

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ALÜVYAL VE SIVILAŞABİLEN ZEMİNLERDE
TÜNELLERİN DEPREM RİSK ANALİZİ:
ADAPAZARI ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe SAÇAR

Enstitü Anabilim Dalı : **İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi İsa VURAL**

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ALÜVYAL VE SIVILAŞABİLEN ZEMİNLERDE
TÜNELLERİN DEPREM RİSK ANALİZİ:
ADAPAZARI ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe SAÇAR

Enstitü Anabilim Dalı

: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 30/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Metin İPEK
Jüri Başkanı



Dr. Öğr. Üyesi
İsa VURAL
Üye



Doç. Dr.
Sedat SERT
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ayşe SAÇAR
06/05/2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi İsa VURAL'a teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
BÖLÜM 3.	
ZEMİNLERDE DALGA YAYILIM	8
3.1. Giriş	8
3.2. Yarı Sonsuz Ortamda Dalga Yayılım	11
3.2.1. Rayleigh yüzey dalgası	12
3.2.2. Love yüzey dalgası	13
3.3. Zemin Dalgalarının Tünelde Yayılımı	14

BÖLÜM 4.

ZEMİN-YAPI SİSTEMLERİNDE NÜMERİK ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI	17
4.1. Alt Sistem Yaklaşımı	17
4.2. Doğrudan Çözüm Yaklaşımı	18
4.3. Zemin Ortamının Modellenme Şekilleri	19
4.3.1. Zemin ortamının idealleştirilmesi	19
4.3.1.1. Sınır elemanlar yöntemiyle sınır şartlarının belirlenmesi	20
4.3.1.2. Viskoz sınır şartlarıyla modelleme	21
4.4. Sonlu Farklar	21
4.4.1. Zaman-Adımı yöntemi	23
4.4.2. Lagrangian analizi	23
4.4.3. Sınır şartları	24
4.4.4. Zemin modelleri.....	24
4.4.4.1. Elastik-İzotropik model.....	24
4.4.4.2. Mohr-Coulomb model.....	26
4.4.4.3. Finn-Byrne sıvılaştırma modeli.....	27

BÖLÜM 5.

ADAPAZARI BÖLGESİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ	28
5.1. Adapazarı'nın Geoteknik Özellikleri	28
5.1.1. Adapazarı bölgesinin depremselliği	32
5.1.2. Adapazarı bölgesinin sıvılaştırma özellikleri	33

BÖLÜM 6.

NÜMERİK MODELİN OLUŞTURULMASI	37
6.1. Nümerik Modelin Boyutlandırılması	38
6.2. Sınır Şartları	43
6.3. Zemin Özellikleri	43
6.4. Nümerik Modelde Kullanılan Deprem Kayıtları	44

6.4.1. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi	44
6.4.2. 18 Mayıs 1940 El Centro depremi	45
BÖLÜM 7.	
ANALİZ SONUÇLARI DEĞERLENDİRİLMESİ.....	46
7.1. Mohr-Coulomb modeli analiz sonuçları	48
7.1.1. Farklı derinlikteki tünellerin Mohr-Coulomb analiz sonuçları	49
7.1.2. Farklı çaptaki tünellerin Mohr-Coulomb analiz sonuçları	61
7.1.3. Farklı kalınlıktaki tünellerin Mohr-Coulomb analiz sonuçları.	71
7.2. Finn-Byrne Modeli Analiz Sonuçları	81
7.2.1. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sıvılaşma analiz sonuçları	81
7.2.1.1. Farklı derinlikteki tünellerin sıvılaşma analiz sonuçları	81
7.2.1.2. Farklı çaptaki tünellerin sıvılaşma analiz sonuçları	90
7.2.2. 18 Mayıs 1940 El Centro depremi sıvılaşma analiz sonuçları	98
7.2.2.1. Farklı derinlikteki tünellerin sıvılaşma analiz sonuçları	98
7.2.2.2. Farklı çaptaki tünellerin sıvılaşma analiz sonuçları....	107
BÖLÜM 8.	
TARTIŞMA VE SONUÇ	116
KAYNAKLAR	118
EKLER	121
ÖZGEÇMİŞ	143

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

m : Kütle

ρ : Yoğunluk

t : Zaman

x_i : koordinat vektörünün bileşenleri

g_i : Yerçekimi ivmesinin bileşenleri

σ_{ij} : Gerilme tensörünün bileşenleri

Δt : Zaman adımı

G : Kayma modülü

K : Bulk modülü

KAF : Kuzey Anadolu Fayı

LL : Likit limit

w : Su muhtevası

C_p : P dalgası hızı

C_s : S dalgası hızı

C_R : Rayleigh dalgası hızı

ν : Poisson oranı

λ : Dalga boyu

σ : Gerilme

ε : Birim deformasyon

c : Kohezyon

E : Elastisite modülü

e : Eksenel gerilme

V_R : Maksimum parçacık hızı

C_R : Rayleigh dalgası yayılma hızı

θ : Dalganın tünel eksenine göre geliş açısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Cisim dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar a) P dalgası b) S dalgası	10
Şekil 3.2. Cisim dalgalarının hızlarının yoğunlukla değişimi.....	12
Şekil 3.3. Yüzey dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar a) Rayleigh dalgası, b)Love dalgası.....	13
Şekil 3.4. Yerküre ve iç yapısı.....	14
Şekil 3.5. Love dalgalarında parçacıkların yerdeğiştirme genliğinin derinlikle değişimi	16
Şekil 3.6. Yüzey ve cisim dalgalarının tünel ekseninde yansımaları.....	17
Şekil 4.1. Doğrudan çözüm yaklaşımı kullanılan zemin-yapı etkileşimleri	21
Şekil 4.2. Sınır elemanlar yöntemiyle zemin sınır şartlarının belirlenmesi.....	23
Şekil 4.3. Viskoz elemanlarla zemin sınırlarının idealleştirilmesi	24
Şekil 4.4. Sonlu Fark Yönteminde noktaların gösterimi (Bobet, 2010).....	25
Şekil 4.5. FLAC temel hesaplama döğüsü	26
Şekil 4.6. FLAC Elastik-izotropik koordinat eksenleri	29
Şekil 4.7. FLAC Mohr-Coulomb yenilme kriteri	30
Şekil 5.1. Adapazarı'nın morfolojik görünümü	33
Şekil 5.2. Adapazarı ve çevresinin jeomorfolojik haritası.....	24
Şekil 5.3. Adapazarı bölgesinde 2000 yılında ve 2001-2002 yıllarında yeraltı su seviyesi haritaları	35
Şekil 5.4. Adapazarı bölgesinin aktif fay haritası	36
Şekil 5.5. Adapazarı bölgesinin deprem haritası.....	37
Şekil 5.6. Sıvılaşma sırasında daneciklerin hareketi	37
Şekil 5.7. 17 Ağustos 1999 depreminde Adapazarı'nda oluşan sıvılaşma hasarı.....	39
Şekil 6.1. Nümerik modelde incelenen noktalar	42
Şekil 6.2. Tünel derinlikleri	43
Şekil 6.3. Tünel çapları	43

Şekil 6.4. Tünel Kalınlıkları	43
Şekil 6.5. Modelin yüksekliğe etkisi	44
Şekil 6.6. Modelin uzunluğa etkisi	45
Şekil 6.7. Sınır şartları	46
Şekil 6.8. Kocaeli depreminin ivme-zaman grafiği.....	48
Şekil 6.9. El Centro depreminin ivme-zaman grafiği.....	48
Şekil 7.1. FLAC 2D’de kurulan nümerik model	50
Şekil 7.2. Tünelde ivme kayıtları değişimi.....	52
Şekil 7.3. Mohr-Coulomb model ivme kaydı değerleri a) ana kaya b) yüzey.....	53
Şekil 7.4. Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.....	54
Şekil 7.5. Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız	57
Şekil 7.6. Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.....	59
Şekil 7.7. Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasmanlar a) üst nokta b) alt nokta.....	62
Şekil 7.8. Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasmanlar a) üst nokta b) alt nokta.....	63
Şekil 7.9. Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.....	64
Şekil 7.10. Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.....	67
Şekil 7.11. Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.....	70

Şekil 7.12. Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	72
Şekil 7.13. Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	73
Şekil 7.14. Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.....	74
Şekil 7.15. Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.....	77
Şekil 7.16. Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.....	79
Şekil 7.17. Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	82
Şekil 7.18. Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	83
Şekil 7.19. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	85
Şekil 7.20. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	87
Şekil 7.21. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	89
Şekil 7.22. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	91
Şekil 7.23. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	92

Şekil 7.24. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	93
Şekil 7.25. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	95
Şekil 7.26. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	97
Şekil 7.27. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	99
Şekil 7.28. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	100
Şekil 7.29. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	102
Şekil 7.30. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	104
Şekil 7.31. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	106
Şekil 7.32. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperi yatay deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	108
Şekil 7.33. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperi düşey deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	109
Şekil 7.34. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel altı noktada analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	110
Şekil 7.35. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	112

Şekil 7.36. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.....	114
Şekil 7.37. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	116
Şekil 7.38. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.....	117



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 6.1. Çalışmada kullanılan tünel boyutları.....	41
Tablo 6.2. Çalışmada kullanılan zemin özellikleri.....	47
Tablo 7.1. Çalışmada kullanılan tünel boyutları.....	49
Tablo 7.2. Kullanılan birimler.....	50
Tablo 7.3. Statik analiz sonuçları.....	51

ALÜVYAL VE SIVILAŞABİLEN ZEMİNLERDE TÜNELLERİN DEPREM RİSK ANALİZİ: ADAPAZARI ÖRNEĞİ

ÖZET

Gelişen dünyada endüstriyel faaliyetlerin giderek artması sonucu insan nüfusu şehirlerde giderek atmaktadır. Bu durum mevcut yerüstü alanlarını daha kıymetli kılmaktadır ve ulaşım problemlerine yol açmaktadır. Bunun bir sonucu olarak insanoğlu yeraltını daha aktif olarak kullanmak zorundadır. Yeraltı yapıları tarih boyunca ulaşım, madencilik, savunma, kanalizasyon gibi çok çeşitli amaçlarla inşa edilmiştir. Günümüzde büyük şehirlerde tüneller özellikle ulaşımın daha güvenli ve daha hızlı olmasını sağlamaktadır.

Yaşanan son büyük depremlerde (1995 Kobe, Japonya depremi, 1999 Chi-Chi, Tayvan depremi ve 1999 Kocaeli, Türkiye depremi) mevcut yeraltı yapılarında hasarlar oluşmuştur. Bu durum yeraltı yapılarının sismik tasarımının önemini ve gerekliliğini bir kez daha gözler önüne sermiştir.

Ülkemiz aktif bir fay hattı üzerinde yer almaktadır. Bu durum yapılacak tünel gibi yeraltı yapılarında can ve mal kaybının yaşanmaması, deprem sırasında ve sonrasında ulaşımın devam etmesi için tünellerin sismik tasarımını zorunlu hale getirmiştir.

Bu çalışmada tünellerin sismik performansının değerlendirilmesi için, nümerik modelleme yapılarak, sıvılaşma ve oturma parametrelerine bağlı hasarlar incelenmiştir. Bu tez çalışmasında Adapazarı zeminlerinde inşa edilebilecek bir tünel için farklı derinlik, farklı çap ve farklı kalınlık değerlerinin sıvılaşma eğilimine, maksimum yer ivmesine ve zemin deformasyonlarına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda Adapazarı zeminlerinde tünel inşası için derinlik, çap ve kalınlık önerisinde bulunmaktadır.

Anahtar kelimeler: sıvılaşma, nümerik model, tünel, deprem

THE EARTHQUAKE RISK ANALYSIS OF TUNNELS IN ALLUVIAL AND LIQUEFIABLE UNDERGROUNDS: EXAMPLE OF ADAPAZARI

SUMMARY

As the industrial activity is on the rise in the developing world, so is the population of the cities. This increase causes overground resources to be more valued and also results in transportation problems. As a consequence, human beings need to operate underground more actively. Throughout history, underground structures have been built for lots of reasons like transportation, mining, defences and sewage. Today, big cities utilize tunnels specifically because it provides a safer and faster way of transportation.

The earthquakes that happened in the near past, 1995 Kobe, Japan earthquake, 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake and 1999 Kocaeli, Turkey earthquake all caused a devastation to underground structures. These natural disasters showed the importance and necessity of seismic layouts for underground structures.

Our country is situated on top of an active fault line. This makes it mandatory for there to be seismic layouts of underground structures like transportation tunnels so that loss of life and property can be prevented in the event of an earthquake.

In this study, through numeric modeling, the damages dependant on liquefaction and subsidence are observed to evaluate the seismic performance of tunnels. In this dissertation study, liquefaction tendency of different depths, diameters and thickness of a tunnel that can be built underground of Adapazari have been searched and observed along with maximum ground acceleration and underground deformations. The aim of the study is to give propositions of depth, diameter and thickness for a tunnel built underground in Adapazari.

Keywords: liquefaction, numeric modeling, tunnel, earthquake

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Gelişen dünyada endüstriyel faaliyetlerin giderek artması sonucu insan nüfusu şehirlerde giderek artmaktadır. Bu durum mevcut yerüstü alanlarını daha kıymetli kılmaktadır ve ulaşım problemlerine yol açmaktadır. Bunun bir sonucu olarak insanoğlu yeraltını daha aktif olarak kullanmak zorundadır. Yeraltı yapıları tarih boyunca ulaşım, madencilik, savunma, kanalizasyon gibi çok çeşitli amaçlarla inşa edilmiştir. Günümüzde büyük şehirlerde tüneller özellikle ulaşımın daha güvenli ve daha hızlı olmasını sağlamaktadır.

Yeryüzündeki aktif fay hatları üzerinde bulunan ülkemizde meydana gelebilecek depremler sırasında oluşacak zararın minimum seviyede kalabilmesinin yerüstü yapıları kadar yeraltı yapıları için de deprem risk analizleri yapılmalıdır. Tünellerin en önemli özelliklerinden biri ulaşım ve bunun deprem sırasında göçmesi tünel içerisinde çok fazla can kaybına yol açabileceği gibi bölgeye yapılması gereken yardımların da ulaşmasını zorlaştıracaktır. Bu sebeplerden dolayı, yer altı yapılarının deprem sırasında ki ve sonrasındaki davranışlarının belirlenmesi ve tasarımının dikkatli yapılması önemlidir (Unutmaz, 2015).

1.1 Çalışmanın Amacı

Deprem sırasında yeraltı yapılarında oluşan zararlar hem ekonomik hem de insan yaşantısı için olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Depremler, büyüklükleri, yerel zemin etkileri gibi özelliklere bağlı olarak yerüstü ve yeraltı yapılarda hasarların oluşmasına neden olmaktadır. Deprem sırasında ve sonrasında oluşan hasarların boyutu ve neden olabileceği sorunlar yeraltı yapılarının tasarımında deprem performansının önceden analiz edilmesinin gerekliliğini gözler önüne sermiştir. Bu çalışmanın amacı tünellerin sismik performanslarının değerlendirilmesi için nümerik modelleme yapılarak sınırlama ve oturma değerlerine bağlı hasarları incelemektir. Bu araştırmada farklı derinlik, farklı

ap ve farklı et kalınlığındaki tünellerin zemindeki sıvılaşmaya etkileri, maksimum yer ivmesi ve zemin deformasyonları araştırılacaktır.

Bu çalışmada bölüm ikide ilk olarak literatür alışları incelenmiştir. İncelenen alışmalar sırasıyla tünellerin tarihçesini, zemin-tünel arasındaki etkileşimi, fay bölgesindeki tünellerin tasarımı, tünellerin zemin içerisindeki boşluk suyundan etkilenme durumlarını, tünellerin sismik tasarım parametrelerini, sıvılaşan zeminlerde tünel inşaatını ve tünel hasarlarını içermektedir.

Bölüm üçte ise tnelerde deprem sırasında oluşabilecek hasarların zemin içerisinde yayılan sismik dalgalardan kaynaklandığı göz önünde bulundurularak sismik dalgalar açıklanmıştır. Bu dalgaların tnelerde yayılması ele alınmıştır.

Deprem bölgelerinde inşa edilen tnelerde dinamik etkiler sonucunda tünelde oluşabilecek deformasyonları, taşıma gücü kayıplarını ve sıvılaşmayı nümerik modellemede daha doğru bir şekilde bilmek için zemin-yapı arasındaki etkileşimin tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle dördüncü bölümde zemin-yapı etkileşimleri incelenmiş ve kullanılan FLAC 2D programı sonlu farklar prensibiyle çalıştığı için sonlu fark yöntemi ele alınmıştır.

Tnelerde oluşan deformasyonlarda dinamik dalga yayılımı etkili olduğu kadar yerel zemin koşulları da önemli bir parametredir. Beşinci bölümde tünelin modellendiği Adapazarı zeminlerinin geoteknik özellikleri ele alınmış ve tnelerde önemli deformasyonlara ve tünelin zemin içerisinde yükselmesine neden olduğu için sıvılaşma incelenmiştir.

Altıncı ve yedinci bölümlerde ise Adapazarı zeminlerinde inşa edilebilecek tünelin sıvılaşabilen zeminlerde gerçek davranışının yansıtılabilmesi için FLAC 2D üzerinde sıvılaşma modeli üzerinde çalışılmıştır. Sonrasında ise farklı derinlik, farklı çap ve farklı kalınlıktaki tüneller için analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

Sonuç bölümünde ise sıvılaşabilen zeminlerde inşa edilebilecek tünel için uygun derinlik, çap ve kalınlık önerisinde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tarihteki ilk tünellerin değerli madenler ve su temini için kullanıldığı düşünülmektedir. İlk tüneller desteğe ihtiyacı olmayan doğal mağaraların içerisinde inşa edilmiştir ve o dönemde yaşayan insanların sosyal hayatını yansıtmaktadır, en görkemli tünellerin çoğu tören ve dini amaçlıdır. Bilinen ilk su altı tüneli, Kraliçe Semiramis tarafından kraliyet sarayını Fırat Nehrinin altındaki Jove Tapınağına bağlamak için M.Ö 2000 yılında inşa ettirilmiştir. Tünel yaklaşık 1 km uzunluğundadır. M.Ö 2800 – 2200 yılları arasında Mezopotamya’da drenaj amaçlı tüneller inşa edilmiştir. Yunanlılar ve Romalılar, su temini ve savaş tekniği olarak tünelleri kullanmışlardır (Wood, 2000).

Tüneller 17. Yüzyılda Avrupa’da artan ulaşım ihtiyacını karşılamak için inşa edilmiştir. 1830’lara gelindiğinde demiryolunun gelişimi tünellerde büyük miktarda artışa sebep olmuştur (Kenneth, 2019).

Avrupa’daki bu gelişmelerin yanında 1875 yılında Fransız mühendis Eugene-Henri Gavand tarafından İstanbul’da Karaköy ile Beyoğlu arasında dünyanın 2. metrosu inşa edilmiştir (İmrak ve Özkırım, 2002). 1950’li yıllarda ise karayolu tünellerinin inşaatına başlamıştır. İlk başlarda daha çok kısa mesafeler için inşa edilir iken gelişen yapım teknikleri ve teknolojileriyle birlikte 2000’li yıllarda 5 km ve üzerine çıkmıştır (Ünal, 2004).

Deprem bölgelerinde inşa edilen yeraltı yapıları hem statik hem de sismik yüklere maruz kalmaktadır. Yeraltı yapıları için sismik tasarım yükleri genellikle yapı-zemin arasındaki etkileşime bağlı olarak, yapıya çevresindeki zeminden uygulanan deformasyonlar ve gerilmelerle karakterize edilir. Dinamik analizlerde, sonlu elemanlar ve sonlu fark yöntemleri gibi nümerik modelleme programları kullanılarak dinamik bir yapı-zemin etkileşimi oluşturulmuştur (Hashash ve diğ., 2001). Yapı-zemin etkileşimi yeraltı yapıları için yapının boyutuna, etrafındaki mevcut zemin özelliklerine ve uygulanan dinamik ve statik yüke bağlıdır (Unutmaz ve diğ., 2008).

Pakbaz ve Yareevand yaptıkları çalışmada depremin yapı-zemin etkileşimi üzerine etkisini incelemiş ve maksimum yer ivmesi, depremin şiddeti ve süresi, tünel ile zemin arasındaki rijitlin önemini belirtmiştir (Pakbaz ve Yareevand, 2005) .

Asheghabadi ve Matinmanesh yaptıkları çalışmada zemin-tünel etkileşimini incelemişlerdir. Bu çalışma için zemin tünelli ve tünelsiz modellenmiştir. Sıkı ve gevşek kumlu zeminlerde farklı depremler sırasında oluşan sismik dalgaların zemin-tünel etkileşimi incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda bir zeminde tünelin olmasının yüzeydeki sismik dalgaları güçlendirdiği gözlemlenmiştir. Maksimum hacim büyümesi de zemin-tünel ara yüzünde oluşmuştur. Son olarak ise maksimum gerilmeler tünel çevresinde oluşurken minimum gerilmelerin tünelin üst ve alt noktasında olduğu görülmüştür (Asheghabadi ve Matinmanesh, 2011).

Hashash ve diğ., sismik yükleme durumunda yapı-zemin etkileşimleri nedeniyle dairesel tünellerde ovalleşme deformasyonu ve kuvvetlerini tahmin etmek için iki analitik çözümü incelemişler ve bu analitik yöntemleri doğrulamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda nümerik analiz sonuçlarına göre tünel-zemin arasındaki kuvvetlerin göz ardı ettiği görülmüştür ve bu çözümün kullanılmamasını önermişlerdir (Hashash ve diğ.,2005).

Guobo ve diğ., tünel-zemin-yerüstü yapısı etkileşimi üzerine yaptıkları deneysel çalışmada sarsma tablası testini kullanmışlardır. Deneysel tasarımda sarsma tablasının taşıma kapasitesinin sınırlı olmasından dolayı ve zemin-yapı rijitlik oranının bozulmaması için zemini modellemede odun talaşını seçmişlerdir. Deneysel zemin, zemin ve tünel, zemin ve yerüstü yapısı, zemin, tünel ve yerüstü yapısı olarak tekrarlanmıştır. Deneysel sonuçları ise ilk olarak deneysel çalışmalarda zemini modellemek için odun talaşının kullanılabilceğini göstermiştir. Sismik test sonuçlarında ise tünel varlığının sismik dalganın yayılmasına bir miktarda engel olduğu ve böylelikle yerüstü yapılarında özellikle alt ve orta katlarda yapının sismik tepkisini azalttığı görülmüştür. Yerüstü yapısının varlığının ise zemin ve tünelin sismik tepkisini bastırıldığını gözlemlemişlerdir (Guobo ve diğ., 2018).

Paltrinieri yaptığı çalışmada fay bölgeleri ile yeraltı yapılarının durumunu incelemiştir. Bu çalışmanın sonucunda tüneller ve pek çok yeraltı yapısında fay hareketlerinden dolayı

hasar oluşabileceğini veya fay hatlarıyla kesişebileceğini söylemiştir. Bu yüzden tünel ve yeraltı yapıları için fay riski araştırmalarını önermiştir (Paltrinieri, 2015).

Yüzey yükünün doymuş zeminlerde tünel inşaatı sırasında maruz kaldığı hidro-mekanik tepkileri inceleyen Prassete ve Guitierrez, bunun için tünel üzerindeki hidro-mekanik etkilerin uzun ve kısa vadeli tünel stabilitesi üzerine etkisini farklı zemin formasyonları (kil-granit) ve astar geçirgenlikleri altında analiz etmiştir. Analizler sonucunda yüzey yükleri yapılara uygulandığında boşluk suyu basınçları mekanik deformasyon yoluyla hidro-mekanik etki oluşturmuştur. Kısa vadede yüzey yükleri killi zeminlerde geçirimsiz tünellerde geçirimli tünellerden daha büyük moment ve deformasyon değerlerine ulaşmıştır. Uzun vadede geçirimsiz tünellerde yükleme yapıldıktan sonra kısa bir süre momentler durmamış, bunun yerine sabit bir şekilde devam etmişlerdir. Sonuç olarak yapılan tünel çalışmalarında kuru zemin analizleri kadar doymuş zemin analizlerinin de ele alınması gerektiğini belirtmişlerdir (Prassete ve Guitierrez, 2016).

Zhou ve diğ. 2018 yılında yaptıkları çalışmada tünel kazısı sırasında oluşan deplasmanları ve boşluk suyu basıncını incelemiş ve kazı sırasında tünelde oluşan deplasmanlarının önce arttığını, sonra azaldığını ve yavaş yavaş sıfırlandığını görmüşlerdir. Tünel çevresindeki boşluk suyu basıncını ise asimetrik bir dağılımda olduğunu gözlemişlerdir (Zhou ve diğ., 2018).

Yumuşak doymuş zeminlerde FLAC programı kullanılarak oluşturulan Finn modelde tünel; çapı 6 m ve yüzeyin 10 m altında kurulmuştur. Kurulan modelle dinamik yükler altında zemin gerilmelerinin, tünel et kalınlığındaki kuvvet değişimleri üzerine etkisi incelenmiştir. Deprem sırasında yumuşak doymuş zemin tabakalarında boşluk suyu basıncının kademeli olarak artması, etkili gerilmelerin azalmasına neden olduğu bulunmuş, tünel çevresinde ve yüzeyde kabarmalarda artma ve kayma gerilmelerinde de artma analiz sonuçlarında gözlemlenmiştir (Azadi, 2011).

Unutmaz, tünel çevresindeki zeminlerin tekrarlı yükleme durumunu ve sıvılaşma potansiyelini incelemiştir. Bu kapsamda 3 boyutlu sonlu farklar analizlerini kullanarak hem statik hem de sismik incelemeler yapmıştır. Oluşturulan modellerde farklı zemin yapısında farklı depremler altında farklı tünel et kalınlıklarını, farklı çapları ve farklı derinlikleri incelemiştir. Bu çalışma sonucunda, yer ivmesi değeri derine inildikçe kalın tüneller için daha yüksek çıkmıştır. Sıvılaşma analizlerinde ise tünel et kalınlığının hiçbir

etkisinin olmadığını, tünel çapının ise kayda değer bir etkisinin olmadığını belirtmiştir. Sıvılaşma üzerine en etkili parametrenin derinlik olduğunu söylemiştir (Unutmaz, 2014).

Azadi ve Hosseini yaptıkları çalışmada sıvılaşmanın sığ tüneller üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada tünel ve zemin için farklı parametreleri değiştirmişlerdir. Bu parametrelerden biri sismik yükün frekansıdır. Çalışmada frekans değeri azaltılmıştır ve bunun sonucunda aksenal kuvvette, kayma gerilmesinde ve boşluk suyu basıncı değerlerinde artma gözlenmiştir. Yüklemenin genliği artırıldığında ise boşluk suyu basıncı artmış ve bununla birlikte sıvılaşma, yüzey kabarmaları da artmıştır. Tünelin kaplama kalınlığının artması ise boşluk suyu basıncında kayda değer bir değiştirme oluşturmamıştır, dolayısıyla sıvılaşma üzerinde pek bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir (Azadi ve Hosseini, 2011).

Pitilskis ve Tsiniadis çalışmalarında yeraltı yapılarının sismik tasarımı ve performansı için önemli noktaları incelemişlerdir. Yer değiştirmeye dayalı kuvvet tasarımı, yeraltı yapısının çevresinde sismik kayma gerilmelerinin zemin-yapı etkileşimine uygunluğu ele alınmıştır. Yapılan analiz sonuçlarında ise yeraltı yapılarının yerüstü yapılarından farklı olarak atalet kuvvetlerinden çok sismik zemin deformasyonları için tasarlanması gerektiğini, sismik tasarımda zeminin esnek kabul edilmesinin zemin-yapı etkileşimini etkilediğini ve yeraltı yapılarının sismik tasarımı sırasında yerel zemin özelliklerinin de ele alınması gerektiğini belirtmişlerdir (Pitilskis ve Tsiniadis, 2014).

Sedarat ve diğ., zemin-tünel etkileşiminin sonucu gerçekçi olmayan gerilmeleri önlemek için sınırlı kayma sağlayan sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. 2D modelinde zemin bir birimlik katı eleman, tünel bir birimlik ışın eleman ve zemin-tünel ara yüzü sürtünmeli olarak modellenmiştir. Tünel ovalleşmesine bağlı olarak tünel kaplamasında basınç artışları ve zemin-tünel ara yüzünde sürtünme durumunda sürtünme sınır değerine ulaşıncaya kadar normal ve teğetsel çekme kuvvetten dolayı itme kuvvetinin arttığını gözlemlenmiştir (Sedarat ve diğ., 2009).

Chen ve diğ., sismik olarak aktif bölgelerde zeminlerdeki sıvılaşma durumu yeraltı yapıları için önemli bir problem olduğundan sıvılaşabilir tabakalı zeminlerde yeraltı yapılarının sismik tepkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma için zemin tek tabakalı sıvılaşabilir, tek tabakalı sıvılaşmaz ve tabakalı sıvılaşabilir olarak nümerik modellenmiştir. Sığ gömülü yeraltı yapılarında tek tabakalı sıvılaşabilir zeminlerde, tek

tabakalı sıvılaşımayan zeminlere oranla daha fazla hasar oluşmuştur. Tabakalı sıvılaştırılabilir zeminlerin yeraltı yapıları üzerine önemli etkisi vardır. Sıvılaştırılabilen tabakalı zeminler için sıvılaştırılabilen tabakalarda büyük kayma gerilmeleri oluşmuştur ve bunun yanı sıra sıvılaşımayan alt ve üst tabakalarda da kayma gerilmeleri artışına yol açtığı sonucuna varılmıştır. Bu durumda sıvılaştırılabilen tabakalardan geçen yeraltı yapıları için idealize edilmiş tek tabakalı çözümün yetersiz olacağı görülmektedir (Chen ve diğ., 2018).

Kumlu zeminlerde deprem sırasında oluşan sıvılaşma yeraltı hafif yapılarında yükselmelere neden olabilir. Watanabe ve diğ., yaptıkları çalışma ile sarsma tablası deneyleri yaparak deprem sırasında oluşabilecek sıvılaşma durumunda tünelin yükselme durumunu incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda zeminin üst tabakalarındaki sıvılaşmanın tünelin alt kısmında hafif bir hareketin yanı sıra tünel alt yüzeyindeki gerilmelerde ani bir düşüşe neden olduğu, fakat bu aşamada tünelin yükselişinin oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Zeminin orta ve alt tabakaları tamamen sıvılaştıktan sonra tünelin yükselmesinin hızla artmakta olduğunu gözlemlemişlerdir (Watanabe ve diğ.,2016).

1995 Kobe depremi sırasında Daikai metrosunda oluşan hasarlar mühendislik açıdan şaşırtıcı olarak nitelendirilmektedir. Çünkü deprem mühendisliği açısından yeraltı yapılarının yerüstü yapılara oranla çok daha yüksek deprem direnci olduğu düşünülmekteydi. Yaşanan depremde Daikai metrosunda 30'dan fazla sütunun çöktüğü görülmüştür. Bunun sebebi ise zeminin hareketinden dolayı tünelin tabanı ile tavanı arasında göreceli bir yer değişiminin hasara yol açmasıdır. Yaşanan bu olay yeraltı yapılarının sismik tasarımının önemini gözler önüne sermiştir (Iida ve diğ., 1995).

Tayvan'ın merkezindeki 21 Eylül 1999 Chi Chi depreminden ağır bir şekilde etkilenen bir bölgede bir çok otoyol tüneli bulunmaktadır. Kaya zemin içerisinde yer alan tünellerde hasara rastlanmazken, Chenlungpu fayı içinden geçen bir tünelde 4 m'lik fay hareketi oluşmuştur (Ueng ve diğ., 2001).

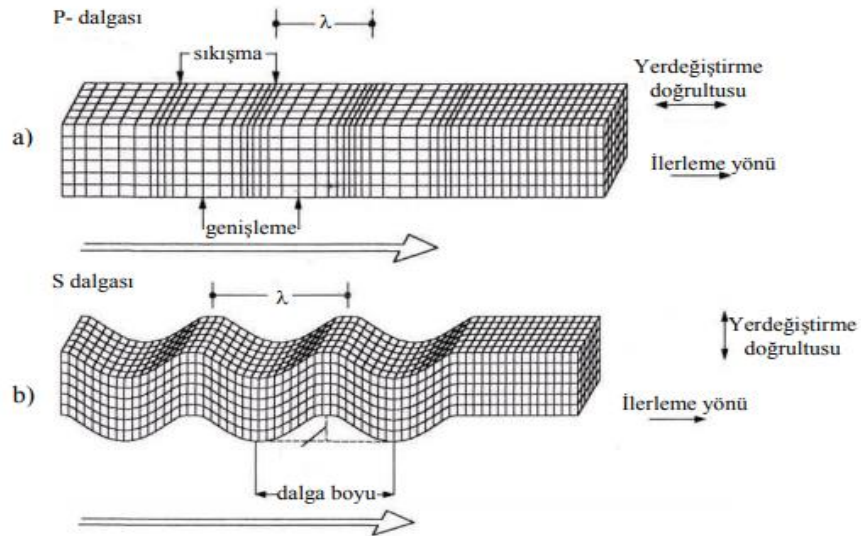
17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde Bolu tünellinde kılcal çatlaklar dışında hasara rastlanmazken, 12 Kasım 1999 Düzce depreminde Bolu tünelinin her iki arterinde de hasarlar oluştuğu görülmüştür. Deprem sonrasında yapılan 800 m'lik kazılarda yaklaşık 300 m'lik bir betonarme kesite rastlanmıştır. Yaşanan olay tünellerin sismik tasarımının önemini bir kez daha gözler önüne sermiştir (Hashash ve diğ., 2001).

BÖLÜM 3. ZEMİNLERDE DALGA YAYILIMI

3.1 Giriş

Herhangi bir ortamda dinamik etki (deprem, makine titreşimleri vb.) oluşturulduğu veya oluştuğunda bir dalga alanı ortaya çıkar. Bu dalga alanı, ortam içinde yayılan “cisim dalgaları” ve ortam yüzeyinde yayılan “yüzey dalgaları” olarak bilinen dalga çeşitlerinden oluşmaktadır.

Zemin içerisinde hareket eden cisim dalgalarının P ve S olmak üzere iki türü vardır. (Şekil 3.1). P dalgaları boyuna dalgalar olup basınç dalgaları olarak bilinir ve geçtikleri ortamda önce sıkışma sonra genişleme oluştururlar. Ses dalgalarına benzerler ve P dalgalarından etkilenen parçacık titreşimi dalga ilerleme yönüne paraleldir. P dalgaları ses dalgalarında olduğu gibi katı ve sıvı ortamdan geçebilir. S dalgaları enine ve kesme dalgalarıdır. Bu dalgalardan etkilenen parçacık hareketi dalga ilerleme yönüne diktir. Sonsuz ortamda S dalgasının yayılma hızı, P dalgalarının yayılma hızının en az yarısı kadardır (Geniş ve Gerçek, 2000).



Şekil 3. 1. Cisim dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar a) P dalgası b) S dalgası.

P dalgaları diğer dalgalardan daha hızlıdır, dolayısıyla kayıt istasyonuna ilk olarak P dalgaları ulaşır. Bu dalgaların hızı, dalganın yayıldığı ortamın rijitliğine, ortamın elastik özelliklerine ve ortamın yoğunluğuna göre değişim göstermektedir. P dalgasının hızı c_p ve S dalgalarının hızı c_s aşağıdaki formüllerle bulunabilir (Celep, 2000);

$$c_p^2 = \frac{(1-\nu).E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho} \quad (3.1)$$

$$c_s^2 = \frac{E}{\rho(1+\nu)} \quad (3.2)$$

c_p : P dalga hızı

E : Elastisite modülü

ν : Poisson oranı

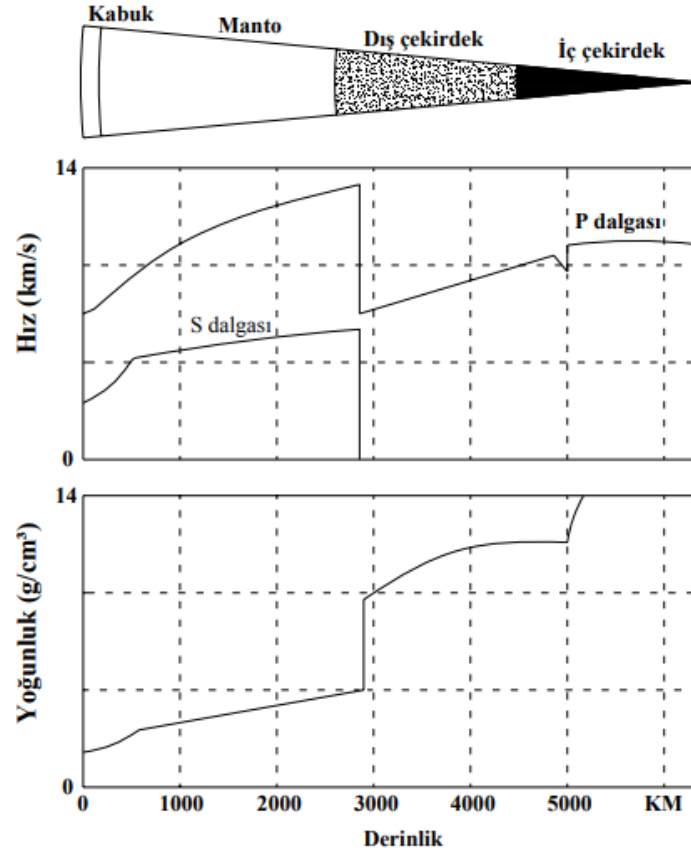
ρ : Ortamın yoğunluğu

c_s : S dalga hızı

Yukarıdaki eşitliklerde c_s , S dalgası yayılma hızını, c_p , P dalgası yayılma hızını, ν poisson oranını, E elastisite modülünü ve ρ kütle yoğunluğunu ifade etmektedir.

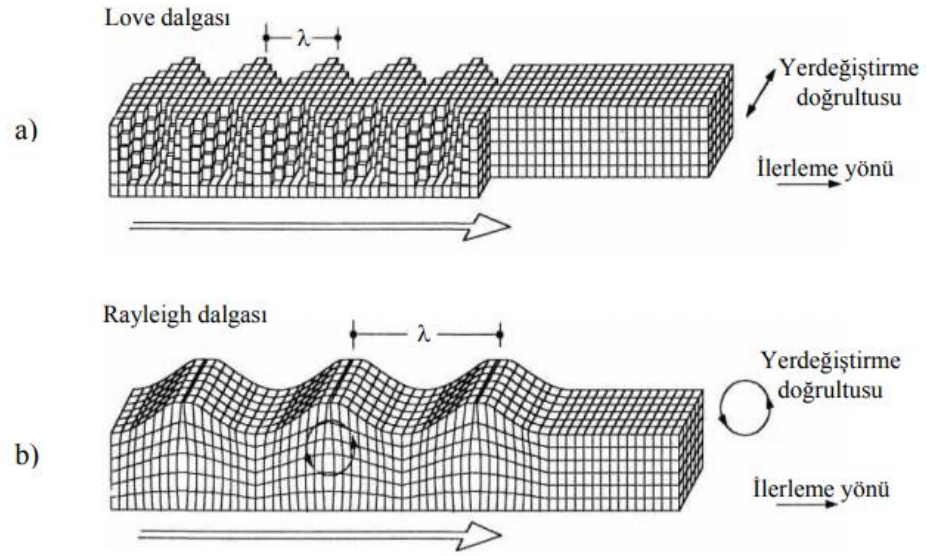
$$\frac{c_p}{c_s} = \sqrt{\frac{(1-\nu).2}{1-2\nu}} \quad (3.3)$$

Yukarıda iki dalga hızları arasındaki oranda $c_p > c_s$ ilişkisi vardır. Cisim dalgaları olarak adlandırılan bu dalgaların yayılması ortamın sınırlarından bağımsız olarak ortam içinde olmaktadır.



Şekil 3.2. Cisim dalgalarının hızlarının yoğunlukla değişimi.

Yüzeysel dalgaları, cisim dalgaları ile yer yüzeyinin etkileşimi sonucu oluşmaktadır. Yüzeysel dalgalarının genlikleri yer yüzeyinde derinliğe göre üssel olarak azalan bir şekilde ilerlerler (Şekil 3.2), (Kramer, 2003). Yüzeysel dalgaları cisim dalgalarına göre titreşim odağından uzak mesafelerde daha baskındır. Yüzeysel dalgalarının mühendislik için en önemlisi Love dalgaları ve Rayleigh dalgalarıdır. Rayleigh dalgaları P dalgaları ve S dalgalarının yer yüzeyi ile etkileşiminden oluşan parçacıkların düşey ve yatay yönlerde hareket ederler. S dalgalarının yumuşak çökellerle etkileşimi sonucu oluşan Love dalgalarında ise parçacıkların hareketi sadece yatay doğrultudadır.

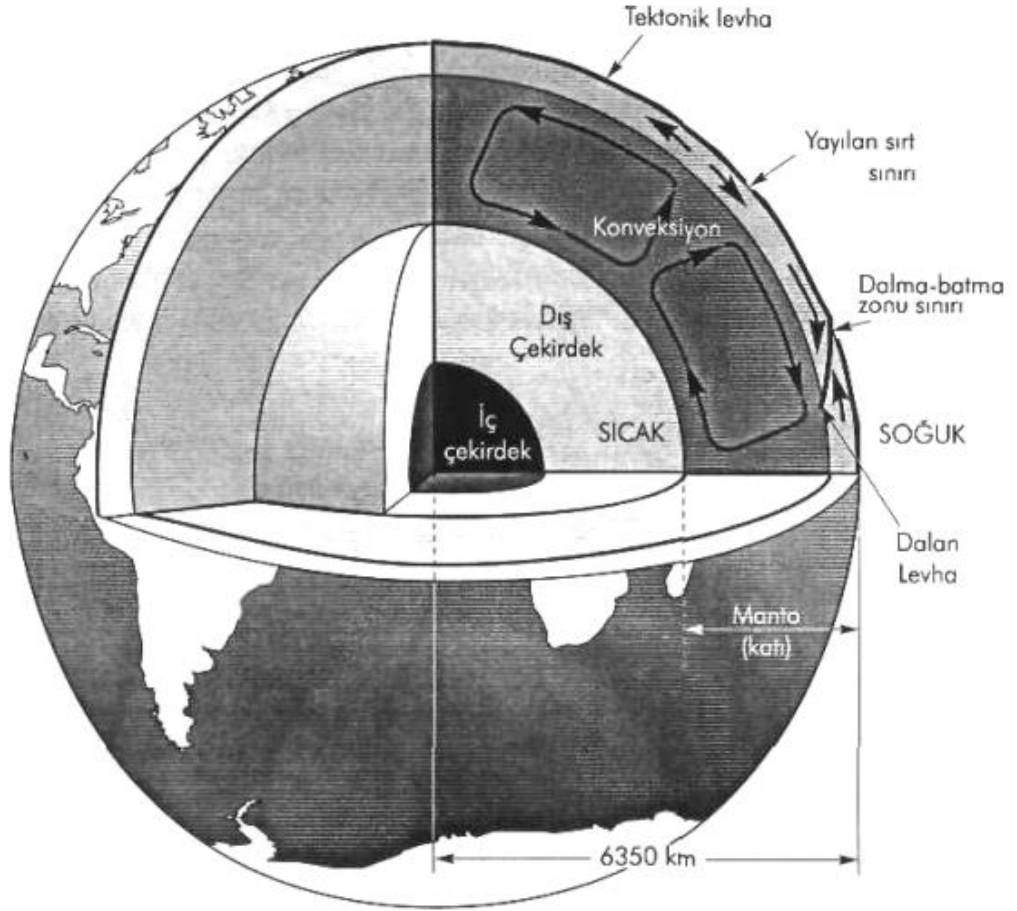


Şekil 3.3. Yüzeysel dalgaların oluşturduğu deformasyonlar a) Rayleigh dalgası, b) Love dalgası.

Odak noktasından yayılan deprem dalgaları, geçiş güzergahı üzerindeki şekil ve malzeme özelliklerinden etkilenirler. P ve S dalgaları geçiş güzergahı boyunca malzeme özelliklerine sahip ara yüzeylerle karşılaştıklarında kırılırlar ya da yansır. Geçiş güzergahındaki yüzey şekillerindeki ve malzeme özelliklerindeki gibi değişimler yansıma ve kırılma olaylarında büyük karmaşıklıklara yol açar. Yüzeysel şekilleri ve yüzeye yakın tabakalar da yüzeysel dalgalarını etkiler (Celep, 2000).

3.3. Yarı Sonsuz Ortamda Dalga Yayılımı

Yerküre sonsuz olmayan ve dış yüzeyinde gerilmelerin oluşmadığı çok büyük bir küredir (Şekil 3.4), (Kramer, 2003). Mühendislik açısından yüzeye yakın problemlerin analizinde yer küre genellikle düzlemsel bir serbest yüzey ile birlikte yarı sonsuz bir ortam olarak modellenmektedir. Bu tür modellemeler ve çözümler, hareketi serbest yüzeye yakın sığ bir bölgede yoğunlaşmış dalgaları yani yüzeysel dalgalarını tanımlamaktadır.



Şekil 3.4. Yerküre ve iç yapısı.

3.2.1. Rayleigh yüzey dalgası

Geçmişten günümüze meydana gelen depremlerde üst yapıda oluşan hasarların çoğunluğu yer yüzeyinin serbest alandaki yer hareketlerinin neden olması geoteknik deprem mühendisliği bakımından Rayleigh yüzey dalgalarının ilerleme hızının önemini giderek artırmıştır. Yüzeyde zemin hareketlerinin çözümünde analitik olarak Rayleigh dalgalarının mekanik açıdan oluşturulması daha kolay olduğu için tercih edilmektedir.

Genelde yüzeyde oluşan en yaygın dalga bu dalgalardır. Rayleigh dalgasının yayılma hızı (c_R), aşağıda ifade edilmiştir (Kramer, 2003).

$$4c_s[(c_s^2 - c_R^2)(c_p^2 - c_R^2)]^{1/2} = c_p(2c_s^2 - c_R^2) \quad (3.4)$$

Burada;

c_R = Rayleigh dalga hızı

c_S = S dalga hızı

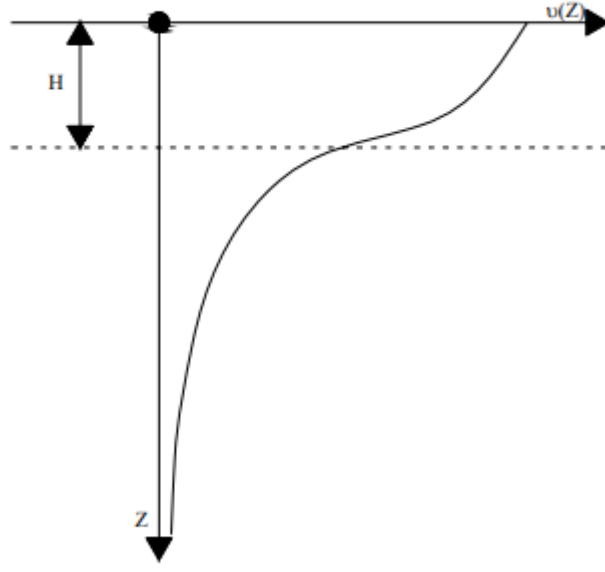
c_P = P dalga hızıdır.

Rayleigh dalgasının yayılma hızı, yaklaşık S dalgası hızında olmasına rağmen, Love dalgasının yayılımı, yüzey tabakasındaki ve alt tabakadaki S dalgalarının yayılma hızları arasındaki bir değerdir.

Rayleigh ve Love dalgalarını S ve P dalgalarından ayıran en önemli fark genliklerinin derinlikle azalmasıdır. Bu tür dalgalar yarı sonsuz ortamın sığ bir bölgesinde yüzeye paralel olarak hareket ederler. Bu yüzden bu tür dalgalara yüzeysel dalgalar da denir. Dalga yayılma doğrultusunda S dalgalarından biraz daha yavaş hareket ederler ($c_R \cong 0.9 c_S$). Bu dalga türlerinde yer değiştirme yönü düşey ve yatay titreşimlerin ortak bir hareketi sonucunda ters elips şeklinde oluşmaktadır. Dalga yüzeye yakın derinlikte ilerlerken çevrimsel bir hareket oluşturur.

3.2.2. Love yüzey dalgası

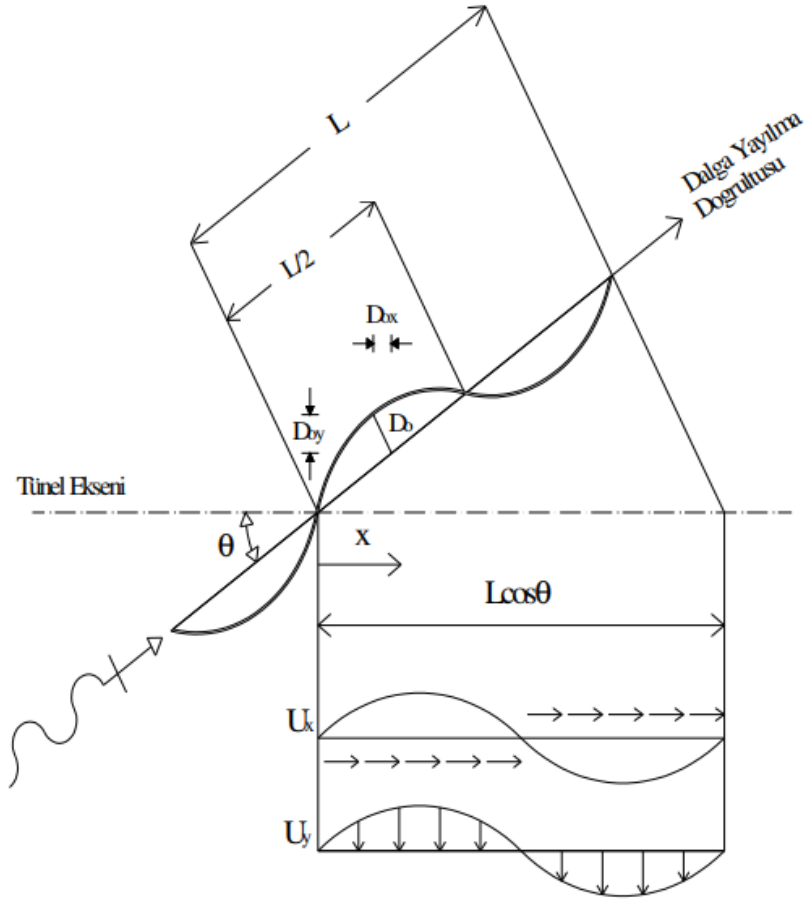
Homojen elastik yarı uzay bir ortamda sadece S, P ve Rayleigh dalgaları meydana gelir. Ancak, yarı sonsuz ortamın kendinden daha düşük cisim dalgası iletme hızına sahip bir katman ile örtülmesi halinde, Love dalgaları oluşabilir. Love dalgaları aslında yüzey katmanları içinde çoklu yansımalar vasıtasıyla kaplanmış S dalgalarından oluşur. Love dalgası yerdeğiştirme genliği yüzeydeki katmanda sinüzoidal olarak değişir ve alttaki yarı sonsuz ortamda derinlikle birlikte üssel olarak sönümlenir. Love dalgası hızları yarı sonsuz ortamın (çok düşük frekanslardaki) S dalga hızı ile yüzey katmanının (çok yüksek frekanslardaki) S dalga hızı arasındadır (Şekil 3.5) (Kramer, 2003).



Şekil 3.5. Love dalgalarında parçacıkların yerdeğiştirme genliğinin derinlikle değişimi.

3.3 Zemin Dalgalarının Tünellerde Yayılımı

Deprem sırasında oluşan yüzey dalgaları ve cisim dalgaları tünel ekseninde yer değiştirmeler oluşturur. Tünellerin sismik tasarımı için incelenmesi gereken önemli noktalardan biri de oluşan bu aksenal yer değiştirmelerdir. Oluşan yer değiştirmeler tünelde basınç kuvveti, çekme kuvveti ve eğilme gerilmeleri oluşturur. Yüzey ve cisim dalgalarının tünel ekseninde belli bir açıyla yansması Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Burada L dalga boyunu, D deplasman genliğini, θ dalganın tünel eksenine yaptığı açığı, U_x boyuna deplasman, U_y enine deplasmanı ifade etmektedir.



Şekil 3.6. Yüzey ve cisim dalgalarının tünel ekseninde yansıması (Cüceoğlu 2006).

Tünel sismik tasarımında serbest alan yaklaşımı kullanılmaktadır. Serbest alan yaklaşımında deprem sırasında oluşan dalgaların tünelde oluşturduğu gerilmeler incelenmektedir. Deprem sırasında oluşan dalgaların özellikleri karmaşık olduğundan dolayı hangi dalga türünün baskın olacağını tahmin etmek zordur. Bunun yanında tünelde gerilmelerin tahmini için genel olarak Rayleigh dalgaları tercih edilmektedir. Rayleigh dalgalarının oluşturduğu gerilme fonksiyonu aşağıdaki gibidir (Wang 1993).

$$e = \frac{V_R}{c_R} \cos^2 \theta \quad (3.5)$$

e = aksenal gerilme

V_R = maksimum parçacık hızı

c_R = Rayleigh dalgası yayılma hızı

θ = Dalganın tünel eksenine göre geliş açısı

Sismik dalgaların zemin içerisindeki bir yapıdan dolayı yansıması dalganın zeminin içerisindeki yayılma hızından farklılık gösterebilmektedir (Hadjian ve Hadley, 1981). Bu olay deformasyonlara yol açabilir.



BÖLÜM 4. ZEMİN-YAPI SİSTEMLERİNDE NÜMERİK ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Dinamik yükler altında yeraltı/yerüstü yapılarının daha iyi analiz edilebilmesi ve gerek işlem kolaylığı açısından, gerek maliyet açısından gelişen teknolojiyle birlikte bilgisayar programları kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan programlarda ise sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemleri öne çıkmaktadır. Bu yöntemlerde daha doğru sonuçlar verebilmesi ve modelin daha doğru çalışması için zemin-yapı etkileşiminin ele alınması gerekmektedir. Zemin yapı etkileşimi; en genel tanımla deprem sırasında zeminin hareketinin yapıyı, yapının hareketinin de zemini etkilemesi olarak tanımlanabilir (Kramer, 2003). Zemin yapı etkileşimleri incelenirken önemli noktalardan biri de sisteme uygulanan etkinin çeşididir. Statik yükler altında sistemin geometrik uygunluğu ve denge koşulları incelenirken, dinamik yükler altında bu koşulların yanında radyasyon sönümü etkisi de incelenmektedir. İnsanların oluşturduğu titreşimler veya deprem hareketleri esnasında oluşan dalgalar zeminin sınırsızlığından dolayı radyasyona uğrarlar. Dinamik etkiler zeminini özelliklerinin dışında bir de geometrisinden dolayı sönümlenirler, bu durum da geometrik sönüm olarak ifade edilmektedir (Vural, 2012).

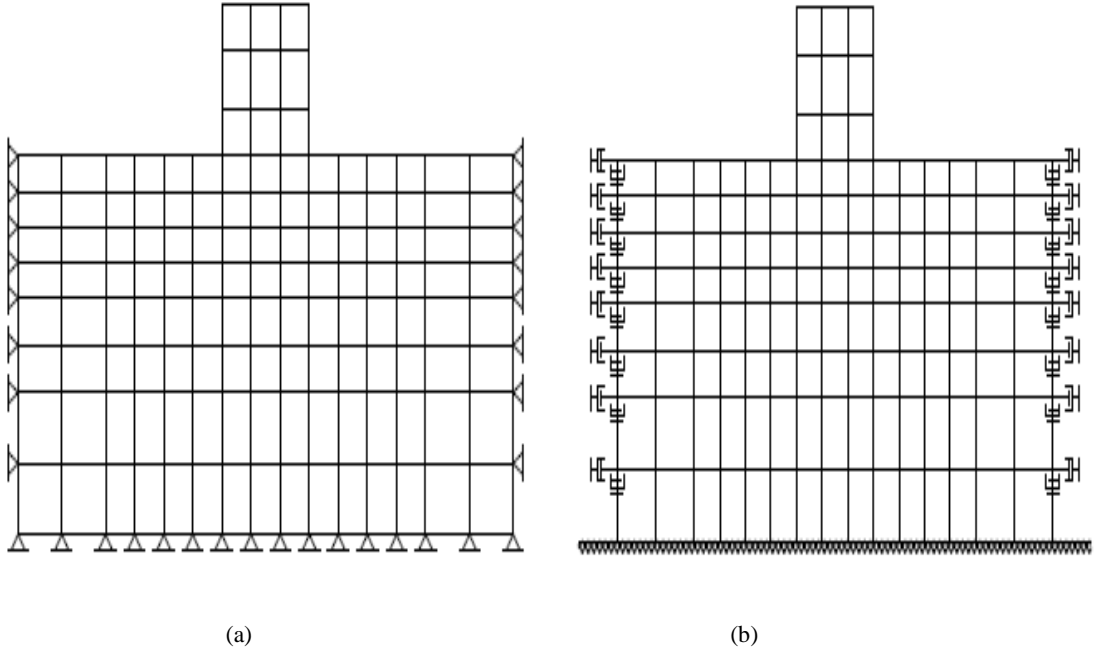
Zemin yapı etkileşimi dış yükler altında, zeminin altyapı ile birlikte analiz edilmesi olarak ele alınmalıdır. Bu durumda asıl problem zeminin yapısal olarak nasıl idealleştirileceğidir. Zemin yapı etkileşimlerini tanımlamada seçilen yöntem doğrultusunda Alt Sistem Yaklaşımı ve Doğrudan Çözüm Yaklaşımı kullanılabilir.

