesine olanak tanıyarak analizin kritik bir yönünü oluşturur.

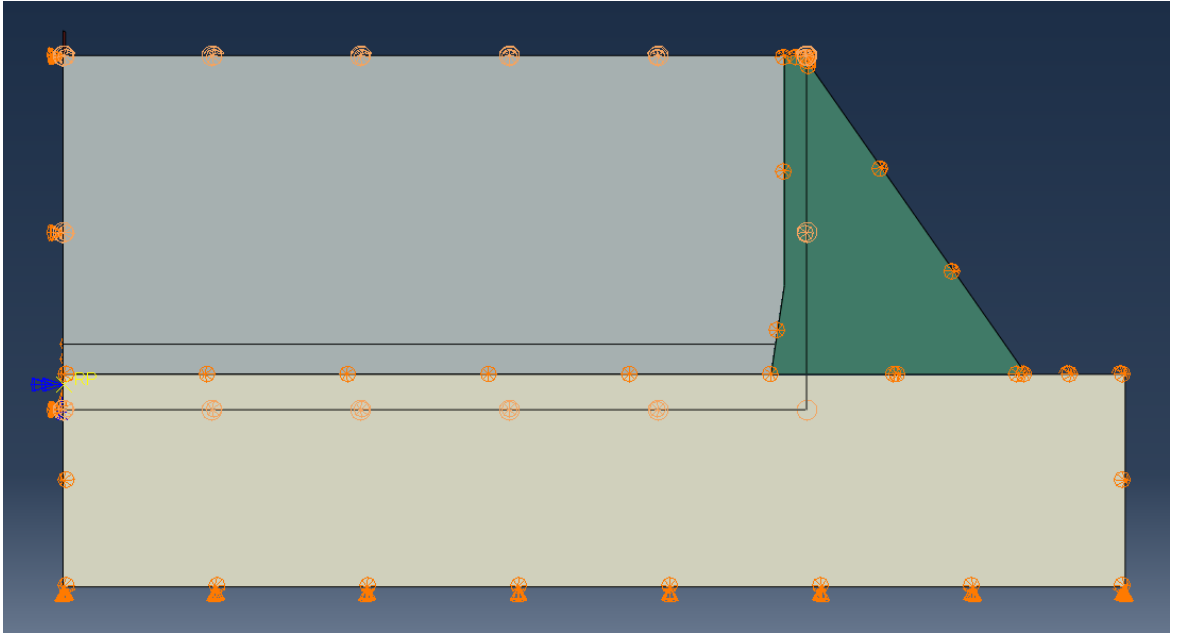
Bu özelleştirilmiş modelleme teknikleri ve kafes sistemi stratejileri kullanılarak, üretilen sonlu eleman baraj modeline Northridge Depremi yer hareketi kaydı etki ettirilerek barajın dinamik davranışı incelenmeye çalışılmıştır. Bu yöntemlerin ve elemanların kombinasyonu tüm sistemin dinamik tepkisinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 39. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında sunulan baraj modeline ait sonlu eleman ağı

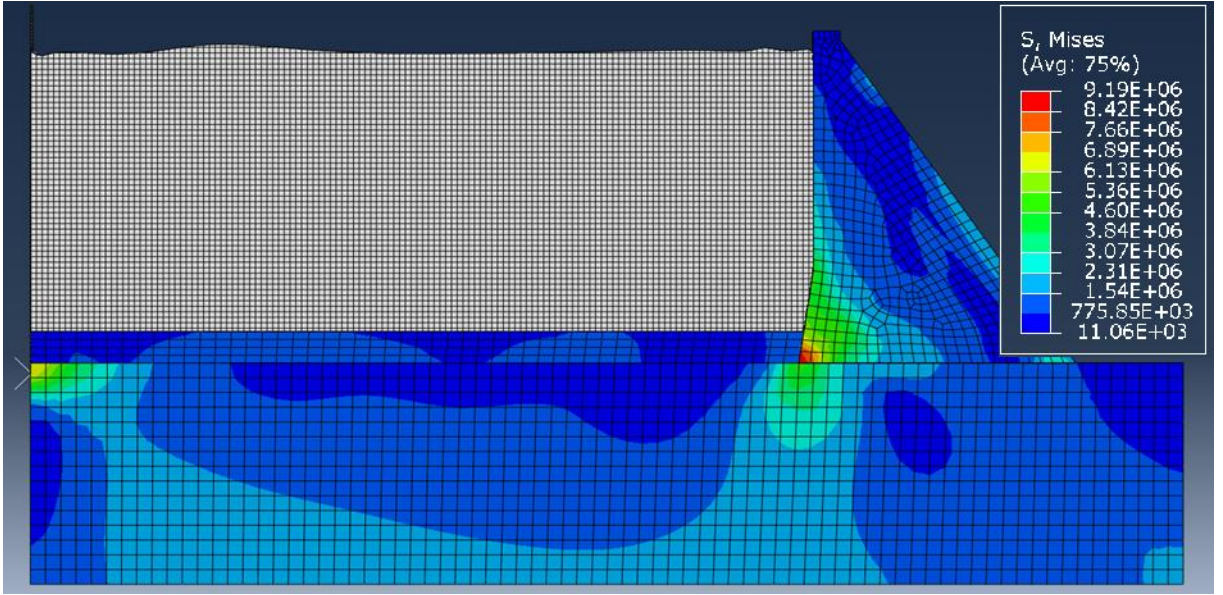
Yer hareketi kaydı (deprem yükleri), bu analizin temel bir bileşeni olarak işlev görmekte ve tüm sistemin davranışını derinlemesine etkilemektedir. Doğru ve anlamlı bir analiz sağlamak amacıyla, model üzerinde uygulanan kritik sınır koşulları, Şekil 40'ta gösterildiği gibi tasarlanmıştır.

Bu özenle belirlenmiş sınır koşulları uygulanarak, model, baraj, su, tortu, temel ve yer hareketi kaydı tarafından uygulanan deprem kuvvetleri arasındaki etkileşimleri doğru bir şekilde temsil edebilme kapasitesine sahip olmaktadır. Bu hassas temsil, deprem yükü koşulları altında barajın yapısal tepkisi hakkında güvenilir öngörüler elde etmek için vazgeçilmezdir ve sonuç olarak baraj yapıları bağlamında deprem mühendisliğinin anlayışını ilerletmektedir.



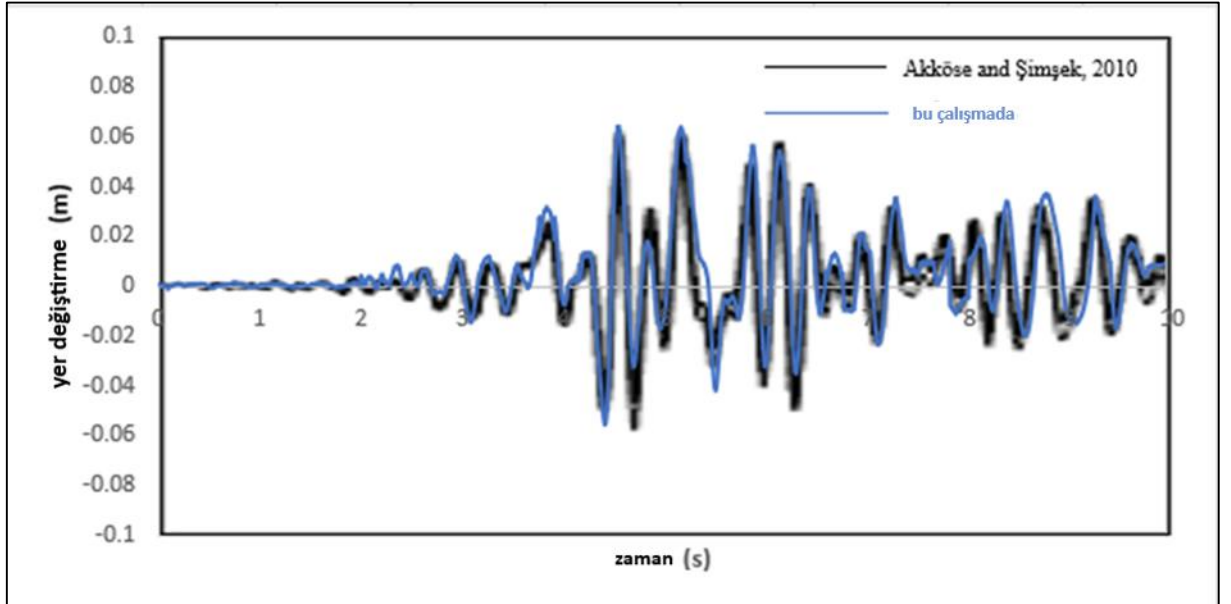
Şekil 40. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında sunulan baraj modelinin yükleri ve sınır koşulları

Şekil 41'de incelenen baraj modelinde hesaplanan şekil değiştirme dağılımları sunulmaktadır. Bu görselleştirme, Euler-Lagrange yöntemi kullanılarak temsil edilen suyun davranışını içermektedir. Bu ayrıntılı temsilde, tüm bileşenlerin dinamik etkileşimi, baraj, su, tortu ve temel kaya dahil olmak üzere gözlemlenmektedir. Özellikle, suyun Euler-Lagrange yaklaşımı kullanılarak nasıl modellendiğini gösteren görsel temsil dikkate değerdir. Bu nihai çıktı, deprem yükü altındaki sistem davranışının anlaşılmasına katkıda bulunarak, bu tür mühendislik senaryolarında yer alan dinamiklerin kavranması açısından önem taşımaktadır.



Şekil 41. Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında sunulan baraj modelinin analizi sonucunda hesaplanan şekil değiştirmeler ve suyun sıçrama etkisi

Şekil 40' ta sunulan modelin en üst noktanın yer değiştirmesini hesaplamak için 3000 veri noktasından (zaman-frekans) oluşan geniş bir veri seti kullanılmıştır. Sonuçların güvenilirliğini sağlamak amacıyla oldukça küçük bir zaman adımı benimsenmiştir. Doğrulama amacıyla, sayısal sonuçlar ile literatürdeki bulgular karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında hesaplanan yer değiştirme değerleri ile Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında elde edilen bulgularla uyumlu bulunmuş ve bu durum Şekil 42'de gösterilmiştir.



Şekil 42. Baraj modeli doğrulama amacıyla yapılan analiz sonucunda Akköse ve Şimşek (2010) çalışmasında elde edilen yer değiştirme ile zaman ilişkisi ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar

Kanyon Altında Tünel Modelinin Malzeme Özellikleri

Toplam 3 farklı sayısal modelleme ve doğrulama çalışması sonrasında bu tez çalışmasına esas sonlu elaman modelinin oluşturulması aşamasında geçilmiştir. Modellemede kullanılan malzeme özelliklerinin kapsamlı bir özeti Tablo 11'de, sönümlleme parametreleri ise Tablo 12'de sunulmuştur. Bu tablolar, modelleme sürecinin ilk aşaması için detaylı bir referans sağlamaktadır.

Tablo 11. Kanyon altında tünel modelinin analizinde kullanılan malzeme özellikleri

Malzemeler	Yoğunluğu (kg/m3)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	Viskozite
Tünel Betonu	2446	30.000	0.15	-
Su	1000	-	-	0.001
Siltli kil	1800	20	0.35	-
Siltli Kum	2000	40	0.3	-
Siltli Taş	2400	80	0.2	-

Tablo 12. Sönümlleme parametreleri

Malzeme	Alfa (α)	Beta (β)
Tünel Betonu	0.05	0
Zemin	0.5	0.003571

Kanyon Altında Tünelin Modelinin Analiz Sonuçları

Analiz sonuçlarını tartışmadan önce, Kahramanmaraş'ta meydana gelen 7,4 büyüklüğündeki depremin bu bölgedeki yapılar, özellikle de tüneller üzerinde ciddi hasar yarattığını belirtmek önemlidir. Bu durum, çalışmayla doğrudan ilişkilidir, zira Şekil 43'te gösterilen hasar desenleri, çalışmada tespit edilen hasar desenleriyle benzerlik göstermektedir.

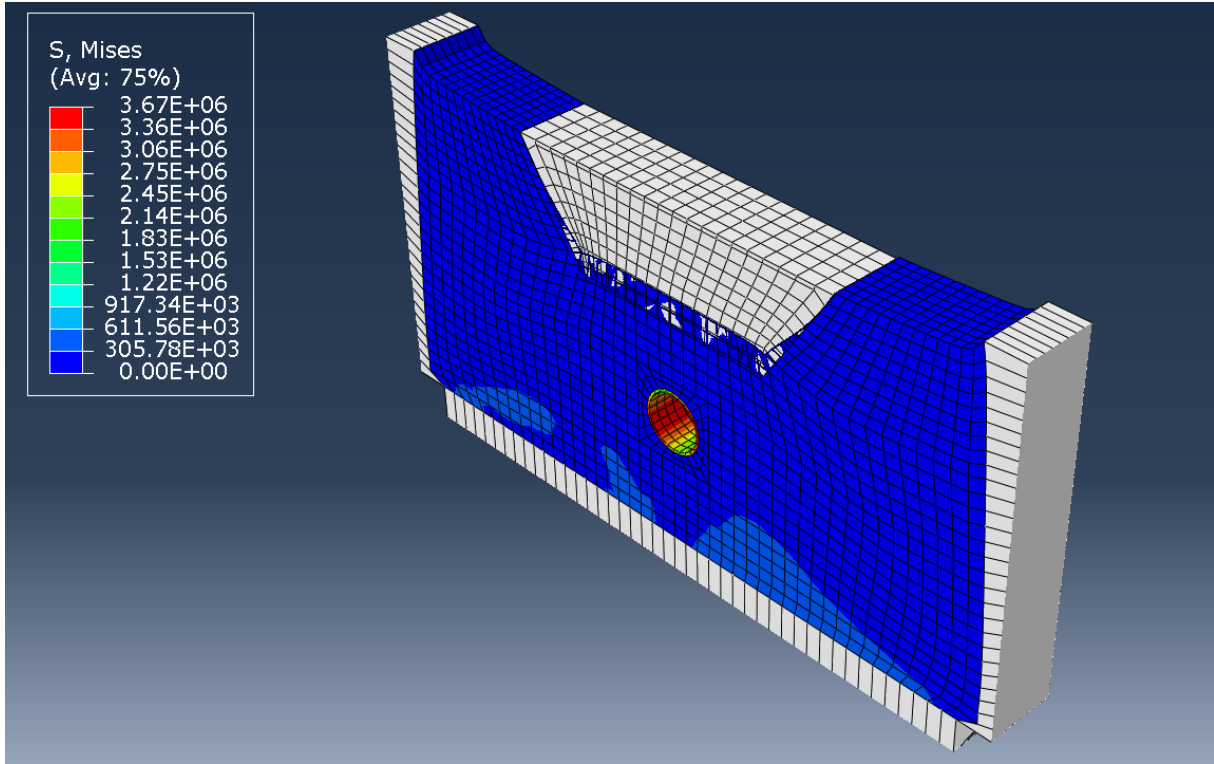


Şekil 43. Kahramanmaraş depremi sonrası tünellerde oluşan zararlar

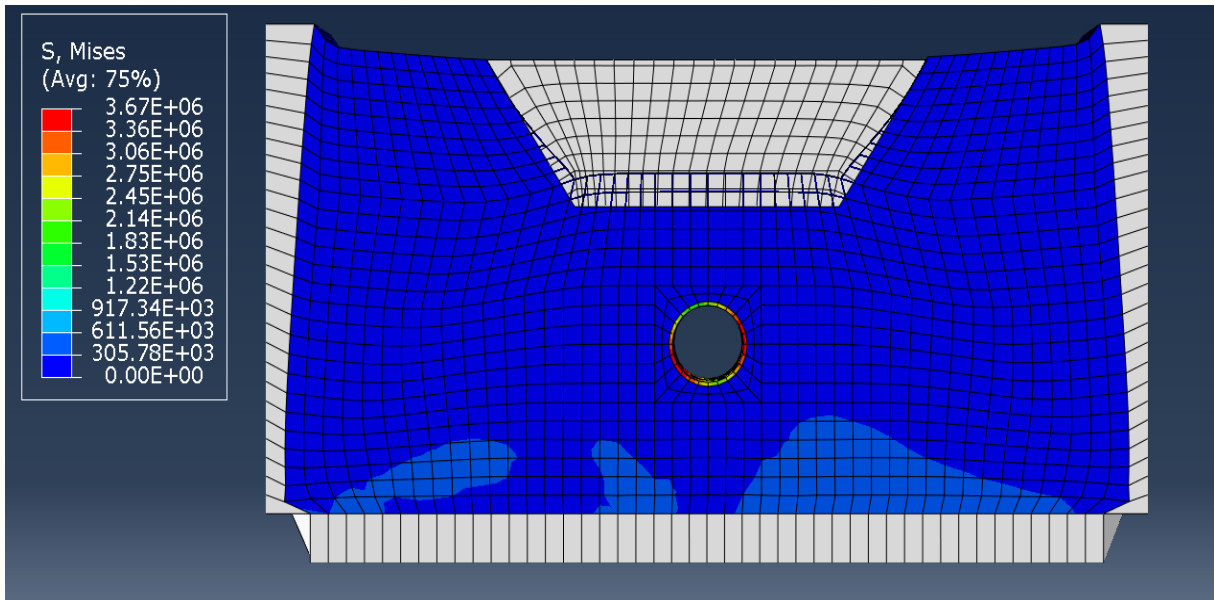
6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası bölgedeki pek çok tünel yapısında Şekil 43' te sunulana benzer hasar tespit edilmiştir. Türkiye'nin bir deprem ülkesi olması ve son yıllarda yapılan yatırımlar sonucu ulaşımı kolaylaştıran tünel sayısının önemli ölçüde artmış olması bu çalışma bulgularının literatürdeki ve uygulamadaki yerine vurgu yapılması bakımından önemlidir.

Şekil 44, Von Mises gerilmesinin üç boyutlu bir analizin sonucunu göstermektedir. Şekil 45 ise, aynı olgunun iki boyutlu görünümdeki analiz sonucunu temsil etmektedir; bu şekil, olayın temel dinamiklerini daha sade bir perspektiften anlamaya olanak tanımaktadır. Şekil 46, sismik yük altında bir tünelde meydana gelen oval deformasyonu göstermektedir. Bu bağlamda, siyah renk orijinal tünel şeklini, beyaz renk ise deforme olmuş tünel şeklini ifade etmektedir; bu durum, tünelin sismik aktivite karşısındaki yapısal tepkisini ortaya koymaktadır. Son olarak,

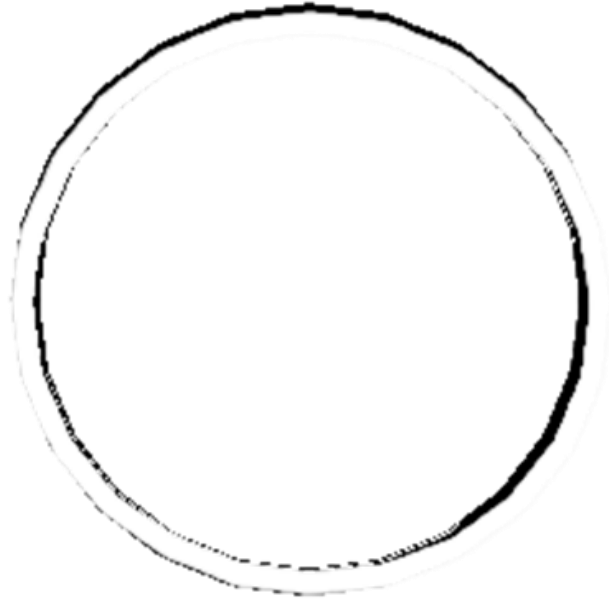
Şekil 47, üç boyutlu tünel kesitinde meydana gelen gerilmeleri göstermekte olup, bu kesit tünel içindeki gerilme dağılımını daha derinlemesine incelemeye yardımcı olmaktadır.



