



T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



## YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜNEL-YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN ZEMİN BÜYÜTMESİNE  
ETKİLERİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Ozan SARIKAYA

DANIŞMAN  
Prof. Dr. İlknur BOZBEY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2018

Bu çalışma 17.12.2018 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliğı Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ



Prof. Dr. İlknur BOZBEY  
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK  
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
İnşaat Fakültesi



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

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez kapsamında proje çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımından dolayı çok değerli hocam Prof.Dr.İlknur BOZBEY'e teşekkür ederim.

Tez süresince daima yanımda bulunan ve desteğini bir an olsun esirgemeyen, elinden geldiğince yardımda bulunmaya çalışan Sayın Arş.Gör.Sinan SARĞIN'a da ayrıca teşekkür ederim.

Aralık 2018

Ozan SARIKAYA

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
TABLO LİSTESİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xiii
ÖZET .....	xv
SUMMARY .....	xvii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR</b> .....	<b>4</b>
2.1.TÜNELLER .....	4
2.1.1. Tünel Çeşitleri .....	4
2.1.1.1. Demiryolu Tüneli.....	4
2.1.1.2. Karayolu Tüneli.....	4
2.1.1.3. Yaya Tüneli.....	5
2.1.1.4. Metrolar.....	5
2.2.ZEMİN TİTREŞİM HAREKETİ.....	5
2.2.1.Deprem Spektrumu.....	5
2.2.Tasarım Spektrumu .....	9
2.3.ZEMİN BÜYÜTME KAVRAMI .....	13
2.3.1. Zemin Büyütmesine Etki Eden Faktörler.....	14
2.3.1.1. Topografya Etkisi.....	14
2.3.1.2.Empedans Oranı .....	15
2.3.1.3. Kayma Dalgası Hızı.....	16
2.3.1.4. Zemin Büyütme Fonksiyonu.....	17
2.3.1.5. Zemin Tabakası Kalınlığı .....	18
2.4.TÜNEL-YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİN ZEMİN BÜYÜTMESİ İLE İLİŞKİSİ .....	19
2.4.1. Tünel-Yapı-Zemin Etkileşimi Üzerine Yapılan Sismik Çalışmalar.....	20
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM</b> .....	<b>26</b>
3.1.DENEY MODELİ OLUŞTURULMASI.....	26
3.1.1.Tünel-Yapı-Zemin Modeli (TYZ).....	28

3.1.2. Tünel-Zemin Modeli (TZ).....	29
3.1.3. Yapı-Zemin Modeli (YZ).....	29
3.1.4. Zemin Modeli (Free Field-FF) .....	30
3.2. ANALİZLERDE KULLANILAN ZEMİN VE MALZEME PARAMETRELERİ .....	30
3.3. DİNAMİK ANALİZ ÖZELLİKLERİ .....	31
3.3.1. Fourier Dönüşümleri .....	35
3.3.2. İvme Noktaları.....	38
3.4. PLAXIS PROGRAMI.....	40
3.4.1. Kullanılan Zemin Modelleri .....	40
3.4.1.1. Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli .....	40
3.4.1.2. Hardening Soil (HS) Zemin Modeli.....	40
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>42</b>
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>58</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>60</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>63</b>
<b>EK 1.</b> Analizlerde kullanılan depremlerin Fourier dönüşümleri.....	63
<b>EK 2.</b> Analizlerde kullanılan depremlerin nokta ivme değerleri. ....	65
<b>EK 3.</b> Analizlerde kullanılan depremlerin noktasal ivme dağılımları. ....	67
<b>EK 4.</b> Analizlerde kullanılan depremlerin ivme alan konturları.....	70
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>74</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Spektrum Eğrisi. ....	6
Şekil 2.2: Yarımca İstasyonundan Alınan Deprem Kaydından Hesaplanan Hız Spektrumu.....	7
Şekil 2.3: Yarımca İstasyonuna Ait Hız Spektrumundan Elde Edilen İvme Spektrumu.....	7
Şekil 2.4: Farklı Zemin Türleri İçin İvme Spektrumları. ....	8
Şekil 2.5: Farklı Zemin Türlerine Göre İvme Spektrumları. ....	8
Şekil 2.6: 1987 Whittier ve 1994 Northridge depremleri için normalize edilmiş sözde ivme spektrumları. ....	9
Şekil 2.7: 1987 Whittier, 1991 Sierra ve 1994 Northridge depremleri için normalize edilmiş ortalama ivme spektrumları. ....	10
Şekil 2.8: ABYYHY98'e göre tasarım spektrum eğrisi. ....	11
Şekil 2.9: Yerel zemin sınıfına bağlı spektrum katsayıları. ....	13
Şekil 2.10: Yerel zemin sınıfı 1 için ivme spektrumları. ....	13
Şekil 2.11: Zemin büyütmesini etkileyen faktörler.....	14
Şekil 2.12: Bir boyutlu zemin durumunda dalga yansımalarının gösterimi ve zemin büyütme fonksiyonu. ....	16
Şekil 2.13: Ana kaya üzerinde farklı zemin tipleri yer alan örnek bir zemin profili. ....	17
Şekil 2.14: Zemin tipleri için örnek büyütme fonksiyonları. ....	17
Şekil 2.15: Nümerik programında hazırlanmış bir TZ modeli.....	21
Şekil 2.16: Analiz için hazırlanmış TZ modeli. ....	21
Şekil 2.17: TZ modeli için hazırlanmış sismik tabla modeli. ....	22
Şekil 2.18: Nümerik ortamda hazırlanmış bir TZ modeli.....	23
Şekil 2.19: TZ modeli için hazırlanmış kare kesitli model ve yerleştirilen ivme ölçerler.....	23
Şekil 2.20: Nümerik ortamda hazırlanmış bir TZ modeli. ....	24

Şekil 2.21: Laboratuvar ortamında hazırlanan tünel kesiti. ....	24
Şekil 2.22: Laboratuvar ortamında hazırlanmış bir TZ modeli.....	25
Şekil 2.23: Nümerik ortamda hazırlanmış tünel-zemin modeli. ....	25
Şekil 3.1: Plaxis programında tünel tasarım aşaması.....	27
Şekil 3.2: Örnek Tünel-Yapı-Zemin (TYZ) Durumu. ....	28
Şekil 3.3: TYZ durumuna bir örnek.....	28
Şekil 3.4: TZ durumuna bir örnek.....	29
Şekil 3.5: YZ durumuna bir örnek. ....	29
Şekil 3.6: FF durumuna bir örnek. ....	30
Şekil 3.7: Northridge depremine ait ivme kaydı. ....	33
Şekil 3.8: Friuli depremine ait ivme kaydı.....	33
Şekil 3.9: Willowak depremine ait ivme kaydı.....	33
Şekil 3.10: Parkfield depremine ait ivme kaydı.....	33
Şekil 3.11: Erzincan depremine ait ivme kaydı. ....	33
Şekil 3.12: Victoria depremine ait ivme kaydı.....	34
Şekil 3.13: Newzeland depremine ait ivme kaydı.....	34
Şekil 3.14: Coyote depremine ait ivme kaydı. ....	34
Şekil 3.15: Loma Gilroy depremine ait ivme kaydı.....	34
Şekil 3.16: Seismo Signal programı ara yüzü. ....	36
Şekil 3.17: Coyote depremine ait Fourier dönüşümü.....	37
Şekil 3.18: Loma Gilroy depremine ait Fourier dönüşümü. ....	37
Şekil 3.19: Erzincan depremine ait Fourier dönüşümü. ....	37
Şekil 3.20: Plaxis programında ölçüm için kullanılan ivme noktaları.....	39
Şekil 3.21: Plaxis programında mesh durumu gösteren örnek bir model. ....	39
Şekil 3.22: Hardening Soil modeline ait örnek bir arayüz. ....	41
Şekil 4.1: İvme ölçüm noktaları.....	42



<b>Şekil 4.2:</b> Friuli depremine ait farklı tünellerin derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları. ....	44
<b>Şekil 4.3:</b> Coyote depremine ait farklı tünellerin derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları. ....	45
<b>Şekil 4.4:</b> Willowak depremine ait farklı tünellerin derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları. ....	45
<b>Şekil 4.5:</b> Kullanılan depremlerin TYZ modeli ve H=10 m tünellerin derinliği için noktasal ivme dağılımları. ....	46
<b>Şekil 4.6:</b> Kullanılan depremlerin TZ modeli ve H=10 m tünellerin derinliği için noktasal ivme dağılımları. ....	46
<b>Şekil 4.7:</b> Kullanılan depremlerin TYZ modeli ve H=15m tünellerin derinliği için noktasal ivme dağılımları. ....	47
<b>Şekil 4.8:</b> Kullanılan depremlerin TZ modeli ve H=15m tünellerin derinliği için noktasal ivme dağılımları. ....	47
<b>Şekil 4.9:</b> Kullanılan depremlerin YZ modeli için noktasal ivme dağılımları. ....	48
<b>Şekil 4.10:</b> H=10m tünellerin derinliğine göre TYZ,TZ ve YZ modellerinde A noktasındaki ivme değerleri. ....	48
<b>Şekil 4.11:</b> H=15m tünellerin derinliğine göre TYZ,TZ ve YZ modellerinde A noktasındaki ivme değerleri. ....	49
<b>Şekil 4.12:</b> Dört farklı modelde H=10m tünellerin derinliğinde A noktasındaki ivme değerleri. ....	52
<b>Şekil 4.13:</b> Dört farklı modelde H=15m tünellerin derinliğinde A noktasındaki ivme değerleri. ....	52
<b>Şekil 4.14:</b> Parkfield depremine ait FF modelinde ivme alan konturları. ....	54
<b>Şekil 4.15:</b> Parkfield depremine ait H=10m tünellerin derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları. ....	54
<b>Şekil 4.16:</b> Parkfield depremine ait H=10m tünellerin derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları. ....	54
<b>Şekil 4.17:</b> Parkfield depremine ait H=15m tünellerin derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları. ....	55
<b>Şekil 4.18:</b> Parkfield depreminde H=15m tünellerin derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları. ....	55
<b>Şekil 4.19:</b> Parkfield depremine ait YZ modelinde ivme alan konturları. ....	55
<b>Şekil 4.20:</b> Maksimum ivmelerin yüzeyde etkilediği alanların gösterimi. ....	57

<b>Şekil 0.1:</b> Northridge depremine ait Fourier dönüşümü. ....	63
<b>Şekil 0.2:</b> Parkfield depremine ait Fourier dönüşümü. ....	63
<b>Şekil 0.3:</b> Friuli depremine ait Fourier dönüşümü. ....	63
<b>Şekil 0.4:</b> Newzeland depremine ait Fourier dönüşümü. ....	64
<b>Şekil 0.5:</b> Victoria depremine ait Fourier dönüşümü. ....	64
<b>Şekil 0.6:</b> Willowak depremine ait Fourier dönüşümü. ....	64
<b>Şekil 0.7:</b> Parkfield depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları. ....	67
<b>Şekil 0.8:</b> Loma Gilroy depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları. ....	67
<b>Şekil 0.9:</b> Victoria depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları. ....	68
<b>Şekil 0.10:</b> Erzincan depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları. ....	68
<b>Şekil 0.11:</b> Newzeland depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları. ....	69
<b>Şekil 0.12:</b> Northridge depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları. ....	69
<b>Şekil 0.13:</b> Coyote depremine ait FF modelinde ivme alan konturları. ....	70
<b>Şekil 0.14:</b> Coyote depremine ait H=10m tünel derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları. ....	70
<b>Şekil 0.15:</b> Coyote depremine ait H=10m tünel derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları. ....	70
<b>Şekil 0.16:</b> Coyote depremine ait H=15m tünel derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları. ....	71
<b>Şekil 0.17:</b> Coyote depreminde H=15m tünel derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları. ....	71
<b>Şekil 0.18:</b> Coyote depremine ait YZ modelinde ivme alan konturları. ....	71
<b>Şekil 0.19:</b> Friuli depremine ait FF modelinde ivme alan konturları. ....	72
<b>Şekil 0.20:</b> Friuli depremine ait H=10m tünel derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları. ....	72

<b>Şekil 0.21:</b> Friuli depremine ait H=10m tünel derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları. ....	72
<b>Şekil 0.22:</b> Friuli depremine ait H=15m tünel derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları. ....	73
<b>Şekil 0.23:</b> Friuli depreminde H=15m tünel derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları. ....	73
<b>Şekil 0.24:</b> Friuli depremine ait YZ modelinde ivme alan konturları. ....	73



## TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
<b>Tablo 2.1:</b> Etkin Yer İvmesi Katsayıları.....	11
<b>Tablo 2.2:</b> Spektrum Karakteristik Periyotları.....	12
<b>Tablo 3.1:</b> Analizlerde kullanılan zemin özellikleri.....	31
<b>Tablo 3.2:</b> Analizlerde kullanılan tünel ve temel parametreleri.....	31
<b>Tablo 3.3:</b> Analizlerde kullanılan depremlerin genel özellikleri.....	32
<b>Tablo 3.4:</b> Kullanılan depremlerin max ivme ve süreleri.....	35
<b>Tablo 3.5:</b> Kullanılan depremlerin baskın frekansları ve zemin hakim frekansı.....	38
<b>Tablo 3.6:</b> Analizlerde ölçülen ivme noktalarının derinlikleri.....	39
<b>Tablo 4.1:</b> Friuli depremine ait nokta ivme değerleri.....	43
<b>Tablo 4.2:</b> Victoria depremine ait nokta ivme değerleri.....	43
<b>Tablo 4.3:</b> Willowak depremine ait nokta ivme değerleri.....	43
<b>Tablo 4.4:</b> TYZ ve YZ modellerinin arasındaki yüzde ivme farkları.....	50
<b>Tablo 4.5:</b> Dokuz depreme ait büyütme değerleri.....	50
<b>Tablo 4.6:</b> Yapılan tüm analizlerin listesi.....	53
<b>Tablo 0.1:</b> Coyote depremine ait nokta ivme değerleri.....	65
<b>Tablo 0.2:</b> Parkfield depremine ait nokta ivme değerleri.....	65
<b>Tablo 0.3:</b> Loma Gilroy depremine ait nokta ivme değerleri.....	65
<b>Tablo 0.4:</b> Newzeland depremine ait nokta ivme değerleri.....	66
<b>Tablo 0.5:</b> Erzincan depremine ait nokta ivme değerleri.....	66
<b>Tablo 0.6:</b> Northridge depremine ait nokta ivme değerleri.....	66

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$\rho$	: Yoğunluk
$\gamma$	: Birim Hacim Ağırlığı
$\xi$	: Sönüm Oranı
$\phi^0$	: Kayma Mukavemet Açısı
$\psi$	: Dilatasyon Açısı
$\mu$	: Poisson Oranı
$A_0$	: Etkin Yer İvmesi Katsayısı
$B_k$	: Zemin Büyütme Katsayısı
$c$	: Kohezyon
$E(t)$	: Enerji Akışı
$E_{oed}$	: Tanjant Eğimi
$E_s$	: Elastisite Modülü
$E_{ur}$	: Boşaltma/Yükleme Eğrisi
$E_{50}$	: Sekant Eğimi
$e_0$	: Boşluk Oranı
$f_0$	: Temel Rezonans Frekansı
$f_1$	: Zemin Hakim Frekansı
$f_2$	: Deprem Hakim Frekansı
$f_s$	: Harmonik Frekans
$g$	: Yerçekimi İvmesi
$G$	: Kayma Modülü
$K_0$	: Yanal Toprak Basıncı
$H$	: Zemin Tabaka Kalınlığı
$n$	: Bina Kat Sayısı
$T$	: Periyot
$t_0$	: Zemin Hakim Periyodu
$S(T)$	: Spektral Katsayısı
$V_s$	: Kayma Dalgası Hızı
$Z$	: Empedans Oranı
$w_f$	: Açısal Hız

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>ABYYHY</b>	: Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
<b>BEM</b>	: Boundary Element Method
<b>DBYBHY</b>	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
<b>FDM</b>	: Finite Differance Method
<b>FEM</b>	: Finite Element Method
<b>FF</b>	: Free Field
<b>PGA</b>	: Peak Ground Acceleration
<b>PGA</b>	: Pseudo Spectral Acceleration
<b>TYZ</b>	: Tünel-Yapı-Zemin
<b>TZ</b>	: Tünel-Zemin
<b>USGS</b>	: United State Geological Servey
<b>YZ</b>	: Yapı-Zemin

## ÖZET

# TÜNEL-YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN ZEMİN BÜYÜTMESİNE ETKİLERİNİN NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ozan SARIKAYA**

**İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman : Prof. Dr. İlknur BOZBEY**

Anakaya seviyesinde bir kaynaktan açığa çıkan enerjinin oluşturduğu sismik dalgalar, içinden geçtikleri ortamların özelliklerinden etkilenerek yayılımları sırasında; frekans, süre ve genliklerinde değişime uğrar. Yüzeğe yakın yerlerde deprem dalgalarının genliklerinde meydana gelen artışa bağlı olarak ivme değerlerinde de artış meydana gelir ve bu da zemin büyütmesi olarak adlandırılır. Bu tez çalışmasında olası bir deprem durumunda tünel, yapı ve zemin etkileşiminin zemin büyütmesine olan etkileri incelenmiştir. Deprem yüklerine maruz kalan tünel yapılarının sismik davranışı, buldukları bölgenin zemin yapısının yanı sıra o bölgede bulunan diğer yapılara ve tünellerin bu yapılarla olan ilişkisine bağlıdır. Bunların yanında tünelin zemin tabakasına göre derinliği, tünel kaplamasının et kalınlığı ve maruz kalınan deprem dalgalarının frekans ve sönüm oranları tünelin sismik davranışını değiştirir. Şu ana kadar bu konuyla ilgili çeşitli laboratuvar çalışmaları olmasına rağmen bu konu son yıllarda daha çok nümerik olarak çalışılmaya başlanan bir konudur. Bu çalışma sırasında tünel-yapı-zemin etkileşimleri adı altında PLAXİS 2D programında nümerik analizler yapılmıştır. Programda üst yapı, rijit bir temele sahip olacak şekilde yayılı yük olarak tasarlanmıştır. Yapının altında belli bir atalet ve rijitliğe sahip elastik malzeme özelliği taşıyan tünel oluşturulmuştur. Analizler sırasında kullanılan tünel derinlikleri  $H \leq 15$  m olduğundan dolayı sığ tüneller olarak adlandırılmıştır. Analizlerde tünelin çapı sabit tutulmuştur. Deprem dalgalarının yapı-tünel arasında sıkışıp yansıma yapıp yapmadığı ve bunun yüzeyde ivme

değerlerinde artışa sebep olup olmadığı incelenmiştir. Tünelin zemin tabakasına göre konumu değiştirilerek tünel derinliğinin yüzeyde okunan ivme değerlerinde değişime sebep olup olmayacağı ve ivme değerlerinin ana kaya seviyesinden yüzeye nasıl değiştiği araştırılmıştır. Analizlerin birinci bölümünde tünel ve yapının zemin büyütmesine etkisini tam olarak anlamak amacıyla analizlerde tünel, yapı ve zeminin olduğu, sadece tünel ve zeminin ve sadece yapı ve zeminin olduğu üç farklı durumda analizler tekrarlanmıştır. Analizlerin ikinci bölümünde ise yüzeydeki ivme dağılım alanlarını görmek amacıyla analizlere sadece zeminin olduğu durum eklenerek dört farklı durum için analizler yapılmıştır. Daha önce meydana gelmiş birbirinden farklı frekans, genlik ve pik ivmelere sahip dokuz adet depremin ana kaya seviyesinde ölçülen ivme kayıtları incelenmiş ve analiz için uygun nitelikteki deprem kayıtları USGS (U.S. Geological Survey) veri tabanından alınmıştır. Kullanılan ivme kayıtlarının Fourier dönüşümleri yapılarak baskın frekansları bulunmuş ve bu deprem kayıtları sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla nümerik ortamda işlenmiştir. Ardından deprem simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ana kaya seviyesinden başlayarak ilerleyen deprem dalgalarının tünelin etrafından geçip zemin yüzeyine ulaşırken geçirdiği değişimi anlamak için farklı noktalarda ivme değerleri okunmuştur. Bu noktalarda ölçülen ivme değerleri kıyaslanarak zemin büyütme noktaları tespit edilmiştir. Analizler sonucunda zemin büyütmelerinin en fazla sadece zemin modelinde ardından tünel, yapı, zeminin birlikte olduğu modelde olduğu görülmüştür. Analizler sırasında tünelin derinliği değiştirilerek deprem sonrasında zemin büyütmesine olan etkisi incelenmiştir. Tünel derinliği arttıkça tünel, yapı, zemin etkileşimi azaldığından yüzeydeki zemin büyütme ve ivme değerleri azalmıştır. Analizler sonucunda tünelin yapıya daha uzak olduğu durumlarda yüzeyde depremden etkilenen alanların daha geniş yer kapladığı görülmüştür.

Aralık 2018, 92 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Zemin Büyütmesi, tünel-yapı-zemin etkileşimi, deprem, Fourier dönüşümleri, ivme kayıtları.