4.1. Alt Sistem Yaklaşımı

Alt sistem yaklaşımında zemin ile üst yapı iki ayrı sistem olarak incelenir. Bu iki sistem için ayrı ayrı denge denklemleri oluşturulur. Yazılan denge denklemleri daha sonra yapı-zemin ara yüzeyindeki denge koşulları ve geometrik uygunluk şartları dikkate alınarak birleştirilir. Böylece zemin ortamı sadece yapı-zemin ara yüzeyinde, sınırlı sayıda ayrık düğüm noktalarında temsil edilen bir alt sistem olarak idealleştirilmiş olur (Aydinoğlu, 1994).

4.2 Doğrusal Yaklaşım

Bu yöntem, zemin ortamının da yapı sistemi gibi ayrıklaştırılmasını ve oluşturulan yapı-zemin modelinin, tanımlanan statik veya dinamik etkiler altında doğrudan analizini öngörür. Doğrudan çözüm yaklaşımında statik ve dinamik etki durumlarında zemin ortamının sınırlarının belirlenmesinde farklılıklar mevcuttur. Statik durumda zemin ortamının sınırları, deplasmanların yeteri kadar küçüldüğü düğüm noktalarıyla tanımlanır. Bu düğüm noktalarına basit mesnet konulması ile zemin ortamı idealleştirilmiş olur (Şekil 4.1a). Dinamik durumda ise radyasyon sönümü nedeni ile zemin ortamı ne kadar büyütülürse büyütülsün, sınırlar basit mesnetli olarak tanımlanamaz. Bu nedenle modellemede radyasyon koşulunu sağlayan mesnetlerin kullanılması gerekmektedir (Şekil 4.1b). Geçirgen sınırlar olarak ta adlandırılan bu tür mesnetler, sonlu elemanlarla modellenen zemin bölgesinden dışa doğru yayılan dalgaların içeri doğru yansıtılıp sönümlenmesini sağlar (Aydınoğlu, 1994).



Şekil 4.1. Doğrudan çözüm yaklaşımı kullanılan zemin-yapı etkileşimleri.

4.3. Zemin Ortamının Modellenme Şekilleri

Zemin-yapı etkileşimi problemleri; ortamın sınırsız olması, dinamik enerjinin yayılması, zemin sönümü, ilişkisi olan yapının ve zeminin birbirilerinin davranışını etkilemesi, zeminin doğrusal olmayan davranışı gibi özellikleri nedeni ile çözümü son derece karmaşık ve zor olan bir problemdir. Ayrıca zemindeki süreksizlikler, zeminin yarı sonsuz bir ortam olması, zemindeki tabakalaşma ve bu tabakaların değişkenliği, zemindeki yeraltı suyu, zeminin çekme gerilmesi almayan bir malzeme olması gibi olgular zemin yapı etkileşim problemlerini klasik analiz problemlerinden farklı kılan özelliklerdir. Zeminin dinamik karakterlerinin belirlenmesinde, zemin rijitliğini, sönümü ve zemin ortamında yüzeyden yansıyan dalganın geri dönmeyecek şekilde yayılmasını göz önüne alan modeller oluşturulabilir.

4.3.1. Zemin ortamının idealleştirilmesi

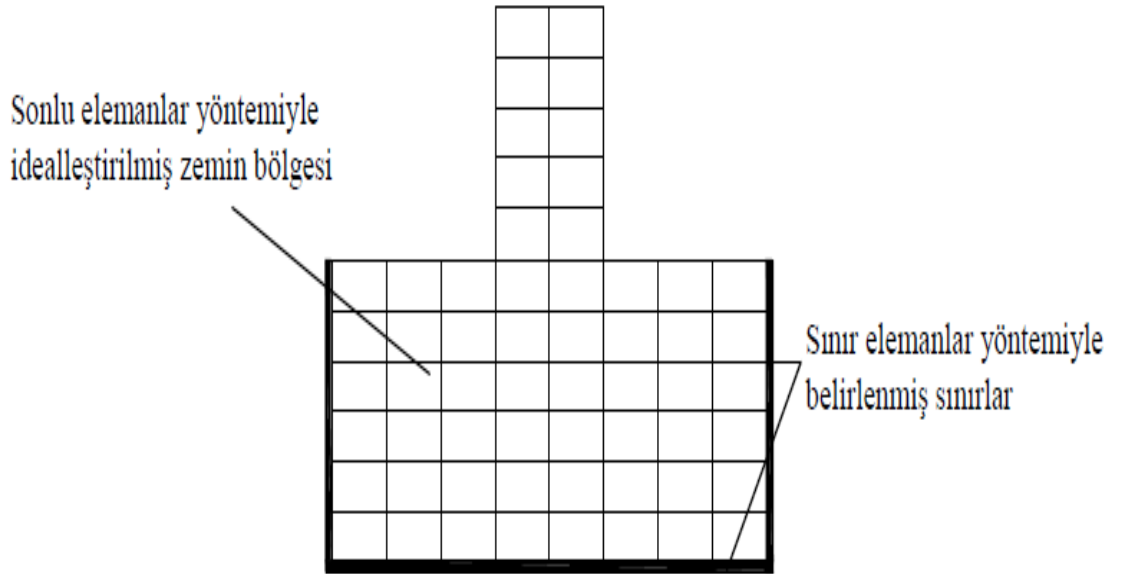
Sonlu farklar veya sonlu elemanlar kullanılarak yapılan idealleştirmelerde de bazı noktalar önemlidir. Gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için zemin bölgesinin sınır kesim yüzeylerinin yapıdan yeterince uzak mesafede seçilmesi gerekmektedir. Fakat modelin çözülebilir olması için sonlu elemanlar bölgesinin çok büyük olması istenmez. Kesim sınırları ile sınırlanan zemin bölgesi modellendiğinde kapalı ortam içerisinde yayılan dalgalar sınırlara çarparak tekrar analiz ortamına döner ve çözümü olumsuz etkilerler. Bu durumun engellenmesi için kesim sınırlarının özel sınır şartları ile dalga geçirimsizliğini sağlayacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Yapılan parametrik çalışmalar, zemin eleman ağının, özellikle geometrik sönümün (radyasyonun) önemli olduğu yüksek frekanslı yer hareketlerinde ve zeminin sönümünün büyük olması gibi özel durumlarda, yapı temel taban genişliğinin sağ ve solunda 8~10 katına kadar uzatılmasının yeterli olacağı belirtilmektedir (Gürsoy ve Durmuş, 2002).

Modellemede zemin bölgesinin idealleştirilmesinin yanında önemli diğer bir unsur da ayrıklaştırılan zemin bölgesinin sınır şartlarının nasıl belirleneceğidir. Zemin ortamının sonsuzluğundan dolayı sınırlarda geometrik sönümün ifade edilmesi gerekmektedir. Sınır şartları için en gerçekçi sonuçlar, viskoz sınır şartlarıyla tanımlanan modellerde elde edilmiştir.

4.3.1.1. Sınır elemanlar yöntemiyle sınır şartlarının belirlenmesi

Sürekli sistemlerin uygun bir sayısal yöntem kullanılması sonucunda ayırık bir sistem olarak incelenmesinde, serbestlik derecesi çoğaltılarak çözümün yaklaşıklık derecesi artırılabilir. Yakınsamanın kabul edilmesi durumunda, matematik olarak kesin bir çözüm, serbestlik derecesinin sonsuza yaklaştırılmasıyla oluşturulur. Sonsuz büyük bir zemin bölgesi gibi sürekli bir ortam sonsuz serbestlik dereceli ayırık bir sisteme dönüştürülebilir. Böyle bir sistemin hareket denklemi, ortamın sonsuz küçük bir eleman parçasının göz önüne alınmasıyla kısmi diferansiyel denklemi ile ifade edilebilir. Sınır elemanlar yönteminin kullanımına ait çözüm, sürekli ortamlar mekaniği problemlerinin hareketi için yazılan diferansiyel denklem takımının sınır integral formülasyonuna dönüştürülmesi esasına dayanır ve analitik olarak da bu diferansiyel denklemin kesin çözümünün bilinmesi gerekir.

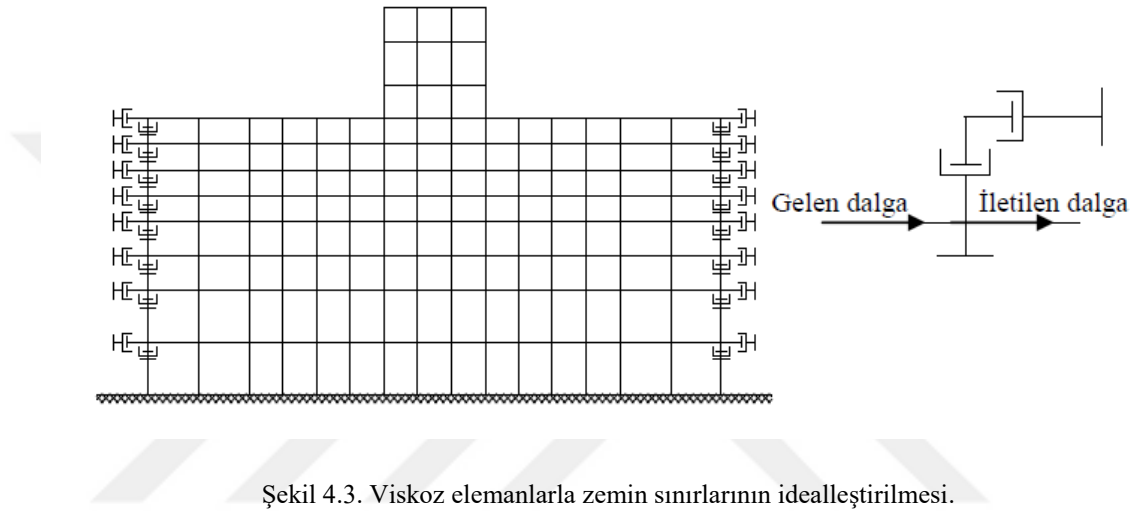
Lineer problemlerde incelenen bölgenin sadece sınırlarının ayrıklaştırılarak çözüm boyutunun bir mertebe indirgenmesiyle daha az bilinmeyen kullanılması ve sınırdaki radyasyon koşulunu doğrudan sağlaması (Şekil 4.2), sınır elemanlar yönteminin sürekli ortamlar mekaniğinde dalga yayılımı problemleri için uygun bir nümerik yaklaşım olduğunu göstermektedir (Çelebi ve diğ., 2006).



Şekil 4.2. Sınır elemanlar yöntemiyle zemin sınır şartlarının belirlenmesi.

4.3.1.2. Viskoz sınır şartlarıyla modelleme

Zeminin radyasyon sönümü şartını sağlayabilmek için kullanılacak bir diğer yöntem ise zeminin kesim yüzeylerinde sınırların eşdeğer statik yaylar ve sönümleyiciler ile idealleştirilmesidir. Bu sınır şartlarıyla titreşim kaynağından yayılan dalgaların sınırlarda yansıyor sisteme geri dönmesi engellenmiş ve zeminin sonsuzluğunun oluşturduğu geometrik sönüm ifade edilmiş olur (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Viskoz elemanlarla zemin sınırlarının idealleştirilmesi.

Viskoz sınır şartlarının kullanılması durumunda zemin bölgesi uygun sonlu elemanlara bölünmeli ve zemin kesim bölgesi de yapıdan yeteri kadar uzaklıkta seçilmelidir. Aynı zamanda düzlem dalga yayılımının izotrop ve lineer elastik bir ortamda gerçekleşmesi gerekmektedir.

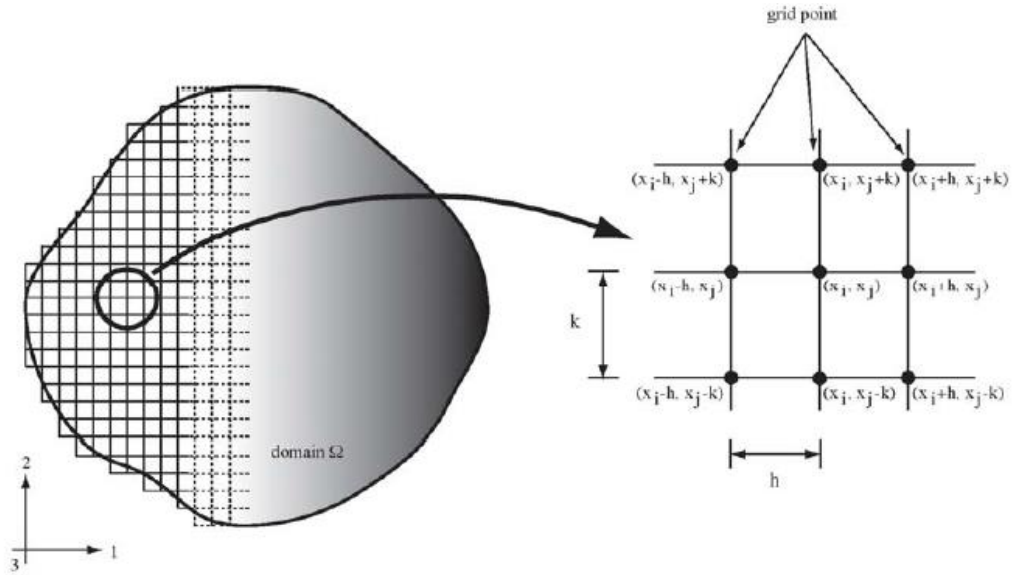
4.4.Sonlu Farklar

Nümerik modelleme, bilgisayar işlemci hızının geliştirilmesi ve çok daha karmaşık problemleri daha kısa bir sürede çözme imkanı sağlamasından dolayı son on-on beş yılda giderek artan kullanım alanı bulmuştur. Bu ilerlemelerin ışığında birçok sayısal yöntem içeren yazılım geliştirilmiştir. Bunlar arasında en popüler olanları sonlu farklar yöntemleri ve sonlu elemanlar yöntemleridir.

Nümerik model çalışmalarında kullanılan FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) Lagrangian analizi yapan açık, sonlu farklar programıdır.

Sonlu farklar yöntemi başlangıç koşulları, sınır şartları vb. değerler verilerek farklı eşitlik kurgularının çözümü için kullanılan en eski nümerik tekniklerden biridir.

Sonlu farklar yönteminde, şekil 4.4.'de gösterildiği gibi gridler alanla üst üste getirilir. Şekilde alt indisler noktanın konumu belirtir. Örneğin, i, j koordinatları (x_i, x_j) , $i + 1, j$ noktası $(x_i + h, x_j)$, $i, j + 1$ noktası $(x_i, x_j + k)$ vb. olan bir noktayı temsil eder (Bobet, 2010).



Şekil 4.4. Sonlu Farklar Yönteminde noktaların gösterimi (Bobet, 2010).

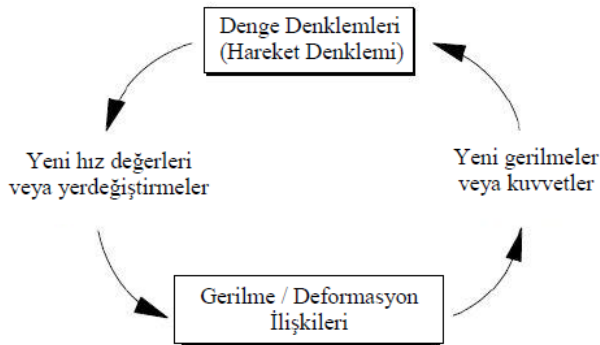
Sonlu farklar yönteminde temel eşitlikler kurgusundaki her türev doğrudan, uzaydaki soyut noktalardaki alan değişkenleri (örneğin, gerilme ya da deplasman vb.) ile ilgili olarak yazılan cebirsel ifadelerle değiştirilebilir. Bu değişkenler elemanlar içerisinde tanımlanmaz (FLAC 2D, User's Manual).

Sonlu farklar yöntemi ile yapılamayan, çok büyük global rijitlik eleman matrisleri, sonlu elemanlar metodu ile birleştirilerek nispeten etkili olması nedeniyle her adımda sonlu fark denklemleri yeniden kullanılarak çözülebilmektedir. Dolayısı ile bu tip problemlerin çözümünde sonlu elemanlar yöntemi kullanılması, giderek sonlu elemanlar yöntemi sonlu farklar yöntemine göre daha popüler hale getirmiştir. FLAC cebirsel denklemleri çözmek için açık bir yöntem kullanır, ancak sonlu elemanlarda örtülü, matris odaklı

çözüm planları daha sık görülür. İki metot arasında başka farklılıklar da yaygındır, ancak bu gibi nedenlerden dolayı sonlu elemanlar metodu sonlu farklara göre daha çok kullanılan, tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan bir metot haline gelmiştir (FLAC 2D, User's Manual).

4.4.1. Zaman-adımı yöntemi

FLAC statik problemlerin çözümünün yanı sıra dinamik problemlerin çözümü için de hareket denklemlerini içermektedir. Bunun amacı kararsız sistemleri kararlı hale getirerek çözümü sağlamaktır. Nonlineer malzemeler ile yapılan modellemelerde fiziksel istikrarsızlık durumu ve sistemin çökme olasılığı her durumda mevcuttur. Gerçekte, sistemin şekil değiştirmelerine bağlı ortaya çıkan enerjiler kaynaktan uzağa kinetik enerjiye dönüşmek suretiyle yayılırlar. FLAC modelleri bu işlemi uygularlar. FLAC sadece çözüm veren kapalı kutu bir yazılım programı değildir. Şekil 4.5 FLAC programının genel hesaplama sıralanışını göstermektedir. Bu prosedüre göre FLAC gerilme ve kuvvetlerden yeni hız ve yerdeğiştirme değerlerini üretmek için ilk olarak hareket denklemlerini kurar. Daha sonra elde edilen hız ve yer değiştirmelerin türevlerinden deformasyon oranları hesaplanır (FLAC 2D, User's Manual).



Şekil 4.5. FLAC temel hesaplama döğüsü.

4.4.2. Lagrangian analizi

FLAC global rijitlik matrisine ihtiyaç duymadığı için büyük şekil değiştirmeler (large-strain) modunda her adım için koordinatları yenileme gereği duymaz. Artan

yerdeşiftirmeler koordinatlara eklenir, böylece sonlu farklar örgüsü, malzeme davranışına göre hareket eder ve deformasyona uğrar. Bu durum sabit grid durumunda çalışan “Eularian” formulasyonun aksine bir durumdur ve “Lagrangian” formulasyonu olarak adlandırılır. Her adımdaki temel formulasyon küçük bir şekil değiştirme (small-strain) hesabıdır, fakat milyonlarca adımın üzerine çıkıldığında bu büyük şekil değiştirmelere eşdeğerdir (FLAC 2D, User’s Manual).

4.4.3. Sınır şartları

FLAC programında hem deplasmanlar hem de gerilme değerleri katı cismin sınırına uygulanabilir. Deplasmanlar düğüm noktalarına verilen hız değeriyle tanımlanmaktadır. Kuvvet değerleri de aşağıdaki formülden tanımlanmaktadır;

$$F_i = \sigma_{ij}^B n_j \Delta_s \quad (4.1)$$

Burada, n_j sınır elemanındaki dış normal vektör birimi, Δ_s sınır elemanının uzunluğunu ve σ_{ij}^B de bu elemandaki gerilme değerini ifade etmektedir (FLAC 2D, User’s Manual).

4.4.4. Zemin modelleri

FLAC, zemin davranış özelliklerine göre nümerik modelleme yapılabilmesini sağlayan özel bir programdır. FLAC içerisinde boş model, elastik model ve plastik model gruplarını düzenlenmesi ile oluşmuş oniki farklı model içermektedir (FLAC 2D, User’s Manual).

4.4.4.1. Elastik-İzotropik model

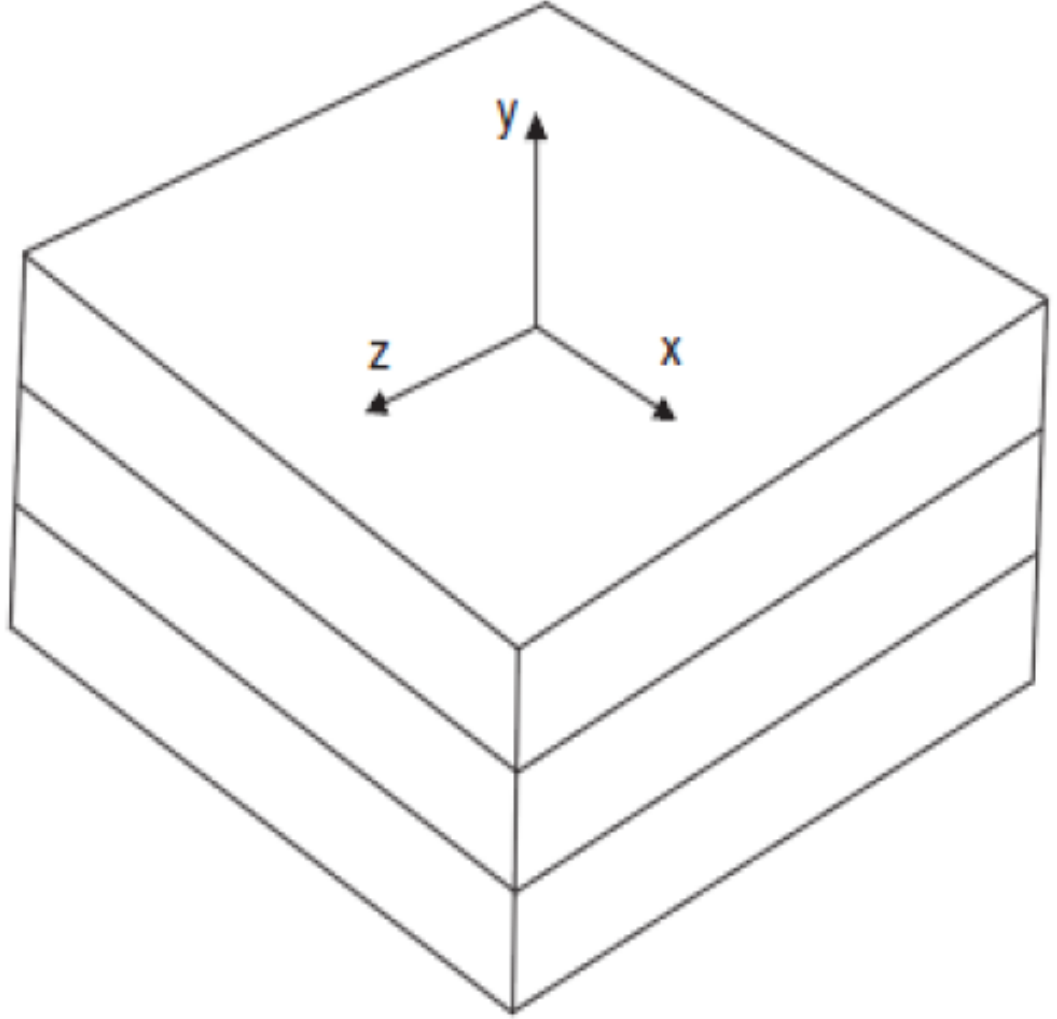
Zeminler kendi içinde homojen olmayan ve süreksiz bir yapı gösterdiğinden yapılan çalışmalarda, zeminlerin bu özelliklerinin tam olarak ifade edilmesinin zorluğu nedeni ile çeşitli kabuller yapılarak zemin modelleri kurulmaktadır. Elastik zemin kavramı da bu kabullere dayanan bir zemin teorisidir. Bu teoriye göre zemin lineer davranış sergileyen, her yerde aynı özellikleri sergileyen bir malzeme olarak kabul edilir ve zeminin elastisite teorisine göre davranış sergileyeceği kabul edilir. Burada temel Hooke kanunları ve

düzlem deformasyon ilişkileri dikkate alınmaktadır. Elastik-izotropik zemin modeline göre gerilme deformasyon eşitlikleri ve kabuller aşağıdaki gibidir (FLAC 2D, User's Manual);

$$E_3 = E_1 \quad (E_z = E_x)$$

$$v_{31} = v_{13} \quad (v_{zx} = v_{xz})$$

$$v_{23} = v_{21} \quad (v_{yz} = v_{yx})$$



Şekil 4.6. FLAC Elastik-izotropik koordinat eksenleri.

4.4.4.2. Mohr-Coulomb model

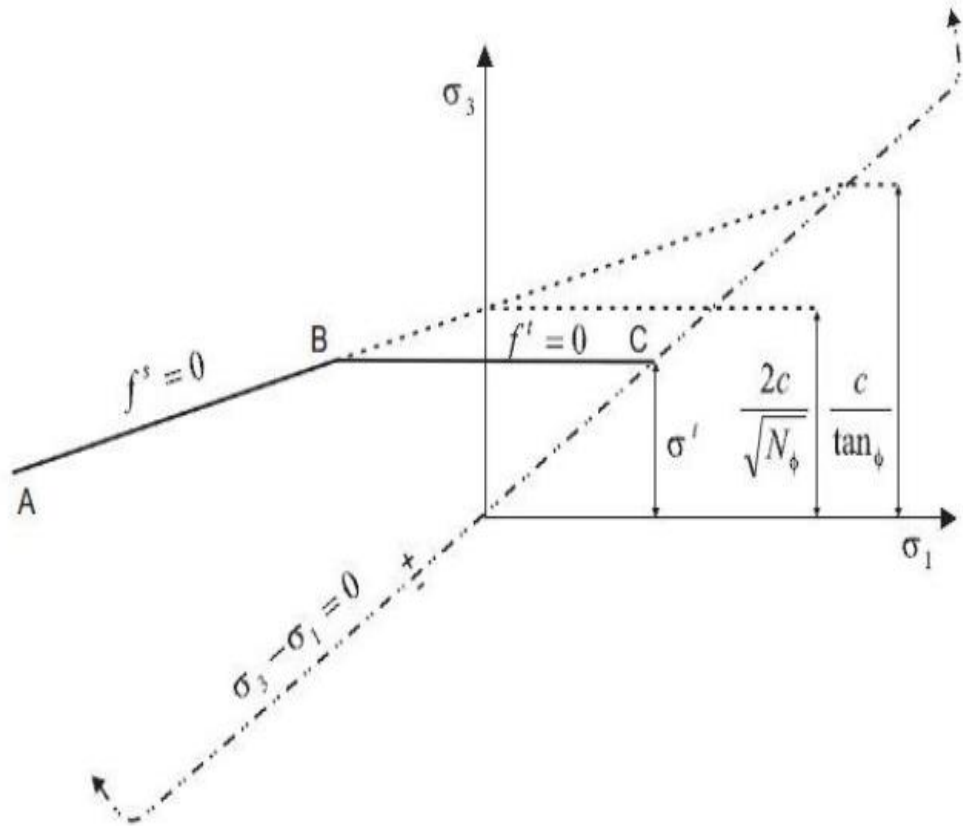
Yenilme zarfı Mohr-Coulomb kriterine karşı gelmektedir. FLAC bu modelde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmeleri kullanmaktadır. Asal gerilmeler ve asal yönlere göre değerlendirilmektedir (FLAC 2D, User's Manual).

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (4.2)$$

Asal şekil değiştirme artışları olan $\Delta_{e1}, \Delta_{e2}, \Delta_{e3}$ aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır (FLAC 2D, User's Manual);

$$\Delta_{ej} = \Delta_{ej}^e + \Delta_{ej}^p \quad (4.3)$$

Burada e ve p sırasıyla elastik ve plastik kısımları ifade etmektedir (FLAC 2D, User's Manual).



Şekil 4.7. FLAC Mohr-Coulomb yenilme kriteri.

Şekil 4.7 Mohr-Coulomb kriterinde A-B noktaları arası yenilme zarfını ifade etmektedir.

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (4.4)$$

B-C noktaları arasında gerilme yenilmesinin fonksiyonu da;

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 \quad (4.5)$$

Burada ϕ içsel sürtünme açısı, c kohezyonu, σ^t gerilme dayanımıdır.

$$N_\phi = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \quad (4.6)$$

4.4.4.3. Finn-Byrne sıvılaşma modeli

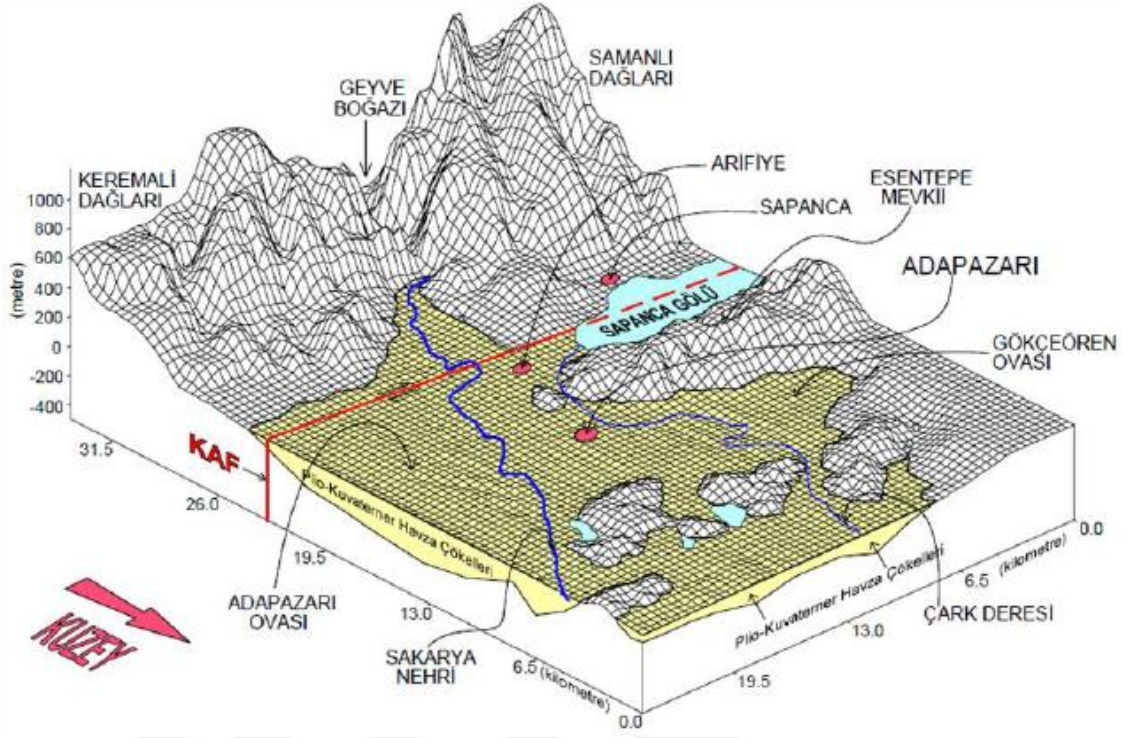
FLAC dinamik opsiyon çalışma modelinde Byrne tarafından geliştirilmiş olan boşluk suyu basıncı artışı modelini kapsamaktadır. Bu model, dinamik kayma birim deformasyonu miktarını hacimsel birim deformasyonlarla ilişkilendirerek dinamik yükleme sırasında oluşan hacimsel birim deformasyonları hesaplayabilmektedir. Bu model ile hacimsel birim deformasyon değerlerinden boşluk suyu basınçları hesaplanabilmekte, böylelikle deprem sırasında boşluk suyu basıncı ve sıvılaşma problemleri modellenebilmektedir (Byrne, 1991).

BÖLÜM 5. ADAPAZARI BÖLGESİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

19 Eylül 1985 tarihinde meydana gelen $M=8,1$ büyüklüğünde Michoacan depremi depremin merkez üssünde orta düzeyde hasarlar oluşturmuş ama 350 km uzağındaki Mexico City’de ağır hasarlara neden olmuştur. 19 Ekim 1989’da San Francisco Körfezi’nde meydana gelen $M=7,1$ büyüklüğündeki depremde merkez üstü Loma Praeta Dağında (San Francisco ve California’nın 100 km güneyinde) oluşan hasarın San Francisco ve California’da oluşan hasardan daha az olduğu görülmüştür (Kramer, 2003). Bu yaşanan olaylar deprem bölgeleri için yerel zemin özelliklerinin önemli olduğunu göstermiştir. Yerel zemin etkilerinin depremler sırasında önemli bir rolü vardır. 19 Ağustos 1999 Kocaeli depremi $M=7,4$ büyüklüğünde iken Adapazarı bölgesinde çok daha büyük şiddetlerde hissedilmiştir. Mevcut örnekler ve yaşanan deprem ele alınarak mevcut çalışma ile ilgili olarak yerel zemin özellikleri bu bölümde incelenmiştir.

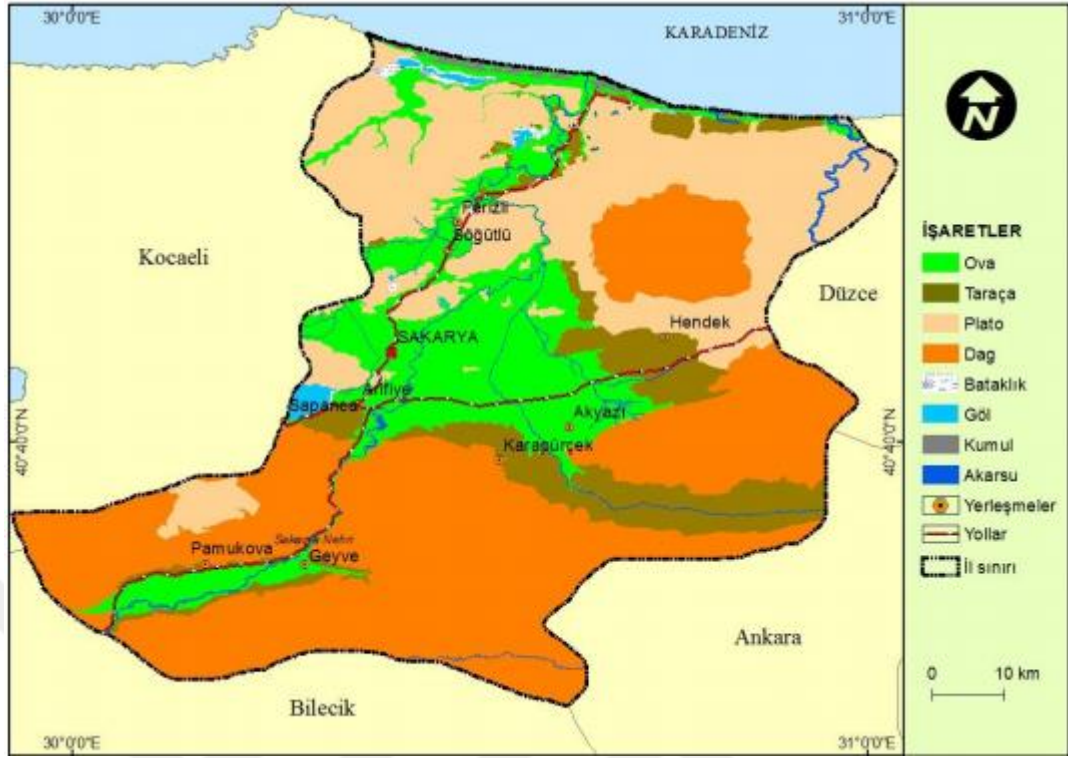
5.1. Adapazarı Bölgesinin Geoteknik Özellikleri

Marmara bölgesinin doğusunda bulunan Sakarya ilinin kurulmuş olduğu yer yüzeyi genelde düz bir yapıya sahiptir. Bölgenin deniz seviyesinden yüksekliği 31 m dolaylarındadır, bu yükseklik kuzeydoğu doğrultusunda % 0.5, kuzeybatı doğrultusunda ise % 2’lik bir eğimle azalmaktadır. Şehrin düzlemselliğini batıda Serdivan, güneybatıda ise Erenler ilçeleri kısmen bozmaktadır. Şehrin bu yapısı şekil 5.1.’de verilmiştir (Önalp ve Bol, 1998).



Şekil 5.1. Adapazari'nin morfolojik görünümü (MTA, 1998).

Adapazari bölgesi yaklaşık $25 \times 40 \text{ km}^2$ 'lik bir havzada yer almaktadır. Havza eski göl yatağında kuruludur. Şehrin kuzey bölümünde Pilo-Pleistosen göl çökelleri, Sakarya Nehri ve kolları tarafından taşınmış kuarterner alüvyon zeminler mevcutken şehrin güney bölümünde ise sert ve sığ zeminler yer almaktadır. Ana kaya formasyonu sedimenter zeminler altında kuzey istikametinde alçalarak kent sınırları içerisinde 200 metre civarındaki derinliklere ulaşmaktadır. Kuarterner alüvyon birikintileri merceksi veya bant şeklinde düşük plastisiteli kil ve silt serileri içerir. Çakıl, kum, kil ve silt yer yer tek başlarına bazı yerlerde ise bunların farklı kombinasyonları şeklinde görülmektedir (Kutunis ve diğ., 2002). Şekil 5.2.'de şehrin jeomorfolojik yapısı verilmiştir.

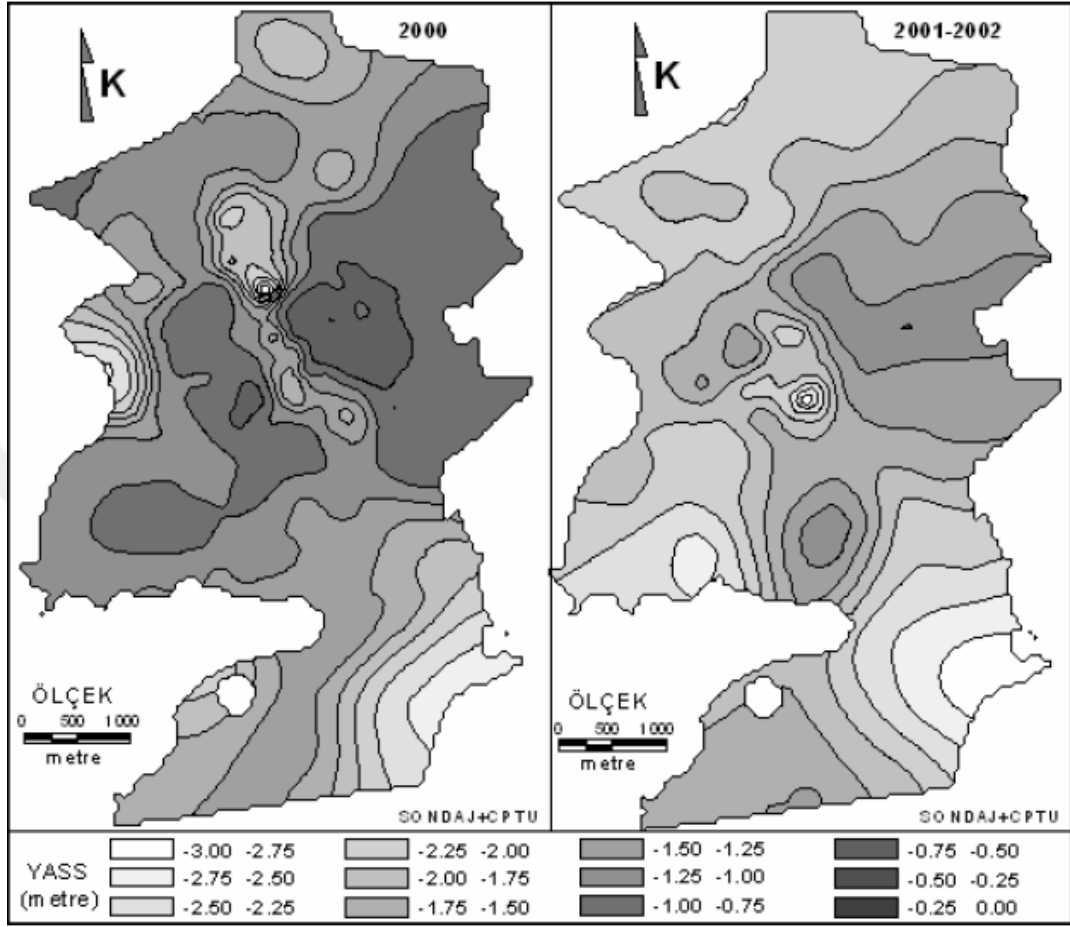


Şekil 5.2. Adapazarı ve çevresinin jeomorfolojik haritası (Kurt ve Duman, 2016).

Adapazarı ovasını kenar bölgelerinde yapılan sondajlarda ana kayaya ulaşılmışken kent merkezinde yapılan sondajlarda ana kayaya ulaşılamamıştır. DSİ'nin katkılarıyla Yenigün mahallesinde yapılan sondajlarda 200 metre derinliğe kadar inilmiş olmasına rağmen ana kayaya ulaşılamamıştır. Bununla birlikte DSİ tarafından kent merkezi ve çevresinde açılan ve derinlikleri 300 metreyi bulan sondajlarda Hızırtepe ve Maltepe etekleri dışında ana kayaya ulaşılamamıştır (Bol ve diğ., 2005).

Adapazarı bölgesinde yeraltı su seviyesi yüzeye yakındır. Şehrin bazı kesimlerinde yeraltı su seviyesi 1 ile 2 metre arasında bir seviyede bulunmaktadır. 1999 yılı öncesi yapılan 60 sondaj sonucunda ortalama yeraltı su seviyesi 1.56 metre olarak hesaplanmıştır aynı sondaj değerlerinden en düşük yeraltı su seviyesi Temmuz ayında 2.77 metre olarak bulunmuştur. 2000 yılında 488 ayrı sondajdan elde edilen verilere göre ortalama yeraltı su seviyesi 1.05 metreye kadar çıkmıştır. Aynı yıl içerisinde Mart ayında yeraltı su seviyesi 0.48 metre, Eylül ve Aralık aylarında ise 1.37 metre olarak ölçülmüştür. 2001 yılında ise ortalama yeraltı su seviyesi 1.79 metre ve Ağustos ayında ise 2.20 metrelere kadar inmiştir. 2002 yılında ortalama yeraltı su seviyesi 1.88 metre, yine Ağustos ayında 2.62 metre olarak ölçülmüştür. 2003 yılına gelindiğinde ise ortalama yeraltı su seviyesi 2.20 metre olarak ölçülmüştür (Bol ve diğ., 2005).

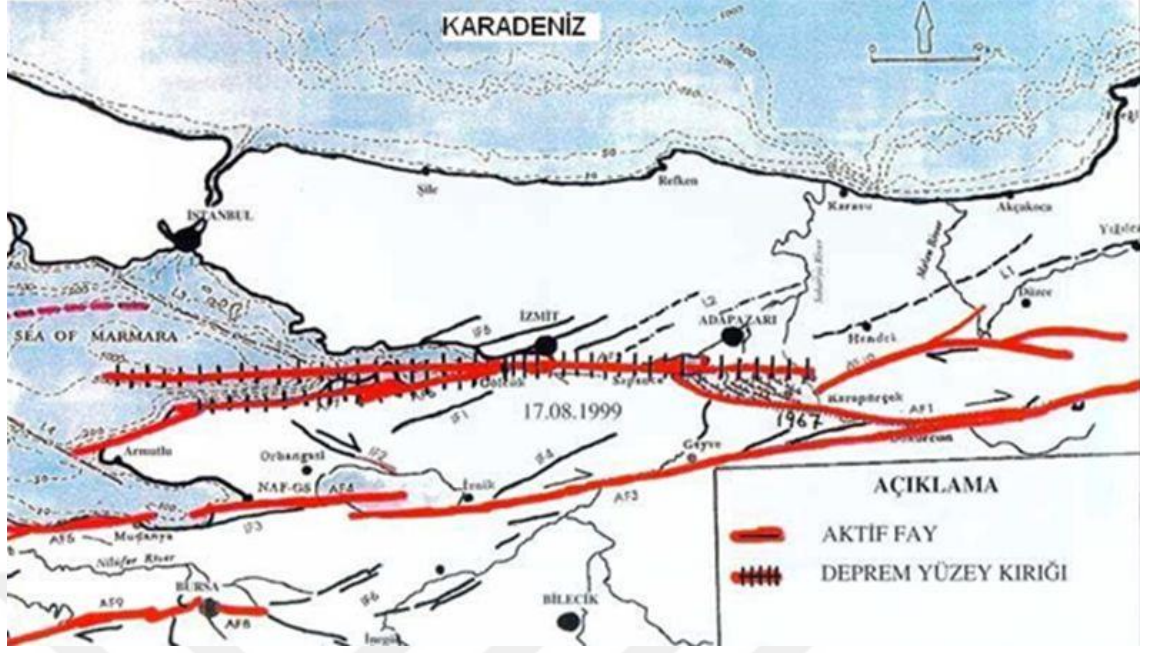
Şekil 5.3’de 2000 yılındaki yeraltı su seviyesi haritası ve 2001-2002 yıllarının ortalama yeraltı su seviyeleri haritası verilmiştir.



Şekil 5.3. Adapazarı bölgesinde 2000 yılında ve 2001-2002 yıllarında yeraltı su seviyesi haritaları (Bol ve diğ. 2005).

5.1.1. Adapazarı bölgesinin depremselliği

Adapazarı ve çevresini etkileyen Kuzey Anadolu Fay (KAF) Kuşağı sismik olarak dünyanın en önemli aktif faylarından biri olup doğrultu atılımlıdır. KAF’ın batı kolu Gerede, Bolu ve Mudurnu Nehri vadisi boyunca Dokurcun’a kadar tek hat olarak uzanır. Dokurcun’ dan sonra iki ana kola ayrılan bu kuşak güneyde Geyve, Pamukova, İznik, Gemlik, Bursa, Manyas, Yenice, Gönen üzerinden Ege Denizi’ ne; kuzeyde ise Arifiye, Sapanca, İzmit Körfezi, Marmara Denizi ve Tekirdağ üzerinden Ege Denizi’ne ulaşır. Şekil 5.4.’te Adapazarı bölgesinden geçen aktif fay hatları gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Adapazari bölgesinin aktif fay haritası .

1943 yılından günümüze Adapazari genelini etkileyen küçükü büyüklü birçok deprem gerçekleşmiştir. 1943 yılında $M=6.6$ büyüklüğünde Hendek depremi, 1957 yılında $M=7.1$ büyüklüğünde Abant depremi, 1967 yılında $M=6.8$ büyüklüğünde Adapazari-Mudurnu depremi, 1999 yılında $M=7.4$ büyüklüğünde Marmara depremi ve 1999 yılında $M=7.2$ büyüklüğünde Düzce depremi Adapazari ve çevresinde yaşanan büyük depremlerdir. 1967 Adapazari-Mudurnu ve 1999 Marmara depremleri bölgede çok şiddetli hissedilmiş ve büyük ölçüde can ve mal kayıplarına yol açmıştır (Kutanis ve diğ., 2002). Şekil 5.5.'de bölgenin deprem haritası yer almaktadır.



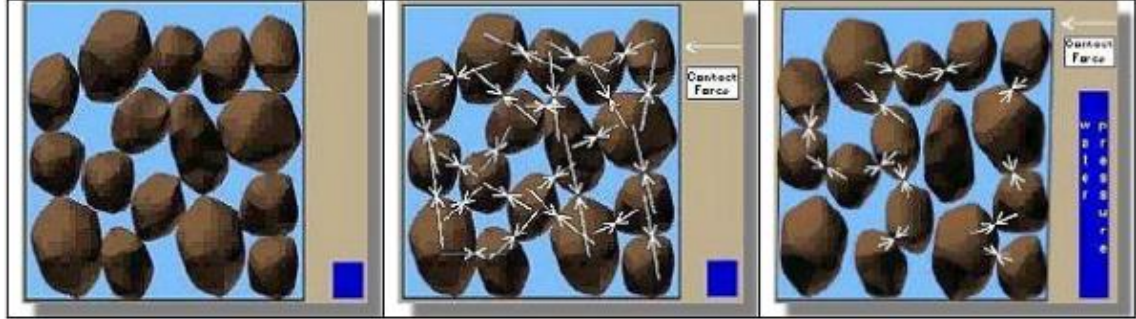
Şekil 5.5. Adapazarı bölgesinin deprem haritası.

Akarsuların taşıdığı malzemelerin üç boyutlu sedimantasyonu sonucunda bölgedeki zemin profili ve zemin katmanları düşeyde ve yatayda çok kısa mesafelerde değişkenlik gösterirler. Bu durum sonucunda, deprem sırasında bu bölgelerde zemin sıvılaşması ve yumuşaması gibi zemin problemleri gözlenebilir (Durgunoğlu ve diğ., 2000)

5.1.2. Adapazarı bölgesinin sıvılaşma özellikleri

Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesi altındaki zemin katmanlarında geçici olarak mukavemet kayıpları olması zeminin katı ortam yerine viskoz bir sıvı gibi davranmasıdır. Özellikle kil bulunmayan kum, silt ve bazen de çakıl katmanları sıvılaşma potansiyeline sahiptir. Deprem sırasında oluşan dalgalar suya doygun daneli katmanlardan geçerken

dane yerleşim düzeni değişir ve bu durum Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Bu durum da gevşek olarak bulunan danelerin yeniden yerleşmesine ve sıkışmasına neden olur. Yerleşme sırasında boşluk suyu basıncı da artar.



Şekil 5.6. Sıvılaşma sırasında daneciklerin hareketi (Alparslan, 2013).

Boşluk suyu basıncı üstteki katmanların ağırlığına yakın bir seviyeye ulaşınca bu katmanlar sıvı gibi davranırlar ve bu durumda sıvılaşma olayı ortaya çıkar. Sıvılaşma sonucu büyük deformasyonlar sonucunda, taşıma gücü azalır ve zeminde mevcut yapılarda batma veya hafif yapılarda ise yüzme eğilimi görülebilir. Sıvılaşarak kayma dayanımı kaybolan zeminde yön değiştiren küçük kayma gerilmeleri büyük şekil değiştirmelerine neden olabilir ve yapıların göçmesine varan hasarlara yol açabilir. Bir zeminde sıvılaşma potansiyeli, esas olarak gevşek bir yerleşimde olması, daneler arasında bağ içindeki kil miktarına ve boşluk suyunun drenajının engellenmesine bağlıdır. Sıvılaşan ortamlarda oluşan deformasyonlar ve deplasmanlar sıvılaşabilir katma kalınlığı, yüzey eğimi ve yükleme durumundan etkilenirler. Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yerlerde gevşek kum ve siltlerin sıvılaşma potansiyeli yüksektir. Zeminin sıvılaşması sonucu onarımı zor olan temiz ve pis su boruları ile doğalgaz borularında hasarlar ve kaçaqlara neden olabilir (Celep 2000).

Adapazarı bölgesinde yapılan koni penetrasyon (CPT) ve SPTN deneylerinde yüksek değer veren kumlardan daha fazla siltlerde sıvılaşma gözlemlenmiştir. Siltlerin sıvılaşması sorgulanırken plastisiteyi göz önüne alan kriterler değerlendirilmelidir (Bol ve diğ., 2007).

Önalp ve Arel yaptıkları çalışmayla Adapazarı zeminlerinde siltlerde sıvılaşmanın oluştuğu bölgeleri inceleyerek bölgeye özgü kriterler geliştirmişlerdir. Yaptıkları

çalışmanın sonucunda Adapazarı'ndaki siltli zeminler şu şartlarda sıvılaştığını belirtmişlerdir:

1. TS 1500/2000 'e göre siltler ML sınıfında olmalı,
2. Sıvılık indisi $I_L < 1$, yani doğal su muhtevasının likit limite eşit veya yüksek olmalı,
3. Likit limit (w_L) değeri 30'dan küçük olmalı,
4. İçerdiği kil boyutu danelerin ($D \leq 0,002\text{mm}$) %15'ten az olmalı (Önalp ve Arel 2002)

Adapazarı zeminlerinde yapılan geniş çaplı araştırma sonuçlarına göre yeraltı su seviyesinin altındaki siltli zeminlerde ve magnitüd olarak 7'den büyük depremlerde sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için:

- a. Likit limit değerinin %33' den az,
- b. Sıvılık indisinin (I_L) 0,9'dan büyük,
- c. Kil içeriğinin %10'dan az,
- d. Ortalama dane boyutunun 0,02 mm'den büyük olması gerekmektedir (Bol ve diğerleri, 2006).



Şekil 5.7. 17 Ağustos 1999 depreminde Adapazarı'nda oluşan sıvılaşma hasarı (www.jeofizik.org.tr).

Şekil 5.7.'de 17 Ağustos 1999 depreminde Adapazarı zeminlerinde sıvılaşmadan kaynaklı oluşan hasarlara bir örnek yer almaktadır. Deprem sırasında oluşan hasarlar faya yakınlık ile doğrusal olarak artmaktadır. Hasarların şehrin ana kaya üzerindeki bölümünde çok az olduğu, ana kaya çevresindeki alüvyonal düzlüklerde ise orta ve yüksek plastisiteli killerde şehrin diğer kısımlarına oranla daha az hasar olduğu, şehir merkezine ise yıkımların arttığı görülmüştür. Adapazarı zeminlerinde sıvılaşma, taşıma gücü kaybı görülen bölgeler de diğer bölgelerde oluşan hasar oranının bir farkının olmadığı, sadece hasarın çeşidinin farklı olduğu görülmüştür (Bol ve diğ., 2007).



BÖLÜM 6. NÜMERİK MODELİN OLUŞTURULMASI

Günümüzde giderek önemi artan nümerik modellemeler maddi yetersizliği, uygulama zorluğu olan projelerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Nümerik modellemeler gelişen bilgisayar teknolojisiyle zaman açısından karmaşık problemlerin çözümünü de daha hızlı bir şekilde çözümlenmektedir. Bu çalışmada ise sıvılaştan zeminlerde yeraltı yapısı olarak tünel nümerik olarak modellenmiş ve tünelin sıvılaştan zemin içerisindeki performansı incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan nümerik modellerin hazırlanması için bir sonlu fark programı olan ve iki boyutlu analiz programı olan FLAC 2D kullanılmıştır. FLAC kaya mekaniği ve zemin mekaniği problemlerinin çözümü için geliştirilmiş bir programdır. FLAC dinamik analizler sırasında düzlemsel gerilme ve eksenel deformasyonlardan yararlanır. Dinamik analizler sırasında modele uygulanan deprem hareketi gibi sarsıntıları ile oluşan zemin-yapı etkileşimi FLAC tarafından incelenebilir. Dinamik analizler sırasında yeraltı suyu hareketine izin verilerek sıvılaştırma ve zamana bağlı boşluk suyu basıncı değişimlerinin değerlendirilmesine olanak sağlar. FLAC sağladığı modelleme seçenekleri içinde özellikle sıvılaştırmanın modellenenebilmesi açısından bu çalışmada tercih edilmiştir.

Nümerik model aşamalarında, öncelikli olarak kullanılacak boyutlar planlanmaya çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan boyutlar Tablo 6.1’de verilmiştir. Bu boyutlar için statik ve dinamik analizler yapılmıştır.

Tablo 6.1. Çalışmada kullanılan tünel boyutları.

Derinlik (m)	Çap (m)	Kalınlık (cm)
10	4	30
10	4	50
10	4	100
10	5	30
10	5	100
10	6	30

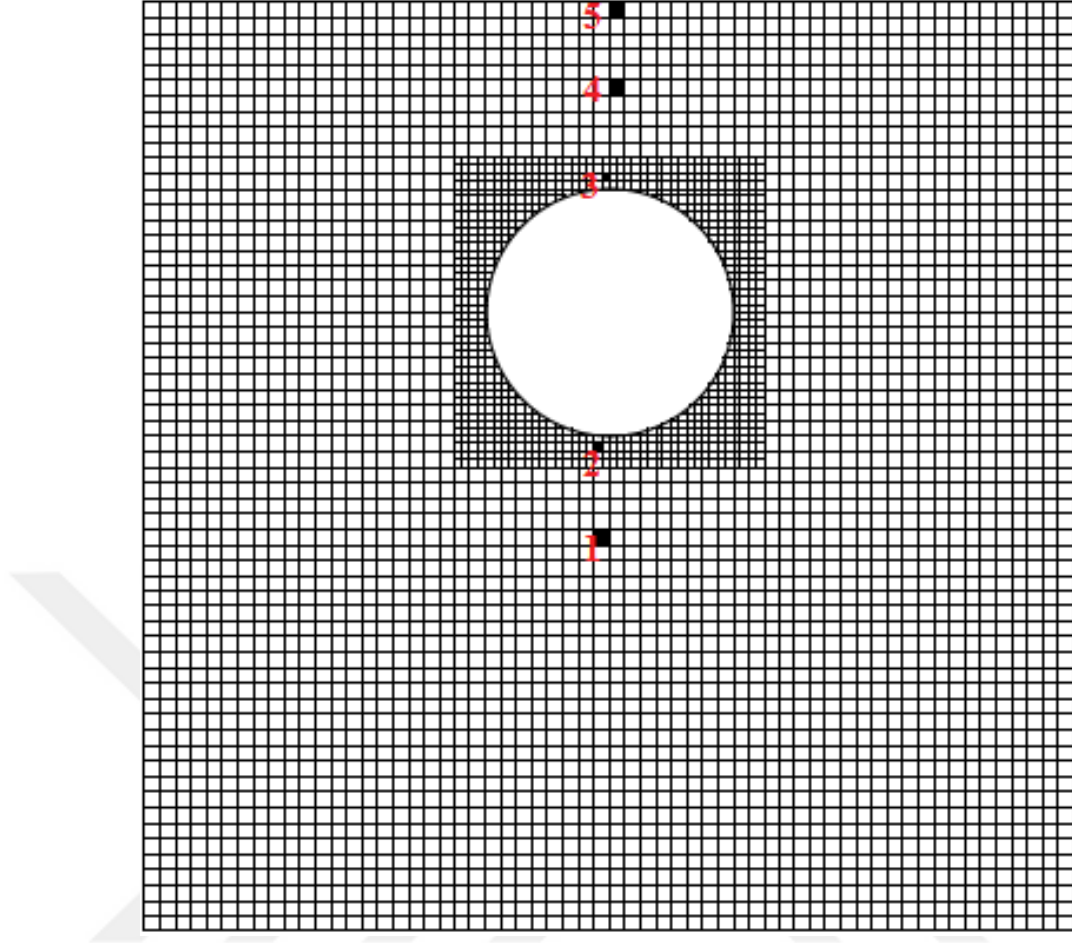
Tablo 6.1.(Devam).