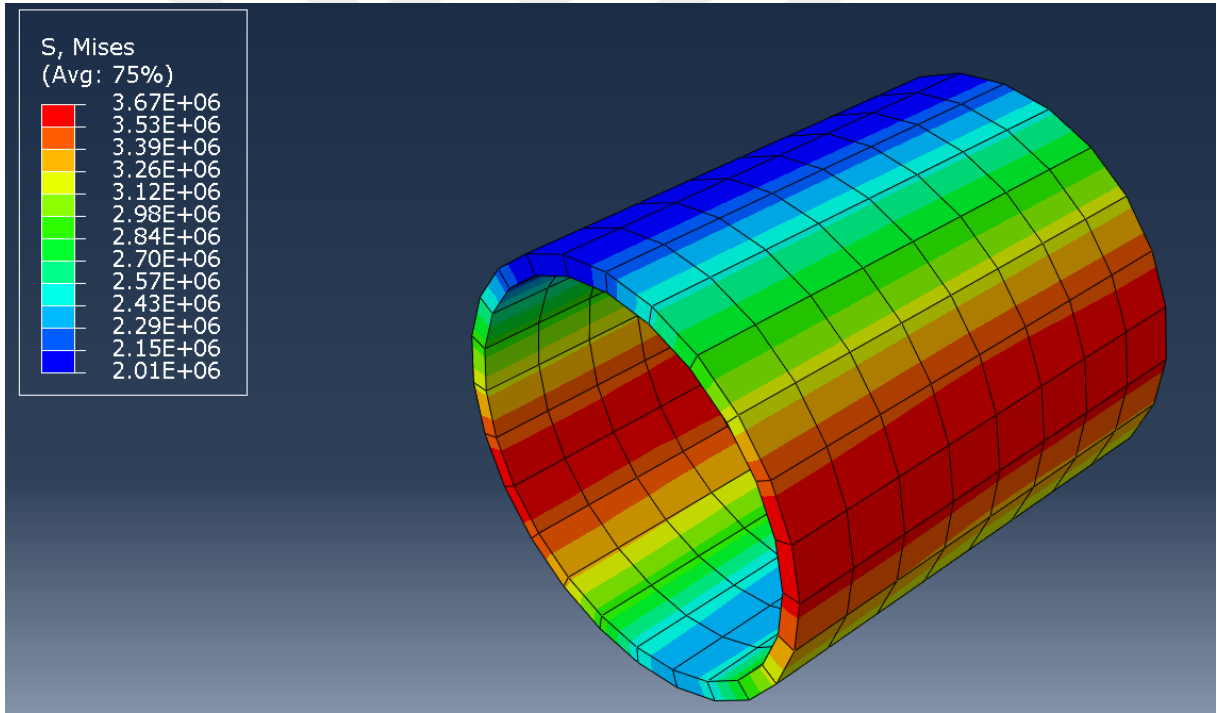
Şekil 44. Kanyon altındaki tünel modelinin analizi (Von Mises gerilmesi üzerine 3 boyutlu inceleme)



Şekil 45. Kanyon altındaki tünel modelinin analizi (Von Mises gerilmesine 2 boyutlu inceleme)



Şekil 46. Sismik yük altında tünelde meydana gelen oval deformasyonun (Siyah: Orijinal şekil; Beyaz: Deforme olmuş şekil)



Şekil 47. Kanyon altındaki tünel modelinin analizi (tünel yapısındaki Von Mises gerilmesi)

Kanyon Altında Tünel Modeli Üzerinde Yapılan Analizler

Modelleme süreci boyunca toplamda on iki farklı özellik ve boyut içeren deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çok yönlü yaklaşım, her biri farklı özelliklere ve boyutlara sahip olan deneyler ile çeşitli sonuçların hesaplanmasını hedefleyerek kapsamlı bir karşılaştırmalı analizin mümkün olmasını sağlamaktadır. Modelleme süreci dört ardışık adıma bölünmüştür; her bir adım üç ayrı modelleme denemesini içermektedir.

İlk adım, çeşitli zemin özelliklerinin elastik davranışını değerlendirmeyi kapsamaktadır. İkinci adım, zeminin plastik davranışını belirlemeyi, Drucker-Prager yöntemini kullanmayı ve bu analizi üç farklı zemin tipine genişletmeyi içermektedir. Üçüncü adımda, tünel kalınlığındaki değişiklikler üç iterasyon boyunca tanıtılarak, elde edilen farklı sonuçların kapsamlı bir şekilde incelenmesine olanak tanınmaktadır. Dördüncü adımda ise, suyun bulunmadığı kanyon şekli ile su ile dolu kanyon şekli ve toprak ile düşen kanyon şekli olmak üzere üç farklı analiz gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, Von Mises gerilmesini görsel olarak temsil eden grafikler ile sunulacaktır. Bu grafikler, tünelin farklı bölgelerindeki gerilme ve deformasyon dağılımını net bir şekilde göstererek yapısal davranışı ve kritik bölgeleri belirlemede faydalı olacaktır. Von Mises gerilmesi, aynı zamanda Mises-Hencky gerilmesi olarak da bilinir; sünek malzemelerin birden fazla yönde gerilmeye maruz kaldığı karmaşık gerilme durumlarında akma başlangıcını öngörmek için kullanılan bir kırılma kriteridir. Üç boyutlu gerilme durumunda gerilme bileşenlerini ifade eden Von Mises gerilmesi, bu analizin temel bileşenlerinden biridir.

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (36)$$

σ_v Von Mises Gerilmesini temsil etmektedir.

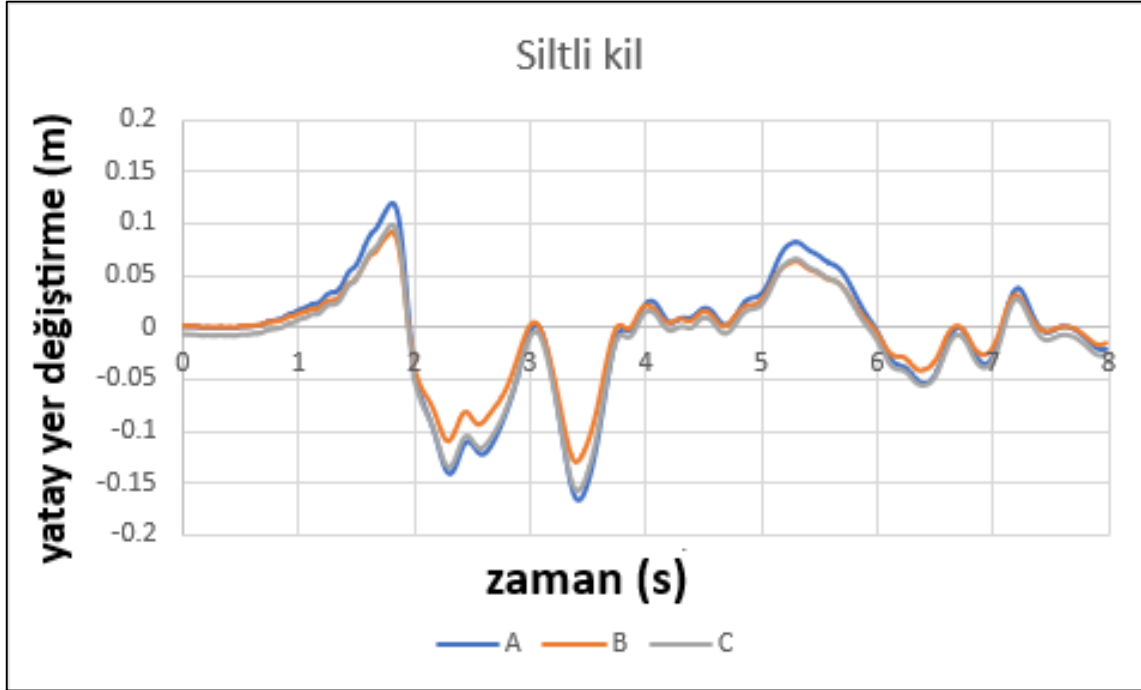
σ_x , σ_y ve σ_z sırasıyla x, y ve z yönlerindeki normal gerilmeleridir.

τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{zx} ilgili düzlemlerdeki kayma gerilmeleridir.

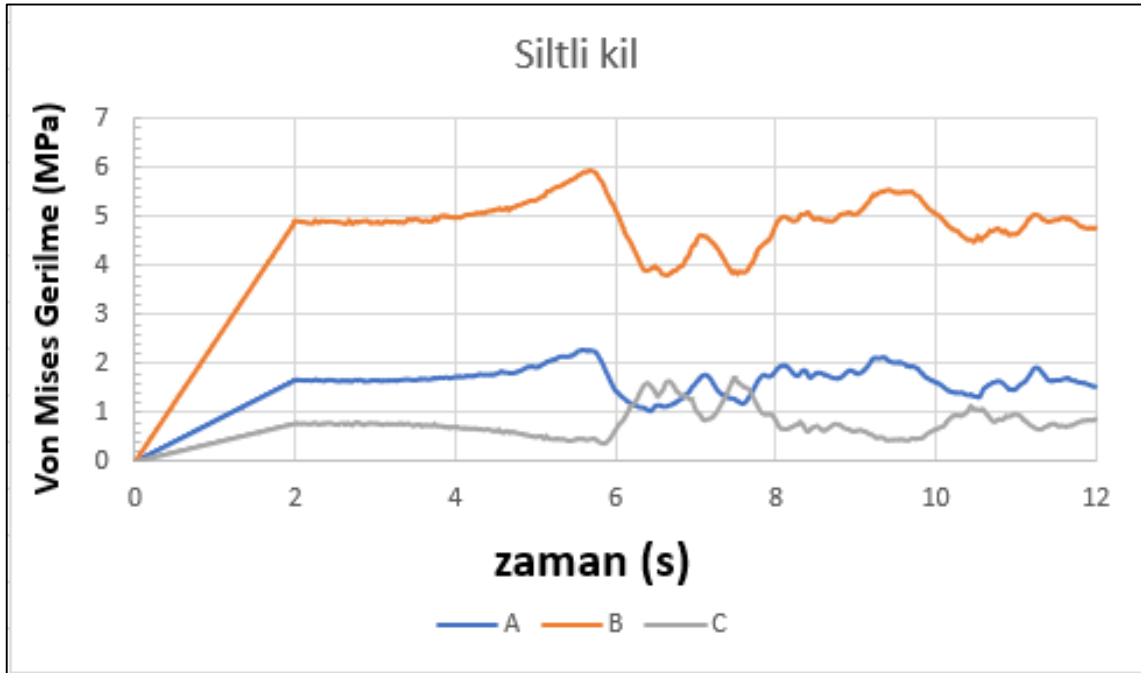
Bu çalışmada, problem sonuçları gerilme (MPa), yer değiştirme (m) ve zaman (saniye) birimleri cinsinden hesaplanmıştır. Bu birimlerin kullanımı, gerçekleştirilen analizlerin daha anlaşılır ve karşılaştırılabilir olmasını sağlamaktadır.

Kanyon Altında Tünel Modelinin Elastik Analizi

Şekil 48'de, siltli kil zemin için A, B ve C noktalarının yer değiştirme değerleri gösterilmektedir. Şekil 49'da ise, siltli kil zemin üzerindeki A, B ve C elemanlarının Von Mises gerilme değerleri sunulmaktadır.

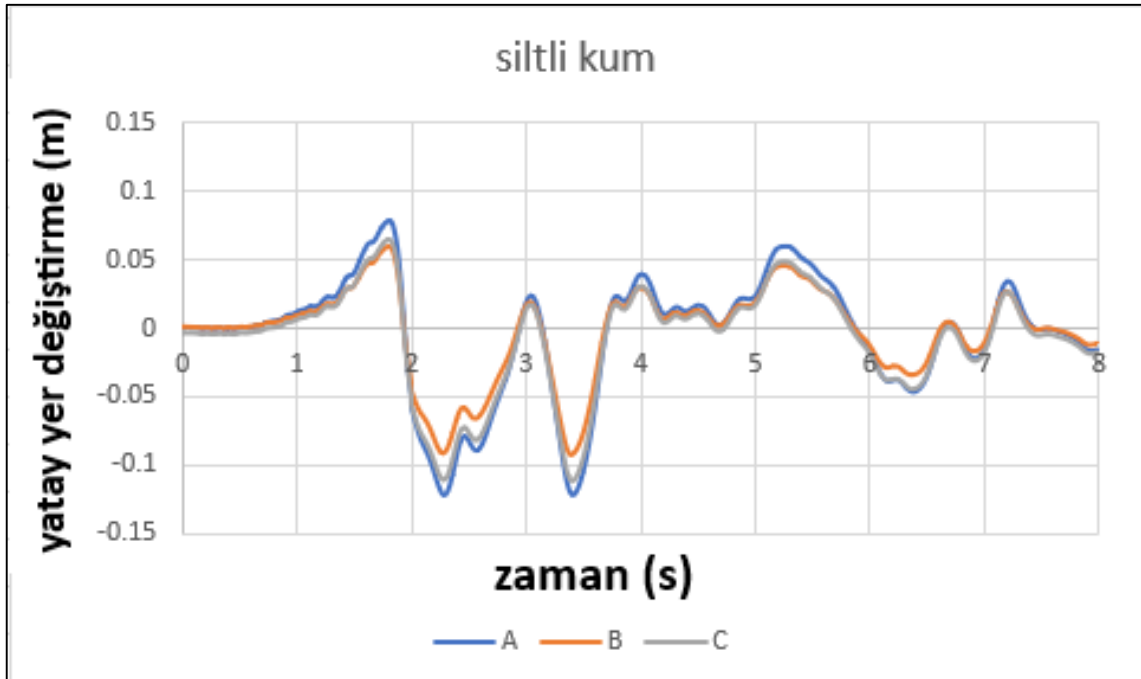


Şekil 48. Siltli kil zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi

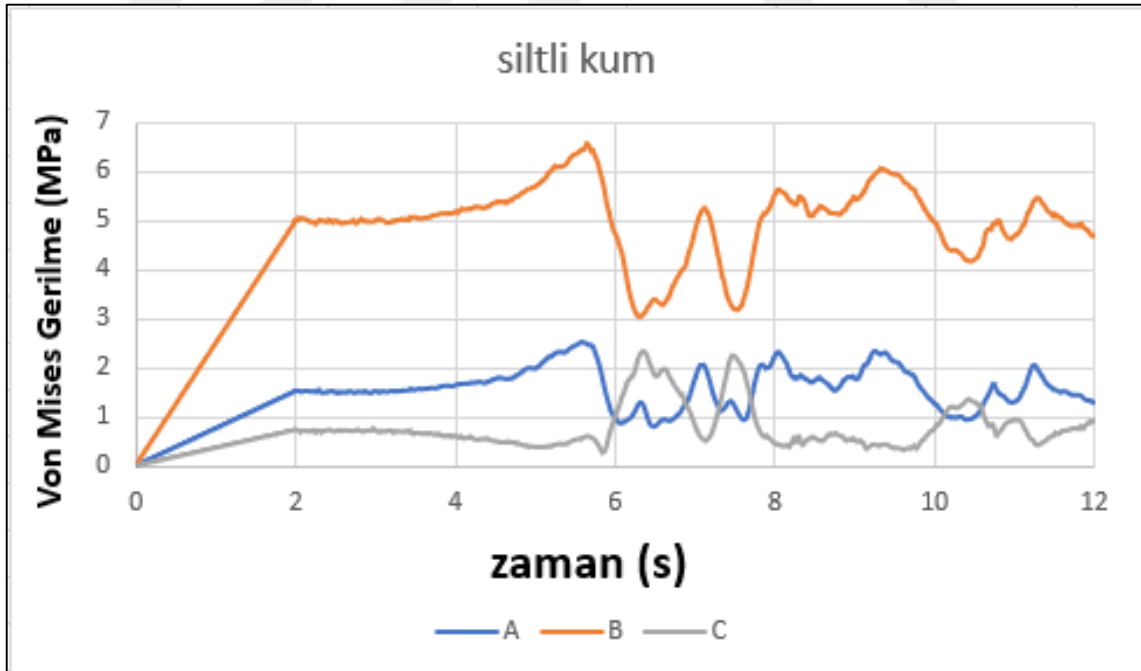


Şekil 49. Siltli kil zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi

Şekil 50'de, siltli kum zemin için A, B ve C noktalarının yer değıştirme değeri sunulmaktadır. Şekil 51'de ise, siltli kum zemin üzerindeki A, B ve C elemanlarının Von Mises gerilme değeri gösterilmektedir.

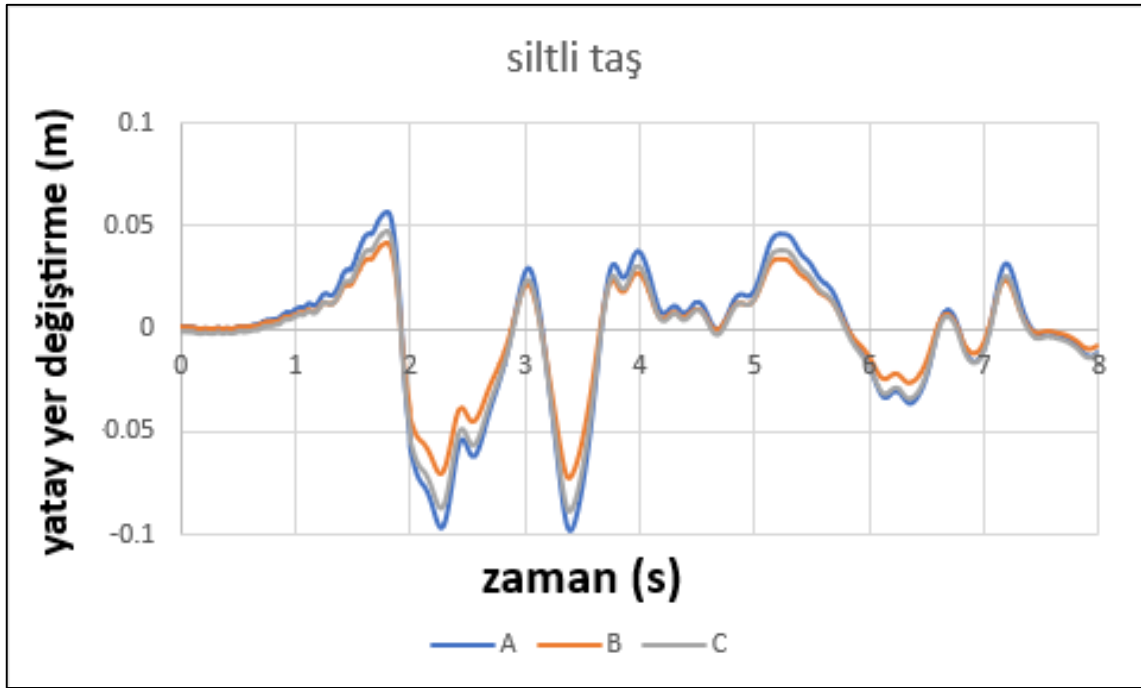


Şekil 50. Siltli kum zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değıştirme - zaman ilişkisi

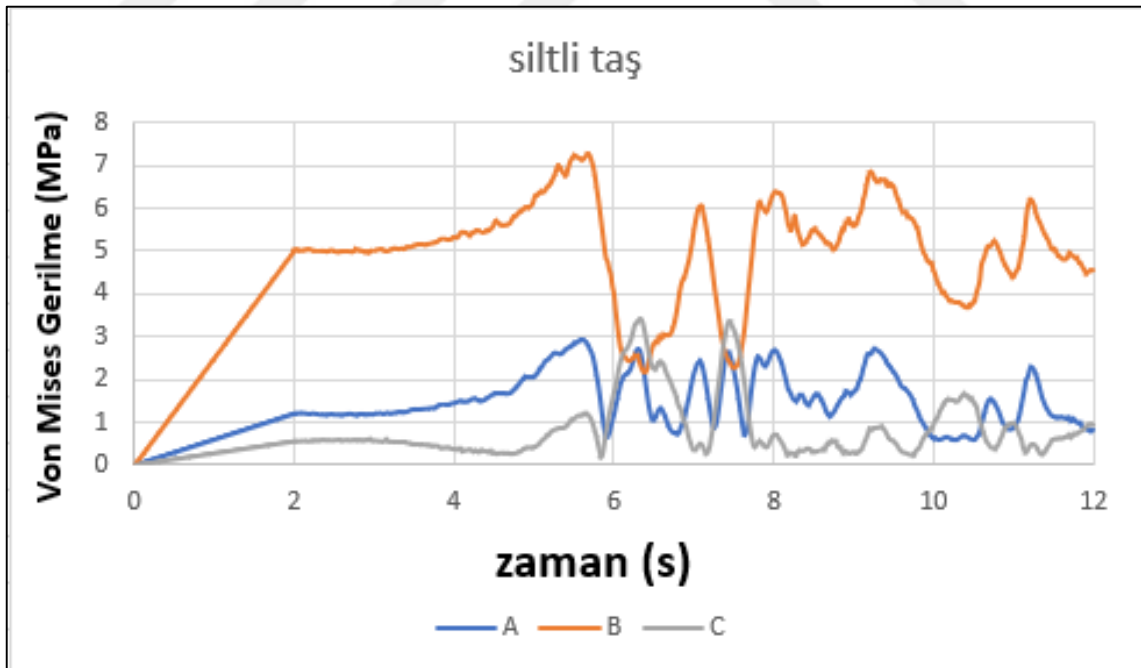


Şekil 51. Siltli kum zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi

Şekil 52'de, siltli taş zemin için A, B ve C noktalarının yer değıştirme değeri sunulmaktadır. Şekil 53'te ise, siltli taş zemin üzerindeki A, B ve C elemanlarının Von Mises gerilme değeri gösterilmektedir.