## **SUMMARY**

### **NUMERICAL INVESTIGATION OF EFFECTS OF TUNNEL-STRUCTURE- SOIL INTERACTION ON SOIL AMPLIFICATION**

#### **M.Sc. THESIS**

**Ozan SARIKAYA**

**Istanbul University-Cerrahpasa**

**Institute of Graduate Studies**

**Department of Civil Engineering**

**Supervisor : Prof. Dr. İlknur BOZBEY**

Seismic waves formed by the energy released from a source at the bedrock level are affected by the characteristics of the environment through which they pass through; frequency, duration and amplitude changes.. There is also an increase in the acceleration values due to the increase in the amplitudes of the earthquake waves near the surface, and this is called the soil amplification. In this thesis study, the effects of tunnel, structure and ground interaction on soil amplification in case of a possible earthquake have been investigated. The seismic behavior of the tunnel structures exposed to earthquake loads depends on the structure of the area in which they are located, as well as the other structures in the area and the relation of the tunnels to these structures. In addition, the depth of the tunnel according to the ground layer, the wall thickness of the tunnel covering and the frequency and damping ratios of the earthquake waves exposed change the seismic behavior of the tunnel. Although there have been various laboratory studies related to this topic so far, this subject has been started to work more numerically in recent years. Numerical analyzes were carried out in the PLAXIS 2D program under the name tunnel-structure-ground interaction during this study. In the program, the superstructure is designed as a spring loaded with a rigid base. Under the structure, a tunnel with the characteristic of elastic material with a certain inertia and rigidity

is formed. The tunnel depths used during the analyzes were called as shallow tunnels due to  $H \leq 15$  m. In the analysis, the diameter of the tunnel is fixed. Whether or not the earthquake waves are trapped between the structure and the tunnel and whether it causes an increase in the acceleration values on the surface is investigated. The location of the tunnel in relation to the ground layer was changed and it was investigated whether the depth of the tunnel would cause changes in the acceleration values read on the surface and how the acceleration values changed from the bedrock level to the surface. In the first part of the analysis, in order to fully understand the effect of the tunnel and building on the ground growth, the analyzes were repeated in three different cases: tunnel, structure and ground, only tunnel and ground and only structure and ground. In the second part of the analyzes, analyzes were made for four different situations by adding the condition that only the ground is present in the analyzes to see the acceleration distribution areas in the surface. The acceleration records measured at the main rock level of nine earthquakes with different frequencies, amplitudes and peak accelerations were investigated and the earthquake records of the appropriate nature for the analysis were taken from the USGS (USA Geological Survey) database. Fourier transformations of the acceleration records were performed and the dominant frequencies were found and these earthquake records were processed in a numerical environment by the finite element method. Then earthquake simulations were carried out. The acceleration values were read at different points to understand the change that the earthquake waves starting from the main rock level passed through the tunnel and reached to the ground surface. Soil amplification points were determined by comparing accelerations measured at these points. As a result of the analyzes, it was seen that the soil amplification was mostly in the ground model, followed by the tunnel, structure. During the analyzes, the depth of the tunnel was changed and the effect of the earthquake after the earthquake was investigated. As the tunnel depth increases, as the tunnel, structure and ground interaction decreases, the soil amplification and acceleration values have decreased. As a result of the analyzes, it was observed that the areas affected by the earthquake on the surface occupied a larger area when the tunnel was further away from the structure.

December 2018, 92 pages.

**Keywords:** Soil Amplification, tunnel-structure-ground interaction, earthquake, Fourier transformation, acceleration records.

## 1. GİRİŞ

Yeraltı yapıları, insan popülasyonunun giderek arttığı, endüstrileşmenin yaygınlaştığı ve şehirleşmenin büyüdüğü bir dönemde altyapının en önemli parçalarını oluşturmuşlardır. Metrolar, su nakil yolları ve oto yollar gibi yer altı yapıları günümüzde çokça kullanılmaktadır ve bunlar olası deprem durumlarında hem dinamik hem de statik etkilere maruz kalmaktadır ve tasarım esnasında bu etkiler ön planda tutularak hesaplamalar yapılır. Bu yapılardan en önemlisi kuşkusuz tünellerdir.

Bu yeraltı yapılarının birbirleri ve çevresiyle olan ilişkileri statik ve dinamik yükler altında farklı sonuçlar doğurur. Deprem sırasında oluşabilecek zemin büyütmelerinin daha gerçekçi ve daha doğru değerlendirilebilmesi için nümerik analizlerde bazı parametrelerin daha dikkatli seçilip, irdelenmesi gerekir. Bunlar arasında tünelin konumu, derinliği, çapı, sisteme girilen deprem dalgasının tipi, frekansı, zemin kayma dalgası hızı, zemin cinsi ve sıklığı zemin büyütmesini etkileyen ana parametrelerdir.

Zemin büyütme konularıyla ilgili yapılan analitik çalışmalar yukarıda belirtilen birçok parametreyi göz ardı ettiği için sağlıklı bir yaklaşım değildir. Analitik çalışmaların yanı sıra FEM, FDM ve BEM gibi birçok nümerik metot geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden FEM metodunu kullanan Yiouta-Mitra (2007), zemin ortamını visco-elastik bir malzeme olarak, tüneli de sonlu ve sonsuz bir yapı olarak görüp buna göre analiz yapmışlardır. Yine bir başka araştırmada Sica ve diğerleri (2015), tünelin oluşturduğu zemin içerisindeki boşluğun zemin yüzeyinde oluşturacağı zemin büyütmelerini FEM metodunu kullanarak bulmaya çalışmışlardır. Bu çalışmaları yaparken tünelin derinliği ve boşluk etkisini dikkate almışlardır.

Abuhajar ve diğerleri (2011), analitik ve nümerik metotlar gibi yer altında bulunan yapıların sismik bir hareket sonrasında zemin yüzeyinde meydana getireceği etkileri görmek için laboratuvar ortamında deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kare şeklinde oluşturulan olan ve etrafı kum zeminle kaplı olan bir tünelin sismik harekette verdiği ivme tepkilerini ölçmek adına santrifüj deneyleri yapmışlardır.

Ashghabadi ve Matinmanesh (2011), nümerik ortamda yaptıkları çalışmalarında deprem durumunda tünelin yapı ile olan etkileşimini incelemişlerdir Çalışma sırasında farklı frekans değerlerine sahip aynı deprem sisteme uygulanmış ve tünel ve çevresinde ivme değişimleri gözlenmiştir. Ayrıca zemin özellikleri farklı olan malzemeler kullanılarak zemin cinsinin sonuçlara etkisi araştırılmıştır.

Tsinidis ve diğerleri (2015), çalışmalarında tüneli kare kesitli bir kutu şeklinde tasarlamış ve uygun malzeme ile dolgusu yapılarak laboratuvar ortamında dinamik santrifüj testlerini yapmış ve bir kopyasını da nümerik olarak tasarlamışlardır. Modelin belli yerlerine ivme ve deplasman ölçerler yerleştirerek tabandan yüzeye ivme değişimlerini incelemişlerdir.

Moghadam ve Baziar (2016), laboratuvar ortamında sismik tabla modelini kullanarak zemin yüzeyinde meydana gelen ivmelere tünelin bir etkisinin olup olmadığını araştırmışlardır. Benzer parametreler kullanarak oluşturdukları nümerik analizlerden çıkan sonuçları sismik tabla testlerindeki bulgularla kıyaslayarak farklılıkları araştırmışlardır.

Tüm bu analitik, nümerik ve deneysel çalışmalar göstermiştir ki, tüneller başta olmak üzere diğer yer altı yapıları deprem durumunda zemin yüzeyinde oluşacak sismik davranışı değiştirir ve etkiler. Ancak görüldüğü üzere yapılan çalışmaların birçoğu laboratuvar ortamda ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında ise nümerik bir program olan Plaxis programı kullanılarak içerisinde tünel ve yapının bulunduğu bir zemin modeli oluşturulmuştur. Rijit özelliklere sahip bir malzeme tanımlanarak sistemin temeli oluşturulmuştur. Bu temelin üzerine de yapıyı temsil edecek olan yayılı bir yük etki ettirilmiştir. Yapının altında ise belli bir atalet ve rijitliğe sahip elastik malzeme özelliği taşıyan tünel oluşturulmuştur ve analizler boyunca tünelin çapı sabit tutulmuştur. Modelin en alt noktasına kayma dalgası hızı ve elastisite modeli oldukça yüksek ana kaya özelliklerine sahip olacak şekilde linear elastik bir malzeme tanımlanmıştır. Deprem durumunda modelin davranışı tanımlanırken sınır koşulları gerçeğe en yakın olacak şekilde sistemin iki yanı y yönünde tutulu x yönünde serbest hareketi sağlayan tied degrees of freedom ve zemin tabanı sistemle uyumlu çalışan compliant base olarak tanımlanmıştır. Fourier dönüşümleri yapılarak baskın deprem frekansları bulunan dokuz farklı deprem analizler boyunca kullanılmıştır. Kullanılan bu depremler USGS (U.S. Geological Survey) veri tabanından elde edilmiştir. Tünel-yapı-zeminin olduğu model; TYZ olarak, sadece tünelin olduğu model; TZ olarak, sadece yapının olduğu model; YZ olarak ve sadece zeminin olduğu model; FF olarak

adlandırılmıştır. Tünelin konumu her bir sismik analizde değiştirilerek sonuca etkisi araştırılmıştır. Analizlerin birinci bölümünde her bir deprem ivme kaydı için analizler tekrarlanarak TYZ, YZ ve TZ durumlarının olduğu üç farklı modelde sonuçlar irdelenmiş ve belli noktalarda ivme değerleri okunarak zemin büyütmeleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu bölümde ayrıca tünel derinliğinin yüzeyde okunan ivme değerlerine ve zemin büyütmelerine etkisi incelenmiştir. Yine bu bölümde yüzeydeki zemin büyütmelerinin ne kadarının yapıdan ne kadarının tünelden kaynaklandığı araştırılmıştır. İlk bölümdeki analiz sonuçlarından maksimum ivmenin yüzeyde kaçınıcı saniyede meydana geldiği bulunmuş ve analizlerin ikinci bölümünde bu süreler referans alınarak analizler tekrarlanmıştır. Analizlerin ikinci bölümünde ise TYZ, YZ ve TZ durumlarına ek olarak sadece zeminin olduğu FF modeli eklenerek dört farklı durumda üç farklı deprem için ayrıca analizler yapılarak tünel-yapı-zemin etkileşiminin yüzeyde etkilediği alanlar ivme-alan konturlarıyla irdelenmiştir. Ayrıca yüzeyde meydana gelen zemin büyütmeleri dört farklı durum için tekrardan incelenmiştir.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1.TÜNELLER

Tünel; bir doğrultulan diğer bir doğrultuya yatay yönde yer altından ya da su kaynaklarının altından geçmeyi sağlayan yol veya geçitlerdir. Tüneller birçok amaç için kullanılmışlardır; madencilikte çıkarılan madenlerin bir yerden diğer bir yere nakliyesini yapmak amacıyla, bir kaynaktan şehre su getirmek amacıyla su yolu olarak, askeri amaç için bir kaleye altından geçip ulaşmak gibi birçok farklı amaçla kullanılmışlardır. Tabii insanoğlu kendini geliştirmesiyle, endüstrileşme ve ticaretin ilerlemesiyle gerek karayolu geçitleri olsun gerek demiryolu geçitleri olsun birçok alanda tüneller yapılmıştır. Doğal olarak insan nüfusunun artmasıyla alternatif ulaşım yolları aranmaya başlamıştır. Şehirleşmenin de artmasıyla metro gibi yeraltı ulaşım araçlarının sayıları artmıştır ve böylece şehirlerdeki trafik yükü azalmaya başlamıştır. Tünellerin şehirlerdeki kullanım amaçları sadece metro olarak değil, hidroelektrik santrallerinin yapımı esnasında, kanalizasyon hatlarının döşenmesi ve elektrik kablolarının muhafaza edilmesi gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır.

#### 2.1.1.Tünel Çeşitleri

Kullanım amaçlarına göre tünelleri dört ana gruba ayırabiliriz:

##### 2.1.1.1. Demiryolu Tüneli

Yalnızca bir yönde ilerleyen tek hat olarak döşenen demiryolları 5-7 m arasında genişliklere sahip olurken, iki yönde ilerleyen çift hat olarak döşenen demiryolları ise 10 m'lik bir genişliğe sahip olurlar.

##### 2.1.1.2. Karayolu Tüneli

Genellikle iki şehri birbirine bağlamak için inşa edilen bu tüneller 5-6 m genişliğinde bir otoyolu ve yanlarında da yayaların kullanımı için iki adet yaya yolu barındırırlar. Ayrıca şehir içlerinde trafik yükü bakımından fazla olan yerlerde ihtiyaç olarak kullanılırlar. Bu tüneller

bazen bir yönde oluşan trafiği kapsayabilirken, bazen de hem gidiş ve hem de geliş olmak üzere iki yönlü trafiği rahatlatmak için kullanılabilir.

### **2.1.1.3. Yaya Tüneli**

Yayaların kullandığı bu tünel ortalama 4 m genişliğe ve tünelden geçenlerin daha rahat geçmesi için ortalama 3 m yüksekliğe sahip olurlar. Bu tüneller bazen daire, bazen dikdörtgen bazen de kemer şeklinde olurlar.

### **2.1.1.4. Metrolar**

Artan insan nüfusu şehir yaşamında alternatif ulaşım yollarının gelişmesinde pay sahibidir. Bu alternatif ulaşım yollarından biri de metrolardır. Metro; şehir içlerinde kullanılan hızlı ve rahat taşımacılık için geliştirilen raylı sistemlerdir. Her bölgede belli sayıda istasyon olur. Bölgedeki insan popülasyonuna göre metroların istasyon sayıları ve kapasiteleri artırılabilir. Metro hatlarının en önemli özelliklerinden biri diğer karayolu ve diğer demir yollarıyla kesişmemesidir. Bu sebepten metrolar genellikle hızlı ve pratik ulaşım araçları olarak tanınırlar. Böylece şehir içlerindeki trafiği de engellememiş olurlar.

## **2.2.ZEMİN TİTREŞİM HAREKETİ**

### **2.2.1.Deprem Spektrumu**

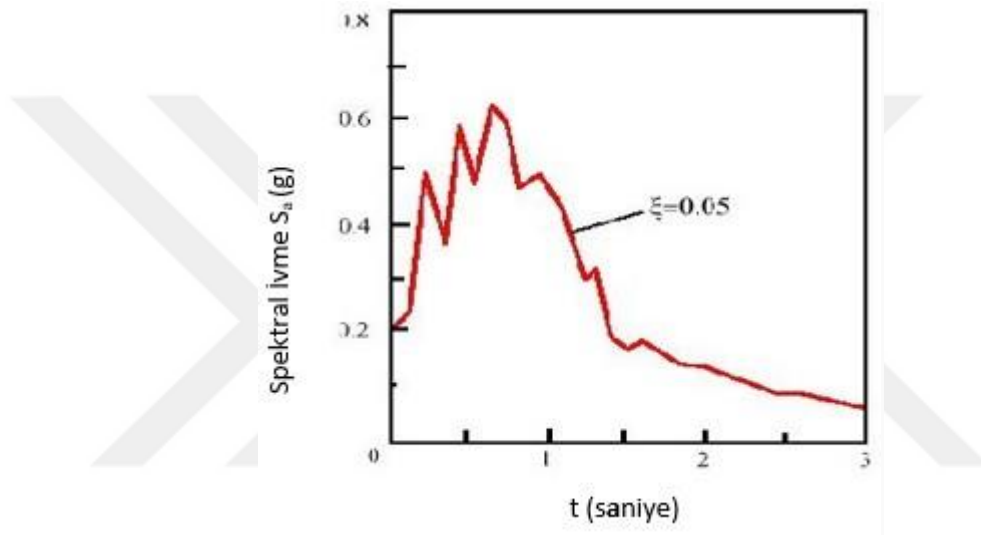
Deprem ivme kayıtları harmonik titreşimler içerir ve bu titreşimler birbirinden oldukça farklı genliklere, sönüm oranlarına ve frekanslara sahip olabilirler.

Basitçe dalgasal hareket olarak tanımlayabileceğimiz harmonik titreşimlerin periyotları iki pik nokta arasındaki zaman farklarıdır. Frekans ise periyot sayısının tam tersidir yani belli bir zaman aralığındaki periyot sayısıdır.

Zamanı tanımlamak için saniye kullanılır, yani basit bir harmonik hareketin bir saniyede tekrar etme sayısı o hareketin frekansı olmuş olur ve Heart (Hz) olarak ifade edilir. Sönüm olayı ise zaman içerisinde bir titreşim hareketinin ilk konumuna göre büyüklüğünde bir azalmasının olması yani sönme olayının gerçekleşmesidir.

Deprem Spektrum Grafiği: Bir deprem etkisine altında bulunan yapıların hız gibi, ivme gibi, yer değiştirme gibi durumlarının en yüksek derecesini gösteren grafiğe deprem spektrum grafiği denir.

Yapılar birden çok titreşim periyotları içerirler ama yapının davranışını etkileyen en çok yapının birinci periyodudur. Yapıların davranışını belirlemek için kullanılan periyotlarda oluşan birçok titreşiminden bulunan en yüksek hız, ivme ve yer değiştirme değerleri bir grafikte toplanır ve sprektum eğrisi elde edilir.

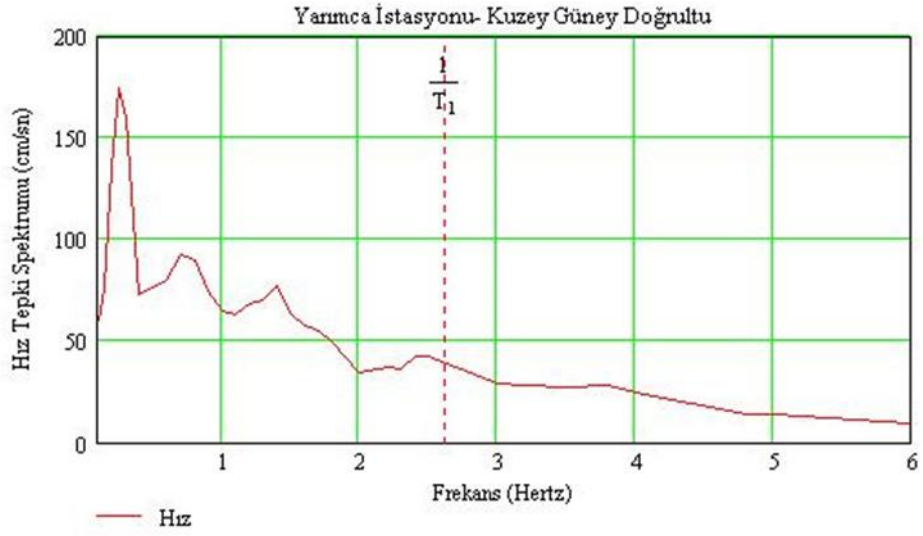


Şekil 2.1: Spektrum Eğrisi.

Yukarıdaki Şekil 2.1'de yüzde beş sönüm oranına sahip bir yapı için ivme spektrum eğrisi gösterilmiştir. Genellikle bir yapının dinamik davranışı takip edilirken ivme spektumları kullanılır. Binaların dinamik analizleri yapılırken sadece bir depremin ivme spektumları kullanılabilir ya da daha önce yaşanmış olan büyük depremlerin ivme spektumları da kullanılabilir. Deprem hareketinin nihai hızını belirlemek için hız tepki spekturmu kullanılır ama daha çok ivme spektumlarının oluşturulması için kullanılır.

Aşağıdaki Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te sırasıyla 1999 Marmara depreminde sonrasında elde edilen ivme grafiklerinden bulunan yüzde beş sönüm oranına sahip hız ve ivme tepki spektumları temsil edilmiştir.





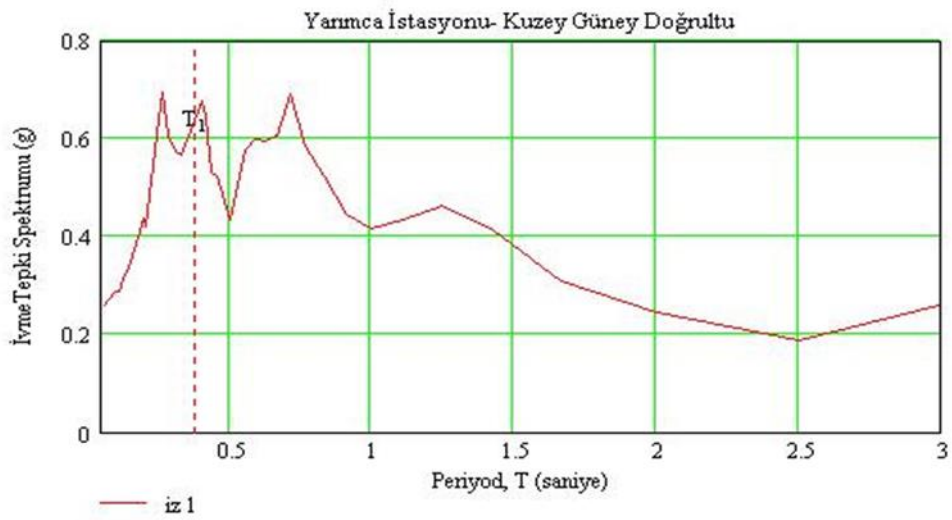
Şekil 2.2: Yarımcı İstasyonundan Alınan Deprem Kaydından Hesaplanan Hız Spektrumu.

Hız spektrumlarından ivme spektrumlarına geçiş yapmak için;

$$\omega_f = 2 * \pi * \text{Frekans}_f * \text{Hz} \quad (2.1)$$

$$\text{İVME} = \omega_f * \text{HIZ}_f * \frac{\text{cm.s}^{-1}}{\text{g}} \quad (2.2)$$

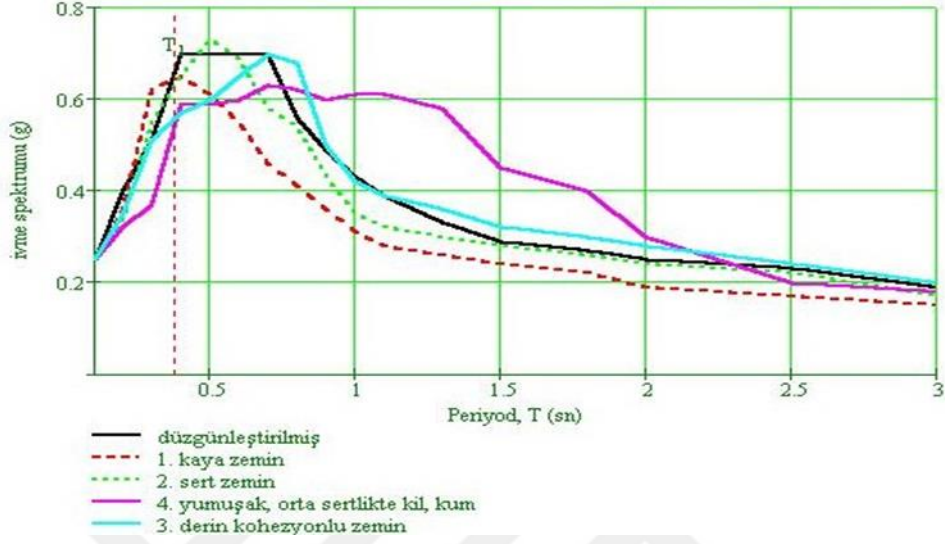
bağıntıları kullanılır.