Derinlik	Çap	Kalınlık
(m)	(m)	(cm)
10	6	100
15	4	30
15	4	50
15	4	100
15	5	30
15	5	50
15	5	100
15	6	30
15	6	50
15	6	100

6.1. Nümerik Modelin Boyutlandırılması

Nümerik modelin boyutları analiz sonuçlarının doğruluğu açısından büyük öneme sahiptir. Modelin oluşturulması sırasında boyutların büyük olması daha gerçekçi sonuçlar çıkmasını sağlarken, modelin analiz süresini de uzatmaktadır. Analiz süresinin uzun olması ise tekrarlı analizlerde çalışmanın süresini etkilediği için büyük modeller çok makul değildir. Boyutun küçültülmesi analiz süresini kısalmasını sağlarken, özellikle dinamik analizlerde oluşan dalgaların yansımaya yol açmaktadır. Nümerik modelleme sırasında modelin boyutlarının belirlenmesi çok önemli bir yer sahiptir. Bu çalışmada kullanılan modelin boyutlarında ise Vural'ın çalışmasından yararlanılmıştır.

Nümerik modelde boyutların belirlenmesinin sonucunda kullanılan model üzerinde incelenen noktalar Şekil 6.1.'de verilmiştir.

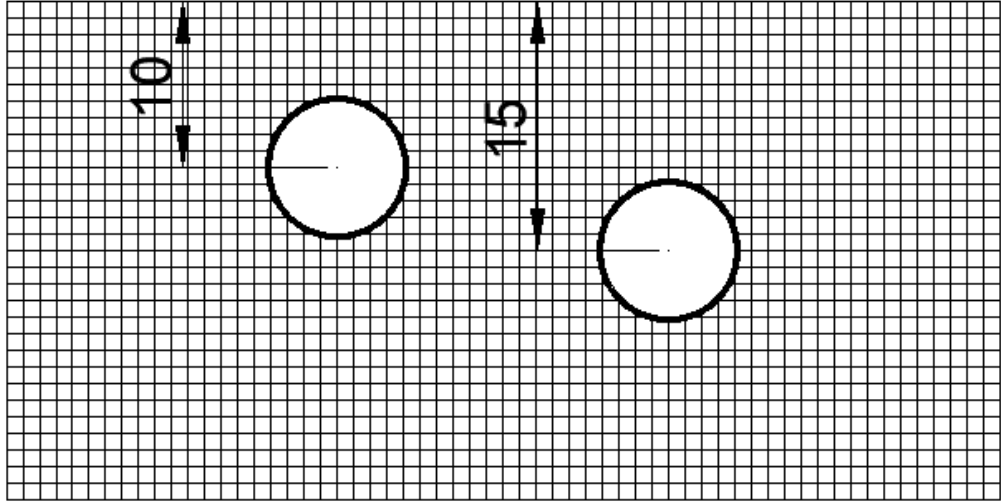


Şekil 6.1. Nümerik modelde incelenen noktalar.

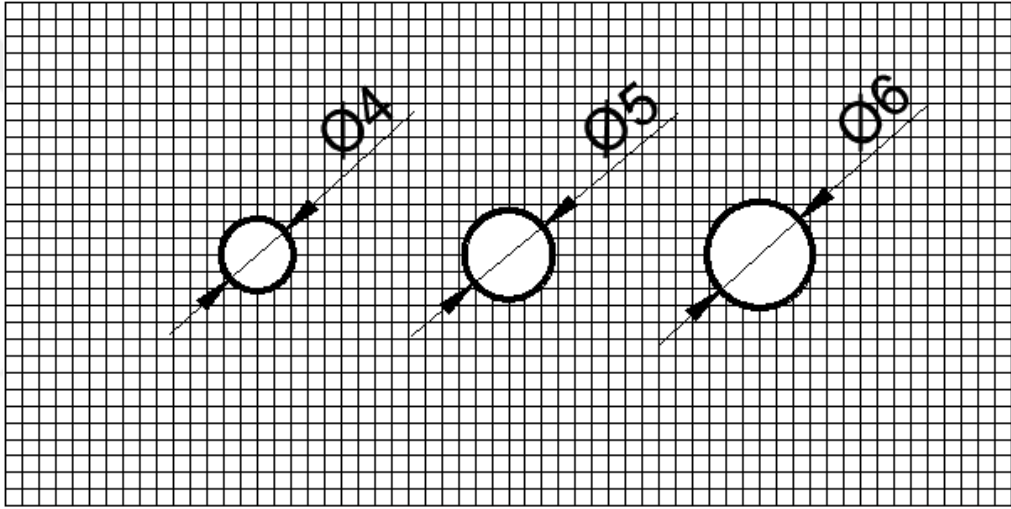
Nümerik modelde ele alınan noktalar ;

1. Tünel altı nokta
2. Tünel çeperi alt nokta
3. Tünel çeperi üst nokta
4. Tünel üstü nokta
5. Yüzey , olarak adlandırılmıştır.

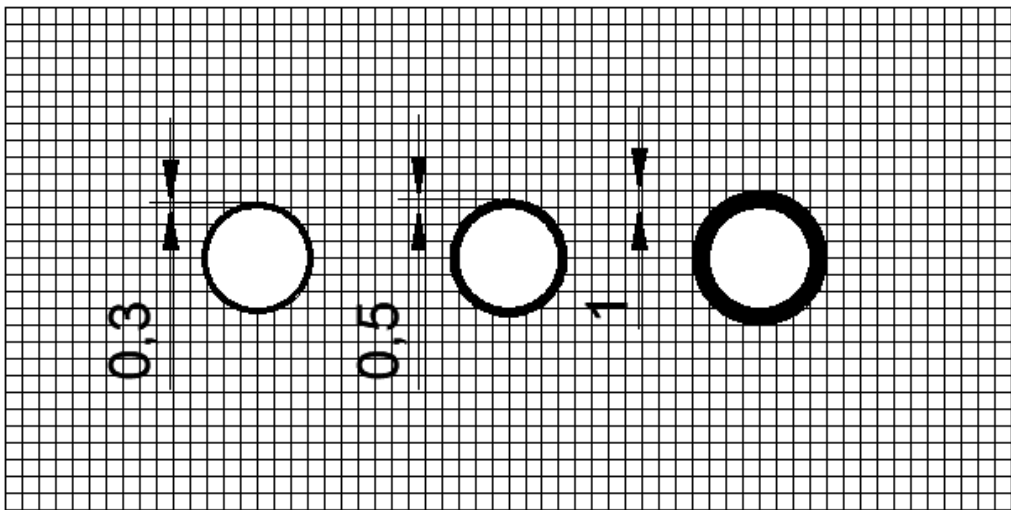
Yaptığı çalışmalar sonucunda model boyutları 30 x 30 m olarak tercih edilmiştir. Şekil 6.2.'de kullanılan tünel derinlikleri, Şekil 6.3.'te kullanılan tünel çapları ve Şekil 6.3.'de kullanılan tünel çapları verilmiştir.



Şekil 6.2. Tünel derinlikleri (Birimler metre).

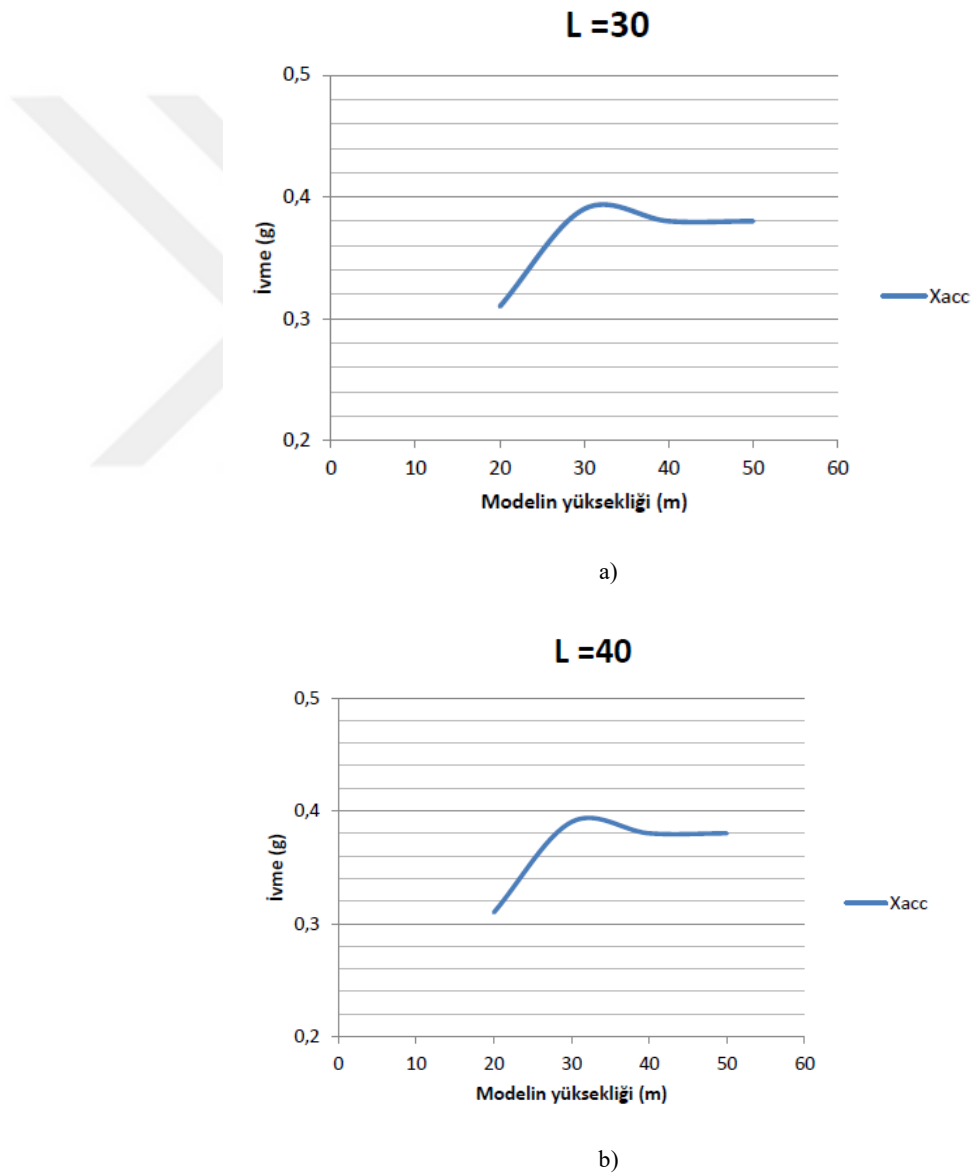


Şekil 6.3. Tünel çapları (Birimler metre).



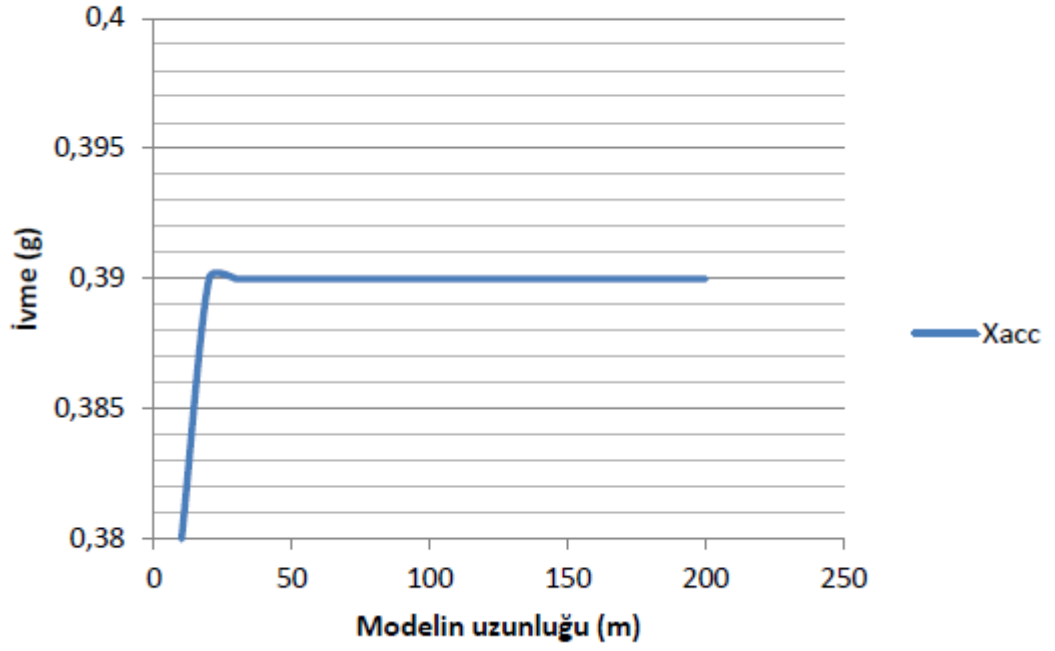
Şekil 6.4. Tünel Kalınlıkları (Birimler metre).

Vural yaptığı çalışmada modelin boyutlarını belirlemek için boyutları farklı olan modellere 0.3 g genliğinde harmonik yük uygulamıştır ve bu harmonik yük altında modelin yatay ve düşey uzunlukları belirlenmiştir. Kurulan matematik modelin yatay uzunluğu sabit olarak alındığında düşey uzunluğun değişiminde ivme değerlerinde değişim olduğunun gözlemlemiştir (Şekil 6.5). Modelin düşey uzunluğu sabit olarak alındığında ise yatay uzunluğunda ki ivme değerlerinde değişimler gözlemlemiştir (Şekil 6.6). Bu çalışmaların sonucunda yatay ve düşey uzunluklarda 30 m'den sonra değişim gözlemlemiştir (Vural, 2012) .



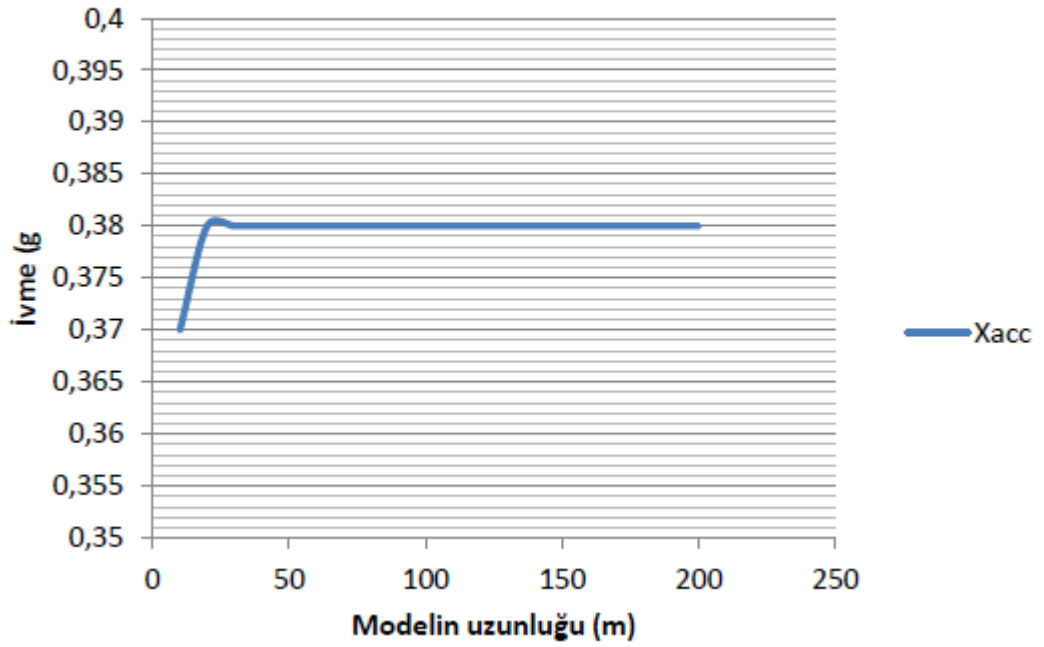
Şekil 6.5. Modelin yüksekliğe etkisi (Vural, 2012).

H=30



a)

H=40

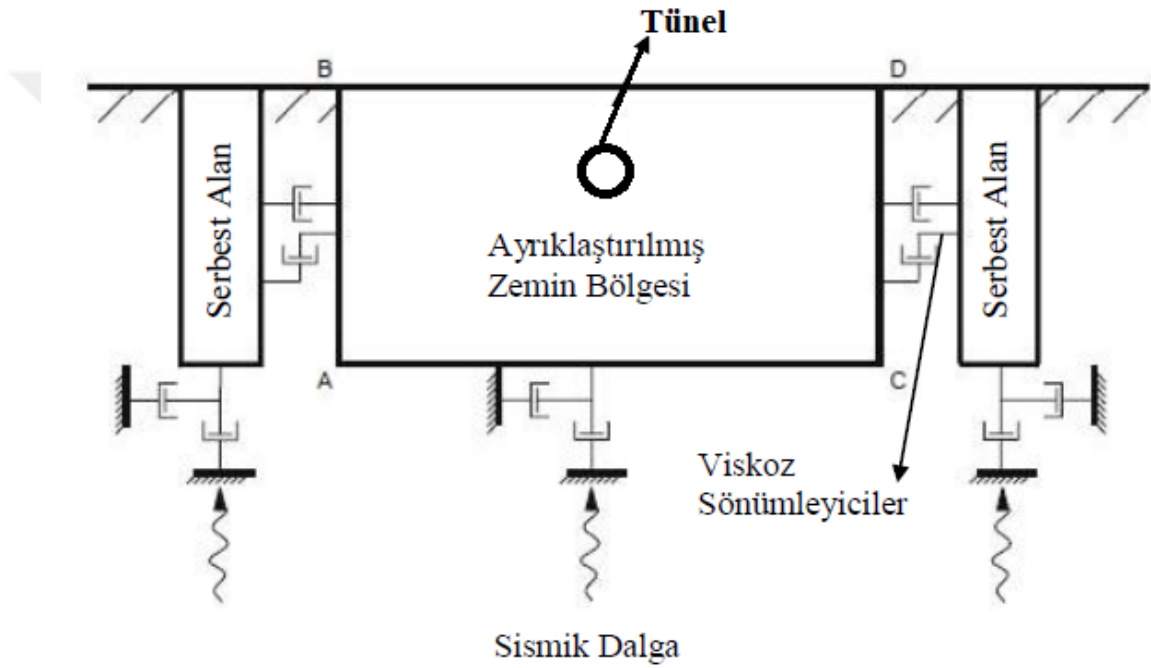


b)

Şekil 6.6. Modelin uzunluğu etkisi (Vural, 2012).

6.2. Sınır Şartları

Nümerik modelin oluşturulmasında büyük önemi olan konulardan biri de sınır şartlarının belirlenmesidir. Modellerde yansımaların engellenmesi analiz sonuçlarının doğruluğunu etkilemektedir. FLAC 2D’de zeminlerdeki yansımaların önlenmesi için sönümleyici sınır koşulları kullanılmaktadır. Şekil 6.7.’de kullanılan sönümleyicilerinde tanımlandığı model verilmiştir. Bu sönümleyici sınır koşulları özellikle dinamik analizlerde daha küçük boyutların kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.



Şekil 6.7. Sınır şartları (Vural 2012’den düzenlenmiştir.).

6.3. Zemin Özellikleri

Çalışmada oluşturulan modellerin boyutları 30 m x 30 m olarak seçilmiştir. Seçilen boyutlar için Adapazarı bölgesinden alınmış sondaj verileri kullanılarak hesaplanan değerler kullanılmıştır. Kullanılan zemin ile ilgili parametreler Tablo 6.2.’de verilmiştir. FLAC 2D programında analizler için gereken diğer parametreler ise aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$G = \frac{E}{(1+\nu)2} \quad (6.1)$$

$$K = \frac{E}{(1-2\nu)^3} \quad (6.2)$$

Burada; G kayma modülünü, K Bulk modülünü, E elastisite modülünü ve ν poisson oranını ifade etmektedir.

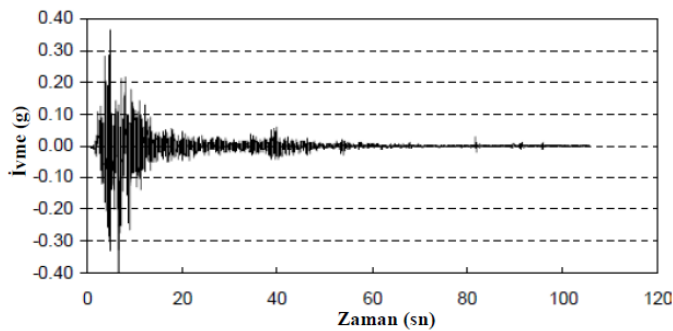
Tablo 6.2. Çalışmada kullanılan zemin özellikleri.

Zemin Sınıfı	Tabaka kalınlığı (m)	SPT	γ (kN/m ³)	ν	E (kN/m ²)	K (kN/m ²)	G (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ
CH	10	15	18	0.35	8100	9000	4200	40	1
SC	10	18	18	0.33	5600	5500	2600	1	30
SM	10	50	19	0.30	84000	70000	14800	1	39

6.4. Nümerik Modelde Kullanılan Deprem Kayıtları

6.4.1. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi

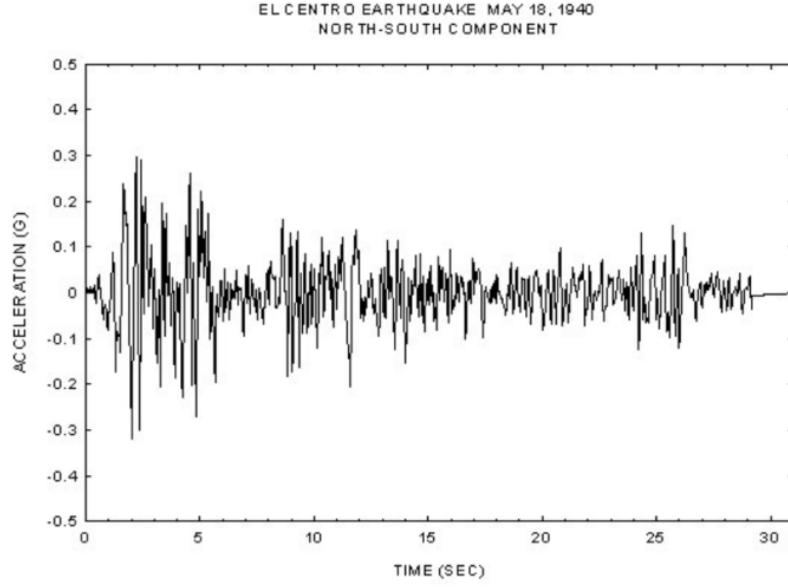
17 Ağustos 1999’ da Kocaeli’nde meydana gelen deprem il merkezinin 12 km güney doğusunda yer alan Gölcük bölgesinde yerel saatle 03:01’de meydana gelmiştir. Deprem, Kuzey Anadolu Fay (KAF) hattı üzerinde gerçekleşmiş olup Marmara bölgesinin genelinde hissedilmiştir. Deprem yüzeyden 15.9 km derinlikte meydana gelmiştir. Depremin magitüdü 7.4 olarak ölçülmüştür (Yılmaz, 2006). Depremin ivme –zaman grafiği Şekil 6.8.’de yer almaktadır. Çalışma için Sakarya istasyonu verileri kullanılmıştır.



Şekil 6.8. Kocaeli depreminin ivme-zaman grafiği.

6.4.2. 18 Mayıs 1940 El Centro depremi

18 Mayıs 1940 tarihinde Güney Kaliforniya’da 21:30 civarında meydana gelmiştir. Depremden ABD ve Meksika da etkilenmiştir. Depremin derinliği 8.8 km olup depremin büyüklüğü ise 7.1 olarak ölçülmüştür (www.safeyowls.com). Depremin ivme –zaman grafiği Şekil 6.9.’da yer almaktadır.



Şekil 6.9. El Centro depreminin ivme-zaman grafiği.

BÖLÜM 7. ANALİZ SONUÇLARI DEĞERLENDİRİLMESİ

Oluşturulan modellerde zemin Mohr-Coulomb özelliğiyle tanımlanmış, farklı derinlik, çap ve kalınlıktaki tüneller için farklı deprem kayıtları altında dinamik analizleri yürütülmüştür. Kurulan modeller ve modellere verilen isimler Tablo 7.1.'de yer almaktadır.

Tablo 7.1. Çalışmada kullanılan tünel boyutları.

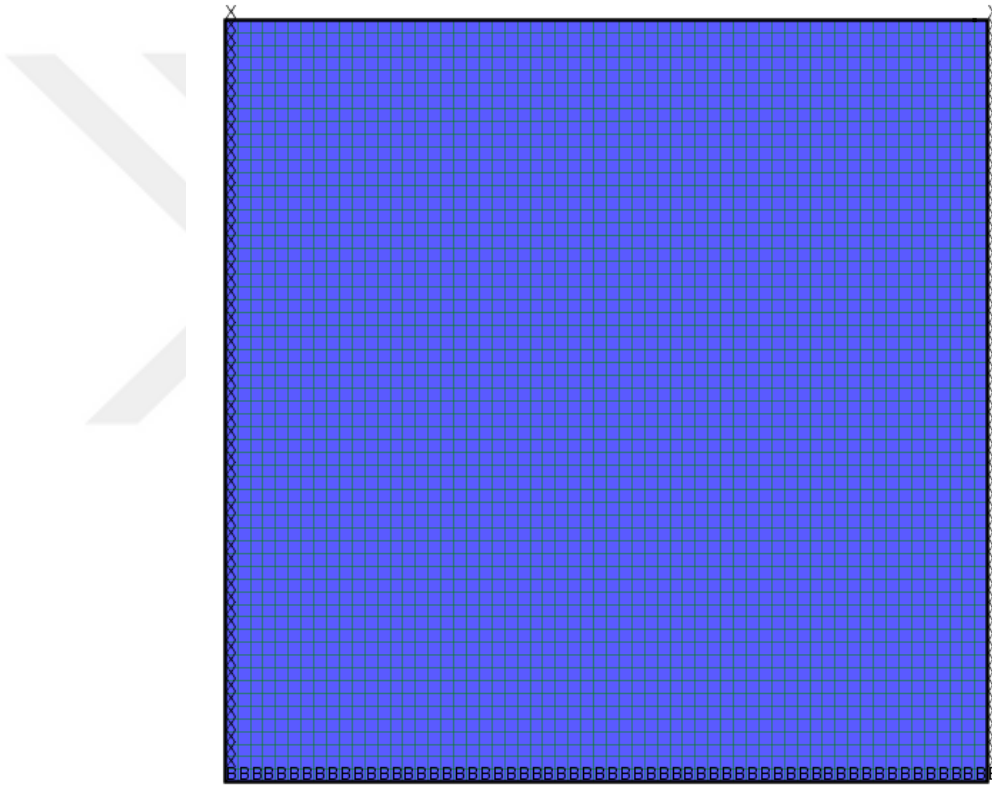
Derinlik (m)	Çap (m)	Kalınlık (cm)	İsim
10	4	30	dck1
10	4	50	dck2
10	4	100	dck3
10	5	30	dck4
10	5	50	dck5
10	5	100	dck6
10	6	30	dck7
10	6	50	dck8
10	6	100	dck9
15	4	30	dck10
15	4	50	dck11
15	4	100	dck12
15	5	30	dck13
15	5	50	dck14
15	5	100	dck15
15	6	30	dck16
15	6	50	dck17
15	6	100	dck18

Analizler sırasında modelle uygulanan yükler kilo Newton (kN) ve metre (m) olarak verilmiş ve sonuçlar da bu birimler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirilirken kullanılan birimler Tablo 7.2 'de verilmiştir.

Tablo 7.2. Kullanılan birimler.

Parametre	Birim
Birim Hacim Ağırlık	kN/m ³
Deplasman	m
İvme	m/sn ²
Gerilme	kN/m ²
Hız	m/sn
Boşluk Suyu Basıncı	kN/m ²

Şekil 7.1.'de FLAC ile kurulan model verilmiştir. Modelde mesh aralıkları 50 cm x 50 cm olarak alınmıştır.



Şekil 7.1. FLAC 2D'de kurulan nümerik model.

FLAC 2D ile kurulan modellerde öncelikli olarak statik analizler yapılmıştır. Statik durumları incelenen modellerin analiz sonuçlarında oluşan düşey ve yatay deplasmanlar ise Tablo 7.3.' de verilmiştir. Analiz sonuçları yüzey için ele alınmıştır. Sonuçlara bakıldığında sığ tünellerde tünel çapı artığında oluşan düşey deplasmanlar artarken, derin tünellerde tünel çapı artıkça oluşan düşey deplasman azalmaktadır. Yatay deplasmanlar da ise her durumda çap artıkça azalma olmuştur.

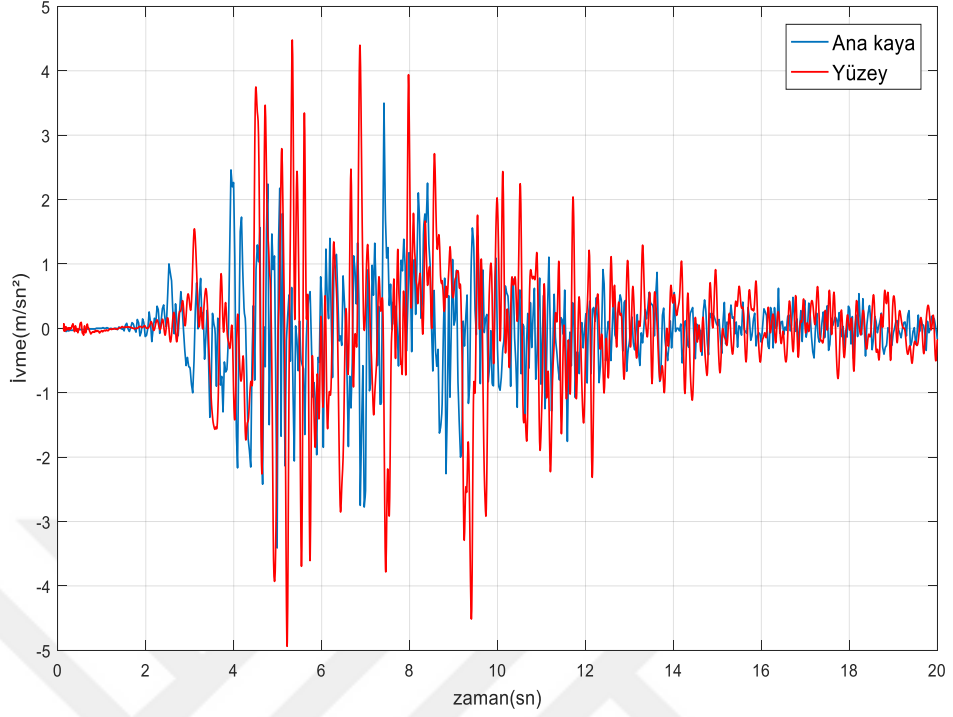
Tablo 7.3. Statik analiz sonuçları.

	Düsey deplasman (cm)	Yatay deplasman (cm)
Tünelsiz	2.8	0.0015
dck1	2.2	0.017
dck2	2.0	0.015
dck3	1.8	0.012
dck4	2.3	0.021
dck5	2.1	0.019
dck6	2.0	0.018
dck7	2.5	0.022
dck8	2.3	0.020
dck9	2.1	0.018
dck10	3.5	0.012
dck11	3.2	0.011
dck12	3.1	0.010
dck13	3.0	0.008
dck14	2.8	0.007
dck15	2.5	0.005
dck16	2.8	0.004
dck17	2.6	0.002
dck18	2.5	0.001

7.1. Mohr-Coulomb Modeli Analiz Sonuçları

Mohr-Coulomb modelde zeminlerin davranışları ve zemin özellikleri daha gerçekçi olarak tanımlanan bilmektedir. Bu bölümde ise Mohr-Coulomb yenilme kriterlerine göre dinamik analizler yapılmıştır.

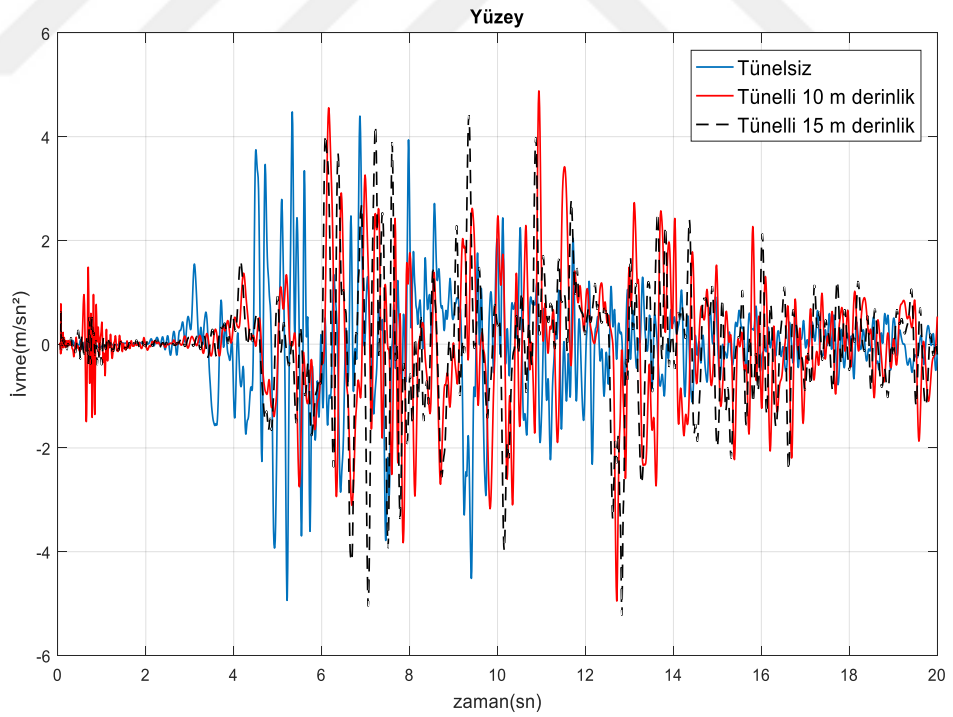
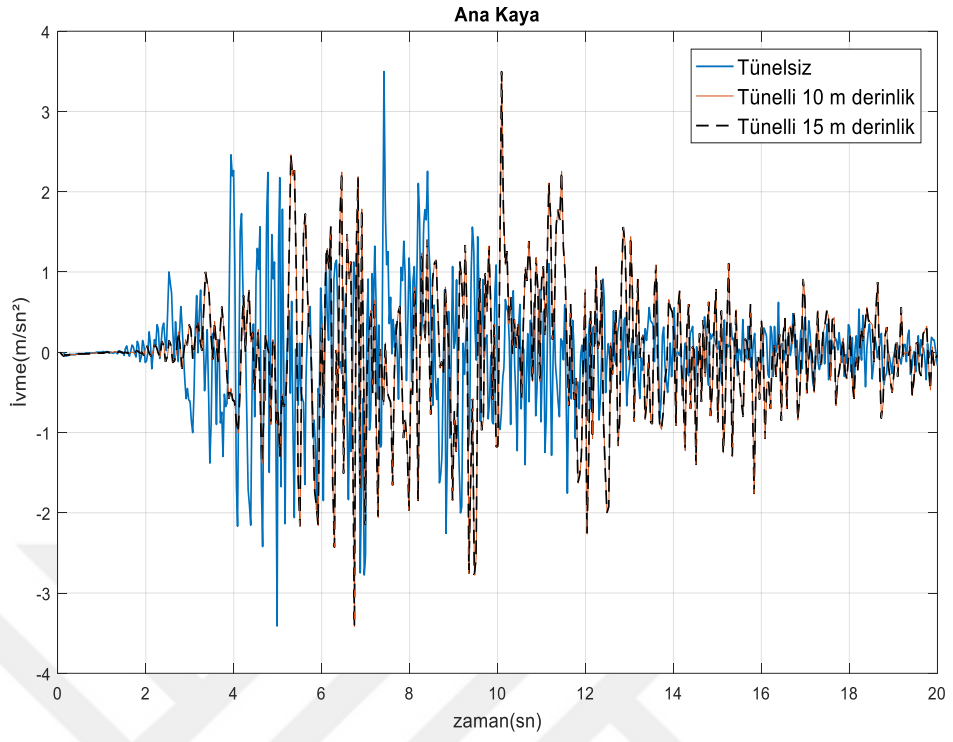
.Mohr-Coulomb modelinde kullanılan deprem ivmeleri ana kayada 3.6 m/sn^2 iken yüzeye gelindiğinde bu değer 4.7 m/sn^2 değerine ulaşmıştır (Şekil 7.2.). Bu değer artışı zeminlerin dalgaları büyütme etkisi göz önünde bulundurulduğunda ve yerel zemin için önerilen zemin büyütmeleleriyle paralellik göstermektedir.



Şekil 7.2. Tünelsiz modelde ivme kayıttı değişimi.

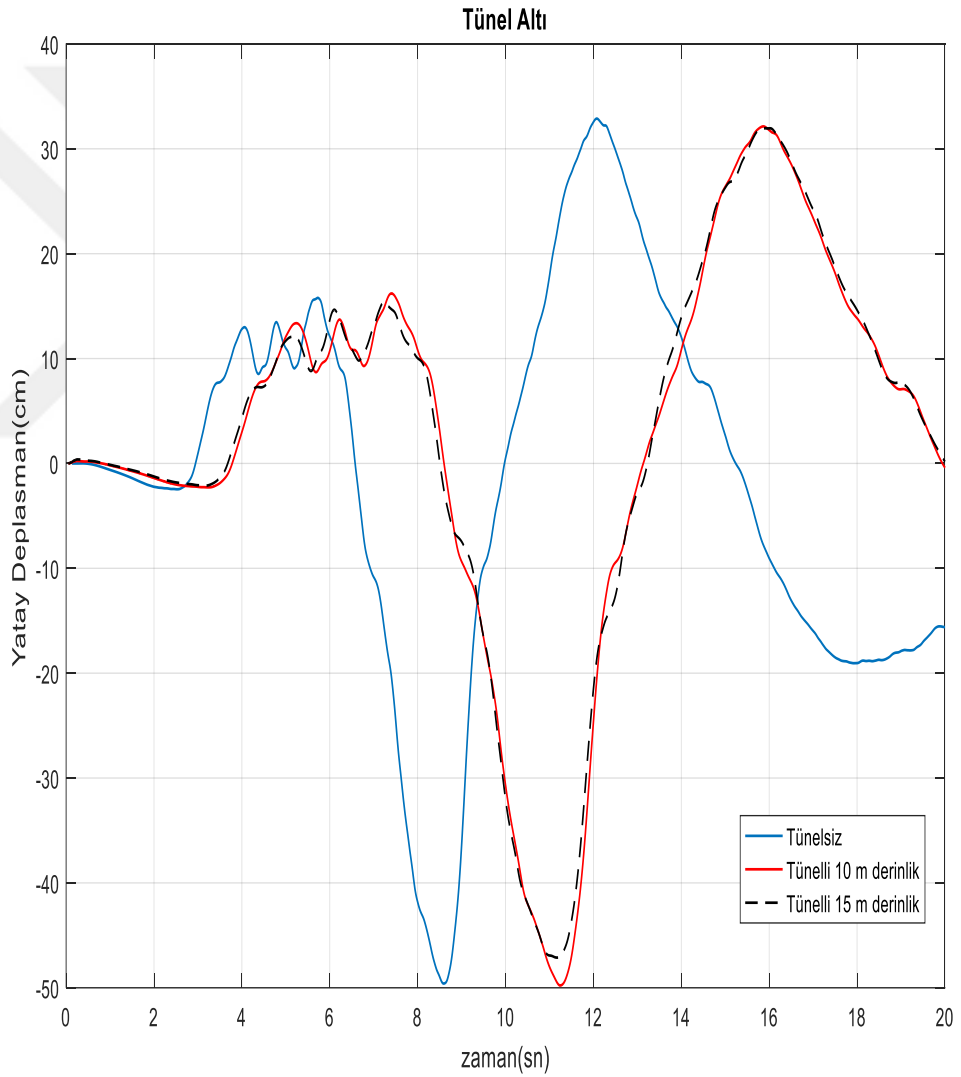
7.1.1 Farklı derinlikteki tünellerin Mohr-Coulomb analiz sonuçları

Tüneller zemin içerisinde modellenirken öncelikli olarak 10 m derinliğe ve daha sonra 15 m derinliğe yerleştirilmiştir. Mohr-Coulomb modelde bu bölümde derinliğin etkisi incelenmiştir. Şekil 7.3.'de ivme değerlerinde görüldüğü gibi ana kayada derinlikle bir değişim görülmezken, yüzeyde ise ivme değeri sığ tünellerde derin tünellere göre daha yüksektir.



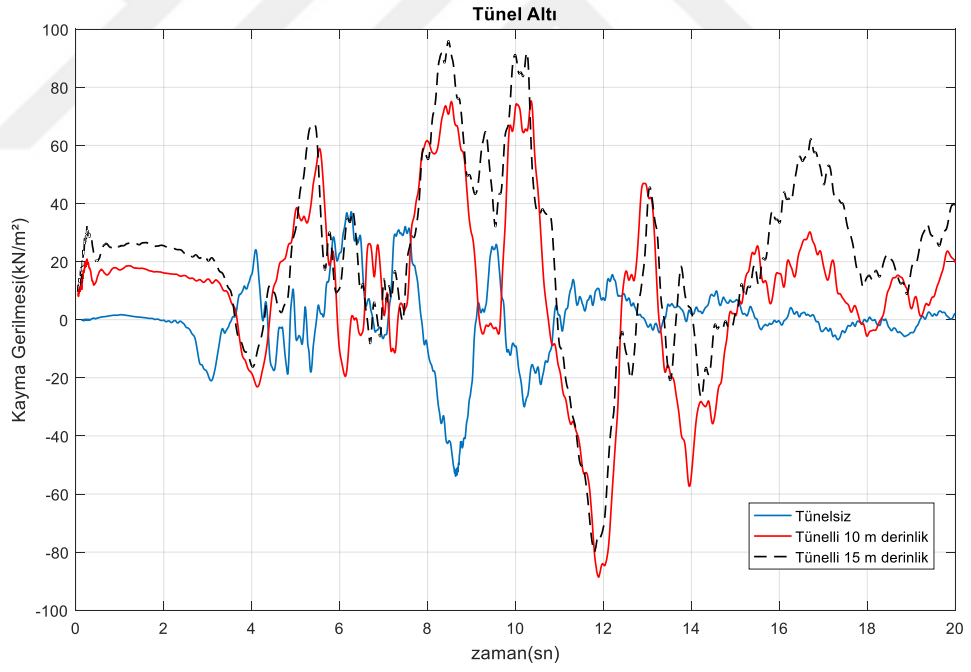
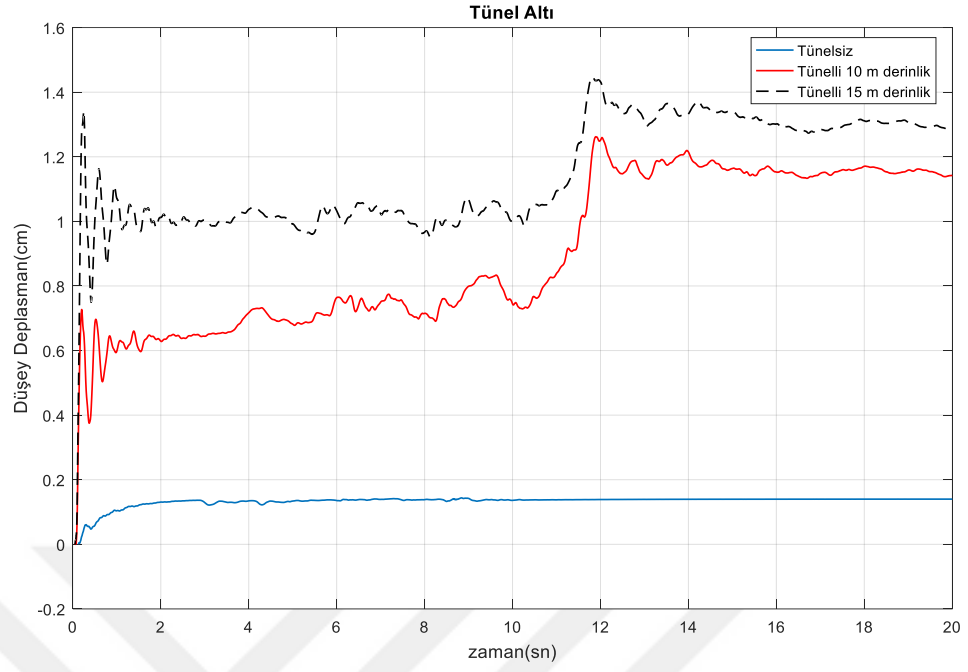
Şekil 7.3. Mohr-Coulomb model ivme kaydı değerleri a) ana kaya b) yüzey.

Şekil 7.4.'te tünel altı noktada oluşan yatay deplasman, düşey deplasman, kayma gerilmesi ve hız sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre yatay deplasman tünelsiz ve tünelli modellerde toplam 70 cm civarındadır. Düşey deplasman ise tünelsiz modelde 0,2 cm iken 10 m derinlikteki tünelde 1 cm, 15 m derinlikteki tünelde 1.3 cm olmuştur. Kayma gerilmeleri yaklaşık olarak tünelsiz modelde 50 kN/m²'ye ulaşmışken 10 m derinlikteki tünelde 80 kN/m², 15 m derinlikteki tünelde 95 kN/m² 'ye ulaşmıştır. Hız değerleri ise her üç model için de deprem sonunda azalma göstermiştir.

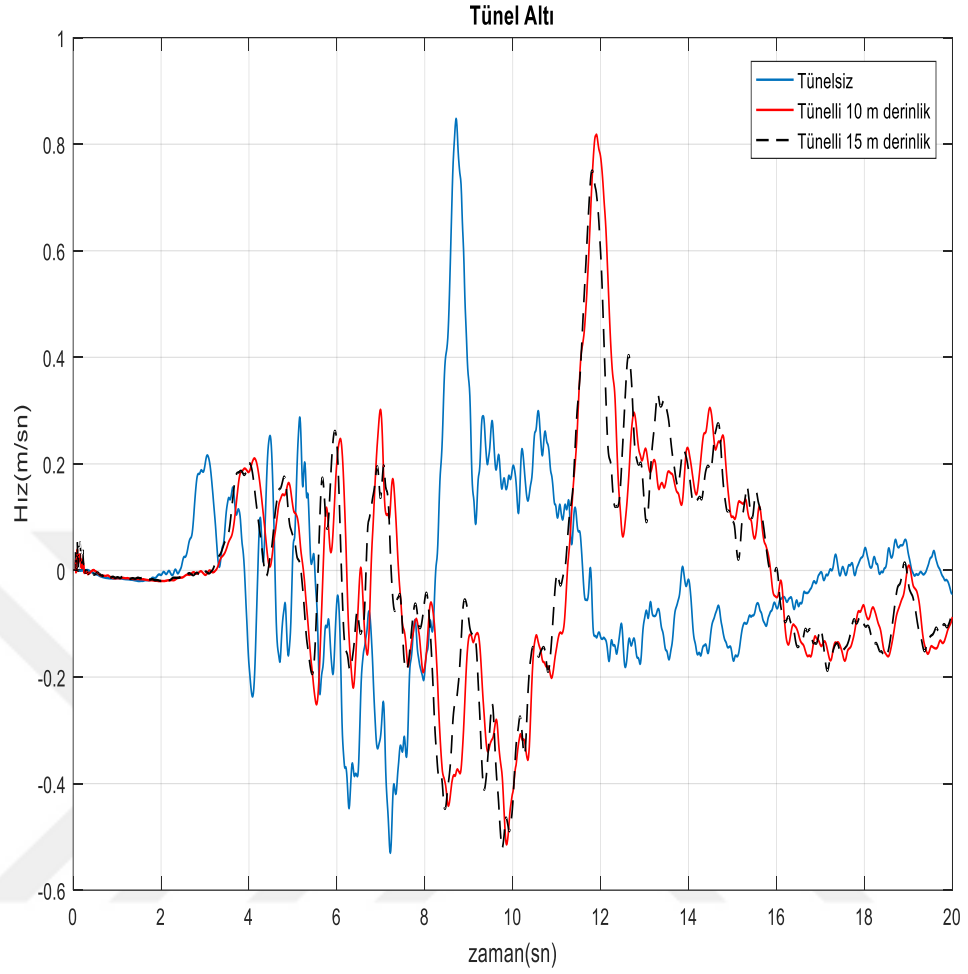


a)

Şekil 7.4. Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.



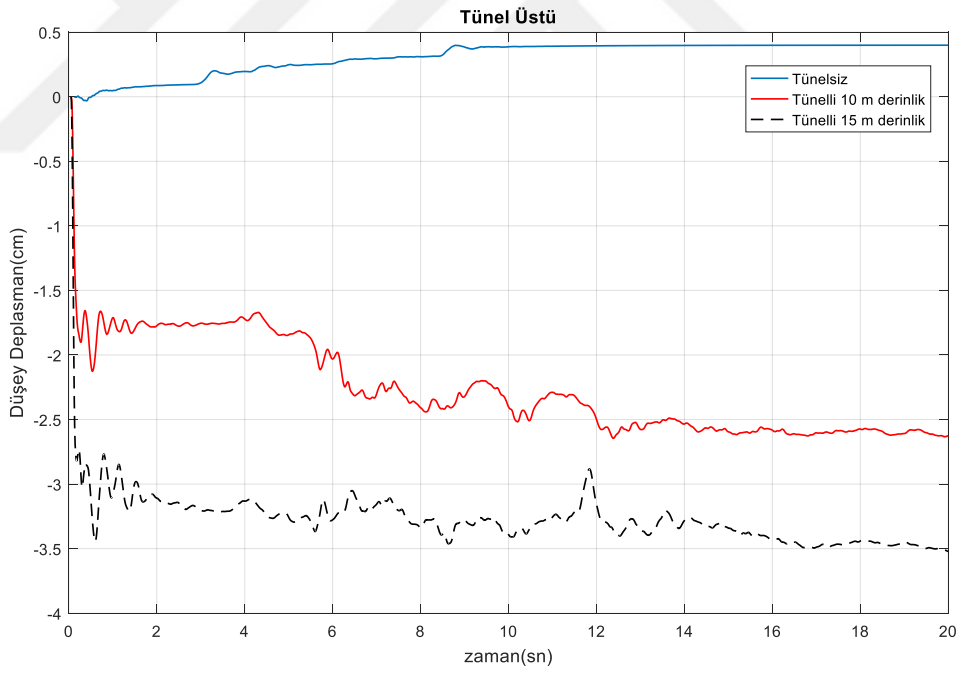
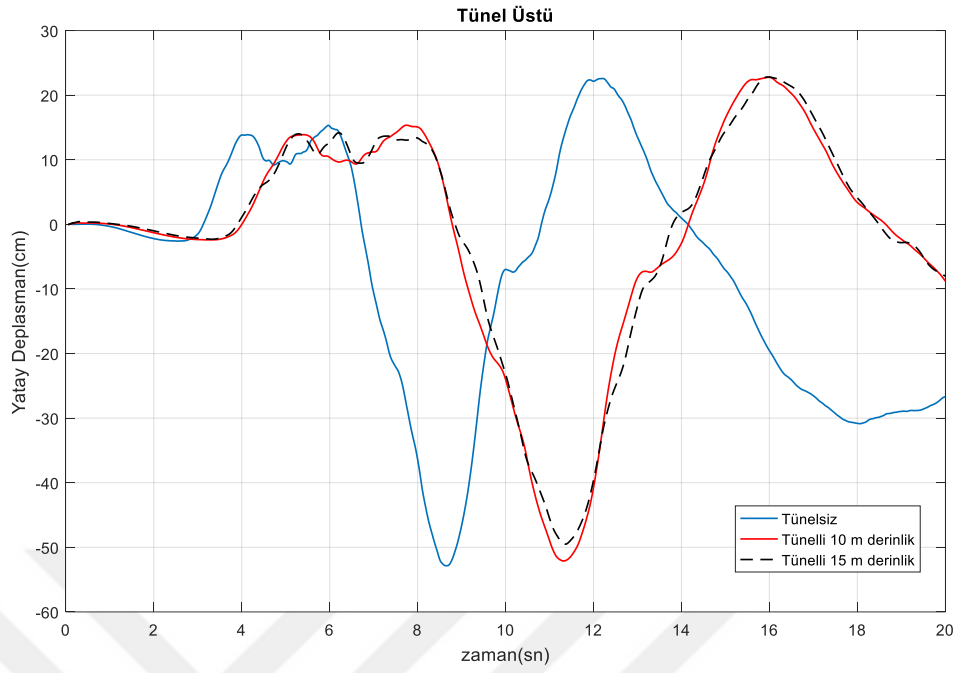
Şekil 7.4. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.



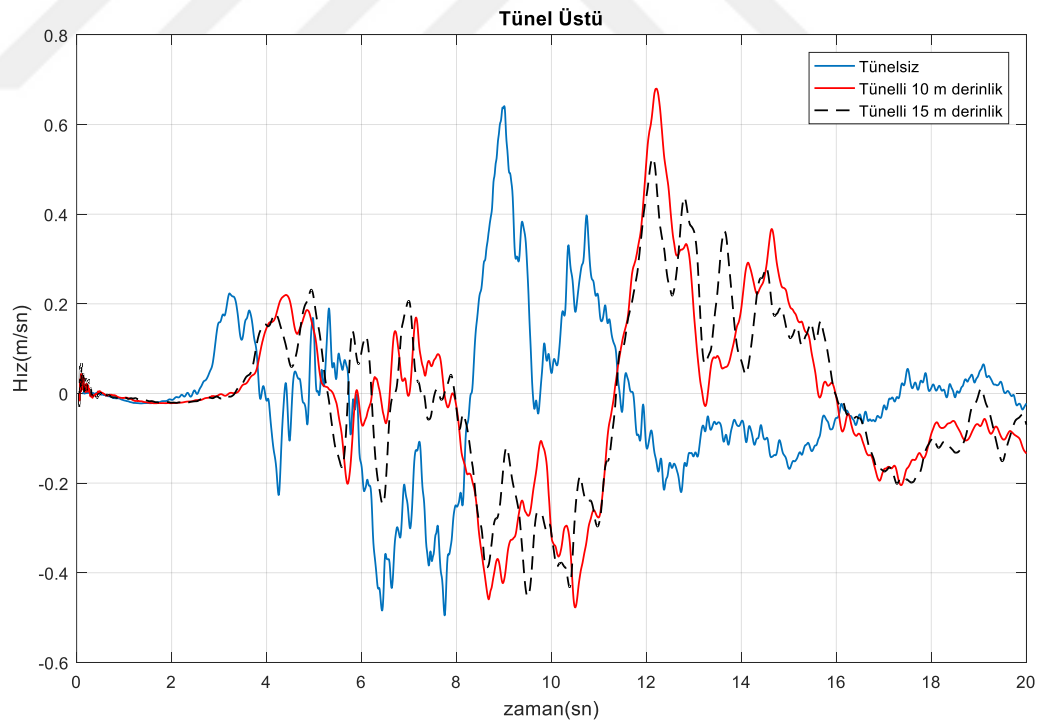
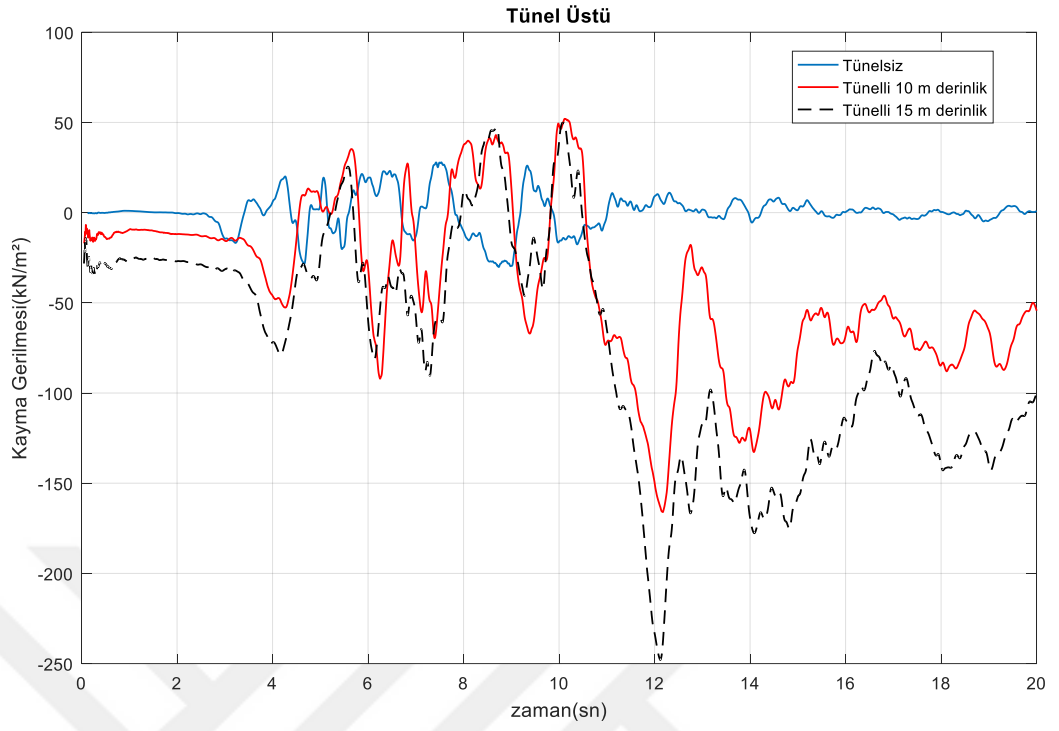
d)

Şekil 7.4. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

Tünel üstü noktada elde edilen analiz sonuçları Şekil 7.5.'te verilmiştir. Mohr-Coulomb modeli için tünel üstü noktada oluşan yatay deplasmanlar tünelsiz model için 28 cm iken tünelli modellerde bu değer yaklaşık 10 cm olmuştur. Düşey deplasmanlarda tünelli modellerde tünelsiz modele göre artış olmuştur. Düşey deplasman tünelsiz modelde 0.5 cm, 10 m derinlikteki tünelde 2.5 cm ve 15 m derinlikteki tünelde 3.5 cm olarak bulunmuştur. Kayma gerilmeleri tünelli modellerde tünelsiz modele göre %100'lük bir artış yaşamıştır. Hız değerlerinde her üç modelde de tünel üstü noktada tünel altı noktaya göre azalma yaşanmıştır.