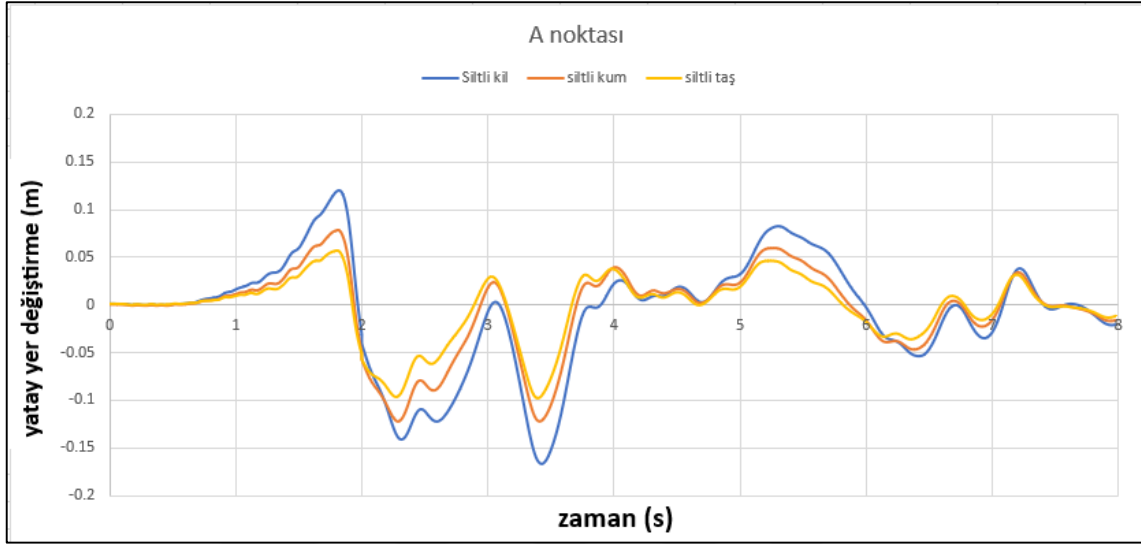


Şekil 52. Siltli taş zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değıştirme - zaman ilişkisi

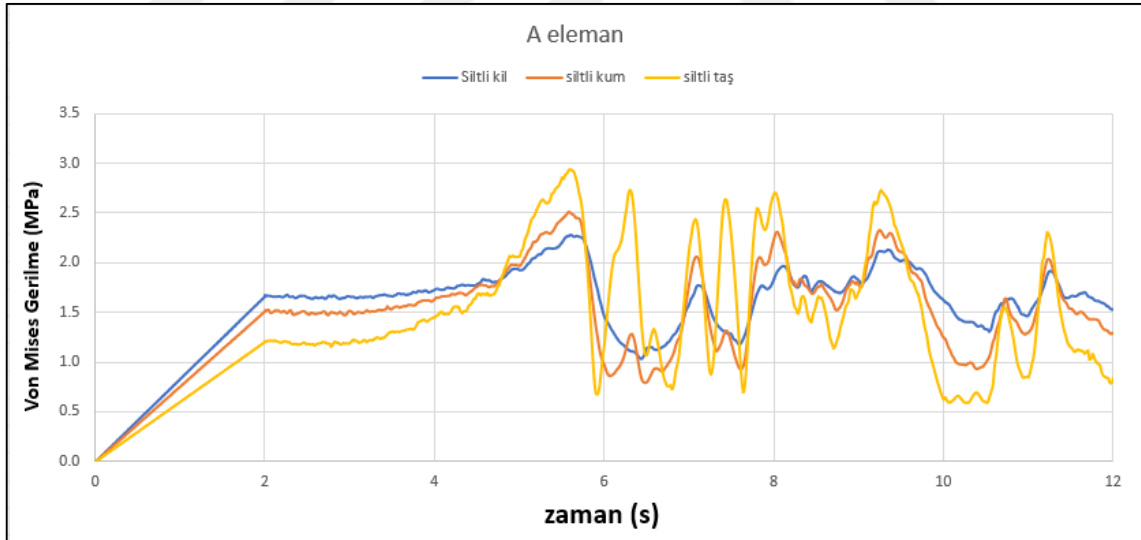


Şekil 53. Siltli taş zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi

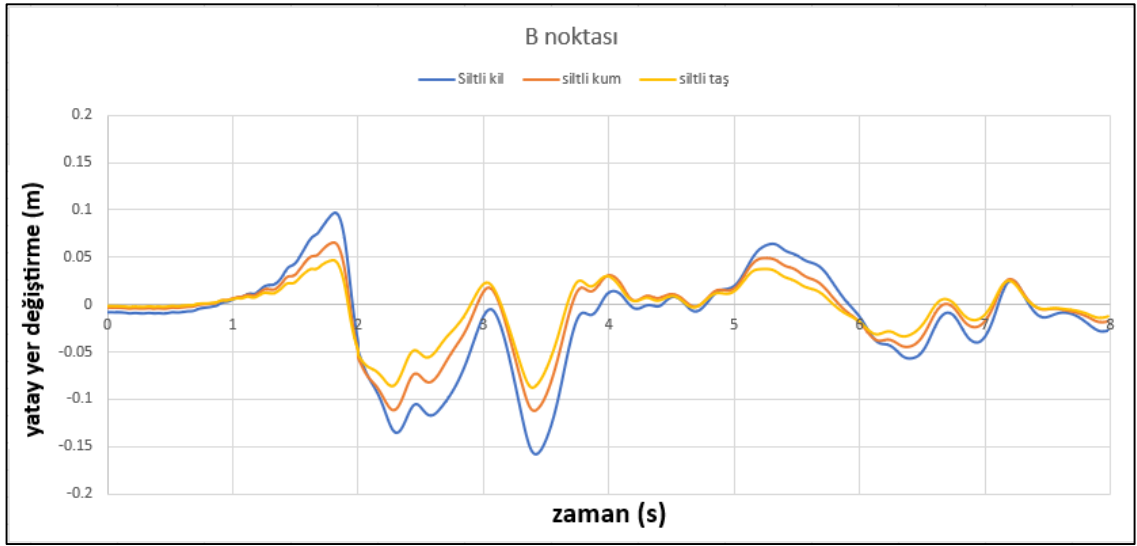
En yüksek yer değıştirme değeri A noktasında, ardından B ve C noktalarında tespit edilmiştir; bu durum Şekil 54, Şekil 56 ve Şekil 58'de görsel olarak sunulmuştur. Ayrıca, tünel elemanları üzerindeki gerilme dağılımı incelendiğinde, en yüksek gerilmenin B elemanında meydana geldiği, bunu A ve C elemanlarının izlediği görülmektedir; bu bulgular Şekil 55, Şekil 57 ve Şekil 59'da gösterilmektedir.



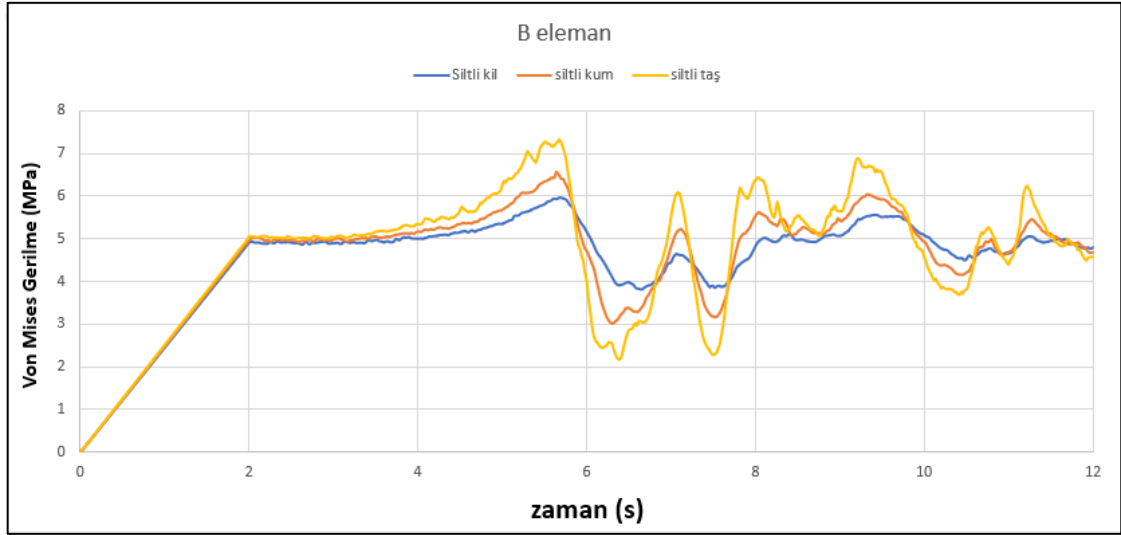
Şekil 54. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde A noktasındaki yer değıştirme



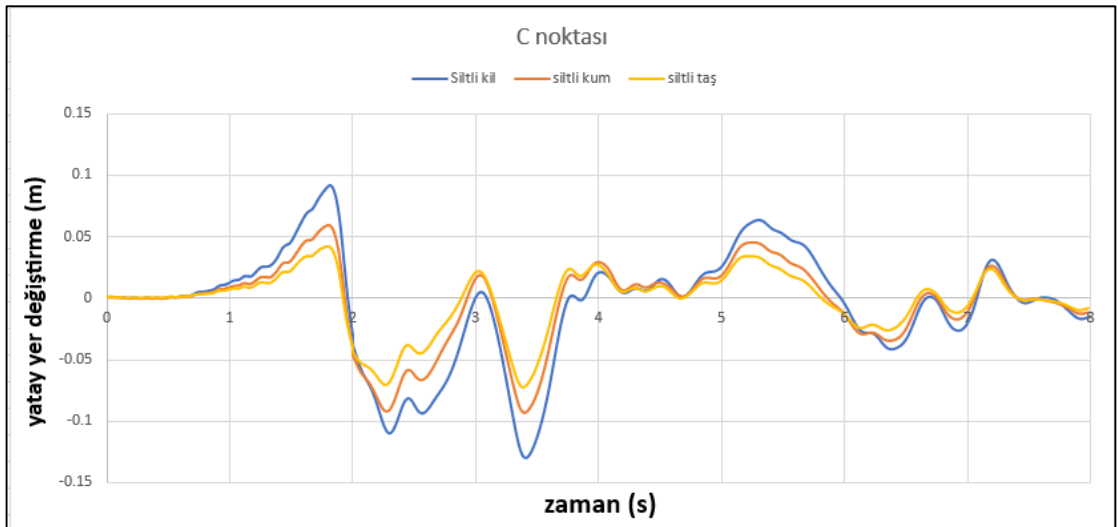
Şekil 55. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde A elemanındaki gerilme



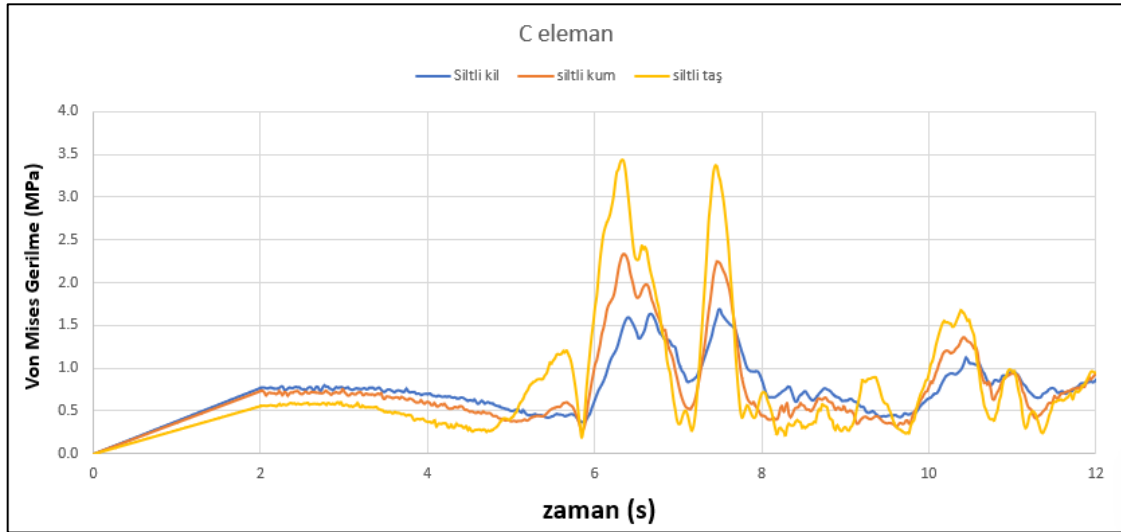
şekil 56. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde B noktasındaki yer değiştirme



şekil 57. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde B elemanındaki gerilme



şekil 58. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde C noktasındaki yer değiştirme



Şekil 59. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde C elemanındaki gerilme

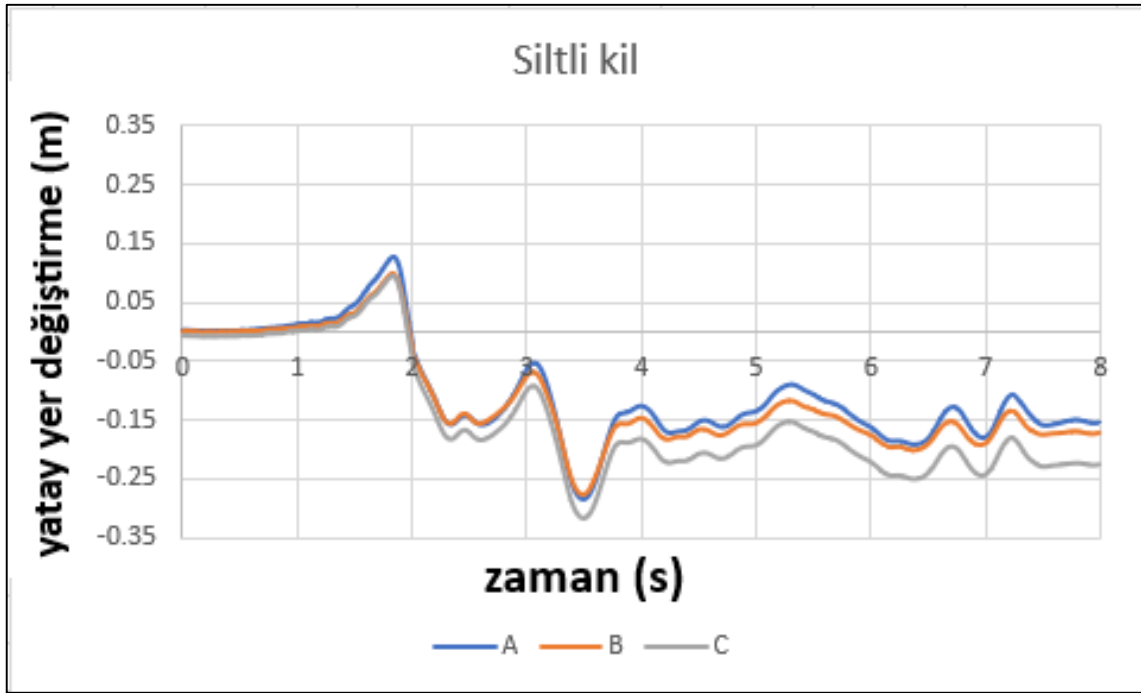
Kanyon Altında Tünelin Plastik Analizi

Sonraki aşamada, siltli kil, siltli kum ve siltli taş olmak üzere üç farklı zemin tipinin plastik davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada modelleme yapılırken Drucker-Prager yöntemi tercih edilmiştir. Bu aşama, belirtilen zemin koşulları altında tünel yapısının plastik tepkisinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir ve deformasyon ile gerilme özellikleri hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Drucker-Prager yöntemi ile ilişkili malzeme özellikleri, Tablo 13'te detaylandırılmıştır.

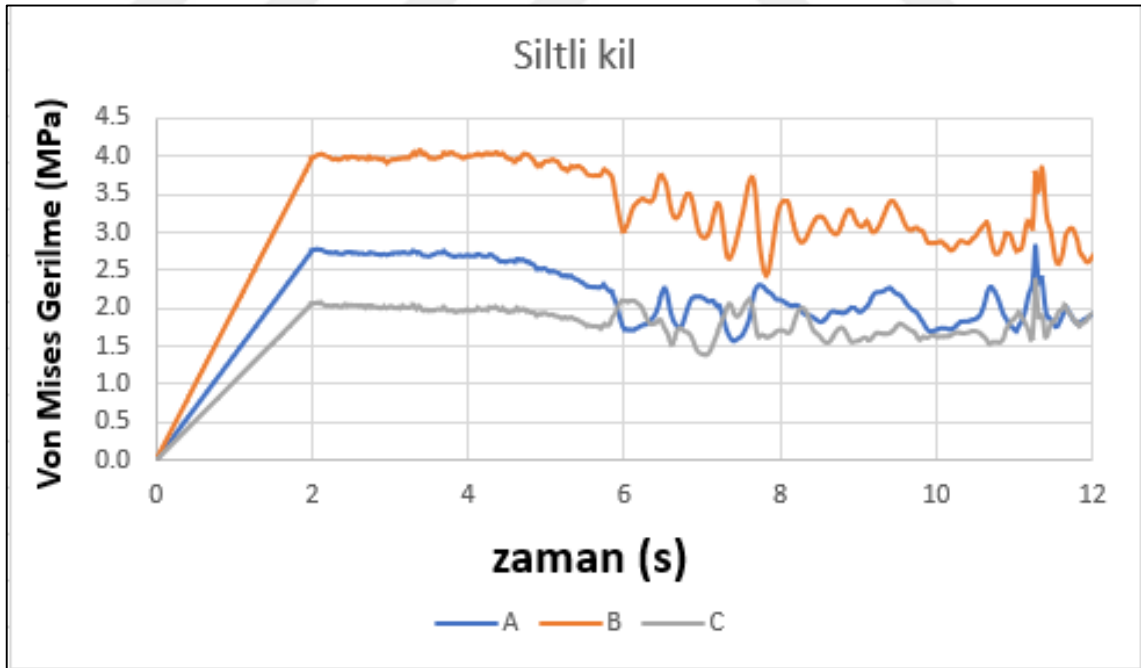
Tablo 13. Drucker-Prager Zemin Özellikleri

Malzemeler	Kohezyon (kPa)	Sürtünme açısı (°)
Siltli kil	4.95	40,18
Siltli kum	13.84	31,24
Siltli taş	21.54	24,74

Drucker-Prager yöntemi kullanılarak, Şekil 60'ta siltli kil zemin için (A, B ve C) noktalarının yer değiştirmeleri sunulmaktadır. Ayrıca, Şekil 61'de siltli kil zemin için (A, B ve C) elemanlarının Von Mises gerilme değerleri gösterilmektedir.