Şekil 2.3: Yarımcı İstasyonuna Ait Hız Spektrumundan Elde Edilen İvme Spektrumu.

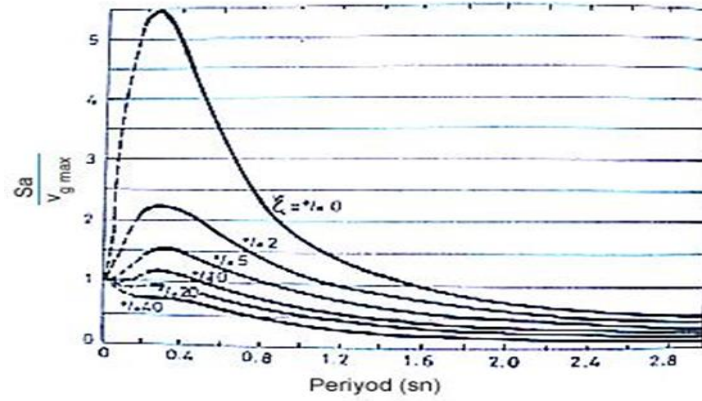
Zemin özellikleri ve sönüm oranları ivme spektrumlarını etkileyen faktörlerin başında gelir.

Aşağıda farklı zemin durumları için Şekil 2.4'te ivme spektrumu verilmiştir.



Şekil 2.4: Farklı Zemin Türleri İçin İvme Spektrumları.

Aşağıdaki Şekil 2.5'te sönüm oranları birbirinden farklı yapılardan alınmış spektrumlar ortalama olarak gösterilmiştir. Yapılarda sönüm oranları azaldıkça deprem etkisi daha çok hissedilirken, sönüm oranının artması deprem etkisini azaltıcı yönde etkiler. Bir başka deyişle yapılar tasarlanırken daha dayanıklı bir yapı elde edilmek isteniyorsa sönüm oranı yüksek yapı olarak modellenmesi gerekir.



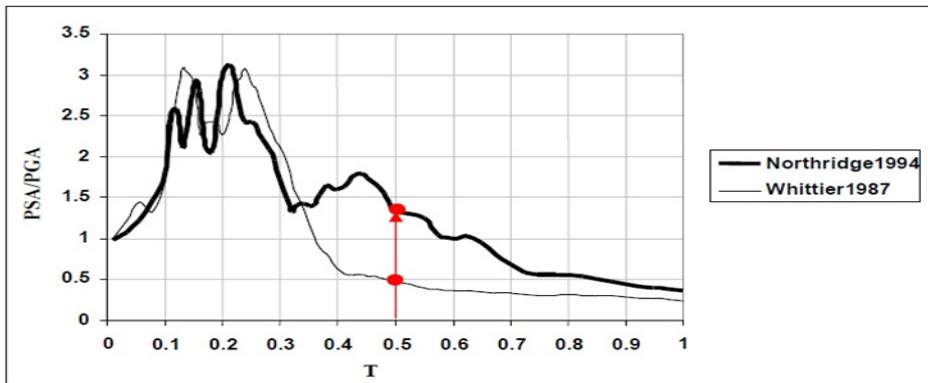
Şekil 2.5: Farklı Zemin Türlerine Göre İvme Spektrumları.

## 2.2.Tasarım Spektrumu

Yapıları tasarlamak için gerekli olan deprem yükü bulunurken tasarım spektrumları kullanılır. Yani diğer bir ifadeyle daha önce yaşanmış olan bir depremden ziyade ileride olması düşünülen depremler için tasarım spektrumları oluşturulur. Tabii ileride olması düşünülen depremlerle ilgili tasarım spektrumları oluşturulurken o coğrafyada daha önce yaşanmış olan deprem kayıtlarından faydalanılır. Tasarım spektrumunun oluşturulacağı bölgede daha önce hiç deprem olmamışsa ya da deprem olup kayıt edilmemişse o zaman başka yerlerde meydana gelen deprem kayıtları incelenerek benzer durumda olan kayıtlar üzerinden tasarım spektrumları oluşturulur. Doğal olarak benzer bölgelerde farklı zaman dilimlerinde kaydedilmiş deprem hareketleri için oluşturulacak spektrumlar kırıklı bir biçimde gözükür. Şekil 2.6'da, 1987 Whittier ve 1994 Northridge deprem kayıtlarından elde edilen ivme spektrumları gösterilmiştir.

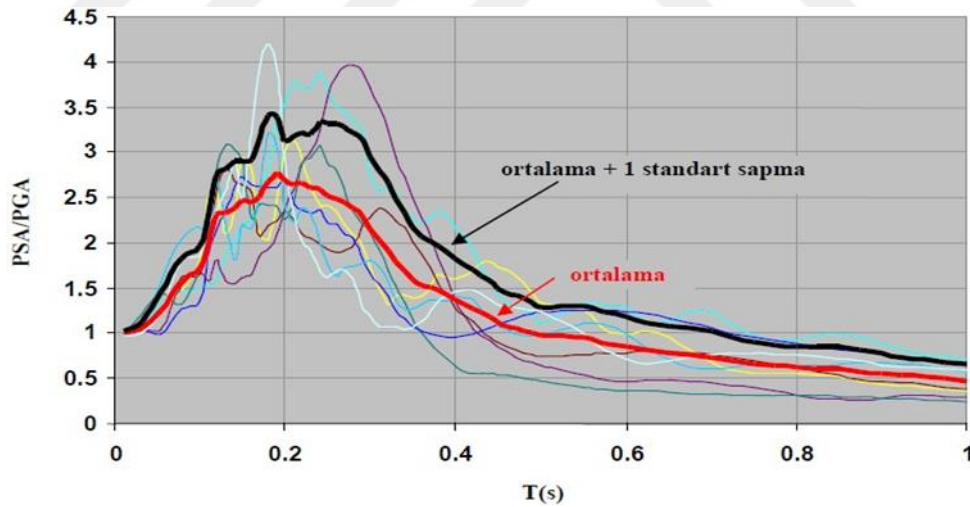
PSA; Önce yer değiştirmeye ait spektrum bulunur ve daha sonra her periyot için açılal frekans ve spektral yer değiştirme çarpılarak pseudo ivme spektrumu elde edilir ve bu da PSA olarak ifade edilir.

PGA; Farklı maksimum ivmeye sahip farklı bölgeler için çizilmiş olan davranış spektrumları aynı grafik ortamında çizilerek birbiriyle kıyaslanır. Bu bölgelere ait pseudo ivmeleri ait oldukları bölgelerde meydana gelen maksimum ivmeler bölünerek normalize edilirler. Bunun sonucunda ortaya normalize edilmiş ivme spektrumları ortaya çıkar ki buna da PGA/PSA denir.



Şekil 2.6: 1987 Whittier ve 1994 Northridge depremleri için normalize edilmiş sözde ivme spektrumları.

Şekil 2.6'dan da anlaşılacağı üzere spektrumlar birbirlerinden farklı durmaktadır. Bu farklılık sebebiyle yukarıda da görüldüğü üzere periyodun 0.5 olduğu zaman tek dereceli serbestliğe sahip olan bir sistem için oldukça farklı değerler oluşmaktadır. Buna ek olarak en yüksek ivme değerlerine de benzer olmayan periyotlarda ulaşmaktadırlar. Buradan sonuçla depremler benzer coğrafyada kayıt edilmiş olsalar bile yalnız başlarına ileride olması düşünülen diğer depremlere ait net bir bilgi vermezler. Ama yine de bu bölge özelinde tasarım spektrumları oluşturulabilir. Tasarım spektrumlarının, daha çok, yapının yapılacağı bölgede daha önce kaydedilmiş depremlerden elde edilen spektrumların kıyaslanması sonucu ortalama bir spektrum elde edilmesi yöntemiyle bulunduğunu söylemiştik. Bazen tüm periyot değerleri için farklı spektrumlardan çıkartılan sayıların ortalama bir değeri alınarak kullanılır. Ama kimi zaman da ortalama bir değer elde etmek yetmeyebilir, bu ortalama değere standart bir sapma ilave edilerek tasarım spektrumları elde edilir. Şekil 2.7'de, 1987 Whittier, 1991 Sierra ve 1994 Northridge depremlerinden elde edilmiş olan farklı sayıda kayıtlar için çizilmiş spektrumların ortalaması alınarak elde edilmiş olan ortalama spektrumları ve bu ortalamaya +1 ilave edilerek oluşturulmuş olan standart sapma ilaveli ortalama spektrumlar çizilmiştir.

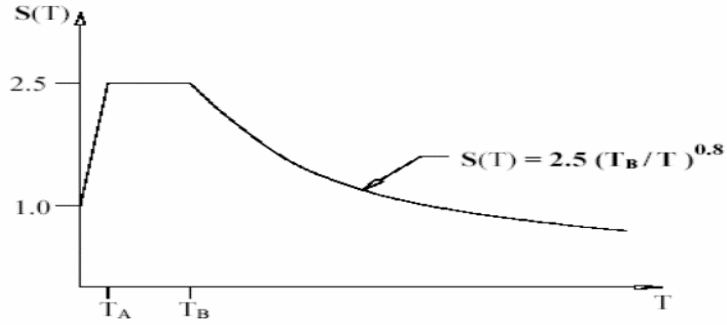


**Şekil 2.7:** 1987 Whittier, 1991 Sierra ve 1994 Northridge depremleri için normalize edilmiş ortalama ivme spektrumları.

Daha çok deprem kaydından elde edilen spektrumlar kullanılarak oluşturulan ortalama spektrumlar daha az kırıklı ve düzgün bir yapıda olurlar. Doğal olarak ne kadar çok deprem kaydına ait spektrumlar kullanılarak tasarım spektrumu hazırlanırsa o kadar düzgün ve gerçekçi eğriler oluşturulur. Bundan dolayı deprem yönetmeliğinde yer alan spektrumların

eğrileri daha düzgündür. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikte deprem yükünü elde etmek için kullanılan tasarım spektrumu uygulanması düşünülen bölgelerdeki zeminlerin yerel zemin sınıflarına göre oluşturulmuştur. Bahsedilen normalize edilmiş spektrum Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Şekil 2.8’de gösterilmiş olan normalize edilmiş ivme spektrumunun yatay ekseninde karşılık gelen değer yapı periyodu, düşey eksenine karşılık gelen değer ise  $S(T)$  ile gösterilen yani yapı periyoduna ait spektrum katsayısıdır. Spektrum katsayısı terimi, Şekil 2.7’de gösterilmiş olan (PSA/PGA) parametresini ifade eder.

Ama spektrum katsayısının elde edilmesi tek başına deprem yükünü hesaplamak için yeterli olmaz. Daha önce de bahsedildiği gibi pseudo spektral ivme değerinin elde edilmesi için PGA değerinin bulunması gerekir. Ancak ABYYHY98 (Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik)’de maksimum yer ivmesi,  $A_0$  yani etkin yer ivmesi katsayısına bağlı durumdadır. Tablo 2.1’de, yapının inşa edileceği deprem bölgesine ait etkin yer ivmesi katsayıları gösterilmiştir.



Şekil 2.8: ABYYHY98’e göre tasarım spektrum eğrisi.

Tablo 2.1: Etkin Yer İvmesi Katsayıları.

DEPREM BÖLGESİ	$A_0$
1	0.4
2	0.3
3	0.2
4	0.1

Etkin yer ivmesi katsayısı ile maksimum yer ivmesi arasındaki ilişkiyi ifade eden bağıntı aşağıda gösterilmiştir.

$$PGA = A_0 * g \quad (2.3)$$

Nihayetinde, etkin yer ivmesi, spektrum katsayısı ve yer çekimi ivmesinin çarpılması sonucu deprem yükünü elde etmek için olması gereken pseudo spektral ivme değeri bulunmuş olur.

$$PSA = \left( \frac{PSA}{PGA} \right) * PGA \quad (2.4)$$

$$\left( \frac{PSA}{PGA} \right) = S(T) \quad (2.5)$$

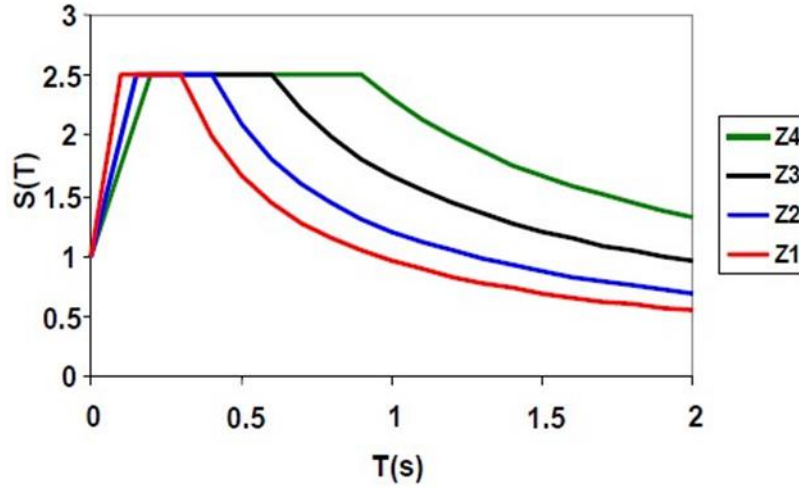
$$PSA = S(T) * A_0 * g \quad (2.6)$$

Şekil 2.8’de gösterilmiş olan  $T_A$  ve  $T_B$  periyotları, spektrum karakteristik periyotları olarak ifade edilirler.  $T_A$  ve  $T_B$  değerlerinin ABYYHY98’de yerel zemin sınıflarına göre değiştiğini gösteren hali Tablo 2.2’ de gösterilmiştir.

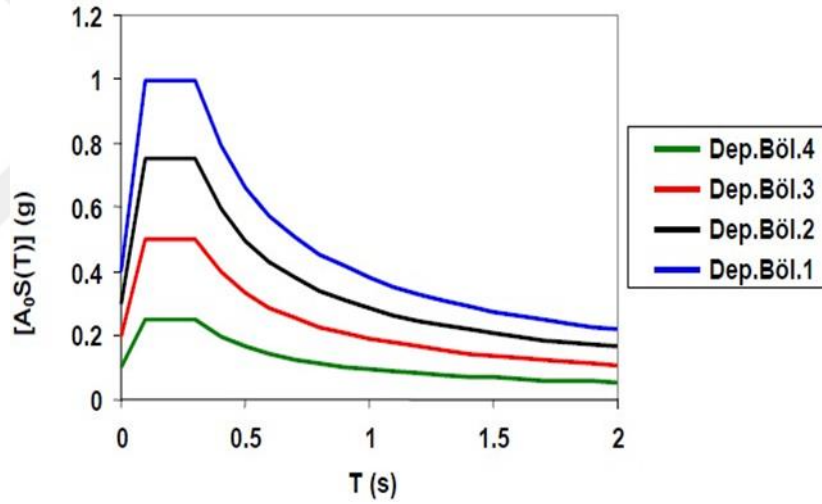
**Tablo 2.2:** Spektrum Karakteristik Periyotları.

YEREL ZEMİN SINIFI	$T_A$	$T_B$
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90

Şekil 2.9’da spektrum katsayılarının yerel zemin sınıflarına göre grafikleştirilmiş hali gösterilmiştir. Şekil 2.10’da ise 1.,2.,3. ve 4. derece deprem bölgelerinde yapılması düşünülen yapılar için kullanılacak olan pseudo ivme spektrumu yerel zemin sınıfı 1 için gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Yerel zemin sınıfına bağlı spektrum katsayıları.



Şekil 2.10: Yerel zemin sınıfı 1 için ivme spektrumları.

### 2.3.ZEMİN BÜYÜTME KAVRAMI

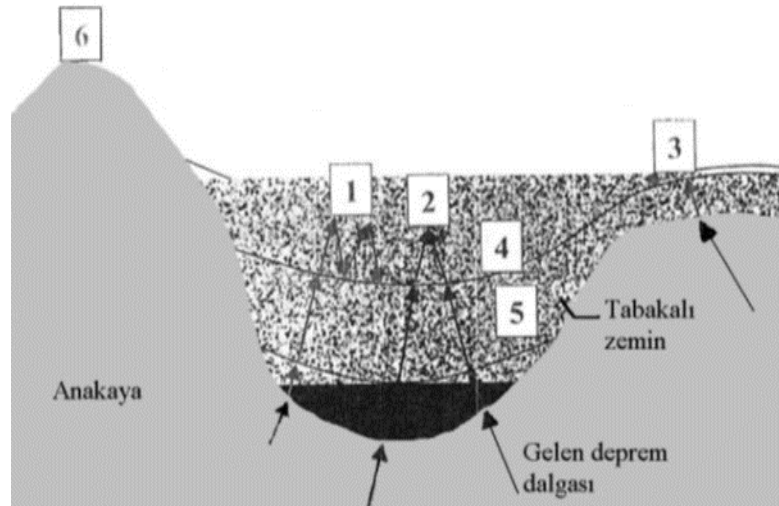
Zemin büyütmesi literatürde genel olarak yeryüzüne yakın yumuşak zemin tabakalarının içinden geçen sismik dalgaların genliklerinin artışı olarak tanımlanmaktadır. Deprem yüzeyde oluşturacağı zararların en önemli nedenlerinden biri olan zemin büyütmesi ciddi yapısal hasarlara neden olabilir. Zemin büyütmesi ana kayanın yeryüzüne olan uzaklığı, depremin büyüklüğü ve yerel zemin özellikleri gibi çok etkene bağlıdır.

### 2.3.1. Zemin Büyütmesine Etki Eden Faktörler

Deprem sırasında kaynaktan yayılan sismik dalgalar ana kaya içinde ilerlerken kilometrelerce yol almalarına rağmen yüzeye yakın zemin tabakalarında ilerlerken kat ettikleri mesafe 150 m civarında olmaktadır. Ancak dalgaların zeminde yarattığı etki büyük oranda zemin tabakalarından geçişi sırasında belirlenir. Deprem dalgalarının zemin tabakaları içerisindeki bu geçişi sırasında belli frekans değerleri arasındaki sismik dalgalar büyürken bazıları da sönümlenir. Bu sismik dalgalara etkiyen faktörler olarak yerel zemin özellikleri kapsamında ana kaya derinliği, bu ana kaya üzerinde bulunan zemin tabakalarının kalınlığı, cinsleri, kayma modülü değeri ve sönüm oranı gibi dinamik özellikleri, zemin tabakalarının yanal düzensizliği ve topografik özellikler gibi birçok etken göz önüne alınabilir.

#### 2.3.1.1. Topografya Etkisi

Yer hareketinin bölgesel değişmesine sebep olan faktörlerden biri de topografik etkilerdir. Yüzey topografyası, ana kaya yüzeyinin zemin tabakalarının ara yüzeylerinin şekli, deprem dalgalarının çeşitli şekillerde kırılma ve yansımalara uğrayarak bir takım ilave etkilerin oluşmasına sebep olurlar. Zemin yüzeylerinin yatay ve düz bir topografyaya sahip olması düşey doğrultuda gelen SH dalgalarının tamamen düşey doğrultuda yansımaya ve yüzeyde, gelen dalgaların iki katı olan bir etki oluşmasına sebep olurlar.



Şekil 2.11: Zemin büyütmesini etkileyen faktörler.



### 2.3.1.2. Empedans Oranı

Zemin büyümesinin nedenlerinden bir diğeri de anakaya üzerinde bulunan zemin tabakalarının birbirinden farklı öz dirençlere (empedans) sahip olmalarıdır. Empedans, bir taneciğin yapmış olduğu harekete ters yönde, bulunduğu ortamın yapmış olduğu direnç denilebilir. Düşey S dalgası için belirlenen empedans oranı ( $Z$ ), yoğunluk ( $\rho$ ) ve S dalga hızının ( $V_s$ ) çarpımı şeklindedir.

$$Z = \rho * V_s \quad (2.7)$$

Ortamın yoğunluğu ( $\rho$ ) ve kayma dalgası hızından ( $V_s$ ) bulunabilen bu değer, yüzeyde meydana gelen sismik hareketlerin değişiminde yerel zemin koşullarının etkisini göstermek adına formülize edilmiştir. Daha çok yüzeye yakın yerlerdeki zeminlerin yoğunlukları ve kayma dalgası hızları derinde olan zeminlerin kayma dalgası hızı ve yoğunluklarına göre daha küçüktür. Enerjinin korunumu yasası gereğince, enerji akışı  $E(t)$ , ana kayadan itibaren zemin yüzeyine kadar sabit bir değer olarak kalıp değişmeyecektir.

$$E(t) = \left( \frac{1}{2 * (\rho * V_s)} \right) * u(t) \quad (2.8)$$

Yukarıdaki formüle bakarak, sismik dalgalar yeryüzüne doğru yaklaşırken ortam yoğunluğunun ( $\rho$ ) ve aynı şekilde kayma dalgası hızının ( $V_s$ ) azalması, yani empedansın değerinin azalması sebebiyle enerjinin korunumu yasası gereği tanecik hızı değerinde yani  $u(t)$ 'de artış meydana gelmesi gerekir.

Ana kaya ile üzerindeki zemin arasında meydana gelen sismik empedans farkı, sismik dalgaların zemin tabakalarından geçerken yansımalarına sebep olur. Yatay doğrultuda oluşacak olan tabakalanma; yani fiziksel özelliklerin düşey yönde bir değişim geçirmiş şeklini bir boyutlu zemin modelinde Şekil 2.12'de gösterilmiştir.

Yansımalar diğeri bir deyişle kapaklanmalar yalnızca zemin tabakası içinde aşağıya ve yukarıya doğru ilerleyen cisim dalgalarını değişime uğratır.