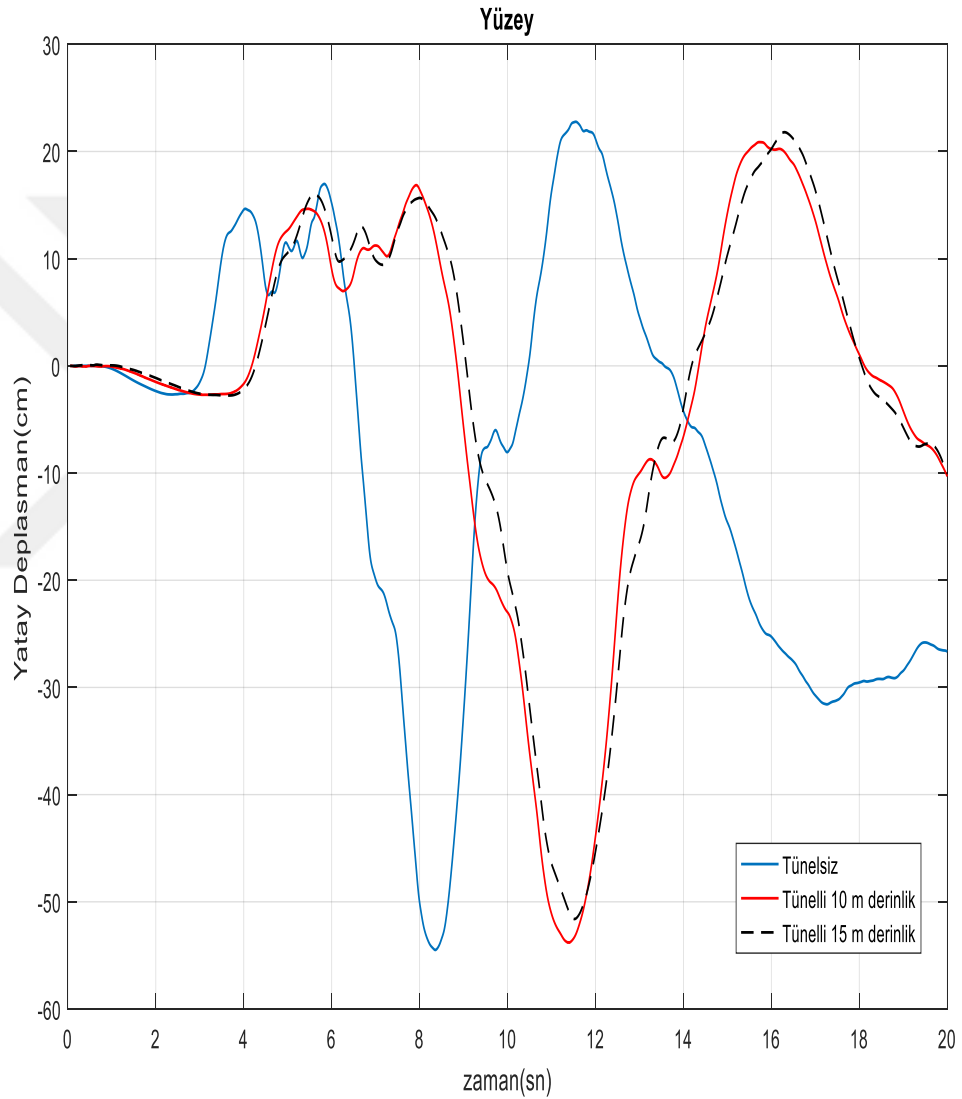


Şekil 7.5. Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.



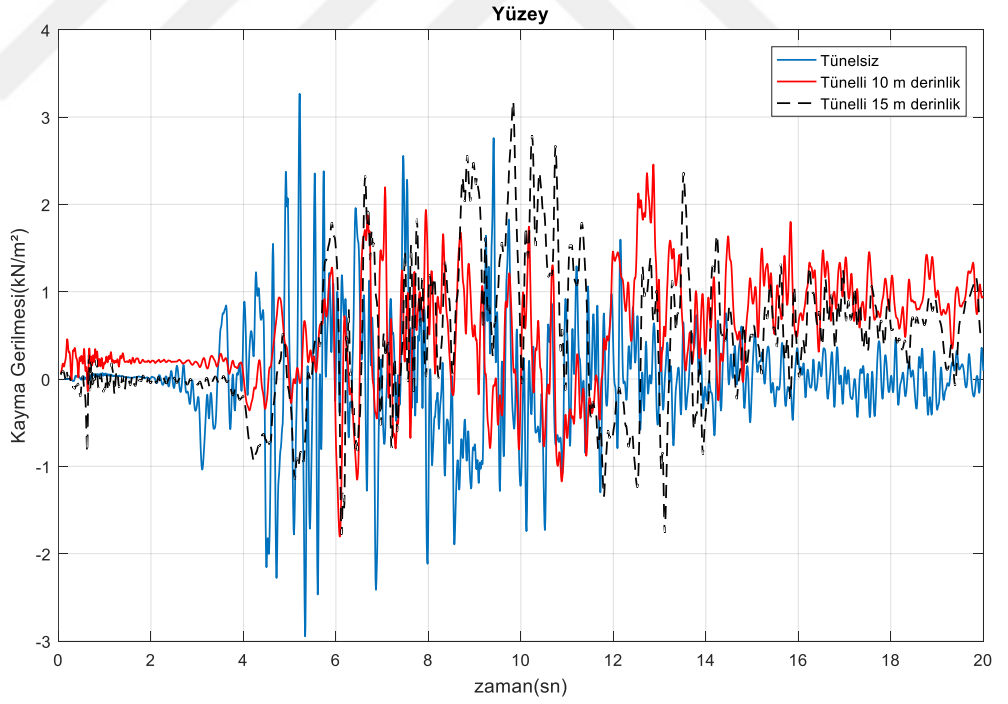
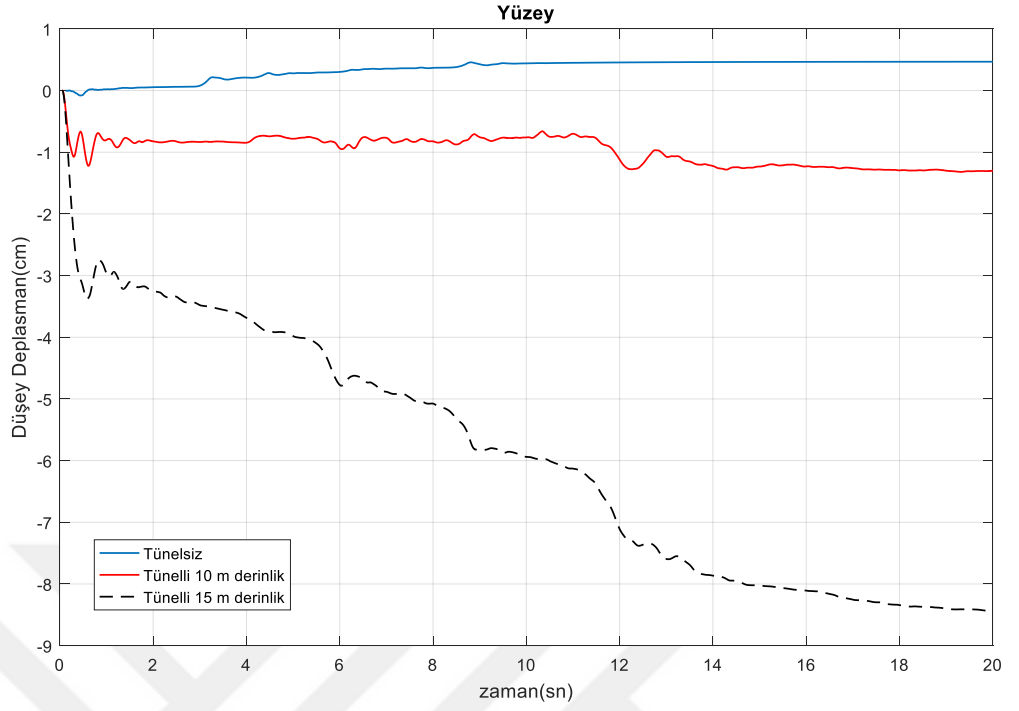
Şekil 7.5. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

Şekil 7.6.'da yüzeyde oluşan yatay deplasman, düşey deplasman, kayma gerilmesi ve hız değerleri verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yatay deplasman zeminde tünelin varlığı ile birlikte azalma göstermiştir. Düşey deplasmanlar ise özellikle yüzeyde 15 m derinlikteki tünel için en fazla olmuştur. Kayma gerilmeleri ana kayadan yüzeye çıkıldıkça azalma göstermiştir. Hız değerlerinde ise bütün modeller için zeminde incelenen bütün noktalarda benzer şekilde azalma görülmektedir.

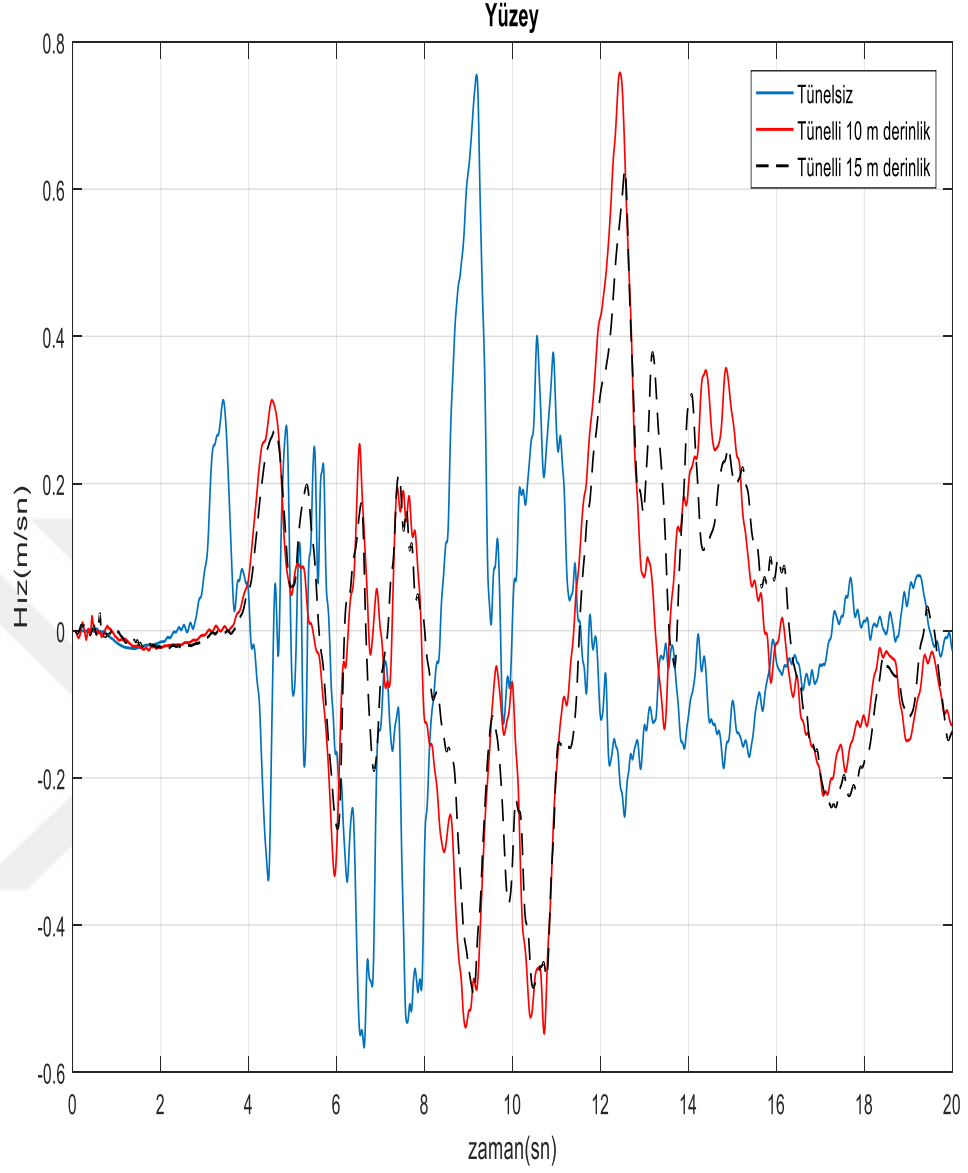


a)

Şekil 7.6. Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

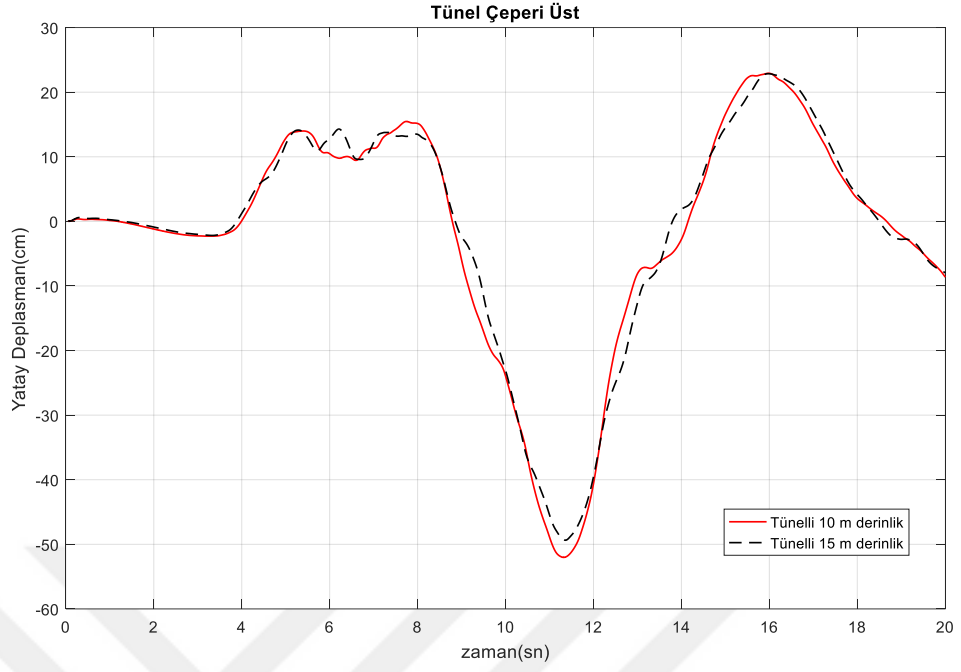


Şekil 7.6. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

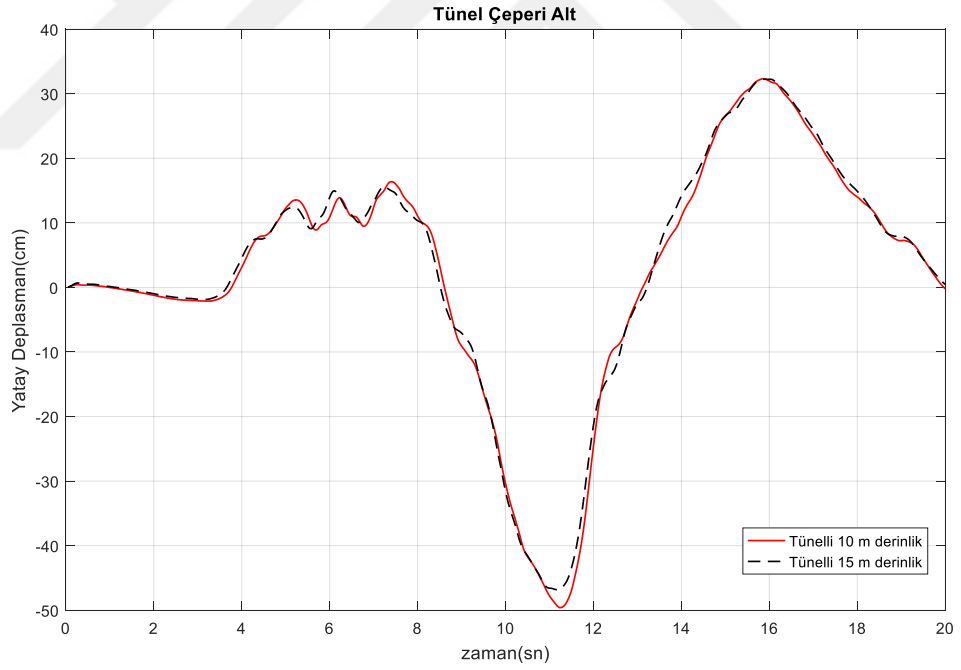


Şekil 7.6. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı derinliklerdeki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

Tünel çevresinde üst ve alt noktalarda yatay deplasman sonuçları Şekil 7.7.'de verilmiştir. Tünel derinliğinin değişimi yatay deplasmanda bir değişime yol açmamıştır. İki noktada da yatay deplasmanlar deprem sırasında benzer davranmışlardır.

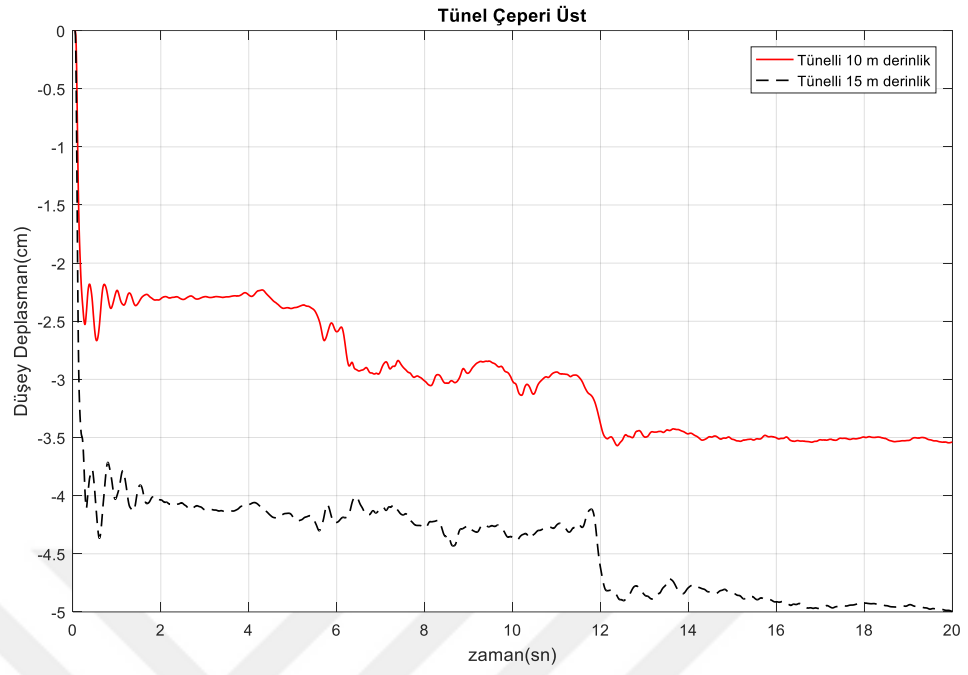


a)

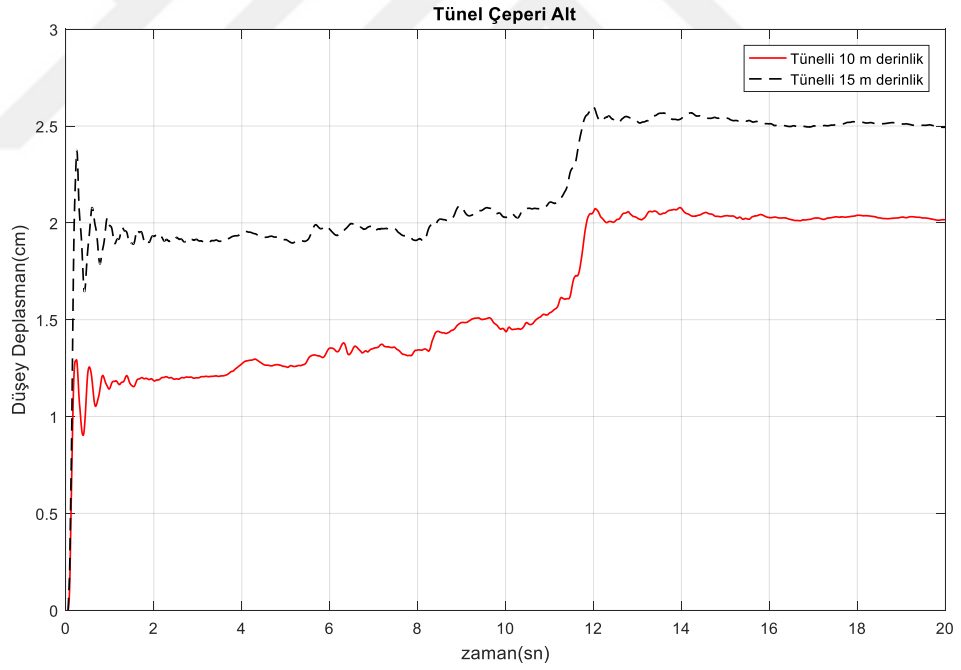


b)

Şekil 7.7. Mohr-Coulom modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasmanlar a) üst nokta
b) alt nokta.



a)



b)

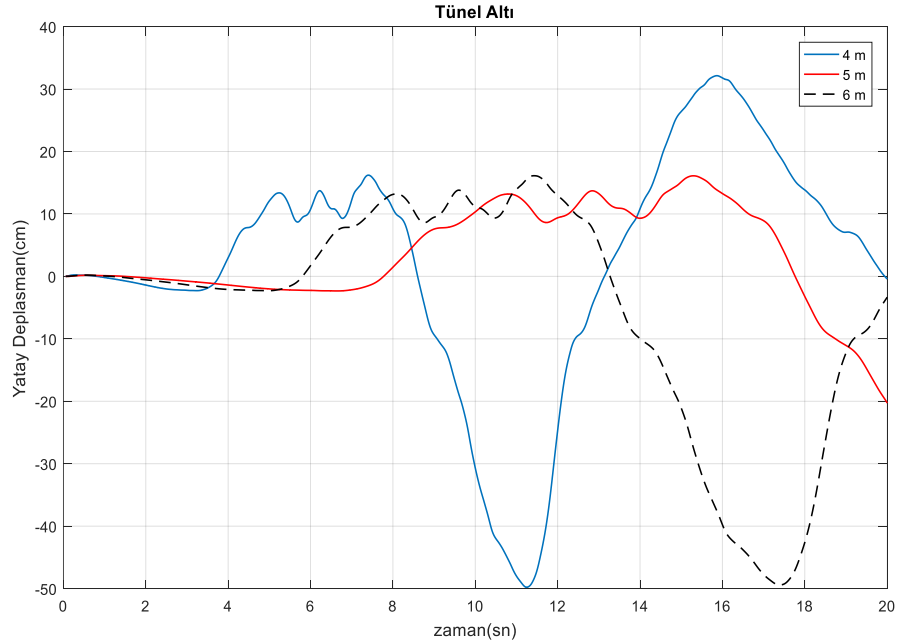
Şekil 7.8. Mohr-Coulom modelde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasmanlar a) üst nokta
b) alt nokta.

Şekil 7.8.'de verilen tünel çeperi noktalar için düşey deplasman değerleri tünel çeperi üst noktada her iki derinlikteki tünel için de çökme görülürken tünel altı noktada her iki tünel içinde kabarma gözlemlenmiştir.

7.1.2 Farklı çaptaki tünellerin Mohr-Coulomb analiz sonuçları

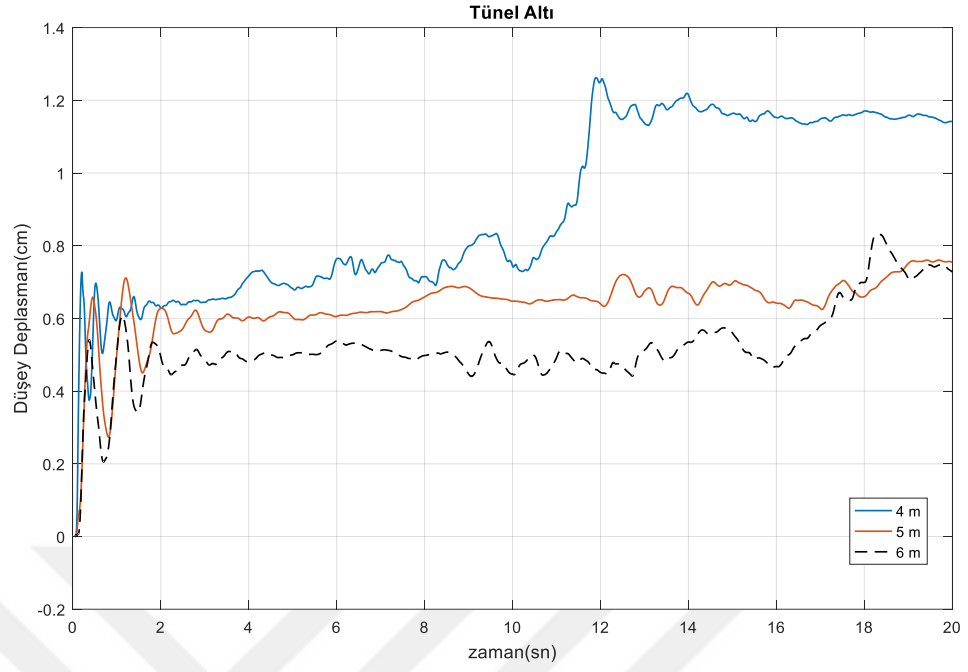
FLAC 2D ile kurulan modellerde tünel çapları 4 m, 5 m ve 6 m olarak belirlenmiştir. Mohr-Coulomb yenilme kriterlerine göre elde edilen analiz sonuçları bu kısımda yer almaktadır. Farklı çaplardaki tüneller için yatay deplasman, düşey deplasman, kayma gerilmeleri ve hız değerleri değerlendirilmiştir.

Farklı çaplardaki tüneller için Şekil 7.9.'da tünel altı noktada oluşan yatay deplasman, düşey deplasman, kayma gerilmesi ve hız değerleri verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre oluşan yatay deplasmanlar deprem sonunda 4 m ve 6 m çaptaki tünellerde 10 cm iken, 5 m çaptaki tünelde deprem sonunda 30 cm'lik bir deplasman olmuştur. Düşey deplasmanlar ise tünelin çapı arttıkça deprem sonunda bir azalma görülmüştür. Kayma gerilmeleri ise çapın artışıyla birlikte incelenen nokta için azalmıştır. Hız değerleri ise çapın değişimiyle birlikte maksimum hıza ulaşma anı değişmiştir.

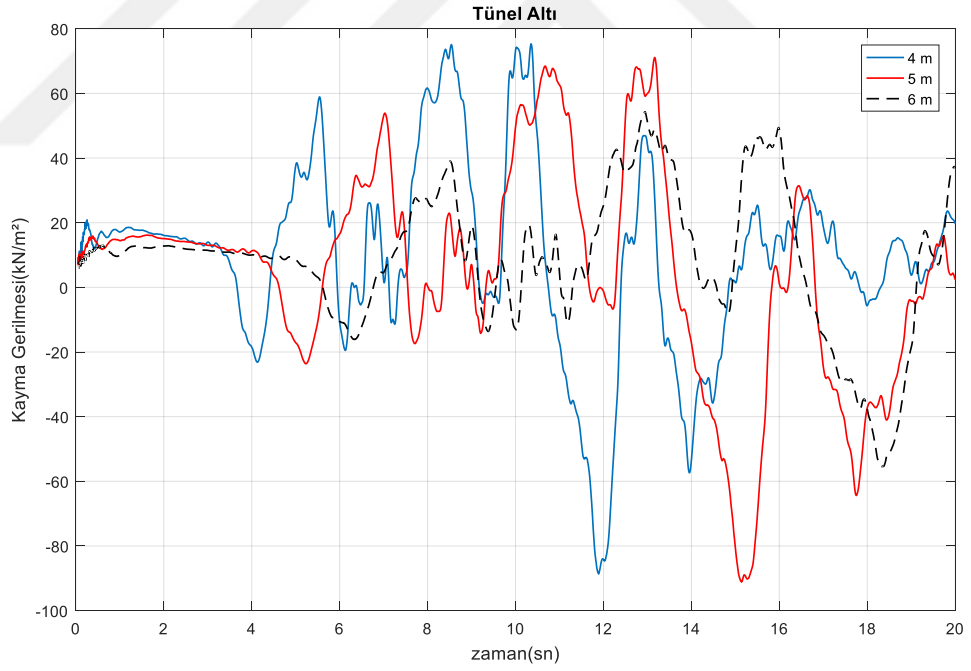


a)

Şekil 7.9. Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

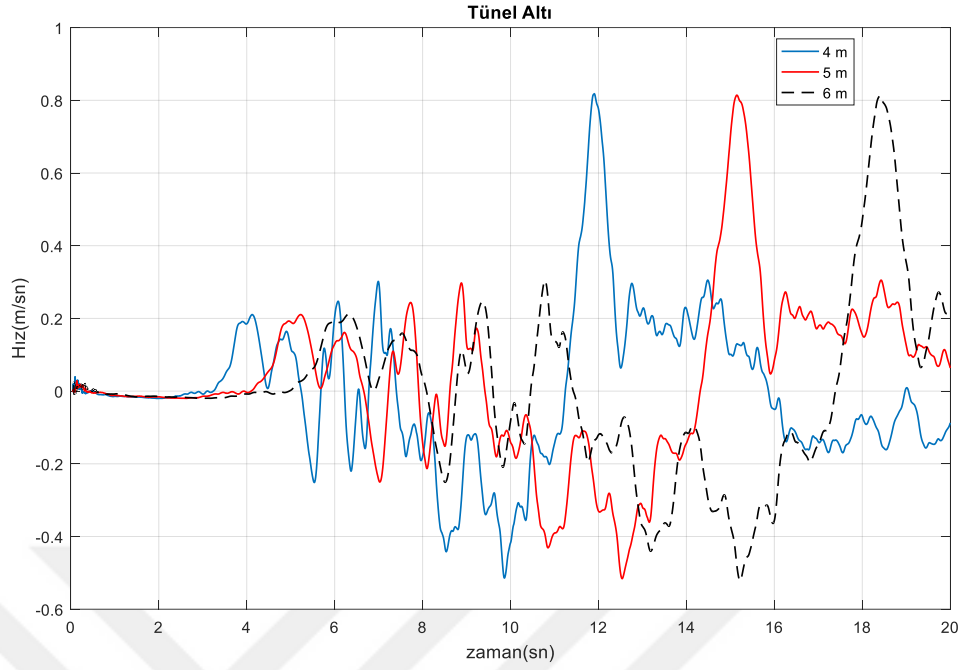


b)



c)

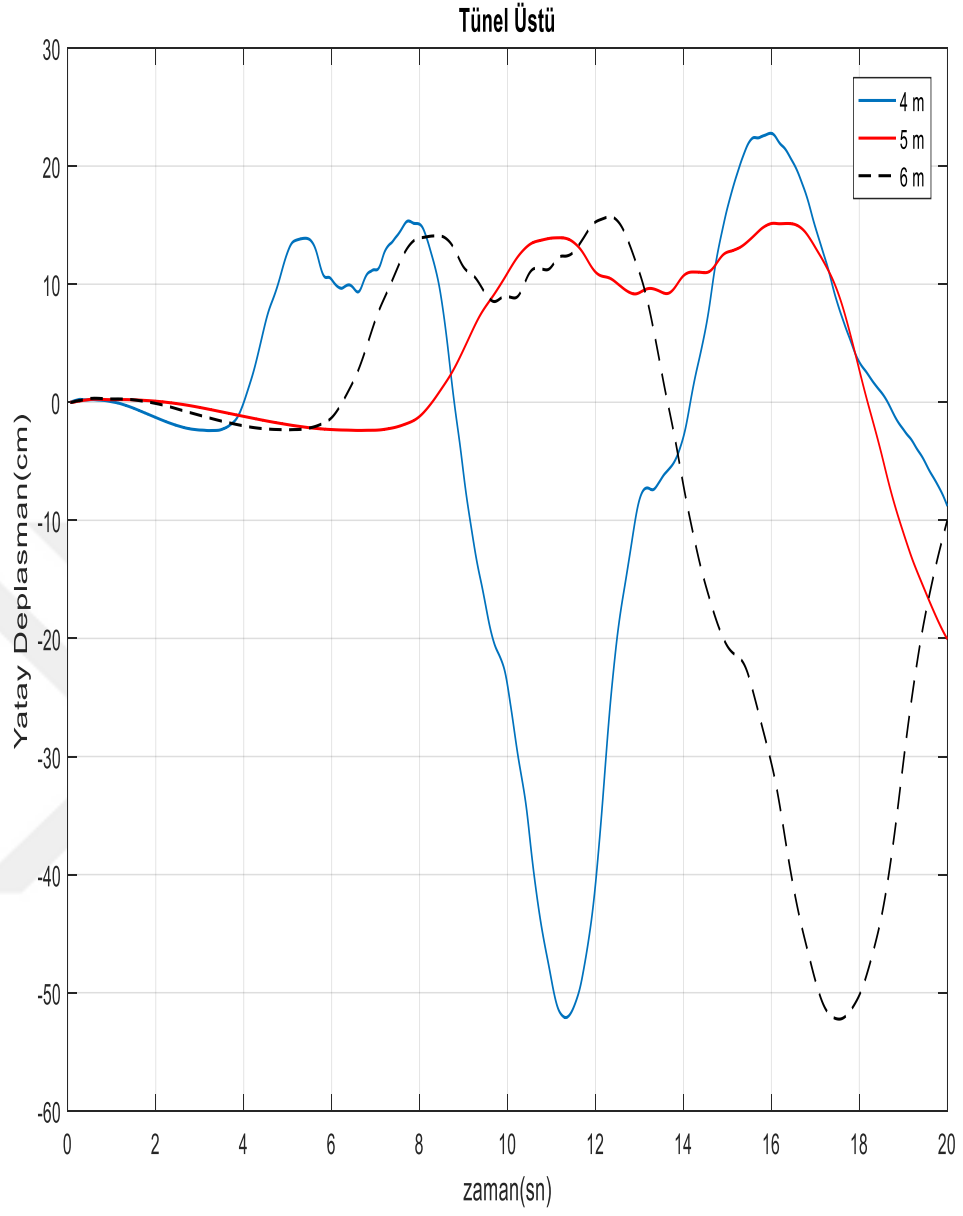
Şekil 7.9. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.



d)

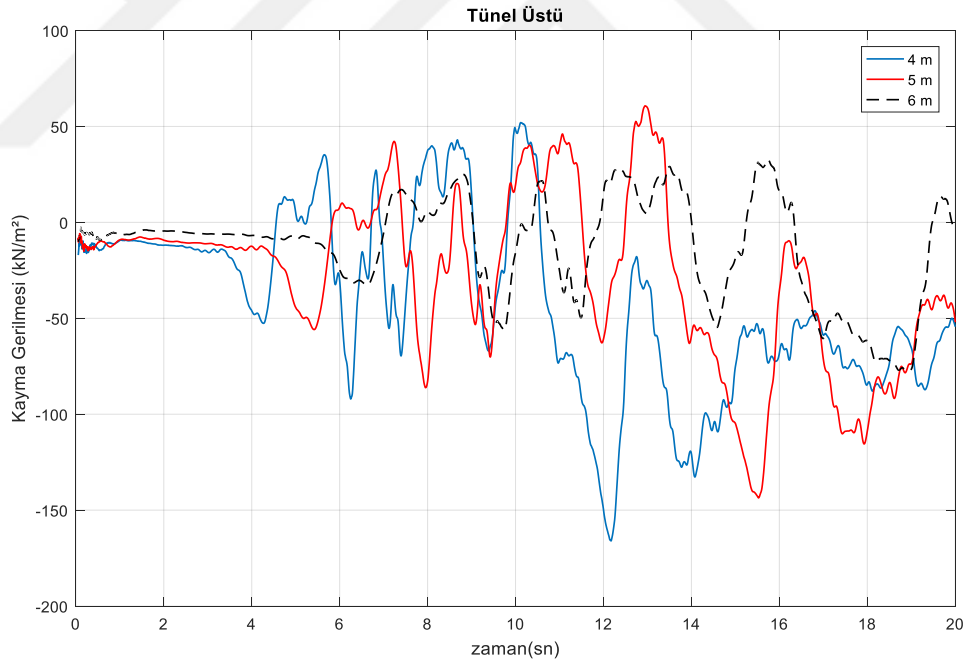
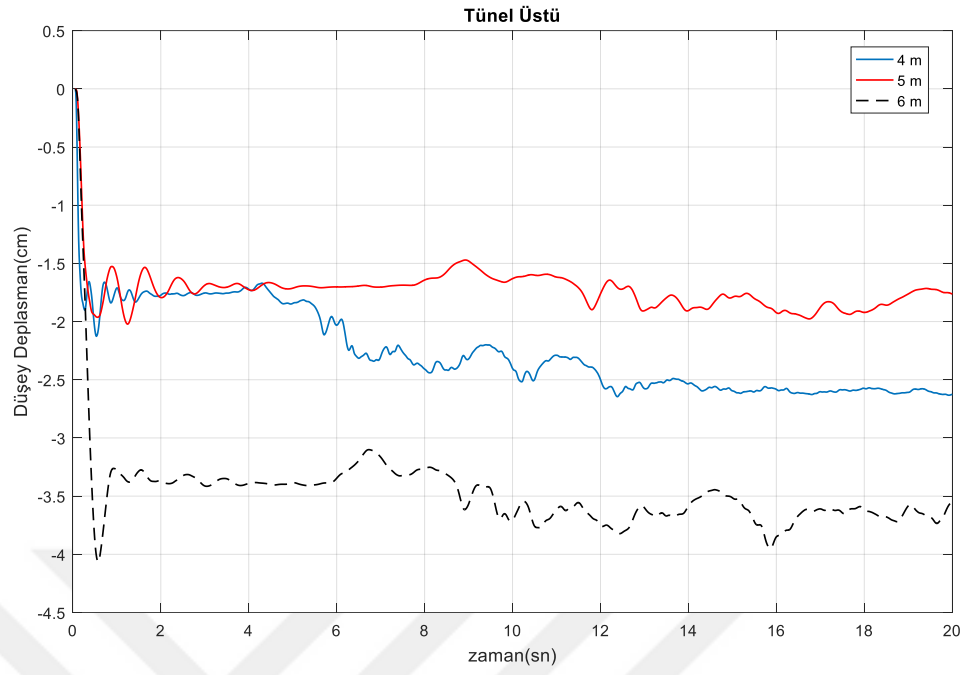
Şekil 7.9. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

Şekil 7.10.'da 4 m, 5 m ve 6 m çaplarındaki tüneller için tünel üstündeki noktalar ele alınmıştır. Farklı çaplardaki bu tüneller için bu noktadaki yatay deplasman değeri tünel altı noktaya göre 4 m çap ve 6 m çap için değişmezken, 5 m tünel için bir azalmıştır. Düşey deplasmanlar ise 5 m çaptaki tünel için diğer tüneller göre daha az bir deplasman olmuştur. Kayma gerilmeleri ise en küçük değerleri 6 m çaptaki tünelde oluşmuştur. Hız değerlerinde ise deprem sonunda 6 m çaptaki tünel için bir artış olmuştur.

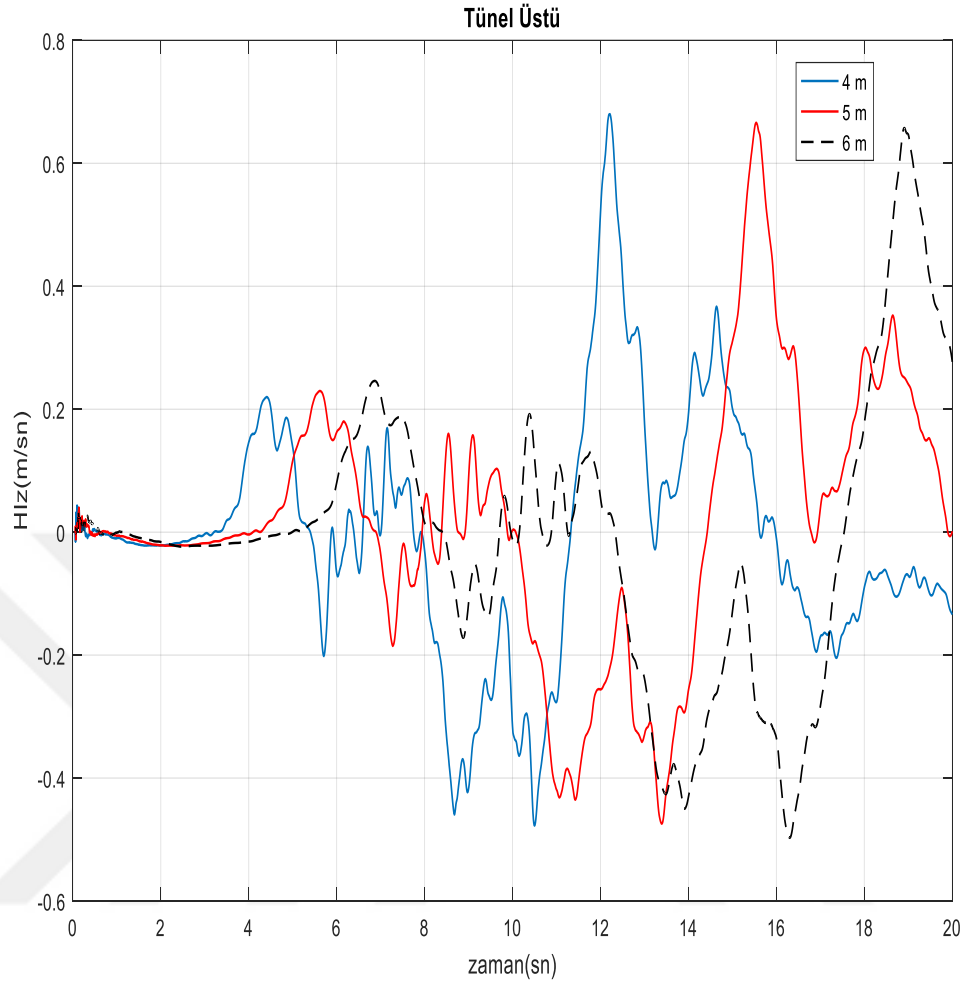


a)

Şekil 7.10. Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.



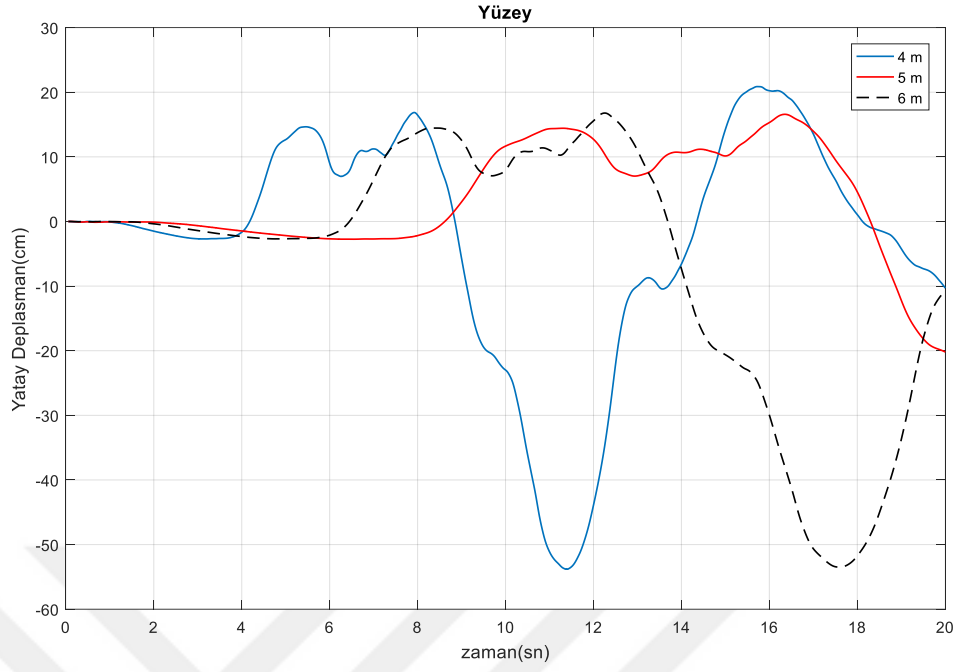
Şekil 7.10. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.



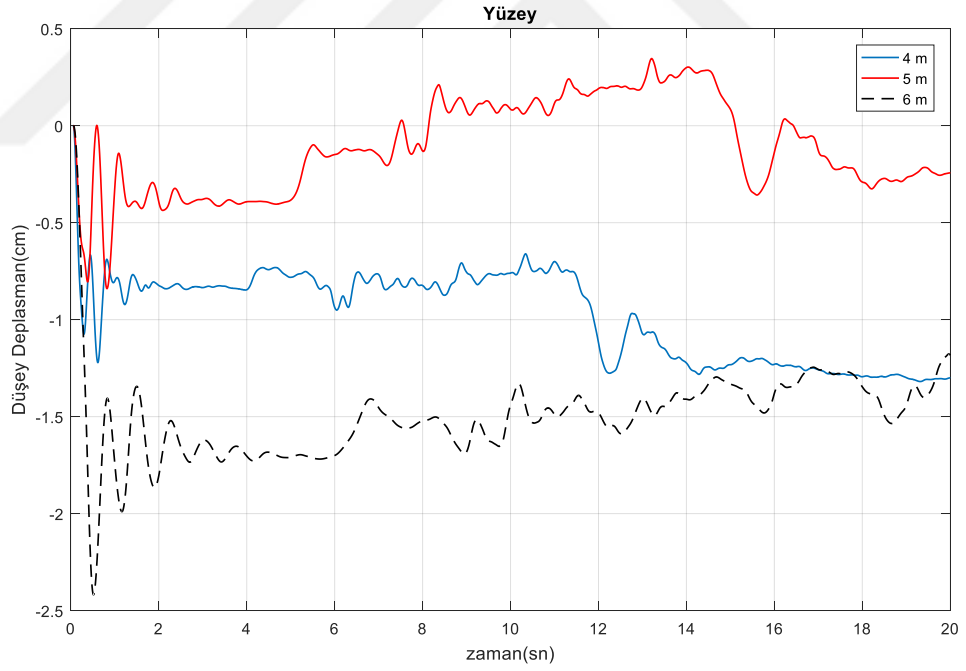
d)

Şekil 7.10. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

Yüzeyde oluşan yatay deplasman, düşey deplasman, kayma gerilmesi ve hız değerleri Şekil 7.11.'de yer almaktadır. Yüzeyde oluşan yatay deplasman tünel üstü nokta ile benzer şekilde olmuştur ve 5 m çaptaki tünelde 20 cm, diğer tünellerde 10 cm deplasman olmuştur. Düşey deplasmanlar ise 5 m çapındaki tünelde sıfıra yaklaşırken diğer tünellerde de tünel üstü noktaya göre bir azalma görülmüştür. Kayma gerilmelerinde ise zeminin içerisinde yüzeye gelindikçe bir azalma görülmüştür. Zemindeki hız değerlerinde yüzeye çıkıldıkça her çap için aynı şekilde olmuştur.

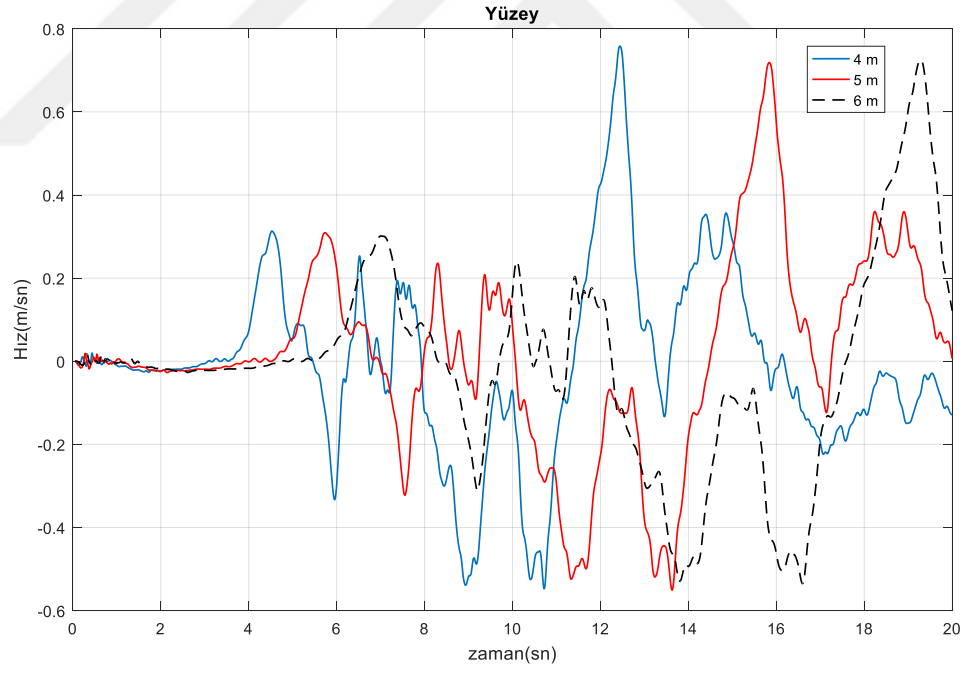
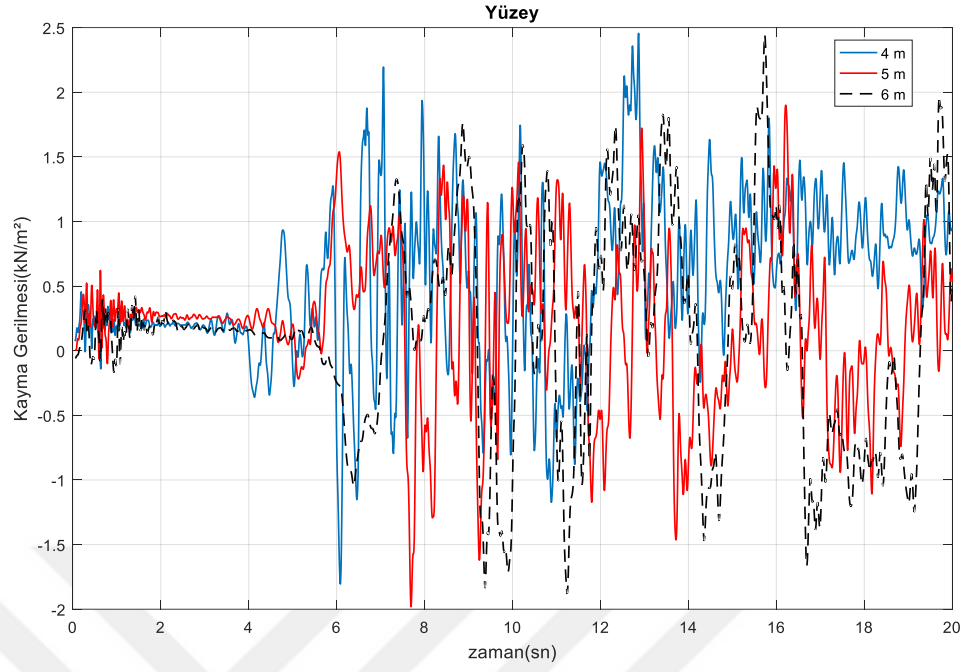


a)



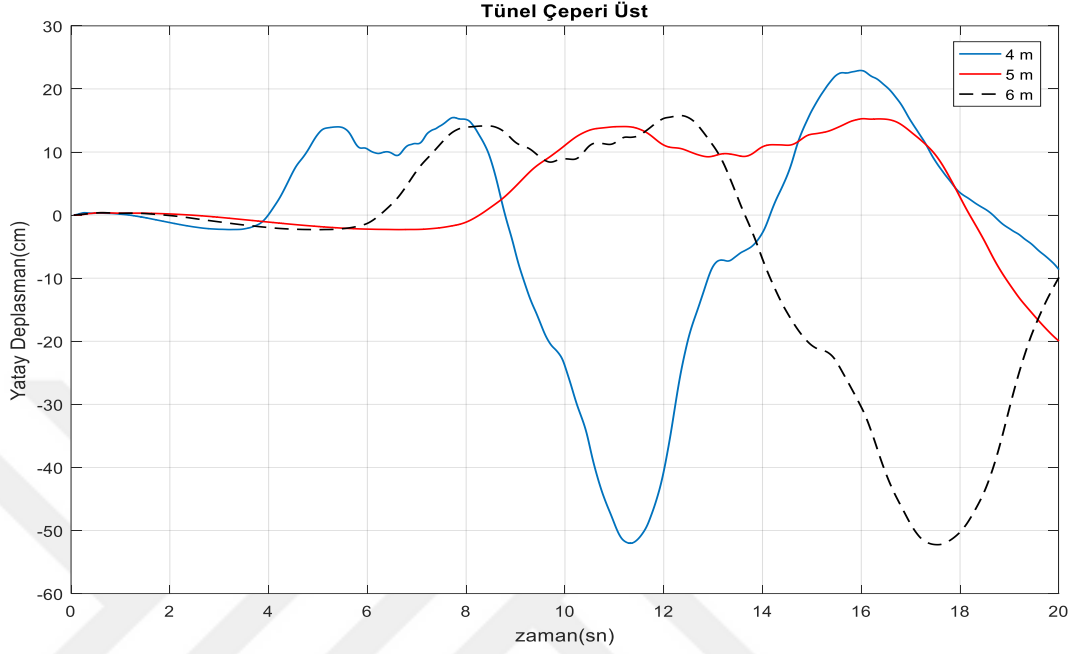
b)

Şekil 7.11. Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

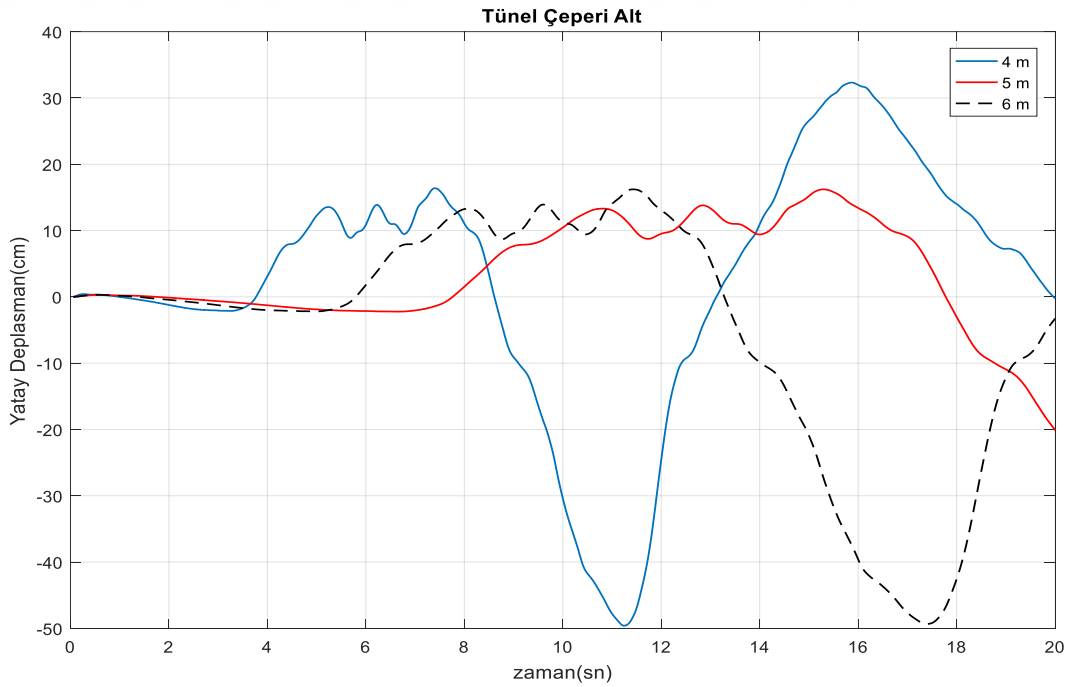


Şekil 7.11. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

Tünel çeperinde oluşan yatay deplasmanlar Şekil 7.12.'de verilmiştir. Yatay deplasmanlar tünel çeperindeki üst noktada, tünel çeperi alt noktaya göre daha fazla deplasman olmuştur.