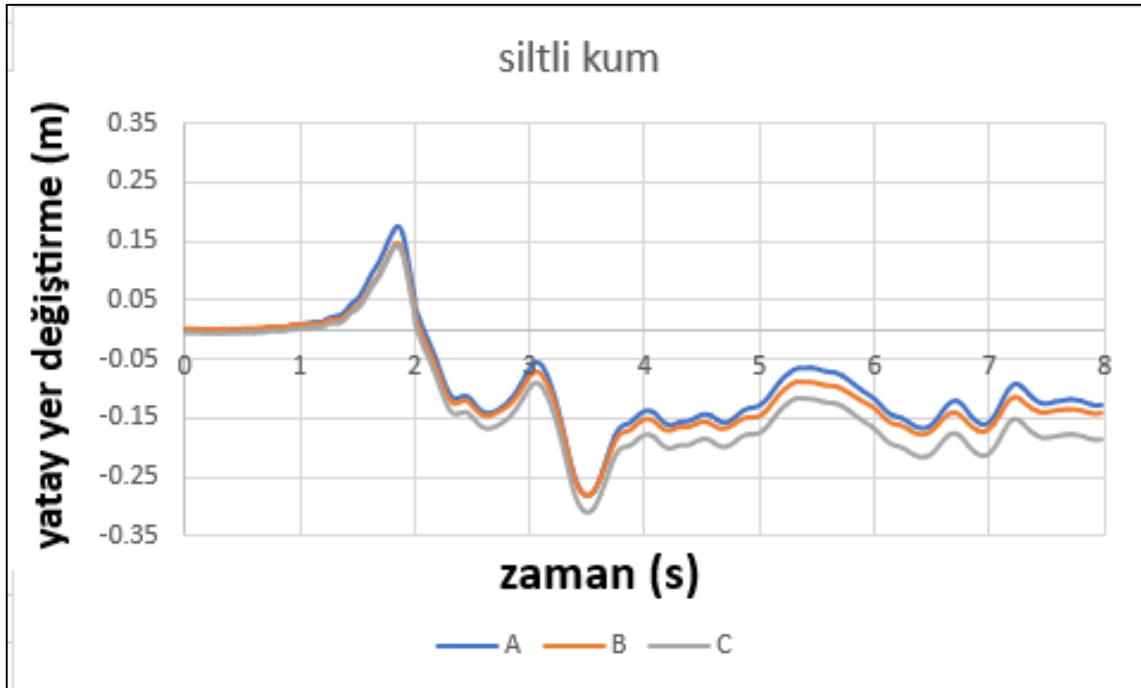


Şekil 60. Siltli kil zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi

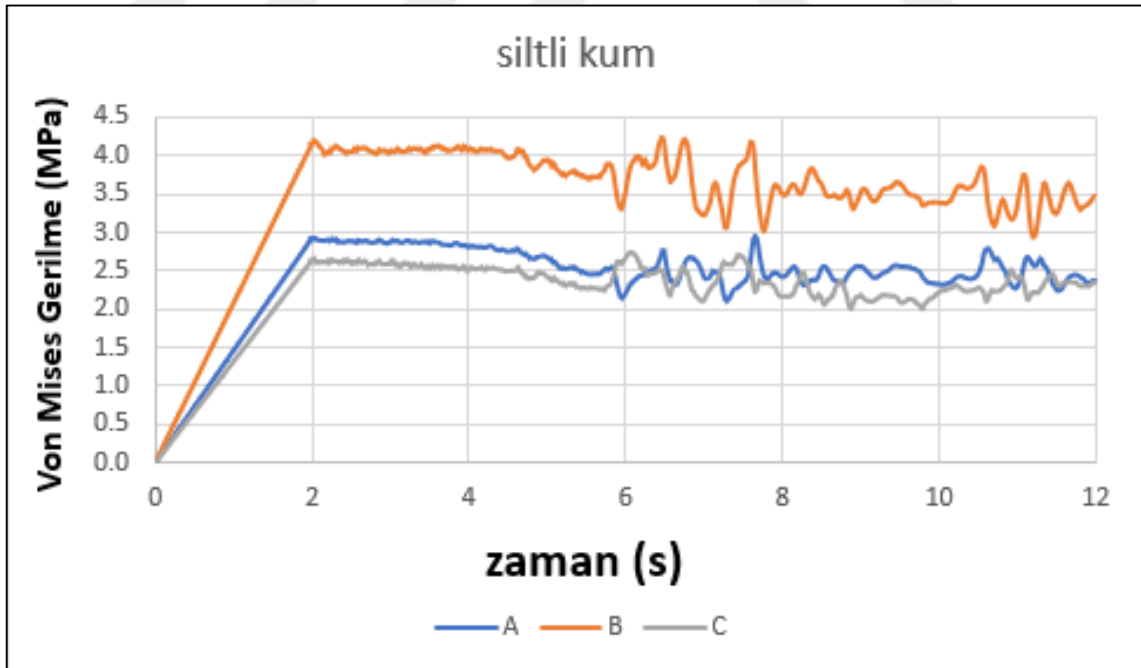


Şekil 61. Siltli kil zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi

Şekil 62'de siltli kum zemin için (A, B ve C) noktaları için Drucker-Prager yöntemi kullanılarak hesaplanan yer değiştirmeleri sunulmaktadır. Ayrıca, Şekil 63'te siltli kum zemin için (A, B ve C) elemanlarının Von Mises gerilme değerleri gösterilmektedir.

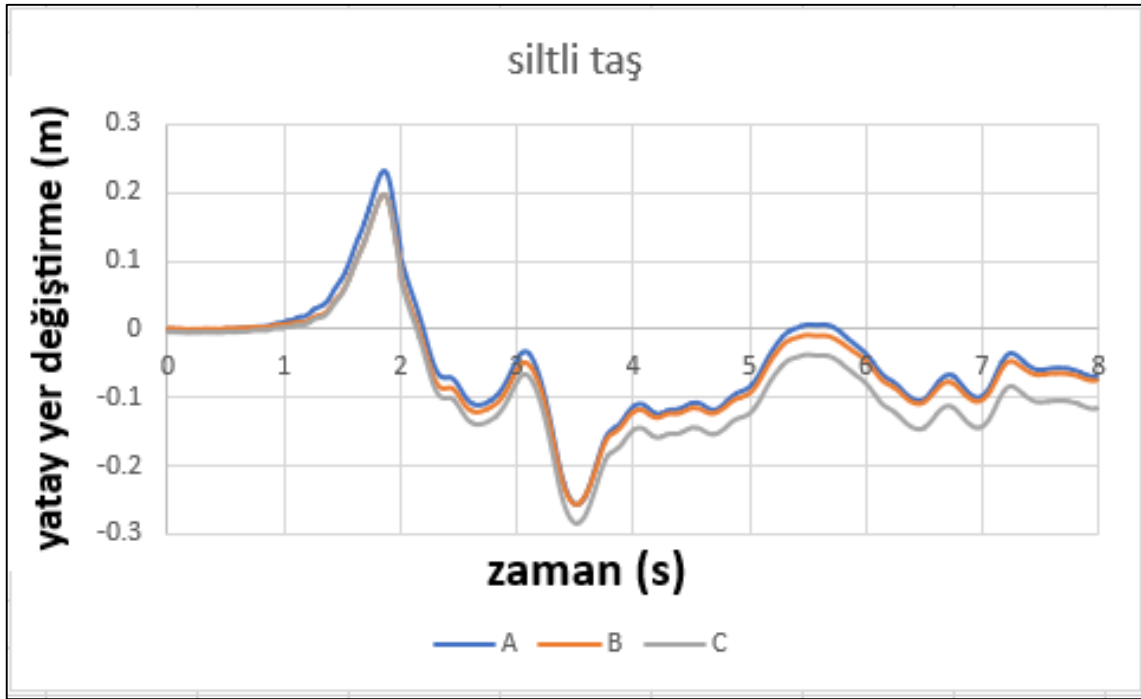


Şekil 62. Siltli kum zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi

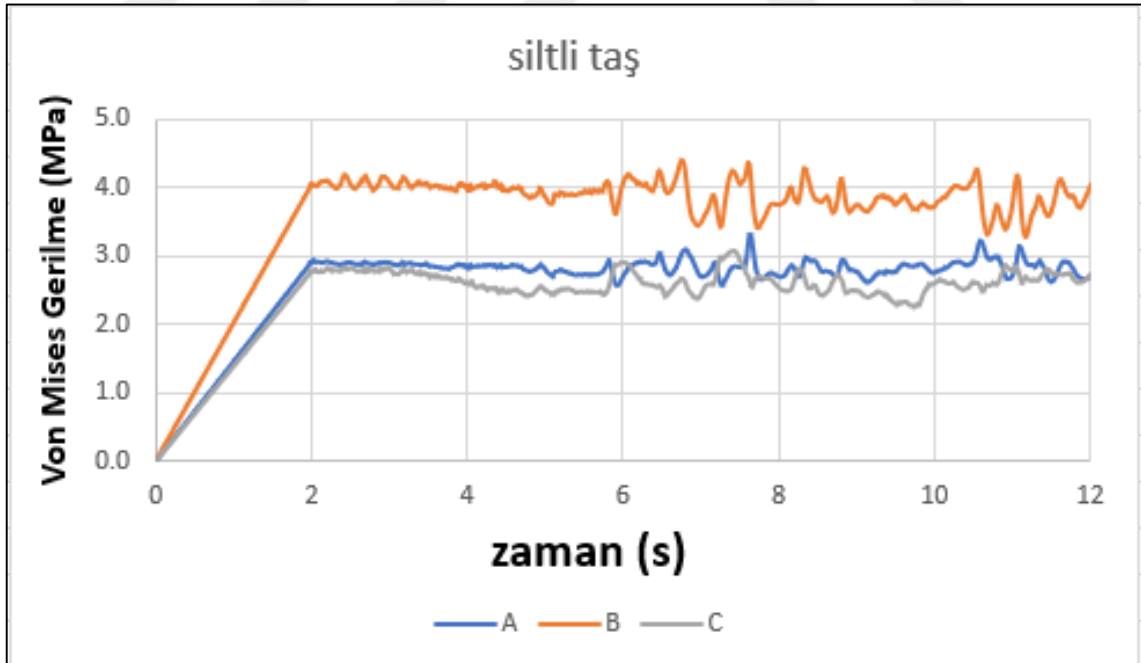


Şekil 63. Siltli kum zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi

Şekil 64'te siltli taş zemin için (A, B ve C) noktaları için Drucker-Prager yöntemi kullanılarak hesaplanan yer değiştirmeler sunulmaktadır. Ek olarak, Şekil 65'te siltli taş zemin için (A, B ve C) elemanlarının Von Mises gerilme değerleri gösterilmektedir.

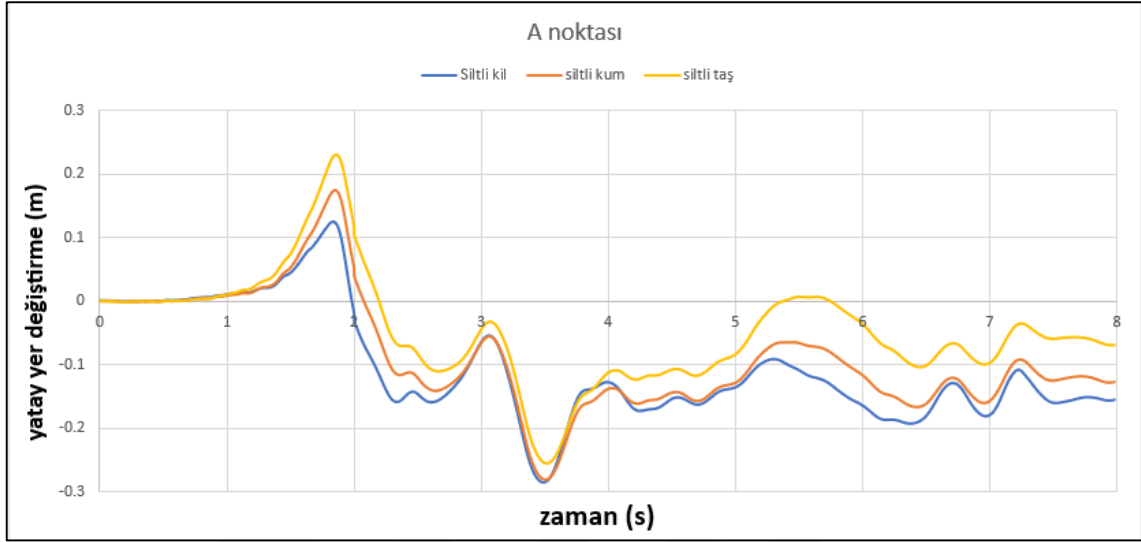


Şekil 64. Siltli taş zeminde (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi

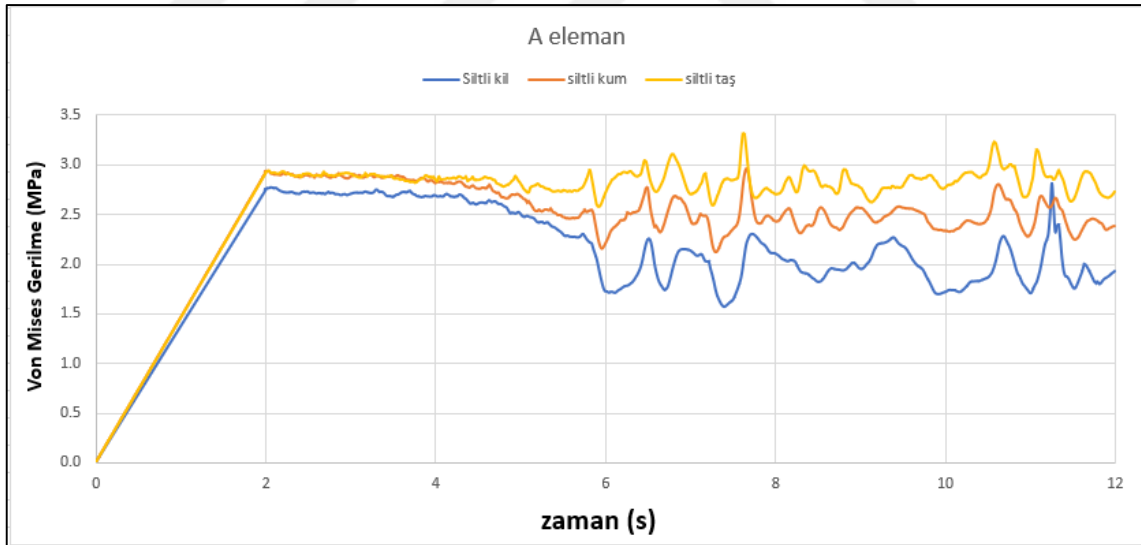


Şekil 65. Siltli taş zeminde (A, B ve C) elemanlarının gerilme - zaman ilişkisi

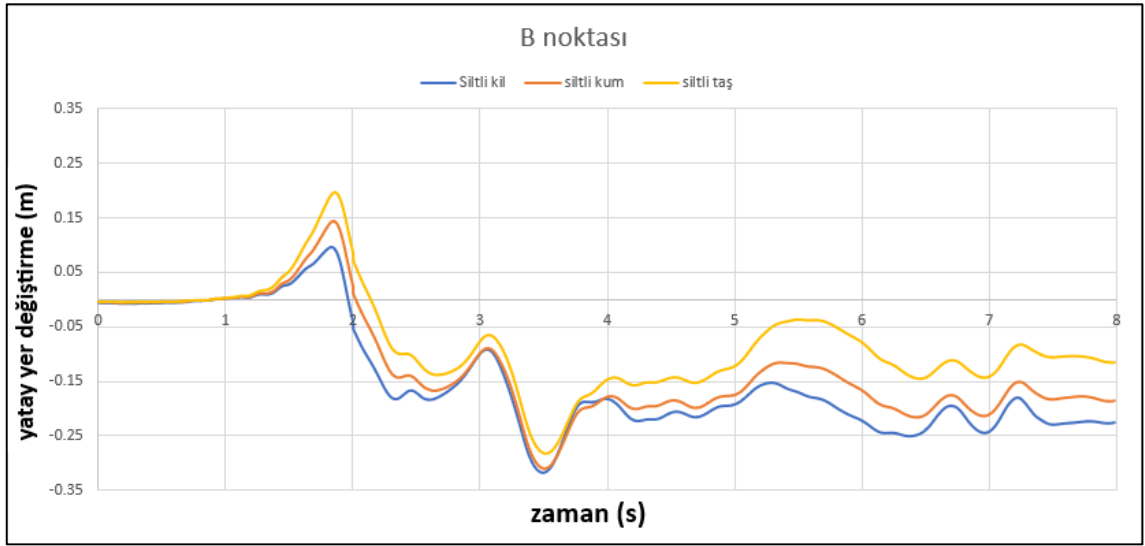
Drucker-Prager yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalarda en yüksek yer değiştirmelerin A noktasında, ardından B ve C noktalarında gerçekleştiği görülmüş ve bu değerler sırasıyla Şekil 66, Şekil 68 ve Şekil 70'te sunulmaktadır. Ayrıca, tünel elemanları üzerindeki gerilme dağılımı incelendiğinde, B elemanının en yüksek gerilme değerini taşıdığı, bunu takiben A ve C elemanlarının geldiği Şekil 67, Şekil 69 ve Şekil 71'de gösterilmiştir.



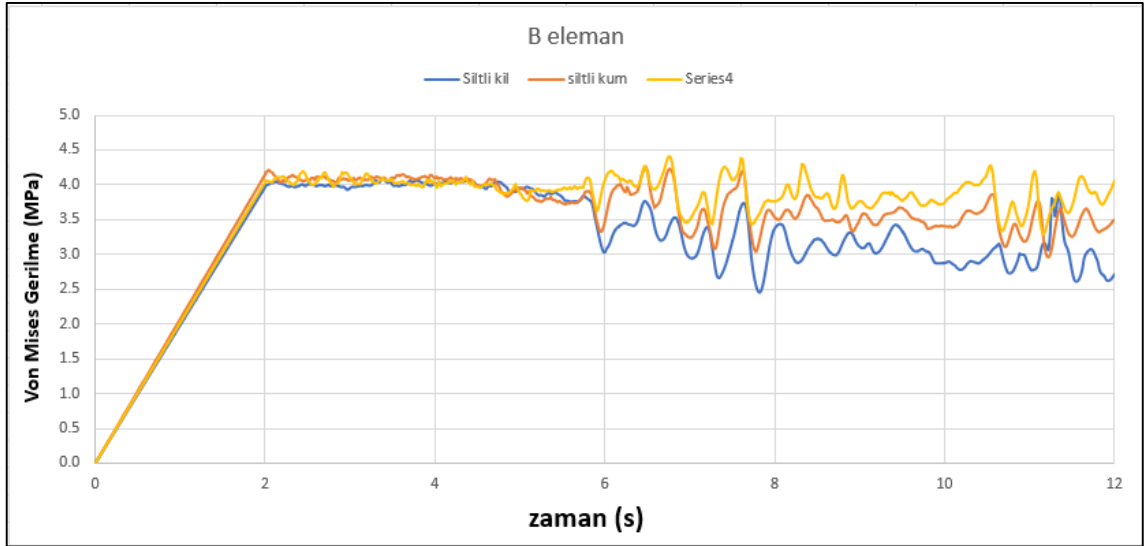
Şekil 66. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde A noktasındaki plastik yer değiştirme



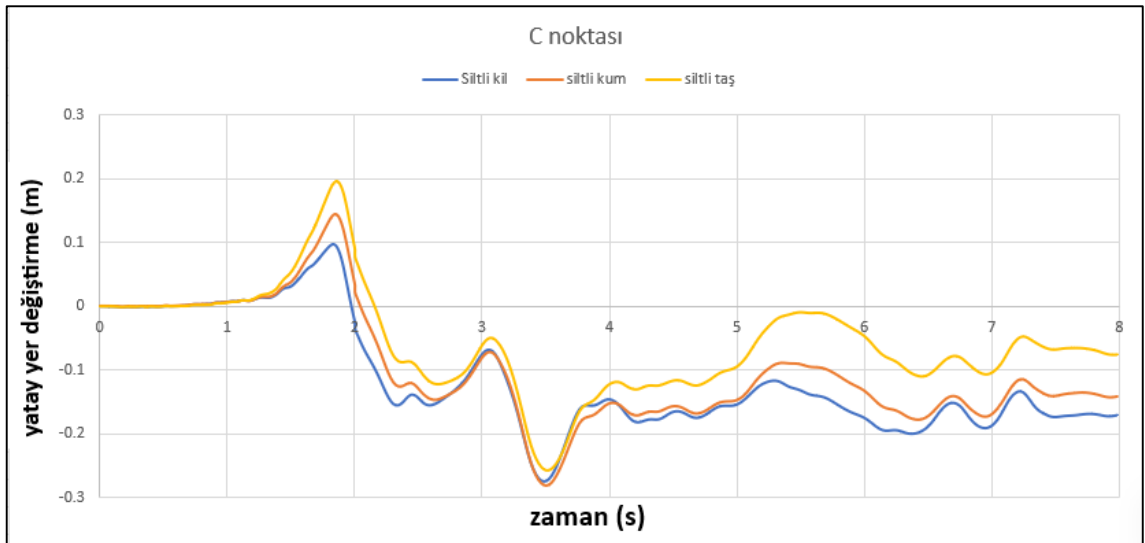
Şekil 67. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde A elemanındaki plastik gerilme



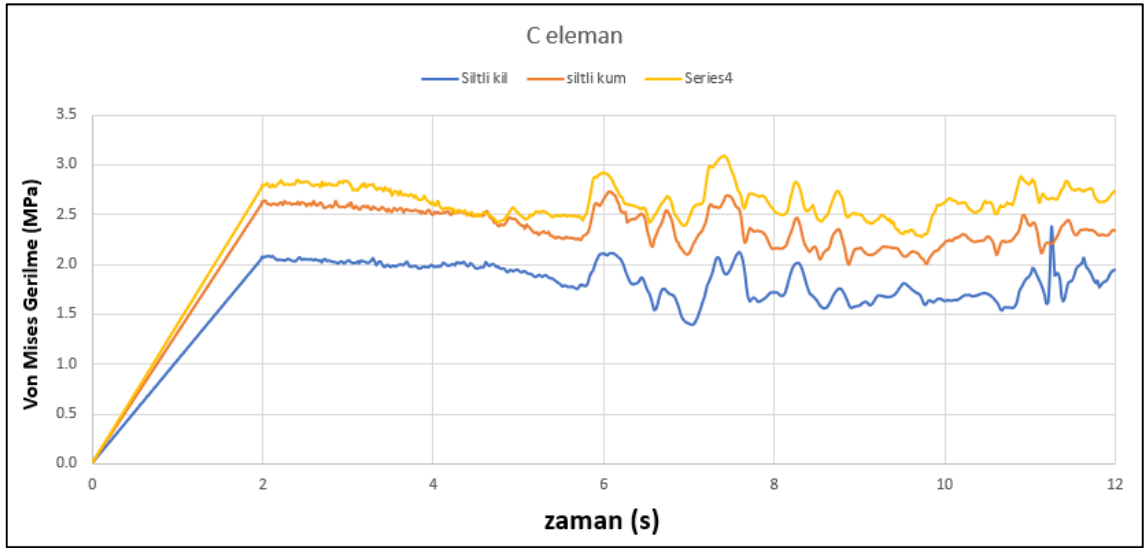
şekil 68. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde B noktasındaki plastik yer değiştirme