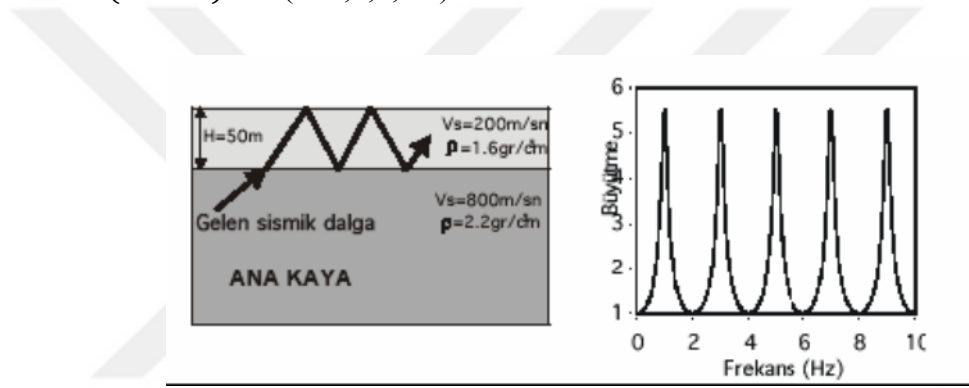
Eğer zemin modeli 2 ya da 3 boyutlu olup da yanal süreksizlikler meydana getiriyorsa bu durumda kapaklanmalar, süreksizliklerde meydana gelen yüzey dalgalarını da değişime

uğrattır. Yansıyor kapaklanan bu dalgalar arasındaki etkileşimler en yüksek rezonans değerlerinin meydana gelmesine neden olur.

Maksimum rezonans frekansı, ana kaya üzerinde yer alan zemin tabakasının kalınlığı ve S dalga hızıyla, yapı eğer iki veya üç boyutlu ise bu durumda da yapının genişliğine bağlıdır. Bir boyutlu tek tabaka modeli için Şekil 2.12'de temel rezonans frekansı ve harmonikleri sırasıyla izleyen bağıntılar da verilmiştir.

$$f_0 = \left( \frac{V_s}{4H} \right) \quad (2.9)$$

$$f_n = (2n + 1) * f_0 \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (2.10)$$



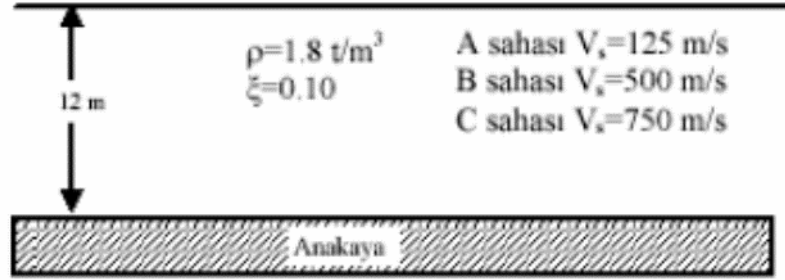
Şekil 2.12: Bir boyutlu zemin durumunda dalga yansımalarının gösterimi ve zemin büyütme fonksiyonu.

### 2.3.1.3. Kayma Dalgası Hızı

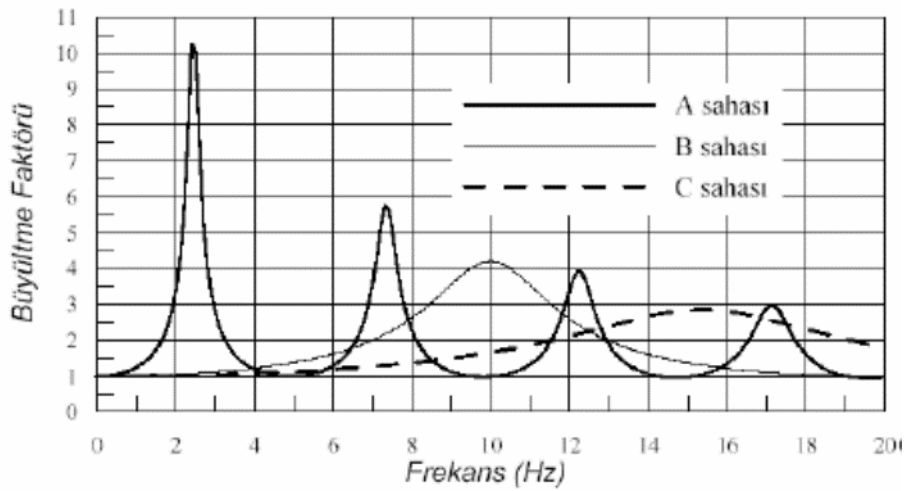
Zemin tabakasının kayma dalgası hızındaki değişim ana kaya ile bu zemin arasındaki empedans oranını farklılaştırır ve bu durum yüzeyde meydana gelebilecek olası zemin büyütmelerini etkiler. Empedans oranı; kayma dalgası hızına ve deprem dalgasının geçtiği zeminin kütle yoğunluğuna bağlıdır.

Ana kaya seviyesinden yüzeye doğru ilerlendiğinde zemin tabakalarının birim ağırlıklarında ve kayma dalgası hızlarında bir takım düşüşler meydana gelmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi ana kayadan zemin yüzeyine doğru ilerledikçe empedans değerinde bir azalma yaşanır. Bilindiği gibi basit koşullarda zemin büyütmesinde ve sönümlemede enerjinin korunduğu kabul edilir.

Enerjinin korunumu yasası gereği empedans oranındaki azalma miktarı sismik sarsıntı hızının ya da bir başka deyişle kayma dalgası hızının artmasıyla telafi edilecektir. Kayma dalgası hızı küçük zeminler deprem dalgalarını büyütürken yüzeyde olması gerekenden daha çok hasara sebep olurlar.



Şekil 2.13: Ana kaya üzerinde farklı zemin tipleri yer alan örnek bir zemin profili.



Şekil 2.14: Zemin tipleri için örnek büyütme fonksiyonları.

#### 2.3.1.4. Zemin Büyütme Fonksiyonu

Ana kayadan yüzeye doğru gelen deprem dalgalarının hiçbiri tek tip harmonik dalgadan meydana gelmez. Yüzeyde bulunan yapılara en fazla hasar veren dalgalar genellikle 0.1 Hz-10 Hz arasındaki frekanslarda oluşurlar. Deprem sırasında meydana gelen sismik dalgalarının frekanslarını depremin ortaya çıktığı anda meydana gelen kırılmalar belirler, ardından deprem dalgalarının yayıldığı zemin parametreleri bu frekanslara son şeklini verir. Yumuşak

zemin tabakaları, farklı frekans ve genlikleri olan deprem dalgalarının her birine aynı tepkiyi vermez. Kısacası; büyütme fonksiyonları frekansa bağlıdır, bazı frekans değerleri daha fazla büyütülürken, bazı frekanslar ise daha az büyütülür. Büyütmenin en fazla ne kadar olacağını empedans ve sönüm oranı belirlerken, bunun hangi frekanslı dalgada meydana geleceğine de sismik dalga hızı ve zemin tabakasının kalınlığı belirler:

$$t_0 = \left( \frac{4H}{V_s} \right) \quad (2.11)$$

Yukarıdaki formüllerde  $f_0$  ve  $t_0$  ; maksimum büyütmenin meydana geleceği frekans ile periyot,  $H$ ; ana kaya üstünde bulunan yumuşak zemin tabakasının kalınlığı ve  $V_s$ ; zemin tabakasının sismik dalga hızıdır.

Maksimum büyütmenin görüldüğü periyot;  $t_0$ , genellikle zemin hâkim periyodu (veya frekansı) olarak adlandırılır. Maksimum büyütmenin görüldüğü ilk hâkim frekans ise diğer bir deyişle  $f_0$ , aynı zamanda rezonans frekansı olarak da adlandırılır. Rezonans olayı, etkileşim halinde bulunan birbirinden farklı titreşim frekanslarının çakışması olayıdır. Rezonans olayı gerçekleştiğinde titreşimin genliği en üst seviyeye çıkar. Bu ihtimal pek de istenilen bir durum değildir. Bu demek oluyor ki zemin ve üzerinde bulunan yapının rezonans durumuna düşmemesi gerekir. Bir başka deyişle, hâkim frekanslarının örtüşmemesi, böylece olası bir deprem durumunda rezonanstan kaynaklı aşırı kuvvetlere maruz kalınmaması gerekir. Anlaşılabacağı üzere zeminler gibi, üst yapıların kendine ait hâkim periyotları ya da frekansları vardır. Yer altı ve yer üstü yapılarının mevcut hâkim periyodunu, sahip oldukları malzemelerin özellikleri ve yapının geometrisi şekillendirir. Basitçe binalardaki kat sayısı  $n/10$  şeklinde ifade edilebilir. Kısacası 6 katlı binanın hâkim periyodu;  $6 / 10 = 0.6s$ 'dir denilebilir.

### **2.3.1.5. Zemin Tabakası Kalınlığı**

Zemin tabakası kalınlığı arttıkça zeminin hakim frekansı daha küçük bir frekansa doğru kaymaktadır. Bu durumda ana kaya üzerindeki zemin kalınlığı ne kadar büyük olursa zemin hakim periyodunun o kadar büyük olacağı anlamına gelir.

$$t_0 = \left( \frac{2H}{2n-1} \right) * V_s \quad (2.12)$$

Mühendislik çalışmalarında dikkat edilen en önemli değer temel frekans ve ona ait büyütmedir. Çünkü yapıları asıl etkileyen bu frekans değeri ve oluşturduğu büyütme değeridir. Sert zeminler ana kaya hareketini yüksek frekanslarda büyütürken yumuşak zeminler düşük frekanslarda büyütme yapmaktadır. Zemin profilinin birden çok tabaka içermesi halinde yüzeydeki zemin büyütme değerleri hesaplanırken deprem dalgasının geçtiği tüm tabakaların etkisi dahil edilir. Deprem dalgalarının bir zemin tabakasından diğer bir zemin tabakasına geçişi sert bir şekilde gerçekleşirse yüzeydeki büyütme değeri de o oranda yüksek çıkar. Ayrıca,  $V_s$  azalmaya başladıkça  $f_0$  büyür,  $V_s$  artmaya başladıkça  $t_0$  büyür.

#### **2.4.TÜNEL-YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN ZEMİN BÜYÜTMESİ İLE İLİŞKİSİ**

Yapı-zemin etkileşimi, deprem etkisi altında zemin ortamının, yüzeysel veya gömülü yapı temelinin ve eğer varsa tünel ve kazıkların ve üst yapının bir arada göz önüne alınarak ortak bir model çerçevesinde yapı ve zeminin deprem sırasında birbirini karşılıklı olarak etkilemesi olarak tanımlanabilir.

Ülkemizde de son yıllarda şehir içinde çok sayıda tünel inşa edilmekte olup, bu tüneller genellikle yapılaşmanın yoğun olduğu bölgelerde yer almaktadır. Zemin büyütmesi konusunda çalışmalar mevcut olmasına rağmen zemin büyütmesini yapılar ve özellikle tünellerle ilişkisini açıklamaya çalışan çalışmalar son derece sınırlı sayıdadır. Zemin büyütmesi analizleri genellikle yerel zemin özellikleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu nedenle zemin tabakalarının deprem sırasında gösterdiği davranışın belirlenmesi geoteknik deprem mühendisliğinde önemli konulardan biridir.

Zemin ortamının geometrik, mekanik ve dinamik özellikleri hiç kuşkusuz üst yapıya aktarılan deprem dalgalarını etkiler; ancak buna karşılık üst yapının geometrik, mekanik ve dinamik özellikleri de üst yapıdan zemine geri yansıyan dalgaları etkileyerek taban kayasından geçen deprem dalgalarını değişikliğe uğrattırlar.

Ancak zemin büyütmesi sadece zemin özellikleri ile değil, başka faktörlere bağlı olarak da değişmektedir. Örneğin zeminin içerisine gömülen rijit yapıların zemin büyütmesi özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Günümüzde çok sayıda tünel yapılmakta ve bu tüneller genellikle şehirleşmenin çok yoğun olduğu bölgelerden geçmektedir. Bazı durumlarda yapı temellere 20-30 m kadar yaklaşan tünellerin, yapıya olan olası etkileri genellikle inşaat aşamalarının yaratacağı etkiler bakımından değerlendirilmektedir. Yapının tünele olan etkileri

de benzer yaklaşımlar içermektedir. Şehirleşmenin artması ile birlikte tünellerin sayısı da artmıştır ve bu tünellerin sismik davranışı üzerine de çok sayıda çalışma yapılmıştır. Buna rağmen tünel-zemin-yapı etkileşiminin zemin büyütmesini ne seviyede etkilediği yeterince çalışılmış bir konu değildir.

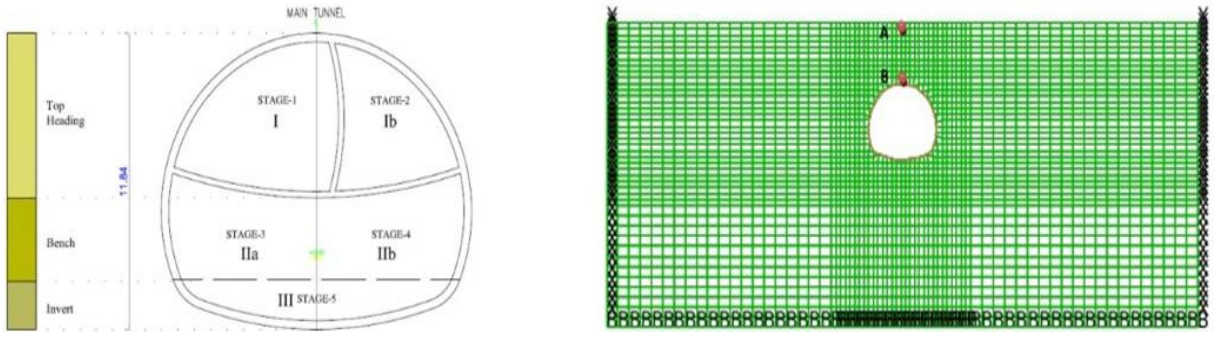
Diğer bir yandan da yeraltı sistemlerini (metro, metro tünelleri ve büyük şehirlerde diğer gömülü tesisler gibi) geliştirirken bu yapıların ve çevrelerinin dinamik etkileşimleri düşünülmelidir. Daha önceden yapılan çalışmalarda bir tünelin varlığı, onu çevreleyen toprağın serbest alan hareketi deprem sırasında frekansı arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu konuya benzer şekilde yapılar, tünellerin üstü ve çevresi de eklenebilir.

#### **2.4.1. Tünel-Yapı-Zemin Etkileşimi Üzerine Yapılan Sismik Çalışmalar**

Daha önce yapılan araştırmalar incelendiğinde laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların mevcut olduğu görülmektedir. Son yıllarda ise nümerik ortamda yapılan çalışmalarda da artışlar meydana gelmiştir. Deprem durumunda tünelin davranışını ve üst yapılarla ilişkisini incelerken depremin frekans içerikleri, tünel kesitleri ve ölçüleri, tünel derinliği, zemin cinsi ve yapısı, tünelde meydana gelen eksenel ve moment zorlanmaları gibi konular genel araştırma konusu olarak işlenmiştir. Geçmişten günümüze tünel-yapı ve zemin etkileşimi altında yapılan çalışmalar aşağıda derlenmiştir;

Shima (1978)'de yapmış olduğu araştırmalar neticesinde, büyütme faktörünü hesaplamada ana kayadaki kayma dalgası hızı ile yüzeydeki kayma dalgası arasındaki oranın önemli bir etken olduğunu göstermiştir. Araştırmalar neticesinde eğer ana kaya üzerindeki kayma dalgası hızı sabit bir değer olarak düşünülürse yüzeyde meydana gelen zemin büyütme değerinin yüzeye yakın bölgelerdeki zeminlerin kayma dalgası hızlarından kaynaklandığı ortaya çıkartılmıştır.

Besharat ve diğerleri (2012), tünel yapıların varlığının zemin büyütmesi bakımından ihmal edilip edilemeyeceği konusunda Şekil 2.15'de gösterildiği gibi bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sonuçlar tünel varlığının zemin yüzeyindeki etkileri değiştirdiğini göstermektedir. Zeminin daha zayıf olduğu durumlarda ise büyütmenin etkisi daha çok olmaktadır. Zayıf zeminlerde tünelin varlığının free-field durumuna göre yüzeyde ölçülen ivmeleri belirli oranda arttırdığı ortaya çıkmıştır. Buna bağlı olarak tünellerin üzerinde bulunan üst yapılar için özel dinamik analizlerin yapılması gerektiğini vurgulamaktadır.



**Şekil 2.15:** Nümerik programında hazırlanmış bir TZ modeli.

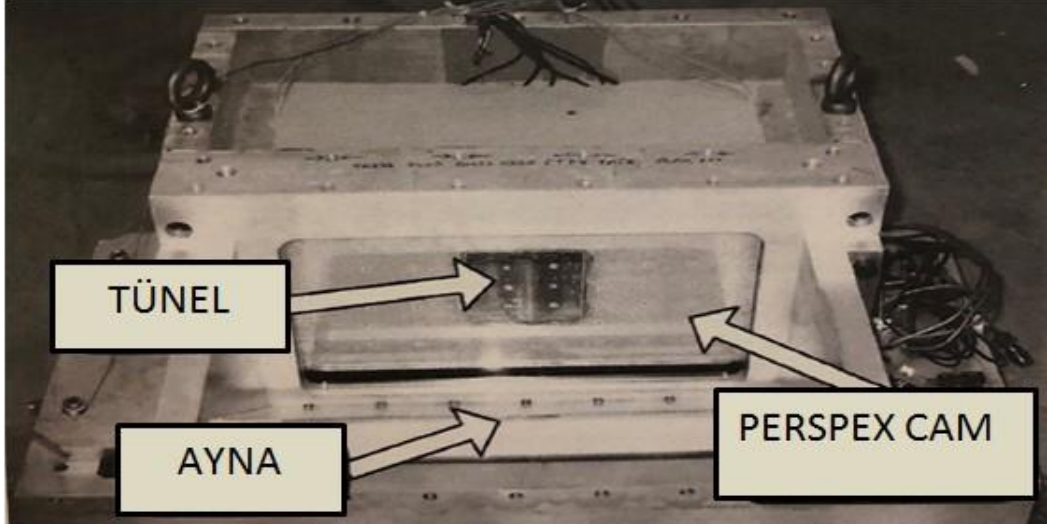
Abuhajar ve diğerleri (2011), santrifüj deneyleri ile şekil 2.16’da gösterildiği gibi kum zemin içine gömülü bir menfezin, zemin büyütmesine olan etkisini incelemiştir. Bu deneylerde, deprem dalgasının son derece rijit bir eleman olan menfez ile karşı karşıya gelmesi ile genliğinin azaldığını göstermişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda tünelin, free-field durumuna göre yüzeydeki ivme değerlerini yüzde %20 civarında azalttığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca yapılan deneyler, daha sıkı zeminlerin yüzeyde daha az ivmelere sebep olduğunu ortaya koymuştur.



**Şekil 2.16:** Analiz için hazırlanmış TZ modeli.

Cilingir ve Madabushi (2010), laboratuvar ortamında tünel ve zemin modeli oluşturup şekil 2.17’deki gibi sismik tabla deneyine maruz bırakmışlardır. Ayrıca bu modeli bir de sonlu

elemanlar yöntemini kullanan bilgisayar programlarına çözdürerek kıyaslama yapmışlardır. Deney ve analizler sırasında tünel ve çevresinde meydana gelen ivme değişimlerini gözlemlemişlerdir. Ayrıca farklı özelliklere sahip harmonik frekanslar içeren dalgalar sisteme verilerek deprem durumunda frekansların ivme değişimine etkisi gözlemlenmiştir. Çıkan sonuçlara göre düşük frekans aralığına sahip depremlerin zemin yüzeyinde meydana getireceği büyütmelerin daha küçük, büyük frekans aralığına sahip depremlerin ise yüzeyde oluşturacağı zemin büyütmelerinin daha büyük olduğu görülmüştür. Son olarak da tünelde meydana gelen eksenel zorlanmalar ve moment değerleri incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre tüneldeki en büyük negatif moment gerilmelerinin köşelerde, pozitif moment gerilmelerinin ise tünelin merkezinde meydana geldiği saptanmıştır.



Şekil 2.17: TZ modeli için hazırlanmış sismik tabla modeli.

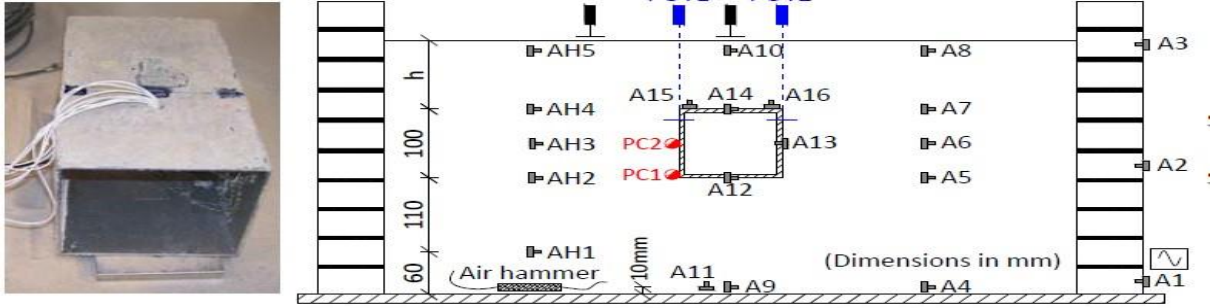
Ashghabadi ve Matinmanesh (2011), Şekil 2.18'deki gibi nümerik ortamda yaptıkları çalışmalarında deprem durumunda tünelin yapı ile olan etkileşimini incelemişlerdir ve çalışma sırasında farklı frekans değerlerine sahip aynı deprem sisteme uygulanmış ve tünel ve çevresinde ivme değişimleri gözlenmiştir. Sonuçlara göre TZ modelinde tünel-zemin ara yüzünde gerilmelerin en fazla olduğu ve bu gerilmelerin de düşük frekans aralığındaki depremlerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca zemin özellikleri farklı olan malzemeler kullanılarak zemin cinsinin sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre sıkı zeminlerin, yumuşak zeminlere göre yüzeyde daha fazla büyütme yaptığı ortaya çıkmıştır.