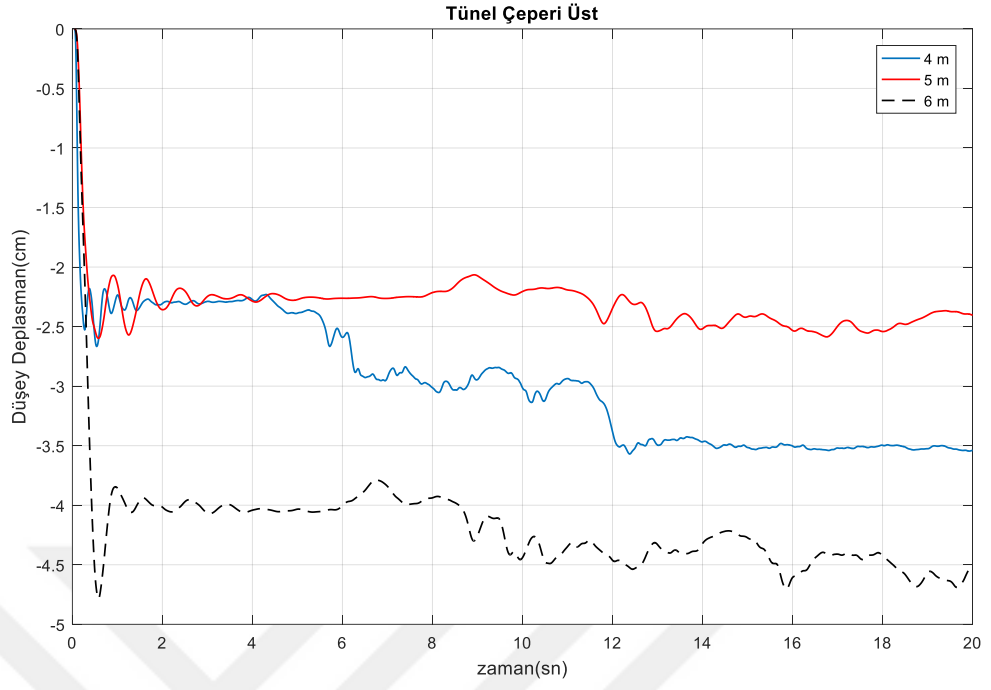


a)

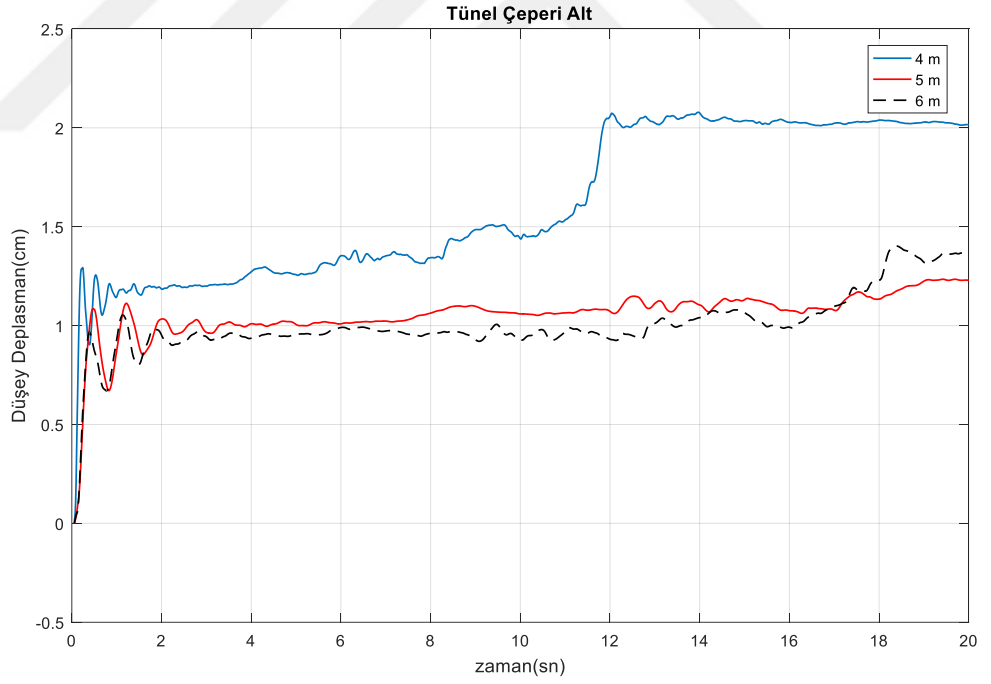


b)

Şekil 7.12. Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.



a)



b)

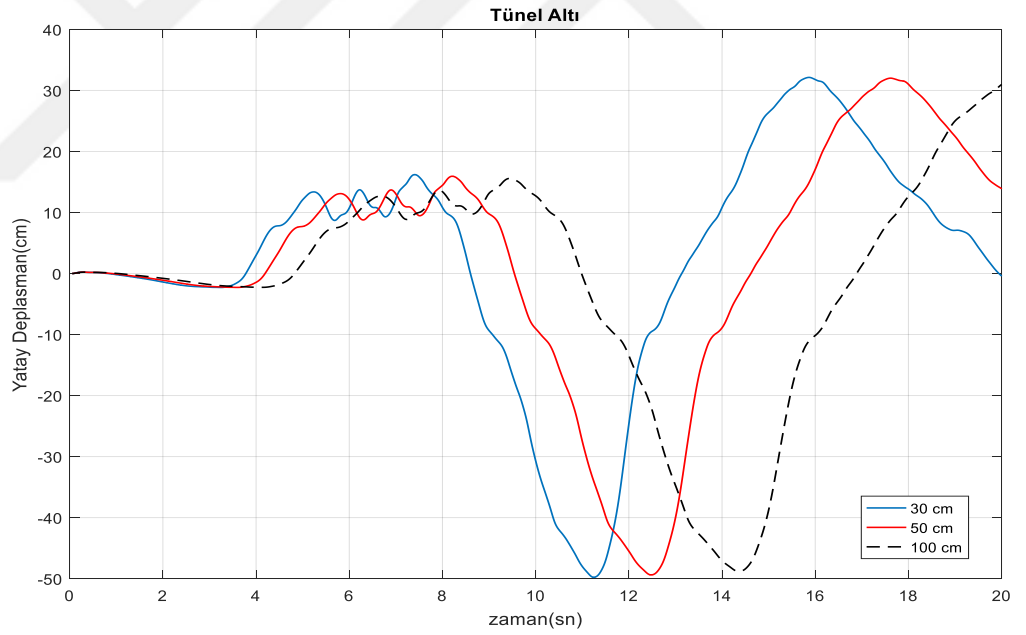
Şekil 7.13. Mohr-Coulomb modelde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.

Şekil 7.13.'te tünel çeperinde oluşan düşey deplasmanlar yer almaktadır. Tünel çeperi üst noktada en az düşey deplasman 5 m çapındaki tünelde olmuştur ve bu noktada çökme olmuştur. Tünel çeperi alt noktada ise en fazla düşey deplasman 4 m çapındaki tünelde 2 cm olmuştur ve bu noktada tünelde kabarma olmuştur.

7.1.3 Farklı kalınlıktaki tünellerin Mohr-Coulomb analiz sonuçları

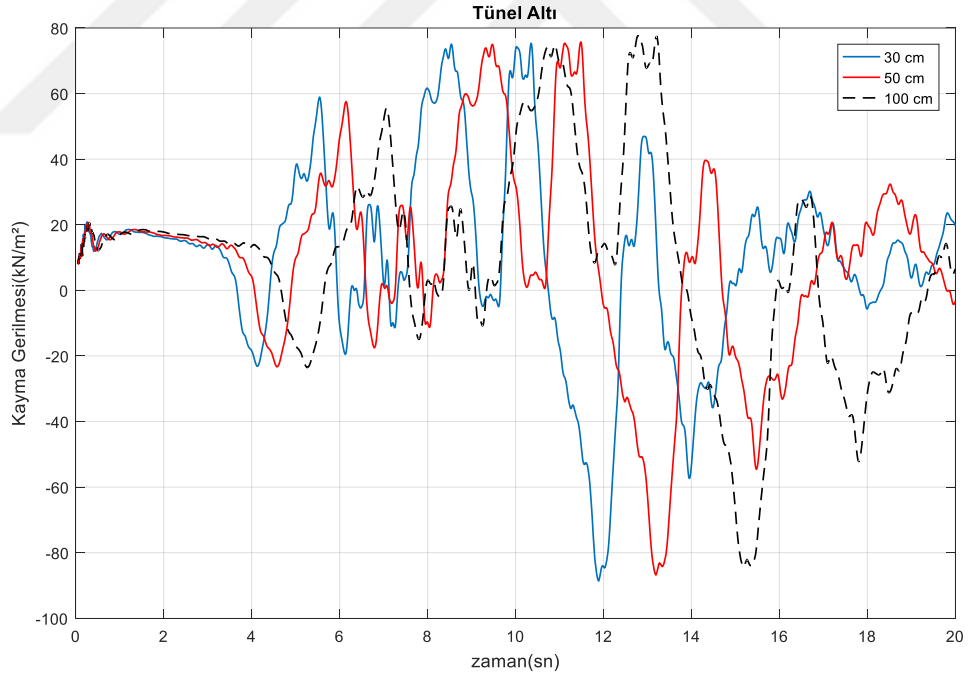
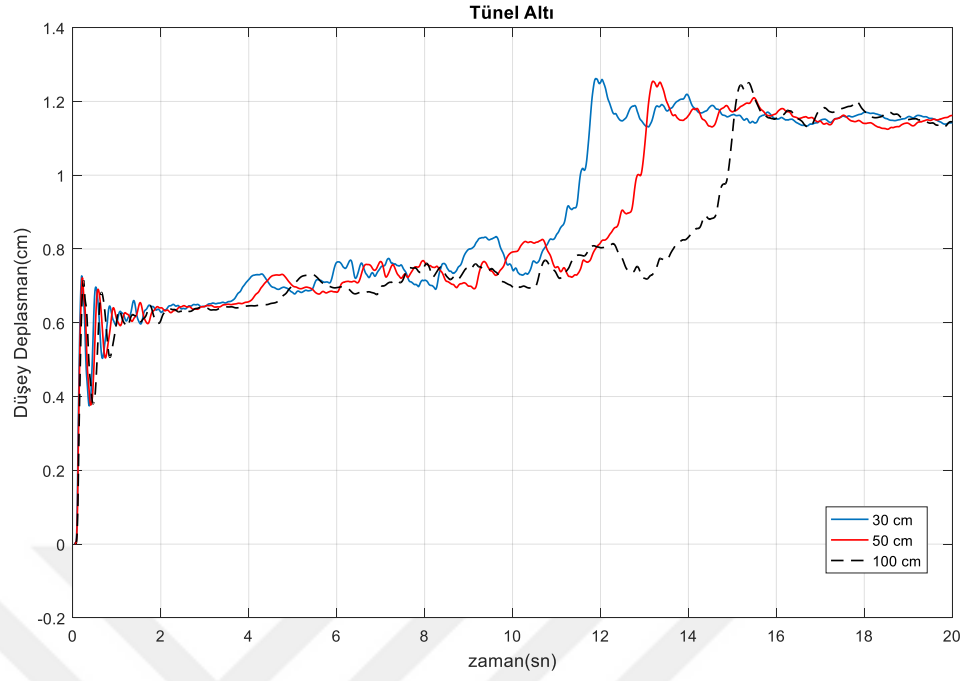
Nümerik modelde analizler için 30 cm, 50 cm ve 100 cm olmak üzere üç farklı kalınlık seçilmiştir. Kullanılan kalınlıklarla ilgili yatay deplasman, düşey deplasman, kayma gerilmesi ve hız değerleri incelenmiştir.

Tünel altı noktada, tünelin kalınlığı arttıkça yatay deplasmanlarda ve düşey deplasmanlarda 1 veya 2 cm'lik azalmalar görülmüştür. Kayma gerilmeleri ise kalınlığın artışıyla birlikte ötelenme olmuştur. Bu grafikler Şekil 7.14.'de yer almaktadır.

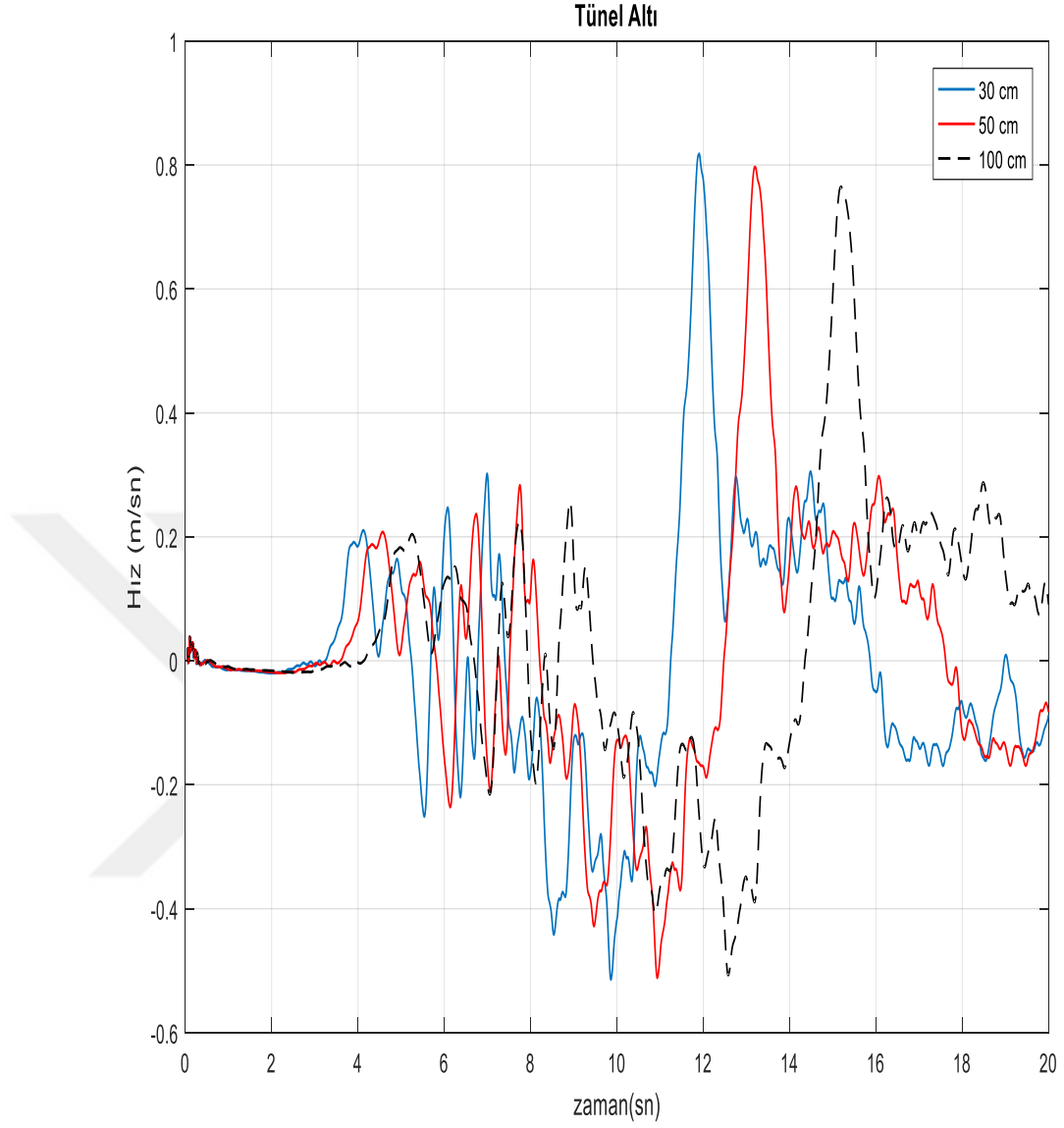


a)

Şekil 7.14. Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.



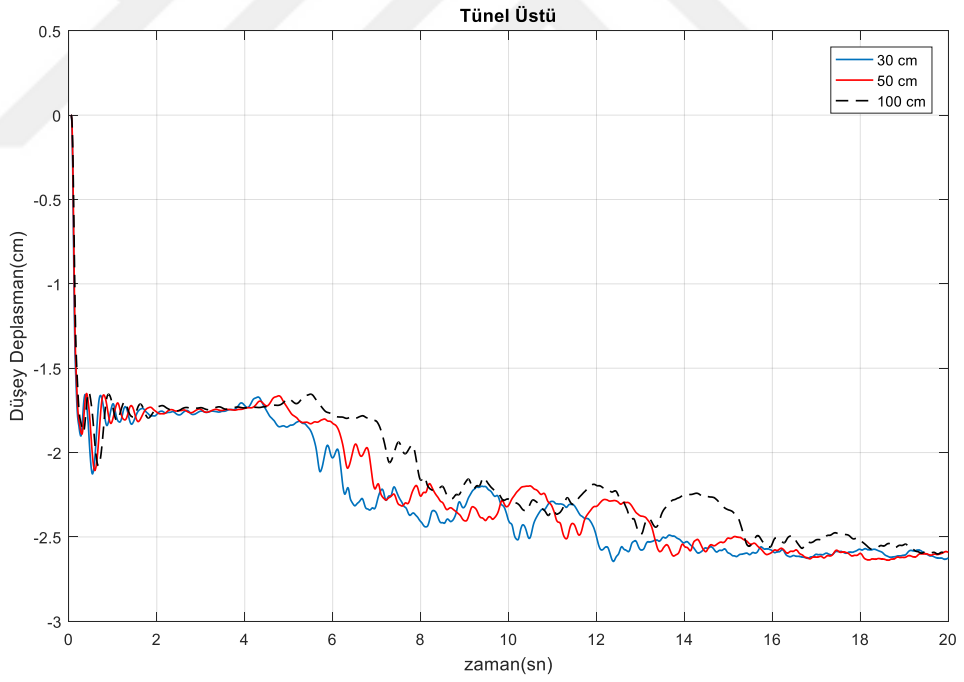
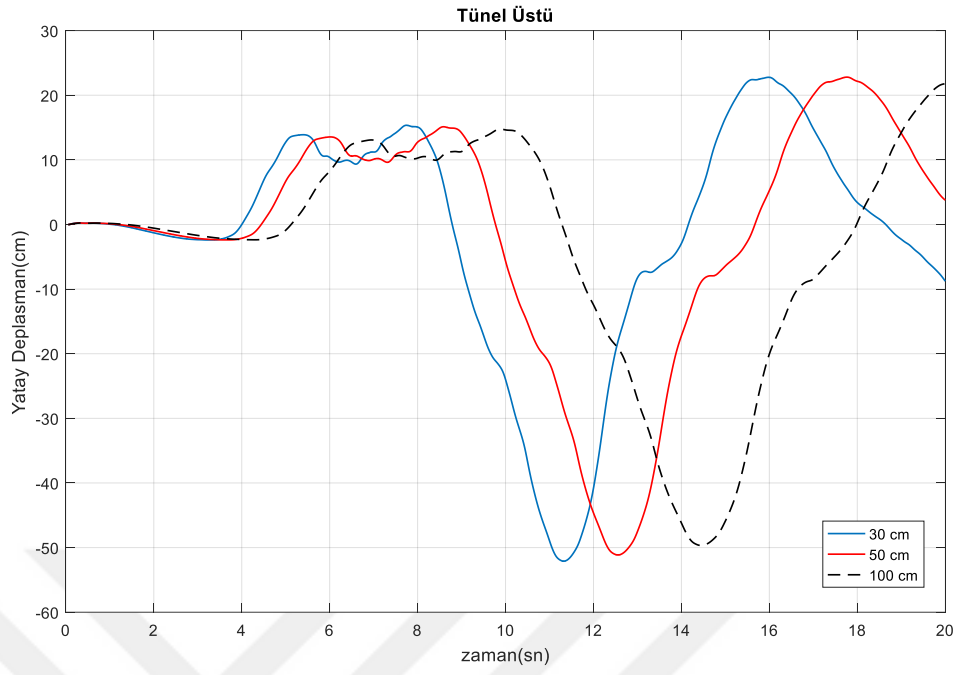
Şekil 7.14. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.



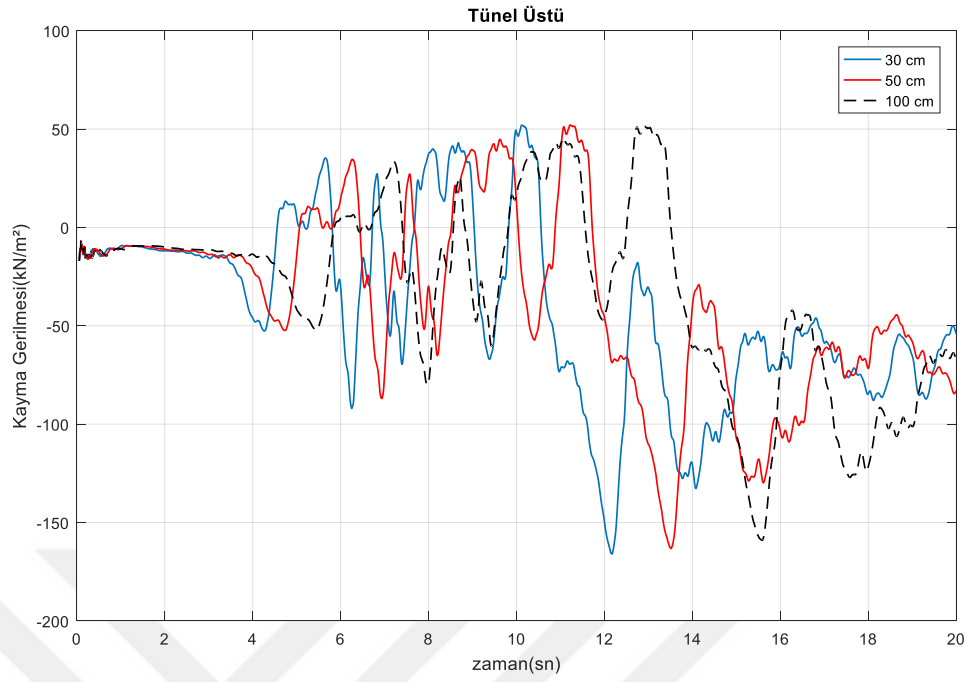
d)

Şekil 7.14. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

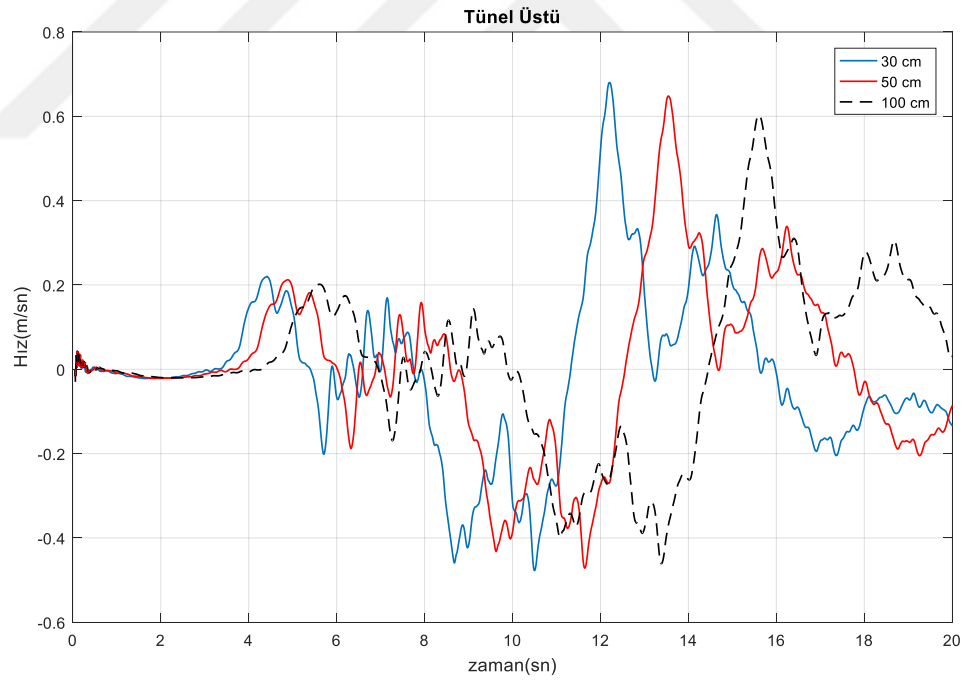
Şekil 7.15.'te tünel üstü nokta için verilen grafikleri ele alındığında düşey deplasmanlarda tünel üstü nokta için her üç kalınlıkta da tünel altı noktaya göre yön değiştirdikleri görülmüştür. Hız değerlerinde ise deprem süresinde birbirine benzer şekilde olduğu görülmüştür.



Şekil 7.15. Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.



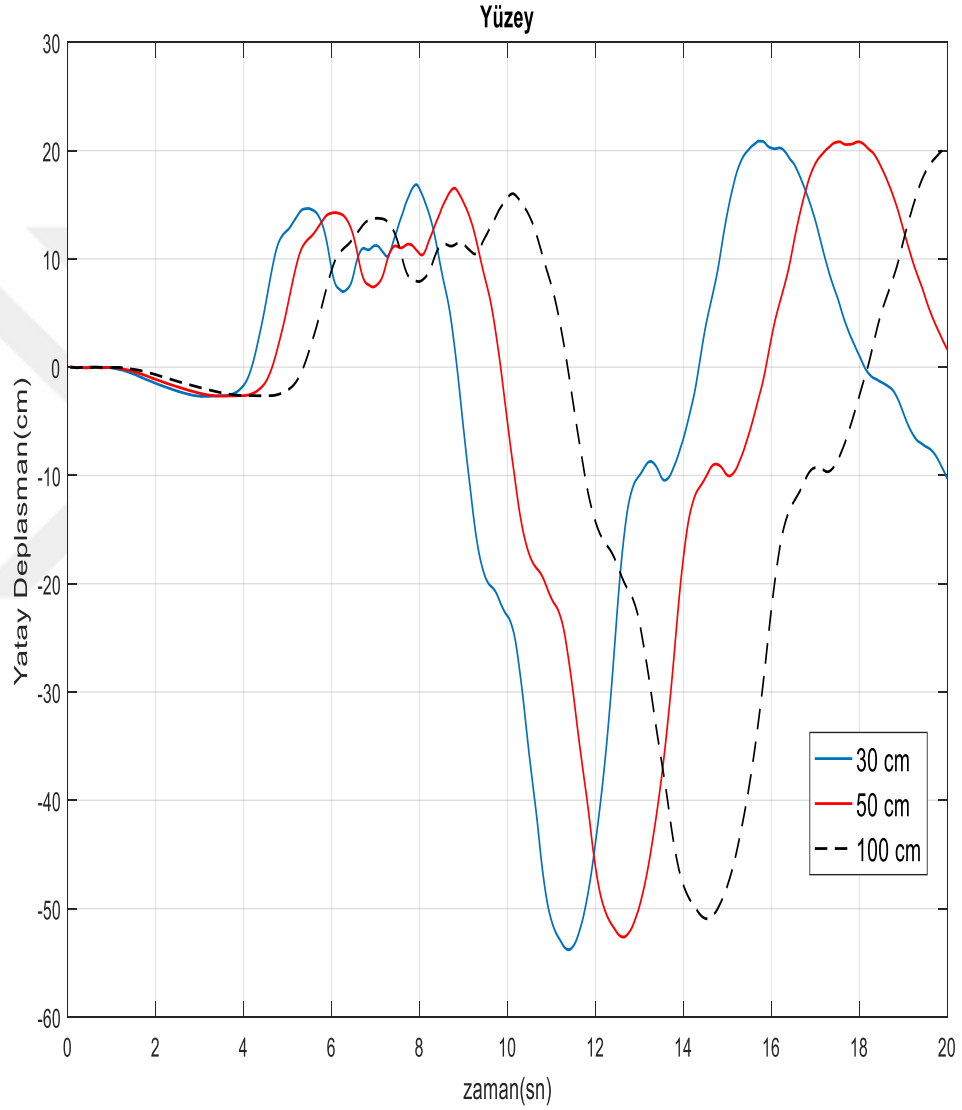
c)



d)

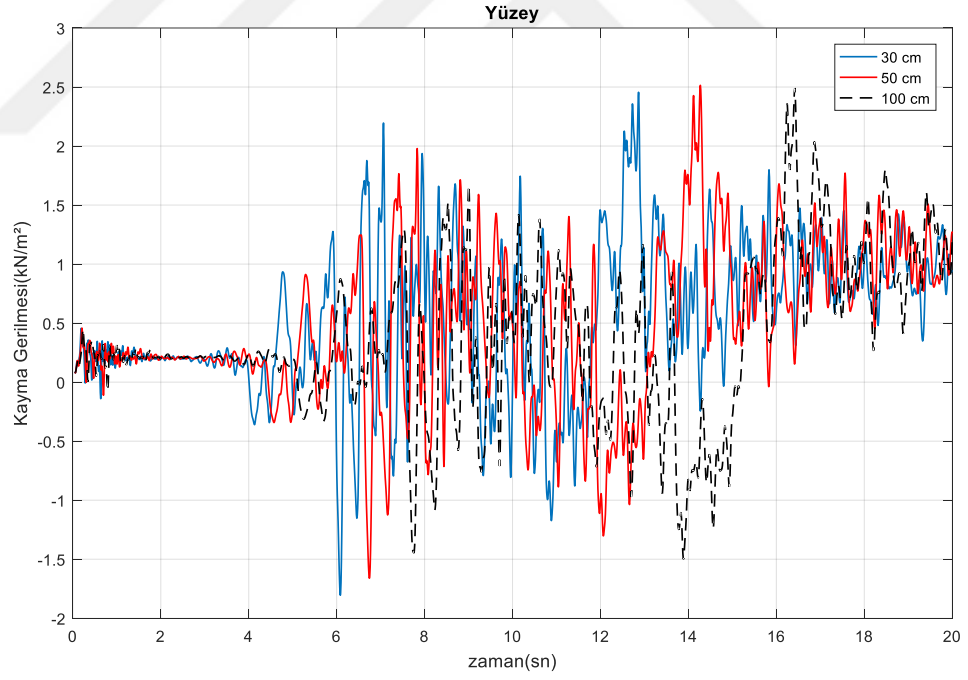
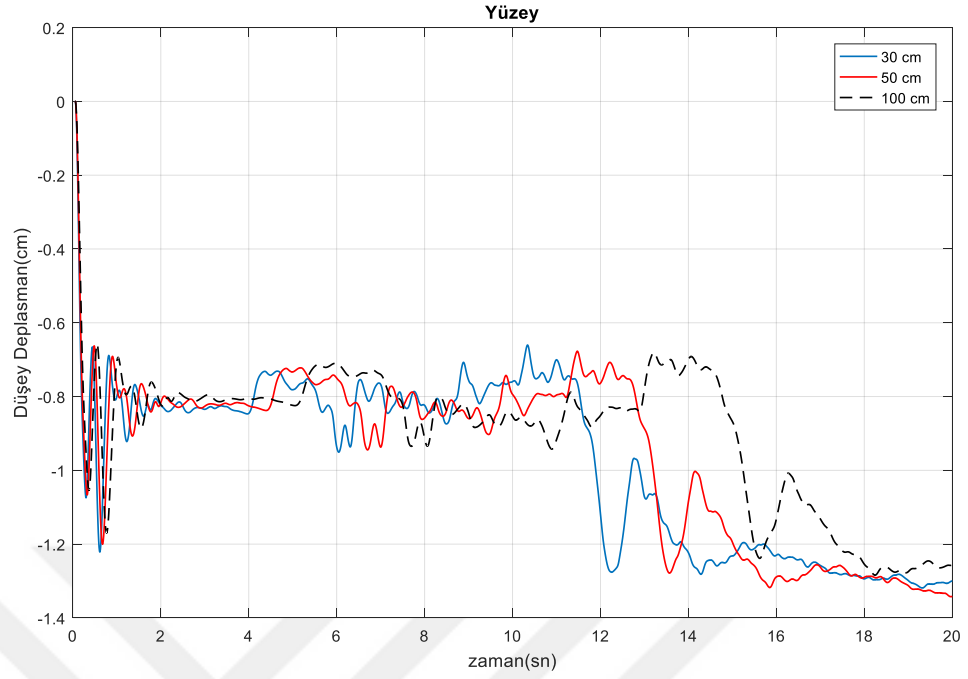
Şekil 7.15. (Devam) Mohr-Coulom modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

Nümerik modelde yüzeydeki analiz sonuçları Şekil 7.16.'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde yatay deplasmanlar zemin boyunca farklı kalınlıklar için benzer sonuçlar vermiştir. Düşey deplasmanlar için ise tünel altı noktada kabarma olurken yüzeyde çökme gerçekleşmiştir. Kayma gerilmeleri zemin içerisinde yüzeye gelindiğinde azalma görülmüştür.

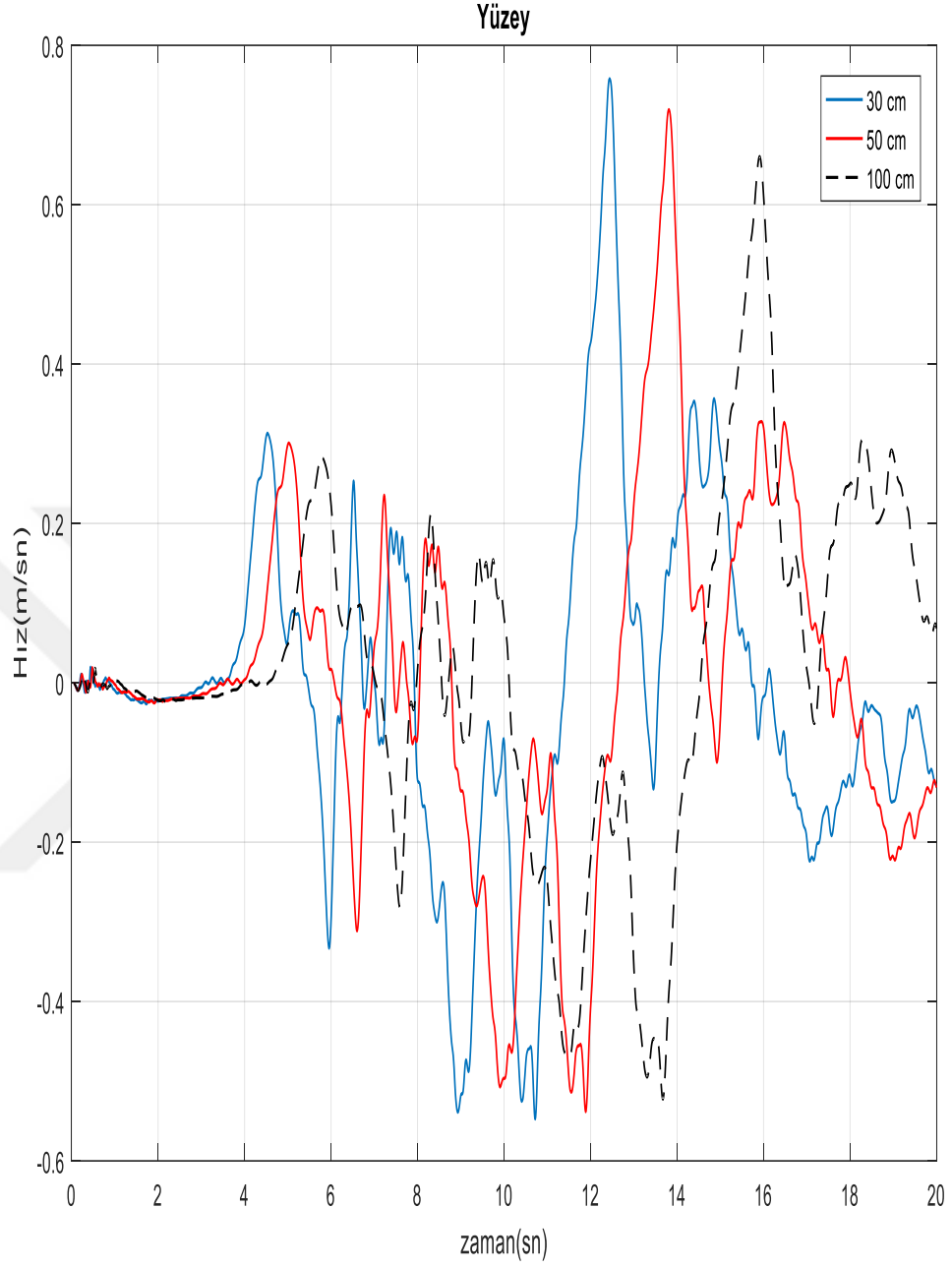


a)

Şekil 7.16. Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

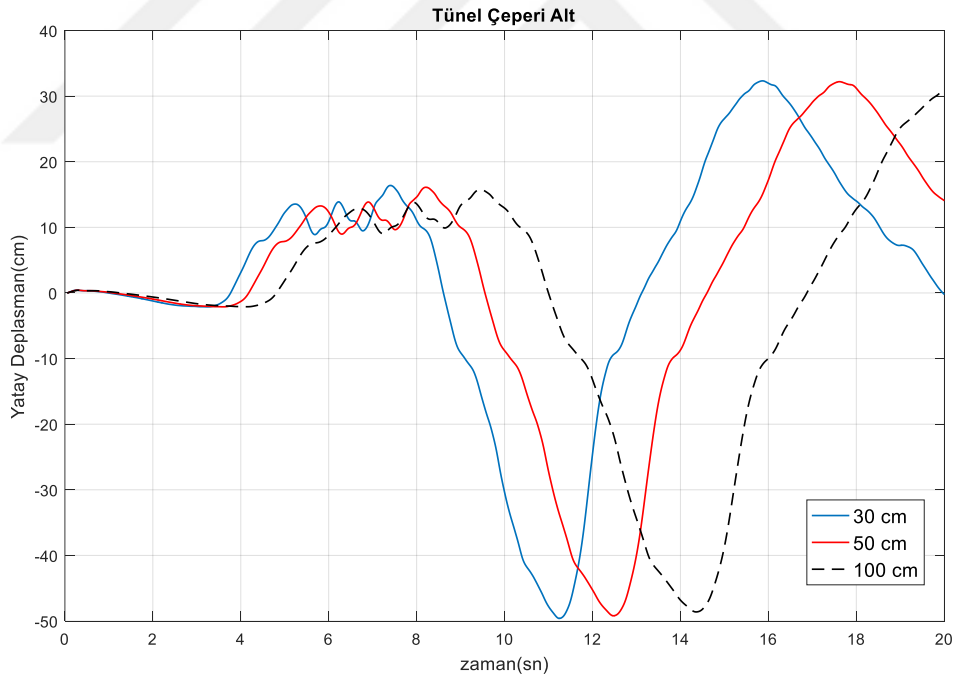
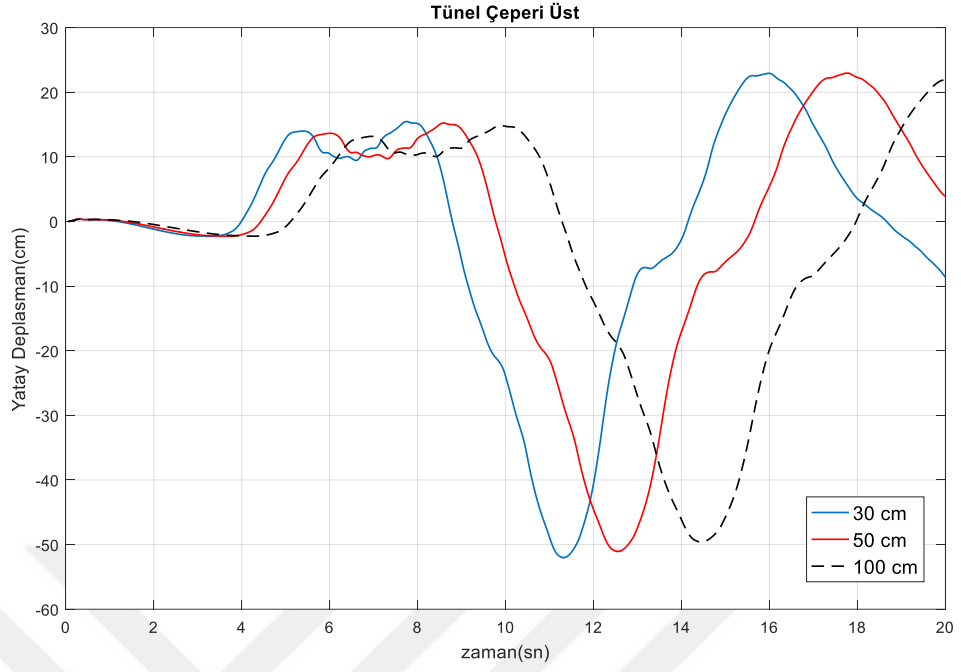


Şekil 7.16. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.



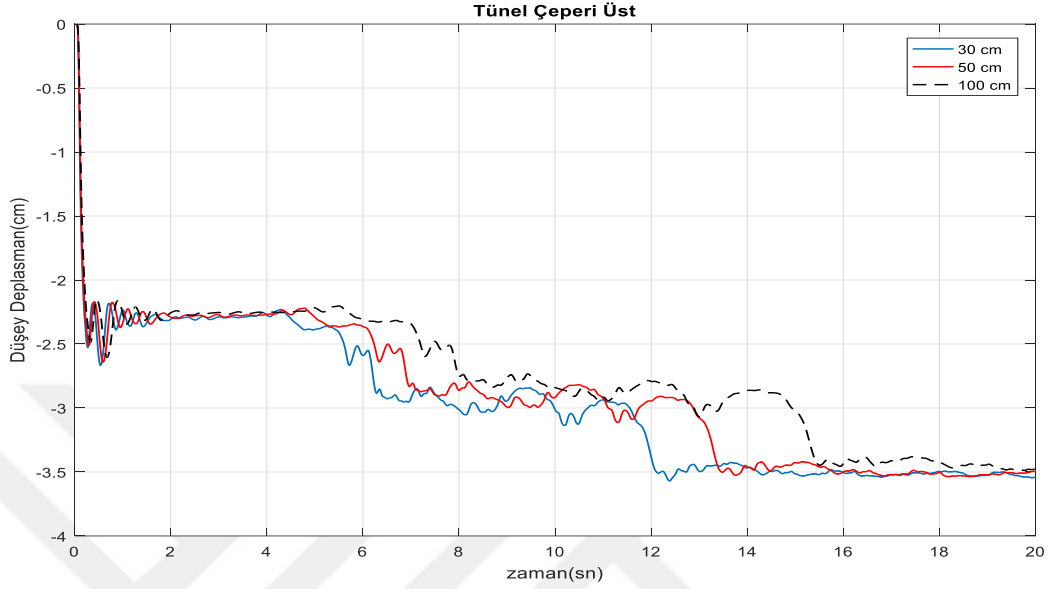
Şekil 7.16. (Devam) Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) kayma gerilmesi d) hız.

Şekil 7.17.'de gösterilen yatay deplasmanlara göre incelenen tünel çeperinde oluşan yatay deplasmanlarda üst noktada alt noktaya göre azalma görülmüştür. Bu azalış kalınlığın artmasıyla da olmuştur.

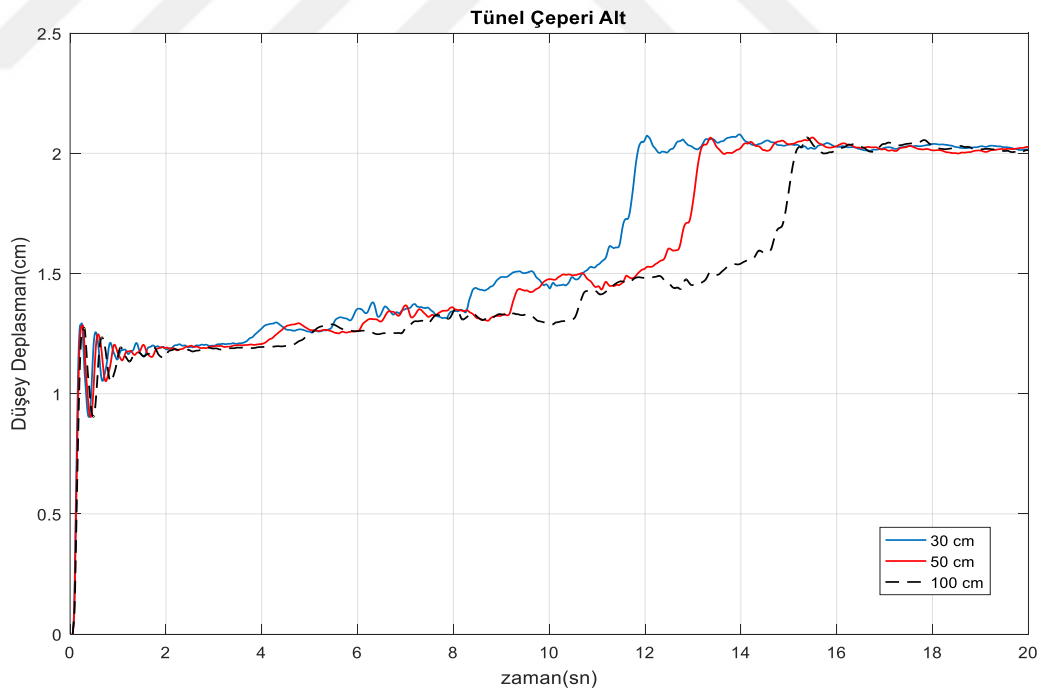


Şekil 7.17. Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.

DüŖey deplasmanlar ise Ŗekil 7.18’de verilmiŖtir. Tünel çeperinde alt noktada yaklaŖık 2 cm’lik bir kabarma olurken, tünel çeperi üst noktada ise 3 cm’lik bir çökme görölmektedir. Kalınlıkların deęiŖimi düŖey deplasman değerini fazla etkilememiŖtir.



a)



b)

Ŗekil 7.18. Mohr-Coulomb modelde farklı kalınlıklardaki tünellerde tünel çeperindeki düŖey deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.

7.2. Finn-Byrne Modeli Analiz Sonuçları

Finn-Byrne modeli sıvılaşma analizleri için geliştirilmiştir. Model zemin içerisindeki boşluk suyunun sismik yükler altında değişimini hesaplamaktadır. Bu bölümde farklı derinlik ve farklı çaptaki tüneller için Sakarya ve El Centro depremleri için yapılan sıvılaşma analizleri yer almaktadır. Unutmaz'ın sıvılaşan zeminlerde inşa edilen tüneller için yaptığı çalışmada tünel kalınlığının sıvılaşma üzerinde etkisinin olmadığını belirtmiştir (Unutmaz, 2014). Bu bölümde tünel kalınlıkları yer almamaktadır.

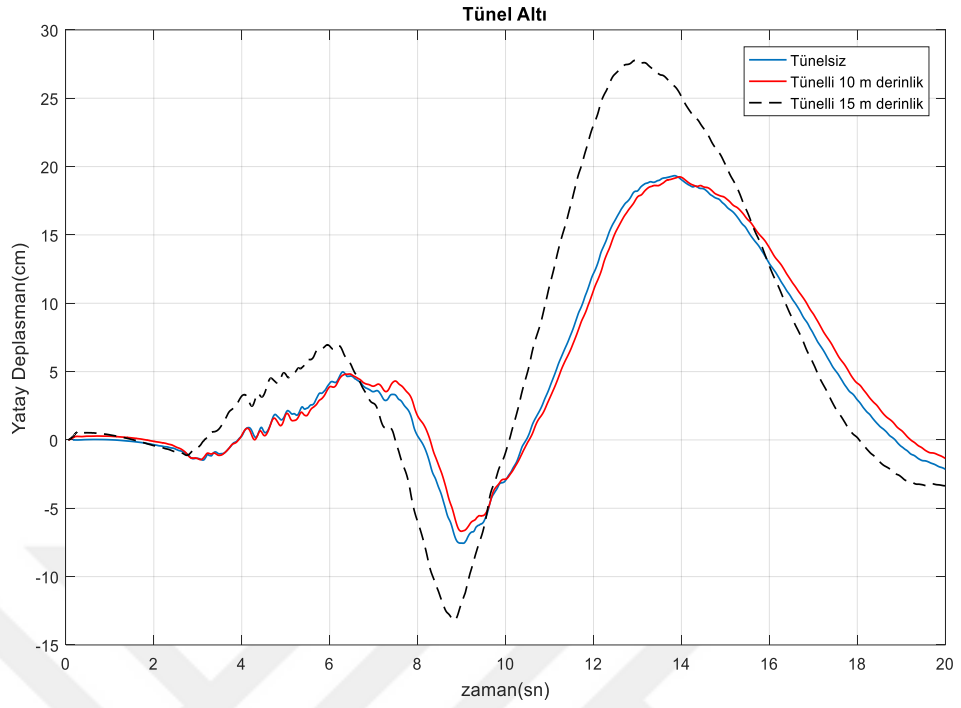
7.2.1. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sıvılaşma analiz sonuçları

Çalışma için Kocaeli depreminin en fazla etkilediği yerlerden biri olan Sakarya için kaydedilen ivme değerleri kullanılmıştır. 17 Ağustos 1999 depreminin magnitüt olarak büyüklüğü 7.4 olarak ölçülmüştür. Yaşanan depremde Sakarya'da sıvılaşmadan kaynaklı bir çok hasar oluşmuştur.

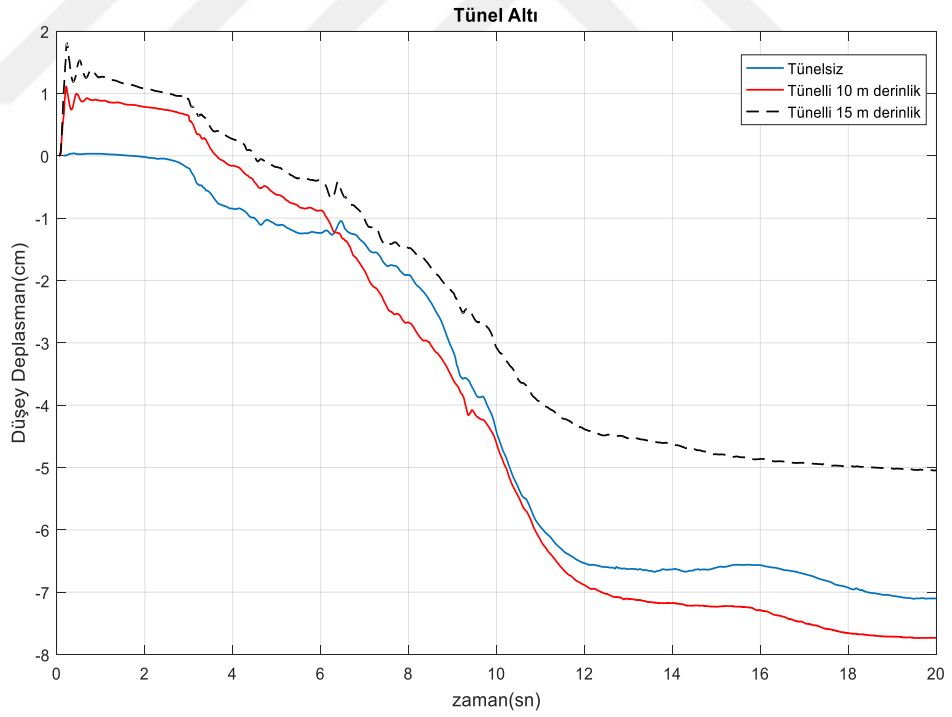
7.2.1.1. Farklı derinlikteki tünellerin sıvılaşma analiz sonuçları

Nümerik modelde tüneller 10 m ve 15 m derinlikte olarak modellenmiştir. Bu durumlarda zemin içerisinde oluşan yatay deplasman, düşey deplasman ve boşluk suyu basınçları bu kısımda yer almaktadır.

Farklı derinlikteki tüneller için tünel altındaki yatay deplasman, düşey deplasman ve boşluk suyu basıncı değerleri Şekil 7.19.'da verilmiştir. Bu grafiklere göre sıvılaşan zeminlerde yatay deplasman tünel altındaki nokta için en fazla 15 m derinlikteki tünelde görülmüştür. Düşey deplasmanlarda ise en az deplasman 15 m derinlikteki tünelde görülmüştür.