şekil 69. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde B elemanındaki plastik gerilme



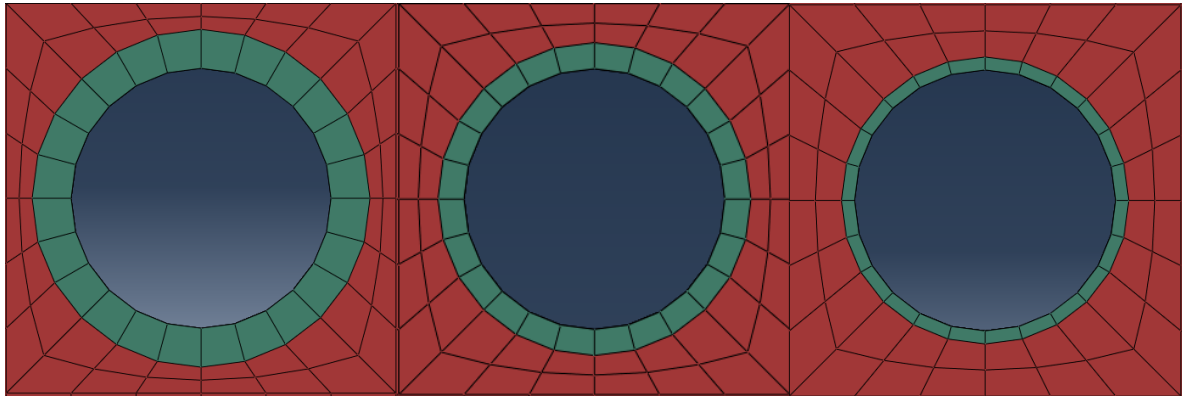
şekil 70. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde C noktasındaki plastik yer değiştirme



Şekil 71. Siltli kil, siltli kum ve siltli taş zeminlerinde C elemanındaki plastik gerilme

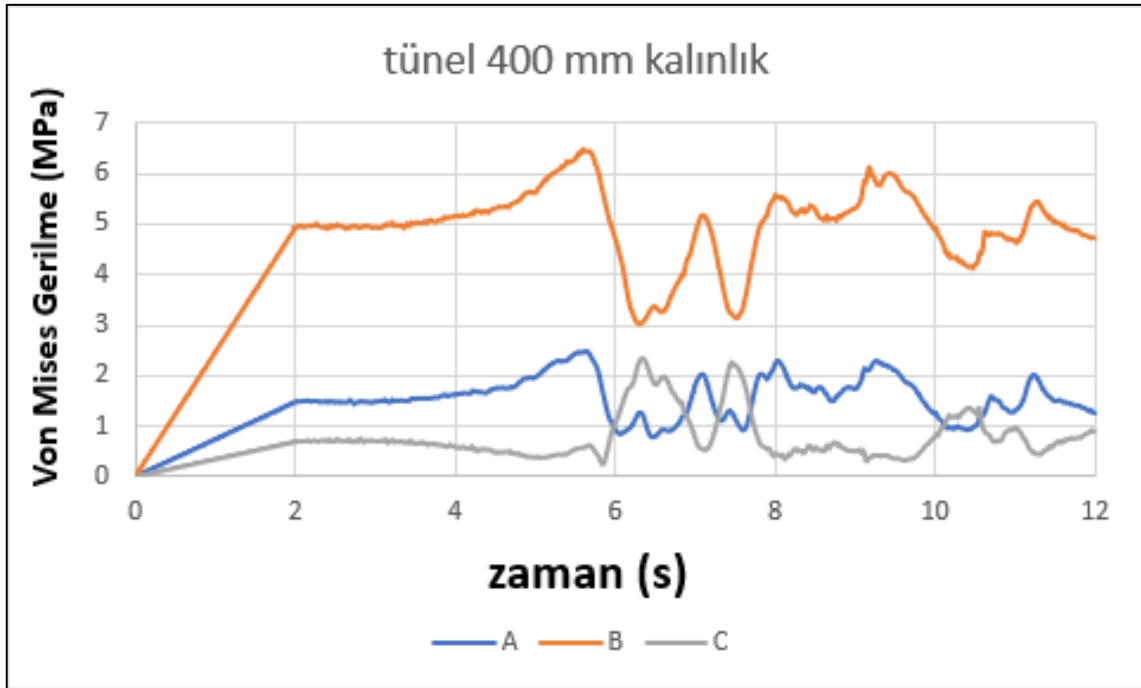
Farklı Tünel Kalınlıkları İçin Yapılan Analizler

Bu analiz aşamasında, üç farklı kalınlıkta (400, 800 ve 1200 mm) tünel modelleri kullanılmıştır ve bu modeller Şekil 72'de gösterilmektedir. Von Mises gerilmesi ve şekil değiştirme, bu farklı kalınlık değerleri boyunca sistematik bir şekilde değerlendirilen önemli parametrelerdir. Bu değerlendirmelerin amacı, değişen tünel kalınlığının yapısal dayanıklılık üzerindeki etkilerini ve optimal eşik değerlerini belirlemektir.

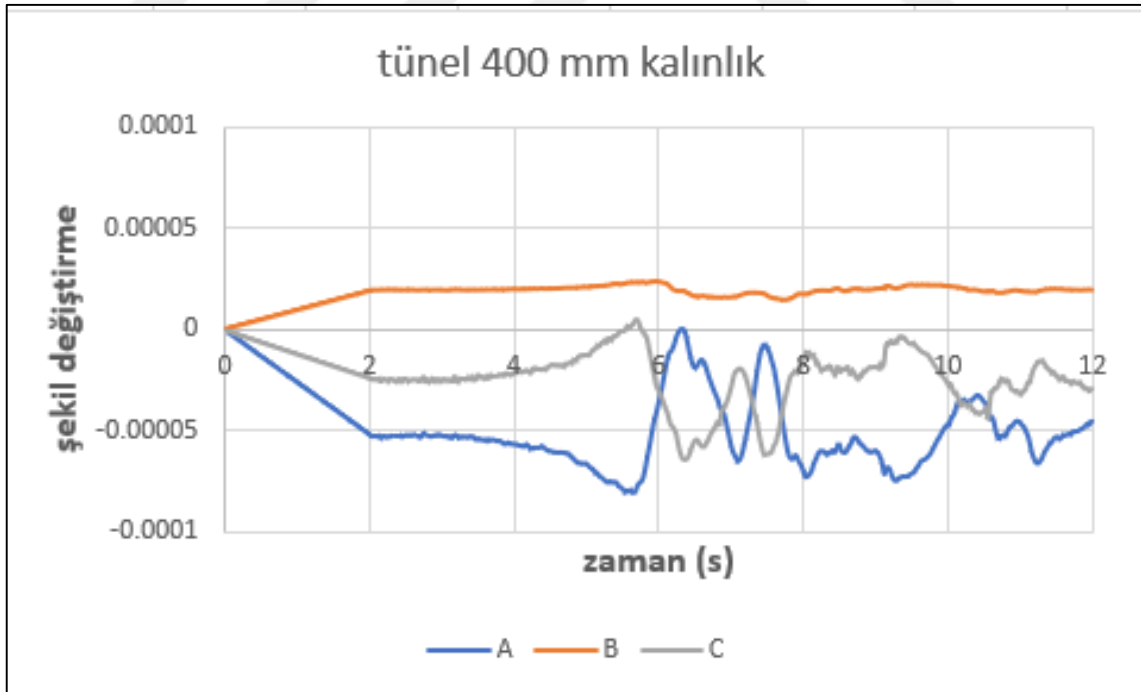


Şekil 72. 400, 800 ve 1200 mm kalınlı tünel kesitlerinin model görünüşleri

400 mm kalınlıındaki tünel için, (A, B ve C) noktalarında bulunan üç eleman için hesaplanan sonuçlar, Œekil 73'te Von Mises gerilmesi ve Œekil 74'te Œekil deęiŒtirme olarak sunulmaktadır.

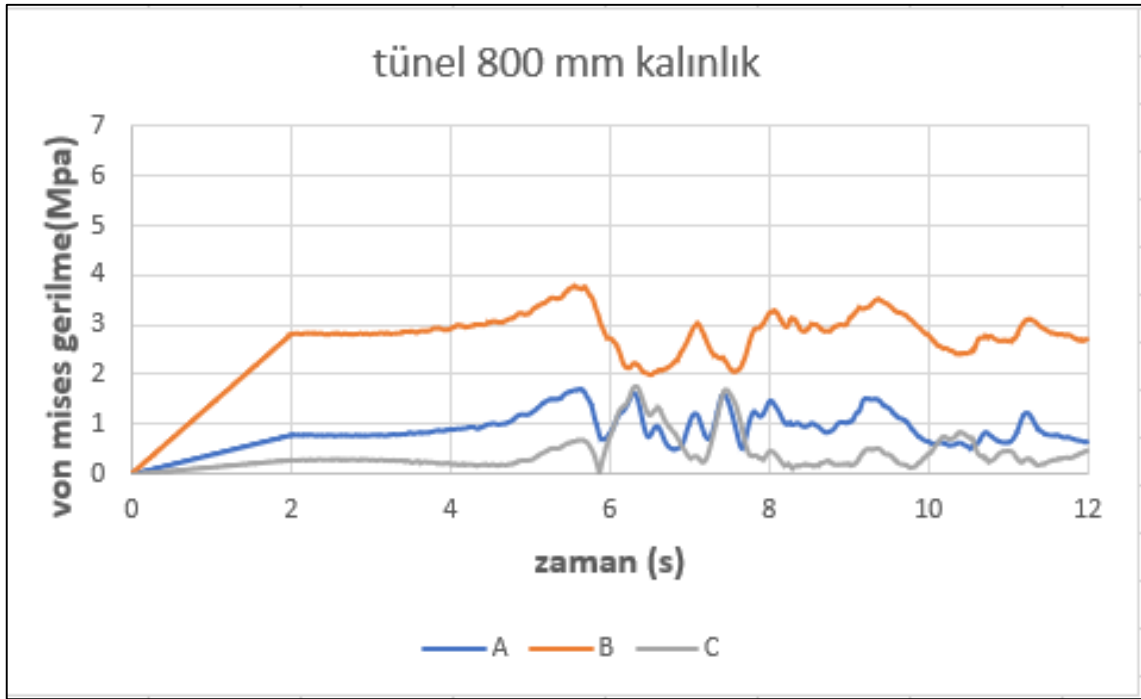


Œekil 73. 400 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki gerilme - zaman iliŒkisi

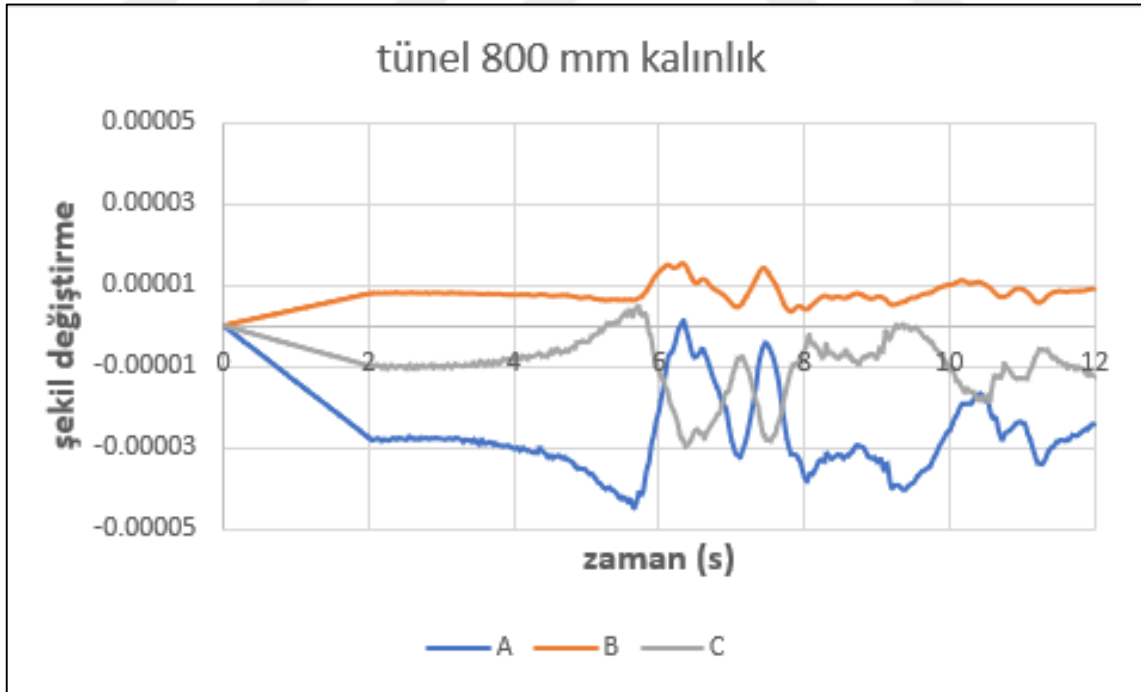


Œekil 74. 400 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki Œekil deęiŒtirme - zaman iliŒkisi

800 mm kalınlıındaki tünel için, (A, B ve C) noktalarında bulunan üç eleman için hesaplanan sonuçlar, Œekil 75'te Von Mises gerilmesi ve Œekil 76'da Œekil deęiŒtirme olarak sunulmaktadır.

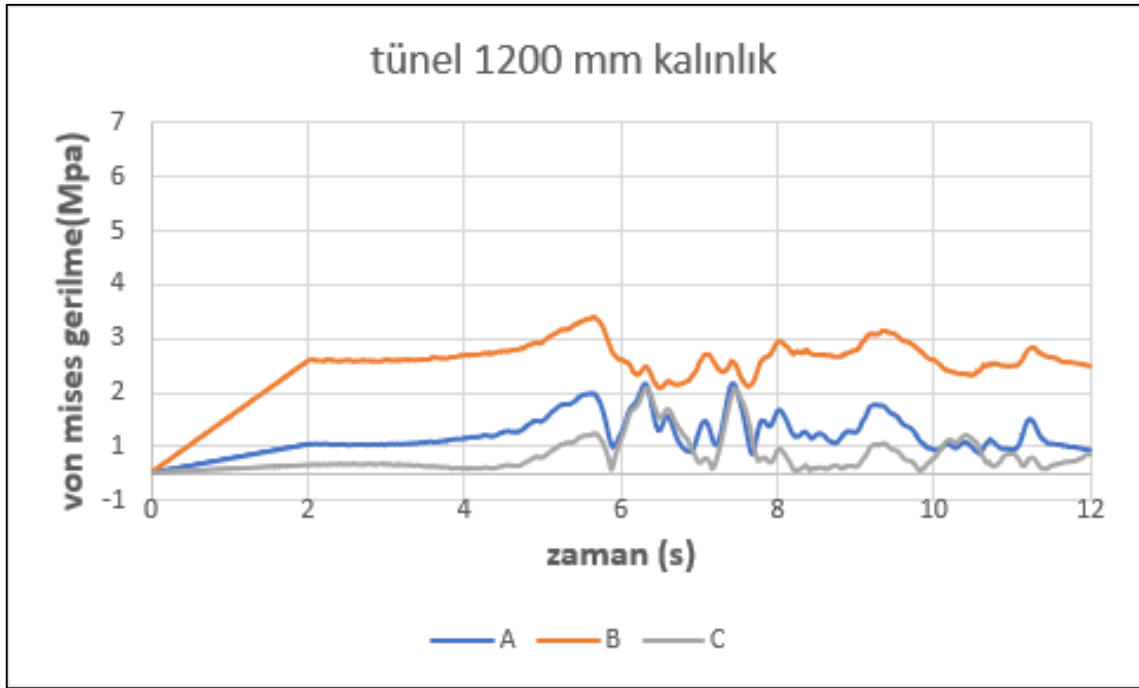


Œekil 75. 800 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki gerilme - zaman iliŒkisi

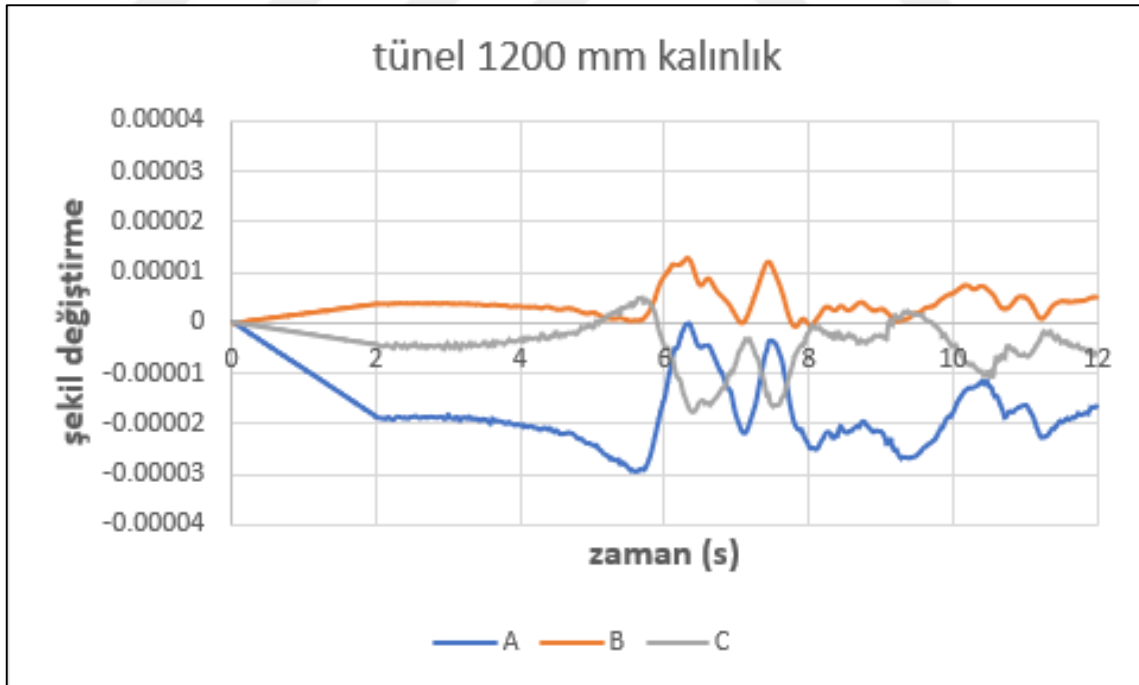


Œekil 76. 800 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki Œekil deęiŒtirme - zaman iliŒkisi

1200 mm kalınlığındaki tünel için, (A, B ve C) noktalarında bulunan    eleman için hesaplanan sonuçlar, Şekil 77'de Von Mises gerilmesi ve Şekil 78'de Şekil değiştirme olarak sunulmaktadır.