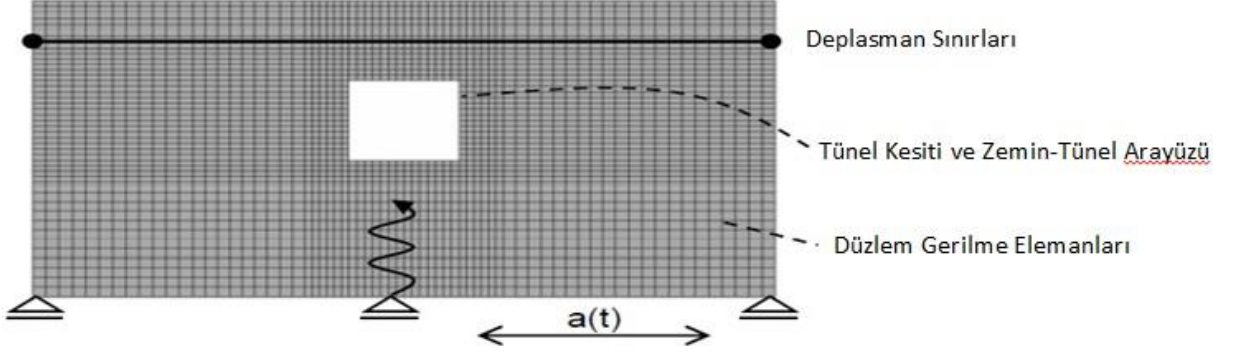


Şekil 2.18: Nümerik ortamda hazırlanmış bir TZ modeli

Tsinidis diğerleri (2015), çalışmalarında Şekil 2.19'daki gibi tüneli kare kesitli bir kutu şeklinde tasarlamış ve uygun malzeme ile dolgusu yapılarak laboratuvar ortamında dinamik santrifüj testlerini yapmış ve bir kopyasını da Şekil 2.20'deki gibi nümerik olarak tasarlamışlardır. Modelin belli yerlerine ivme ve deplasman ölçerler yerleştirilerek tabandan yüzeye ivme değişimlerini incelemişlerdir. Yapılan analizler sonrasında ana kaya tabanından yüzeye doğru ilerleyen deprem dalgalarının tünel geçişi sırasında arttığı gözlemlenmiştir. Diğer analiz sonuçlarına göre ise FF modelinde yüzeyde ölçülen ivme değerlerinin TZ modeline göre daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 2.19: TZ modeli için hazırlanmış kare kesitli model ve yerleştirilen ivme ölçerler.



Şekil 2.20: Nümerik ortamda hazırlanmış bir TZ modeli.

Pitilakis ve Tsinidis (2016), Şekil 2.21'deki gibi laboratuvar ortamında ve nümerik ortamda tünel-zemin modelini oluşturarak deprem durumunda sistemin davranışını incelemiştir. Tünel kesitleri kare ve silindir seçilerek tünel geometrisinin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca analizler boyunca deprem sonrasında tünellerde meydana gelebilecek yanal deplasmanlar yakından takip edilmiştir. Yapılan çalışmaların sonucunda tünel-yapı-zeminin bir arada olduğu modelin sadece tünel-zeminin olduğu duruma göre daha fazla zorlanma aldığı ve yüzeydeki zemin büyütmesini arttığı belirlenmiştir. Yine aynı çalışmada sığ tünellerin zemin büyütmesini arttırdığı, daha derin tünellerin ise daha az zemin büyütmesi yaptığı saptanmıştır.



Şekil 2.21: Laboratuvar ortamında hazırlanan tünel kesiti.

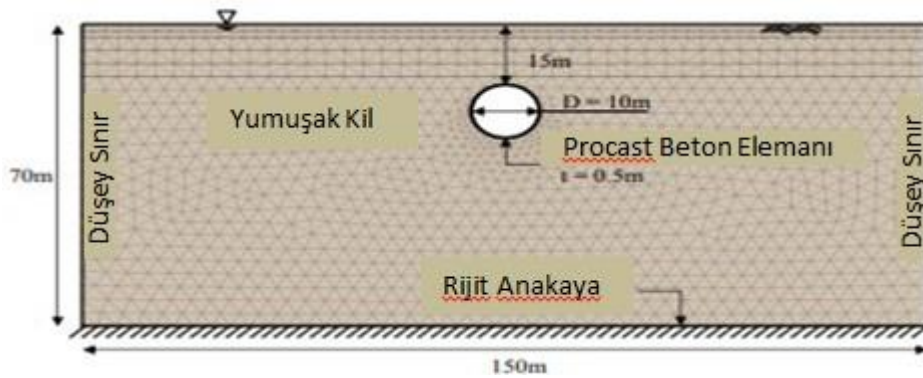
Moghadam ve Baziar (2016), laboratuvar ortamında sismik tabla modelini kullanarak zemin yüzeyinde meydana gelen ivmelere tünelin bir etkisinin olup olmadığını araştırmışlardır. Benzer parametreler kullanarak oluşturdukları nümerik analizlerden çıkan sonuçları sismik

tabla testlerindeki bulgularla kıyaslayarak farklılıkları araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre tünel derinliği arttıkça yüzeyde meydana gelecek zemin büyütmelerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca düşük periyot içeriğine sahip depremlerin yüzeyde maksimum ivmelerin oluşmasını sağladığı ortaya çıkmıştır. Tünel rijitliğinin, şeklinin ve zemin kayma dalgası hızının yüzeyde meydana gelecek maksimum ivmeleri etkilediği ortaya konmuştur.



Şekil 2.22: Laboratuvar ortamında hazırlanmış bir TZ modeli.

Lowell Cabangon ve diğerleri (2017), sonlu elemanlar yöntemini kullanan nümerik bir programda zemin ve tüneli tek bir modelde tanımlamıştır. Analizler sırasında aynı pik ivme değerine sahip birbirinden farklı iki deprem kullanılmıştır ve tünelde meydana gelebilecek eksenel zorlanmalar irdelenmiştir.



Şekil 2.23: Nümerik ortamda hazırlanmış tünel-zemin modeli.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

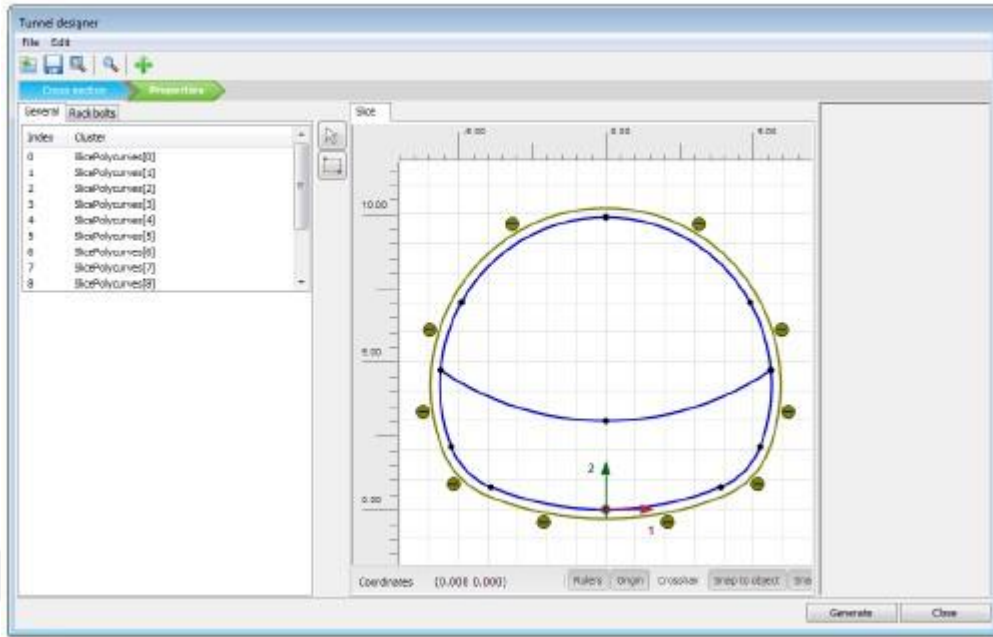
#### 3.1.DENEY MODELİ OLUŞTURULMASI

Bu tez çalışması kapsamında şehir etkisi olarak bilinen ve şehir içinde bulunan tünellerin üst yapı ile etkileşimi sonucunda zemin büyütmesinin ne derece etkilendiğinin araştırılması amaçlanmıştır. Olası bir deprem durumunda tünel, yapı ve zemin etkileşiminin zemin büyütmesine etkileri incelenmiş ve tünel-yapı-zemin etkileşimi adı altında PLAXIS 2D programında nümerik analizler yapılmıştır.

Analizler nümerik ortamda yapıldığından model boyutları seçilirken olası nümerik hataların meydana gelmemesi geniş bir model seçilmiştir. 160 m genişliğinde ve 42 m yüksekliğinde kare kesite sahip bir model oluşturulmuştur. Alttan ilk 2 m yüksekliğinde kayma dalgası hızı ve elastisite modülü oldukça yüksek ana kaya linear elastik özelliklerine sahip bir malzeme ile oluşturulmuştur ve sisteme girilen deprem ivme kayıtları bu noktadan itibaren etki ettirmeye başlanmıştır. Ana kaya üzerinde ise DBYBHY (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik) deprem yönetmeliğinden yararlanılarak seçilen ve yüzeye kadar tek bir tabaka olan 40 m yüksekliğinde katı kil özelliklerine sahip bir malzeme oluşturulmuştur.

Yüzeyde ve modelin tam ortasında 40 m genişliğinde ve 1 m derinliğinde rijit özelliklere sahip bir temel oluşturulmuştur. Bu temelin hemen üstünde ise temel genişliği kadar 3 katlı bir binayı temsil edecek şekilde  $30\text{kN/m}^2$  lik bir ağırlığa sahip yayılı yük ilave edilmiştir.

Analizlerde kullanılan tünelin yüksekliği ve genişliği 10 m olarak seçilmiş ve analizler boyunca çapı 10 m olarak sabit tutulmuştur. Tünel derinliği yüzeyden 10 m ve 15 m derinlikte olacak şekilde iki farklı durum için tüm analizler tekrarlanmıştır. Tünel derinlikleri  $H \leq 15$  olduğundan dolayı tüneller sık tünel olarak düşünülebilir. Şekil 3.1'de tünelin plate eleman olarak tasarlandığı aşama gösterilmiştir.

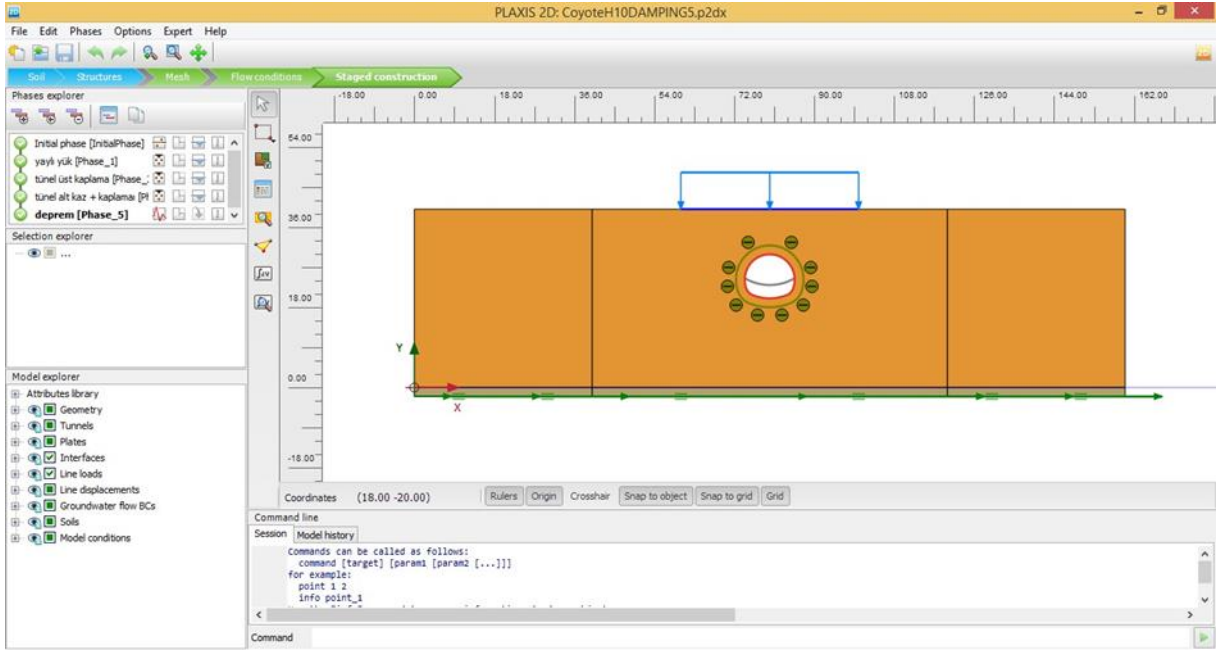


Şekil 3.1: Plaxis programında tünel tasarım aşaması.

Model sınır koşulları tanımlanırken deprem durumundakine en yakın sonucu verecek, gerçeğe en yakın olacak şekilde sistemin iki yanı y yönünde tutulu x yönünde serbest hareketi sağlayan tied degrees of freedom ve zemin tabanı sistemle uyumlu çalışan compliant base olarak tanımlanmıştır.

Nümerik analizlerde Mohr-coulomb ve Hardening Soil olmak üzere iki farklı zemin modeli kullanılmıştır. Analizler sırasında modül azalımını hesaba kattığı ve gerilme-deformasyon eğrilerini gerçeğe yakın hiperbolik eğriler olarak verdiği için Hardening Soil modeli kullanılmıştır. Bu nedenle analizlerde üzerine yoğunlaşılacak ve kritik görülen alanlarda Hardening soil modeli tercih edilmiştir.

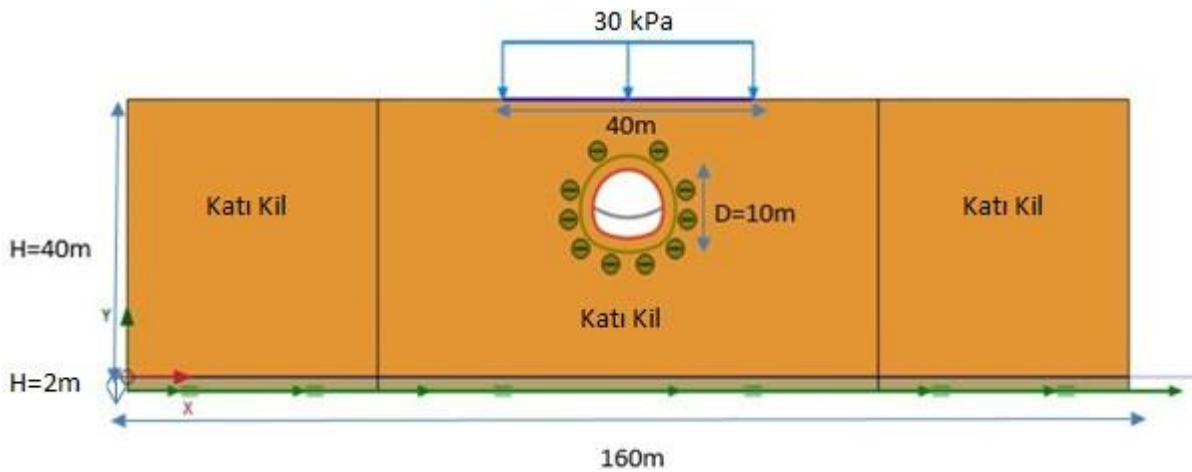
Tasarlanan modelin geometrisi ve sınır koşullarını aynı kalacak şekilde dört farklı model durumu için analizler yapılmıştır. Tünel-yapı etkileşimi sonucunda tünelin zemin büyütmesine etkisini anlamak için tünel-yapı-zemin modeli (TYZ) dışında; tünel-zemin (TZ), yapı-zemin(YZ) ve sadece zemin (FF) durumlarında zemin büyütmesi konusu araştırılmıştır. Tünelin etkisini görmek adına analizler sırasında daha çok TYZ ve TZ durumlarındaki sonuçlar irdelenmiştir. Aşağıdaki görselde tüm yapı elemanlarının aktif olduğu TYZ durumuna ait örnek bir arayüz Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Örnek Tünel-Yapı-Zemin (TYZ) Durumu.

### 3.1.1. Tünel-Yapı-Zemin Modeli (TYZ)

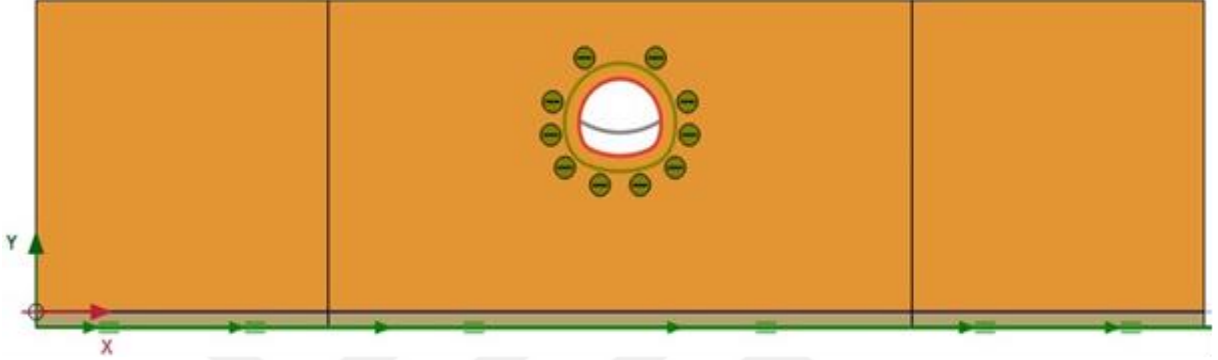
Zemin içerisinde tünel ve yapının birlikte oluşturulduğu modeldir ve deprem durumunda tüm yapı elemanlarının aktif olduğu bir modeldir. Analizler sırasında tünel-yapı etkileşiminin en net gözlemlendiği model durumudur.



Şekil 3.3: TYZ durumuna bir örnek.

### 3.1.2. Tünel-Zemin Modeli (TZ)

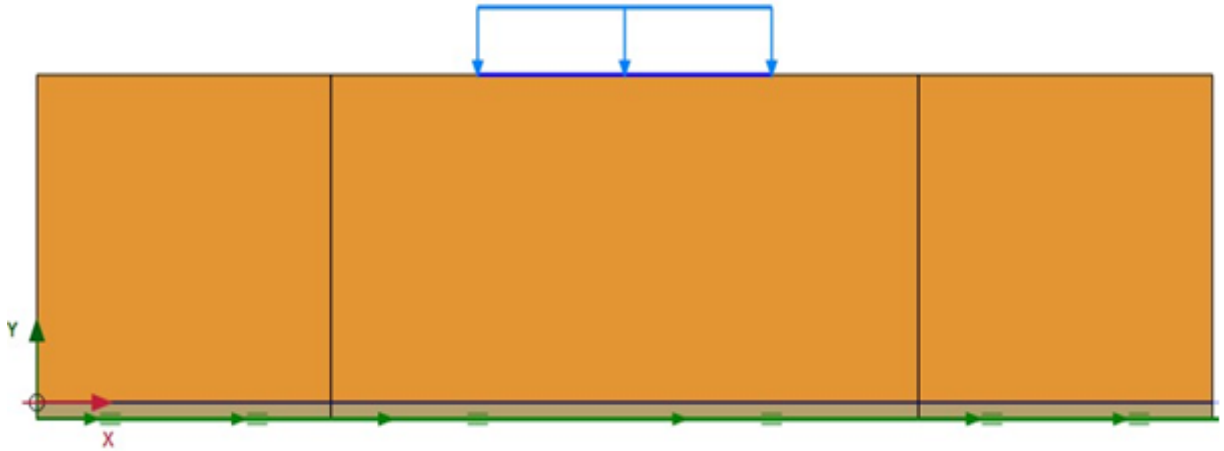
Zemin içerisinde sadece tünelin aktif olduğu, yayılı yük ve temel elemanlarının hesaba katılmadığı model türüdür. Tünelin yalnız olduğu durumda tünel ve çevresinde meydana gelebilecek ivme değişimlerinin, yüzeyde oluşacak ivme değerlerinde tünelin etkisinin gözlemlendiği model durumudur.



Şekil 3.4: TZ durumuna bir örnek.

### 3.1.3. Yapı-Zemin Modeli (YZ)

Zemin içerisinde temel ve yayılı yükün aktif olduğu, tünelin hesaba katılmadığı model türüdür. Yapının, tünelin olmadığı durumda yüzeyde meydana gelecek ivme değişimlerine etkisini incelemek için oluşturulmuştur.



Şekil 3.5: YZ durumuna bir örnek.

### 3.1.4.Zemin Modeli (Free Field-FF)

Zemin içerisinde herhangi bir yapı elemanının olmadığı ve sadece zeminin olduğu durumdur. Bu modelde deprem durumunda zemin sadece x serbest salınım yapar ve kendi salınımı dışında yüzeyde ivme değerlerinin değişimini etkileyecek başka bir şey yoktur.



Şekil 3.6: FF durumuna bir örnek.

### 3.2. ANALİZLERDE KULLANILAN ZEMİN VE MALZEME PARAMETRELERİ

Yapılan analizlerde ana kaya ve katı kil olmak üzere iki farklı zemin tercih edilmiştir ve analizler boyunca bu zemin cinsleri değiştirilmeyip tüm analizlerde kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemelerin zemin özellikleri daha önceki çalışmaların incelenmesi ve DBYBHY 2007 deprem yönetmeliğinden yararlanılması sonucu oluşturulmuştur. Tablo 3.1 de ise analizler boyunca kullanılan zemin parametreleri gösterilmiştir.