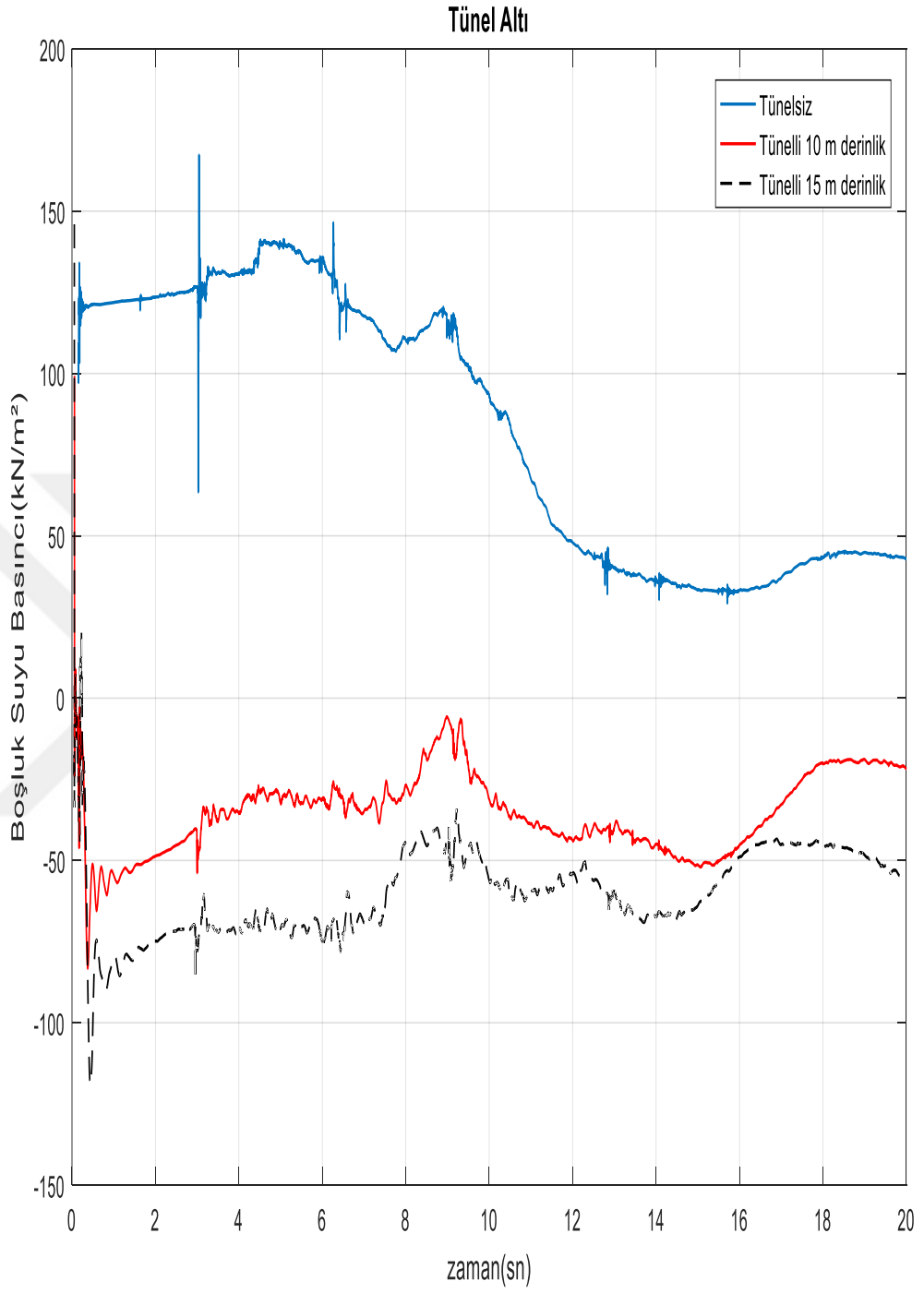


a)



b)

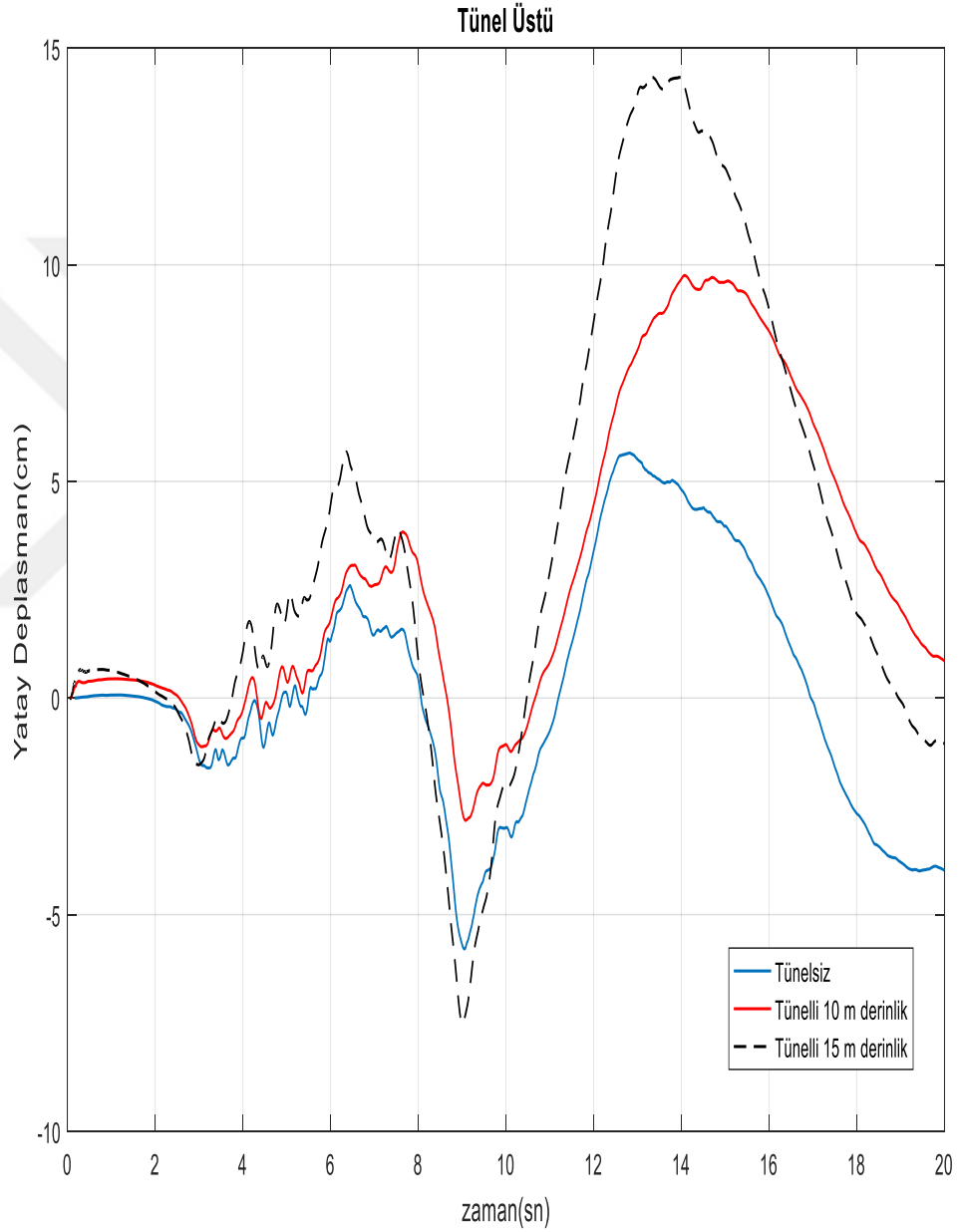
Şekil 7.19. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel altı noktasındaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



c)

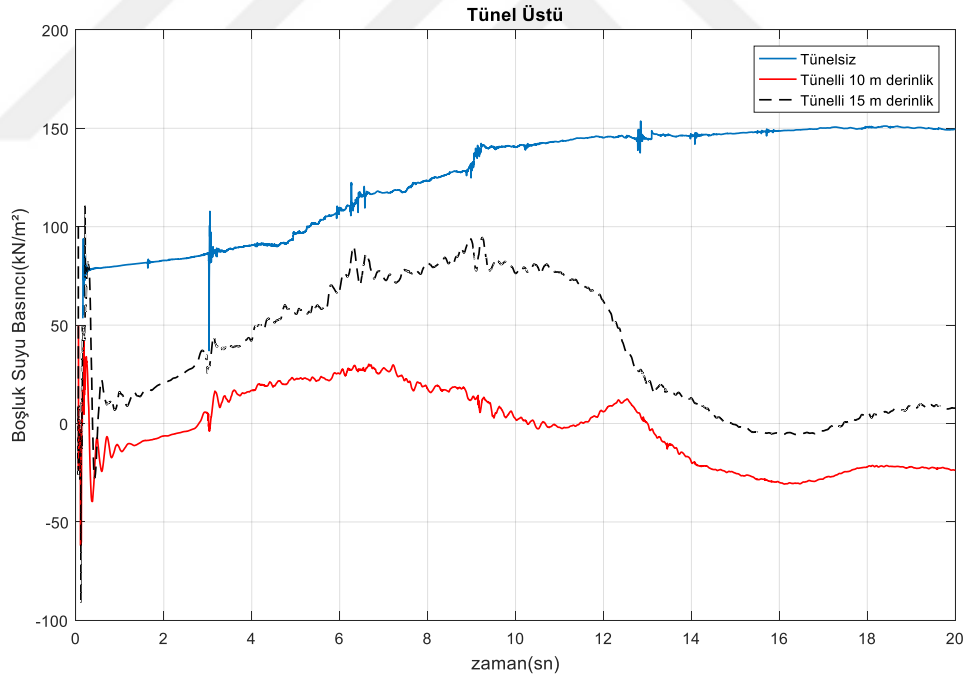
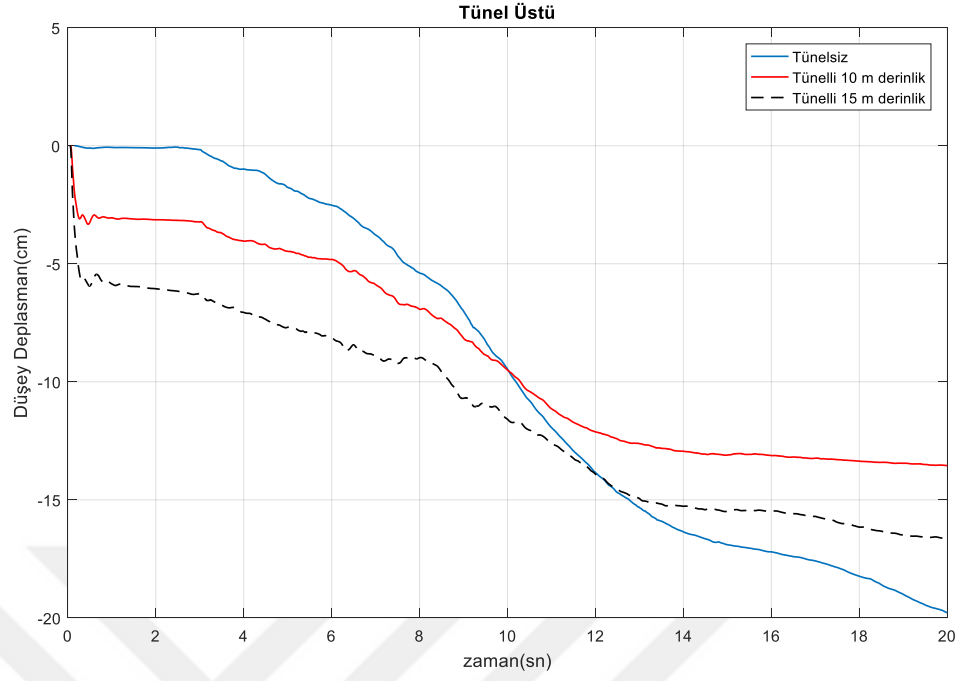
Şekil 7.19. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

Şekil 7.20.'de tünel üstü noktadaki analiz sonuçları verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre düşey deplasmanlarda 10 m derinlikteki ve 15 m derinlikteki tünellerde tünelsiz duruma göre daha az düşey deplasman olmuştur. Boşluk suyu basınçları ise tünelsiz durumda diğer durumlara göre daha yüksektir.



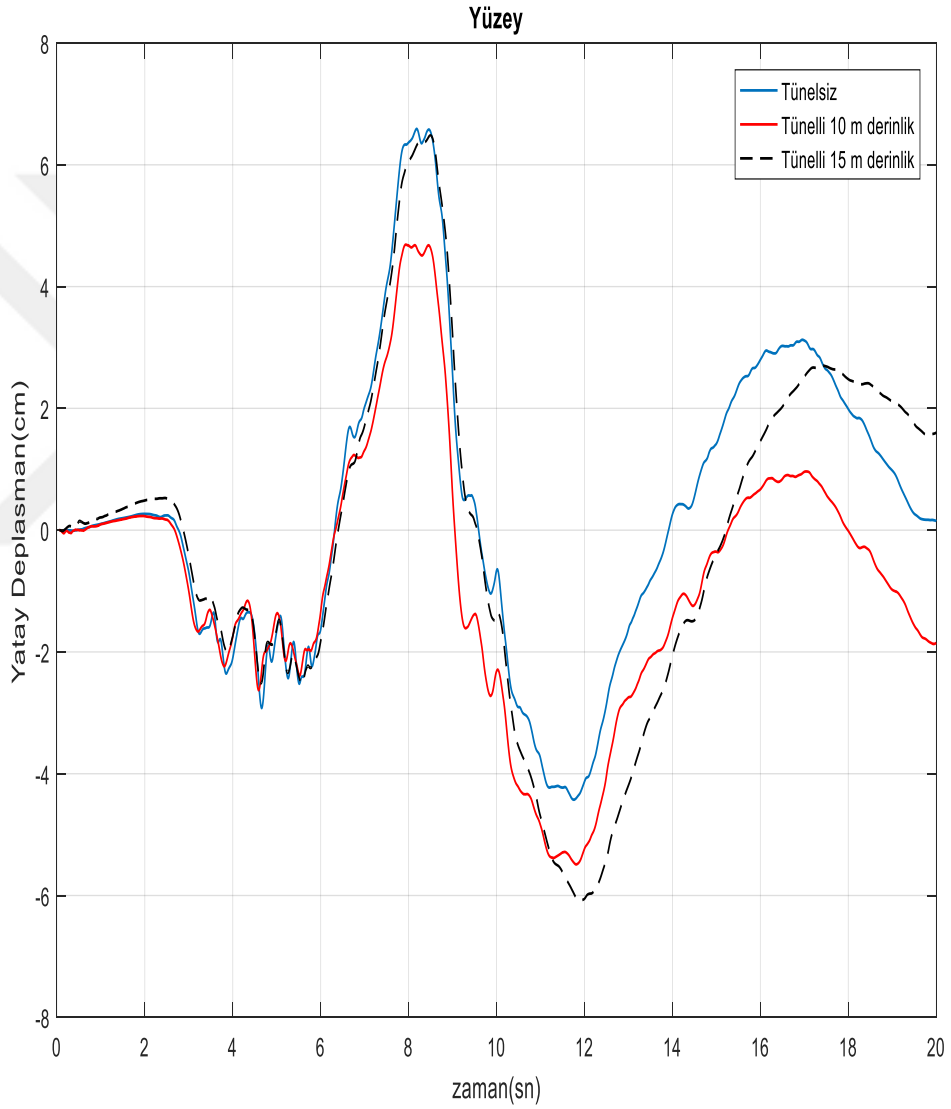
a)

Şekil 7.20. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



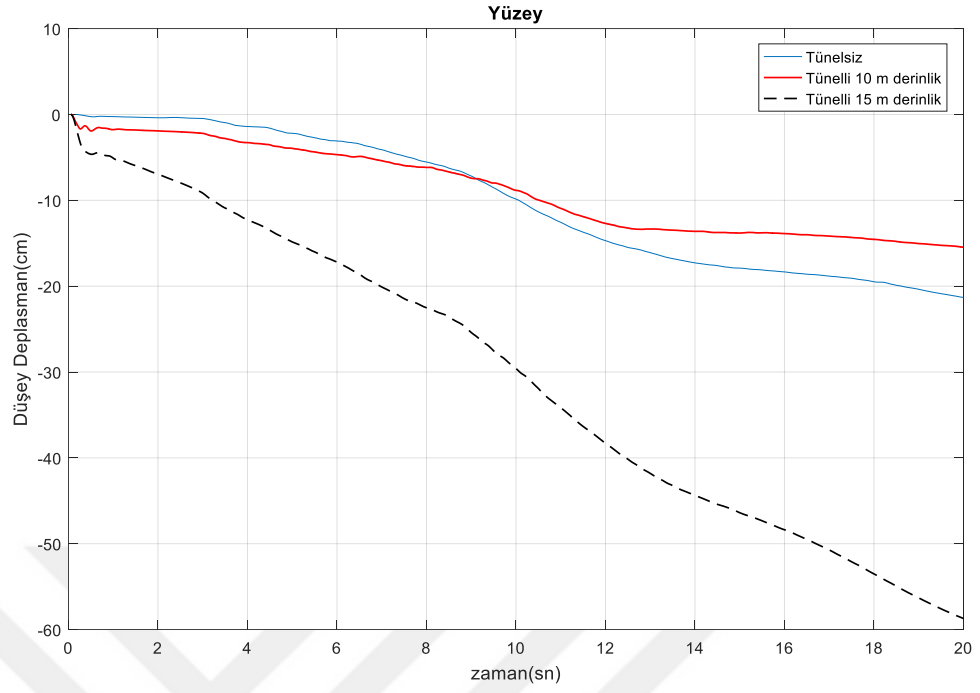
Şekil 7.20. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

10 m derinlikte, 15 m derinlikte ve tünelsiz modeller için yüzeydeki yatay deplasman, düşey deplasman ve boşluk suyu basıncı grafikleri Şekil 7.21.'de verilmiştir. Bu grafiklere göre düşey deplasman en fazla 60 cm ile 15 m derinlikteki tünelde oluşmuştur. Boşluk suyu basınçları ise en yüksek değeri 10 m derinlikteki tünelde almıştır. Bu durum sığ tünellerin sıvılaşma potansiyelinin derin tünellere göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

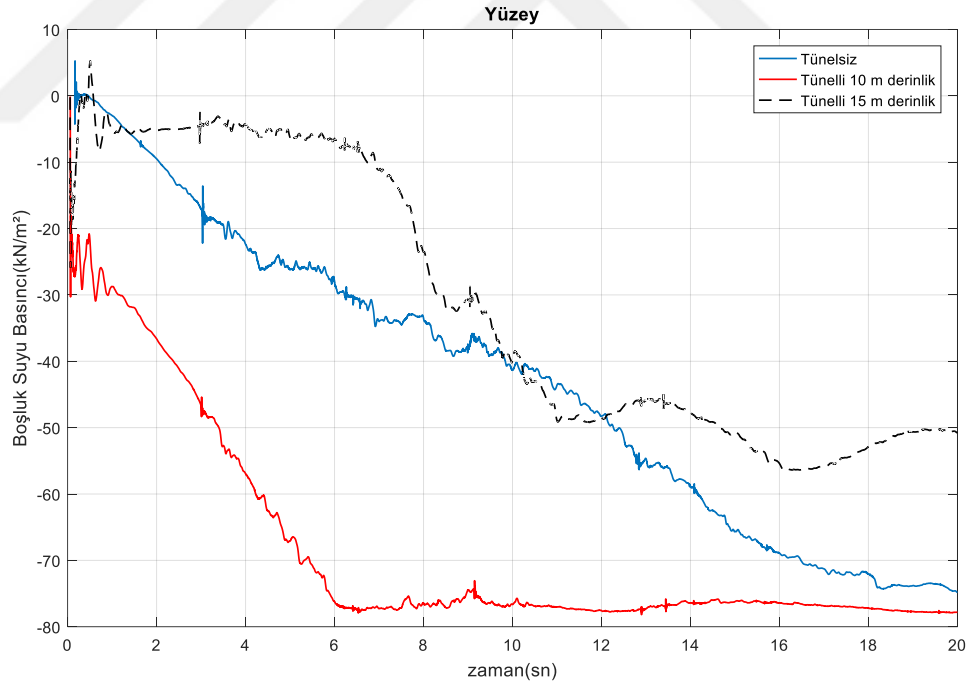


a)

Şekil 7.21. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



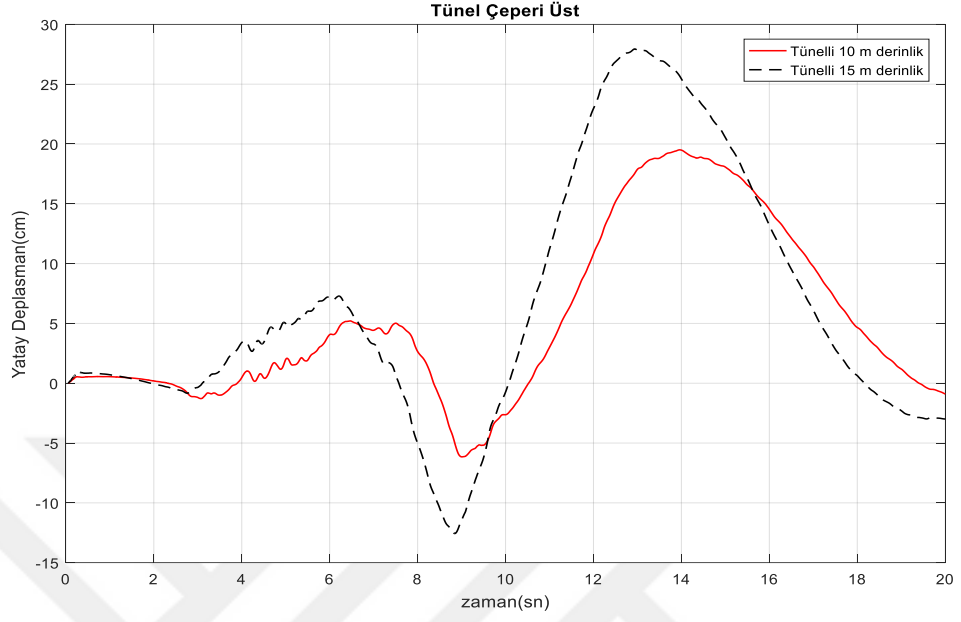
b)



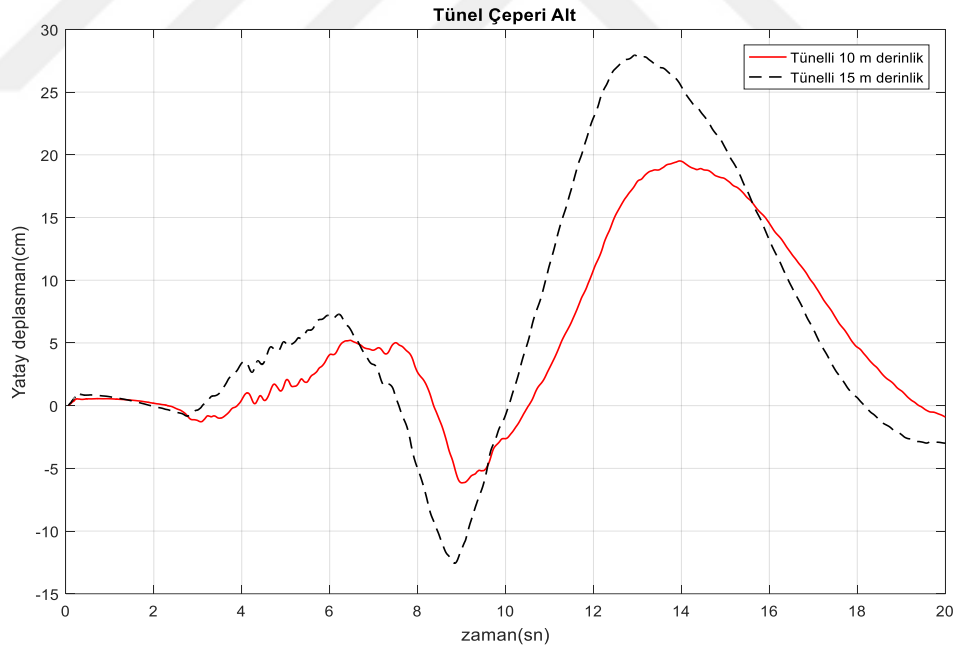
c)

Şekil 7.21. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

Şekil 7.22.'de tünel çeperindeki noktalarda oluşan yatay deplasmanlar tünel çeperi alt ve üst noktalar için 15 m derinlikteki tünelde daha fazla yatay deplasman olmuştur.

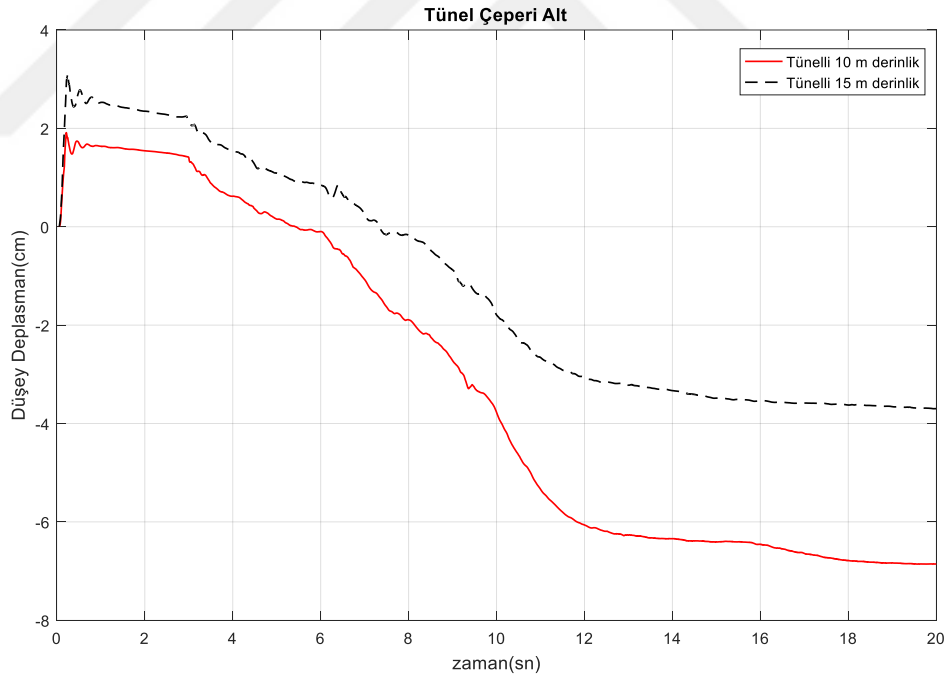
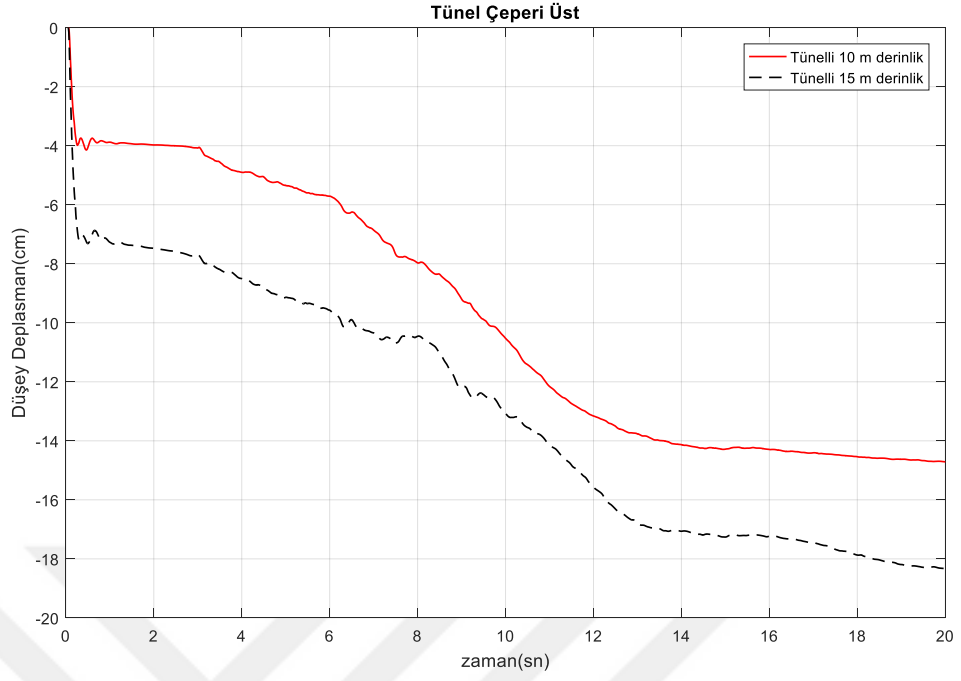


a)



b)

Şekil 7.22. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.



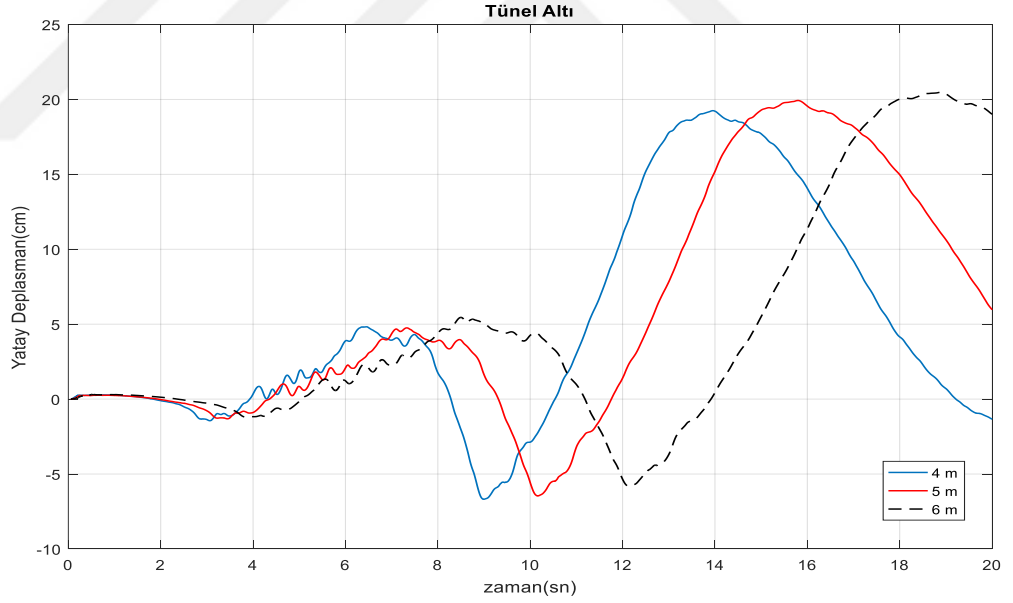
Şekil 7.23. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.

Tünel çeperindeki noktaların düşey deplasmanları şekil 7.23.'de gösterilmektedir. Bu grafiklere göre düşey deplasmanlar tünel çeperi alt noktada 10 m derinlikteki tünelde daha fazla iken tünel çeperi üst noktada 15 m derinlikteki tünelde daha fazladır.

7.2.1.2. Farklı çaptaki tünellerin sıvılaşma analiz sonuçları

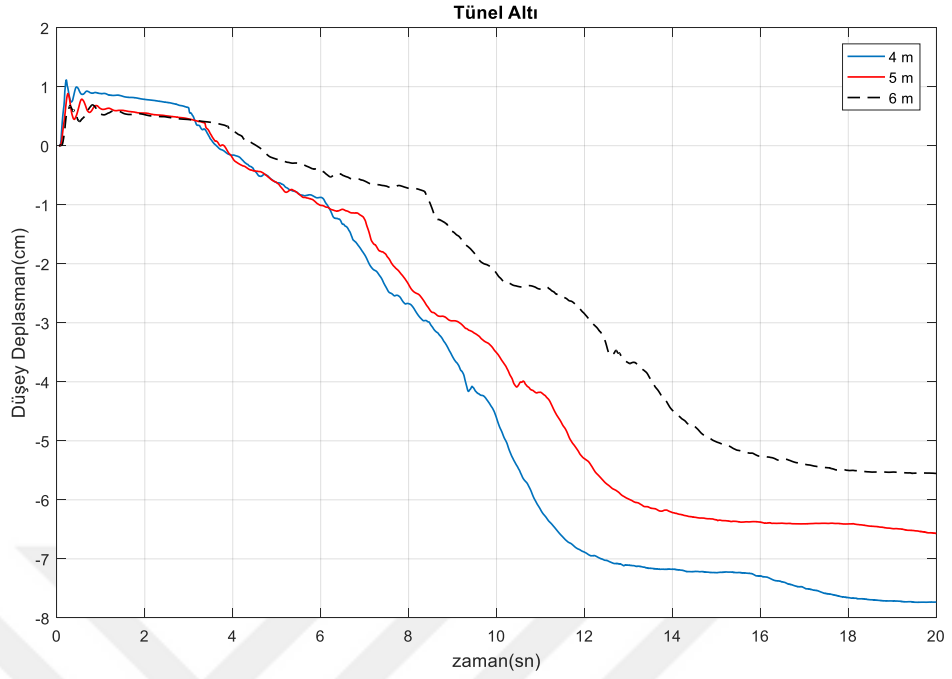
Nümerik analizlerde sıvılaşma modeli için seçilen çaplar 4 m, 5 m ve 6 m'dir. Bu çaplardaki tünellerde depremin etkisiyle sıvılaşma durumunda meydana gelen yatay deplasman, düşey deplasman ve boşluk suyu basınçları bu kısımda yer almaktadır.

Farklı çaplardaki tüneller için tünel altı noktadaki yatay deplasman, düşey deplasman ve boşluk suyu basıncı grafikleri Şekil 7.24.'de verilmiştir. Çapın artmasıyla birlikte yatay deplasmanlarda 2'şer cm'lik artış olmuştur. Düşey deplasmanlarda ise 6 m çaplı tünelde en az deplasman olmuştur. Boşluk suyu basınçları ise 5 m tünel için değeri diğerlerine yakın olmasına karşılık sadece yön değiştirmiştir.

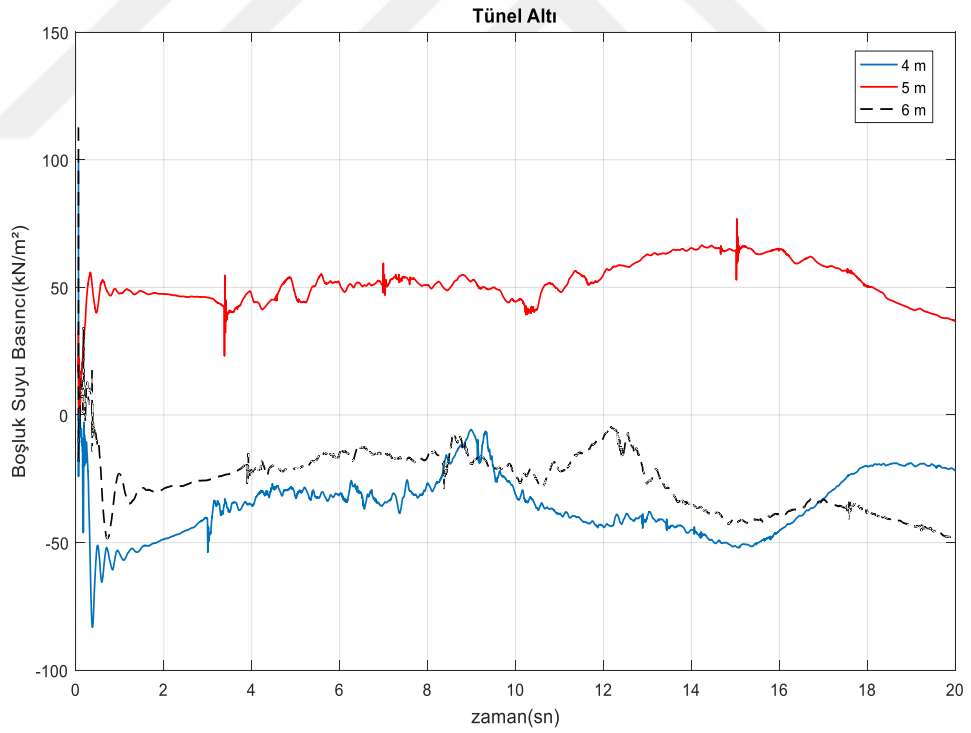


a)

Şekil 7.24. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



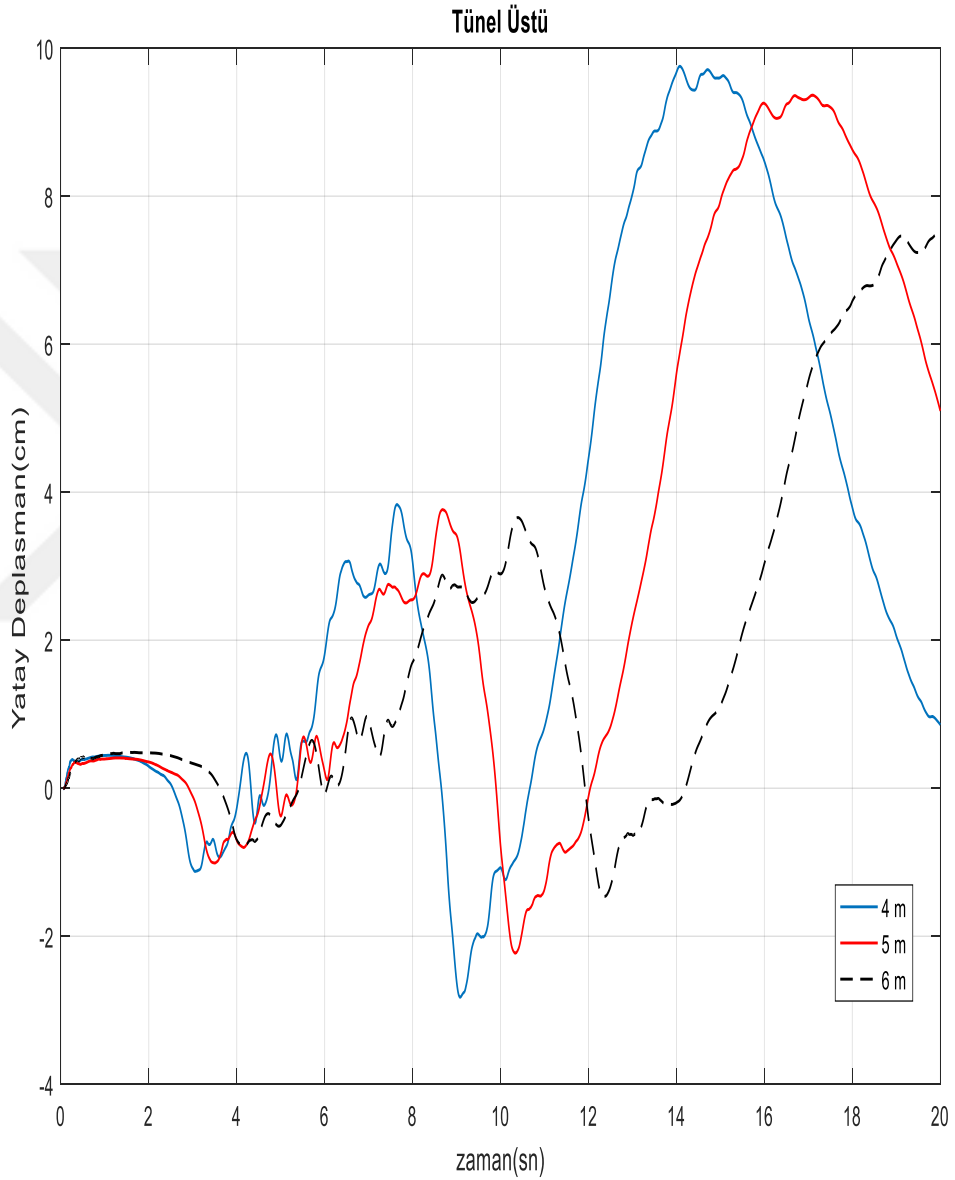
b)



c)

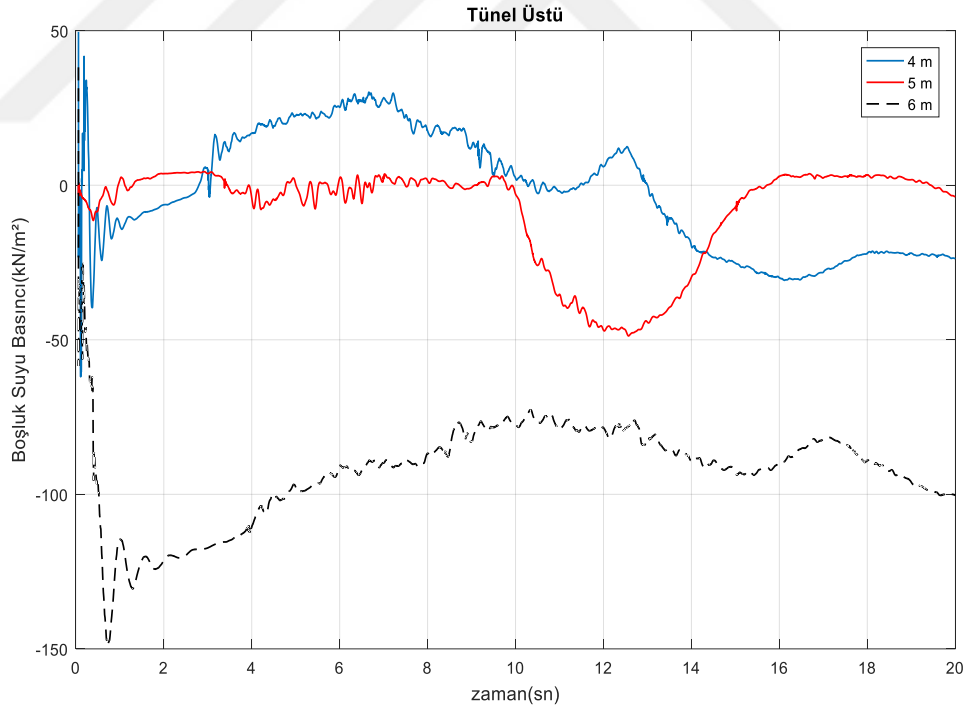
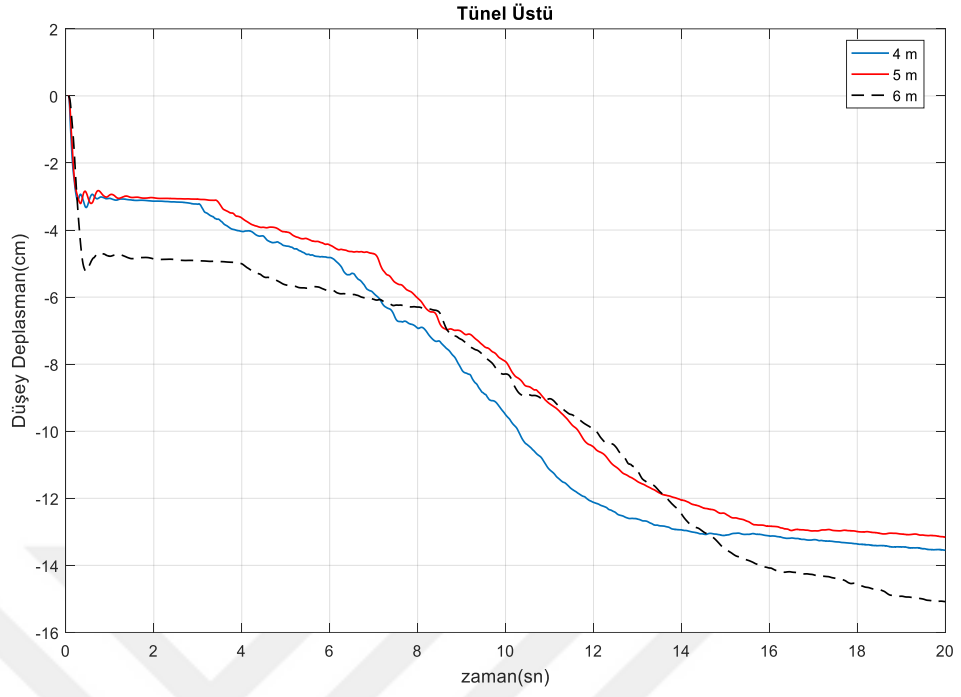
Şekil 7.24. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

Şekil 7.25.'de verildiği üzere tünel üstü noktada çapın artışıyla birlikte yatay deplasmanlarda azalma görülmüştür. Düşey deplasmanlar ise çapların artış sırasına göre 14 cm, 13 cm ve 15 cm olarak hesaplanmıştır. Boşluk suyu basınçları tünel altı noktaya göre 4 m çaptaki tünel için büyük bir değişiklik göstermezken 5 m çaptaki tünelde azalmış ve 6 m çaptaki tünel için artmıştır.



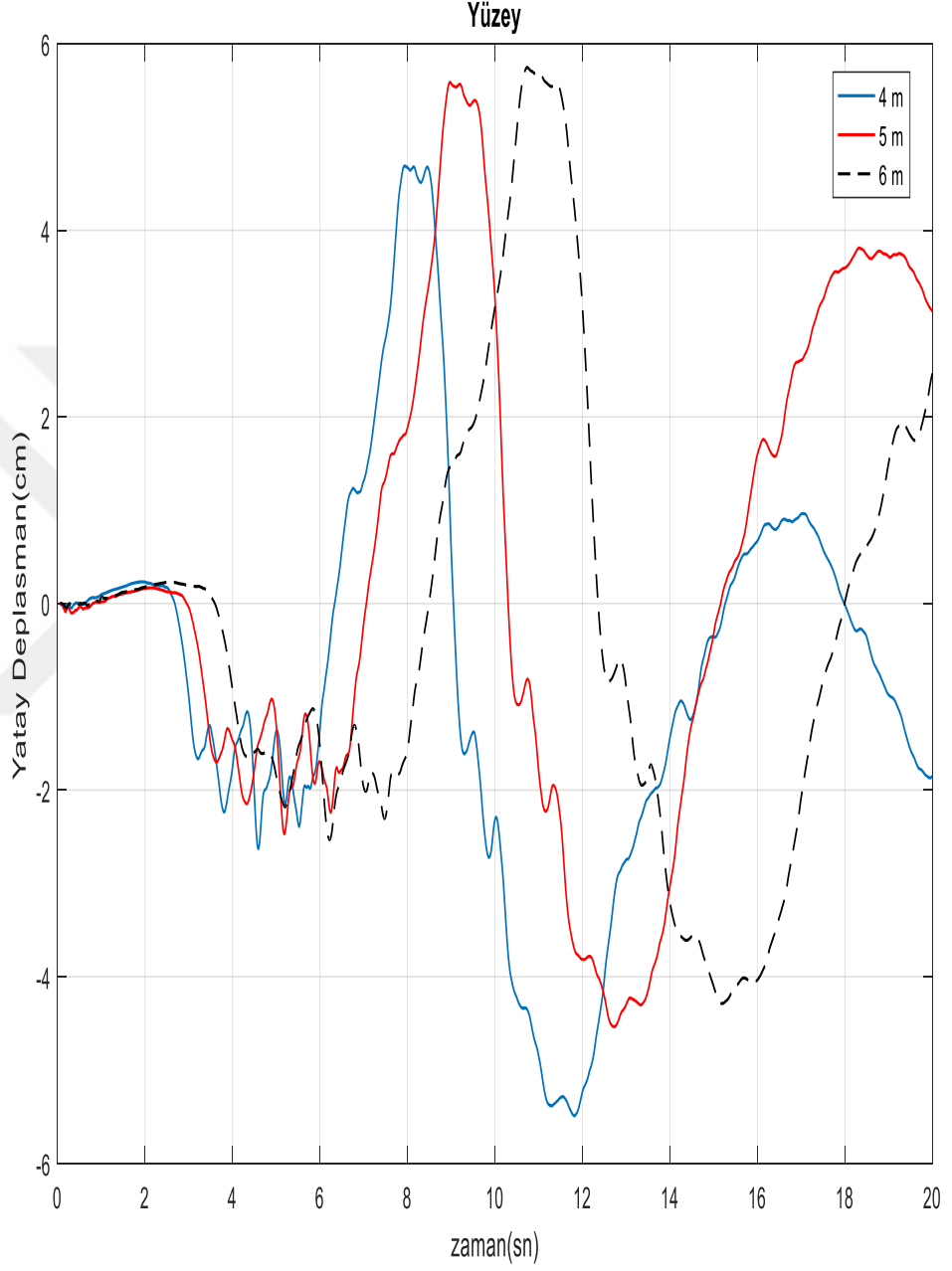
a)

Şekil 7.25. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman
b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



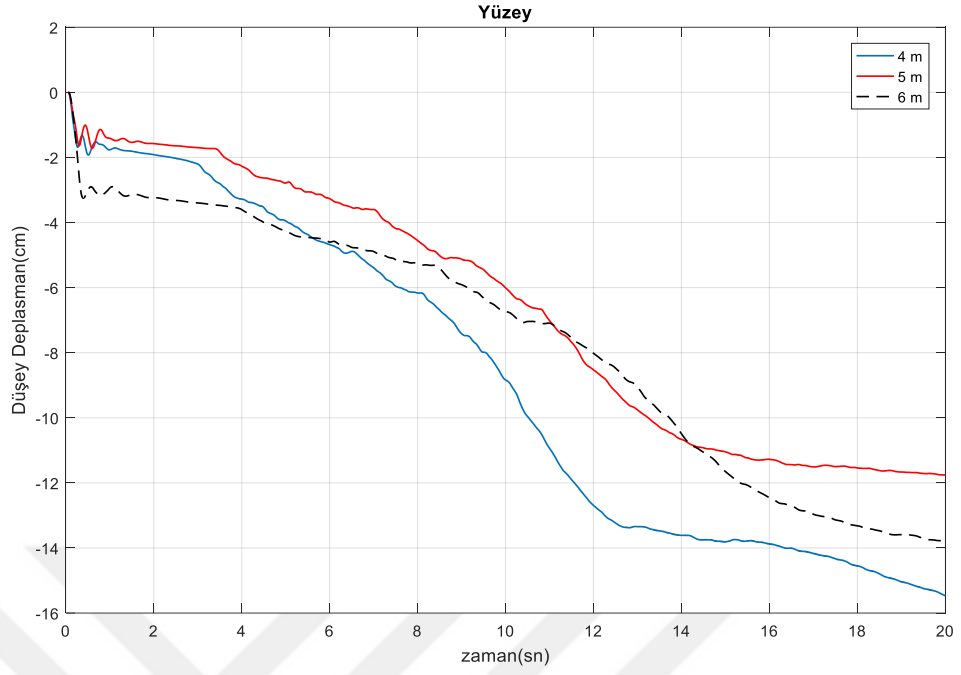
Şekil 7.25. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

Yüzeyde oluşan yatay deplasmanlar çapın artışıyla birlikte artmıştır. Düşey deplasmanlar ise en fazla 4 m çaptaki tünelde oluşmuştur. Boşluk suyu basınçları ise deprem sonunda üç çap içinde eşitlenmiştir. Şekil 7.26.'da bu grafiklere yer verilmiştir.

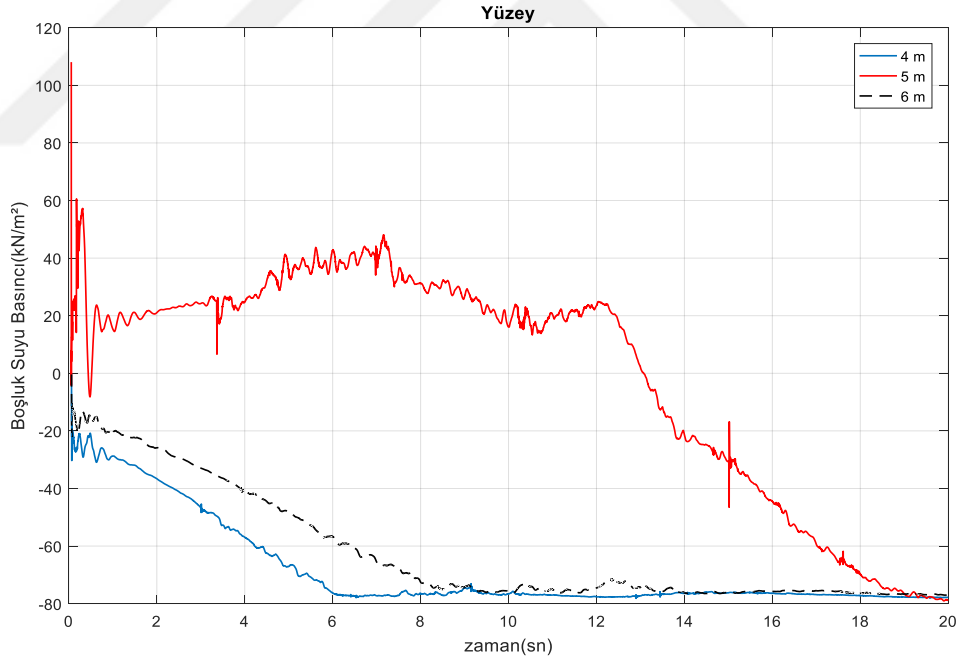


a)

Şekil 7.26. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



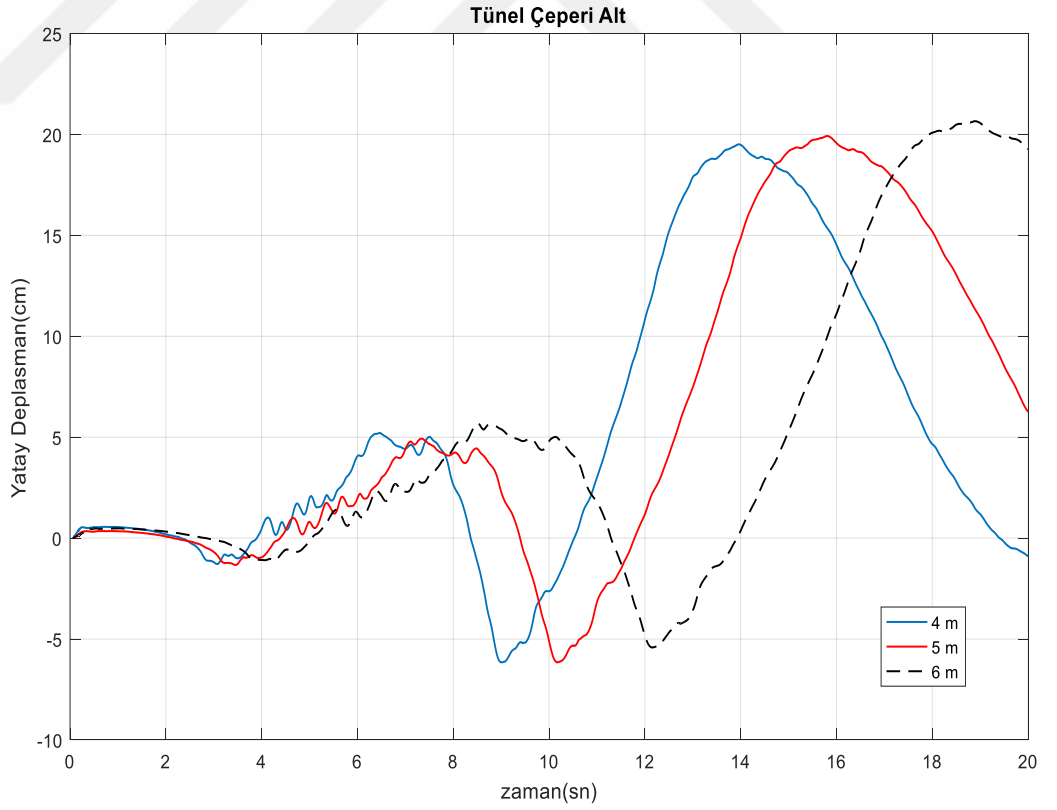
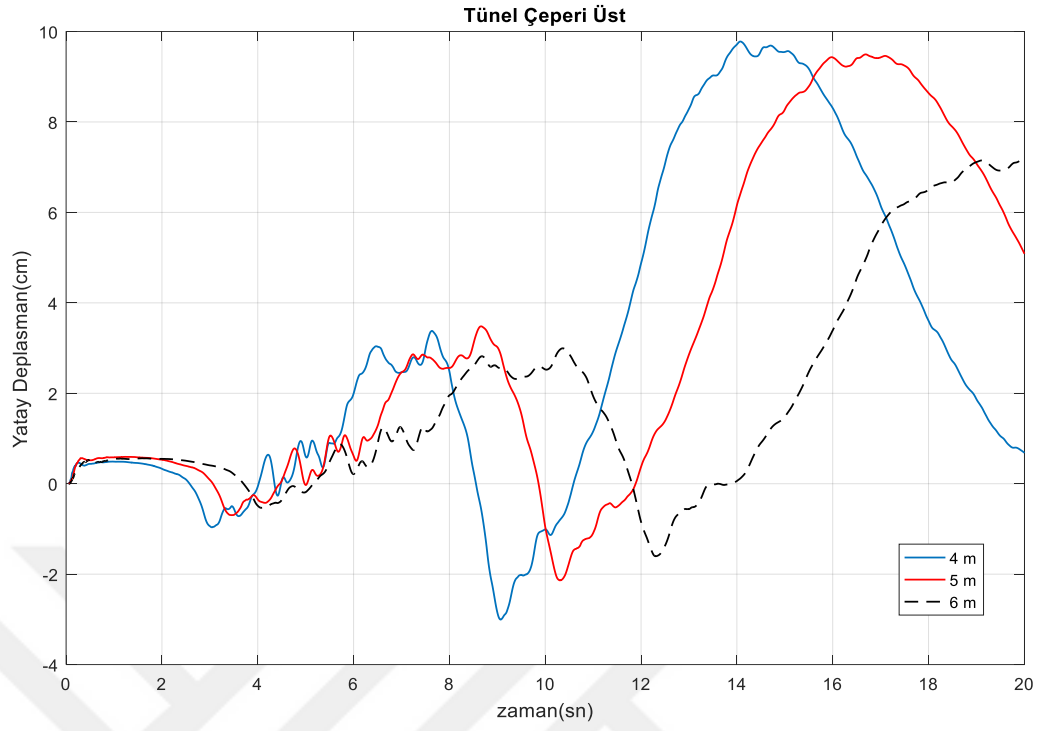
b)



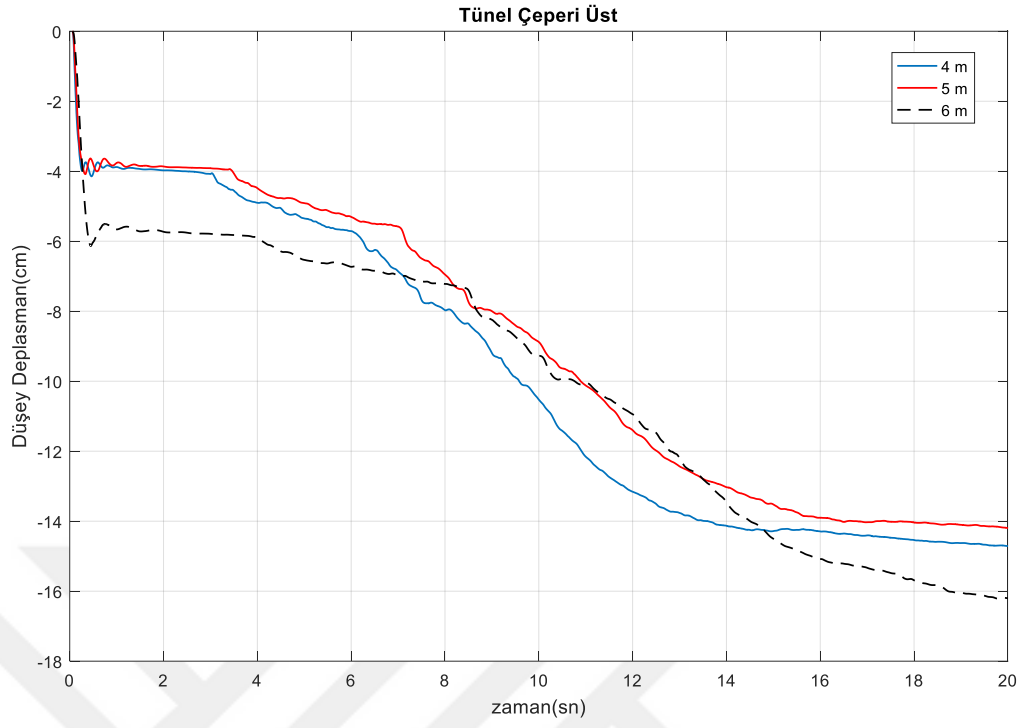
c)

Şekil 7.26. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

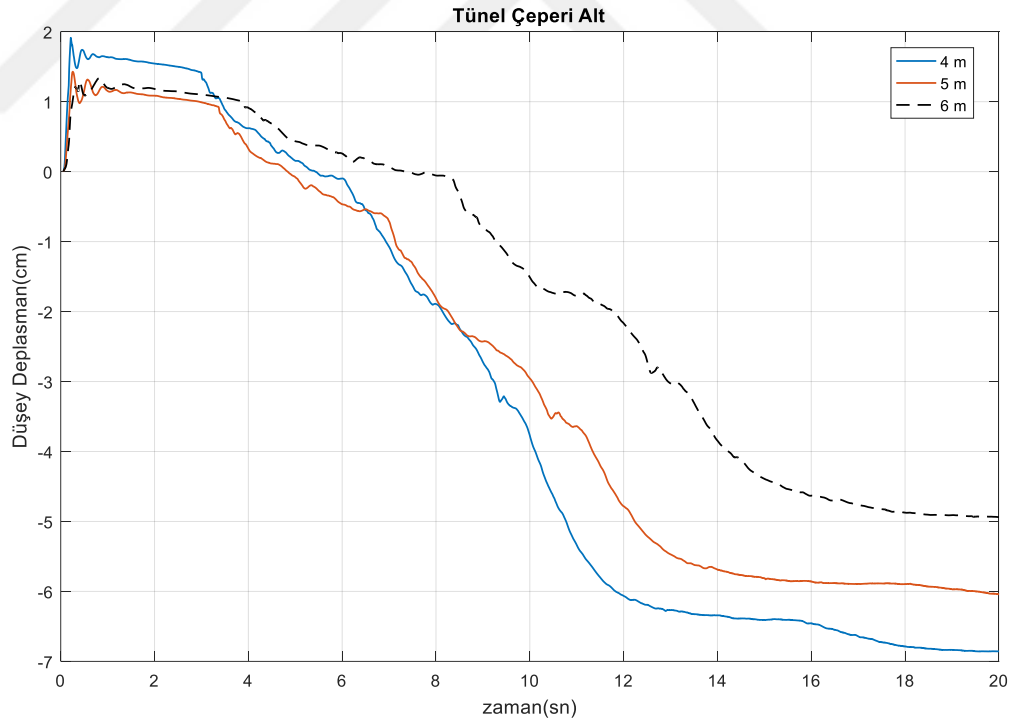
Şekil 7.27.'de yer alan grafiklere göre tünel çeperi üst noktada çapın artışıyla birlikte yatay deplasmanlar azalmıştır. Tünel çeperi alt noktada ise çapın artışıyla birlikte yatay deplasmanlar da artmıştır.