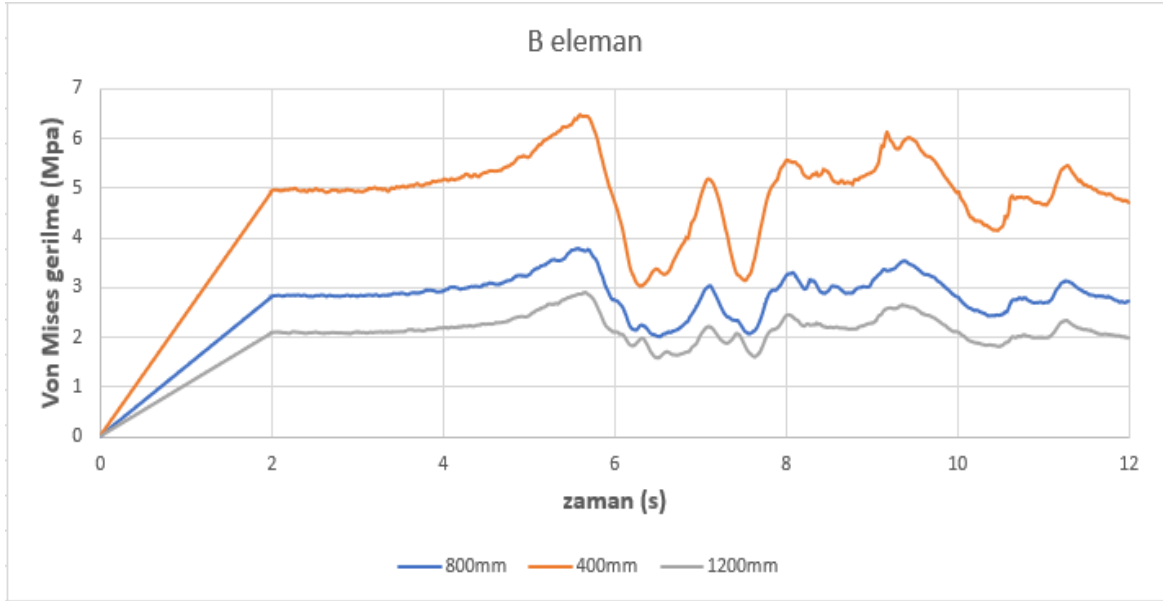


Şekil 77. 1200 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki gerilme - zaman ilişkisi

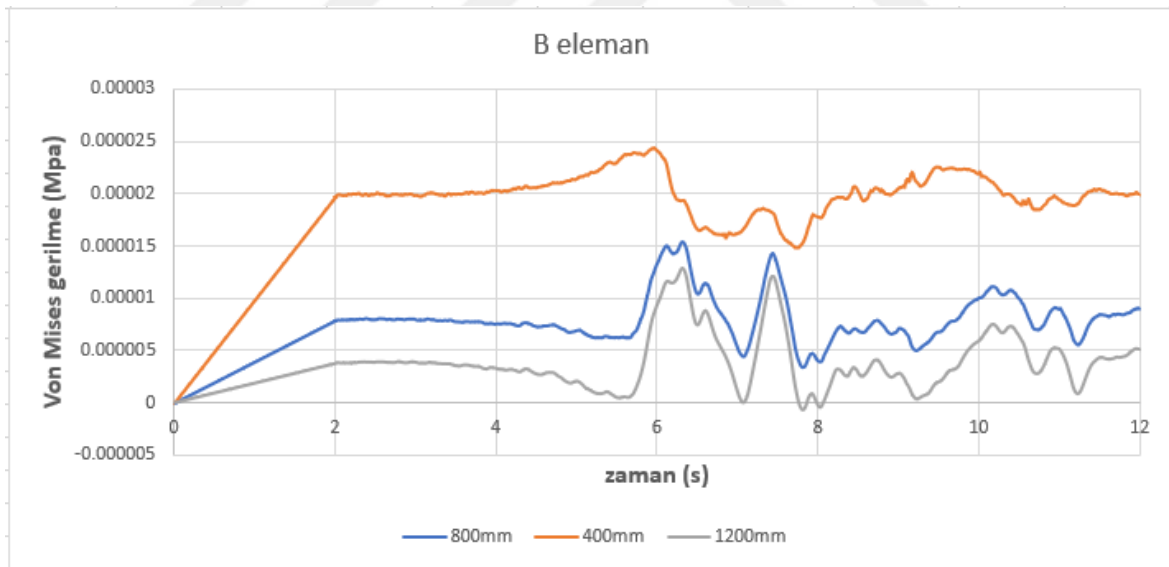


Şekil 78. 1200 mm tünel kalınlığı (A, B ve C) elemanındaki Şekil değiştirme - zaman ilişkisi

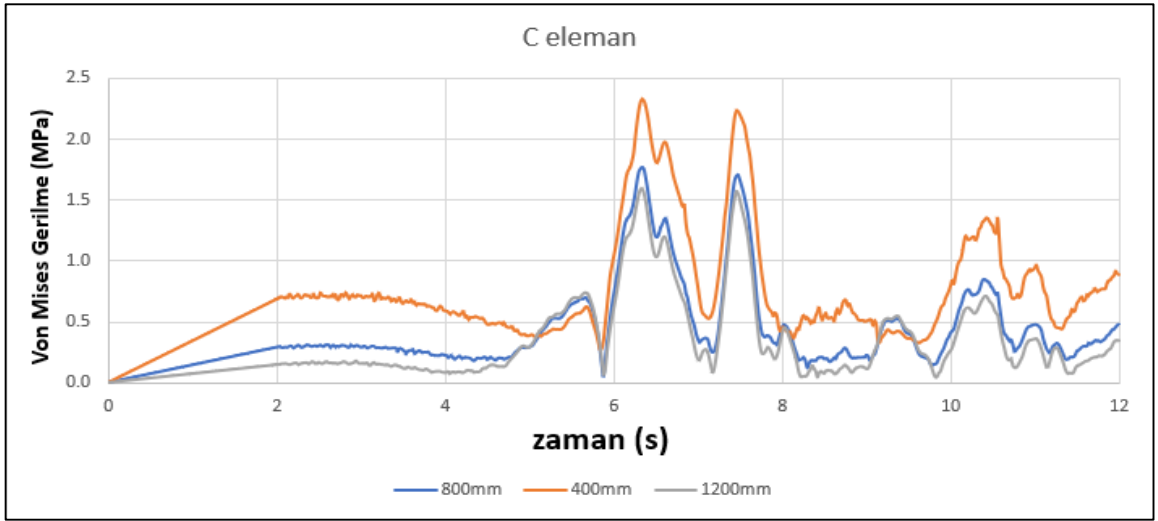
Tünel kalınlığındaki artışın hem Von Mises gerilmesi hem de şekil değıştirme üzerinde etkili olduğu görölmektedir. Von Mises gerilmesi, (A, B ve C) elemanları için Şekil 79, Şekil 81 ve Şekil 83'te görsel olarak sunulurken; şekil değıştirme, (A, B ve C) elemanları için Şekil 80, Şekil 82 ve Şekil 84'te temsil edilmektedir.



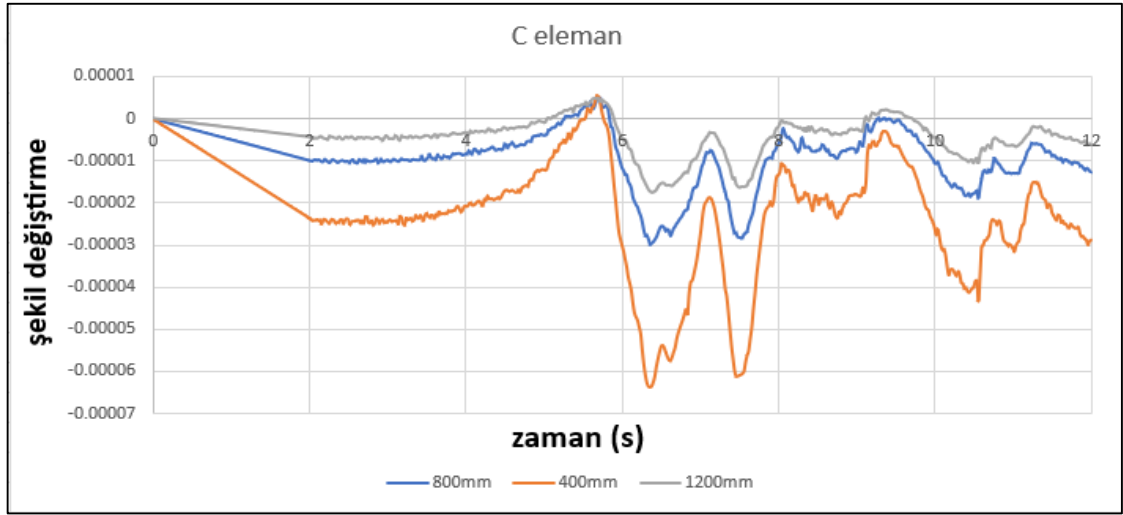
Şekil 79. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için B elemandaki gerilme - zaman ilişkisi



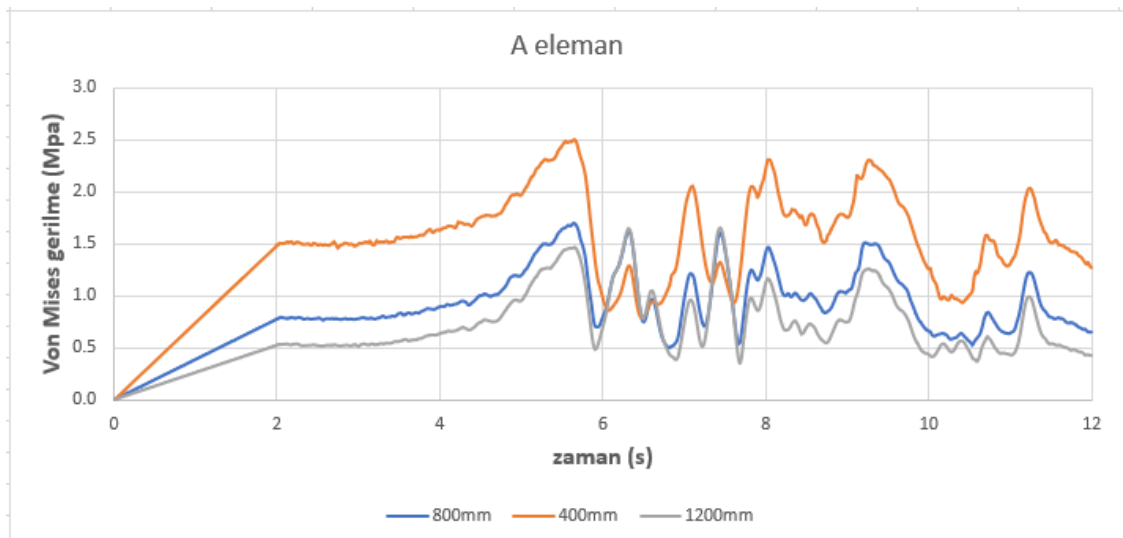
Şekil 80. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için B elemandaki şekil değıştirme - zaman ilişkisi



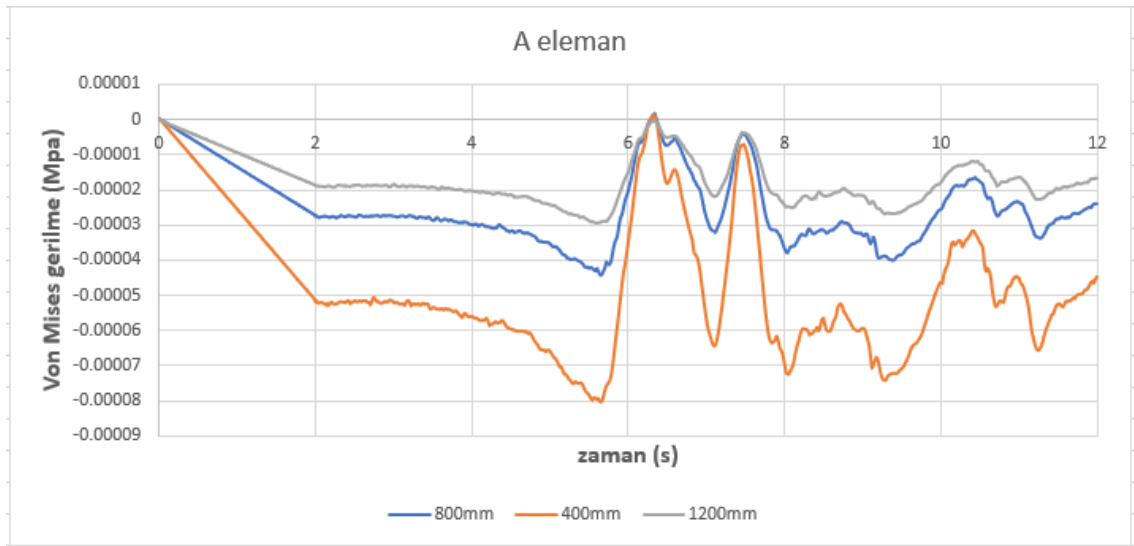
Şekil 81. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için C elemandaki gerilme - zaman ilişkisi



Şekil 82. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için C elemandaki şekil değiştirme - zaman ilişkisi



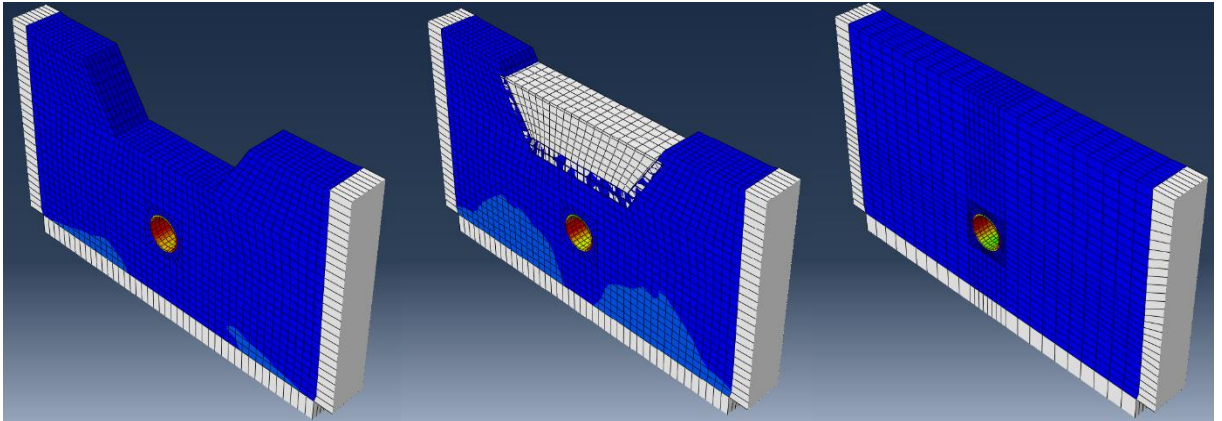
Şekil 83. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için A elemandaki gerilme - zaman ilişkisi



Şekil 84. 400, 800 ve 1200 mm tünel kalınlıkları için A elemandaki şekil değıştirme - zaman ilişkisi

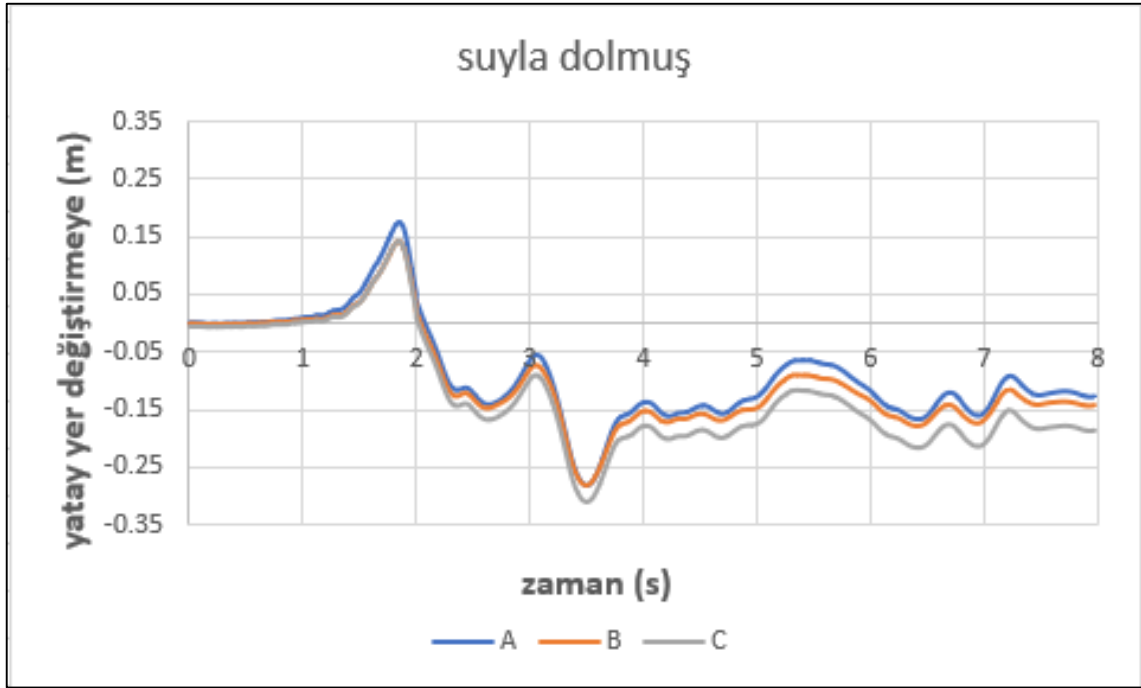
Boş, Su Dolu ve Zemin Dolu Kanyonların Analizi

Bu aşamada yapılan çalışmada siltli kum zeminin plastik davranışını incelemek amacıyla Drucker-Prager yöntemi kullanılarak üç farklı model üzerinde analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizlere konu olan modeller suyla dolmuş kanyon, boş kanyon ve zeminle dolmuş kanyon olmak üzere üç ayrı durumu temsil eder niteliktedir ve Şekil 85'te görsel olarak sunulmaktadır.

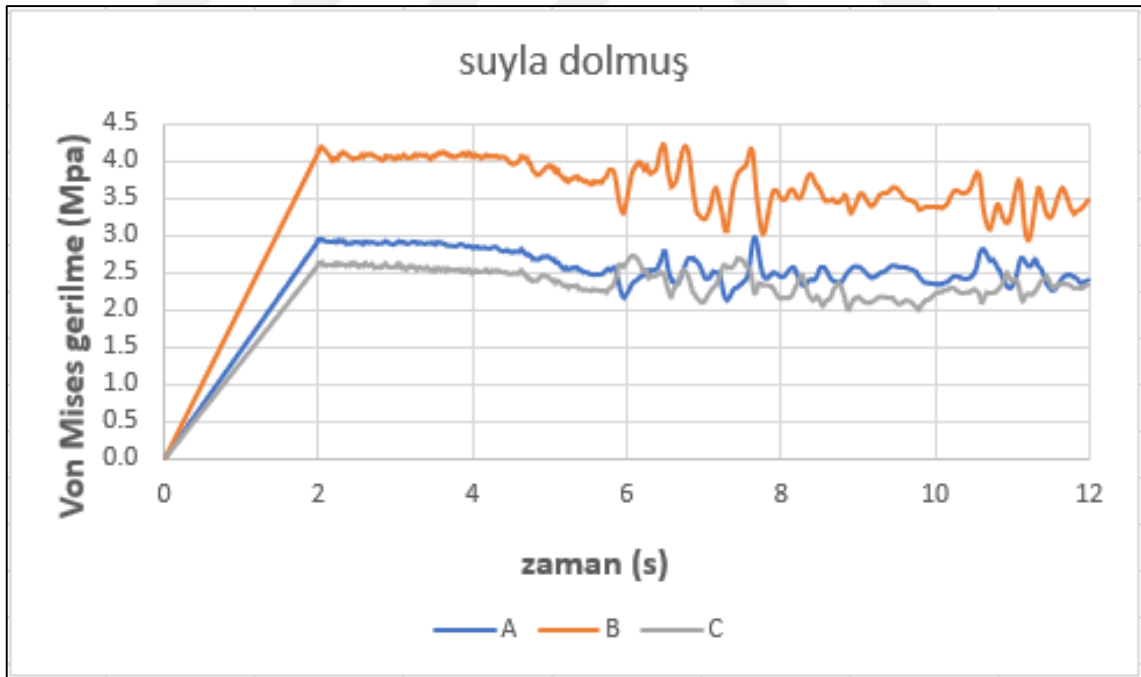


Şekil 85. Boş, su dolu ve deminle dolu kanyon modelleri

Kanyonun suyla doldurulması durumunda, (A, B ve C) noktalarında yer değıştirme için hesaplanan sonuçlar Şekil 86'da, Von Mises gerilme sonuçları ise Şekil 87'de sunulmuştur.