Analizler sırasında kullanılan tünel ve temel yapıları Plaxis 2D programında bu tarz malzemeleri tanımlamak için kullanılan plate elemanlar ile oluşturulmuştur. Malzeme özelliklerinin gerçekçi olması için bu konu hakkında daha önce yapılmış olan literatür çalışmalarından, makale ve tezlerden yararlanılıp en uygun malzeme özellikleri seçilmiştir. Tablo 3.2’de tünel ve temel yapıları için seçilmiş olan malzeme parametreleri verilmiştir.



**Tablo 3.1:** Analizlerde kullanılan zemin özellikleri.

	<b>Ana kaya</b>	<b>Katı kil</b>
Malzeme Modeli	Linear Elastik	Hardening-Soil
$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	2400	1900
Yanal toprak basıncı, $K_0$	0.42	0.42
Kayma mukavemet açısı, $\phi^0$	50	30
Boşluk oranı, $e_{init}$	0.2	0.5
Poisson oranı, ( $kN/m^2$ )	0.2	0.3
$E_{ur}$ (kPa)	9.90E6	285E3
G (kPa)	1.38E6	36.5E3
$E_{50}$ (kPa)	3.30E6	95E3
$E_{oed}$ (kPa)	3.67E6	120E3

**Tablo 3.2:** Analizlerde kullanılan tünel ve temel parametreleri.

	<b>Tünel</b>	<b>Temel</b>
Malzeme Modeli	Elastik	Elastik
EA1 (kN/m)	14E6	1E9
EA2 (kN/m)	14E6	1E9
EI (kNm <sup>2</sup> /m)	143E3	84.3E6
d (m)	0.35	1
v	0.2	0.2

### 3.3.DİNAMİK ANALİZ ÖZELLİKLERİ

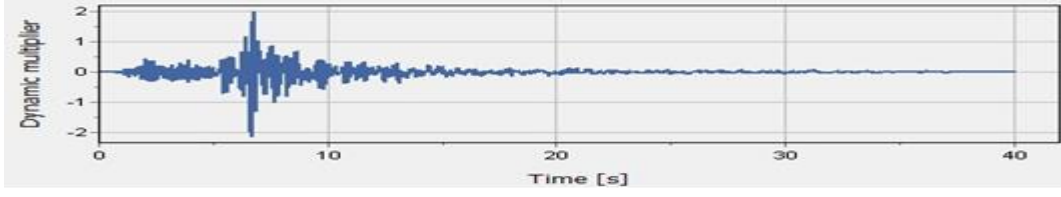
Deprem durumunu gerçeğe en yakın şekilde modellemek için bu konu hakkında daha önce yapılmış olan araştırmalardan, makalelerden, bildirilerden, nümerik ve deneysel çalışmalardan yararlanılmaya çalışılmıştır.

Gerçek deprem durumunu en uygun şekilde nümerik analiz programı olan Plaxis'e yansıtmak için model sınır koşulları dikkatli bir şekilde seçilmiştir. Y yönünde harekete izin verilmezken x yönünde salınım yapılmasına izin verilmiştir. Modelin sağ ve sol yanı tied degrees of freedom olarak, ana kayanın alt noktası yani zemin tabanı compliant base olarak tanımlanmıştır. Tüm analizlerde depremler ana kayanın hemen altından sisteme etki ettirilmiştir. Analizler sırasında zeminin sönüm oranı (damping) %5 olarak sabit tutulmuştur.

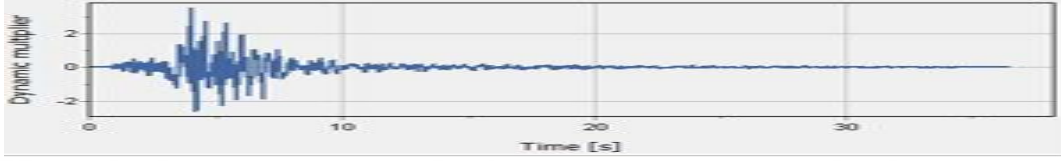
Analizler boyunca USGS (U.S. Geological Survey) veri tabanından alınan dokuz farklı deprem kullanılmıştır. Bu depremler sırasıyla Northridge Depremi, Friuli Depremi, Willowak Depremi, Parkfield Depremi, Erzincan Depremi, Victoria Depremi, Newzeland Depremi, Coyote Depremi ve Loma Gilroy Depremi'dir. Analizler sırasında kullanılan bu deprem ivme kayıtları ana kaya kaydı olarak Plaxis programına yüklenmişlerdir. Bu dokuz depremin genel özellikleri Tablo 3.3'te gösterilmiştir. Kullanılan depremlerin  $m/s^2$  cinsinden ivme kayıtları Şekil 3.7 ve Şekil 3.15 arasında gösterilmektedir.

**Tablo 3.3:** Analizlerde kullanılan depremlerin genel özellikleri.

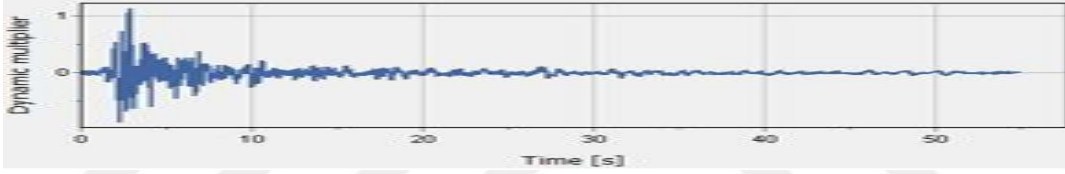
Deprem Adı	Ölçülen İstasyon	Deprem Yılı	Deprem Büyüklüğü (Magnitude)	Derinlik (km)	Vs (m/s)	PGA
Northridge	Cypress Ave	1994	6.70	32	140	0.216
Friuli	Tolmezzo	1976	6.40	25	588	0.358
Willowak	Anchorage	2014	6.20	100	940	0.114
Parkfield	Stockdale	2004	6.00	7.5	880	0.357
Erzincan	Erzincan	1992	6.69	22	275	0.515
Victoria	Cerro Prieto	1980	6.33	12	660	0.621
Newzeland	Bay of Plenty	1987	6.60	10	425	0.054
Coyote	San Juan Bautista	1979	5.70	28	561	0.125
Loma Gilroy	Gilroy	1989	6.90	30	150	0.170



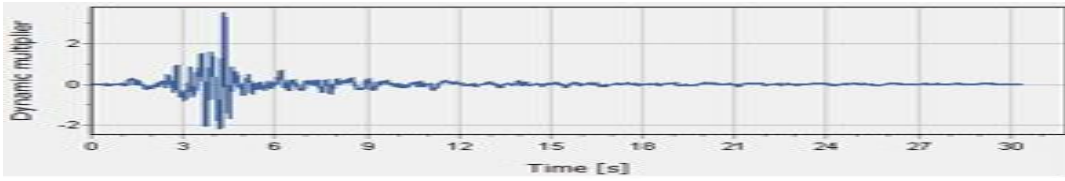
Şekil 3.7: Northridge depremine ait ivme kaydı.



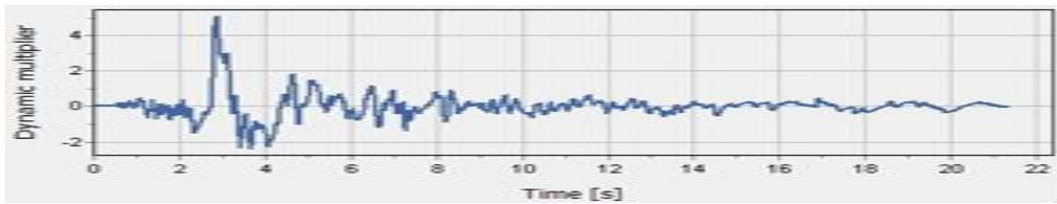
Şekil 3.8: Friuli depremine ait ivme kaydı.



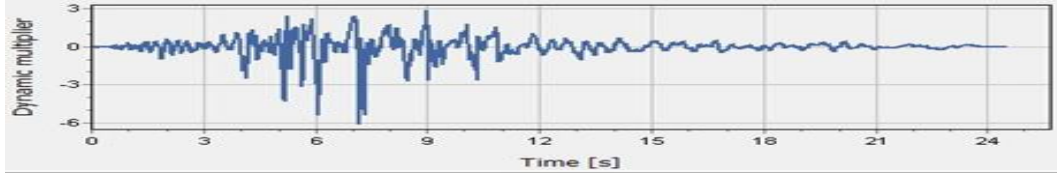
Şekil 3.9: Willowak depremine ait ivme kaydı.



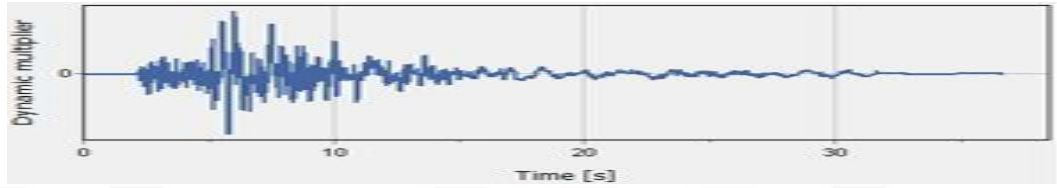
Şekil 3.10: Parkfield depremine ait ivme kaydı.



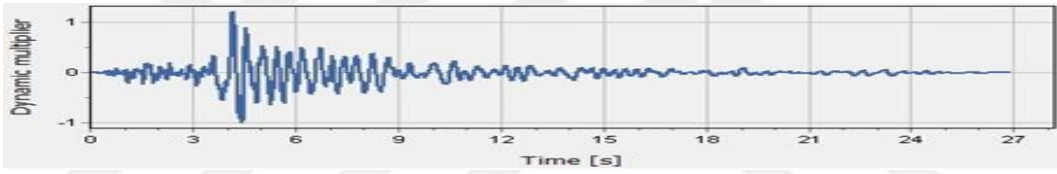
Şekil 3.11: Erzincan depremine ait ivme kaydı.



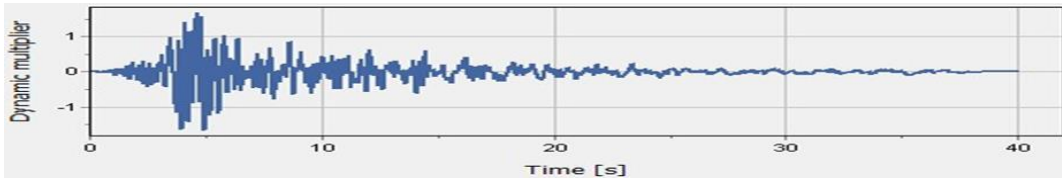
Şekil 3.12: Victoria depremine ait ivme kaydı.



Şekil 3.13: Newzeland depremine ait ivme kaydı.



Şekil 3.14: Coyote depremine ait ivme kaydı.



Şekil 3.15: Loma Gilroy depremine ait ivme kaydı.

Yukarıdaki depremlerin ivme kayıtları Plaxis programına yüklenirken yüksek ivme değerlerinin sönümlenmeye başladığı an deprem süresi olarak seçilmiş ve analizler bu süreler göre yapılmıştır.

Aşağıdaki Tablo 3.4'te analiz sırasında kullanılan Northridge, Friuli, Willowak, Parkfield, Erzincan, Victoria, Newzeland, Coyote ve Loma Gilroy depremlerinin pik ivme (g) değerleri ve deprem süreleri (sn) verilmiştir.

**Tablo 3.4:** Kullanılan depremlerin max ivme ve süreleri.

	Max ivme (g)	Süre
Northridge	0.216	20
Friuli	0.358	10
Willowak	0.114	10
Parkfield	0.357	12
Erzincan	0.515	15
Victoria	0.621	15
Newzeland	0.054	20
Coyote	0.125	15
Loma Gilroy	0.170	20

Plaxis programının çalışma prensibi gereği deprem ivmeleri sisteme aktarılırken 0.5 katsayısı ile çarpılmış ve ana kaya tabanına bu şekilde işlenmiştir. Bunun sebebi ise dinamik analiz başladıktan kısa bir süre sonra yani daha hesaplama fazına geçmeden önce deprem dalgaları ana kaya tabanından yüzeye doğru geçiş yapıp tekrar ana kayaya geri döner. Bu dakikadan itibaren esas analiz başlar ve hesaplamalar yapılmaya başlar ve deprem dalgaları bir kez daha ana kayadan yüzeye doğru ilerler. Bundan dolayı sistem orijinal deprem ivme kayıtlarını sanki iki kez okumuş gibi olur. Bunun önüne geçilip yüzeyde okunan ivme değerlerinde abartılı sonuçların ortaya çıkmaması için orijinal deprem ivme kayıtları 0.5 ile çarpılıp sisteme bu şekilde etki ettirilmiştir.

### 3.3.1. Fourier Dönüşümleri

Sistemin gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi için analizler boyunca kullanılan 9 depremin fourier dönüşümleri yapılarak baskın frekansları bulunmuştur. Ardından katı kil olarak kullanılan zeminin de hakim periyodu ve oradan da hakim frekansı bulunarak sisteme eklenmiştir. Zeminin hakim frekansı ( $f_1$ ) bulunurken aşağıdaki formül kullanılmıştır;

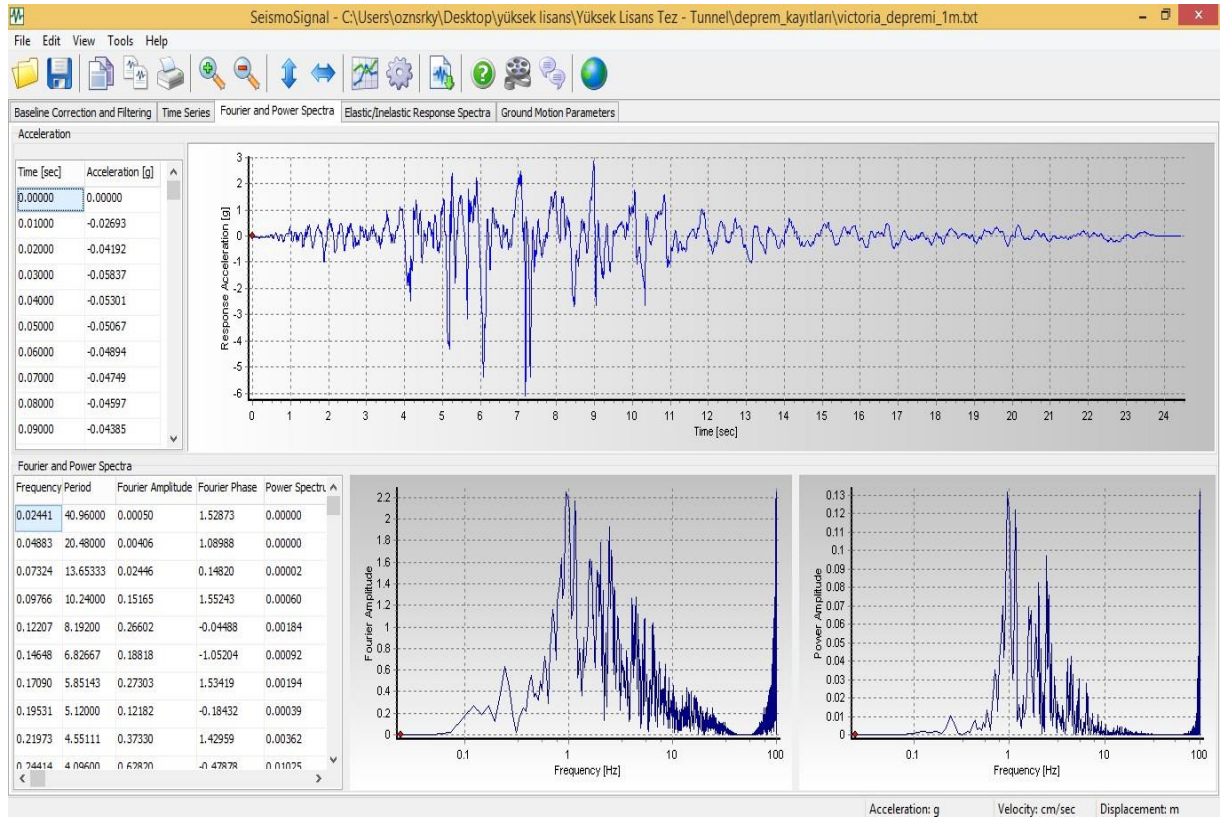
$$f_1 = \frac{V_s}{4H} \quad (3.1)$$

$V_S$  = Zemin kayma dalgası hızı

H= Zeminin tabaka kalınlığı

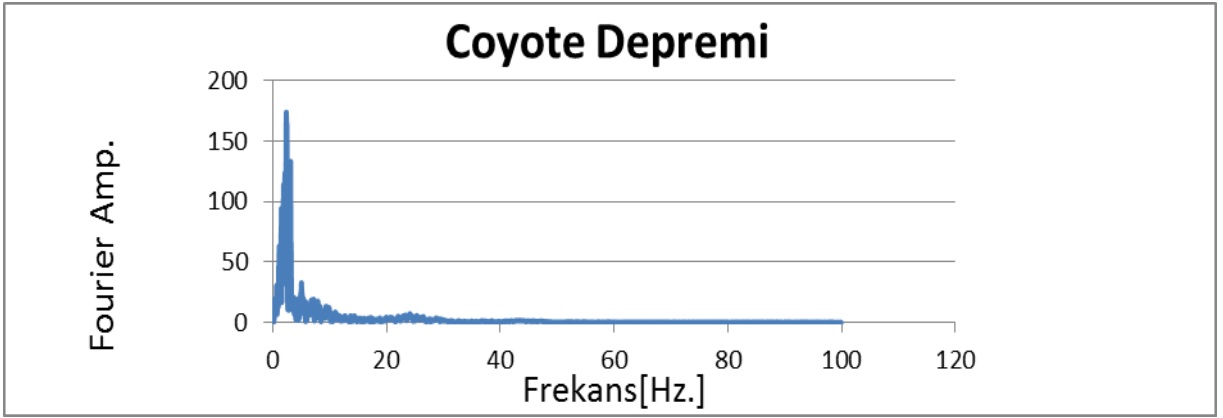
Kullanılan depremlerin baskın frekansları bulunurken Seismo Signal programından yararlanılmıştır.

Seismo Signal programının ara yüzeyi aşağıdaki Şekil 3.16'da örnek olarak gösterilmiştir.

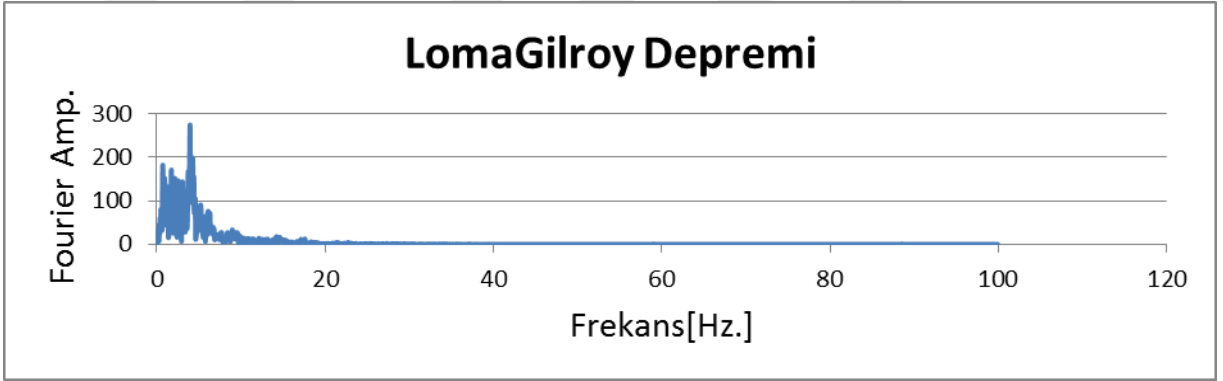


Şekil 3.16: Seismo Signal programı ara yüzü.

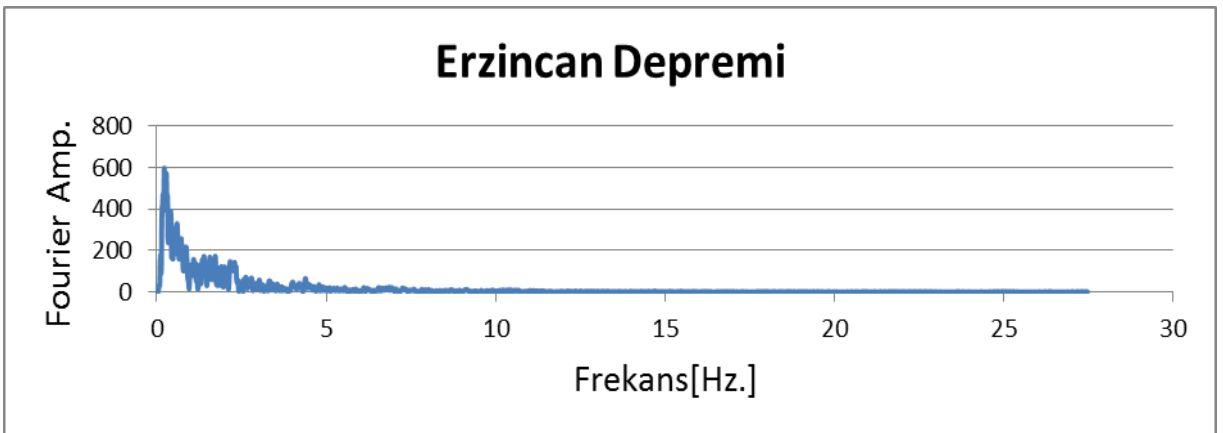
Analizlerde kullanılan depremlerden Coyote, Loma Gilroy ve Erzincan depremlerinin fourier dönüşümleri sırasıyla aşağıdaki Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da gösterilmiştir. Diğer depremlerin fourier dönüşümleri EK 1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17: Coyote depremine ait Fourier dönüşümü.



Şekil 3.18: Loma Gilroy depremine ait Fourier dönüşümü.



Şekil 3.19: Erzincan depremine ait Fourier dönüşümü.

Analizlerde kullanılan zemin hakim frekansı  $f_1$  olarak ve fourier dönüşümlerinden elde edilen deprem ivme kayıtlarının hakim frekansları  $f_2$  olarak Tablo 3.5’te gösterilmiştir.