Şekil 7.27. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta
b) alt nokta.



a)



b)

Şekil 7.28. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasman sonuçları a) üst nokta
b) alt nokta.

DüŖey deplasmanlar ise yatay deplasmanların tersine çapın artışıyla birlikte tünel çeperi alt noktada azalmıştır. Tünel eperi üst noktada ise çapın artışıyla birlikte artmıştır. Ŗekil 7.28.'deki grafiklere göre tünel çeperi üst noktada en fazla deplasman 6 m çapındaki tünelde 16 cm olmuştur.

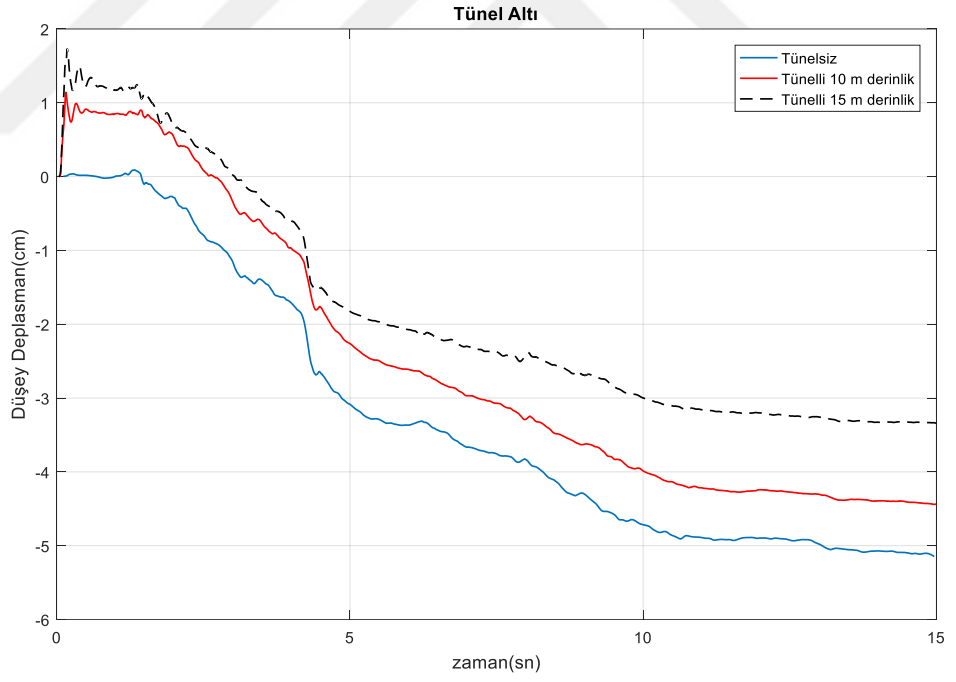
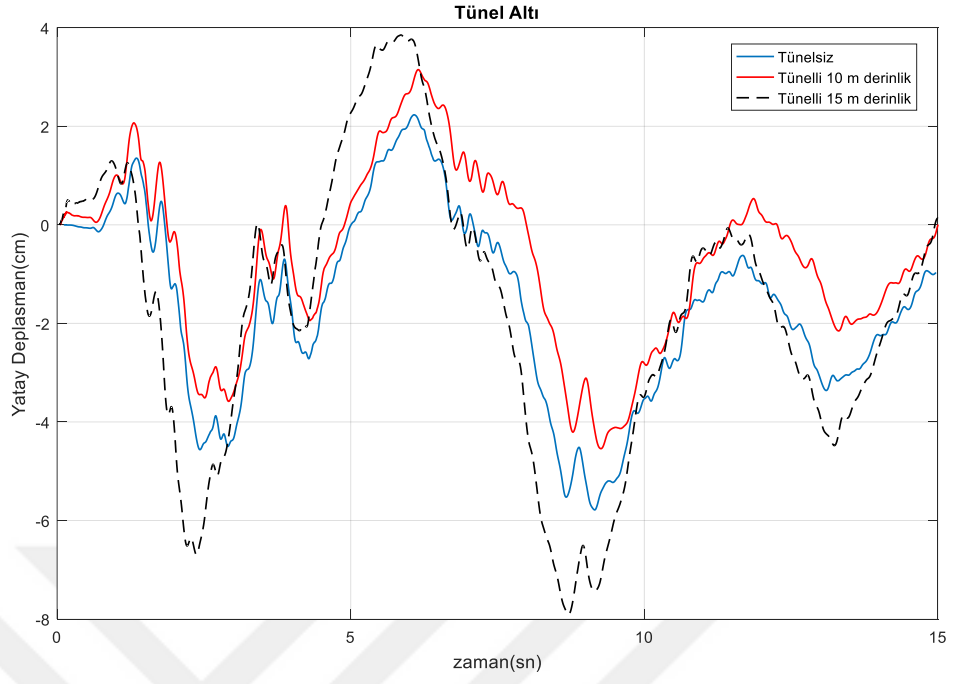
7.2.2. 18 Mayıs 1940 El Centro depremi sıvılaşma analiz sonuçları

18 Mayıs 1940 yılında Kaliforniya'da yaşanan depremde çok fazla can kaybı olmamasına rağmen yaşanan deprem çok fazla hasara neden olmuştur. Yaşanan bu depremin magnitüt olarak 7.1 büyüklüğündedir. Bu kısımda da oluşturulan modellere El Centro depremi uygulanarak analiz yapılmıştır.

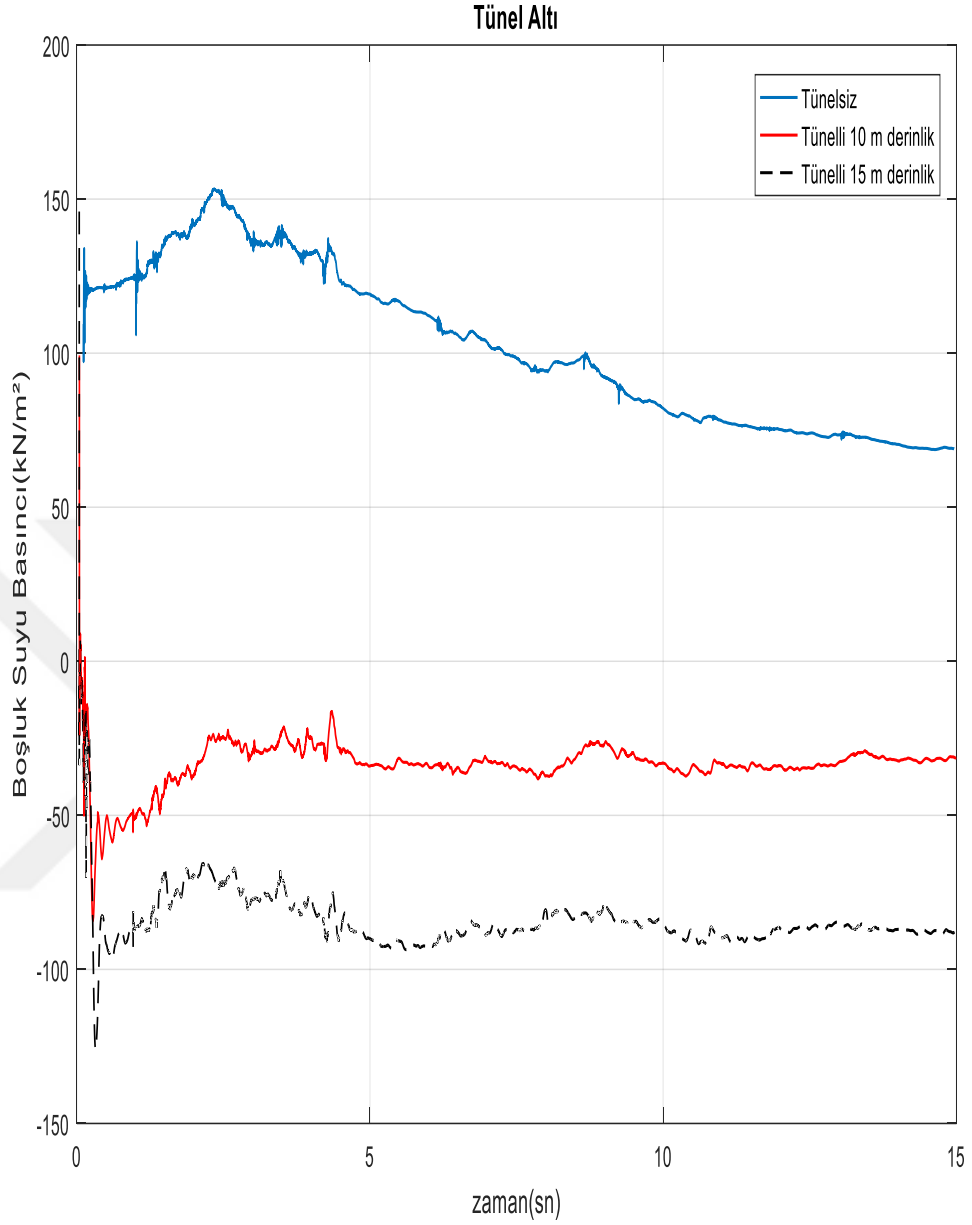
7.2.2.1. Farklı derinlikteki tünellerin sıvılaşma analiz sonuçları

El Centro depremi için 10 m derinlik ve 15 m derinlik için sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları bu bölümde yer almaktadır.

Ŗekil 7.29.'da görüldüğü üzere yatay deplasmanlar 15 m derinlikteki tünelde en fazladır. DüŖey deplasmanlar ise deprem sonunda tünelsiz modelde 5 cm, 10 m derinlikteki tünelde 4.5 cm ve 15 m derinlikteki tünelde yaklaşık 3 cm'lik bir deplasman olmuştur. Boşluk suyu basıncında ise tünelli modellerde tünelsiz modele göre azalmıştır.



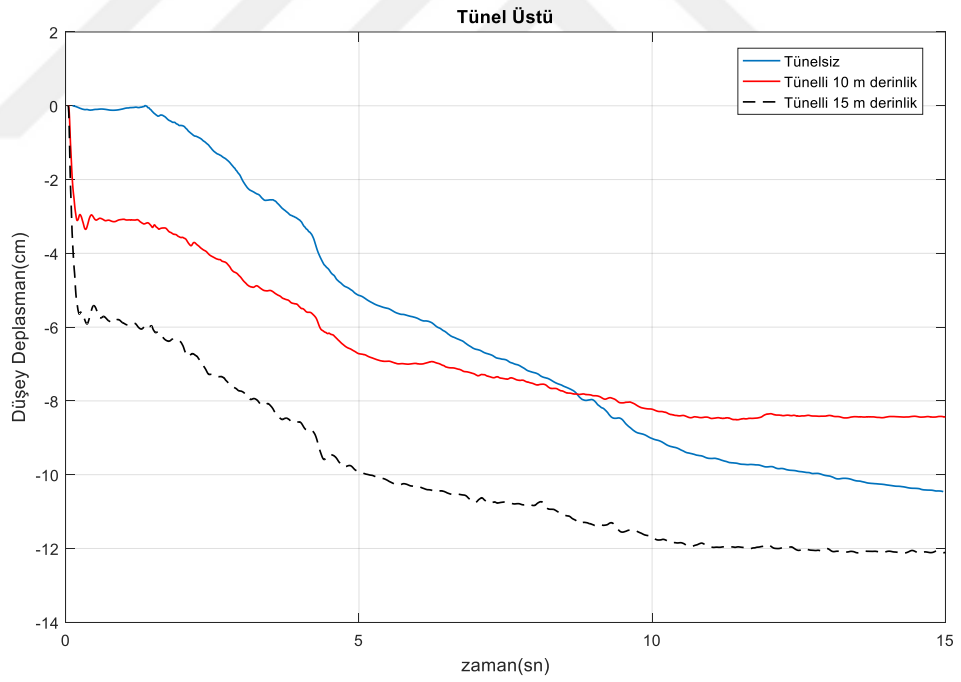
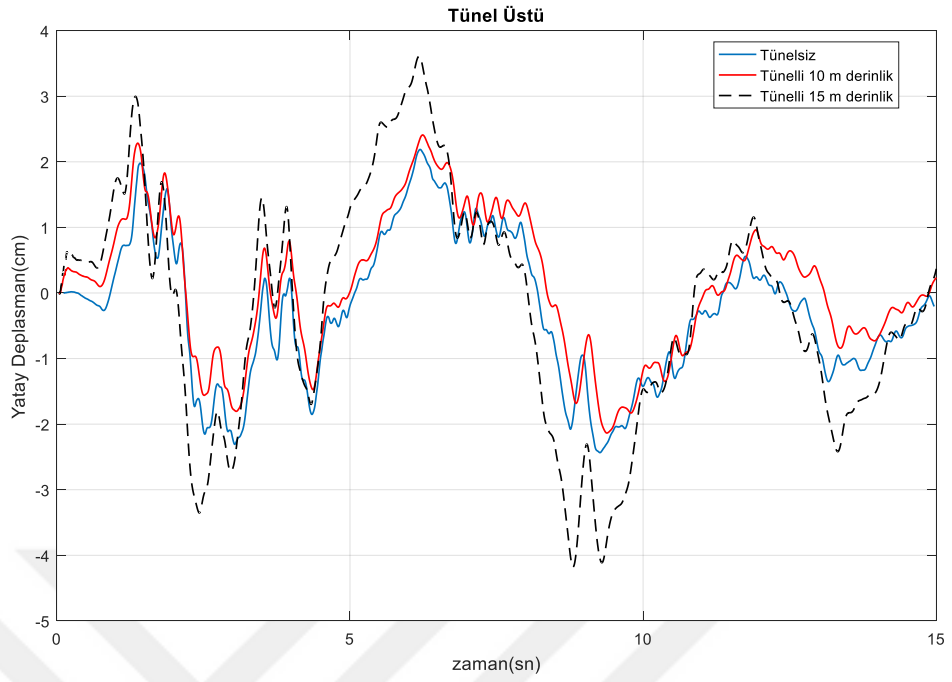
Şekil 7.29. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



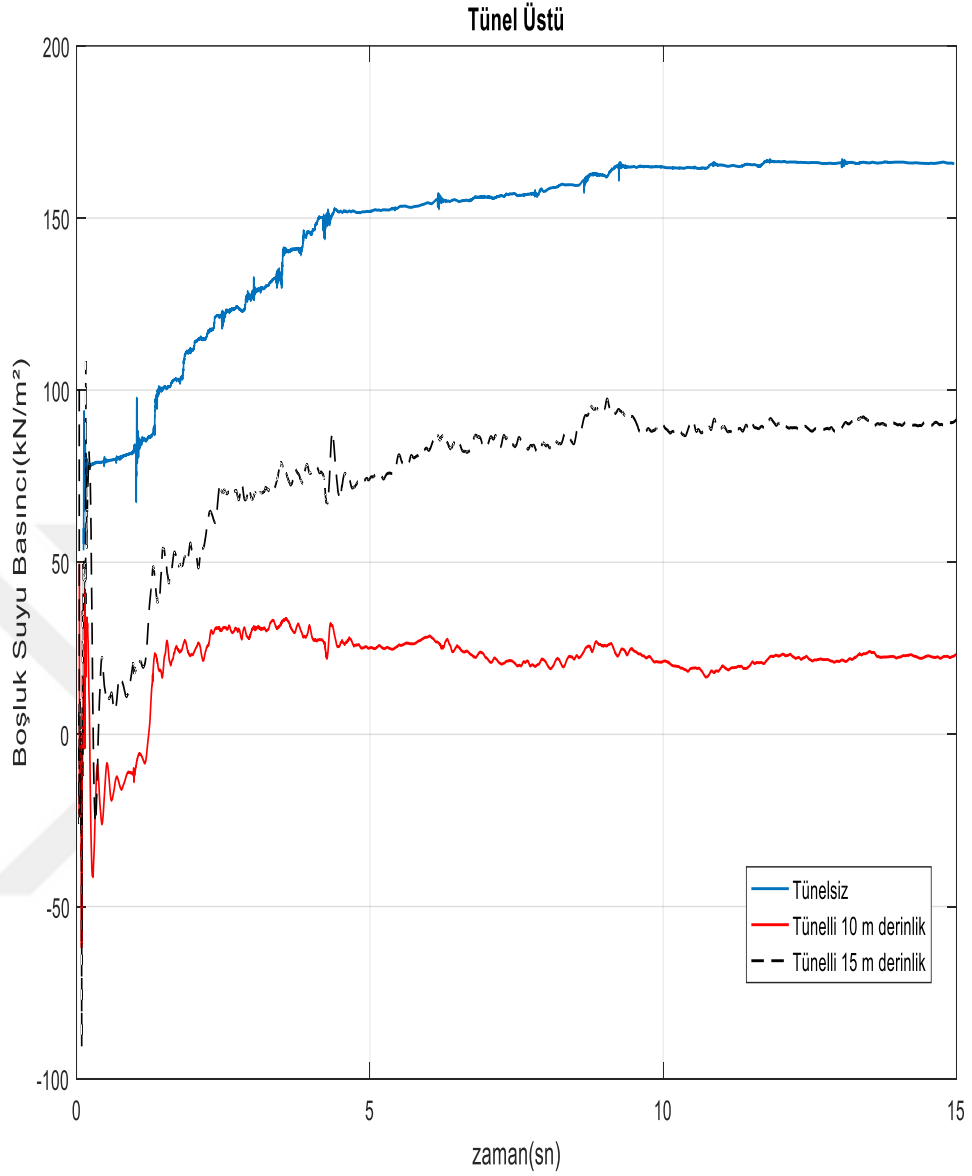
c)

Şekil 7.29. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel altı noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

Sıvılaşma analizlerine göre tünel üstü noktada oluşan deplasmanlar ve boşluk suyu basınçları Şekil 7.30.'da verilmiştir. Düşey deplasmanlar en fazla 15 m derinlikteki tünelde oluşmuştur. Boşluk suyu basıncı ise derin tünellerde sığ tünellere göre daha düşüktür.



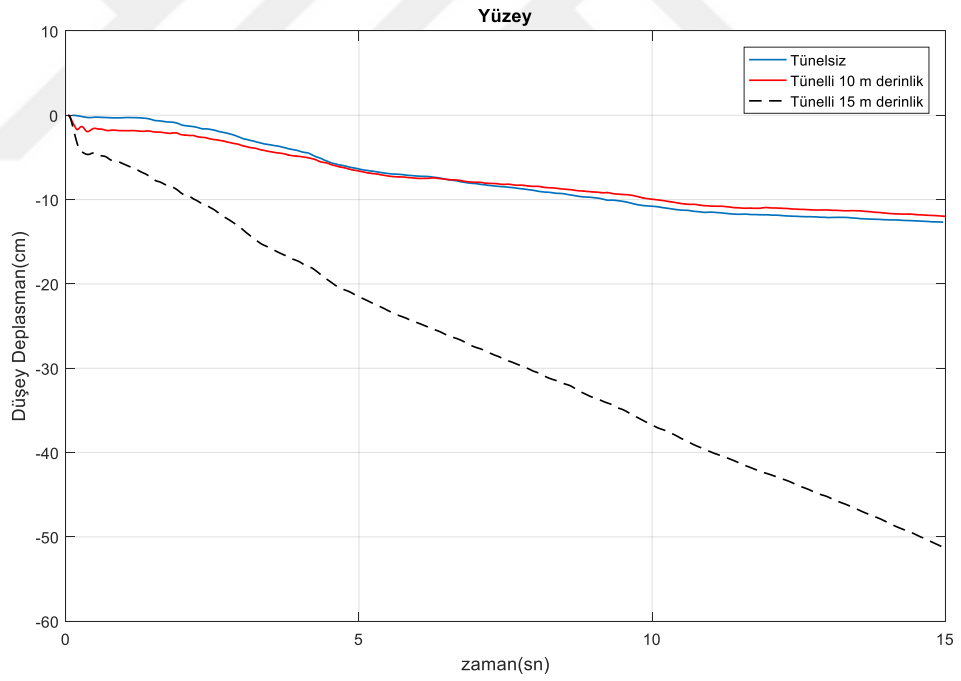
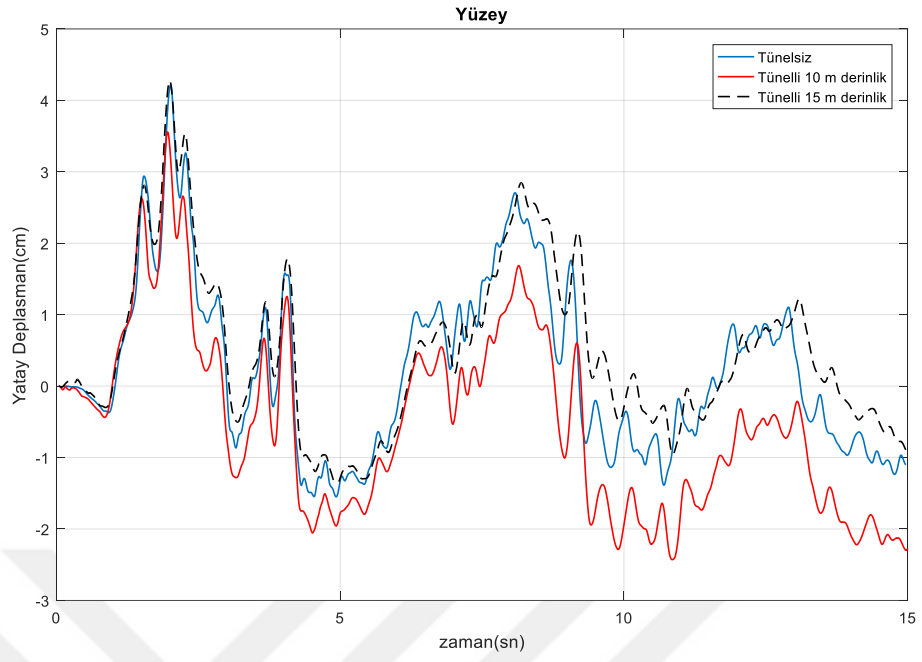
Şekil 7.30. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



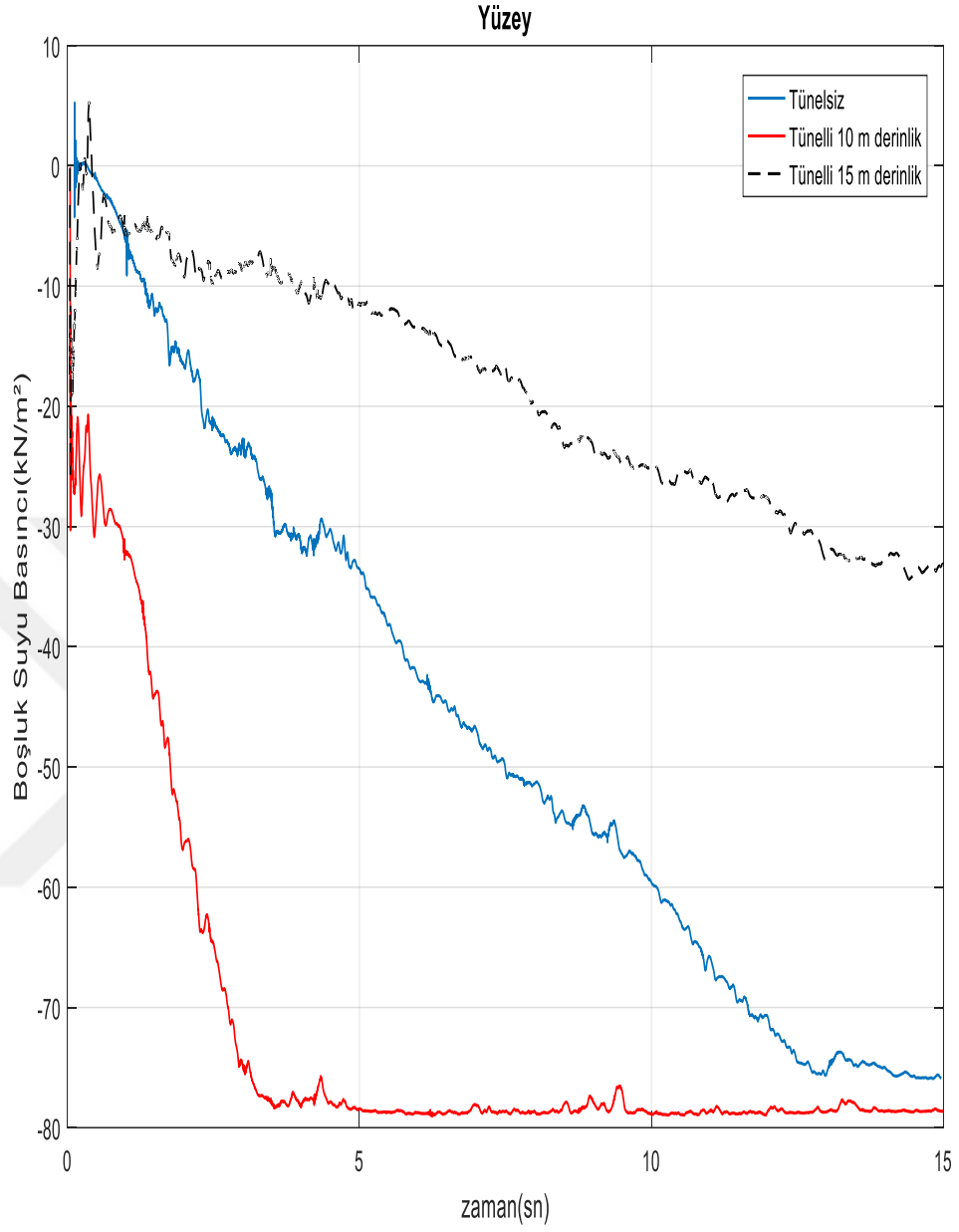
c)

Şekil 7.30. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

Şekil 7.31.'de yüzeyde oluşan boşluk suyu değerleri tünelin derinliğinin artmasıyla azaldığı görülmüştür. Düşey deplasmanlar ise Kocaeli depremine göre aynı noktada azalma görülmüştür. Yatay deplasmanlar ise en az 15 m derinlikteki tünelde olmuştur.



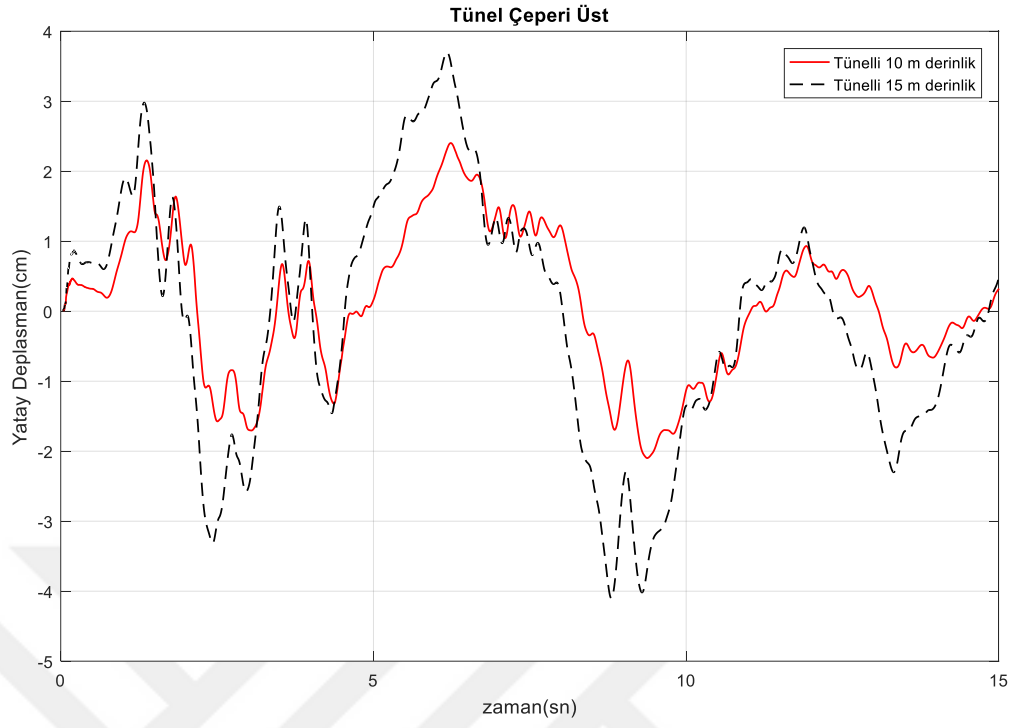
Şekil 7.31. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



c)

Şekil 7.31. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

Şekil 7.32.'de gösterilen tünel çeperinde oluşan yatay deplasman sonuçlarına göre deprem sırasında 15 m derinlikteki tünelde tünel çeperi üst noktada tünel çeperi alt noktaya göre daha az deplasman olmuştur. Bu durum 10 m derinlikteki tünelde de olmuştur.

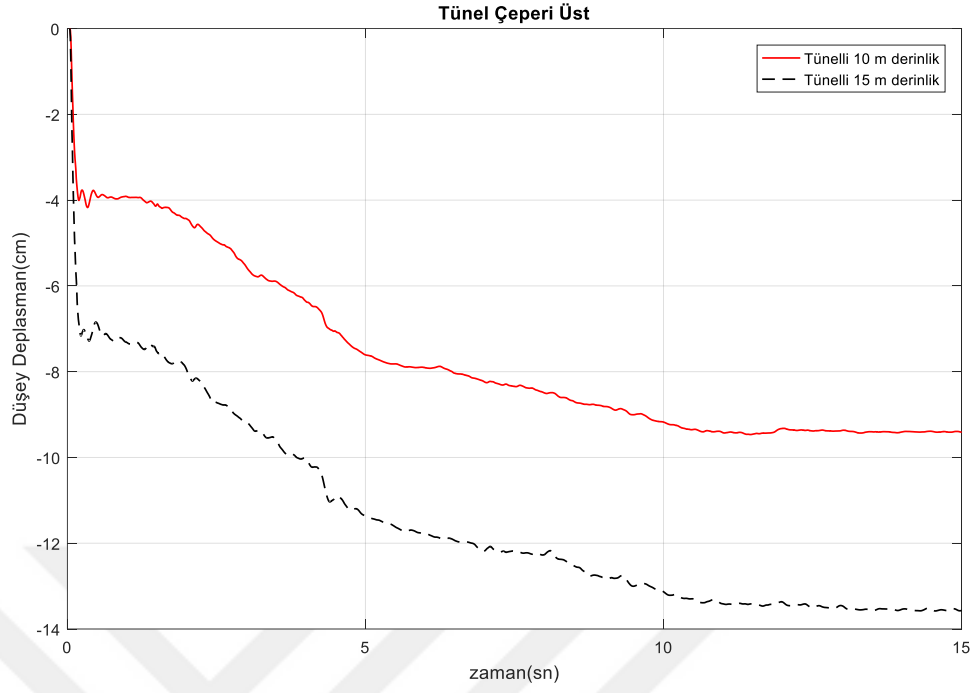


a)

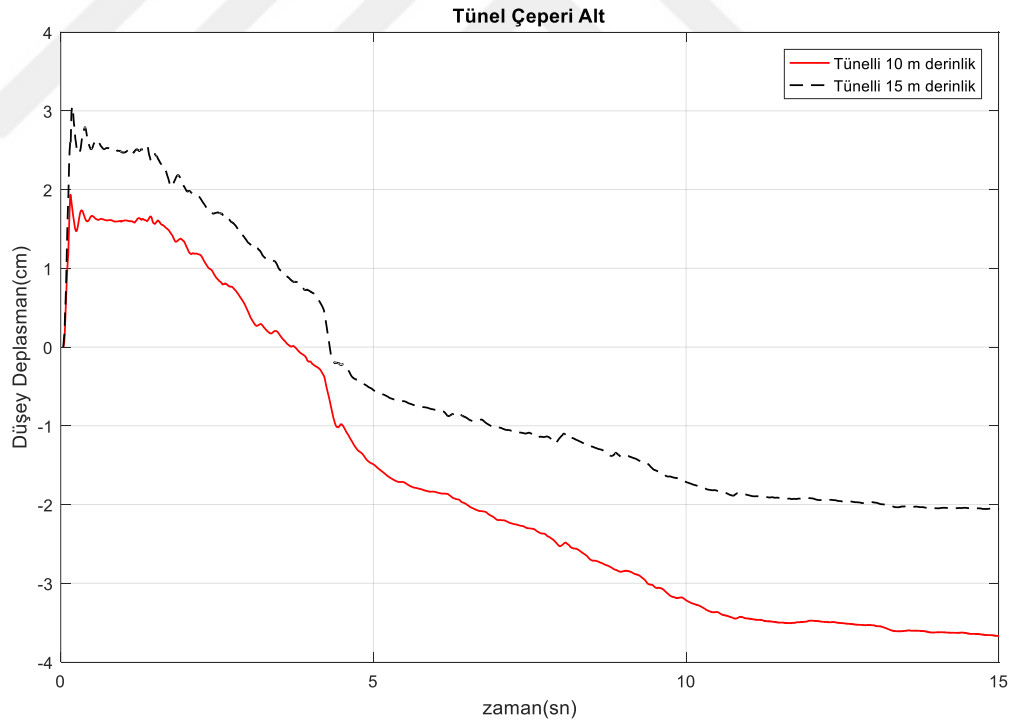


b)

Şekil 7.32. Sıvılaştırma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperi yatay deplasman sonuçları a) üst nokta
b) alt nokta



a)



b)

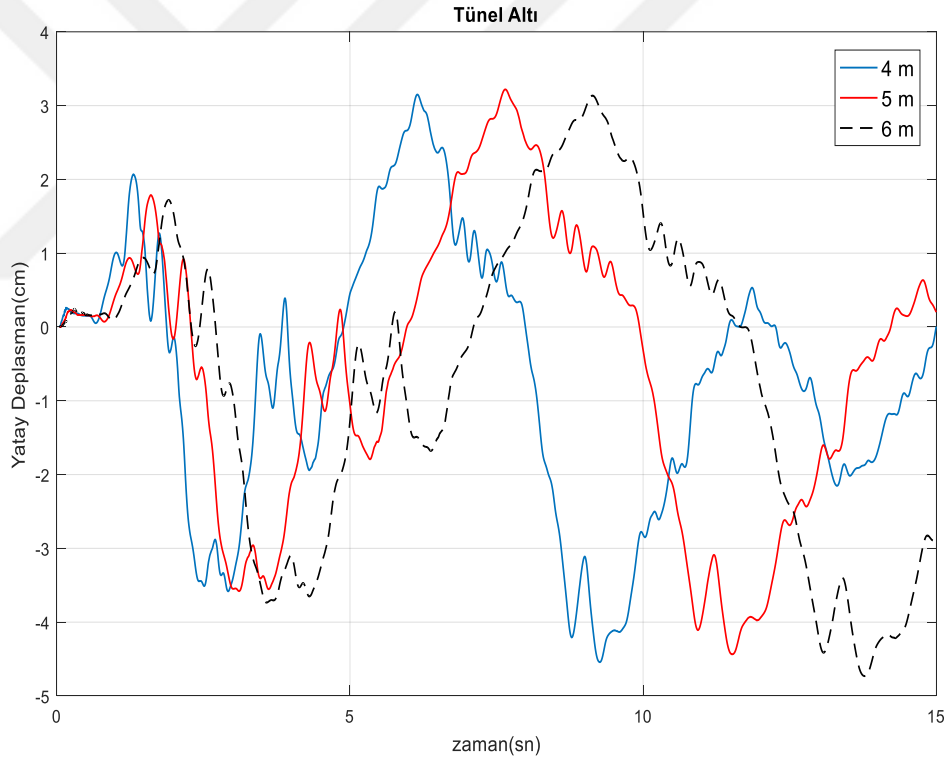
Şekil 7.33. Sıvılaşma modelinde farklı derinliklerdeki tünellerde tünel çeperi düşey deplasman sonuçları a) üst nokta
b) alt nokta.

Şekil 7.33.'e düşey deplasman sonuçlarına göre 15 m derinlikteki tünel çeperi alt noktada düşey deplasman 2 cm iken tünel çeperi üst noktada 14 cm, 10 m derinlikteki tünelde ise tünel çeperi alt noktada 4 cm tünel çeperi üst noktada ise 10 cm olmuştur.

7.2.2.2. Farklı çaptaki tünellerin sıvılaşma analiz sonuçları

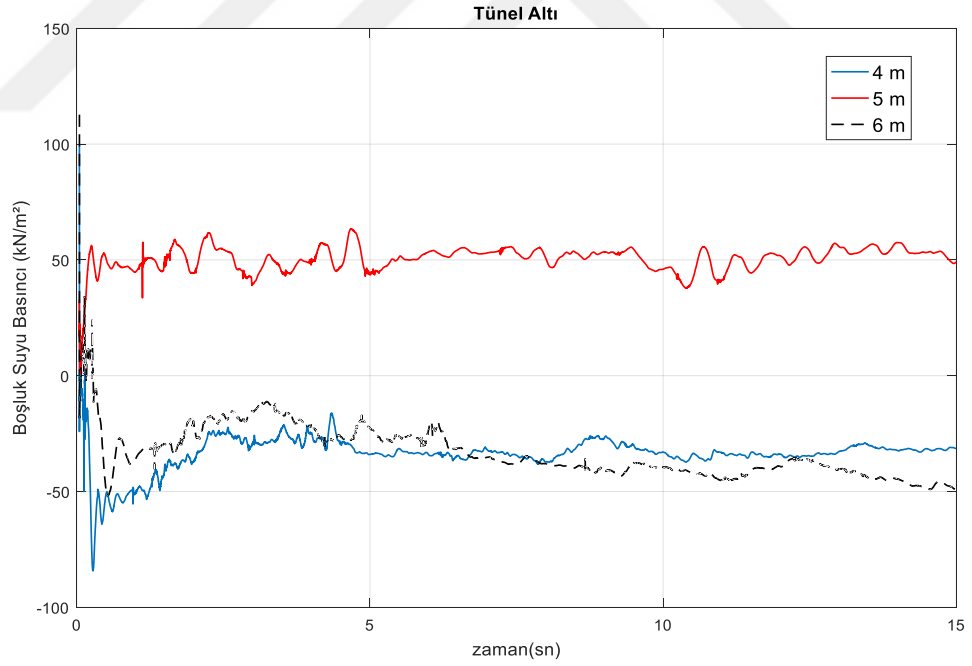
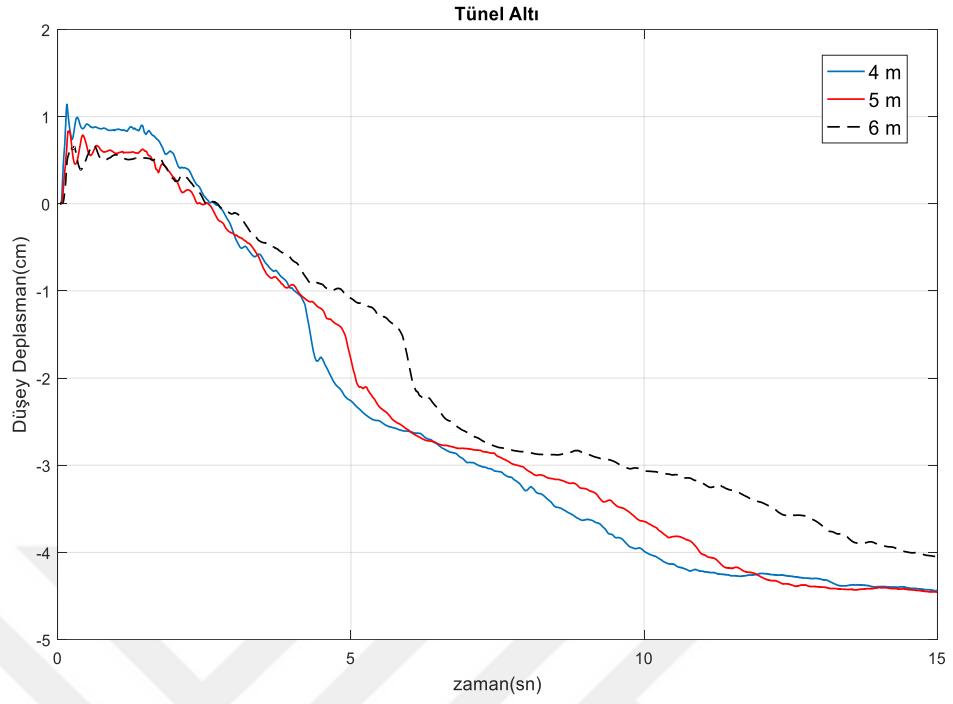
4 m, 5 m ve 6 m olmak üzere farklı çaplarda oluşturulan modeller El Centro depremi altında analiz edilmiş ve analiz sonuçlarına bu bölümde yer verilmiştir.

Şekil 7.34.'e göre yatay deplasmanlar çapın artmasıyla birlikte artmıştır. Düşey deplasmanlar ise çapın artmasıyla birlikte azalmıştır. Boşluk suyu basınçları ise Kocaeli depremine benzer olmuştur.



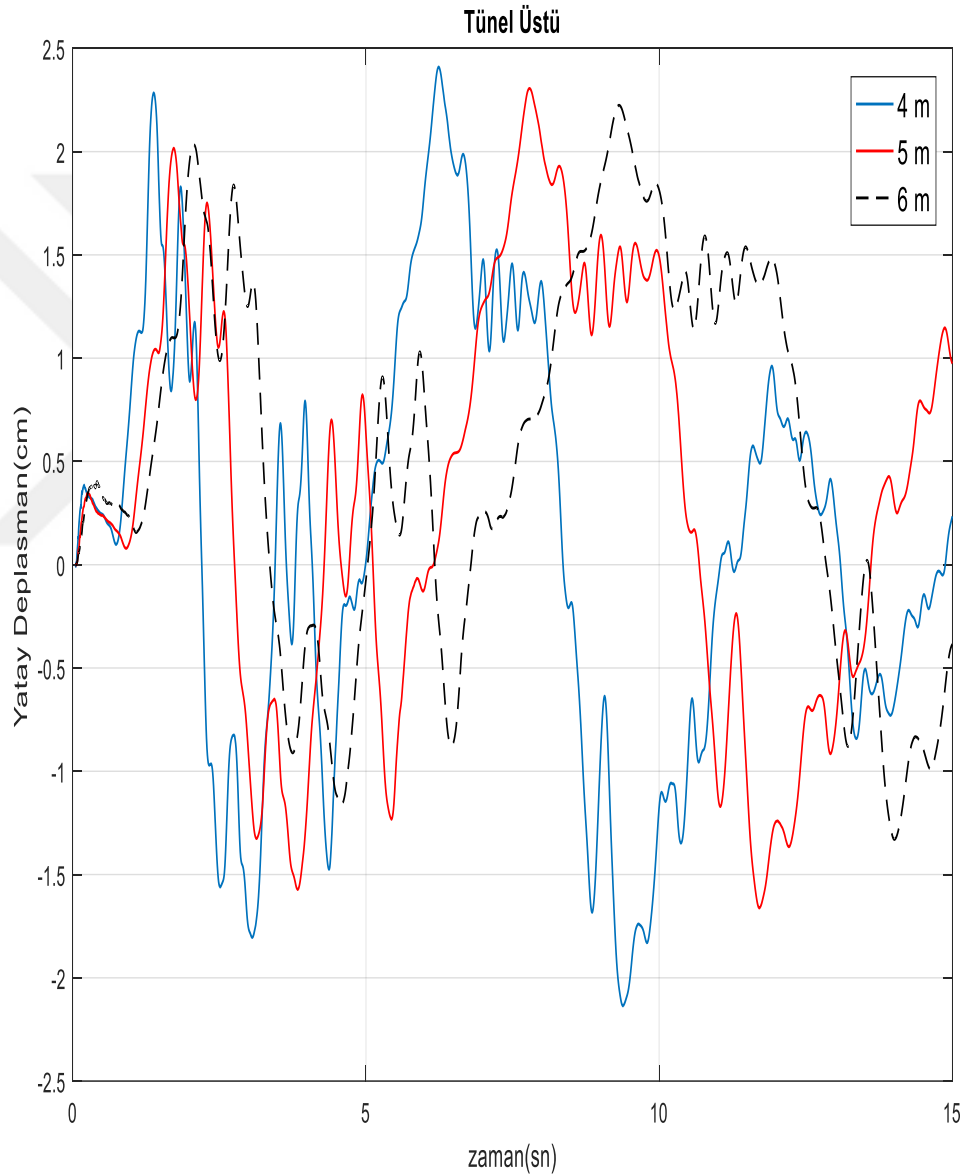
a)

Şekil 7.34. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel altı noktada analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



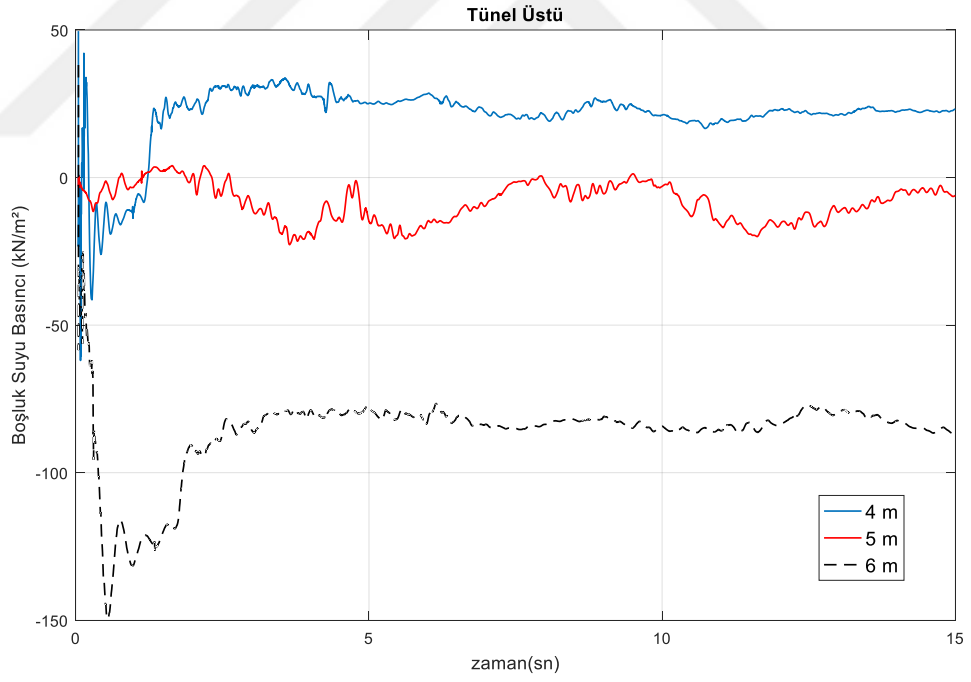
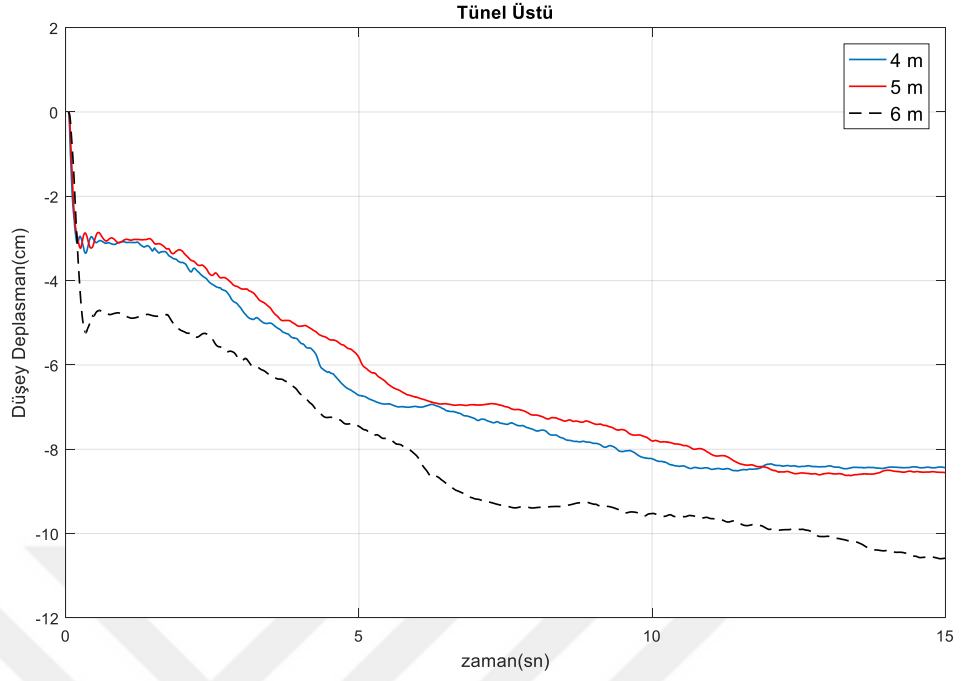
Şekil 7.34. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel altı noktada analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

4 m, 5 m ve 6 m çaplardaki tüneller için Şekil 7.35’de verilen grafiklerde oluşan yatay deplasman tünel üstü noktada çapın artışıyla birlikte azalmıştır. Düşey deplasman ise 4 m ve 5 m için birbirine yakın olup 8 cm civarındadır. 6 m çap için ise 10 cm’e yakın çıkmıştır. Boşluk suyu basınçları ise 5 m çaplı tünel için sıfıra yaklaşmıştır ve 6 m çaplı tünelde ise bir artış olmuştur.



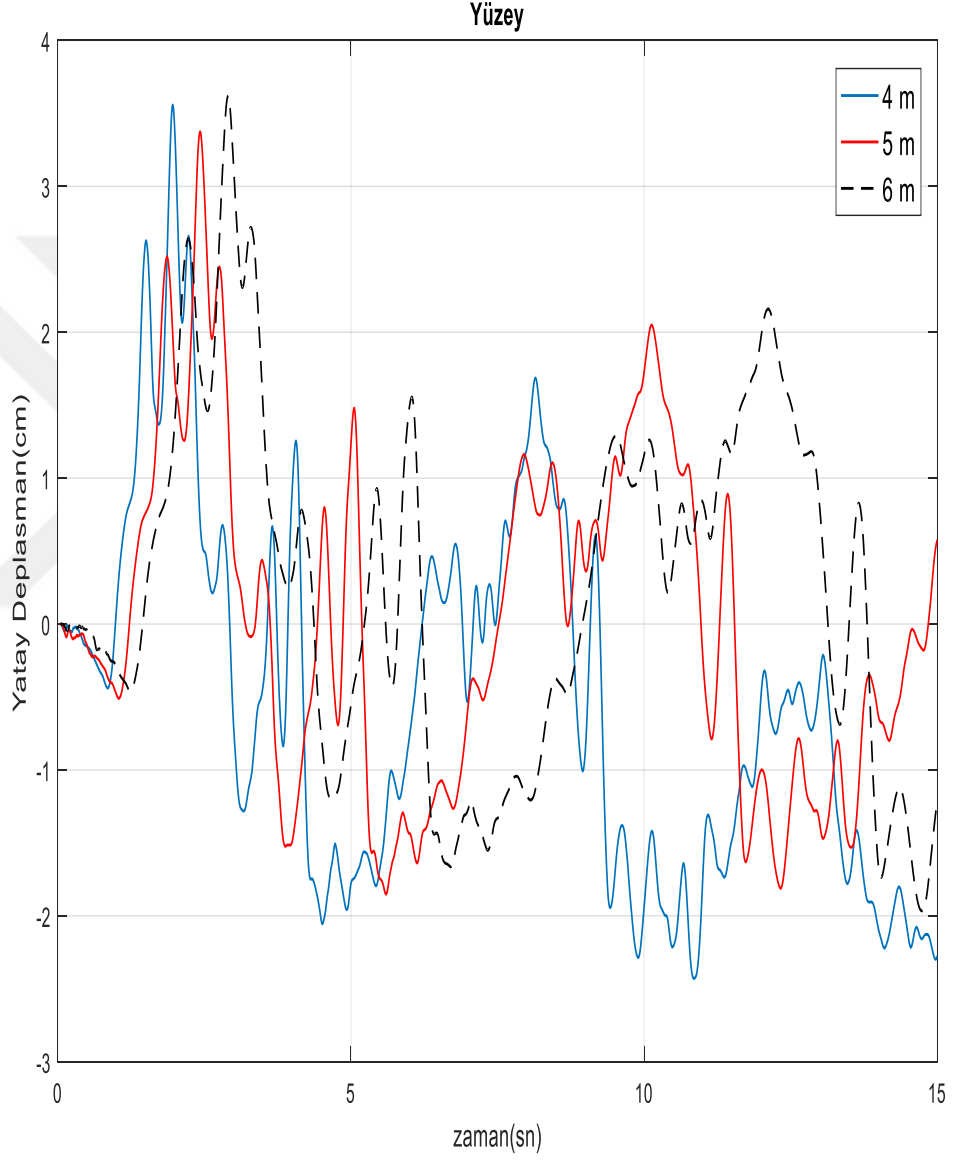
a)

Şekil 7.35. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı .