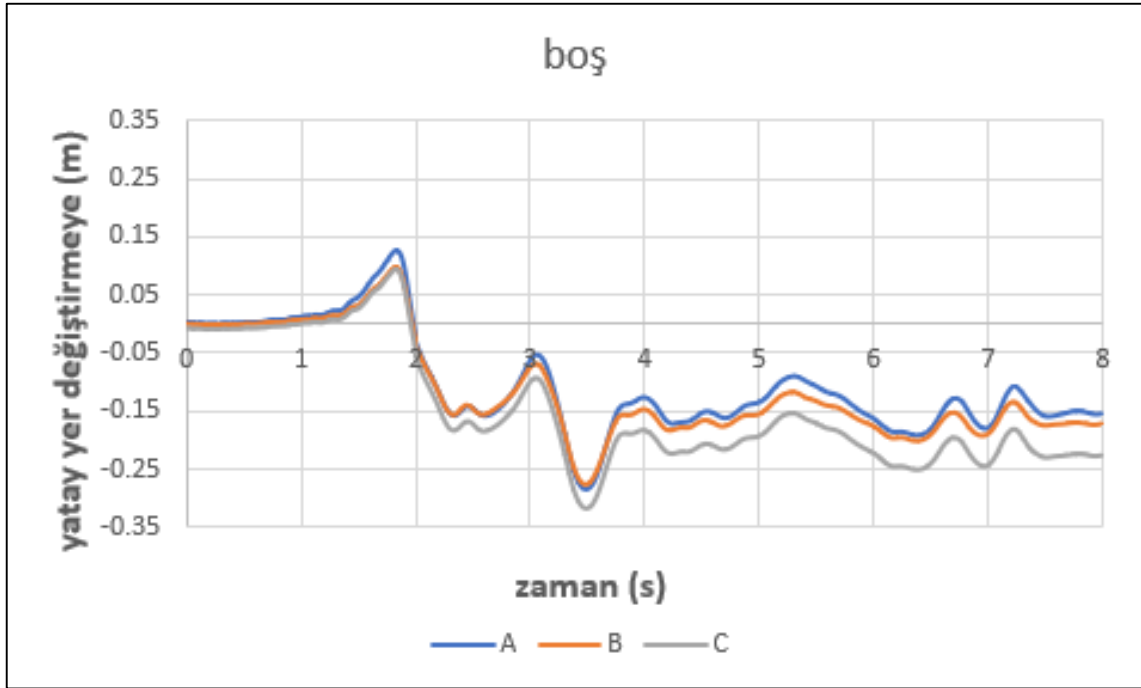


Şekil 86. Kanyonun su ile doldurulması durumunda (A, B ve C) noktalarının yer değıştirmesi ile zaman arasındaki ilişki

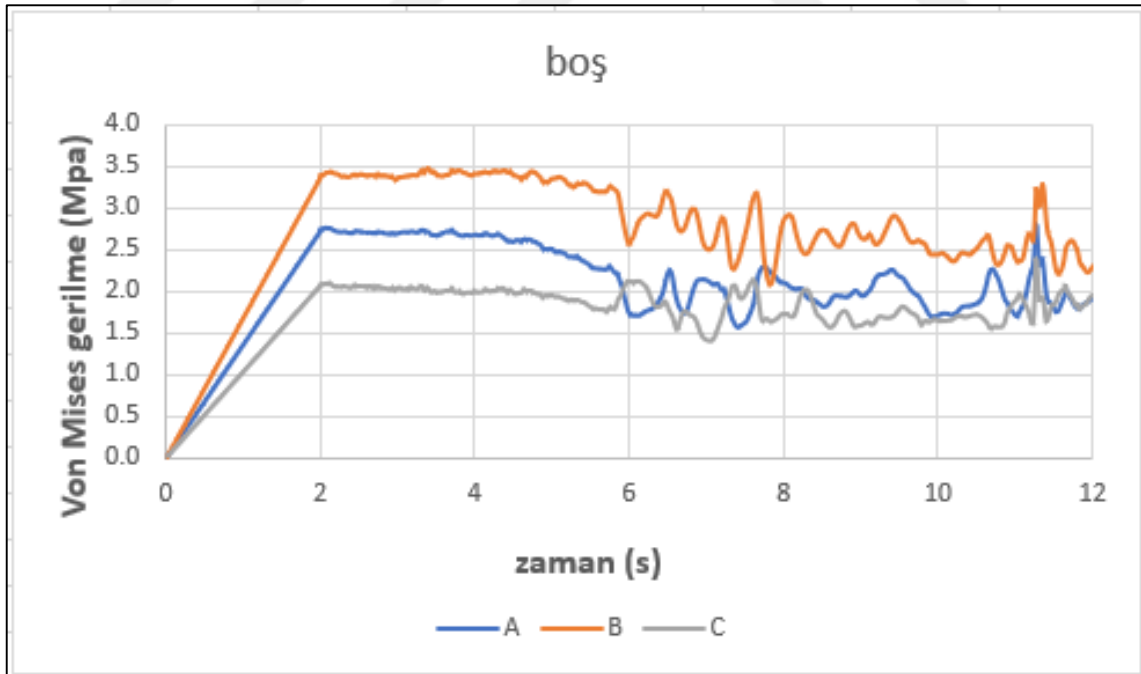


Şekil 87. Kanyonun su ile doldurulması durumunda (A, B ve C) elemanlarında hesaplanan Von-Mises gerilmesi ile zaman arasındaki ilişki

Boş kanyon için (A, B ve C) noktalarında elde edilen yer değiştirme ve Von-Mises gerilmesi sonuçları sırasıyla Şekil 88 ve Şekil 89'da sunulmuştur.

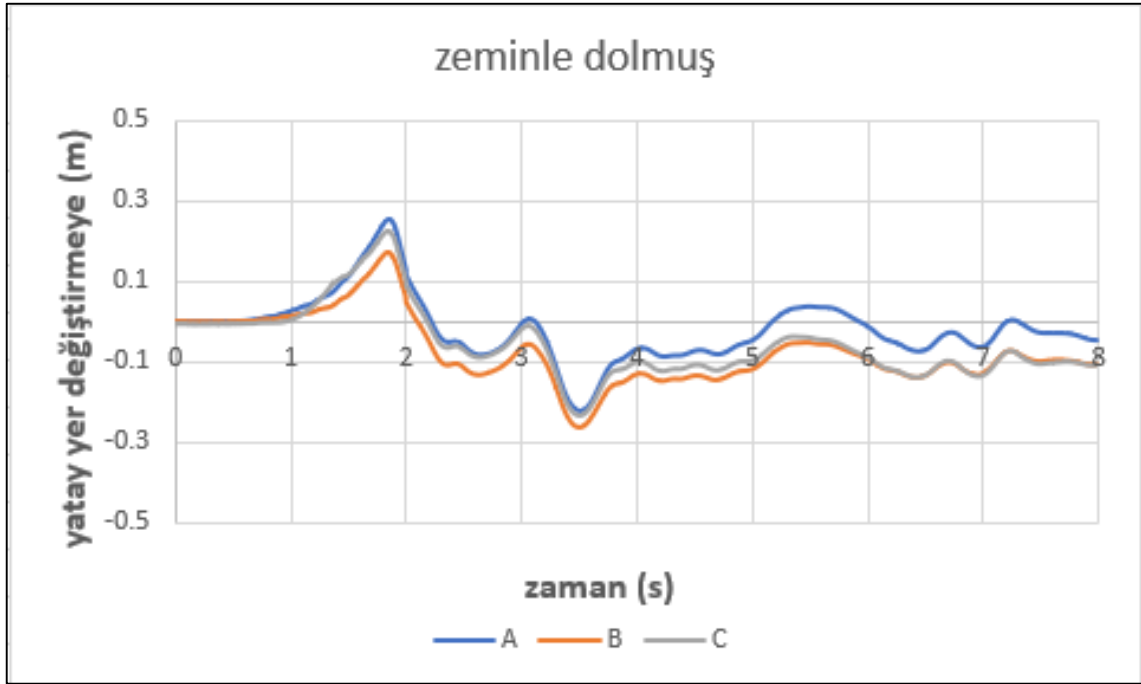


Şekil 88. Boş kanyonun (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi

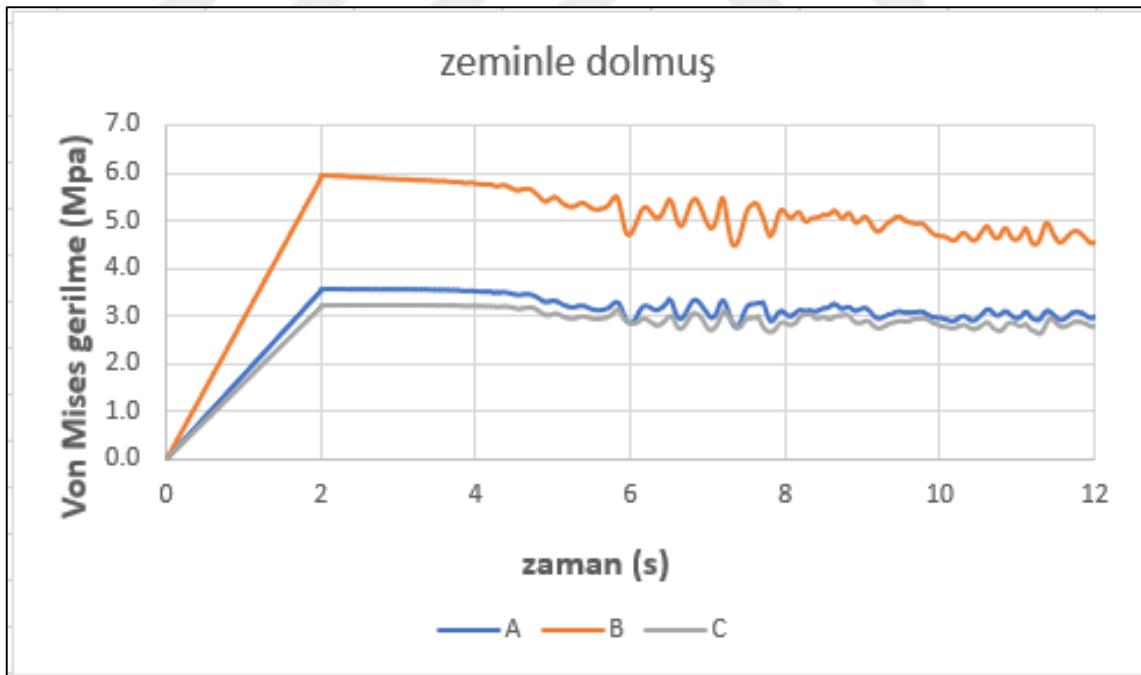


Şekil 89. Boş kanyonun (A, B ve C) elemanlarının Von Mises gerilme - zaman ilişkisi

Zeminle dolu kanyon için (A, B ve C) noktalarında elde edilen yer değiştirme ve Von-Mises gerilmesi sonuçları sırasıyla şekil 90 ve şekil 91’de sunulmuştur.

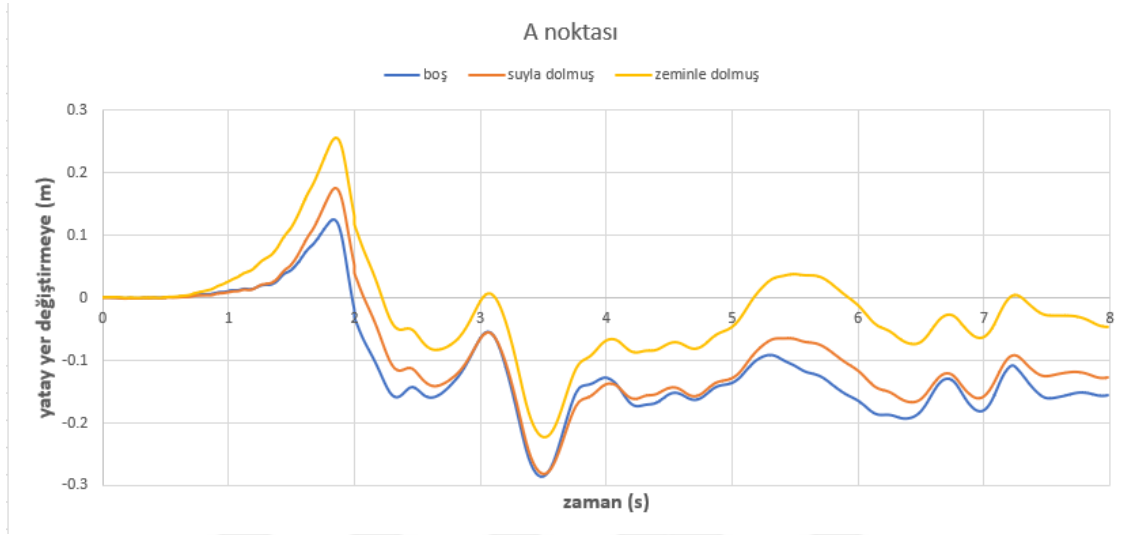


şekil 90. Zeminle doldurulmuş kanyonun (A, B ve C) noktalarının yer değiştirme - zaman ilişkisi

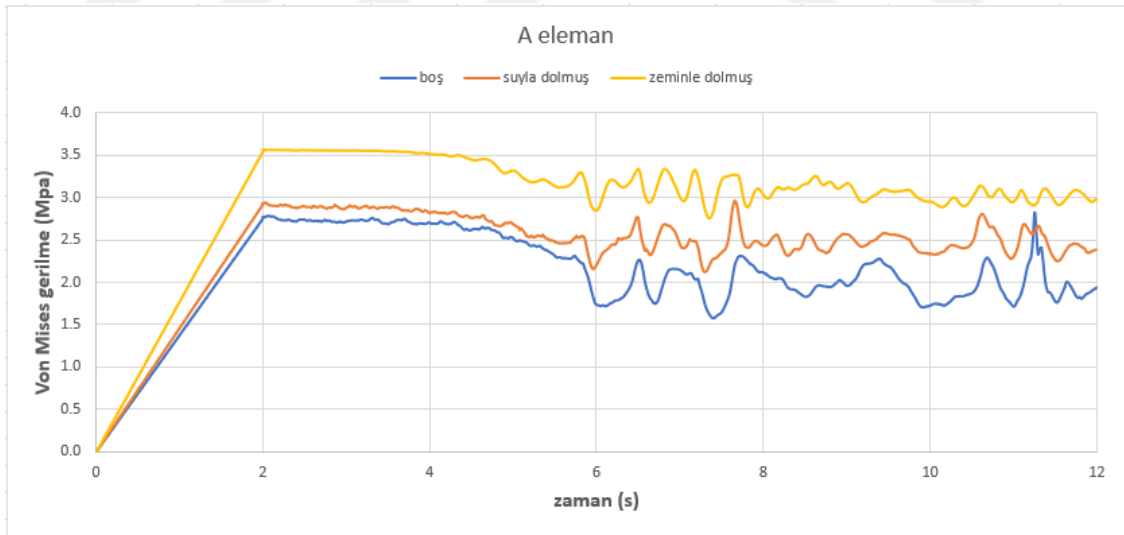


şekil 91. Zeminle doldurulmuş kanyonun (A, B ve C) elemanlarının Von Mises gerilme - zaman ilişkisi

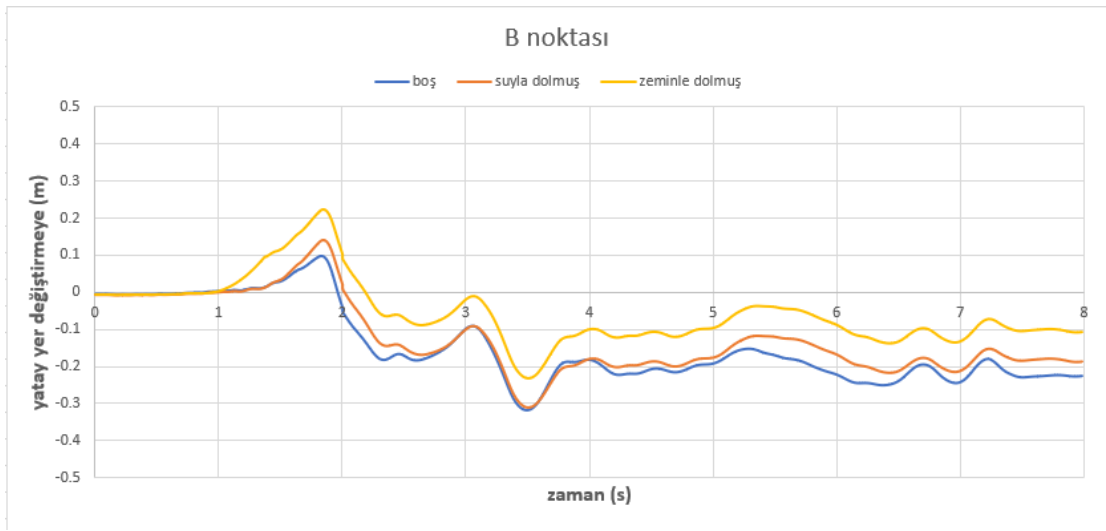
Kanyonun suyla dolu boş ve zeminle dolu kanyon durumları için gerçekleştirilen üç farklı analizde en yüksek yer değiştirme değerleri, A noktasında, ardından B ve C noktalarında elde edilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 92, Şekil 94 ve Şekil 96'da görselleştirilmiştir. Ayrıca, tünel elemanları üzerindeki gerilme dağılımı incelendiğinde, B elemanının en yüksek gerilme değerine sahip olduğu, bunu A ve C elemanlarının takip ettiği gözlemlenmiştir. Bu gerilme dağılımı, Şekil 93, Şekil 95 ve Şekil 97'de sunulmuştur.



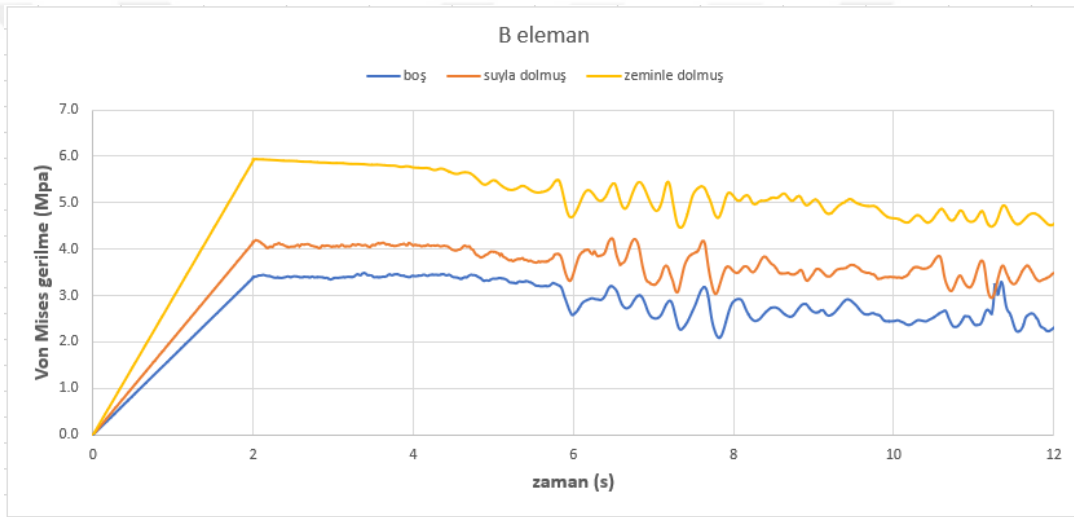
Şekil 92. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında A noktasında hesaplanan yer plastik değiştirme değerleri



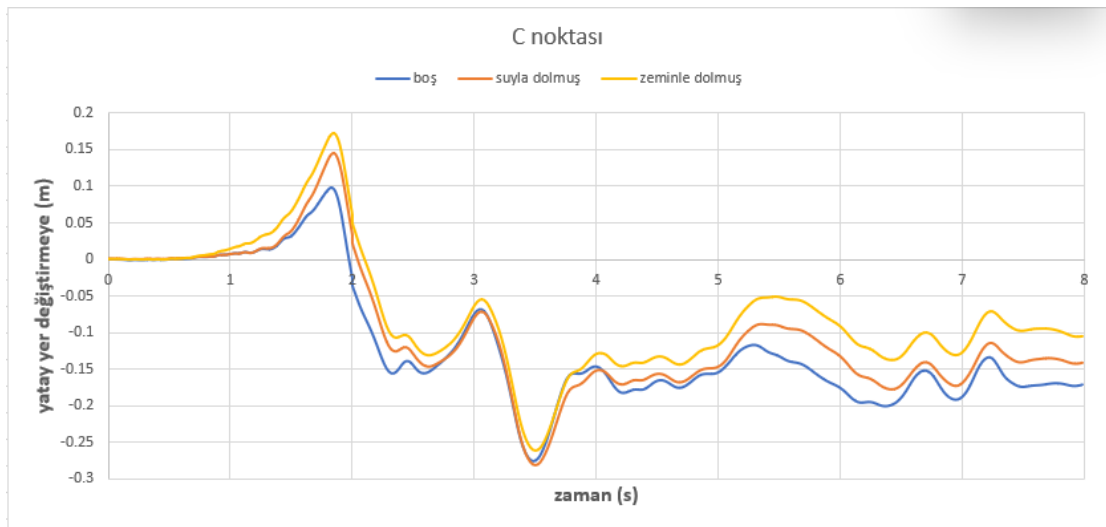
Şekil 93. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında A elemanında hesaplanan plastik gerilme değerleri



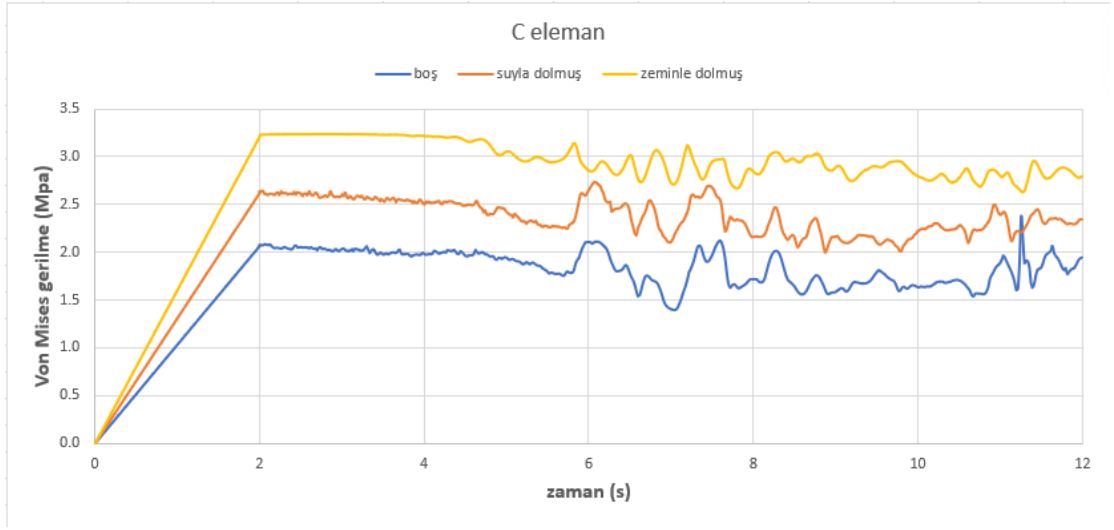
Şekil 94. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında B noktasında hesaplanan plastik yer değiştirme değerleri



Şekil 95. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında B elemanında hesaplanan plastik gerilme değerleri



Şekil 96. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında C noktasında hesaplanan plastik yer değiştirme değerleri



Şekil 97. Suyla dolu, boş ve zeminle dolu kanyon durumlarında C elemanında hesaplanan plastik gerilme değerleri

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yer altı yapıları, yer üstündeki yapılarla karşılaştırıldığında deprem yüklerine daha az duyarlılık gösterir. Doğal faktörlerden kaynaklanan yüksek kütle ve atalet avantajlarından faydalanan yer altı yapıları deprem kuvvetlerinin oluşturduğu yer değiştirmelere karşı direnci artırır. Çevreleyen zemin, yer altı yapısına doğal bir sönümleme mekanizması işlevi görerek, deprem enerjisini dağıtmakta ve yer altı yapısına iletilen zemin hareketini azaltmaktadır. Yer altı yapısının sismik direnci zemin dayanıklılığı, gömülme derinliği ve sıkıştırma etkileri gibi faktörlerden etkilenir. Yer altı yapılarının içsel esnekliği, önemli hasara neden olmadan deformasyona ve enerji emilimine olanak tanır. Bununla birlikte, depremler sırasında yer altı yapılarının davranışı, zemin tipi, derinlik ve deprem dalgası özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir.

İnşaat süreci, işlem analizi ve kullanılan yöntemlerin derinlemesine incelenmesinin ardından, temel bulgulara odaklanarak gelecekteki çalışmalar ve benzer projeler için sunulan önerilere bu bölümde yer verilmektedir.

İlk modelleme aşamasında, üç farklı zemin özelliğinden kaynaklanan varyasyonlar sistematik olarak ayrıştırılmaktadır. Bulgular, zemin sertliğinin tünel yer değiştirmesi üzerinde marjinal bir etkiye sahip olduğunu, Elastisite modülülerin ise zemin tepkisini önemli ölçüde şekillendirdiğini ortaya koymaktadır. Yoğunluk ve Poisson oranının dikkate alınması, daha sert zeminlerin azalmış deformasyon kabiliyetine sahip olduğunu ve bu nedenle daha az tünel yer değiştirmesi sonucunu doğurduğunu göstermektedir. Bir korelasyon Elastisite modülü arttıkça yer değiştirmenin azaldığını göstermektedir. Maksimum yer değiştirmenin gerçekleştiği A noktası ele alındığında, silt kil toprak türü, daha düşük bir Elastisite Modülü nedeniyle 170 mm'lik bir yer değiştirme göstermektedir. Buna karşın, silt taşı toprak türü, yüksek Elastisite Modülü nedeniyle yer değiştirmeyi 90 mm ile önemli ölçüde azaltmaktadır. Gerilim dağılımı açısından, B noktasında en yüksek gerilme değerleri elde edilmektedir. Silt kil toprak türünde tepe gerilme 7.2 MPa'ya ulaşırken, silt taşı toprak türünde bu değer 5.9 MPa ile daha düşüktür. Yer değiştirme ve gerilimdeki bu farklılıklar, iki toprak tipinin elastik özelliklerindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

İkinci modelleme aşamasında, zeminlerin plastik davranışına odaklanılmış ve özellikle kalıcı deformasyon açısından bir irdeleme yapılmıştır. Bu çalışma belirli deprem koşulları ve benzer zemin özellikleri altında tünelin nihai başarısızlık ya da bir başka ifadeyle zayıf

noktasını belirlemeyi amaçlamaktadır. Drucker-Prager yönteminin kullanımı, plastik zemin davranışını yakalayarak kalıcı deformasyon senaryolarını simüle etme ve analiz etme imkânı sunmaktadır. Zemin davranışının daha gelişmiş bir simülasyonunu sağlayan Drucker-Prager yöntemi kullanılarak, silt taşı zeminin daha yüksek Elastisite Modülüne rağmen, deprem dalgalarının başlangıcında başlangıçta daha yüksek yer değiştirme sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, zeminde bulunan küçük hava kabarcıklarının sismik dalgaları erken aşamalarda güçlendirmesiyle ilişkilendirilmektedir. Hava kabarcıklarının etkileri ortadan kalktıktan sonra, zemin tipik davranışına geri dönmektedir; bu bağlamda, daha yüksek bir Elastisite Modülü, daha düşük bir yer değiştirme ile ilişkilidir. A noktasında, silt taşındaki yer değiştirme 230 mm'ye, siltli kildeki yer değiştirme ise 125 mm'ye ulaşmaktadır. Bu yer değiştirme değerleri, sismik olaydan 1,8 saniye sonra ölçülmüştür. Bu noktadan itibaren, zeminler normal davranışlarına geri dönmektedir; silt taşı en düşük yer değiştirmeyi, siltli kil ise en yüksek yer değiştirmeyi göstermektedir. Gerilme açısından, maksimum değerler B noktasında gözlemlenmektedir; burada silt taşı için 4,4 MPa ve siltli kil için 3,6 MPa değerlerine ulaşılmaktadır.

Üçüncü modelleme aşamasında, deprem yükü altında tünel kalınlığının etkisini inceleyen bu çalışma, kritik bir korelasyon ortaya koymaktadır. Artan tünel kalınlığı, uygulanan gerilme ve deformasyonu azaltarak yapısal direncin arttığını göstermektedir. Bunun tersine, kalınlığın azalması gerilme ve deformasyonu artırmakta olup, tünel tasarımında kalınlığın dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Gerilme açısından, B noktasında 400 mm kalınlığındaki bir tünel için 6,46 MPa'lık bir gerilme değeri kaydedilirken, 1200 mm kalınlığındaki tünelde daha düşük bir gerilme değeri olan 2,84 MPa gözlemlenmektedir. Ayrıca, şekil değiştirme ölçümleri, şekil değiştirmenin tünel kalınlığıyla ters orantılı olduğunu ve daha düşük kalınlığa sahip tünellerde daha yüksek şekil değiştirme, daha kalın tünellerde ise daha düşük şekil değiştirme meydana geldiğini göstermektedir. Bu bulgular, daha kalın tünel yapılarının daha ince tünel olanlara kıyasla daha düşük gerilme ve şekil değiştirme düzeylerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Dördüncü analiz aşamasında, kanyonun suyla doldurulması, boş olması ve zeminle doldurulması durumlarını temsil eden modeller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin amacı, suyun varlığının tünel üzerindeki etkilerini belirlemektir. Analizler, kanyonun toprakla doldurulmuş veya kanyonun yok sayılmış olduğu durumlarda hem yer değiştirme hem de gerilmenin en yüksek değerlere ulaştığını, kanyonun suyla doldurulmuş olduğu durumdaysa ikinci en yüksek değerlere ulaştığını ortaya koymaktadır. En düşük değerler ise boş kanyon durumunda gözlemlenmiştir. Bu bulgular, toprağın varlığının tünel

üzerindeki etkisinin suya kıyasla daha belirgin olduğunu göstermektedir. Özellikle, kanyon toprakla doldurulduğunda yer değiştirme 252 mm'ye ve gerilme 3,6 MPa'ya ulaşırken, su dolu kanyon durumunda yer değiştirme 170 mm ve gerilme 2,9 MPa olarak ölçülmüştür. Boş kanyon ise en düşük yer değiştirme ve gerilme değerlerini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, deprem yükleri altındaki tünel davranışını belirli model özellikleri çerçevesinde incelemekte ve plastik deformasyonun kritik rolünü vurgulamaktadır. Drucker-Prager yönteminin uygulanması, zemin özellikleri ile tünel tepkisi arasındaki karmaşık etkileşimleri ortaya koymaktadır. Plastik zemin davranışının simülasyonları, belirli deprem koşulları altında nihai başarısızlık eşiğinin belirlenmesine katkıda bulunmakta ve Elastisite modüllerinin, yoğunluğun ve Poisson oranının önemini vurgulamaktadır. Drucker-Prager özelliklerinin entegrasyonu, zemin yer değiştirmesi üzerindeki dayanıklılık etkileşimlerini öne çıkararak, başarısızlık veya göçme öncesinde daha yüksek gerilme değerlerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Siltli taş ve kumda plastik deformasyon mekaniğinin, özellikle genleşme dinamiklerinin detaylı analizi, başlangıçta daha yüksek yer değiştirmenin zamanla azaldığını açıklamaktadır. Siltli taş ve kumun sertliği, zemin özellikleriyle birlikte daha fazla deformasyona karşı direnci artırmakta olup, deprem tünel tasarımında zemin özgül davranışların dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, deprem riski olan bölgelerde daha sağlam ve dayanıklı altyapıların inşasına katkıda bulunmakta ve zemin özellikleri ile tünel geometrisi arasındaki plastik deformasyon ilişkilerini ortaya koymaktadır. Ayrıca, analizler, tünel yapısı üzerindeki üç farklı koşulun etkilerini değerlendirmiştir: boş bir kanyon, suyla dolu bir kanyon ve kanyonun yok sayıldığı durumlar. Bu koşullardaki farklılıklar, tünelin yapısal tepkisini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.

Öneriler

Çalışma sonucunda aşağıdaki öneriler ortaya konmuştur.

1. Farklı tünel yapılarının deprem yüklerine nasıl tepki verdiğini daha iyi anlamak amacıyla, modelleme sürecine çeşitli şekil ve boyutların dikkate alınması önemlidir.
2. Karşılaştırmalı analiz için çeşitli yüklerin kullanılması, tünellerin deprem altındaki dinamik davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlayabilir. Burada farklı karakteristik özelliklere sahip yer hareketlerinin analizlerde kullanılması önerilmektedir.
3. Tünel üzerindeki kanyonda değişen su seviyelerinin etkileri daha kapsamlı bir şekilde araştırılmalıdır. Bu durumda hidrodinamik kuvvetlerin tünelin depreme davranışını etkileme düzeyini daha geniş bir yelpazede ortaya koyacaktır.

4. Yer altı yapıları için deprem yükleri altında zemin-yapı etkileşiminin incelenmesi gerekmektedir. Zemin özellikleri ile tünel yapısı arasındaki karmaşık etkileşimin daha fazla araştırılması önemlidir.
5. Farklı beton türleri, sınıfları ve zemin türleri de dahil olmak üzere değişen malzeme özelliklerinin tünelin deprem tepkisi üzerindeki etkisi de dikkate alınmalıdır.



KAYNAKLAR

- Addenbrooke, T., & Potts, D. (1996). Twin tunnel construction-ground movements and lining behaviour. In R. J. Mair & R. N. Taylor (Eds.), *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground* (pp. 715-720).
- Akköse, M., and Şimşek, E. (2010). Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction. *Applied Mathematical Modelling*, 34(11), 3685-3700.
- Asheghabadi, M. S., and Matinmanesh, H. (2011). Finite element seismic analysis of cylindrical tunnel in sandy soils with consideration of soil-tunnel interaction. *Procedia engineering*, 14, 3162-3169.
- Aubin, J.-P., & Ekeland, I. (2006). *Applied nonlinear analysis*. Courier Corporation.
- Azadiab, M. (2011). The seismic behavior of urban tunnels in soft saturated soils. *Procedia engineering*, 14, 3069-3075.
- British Tunnelling Society. (2004). *Tunnel lining design guide*. Thomas Telford.
- Babu, A., S D, A., & Abraham, N. (2018). Dynamic analysis of underwater tunnels. *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering and Architecture*, 2, 102-108.
- Barrett, S., and McCreath, D. (1995). Shortcrete support design in blocky ground: Towards a deterministic approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10(1), 79-89.
- Barton, N. (1978). Recent experiences with the Q-system of tunnel support design. In *Proceedings of the International Symposium on Field Measurements in Geomechanics* (pp. 679-690).
- Billington, S. L., Barnes, R. W., and Breen, J. E. (1999). A precast segmental substructure system for standard bridges. *PCI journal*, 44(4), 56-73.
- Broch, E. (1984). Unlined high pressure tunnels in areas of complex topography. *Int. Water Power Dam Constr.:(United Kingdom)*, 36(11).
- Brown, E., and Hoek, E. (1980). *Underground excavations in rock*. CRC Press.
- Dassault Systèmes. (2012). Abaqus 6.11 Documentation. Retrieved from <http://130.149.89.2008/v6>.
- Dawson, E., Roth, W. H., and Drescher, A. (1999). Slope stability analysis by strength reduction. *Géotechnique*, 49(6), 835-840.
- Duddeck, H., & Erdmann, J. (1985). Structural design models for tunnels in soft soil. *Underground Space*, 9, 55-64.
- Ducobu, F., Rivière-Lorphèvre, E., and Filippi, E. (2016). Application of the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method to the modeling of orthogonal cutting. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 59, 58-66.
- Duddeck, H., and Erdmann, J. (1985). Structural design models for tunnels in soft soil. *Underground Space:(United States)*, 9.

- Eisenstein, Z., and Branco, P. (1991). Convergence—Confinement method in shallow tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 6(3), 343-346.
- Fedosin, S. G. (2016). The concept of the general force vector field. *Open Access Library Journal*, 3(3), 1-15.
- Groen, A., and De Borst, R. (1997). Three-dimensional finite element analysis of tunnels and foundations. *Heron (Delft)*, 42(4), 183-214.
- Hashash, Y. M., Hook, J. J., Schmidt, B., John, I., and Yao, C. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(4), 247-293.
- Health, and Commission, S. (1995). *Managing Construction for Health and Safety. Construction (Design and Management) Regulations 1994. Approved Code of Practice*. HSE Books.
- Helwany, S. (2007). Applied soil mechanics with ABAQUS applications. John Wiley & Sons.
- Jaimes, A. F. (2017). Comparative analysis of threshold voltage extraction techniques based in the MOSFET gm/ID characteristic. *Tecnura*, 21, 32-44.
- Kahlström, M. (2013). Plaxis 2D comparison of Mohr-Coulomb and soft soil material models. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (pp. 1123-1127).
- Khan, M. A., Sadique, M. R., Harahap, I. H., Zaid, M., and Alam, M. M. (2022). Static and dynamic analysis of the shielded tunnel in alluvium soil with 2D FEM model. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 9(1), 73-100.
- Kontoe, S., Zdravkovic, L., Potts, D., and Menkiti, C. (2011). On the relative merits of simple and advanced constitutive models in dynamic analysis of tunnels. *Géotechnique*, 61(10), 815-829.
- Krawinkler, H. (2006). Importance of good nonlinear analysis. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 15(5), 515-531.
- Kaveh, A., & Rahami, H. (2006). Nonlinear analysis and optimal design of structures via force method and genetic algorithm. *Computers & Structures*, 84(10-11), 770-778.
- Labuz, J. F., and Zang, A. (2012). Mohr–Coulomb failure criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 975-979.
- Lanzano, G., Bilotta, E., Russo, G., and Silvestri, F. (2015). Experimental and numerical study on circular tunnels under seismic loading. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(5), 539-563.
- Lee, K., and Rowe, R. (1989). Deformations caused by surface loading and tunnelling: the role of elastic anisotropy. *Géotechnique*, 39(1), 125-140.
- Legay, A., Chessa, J., and Belytschko, T. (2006). An Eulerian–Lagrangian method for fluid–structure interaction based on level sets. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(17-18), 2070-2087.
- Lin, K., Hung, H., Yang, J. P., and Yang, Y. (2016). Seismic analysis of underground tunnels by the 2.5 D finite/infinite element approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 31-43.
- Mair, R., and Taylor, R. (1992). Prediction of clay behaviour around tunnels using plasticity solutions. Predictive soil mechanics: Proceedings of the Wroth Memorial Symposium held at St Catherine's College, Oxford, 27-29 July 1992,

- Meduri, S., Cremonesi, M., Perego, U., Bettinotti, O., Kurkchubasche, A., and Oancea, V. (2017). A partitioned fully explicit Lagrangian Finite Element Method for highly nonlinear Fluid-Structure-Interaction problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 113. <https://doi.org/10.1002/nme.5602>
- Meduri, S., Cremonesi, M., Perego, U., Bettinotti, O., Kurkchubasche, A., and Oancea, V. (2018). A partitioned fully explicit Lagrangian finite element method for highly nonlinear fluid-structure interaction problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 113(1), 43-64.
- Muir Wood, A. (1976). Discussion: The circular tunnel in elastic ground. *Géotechnique*, 26(1), 231-237.
- Nicholson, D., Tse, C.-M., Penny, C., O'Hana, S., & Dimmock, R. (1999). The observational method in ground engineering: Principles and applications. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), Report 185.
- Nikakhtar, L., and Zare, S. (2021). Dynamic and Static Analysis of Circular Tunnel with Special Focus on the Hydro-Mechanical Coupling Behavior of Soil. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 6(1), 31-41.
- Pakbaz, M. C., and Yareevand, A. (2005). 2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(5), 411-417.
- Pöttler, R. (1985). Evaluating the gerilmeses acting on the shotcrete in rock cavity constructions with the Hypothetical Modulus of Elasticity. *Felsbau*, 3(3), 136-139.
- Preene, M., & Brassington, R. (2003). Potential groundwater impacts from civil-engineering works. *Water and Environment Journal*, 17(1), 59-64.
- Qiu, G., Henke, S., and Grabe, J. (2011). Application of a Coupled Eulerian–Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations. *Computers and Geotechnics*, 38(1), 30-39.
- Rakhsha, M., Kees, C. E., and Negrut, D. (2021). Lagrangian vs. Eulerian: An analysis of two solution methods for free-surface flows and fluid solid interaction problems. *Fluids*, 6(12), 460.
- Rawlings, C., Lance, G., and Anderson, J. (1998). Pre construction assessment strategy of significant engineering risks in tunnelling. *Underground Construction in Modern Infrastructure, Stockholm*.
- Reilly, J. (2000). The management process for complex underground and tunneling projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(1), 31-44.
- Riedmüller, G., and Schubert, W. (1999). Critical comments on quantitative rock mass classifications. *Felsbau*, 17(3), 164-167.
- Roy, S., and Bhalla, S. K. (2017). Role of geotechnical properties of soil on civil engineering structures. *Resources and Environment*, 7(4), 103-109.
- Sedarat, H., Kozak, A., Hashash, Y. M., Shamsabadi, A., and Krimotat, A. (2009). Contact interface in seismic analysis of circular tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), 482-490.
- Shadloo, M. S., Oger, G., and Le Touzé, D. (2016). Smoothed particle hydrodynamics method for fluid flows, towards industrial applications: Motivations, current state, and challenges. *Computers & Fluids*, 136, 11-34.
- Singh, M., Viladkar, M. N., and Samadhiya, N. K. (2017). Seismic analysis of Delhi metro underground tunnels. *Indian Geotechnical Journal*, 47, 67-83.

- Soares Jr, D. (2019). A locally stabilized central difference method. *Finite Elements in Analysis and Design*, 155, 1-10.
- Tan, S.-Y. (1996). Religion in clinical practice: Implicit and explicit integration. In A. M. Joseph (Ed.), *Clinical Psychology and Religion* (pp. 123-134). Routledge.
- Ti, K. S., Huat, B. B., Noorzaei, J., Jaafar, M. S., and Sew, G. S. (2009). A review of basic soil constitutive models for geotechnical application. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 14, 1-18.
- Ward, W., Tedd, P., and Berry, N. (1983). The Kielder experimental tunnel: final results. *Géotechnique*, 33(3), 275-291.
- Wu, B., Bao, H., Ou, J., and Tian, S. (2005). Stability and accuracy analysis of the central difference method for real-time substructure testing. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(7), 705-718.
- Wu, S. R. (2006). Lumped mass matrix in explicit finite element method for transient dynamics of elasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(44-47), 5983-5994.
- Zaid, M., and Rehan Sadique, M. (2020). Dynamic analysis of tunnels in Western Ghats of Indian Peninsula: effect of shape and weathering. In *Recent Trends in Civil Engineering: Select Proceedings of ICRTICE 2019* (pp. 763-776). Springer.
- Zhang, Z., and Chen, Q. (2007). Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces. *Atmospheric Environment*, 41(25), 5236-5248.
- Zhang, C., Dai, X., & Yan, Z. (2023). Review of wind-induced effects estimation through nonlinear analysis of tall buildings, high-rise structures, flexible bridges, and transmission lines. *Buildings*, 13(8), 2033.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	: Mohammed Kusay Ebrahim AL-DULAYME
Doğum tarihi	:
Doğum Yeri	:
Uyruğu	:
Adres	:
Tel	:
E-mail	:
Eğitim	
Lisans	:
Yüksek lisans	:
Yabancı Dil Bilgisi	
	:
	:
	:
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
-	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
-	