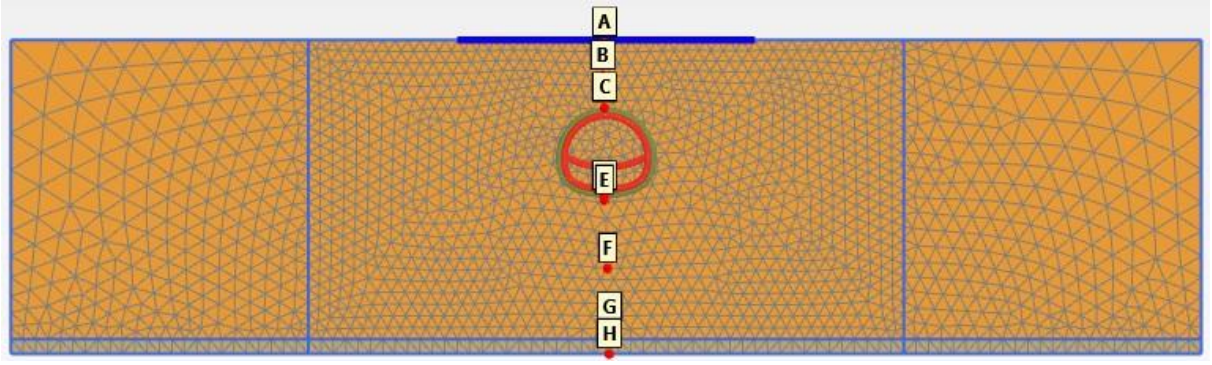
**Tablo 3.5:** Kullanılan depremlerin baskın frekansları ve zemin hakim frekansı.

	$f_2$	$f_1$
Northridge	5.001	0.856
Friuli	2.001	0.856
Willowak	2.441	0.856
Parkfield	2.643	0.856
Erzincan	0.439	0.856
Victoria	0.952	0.856
Newzeland	1.562	0.856
Coyote	2.399	0.856
Loma Gilroy	3.954	0.856

### 3.3.2.İvme Noktaları

Ana kaya üzerinden yüzeye ilerleyen deprem dalgalarının geçtikleri yerlerde meydana getirdiği ivmesel değişimleri ve deplasman değerlerini incelemek için analizi yapılan tüm modellerin üzerinde noktalar seçilmiştir. Bu noktalar ana kaya başlangıcında, ana kayanın hemen üstünde, tünel alt noktası ile ana kaya arasında, tünel alt noktasında, tünel üst noktasında, tünel ile yapı arasında ve yapının hemen altında olmak üzere 7 adet ivme ölçüm noktası seçilmiştir. Bu noktalar aşağıdaki Şekil 3.20’de, bu noktaların H=10 ve H=15 m tünel derinliğine göre nokta derinlikleri de Tablo 3.6’da gösterilmiştir. Plaxis programında bir bütünü daha küçük parçalara bölerek daha hassas analiz yapılmasını sağlayan ve fine öğesi seçilerek hazırlanmış modellerin analize başlamadan önce mesh durumunu gösteren kısmı Şekil 3.21’te gösterilmiştir.

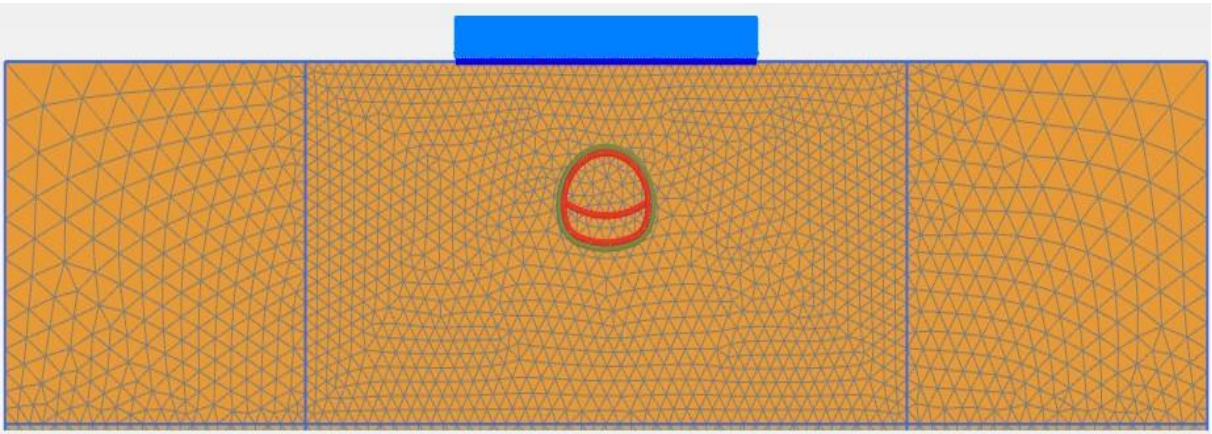




Şekil 3.20: Plaxis programında ölçüm için kullanılan ivme noktaları.

Tablo 3.6: Analizlerde ölçülen ivme noktalarının derinlikleri.

İVME NOKTASI	H=10 METRE	H=15 METRE
A	0	0
B	5	8
C	10	15
E	20	25
F	30	35
G	40	40
H	42	42



Şekil 3.21: Plaxis programında mesh durumu gösteren örnek bir model.

Tüm bu noktalarda okunan ivme değerleri kaydedilip, ana kaya yüzeyinden yapının en alt noktasına kadar olan ivme değişimleri incelenmiştir. Tünel-yapı-zemin, tünel-zemin, yapı zemin ve sadece zeminin olduğu durumlar ve H=10, H=15 tünel derinliği durumları için tüm noktalarda ivme değerleri ölçülüp tünelin yapı ile olan ilişkisi ve tünelin zemin büyütmesine etkisi araştırılmıştır.

Ana kaya tabanından yüzeye doğru geçiş sırasında ivmelerin nasıl değiştiği araştırılıp ivme değişim profili çıkartılmıştır.

### **3.4. PLAXIS PROGRAMI**

Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak dinamik, statik, deformasyon, konsolidasyon ve diğer birçok alanda meydana gelen geoteknik problemlerinin çözümünü yapan analiz programıdır.

#### **3.4.1. Kullanılan Zemin Modelleri**

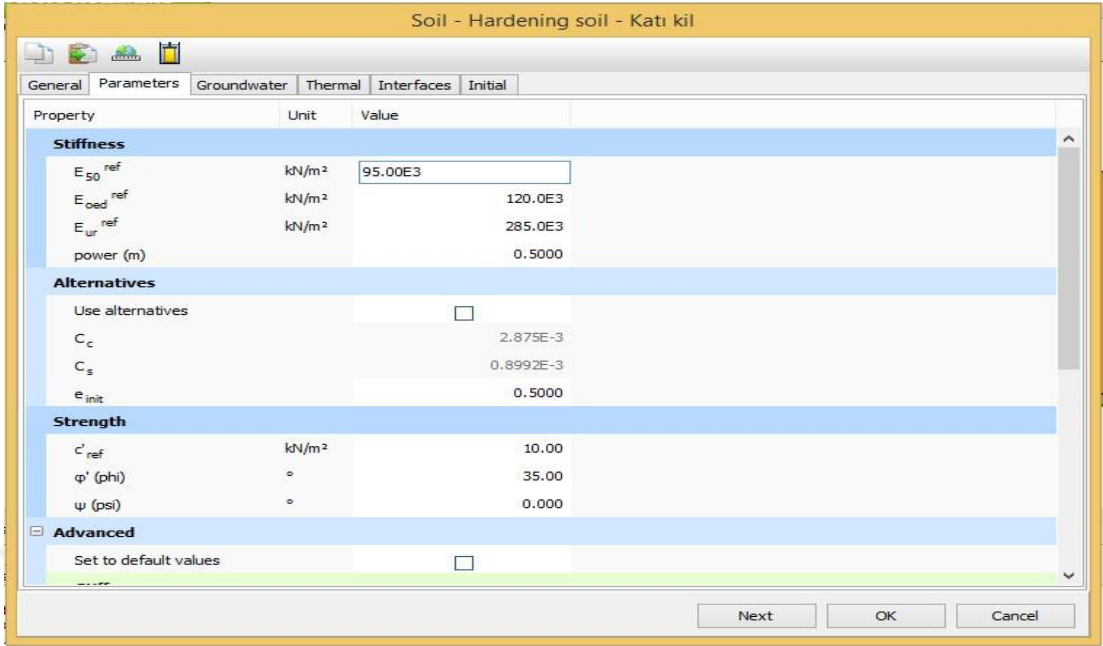
PLAXIS’de zemin davranışını modellemek için iki farklı zemin modeli kullanılmıştır. Bu modeller aşağıda özetlenmiştir.

##### **3.4.1.1. Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli**

Zeminin fiziksel özellikleri belirlerken elasto-tam plastik zeminmiş gibi düşünen Mohr Coulomb Zemin Modelinde; boşluk oranı gibi, kayma modülü gibi, permabilite katsayısı gibi birçok parametre rahatlıkla girilebilir.

##### **3.4.1.2. Hardening Soil (HS) Zemin Modeli**

Hem yumuşak hem de sert zeminler gibi farklı tipteki zeminlerde, zemin davranışlarını en iyi yansıtan modellerden biridir. Mohr-coulomb zemin modelinin aksine gerilme deformasyon ilişkisi lineer değil de hiperbolik eğrilere göre oluşturur. Bu sayede gerilme seviyelerine göre durum kontrolü yapılabilir.



Şekil 3.22: Hardening Soil modeline ait örnek bir arayüz.

Mohr-coulomb zemin modeline benzer olarak kullanılan parametreler;

$c$ = kohezyon (kN/m<sup>2</sup>)

$\phi'$  içsel sürtünme açısı (°)

$\psi$ = dilatasyon açısı (°)

Zemin elastisitesi için kullanılan parametreler;

$E_{50}$  = sekant eğimi (üç eksenli basınç deneyinden elde edilir) (kN/m<sup>2</sup>)

$E_{oed}$  = tanjant eğimi (ödometre deneyinden elde edilir) (kN/m<sup>2</sup>)

$E_{ur}$  = boşaltma/yükleme eğrisi ( $E_{ur} = 3E_{50}$  kabul edilir) (kN/m<sup>2</sup>)

#### 4. BULGULAR

Analiz sonuçları iki bölüm halinde sunulmuştur. Birinci bölümde nümerik analiz programı olan Plaxis 2D programında TYZ, TZ ve YZ modellerinde dokuz farklı depremin dinamik analiz sonuçları paylaşılmıştır. Analizlerin ikinci bölümünde ise ivme alan konturlarını incelemek adına TYZ, TZ, YZ ve FF modellerinde üç farklı deprem için analizler tekrarlanmıştır. Aşağıda gösterilen dört farklı durum için analizler yapılmıştır.

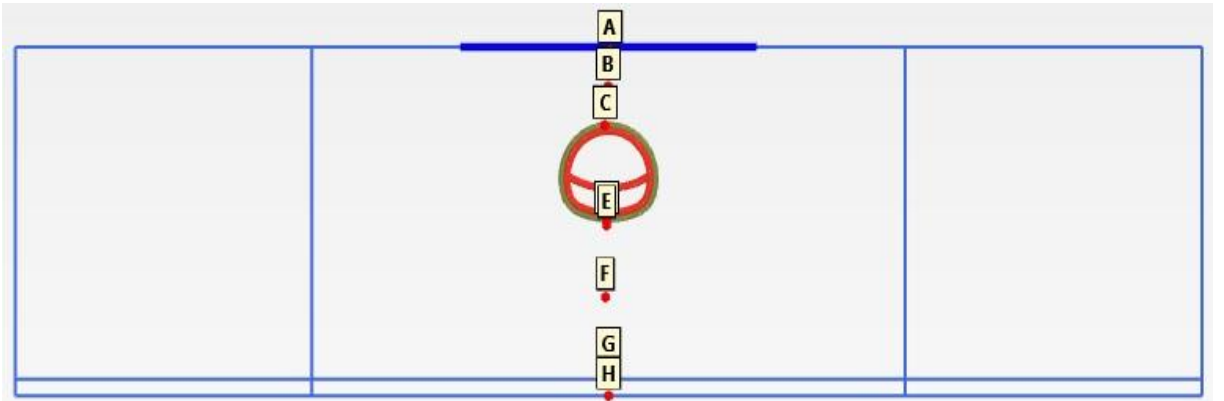
A-) Tünel-Yapı-Zemin (TYZ)

B-) Tünel-Zemin (TZ)

C-) Yapı-Zemin (YZ)

D-) Zemin (FF)

Ayrıca analizlerde tünelin derinliğinin zemin büyütmesine etkisini anlamak için tünel derinliği değiştirilmiştir. H=10 m ve H=15 m'deki iki farklı tünel derinliği için analizler dokuz farklı deprem için tekrarlanmıştır.. Bu bölümde ise analizlerde kullanılan depremlerden Friuli, Victoria ve Willowak depremlerine ait TYZ, TZ, YZ durumları ve H=10, H=15 derinliklerinde, Şekil 4.1'de gösterilen noktalardaki ivme değerleri Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Diğer depremlerin nokta ivme değerleri EK 2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: İvme ölçüm noktaları.

**Tablo 4.1:** Friuli depremine ait nokta ivme değerleri.

FRIULI DEPREMİ					
		H=10 METRE		H=15 METRE	
İVME NOKTASI	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	YAPI ZEMİN
A	0.355	0.332	0.349	0.298	0.347
B	0.322	0.322	0.288	0.292	0.315
C	0.285	0.288	0.263	0.269	0.28
E	0.208	0.213	0.173	0.169	0.201
F	0.181	0.182	0.186	0.186	0.186
G	0.178	0.178	0.178	0.178	0.178
H	0.178	0.178	0.178	0.178	0.178

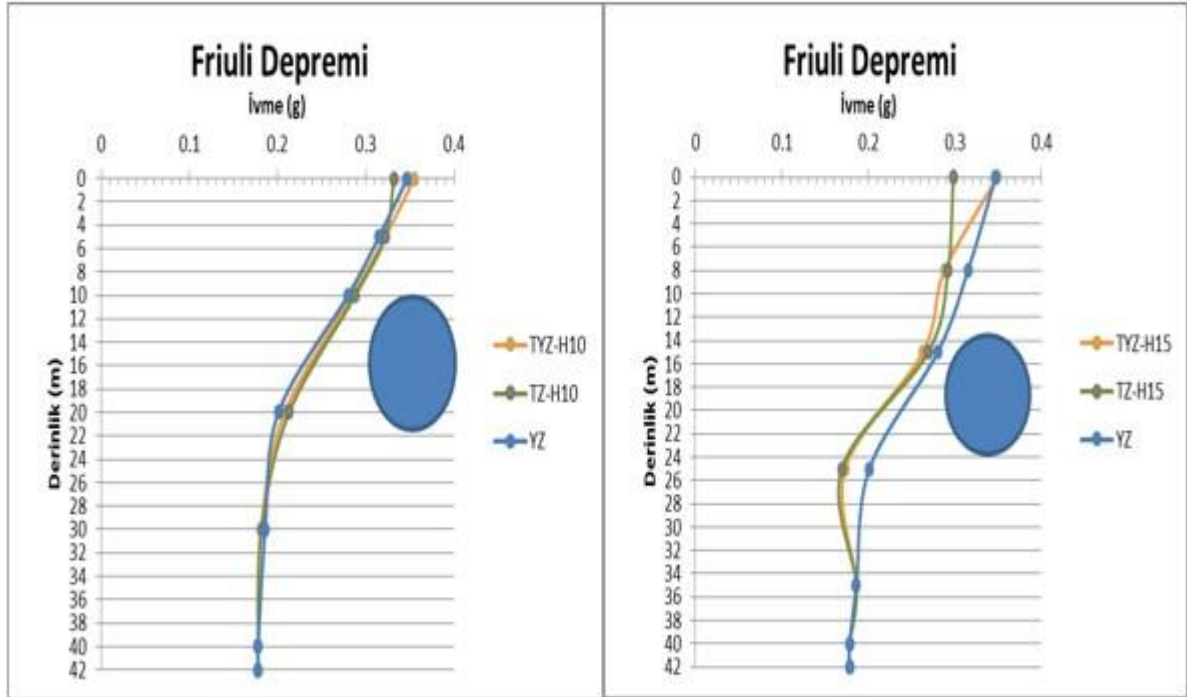
**Tablo 4.2:** Victoria depremine ait nokta ivme değerleri.

VICTORIA DEPREMİ					
		H=10 METRE		H=15 METRE	
İVME NOKTASI	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	YAPI ZEMİN
A	0.487	0.396	0.427	0.419	0.477
B	0.447	0.371	0.373	0.353	0.369
C	0.435	0.374	0.352	0.371	0.334
E	0.369	0.323	0.229	0.231	0.263
F	0.293	0.269	0.243	0.244	0.281
G	0.231	0.231	0.231	0.231	0.231
H	0.231	0.231	0.231	0.231	0.231

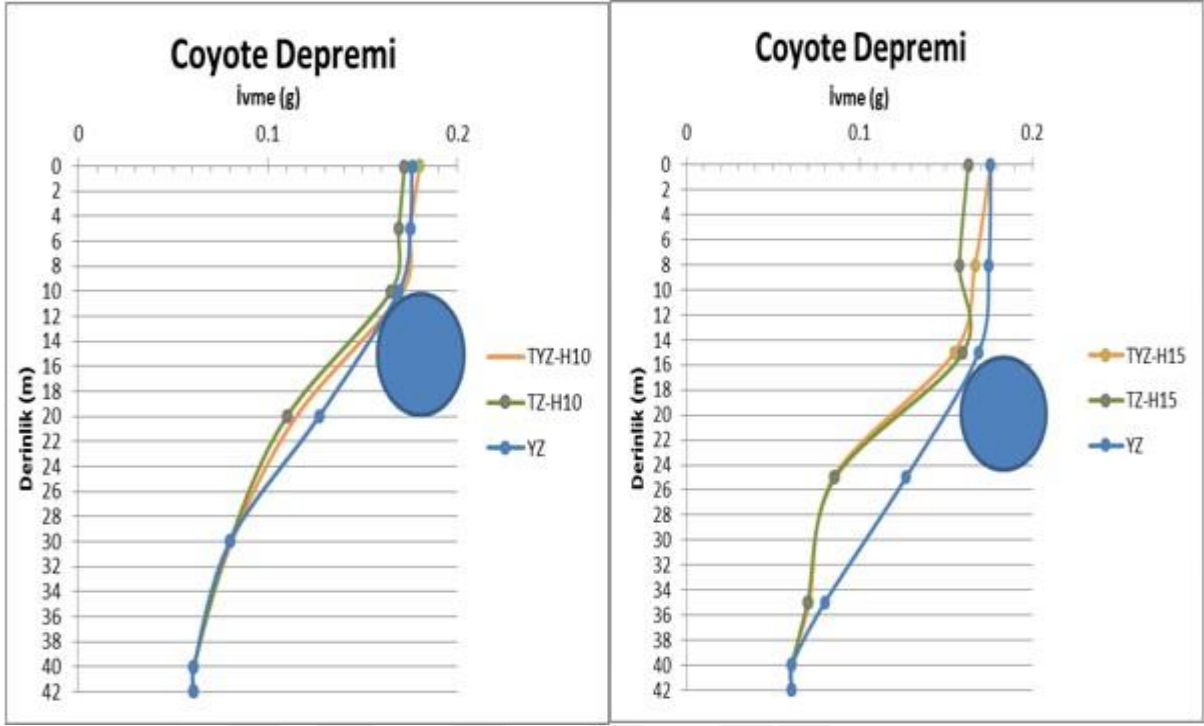
**Tablo 4.3:** Willowak depremine ait nokta ivme değerleri.

WILLOWAK DEPREMİ					
		H=10 METRE		H=15 METRE	
İVME NOKTASI	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	YAPI ZEMİN
A	0.146	0.133	0.132	0.119	0.144
B	0.122	0.127	0.104	0.107	0.124
C	0.114	0.113	0.099	0.096	0.108
E	0.078	0.076	0.063	0.064	0.078
F	0.06	0.06	0.048	0.049	0.057
G	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
H	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056

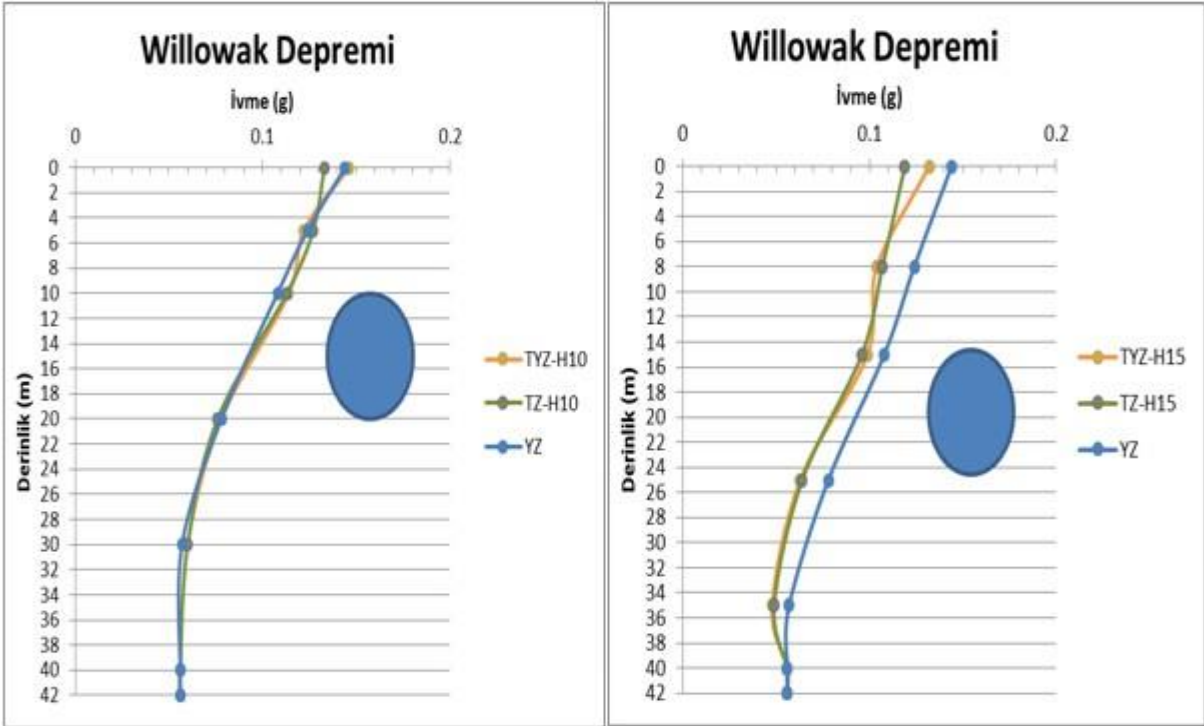
Yukarıdaki Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te de görüldüğü gibi dokuz depremde de ana kayadan yüzeye doğru giderken ivme değerleri artış göstermiştir. Tüm depremlerde tünelin yapıya daha yakın olduğu H=10 derinliğinde A noktasındaki ivme değerleri diğer durumlardaki ivmelere göre daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca TZ modelinde A noktasındaki ivme değerlerinin YZ modeline göre daha az olduğu görülmüştür. Tünel derinliğinin yüzeyde okunan ivme değerlerine etkisini görmek adına H10 ve H15 m derinliklerinde ve TYZ-TZ-YZ durumlarına göre Friuli, Coyote ve Willowak depremlerine ait noktasal ivme dağılım grafikleri sırasıyla aşağıdaki Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Diğer depremlere ait noktasal ivme dağılım grafikleri EK 3'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.2:** Friuli depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları.