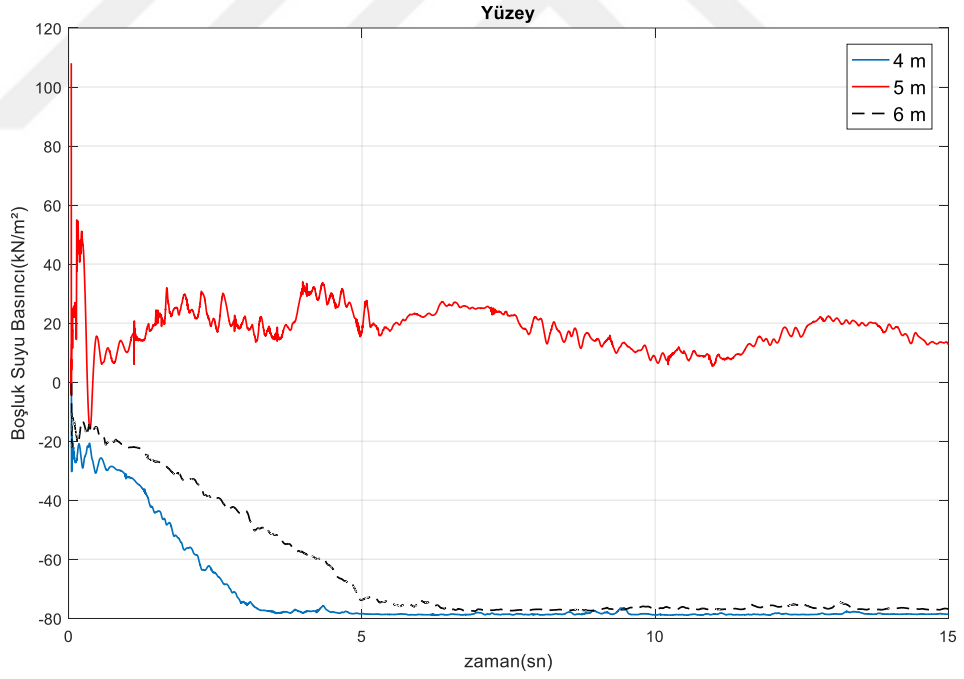
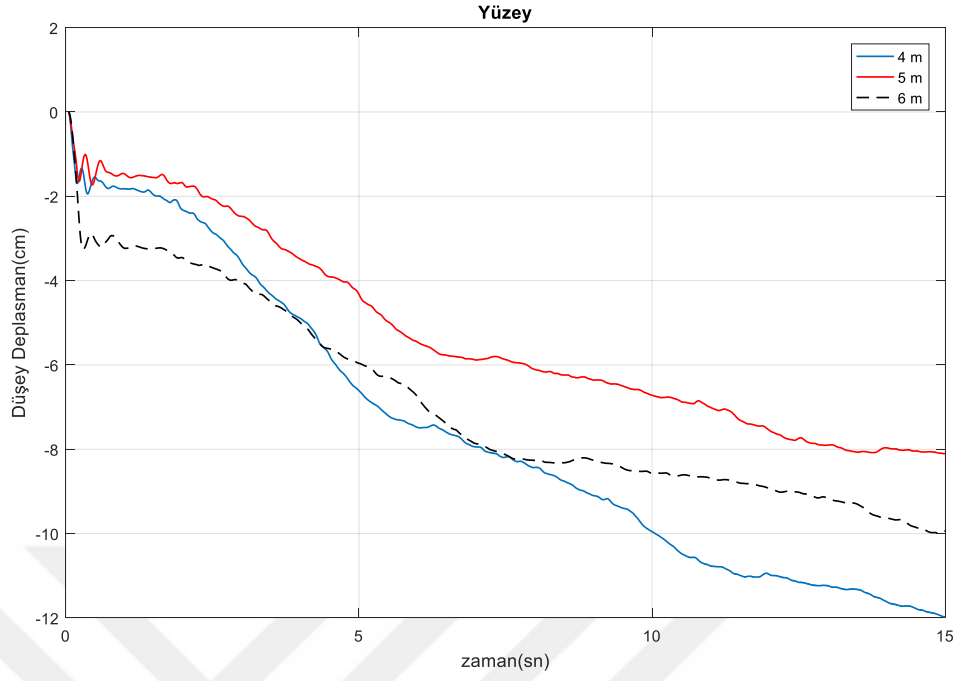
Şekil 7.35. (Devam) Sıvılaştırma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel üstü noktadaki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.

Yüzeyde deprem sırasında oluşan yatay deplasman, düşey deplasman ve boşluk suyu basıncı değerleri Şekil 7.36.'da verilmiştir. Bu grafiklerde düşey deplasmanlar 5 m ve 6 m çaplardaki tüneller için tünel üstü noktaya aynı çıkmışken 4 m çaplı tünelde yüzeye gelindiğinde düşey deplasmanlarda bir artış olmuştur.



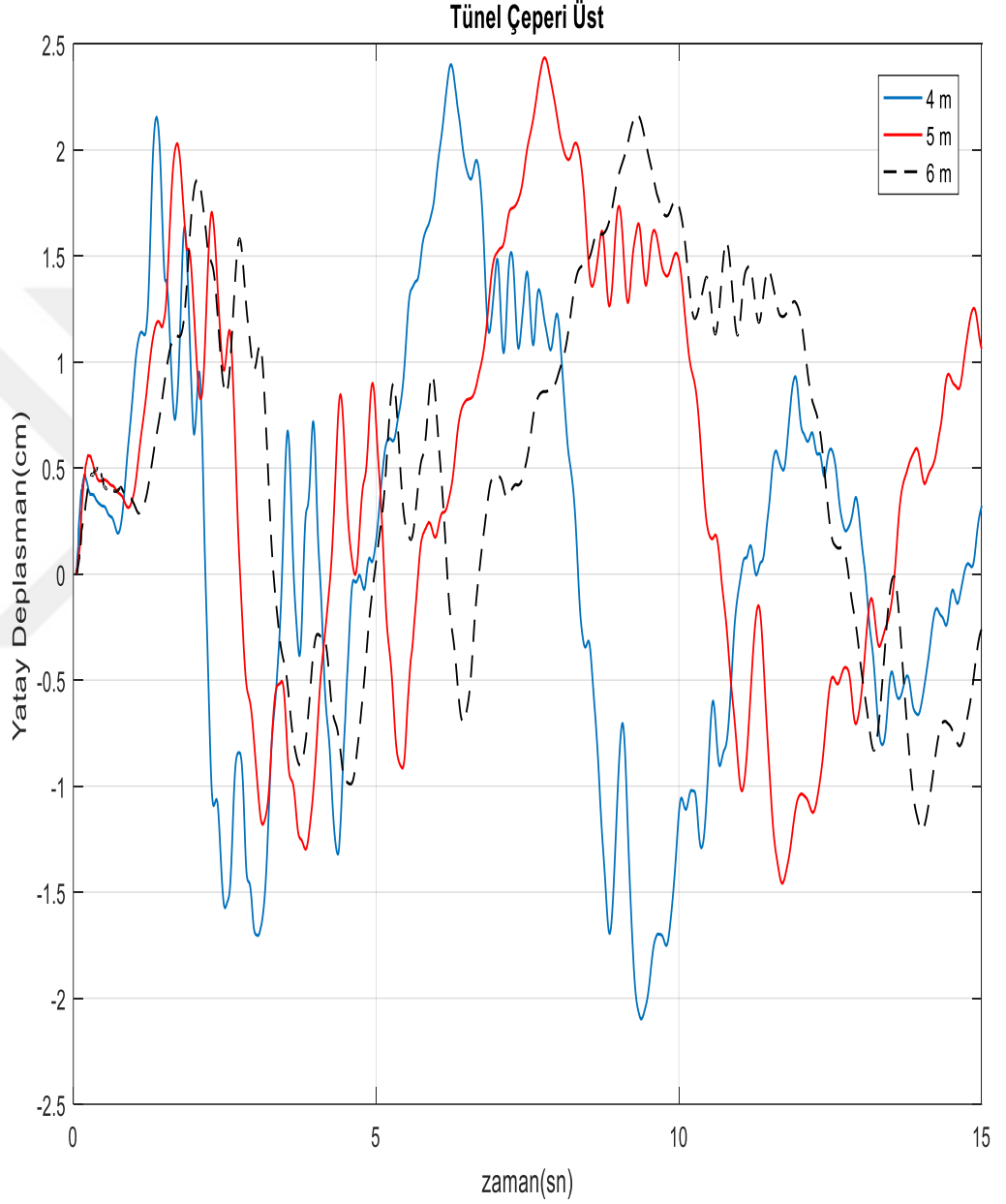
a)

Şekil 7.36. Sıvılaştırma modelinde farklı çaplardaki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı.



Şekil 7.36. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde yüzeydeki analiz sonuçları a) yatay deplasman b) düşey deplasman c) boşluk suyu basıncı .

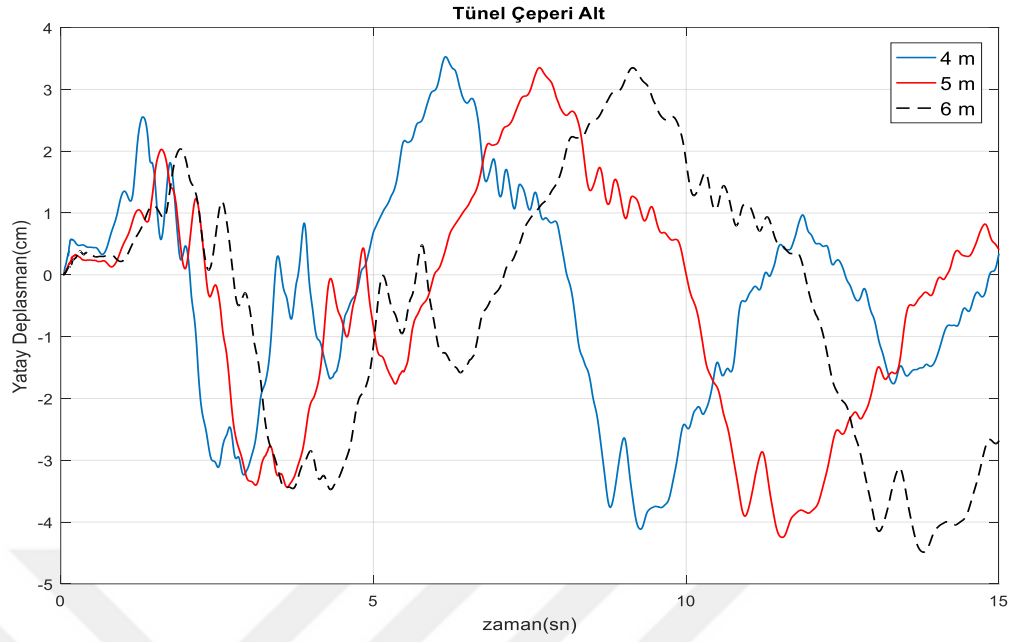
Tünel çerperinde oluşan yatay deplasmanlar Şekil 7.37.'de verilmiştir. Yatay deplasmanlar tünel çerperi üst noktada tünel çerperi alt noktaya göre azalmıştır. Tünel çerperi alt noktada en fazla yatay deplasman 6 m çaplı tünelde iken tünel çerperi üst noktada en az yatay deplasman 6 m çaplı tünelde dir.



a)

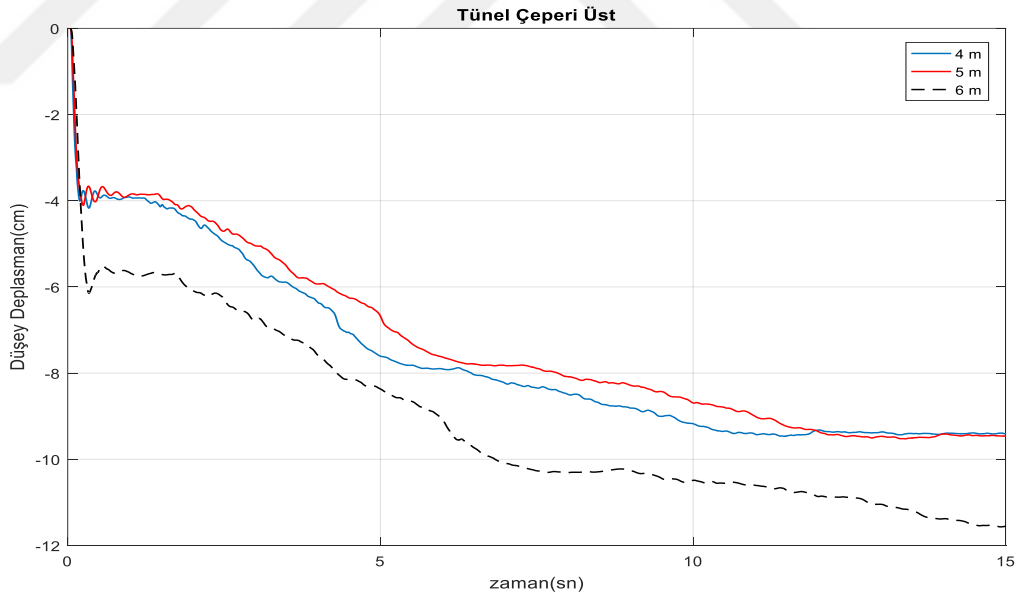
Şekil 7.37. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel çerperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta

b) alt nokta.



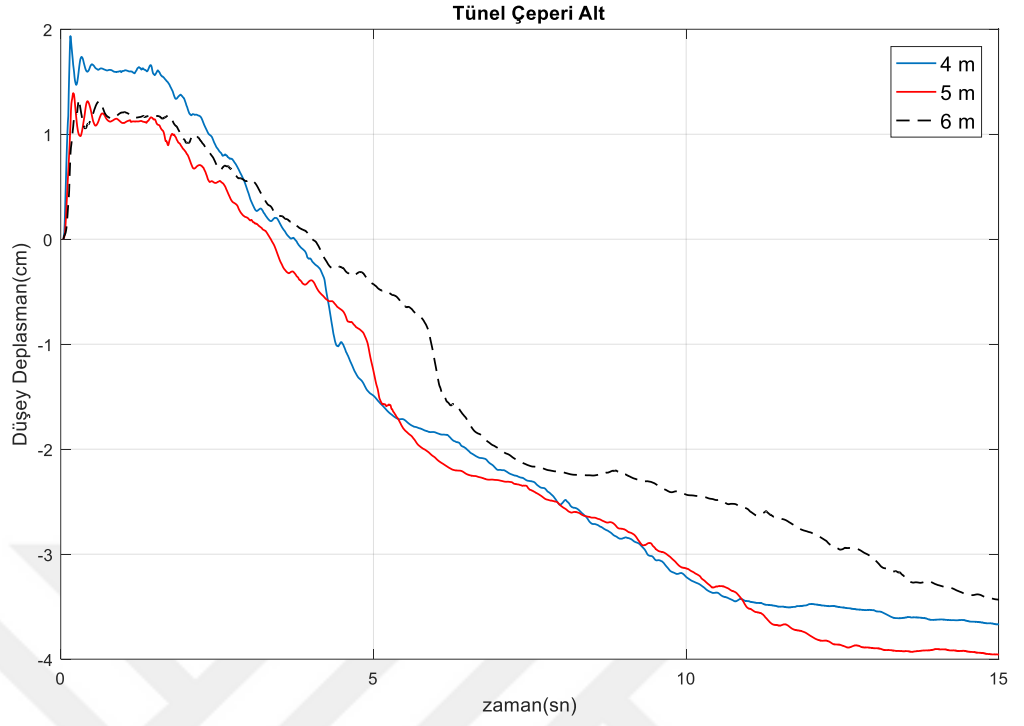
b)

Şekil 7.37. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki yatay deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.



a)

Şekil 7.38. Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasman sonuçları a) üst nokta b) alt nokta.



b)

Şekil 7.38. (Devam) Sıvılaşma modelinde farklı çaplardaki tünellerde tünel çeperindeki düşey deplasman sonuçları
a) üst nokta b) alt nokta.

Şekil 7.38’de yer alan düşey deplasman grafiklerine göre bütün çaplar için tünel çeperi üst noktada tünel çeperi alt noktaya göre bir artış olmuştur. En fazla artış ise yaklaşık 9 cm’lik bir artışla 6 m çaplı tünelde olmuştur.

BÖLÜM 8. TARTIŞMA VE SONUŞLAR

Yapılan çalışmada öncelikli olarak model boyutları 30 m x 30 m olarak alınmıştır. Bu boyutlar için tünelsiz, farklı derinlikte tünel, farklı çaplardaki tüneller ve farklı kalınlıklardaki tüneller için analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde önce 17 Ağustos 1999 Sakarya deprem kayıtlarından yararlanılarak Mohr-Coulomb yenilme kriterleri değerlendirilmiş ve daha sonra aynı deprem kaydı için Finn-Byrne sınıvlaşma analizleri yapılmıştır. Son olarak ise El Centro depremi için Finn-Byrne sınıvlaşma analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

Mohr-Coulomb model için;

- a. Deprem ivme değerleri sığ tünellerde derin tünellere göre biraz daha yüksek çıkmıştır,
- b. Tünel derinliği, aynı kalınlıktaki tüneller için çeperlerinde oluşan yatay deplasmanları etkilemezken, düşey deplasmanların ise derinlikle birlikte artığı görülmüştür.
- c. Çapların artışıyla birlikte oluşan düşey deplasmanlar da artmıştır.
- d. Kayma gerilmeleri çapların artmasıyla azalmıştır, derinliğin değişmesiyle artmıştır.
- e. Kalınlığın ise ivme değerine fazla bir etkisi yoktur.

Finn-Byrne sınıvlaşma modeli analizleri;

- a. Her iki deprem kayıtlarının da deplasmanlar birbirine benze çıkmıştır.
- b. Sınıvlaşma analizlerinde tünel kalınlığının etkisi yoktur.
- c. Tünelin derinliğinin değişimi sınıvlaşmayı en fazla etkilemiştir. Daha derine inşa edilen tünellerin olduğu zeminlerde sınıvlaşma potansiyeli yüzeye yakın tünellere göre daha düşüktür.
- d. Ana kayadan yüzeye gelindikçe sınıvlaşma potansiyeli artmaktadır.

- e. Tünel çapının değişiminin sıvılaşma üzerinde fazla bir etkisi yoktur.
- f. Çap artıkça sıvılaşma tünel altı bölgelerde artmaktadır.

Sonuç olarak Adapazarı zeminlerinde inşa edilecek tünelin 15 m derinlikte, 4 m çapta ve 1 m kalınlıkta olabileceği söylenebilir. Bölgeye inşa edilecek bir tünel için modelleme kadar maliyet kısmı da incelenmelidir.



KAYNAKLAR

- Alpaslan NURAY, (2013) Zemin Sıvılaşması ve Mekanizması, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi* Cilt 3, Sayı 2.
- Asheghabadi M.S., Matinmanesh H.,(2011), Finite Element Seismic Analysis of Cylindrical Tunnel in Sandy Soils with Consideration of Soil-Tunnel Interaction, *Procedia Engineering*, vol 14, 3162–3169.
- Aydınoğlu, M.N., (1994), Yapı Analizi ve Tasarımı süresince Statik ve Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi*, ODTÜ, Ankara.
- Azadi M., Hosseini S. M. M. M., (2010), Analyses of the Effect of Seismic Behavior of Shallow Tunnels in Liquefiable Grounds, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol 25,pp 543-552.
- Azadi M., (2011), The Seismic Behavior of Urban Tunnels in Soft Saturated Soils, *Procedia Engineering*, vol 14, pp 3069-3075.
- Bobet A., (2010), Numerical Methods In Geomechanics, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 35, Number 1B, Paper Accepted February 3.
- Bol E., Önalp A. Arel E., (2005), 1999 Depremi Ardından Adapazarı'nda Yeraltı Suyu Seviyesi Değişimleri, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli , 23-25 Mart 2005.
- Byrne, P. M., (1991), “A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for Sand,” *Proceedings: Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* (St. Louis, Missouri, March 1991), Paper No. 1.24, 47-55.
- Celep Z., (2000), *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, İstanbul.
- Chen R., Taibat M., Wang R., Zhang j., (2018), Effects of Layered Liquefiable Deposits on the Seismic Response of an Underground Structure, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 113, Pages 124-135, October.
- Cüceoğlu C. (2006), *Yeraltı Yapılarının Depreme Dayanıklı Tasarımı*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi), Haziran.
- Çelebi E., Fırat S., Çankaya İ., (2006), Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans fonksiyonları, *İMO Teknik Dergi*, Yazı 252.
- FLAC 2D, *User's Manual-Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Itasca Consulting Group, Minnesota.

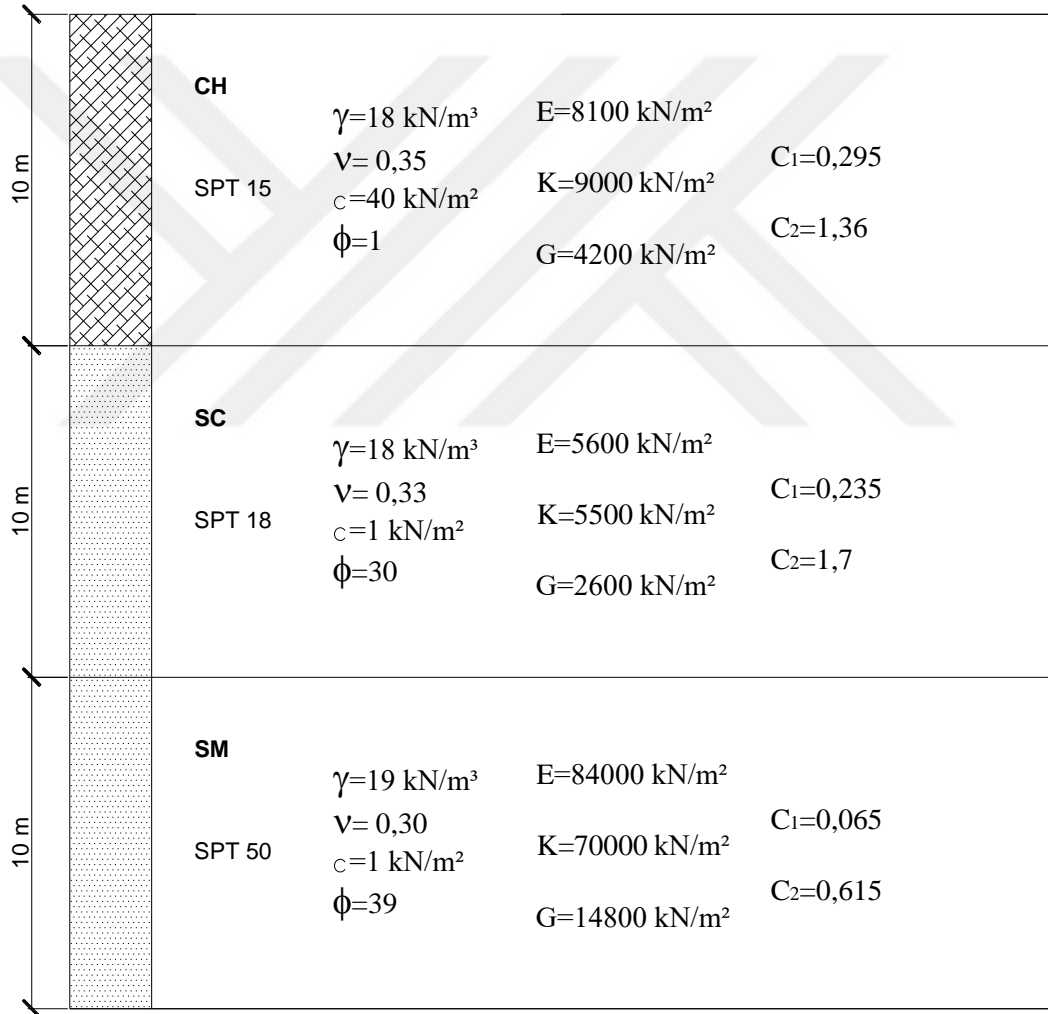
- Geniş M., Gerçek H., (2000), Yer Altı Açıklıklarının Dinamik Tasarımı, *V. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Isparta, Türkiye, pp. 66-72.
- Guobo W., Mingzhi Y., Yu M., Jun W., Yaxi W., (2018), Experimental Study on Seismic Response of Underground Tunnel-Soil-Surface Structure Interaction System, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol 76, pp 145–159.
- Gürsoy ř., Durmuş A., (2002), Betonarme İstinat Duvarlarının Zemin Etkileşimini de Dikkate Alarak Çeşitli Yöntemlerle Karşılaştırmalı Deprem Hesabı, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi*, Eskişehir, 21-22 Ekim.
- Hadjian A. H., Hadley D. M., (1981), Studies of Apparent Seismic Wave Velocity, *Proceedings of International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis.
- Hashash Y.M.A., Hook J.J., Schmidt B., Yao J.I., (2001), Seismic Design and Analysis of Underground Structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol16 , 247-293.
- Hashash Y. M. A., Park D., Yao J. I., (2005), Ovaling Deformations of Circular Tunnels Under Seismic Loading, an Update on Seismic Design and Analysis of Underground Structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol 20, pp 435–441.
- Iida H., Hiroto T., Yoshida N., Iwafuji (1996) Damage to Daikai subway Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of Hyogoken-Naambu Earthquake, Japanese Geotechnical Society, V36, pp 280-300, January 17.
- İmrak C.E., Özkırım M. (2002), Füniküler Sistem ve İstanbul'daki İlk Uygulamaları, Asansör Teknolojisi 12, *ELEVCON'2002 Bildiri Kitabı*, 151-160.
- Kenneth S. L., (2019). www.britannica.com/technology/tunnel/Future-trends-in-underground-construction, 1 Nisan.
- Kramer S.L., (2003), *Geoteknik Deprem Mühendisliği*.
- Kurt S., Duman E., (2016), Sakarya İli'nde Kentsel Gelişim Sürecinin Arazi Kullanımı ve Jeomorfolojik Birimler Üzerindeki Etkisinin Zamansal Değişimi, *Marmara Coğrafya Dergisi*, Sayı 34, ss 268-282, Temmuz .
- Kutunis M., Arman H., Fırat S., Gündüz Z., (2002), 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi ve Adapazarı Bölgesinde Gözlemlenen Deprem Hasarları, *IV. Mühendislik ve Mimarlık Sempozyumu*, pp 459-460, Balıkesir, 11-13 Eylül.
- MTA, (1998), Sakarya İlinin Çevre Jeolojisi ve Doğal Kaynakları, *MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi*, Ankara.
- Önalp A., Bol E., (1998), *Adapazarı Kent Merkezi Jeoloji ve Jeomorfolojisi*, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, Sakarya.
- Pakbaz M.C., Yareevand A., (2005), 2-D Analysis of Circular Tunnel Against Earthquake Loading, *Tunnelling and Underground Space Technology* vol 20 , 411–417.
- Paltrinieri E., (2015), Analysis of TBM Tunneling Performance in Faulted and Highly Fractured Rocks. *Thèse École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL*, Vol 6724 Programme doctoral Mécanique.

- Pitilakis K, Tsinidis G. (2014), Performance and Seismic Design of Underground Structures in earthquake Geotechnical Engineering Design, *Springer International Publishing*, pp 279-340.
- Prasetyo S. H., Gutierrez M., (2016) Effect of Surface Loading on the Hydro-Mechanical Response of a Tunnel in Saturated Ground, *Underground Space*, Volume 1, Issue 1, Pages 1-19, September.
- Sedarat H., Kozak A., Hashash Y. M. A., Shamsabadi A., Krimotat A., (2009), Contact Interface in Seismic Analysis of Circular Tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 24 (4), Pages 482-490 , July.
- Ueng T.S., Lin M.L., Chen M.H., (2001), Some geotechnical aspects of 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, Proceeding of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, SPL-10, pp 1-5.
- Unutmaz B., Çetin K.Ö., Gökyay M.C., (2008), Gömülü Yapıların Zemin-Yapı-Deprem Etkileşiminde Basitleştirilmiş Çerçeve Yöntemi ,*Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi*, Selçuk Üniversitesi, Konya , 16-17 Ekim.
- Unutmaz B., (2014), 3D Liquefaction Assessment of Soils Surrounding Circular Tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol 40, pp 85-94.
- Unutmaz B., (2015), Tünel Çevresi Zeminlerinin Deprem Sonrası Davranışı, *6. Geoteknik Sempozyumu*, Çukurova Üniversitesi, Adana, 26-27 Kasım.
- Ünal, A.I., (2004), “Türkiye Karayolu Tünelleri ve Tünel Güvenliği için Acil Durum Tesisleri”, *1. Avrupa Yol Kongresi*, Lizbon/Portekiz.
- Wang J., (1993) Seismic Design of Tunnels , *Professional Associate Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc.* ,June.
- Watanabe K., Sawada R., Koseki J., (2016), Uplift Mechanism of Open-Cut Tunnel in Liquefied Ground and Simplified Method to Evaluate the Stability Against Uplifting , *Soils and Foundations*, Volume 56(3), Pages 412-426, June.
- Wood A. M., (2000), Tunnelling Management By Design, *E & FN Spon is an imprint of the Taylor & Francis Group*, 9-13.
- Vural İ., (2012), *Alüvyal ve Sıvılaşılabilen Zeminlerde Altyapıların Deprem Risk Analizi: Adapazarı Örneği*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (Doktora tezi), Ekim.
- Yılmaz S., (2006), *1999 Kocaeli Depremi'nde Adapazarı'nda Gözlenen Yapısal Hasarlarında Yakın Fay Etkilerinin Rolü*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, Şubat 2006.
- Zhou H., Gao Y., Zhang C., Yang F., Hu M., Liu H., Jiang Y., (2018), A 3D Model of Coupled Hydro-Mechanical Simulation of Double Shield TBM Excavation , *Tunnelling and Underground Space Technology* 71, pp 1–14.
- URL1 www.safeyowls.com, 25 Nisan 2019.
- URL2 www.jeofizik.org.tr, 7 Mayıs 2019.

EKLER

Ek 1 - Genelleştirilmiş sondaj profilleri

SK 1



Ek 2 – Örnek FLAC 2D veri dosyası

```
*****FLAC-2D INPUT FILE*****
;*****
;***** Statik Analiz*****
;*****
;
config dyn gw

set dyn off

;

grid 85,60

gen 0.0,0.0 0.0,17.0 12.0,17.0 12.0,0.0 i=1,25 j=1,35
gen 12.0,0.0 12.0,17.0 18.0,17.0 18.0,0.0 i=25,37 j=1,35
gen 18.0,0.0 18.0,17.0 30.0,17.0 30.0,0.0 i=37,61 j=1,35
gen 0.0,17.0 0.0,23.0 12.0,23.0 12.0,17.0 i=1,25 j=35,47
gen 12.0,17.0 12.0,23.0 18.0,23.0 18.0,17.0 i=62,86 j=1,25
gen 18.0,17.0 18.0,23.0 30.0,23.0 30.0,17.0 i=37,61 j=35,47
gen 0.0,23.0 0.0,30.0 12.0,30.0 12.0,23.0 i=1,25 j=47,61
gen 12.0,23.0 12.0,30.0 18.0,30.0 18.0,23.0 i=25,37 j=47,61
gen 18.0,23.0 18.0,30.0 30.0,30.0 30.0,23.0 i=37,61 j=47,61

model elastic i=1,24 j=1,34
model elastic i=25,36 j=1,34
model elastic i=37,60 j=1,34
model elastic i=1,24 j=35,46
model elastic i=62,85 j=1,24
model elastic i=37,60 j=35,46
model elastic i=1,24 j=47,60
model elastic i=25,36 j=47,60
model elastic i=37,60 j=47,60

; Attach grids

attach aside from 62,1 to 86,1 bside from 25,35 to 37,35
attach aside from 62,1 to 62,25 bside from 25,35 to 25,47
attach aside from 25,47 to 37,47 bside from 62,25 to 86,25
```

```

attach aside from 37,35 to 37,47 bside from 86,1 to 86,25
;
;***** Zemin Özellikleri *****
;***** Vs=200 *****
group 'Soil-SM' i=1,25 j=1,35
group 'Soil-SM'
prop density=1.9 bulk=700e3 shear=148e3 cohesion=1 &
friction=39.0 j=1,35
;ff_latency=1000000 ff_c1=0.14 ff_c2=2.83 ff_switch=1 j=1,35
;
group 'Soil-SM' i=25,37 j=1,35
group 'Soil-SM'
prop density=1.9 bulk=700e3 shear=148e3 cohesion=1 &
friction=39.0 j=1,35
;ff_latency=1000000 ff_c1=0.14 ff_c2=2.83 ff_switch=1 j=1,35
;
group 'Soil-SM' i=37,61 j=1,35
group 'Soil-SM'
prop density=1.9 bulk=700e3 shear=148e3 cohesion=1 &
friction=39.0 j=1,35
;ff_latency=1000000 ff_c1=0.14 ff_c2=2.83 ff_switch=1 j=1,35
;
group 'Soil-SC' i=1,25 j=35,47
group 'Soil-SC'
prop density=1.8 bulk=55e3 shear=26e3 cohesion=1 &
friction=30.0 j=35,47
;ff_latency=1000000 ff_c1=0.76 ff_c2=0.52 ff_switch=1 j=35,47
;
group 'Soil-SC' i=25,37 j=35,47
group 'Soil-SC'
prop density=1.8 bulk=55e3 shear=26e3 cohesion=1 &

```

```

friction=30.0 j=35,47
;ff_latency=1000000 ff_c1=0.76 ff_c2=0.52 ff_switch=1 j=35,47
;
group 'Soil-SC' i=37,61 j=35,47
group 'Soil-SC'
prop density=1.8 bulk=55e3 shear=26e3 cohesion=1 &
friction=30.0 j=35,47
;ff_latency=1000000 ff_c1=0.76 ff_c2=0.52 ff_switch=1 j=35,47
;
group 'Soil-CH' i=1,25 j=47,61
group 'Soil-CH'
prop density=1.8 bulk=90e3 shear=42e3 cohesion=40 &
friction=1 j=47,61
;ff_latency=1000000 ff_c1=0.434 ff_c2=0.92 ff_switch=1 j=47,61
;
group 'Soil-CH' i=25,37 j=47,61
group 'Soil-CH'
prop density=1.8 bulk=90e3 shear=42e3 cohesion=40 &
friction=1 j=47,61
;ff_latency=1000000 ff_c1=0.434 ff_c2=0.92 ff_switch=1 j=47,61
;
group 'Soil-CH' i=37,61 j=47,61
group 'Soil-CH'
prop density=1.8 bulk=90e3 shear=42e3 cohesion=40 &
friction=1 j=47,61
;ff_latency=1000000 ff_c1=0.434 ff_c2=0.92 ff_switch=1 j=47,61
;
ini xdisp=0 ydisp=0
fix x y i 1 61 j 1
fix x i 1
fix x i 61
;
water dens 1

```



```
;
set gravity= 9.81, flow=off
ini xdisp=0 ydisp=0
ini xvel=0 yvel=0
ini pp 280 var 0 -280 j 1 56
;
gen circle 15.0,20.0 2.0
model null region 76 17
struct node 1 grid 74,21
struct node 2 grid 73,21
struct node 3 grid 72,21
struct node 4 grid 71,21
struct node 5 grid 71,20
struct node 6 grid 70,20
struct node 7 grid 69,20
struct node 8 grid 69,19
struct node 9 grid 68,19
struct node 10 grid 68,18
struct node 11 grid 67,18
struct node 12 grid 67,17
struct node 13 grid 67,16
struct node 14 grid 66,16
struct node 15 grid 66,15
struct node 16 grid 66,14
struct node 17 grid 66,13
struct node 18 grid 66,12
struct node 19 grid 66,11
struct node 20 grid 66,10
struct node 21 grid 67,10
struct node 22 grid 67,9
struct node 23 grid 67,8
struct node 24 grid 68,8
struct node 25 grid 68,7
struct node 26 grid 69,7
struct node 27 grid 69,6
struct node 28 grid 70,6
struct node 29 grid 71,6
struct node 30 grid 71,5
struct node 31 grid 72,5
struct node 32 grid 73,5
struct node 33 grid 74,5
struct node 34 grid 75,5
struct node 35 grid 76,5
struct node 36 grid 77,5
struct node 37 grid 77,6
struct node 38 grid 78,6
struct node 39 grid 79,6
struct node 40 grid 79,7
```

struct node 41 grid 80,7
struct node 42 grid 80,8
struct node 43 grid 81,8
struct node 44 grid 81,9
struct node 45 grid 81,10
struct node 46 grid 82,10
struct node 47 grid 82,11
struct node 48 grid 82,12
struct node 49 grid 82,13
struct node 50 grid 82,14
struct node 51 grid 82,15
struct node 52 grid 82,16
struct node 53 grid 81,16
struct node 54 grid 81,17
struct node 55 grid 81,18
struct node 56 grid 80,18
struct node 57 grid 80,19
struct node 58 grid 79,19
struct node 59 grid 79,20
struct node 60 grid 78,20
struct node 61 grid 77,20
struct node 62 grid 77,21
struct node 63 grid 76,21
struct node 64 grid 75,21
struct beam begin node 1 end node 2 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 2 end node 3 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 3 end node 4 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 4 end node 5 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 5 end node 6 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 6 end node 7 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 7 end node 8 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 8 end node 9 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 9 end node 10 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 10 end node 11 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 11 end node 12 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 12 end node 13 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 13 end node 14 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 14 end node 15 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 15 end node 16 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 16 end node 17 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 17 end node 18 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 18 end node 19 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 19 end node 20 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 20 end node 21 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 21 end node 22 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 22 end node 23 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 23 end node 24 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 24 end node 25 seg 1 prop 1001

```

struct beam begin node 25 end node 26 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 26 end node 27 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 27 end node 28 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 28 end node 29 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 29 end node 30 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 30 end node 31 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 31 end node 32 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 32 end node 33 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 33 end node 34 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 34 end node 35 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 35 end node 36 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 36 end node 37 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 37 end node 38 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 38 end node 39 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 39 end node 40 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 40 end node 41 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 41 end node 42 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 42 end node 43 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 43 end node 44 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 44 end node 45 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 45 end node 46 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 46 end node 47 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 47 end node 48 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 48 end node 49 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 49 end node 50 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 50 end node 51 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 51 end node 52 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 52 end node 53 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 53 end node 54 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 54 end node 55 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 55 end node 56 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 56 end node 57 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 57 end node 58 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 58 end node 59 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 59 end node 60 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 60 end node 61 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 61 end node 62 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 62 end node 63 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 63 end node 64 seg 1 prop 1001
struct beam begin node 64 end node 1 seg 1 prop 1001
struct prop 1001
struct prop 1001 density=24 E=38e6 I=9.41 area=4.05e-2
;
hist unbal          ;history 1
hist xdisp i=2 j=1 ;history 2
hist xdisp i=30 j=1 ;history 3
hist xdisp i=60 j=1 ;history 4
;

```

hist xdisp i=2 j=2 ;history 5
hist xdisp i=30 j=2 ;history 6
hist xdisp i=60 j=2 ;history 7
;
hist xdisp i=2 j=34 ;history 8
hist xdisp i=73 j=3 ;history 9
hist xdisp i=60 j=34 ;history 10
;
hist xdisp i=2 j=45 ;history 11
hist xdisp i=73 j=23 ;history 12
hist xdisp i=60 j=45 ;history 13
;
hist xdisp i=2 j=60 ;history 14
hist xdisp i=30 j=60 ;history 15
hist xdisp i=60 j=60 ;history 16
;
hist xdisp i=73 j=21 ;history 17
hist xdisp i=82 j=13 ;history 18
hist xdisp i=73 j=5 ;history 19
hist xdisp i=65 j=13 ;history 20
;
hist ydisp i=2 j=1 ;history 21
hist ydisp i=30 j=1 ;history 22
hist ydisp i=60 j=1 ;history 23
;
hist ydisp i=2 j=2 ;history 24
hist ydisp i=30 j=2 ;history 25
hist ydisp i=60 j=2 ;history 26
;
hist ydisp i=2 j=34 ;history 27
hist ydisp i=73 j=3 ;history 28
hist ydisp i=60 j=34 ;history 29
;
hist ydisp i=2 j=45 ;history 30
hist ydisp i=73 j=23 ;history 31
hist ydisp i=60 j=45 ;history 32
;
hist ydisp i=2 j=60 ;history 33
hist ydisp i=30 j=60 ;history 34
hist ydisp i=60 j=60 ;history 35
;
hist ydisp i=73 j=21 ;history 36
hist ydisp i=82 j=13 ;history 37
hist ydisp i=73 j=5 ;history 38
hist ydisp i=65 j=13 ;history 39
;
hist ydisp i=84 j=13 ;history 40
hist ydisp i=63 j=13 ;history 41

```
;
hist xdisp i=84 j=13 ;history 42
hist xdisp i=63 j=13 ;history 43
;
hist sxy i=2 j=1 ;history 44
hist sxy i=30 j=1 ;history 45
hist sxy i=60 j=1 ;history 46
;
hist sxy i=2 j=2 ;history 47
hist sxy i=30 j=2 ;history 48
hist sxy i=60 j=2 ;history 49
;
hist sxy i=2 j=34 ;history 50
hist sxy i=73 j=3 ;history 51
hist sxy i=60 j=34 ;history 52
;
hist sxy i=2 j=45 ;history 53
hist sxy i=73 j=23 ;history 54
hist sxy i=60 j=45 ;history 55
;
hist sxy i=2 j=60 ;history 56
hist sxy i=30 j=60 ;history 57
hist sxy i=60 j=60 ;history 58
;
hist sxy i=73 j=21 ;history 59
hist sxy i=82 j=13 ;history 60
hist sxy i=73 j=5 ;history 61
hist sxy i=65 j=13 ;history 62
;
hist pp i=2 j=1 ;history 63
hist pp i=30 j=1 ;history 64
hist pp i=60 j=1 ;history 65
;
hist pp i=2 j=2 ;history 66
hist pp i=30 j=2 ;history 67
hist pp i=60 j=2 ;history 68
;
hist pp i=2 j=34 ;history 69
hist pp i=73 j=3 ;history 70
hist pp i=60 j=34 ;history 71
;
hist pp i=2 j=45 ;history 72
hist pp i=73 j=23 ;history 73
hist pp i=60 j=45 ;history 74
;
hist pp i=2 j=60 ;history 75
hist pp i=30 j=60 ;history 76
hist pp i=60 j=60 ;history 77
```

```

;
hist pp i=73 j=21 ;history 78
hist pp i=82 j=13 ;history 79
hist pp i=73 j=5 ;history 80
hist pp i=65 j=13 ;history 81
;
solve
;
save st_dck1.sav
;
;*****FLAC-2D INPUT FILE*****
;*****
;***** Dinamik Analiz*****
;*****
r st_dck1.sav
;
set dyn on
;
hist reset
;
;***** Zemin Özellikleri *****
model finn i=1,24 j=1,34
model finn i=25,36 j=1,34
model finn i=37,60 j=1,34
model finn i=1,24 j=35,46
model finn i=62,85 j=1,24
model finn i=37,60 j=35,46
model m i=1,24 j=47,60
model m i=25,36 j=47,60
model m i=37,60 j=47,60
;
group 'Soil-SM' i=1,25 j=1,35
group 'Soil-SM'
prop density=1.9 bulk=700e2 shear=148e2 cohesion=1 &

```

```

friction=39.0 dilation=9 poros 0.45 perm 1e-2 ff_latency=100 ff_c1=0.14 ff_c2=2.83
ff_switch=1 j=1,35
;
group 'Soil-SM' i=25,37 j=1,35
group 'Soil-SM'
prop density=1.9 bulk=700e2 shear=148e2 cohesion=1 &
friction=39.0 dilation=9 poros 0.45 perm 1e-2 ff_latency=100 ff_c1=0.14 ff_c2=2.83
ff_switch=1 j=1,35
;
group 'Soil-SM' i=37,61 j=1,35
group 'Soil-SM'
prop density=1.9 bulk=700e2 shear=148e2 cohesion=1 &
friction=39.0 dilation=9 poros 0.45 perm 1e-2 ff_latency=100 ff_c1=0.14 ff_c2=2.83
ff_switch=1 j=1,35
;
group 'Soil-SC' i=1,25 j=35,47
group 'Soil-SC'
prop density=1.8 bulk=55e2 shear=26e2 cohesion=1 &
friction=30.0 dilation=0 poros 0.45 perm 1e-2 ff_latency=100 ff_c1=0.76 ff_c2=0.52
ff_switch=1 j=35,47
;
group 'Soil-SC' i=37,61 j=35,47
group 'Soil-SC'
prop density=1.8 bulk=55e2 shear=26e2 cohesion=1 &
friction=30.0 dilation=0 poros 0.45 perm 1e-2 ff_latency=100 ff_c1=0.76 ff_c2=0.52
ff_switch=1 j=35,47
;
group 'Soil-SC' i=37,61 j=35,47
group 'Soil-SC'
prop density=1.8 bulk=55e2 shear=26e2 cohesion=1 &
friction=30.0 dilation=0 poros 0.45 perm 1e-2 ff_latency=100 ff_c1=0.76 ff_c2=0.52
ff_switch=1 j=35,47
;

```

```

group 'Soil-CH' i=1,25 j=47,61
group 'Soil-CH'
prop density=1.8 bulk=90e2 shear=42e2 cohesion=40 &
friction=1 ff_latency=100 ff_c1=0.434 ff_c2=0.92 ff_switch=1 j=47,61
;
group 'Soil-CH' i=25,37 j=47,61
group 'Soil-CH'
prop density=1.8 bulk=90e2 shear=42e2 cohesion=40 &
friction=1 ff_latency=100 ff_c1=0.434 ff_c2=0.92 ff_switch=1 j=47,61
;
group 'Soil-CH' i=37,61 j=47,61
group 'Soil-CH'
prop density=1.8 bulk=90e2 shear=42e2 cohesion=40 &
friction=1 ff_latency=100 ff_c1=0.434 ff_c2=0.92 ff_switch=1 j=47,61
;
water dens 1 tens 1e10 ;bulk 0
water bulk=2.2e6
ini pp 280 var 0 -280 j 0 56
;
;***** Sıvılaşma modeli parametreleri (finn)*****
prop ff_latency=100
; parameters for Martin formula
prop ff_switch = 0
prop ff_c1=0.8 ff_c2=0.79
prop ff_c3=0.45 ff_c4=0.73
;parameters for Byrne formula
prop ff_switch = 1
def _setCoeff_Byrne
ff_c1_ = 8.7*exp(-1.25*ln(n1_60_))
ff_c2_ = 0.4/ff_c1_
ff_c3_ = 0.0000

```



```

end
set n1_60_ = 7
_setCoeff_Byrne
prop ff_c1=ff_c1_ ff_c2=ff_c2_
prop ff_c3=ff_c3_
set ncwrite=100
;*****Dinamik Analiz*****
ini xdisp=0 ydisp=0
ini xvel=0 yvel=0
;***** Dinamik Sınır Koşulları*****
;
apply ff
;
;***** Başlangıç koşulları *****
;
set dytime 0.00
ini xvel 0 yvel 0
ini xdisp 0 ydisp 0
;
;***** Deprem Kaydı *****
history read skr_base_20.dat
apply xacc 9.81 hist 1 i 1 61 j 1
apply yacc 0.0 i 1 61 j=1
;
;***** Sönüm oranları*****
;
set dy_damp=rayleigh 0.015 25
;
gen circle 15.0,20.0 2.0
model null region 76 17
struct prop 1001 density=24 E=38e6 I=9.41 area=4.05e-2

```

struct beam long node 1 end node 2 seg 1 prop 1001
struct beam long node 2 end node 3 seg 1 prop 1001
struct beam long node 3 end node 4 seg 1 prop 1001
struct beam long node 4 end node 5 seg 1 prop 1001
struct beam long node 5 end node 6 seg 1 prop 1001
struct beam long node 6 end node 7 seg 1 prop 1001
struct beam long node 7 end node 8 seg 1 prop 1001
struct beam long node 8 end node 9 seg 1 prop 1001
struct beam long node 9 end node 10 seg 1 prop 1001
struct beam long node 10 end node 11 seg 1 prop 1001
struct beam long node 11 end node 12 seg 1 prop 1001
struct beam long node 12 end node 13 seg 1 prop 1001
struct beam long node 13 end node 14 seg 1 prop 1001
struct beam long node 14 end node 15 seg 1 prop 1001
struct beam long node 15 end node 16 seg 1 prop 1001
struct beam long node 16 end node 17 seg 1 prop 1001
struct beam long node 17 end node 18 seg 1 prop 1001
struct beam long node 18 end node 19 seg 1 prop 1001
struct beam long node 19 end node 20 seg 1 prop 1001
struct beam long node 20 end node 21 seg 1 prop 1001
struct beam long node 21 end node 22 seg 1 prop 1001
struct beam long node 22 end node 23 seg 1 prop 1001
struct beam long node 23 end node 24 seg 1 prop 1001
struct beam long node 24 end node 25 seg 1 prop 1001
struct beam long node 25 end node 26 seg 1 prop 1001
struct beam long node 26 end node 27 seg 1 prop 1001
struct beam long node 27 end node 28 seg 1 prop 1001
struct beam long node 28 end node 29 seg 1 prop 1001
struct beam long node 29 end node 30 seg 1 prop 1001
struct beam long node 30 end node 31 seg 1 prop 1001
struct beam long node 31 end node 32 seg 1 prop 1001

struct beam long node 32 end node 33 seg 1 prop 1001
struct beam long node 33 end node 34 seg 1 prop 1001
struct beam long node 34 end node 35 seg 1 prop 1001
struct beam long node 35 end node 36 seg 1 prop 1001
struct beam long node 36 end node 37 seg 1 prop 1001
struct beam long node 37 end node 38 seg 1 prop 1001
struct beam long node 38 end node 39 seg 1 prop 1001
struct beam long node 39 end node 40 seg 1 prop 1001
struct beam long node 40 end node 41 seg 1 prop 1001
struct beam long node 41 end node 42 seg 1 prop 1001
struct beam long node 42 end node 43 seg 1 prop 1001
struct beam long node 43 end node 44 seg 1 prop 1001
struct beam long node 44 end node 45 seg 1 prop 1001
struct beam long node 45 end node 46 seg 1 prop 1001
struct beam long node 46 end node 47 seg 1 prop 1001
struct beam long node 47 end node 48 seg 1 prop 1001
struct beam long node 48 end node 49 seg 1 prop 1001
struct beam long node 49 end node 50 seg 1 prop 1001
struct beam long node 50 end node 51 seg 1 prop 1001
struct beam long node 51 end node 52 seg 1 prop 1001
struct beam long node 52 end node 53 seg 1 prop 1001
struct beam long node 53 end node 54 seg 1 prop 1001
struct beam long node 54 end node 55 seg 1 prop 1001
struct beam long node 55 end node 56 seg 1 prop 1001
struct beam long node 56 end node 57 seg 1 prop 1001
struct beam long node 57 end node 58 seg 1 prop 1001
struct beam long node 58 end node 59 seg 1 prop 1001
struct beam long node 59 end node 60 seg 1 prop 1001
struct beam long node 60 end node 61 seg 1 prop 1001
struct beam long node 61 end node 62 seg 1 prop 1001
struct beam long node 62 end node 63 seg 1 prop 1001

```
struct beam long node 63 end node 64 seg 1 prop 1001
struct beam long node 64 end node 1 seg 1 prop 1001
;
;***** History noktaları *****
;
hist xdisp i=2 j=1 ;history 2
hist xdisp i=30 j=1 ;history 3
hist xdisp i=60 j=1 ;history 4
;
hist xdisp i=2 j=2 ;history 5
hist xdisp i=30 j=2 ;history 6
hist xdisp i=60 j=2 ;history 7
;
hist xdisp i=2 j=34 ;history 8
hist xdisp i=73 j=3 ;history 9
hist xdisp i=60 j=34 ;history 10
;
hist xdisp i=2 j=45 ;history 11
hist xdisp i=73 j=23 ;history 12
hist xdisp i=60 j=45 ;history 13
;
hist xdisp i=2 j=60 ;history 14
hist xdisp i=30 j=60 ;history 15
hist xdisp i=60 j=60 ;history 16
;
hist xdisp i=73 j=21 ;history 17
hist xdisp i=82 j=13 ;history 18
hist xdisp i=73 j=5 ;history 19
hist xdisp i=65 j=13 ;history 20
;
hist ydisp i=2 j=1 ;history 21
```

hist ydisp i=30 j=1 ;history 22
hist ydisp i=60 j=1 ;history 23
;
hist ydisp i=2 j=2 ;history 24
hist ydisp i=30 j=2 ;history 25
hist ydisp i=60 j=2 ;history 26
;
hist ydisp i=2 j=34 ;history 27
hist ydisp i=73 j=3 ;history 28
hist ydisp i=60 j=34 ;history 29
;
hist ydisp i=2 j=45 ;history 30
hist ydisp i=73 j=23 ;history 31
hist ydisp i=60 j=45 ;history 32
;
hist ydisp i=2 j=60 ;history 33
hist ydisp i=30 j=60 ;history 34
hist ydisp i=60 j=60 ;history 35
;
hist ydisp i=73 j=21 ;history 36
hist ydisp i=82 j=13 ;history 37
hist ydisp i=73 j=5 ;history 38
hist ydisp i=65 j=13 ;history 39
;
hist ydisp i=84 j=13 ;history 40
hist ydisp i=63 j=13 ;history 41
;
hist xdisp i=84 j=13 ;history 42
hist xdisp i=63 j=13 ;history 43
;
hist sxy i=60 j=60 ;history 44

;
hist sxy i=24 j=36 ;history 45
hist sxy i=37 j=36 ;history 46
hist sxy i=31 j=30 ;history 47
hist sxy i=31 j=43 ;history 48
;
hist sxy i=63 j=12 ;history 49
hist sxy i=73 j=2 ;history 50
hist sxy i=84 j=13 ;history 51
hist sxy i=73 j=23 ;history 52
;
hist xacc i=2 j=1 ;history 53
hist xacc i=30 j=1 ;history 54
hist xacc i=60 j=1 ;history 55
;
hist xacc i=2 j=2 ;history 56
hist xacc i=30 j=2 ;history 57
hist xacc i=60 j=2 ;history 58
;
hist xacc i=2 j=34 ;history 59
hist xacc i=73 j=3 ;history 60
hist xacc i=60 j=34 ;history 61
;
hist xacc i=2 j=45 ;history 62
hist xacc i=73 j=23 ;history 63
hist xacc i=60 j=45 ;history 64
;
hist xacc i=2 j=60 ;history 65
hist xacc i=30 j=60 ;history 66
hist xacc i=60 j=60 ;history 67
;

hist xacc i=73 j=21 ;history 68
hist xacc i=82 j=13 ;history 69
hist xacc i=73 j=5 ;history 70
hist xacc i=65 j=13 ;history 71
;
hist yacc i=2 j=1 ;history 72
hist yacc i=30 j=1 ;history 73
hist yacc i=60 j=1 ;history 74
;
hist yacc i=2 j=2 ;history 75
hist yacc i=30 j=2 ;history 76
hist yacc i=60 j=2 ;history 77
;
hist yacc i=2 j=34 ;history 78
hist yacc i=73 j=3 ;history 79
hist yacc i=60 j=34 ;history 80
;
hist yacc i=2 j=45 ;history 81
hist yacc i=73 j=23 ;history 82
hist yacc i=60 j=45 ;history 83
;
hist yacc i=73 j=21 ;history 84
hist yacc i=82 j=13 ;history 85
hist yacc i=73 j=5 ;history 86
hist yacc i=65 j=13 ;history 87
;
hist yacc i=2 j=60 ;history 88
hist yacc i=30 j=60 ;history 89
hist yacc i=60 j=60 ;history 90
;
hist yacc i=84 j=13 ;history 91

hist yacc i=63 j=13 ;history 92
;
hist xacc i=84 j=13 ;history 93
hist xacc i=63 j=13 ;history 94
;
hist sxy i=2 j=1 ;history 95
hist sxy i=30 j=1 ;history 96
hist sxy i=60 j=1 ;history 97
;
hist sxy i=2 j=2 ;history 98
hist sxy i=30 j=2 ;history 99
hist sxy i=60 j=2 ;history 100
;
hist sxy i=2 j=34 ;history 101
hist sxy i=73 j=3 ;history 102
hist sxy i=60 j=34 ;history 103
;
hist sxy i=2 j=45 ;history 104
hist sxy i=73 j=23 ;history 105
hist sxy i=60 j=45 ;history 106
;
hist sxy i=2 j=60 ;history 107
hist sxy i=30 j=60 ;history 108
hist sxy i=60 j=60 ;history 109
;
hist sxy i=73 j=21 ;history 110
hist sxy i=82 j=13 ;history 111
hist sxy i=73 j=5 ;history 112
hist sxy i=65 j=13 ;history 113
;
;

hist pp i=2 j=1 ;history 114
hist pp i=30 j=1 ;history 115
hist pp i=60 j=1 ;history 116
;
hist pp i=2 j=2 ;history 117
hist pp i=30 j=2 ;history 118
hist pp i=60 j=2 ;history 119
;
hist pp i=2 j=34 ;history 120
hist pp i=73 j=3 ;history 121
hist pp i=60 j=34 ;history 122
;
hist pp i=2 j=45 ;history 123
hist pp i=73 j=23 ;history 124
hist pp i=60 j=45 ;history 125
;
hist pp i=2 j=60 ;history 126
hist pp i=30 j=60 ;history 127
hist pp i=60 j=60 ;history 128
;
hist pp i=73 j=21 ;history 129
hist pp i=82 j=13 ;history 130
hist pp i=73 j=5 ;history 131
hist pp i=65 j=13 ;history 132
;
hist xvel i=2 j=1 ;history 133
hist xvel i=30 j=1 ;history 134
hist xvel i=60 j=1 ;history 135
;
hist xvel i=2 j=2 ;history 136
hist xvel i=30 j=2 ;history 137

```
hist xvel i=60 j=2 ;history 138
;
hist xvel i=2 j=34 ;history 139
hist xvel i=73 j=3 ;history 140
hist xvel i=60 j=34 ;history 141
;
hist xvel i=2 j=45 ;history 142
hist xvel i=73 j=23 ;history 143
hist xvel i=60 j=45 ;history 144
;
hist xvel i=2 j=60 ;history 145
hist xvel i=30 j=60 ;history 146
hist xvel i=60 j=60 ;history 147
;
hist xvel i=73 j=21 ;history 148
hist xvel i=82 j=13 ;history 149
hist xvel i=73 j=5 ;history 150
hist xvel i=65 j=13 ;history 151
;
solve dytime = 20 step 1000000
;
save fnn_dck1.sav
```

ÖZGEÇMİŞ

Ayşe SAÇAR 23/03/1993'de Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2011 yılında Hacı Zehra Akkoç Kız Lisesinden mezun oldu. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi başladı ve 2016 yılında inşaat mühendisliği bölümünü bitirdi. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü Geoteknik Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı