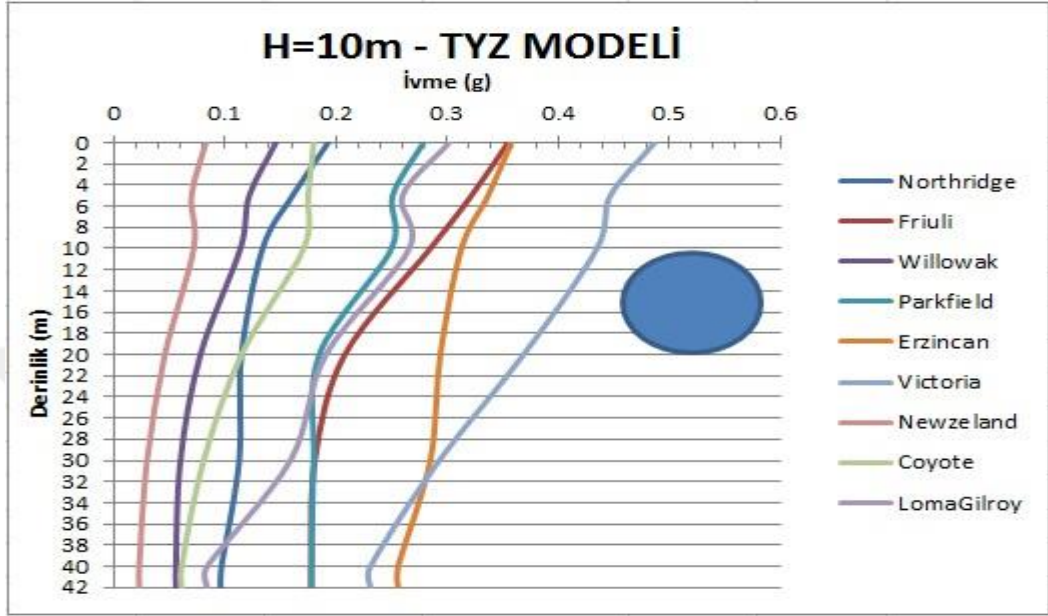


Şekil 4.3: Coyote depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları.

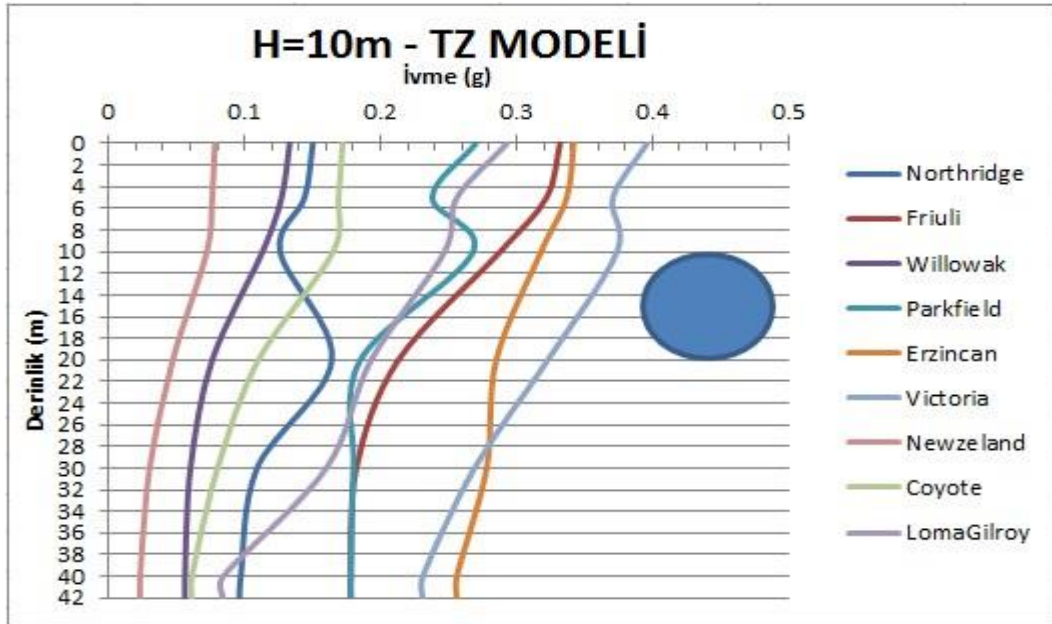


Şekil 4.4: Willowak depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları.

Yukarıda her bir deprem için gösterilen noktasal ivme dağılım eğrilerinin hepsinin bir arada gösterildiği grafikler aşağıdaki Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'de her bir derinlik ve model için ayrı ayrı gösterilmiştir.

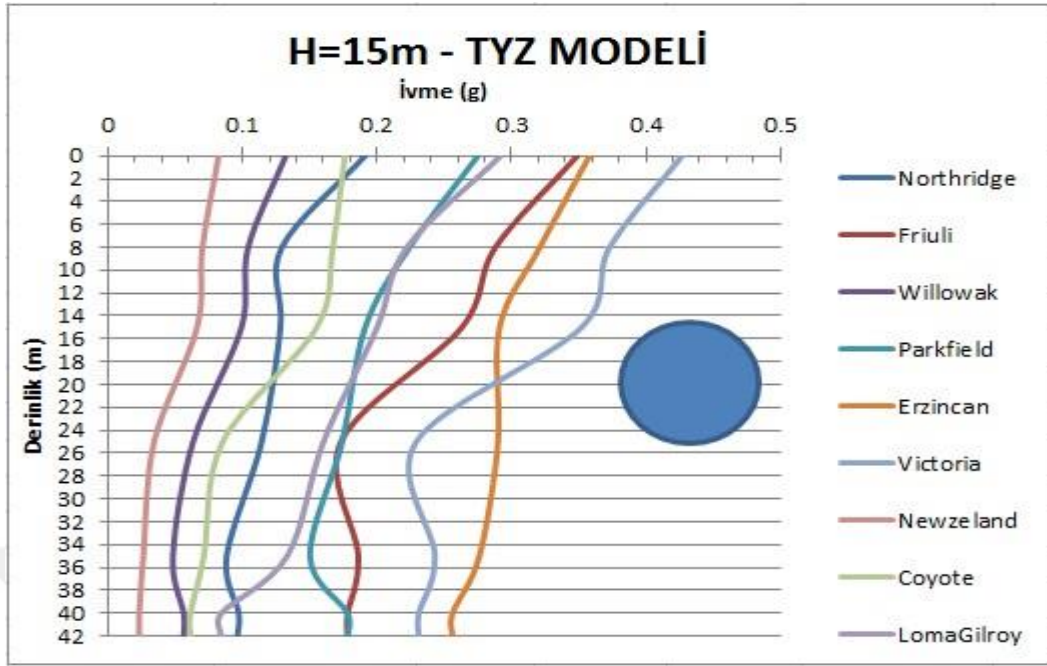


Şekil 4.5: Kullanılan depremlerin TYZ modeli ve H=10 m tüneller için noktasal ivme dağılımları.

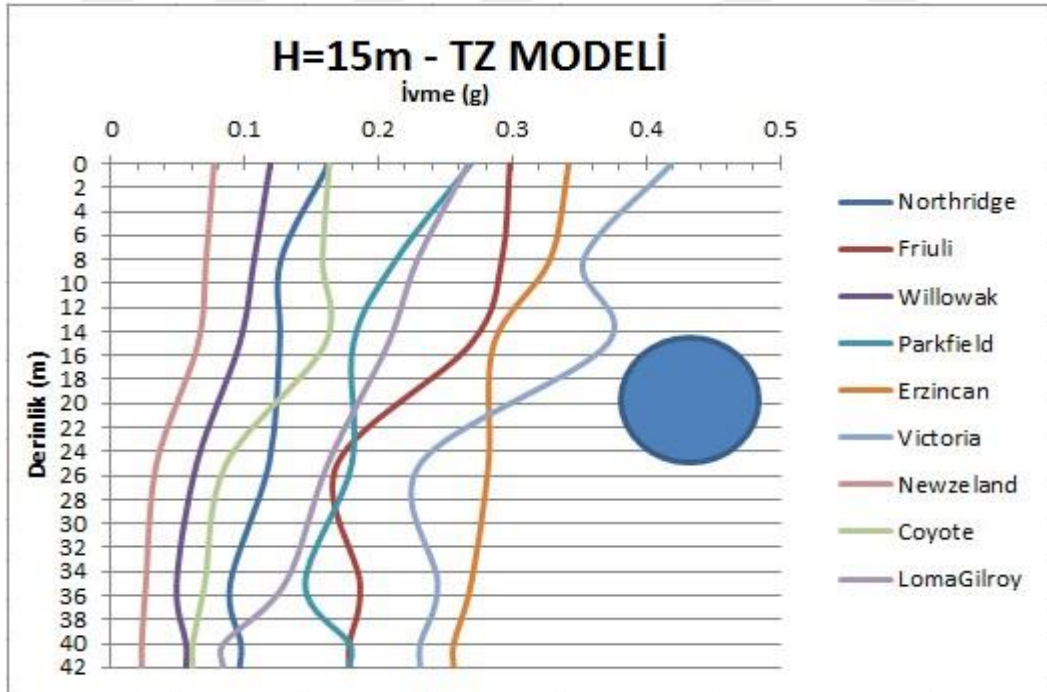


Şekil 4.6: Kullanılan depremlerin TZ modeli ve H=10 m tüneller için noktasal ivme dağılımları.

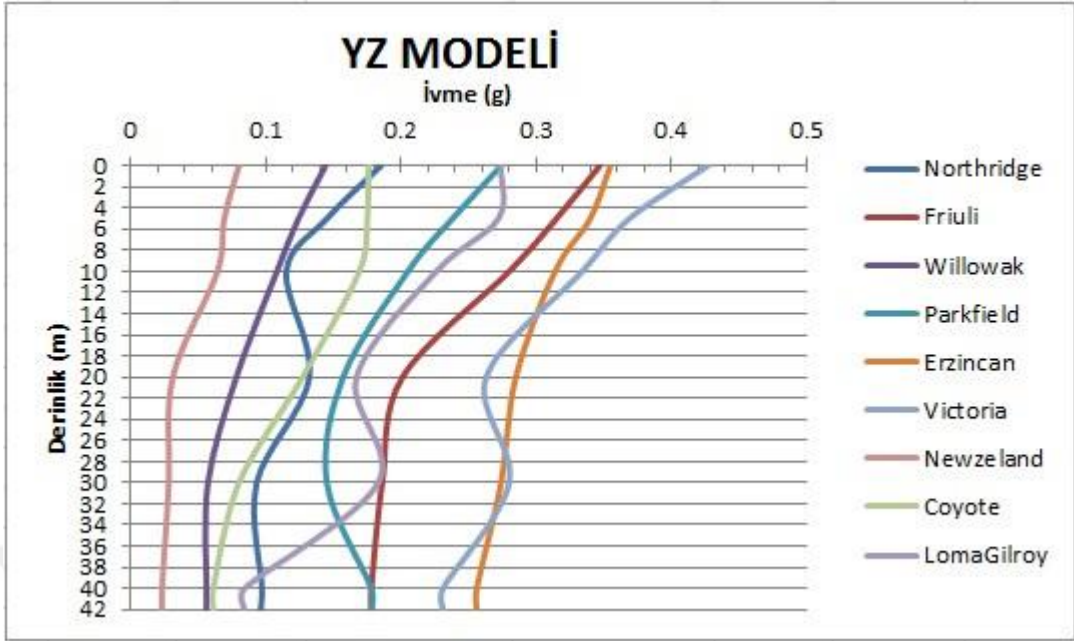




Şekil 4.7: Kullanılan depremlerin TYZ modeli ve H=15m tünel derinliği için noktasal ivme dağılımları.

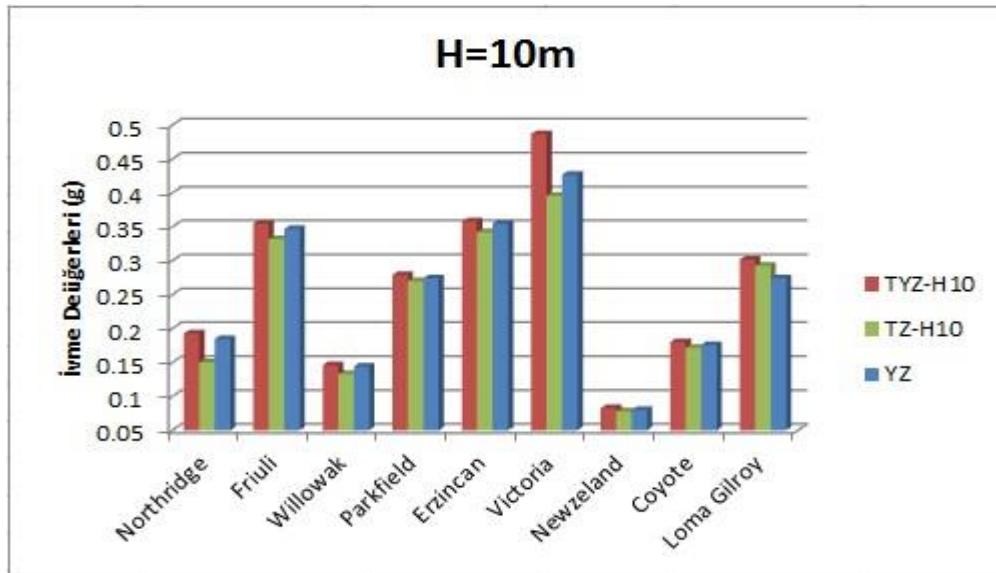


Şekil 4.8: Kullanılan depremlerin TZ modeli ve H=15m tünel derinliği için noktasal ivme dağılımları.

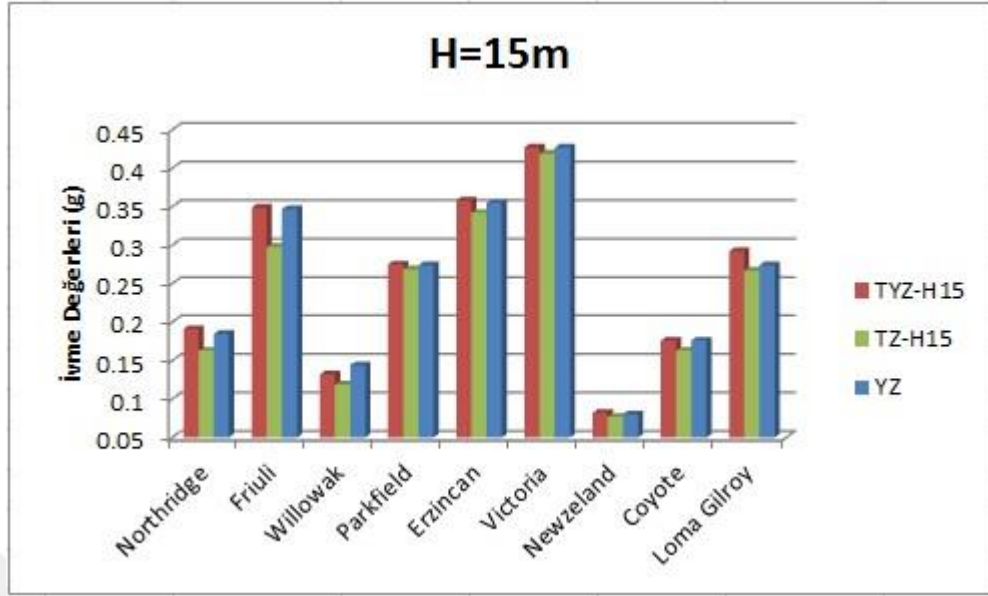


Şekil 4.9: Kullanılan depremlerin YZ modeli için noktasal ivme dağılımları.

TYZ, TZ ve YZ modellerinin A noktasındaki ivme dağılımları Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.10: H=10m tünel derinliğine göre TYZ,TZ ve YZ modellerinde A noktasındaki ivme değerleri.



Şekil 4.11: H=15m tünellerine göre TYZ,TZ ve YZ modellerinde A noktasındaki ivme değerleri.

Tek başına yapının da yüzeydeki ivme değerlerini arttırdığı ve tüneller ile beraber olunca en yüksek ivme değerlerini oluşturduğu söylenebilir. Bu farklılıklar çok büyük seviyede olmamakla beraber, TYZ modelinde daha yüksek ivmelerin görüldüğü söylenebilir. Bunun sebebi ise deprem dalgalarının tüneller-yapı arasında sıkışıp yansıma yapması ve enerji yığılmalarının o bölgede daha fazla olması sebebiyle ivme artışlarının da daha yüksek olması olabilir. Daha sonra en yüksek ivmeler sırasıyla YZ ve TZ modellerinde meydana gelmiştir. Ayrıca tüneller derinliği arttıkça YZ modeli TYZ modeline yaklaşmıştır. Bir başka deyişle tüneller derinliği arttıkça TYZ modeli YZ modeli gibi çalışmıştır. Bu da demek oluyor ki tüneller derinliği arttıkça tüneller-yapı-zemin arasında oluşan etkileşim seviyesi azalmaktadır.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'den yararlanılarak TYZ ve TZ modelleri arasındaki ivme farklarının diğer bir ifade ile yapının etkisinin yüzde olarak ifade edilmiş hali Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.4:** TYZ ve YZ modellerinin arasındaki yüzde ivme farkları

DEPREM	H=10m			H=15m		
	TYZ (g)	TZ (g)	FARK (TYZ-TZ) (%)	TYZ (g)	TZ (g)	FARK (TYZ-TZ) (%)
Northridge	0.193	0.15	23	0.191	0.163	17
Friuli	0.355	0.332	7	0.349	0.298	15
Willowak	0.146	0.133	10	0.132	0.119	10
Parkfield	0.279	0.27	3	0.275	0.269	2
Erzincan	0.358	0.342	5	0.358	0.342	4
Victoria	0.487	0.396	21	0.427	0.419	2
Newzeland	0.083	0.078	6	0.082	0.077	6
Coyote	0.18	0.172	5	0.176	0.163	7
Loma Gilroy	0.302	0.293	3	0.292	0.267	9

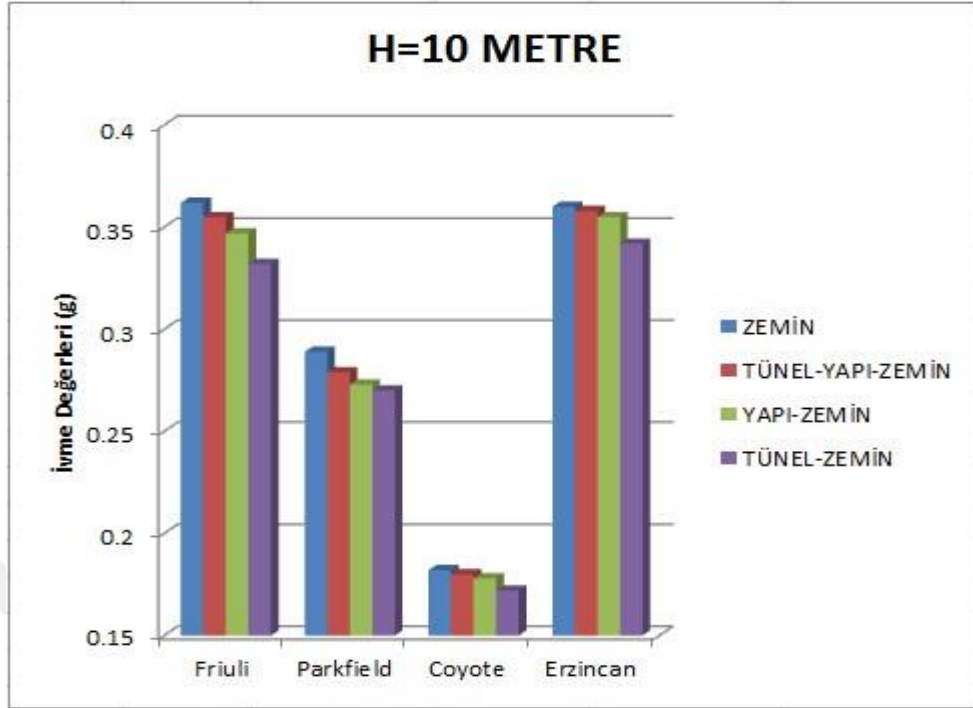
A noktasında okunan ivme değerlerinin ana kaya tabanında bulunan H noktasındaki ivme değerlerine bölünmesiyle  $B_k$  yani Zemin Büyütme Katsayı bulunur. Dokuz depreme ait  $B_k$  değerleri TYZ, TZ ve YZ modelleri için aşağıdaki Tablo 4.5'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.5:** Dokuz depreme ait büyütme değerleri.

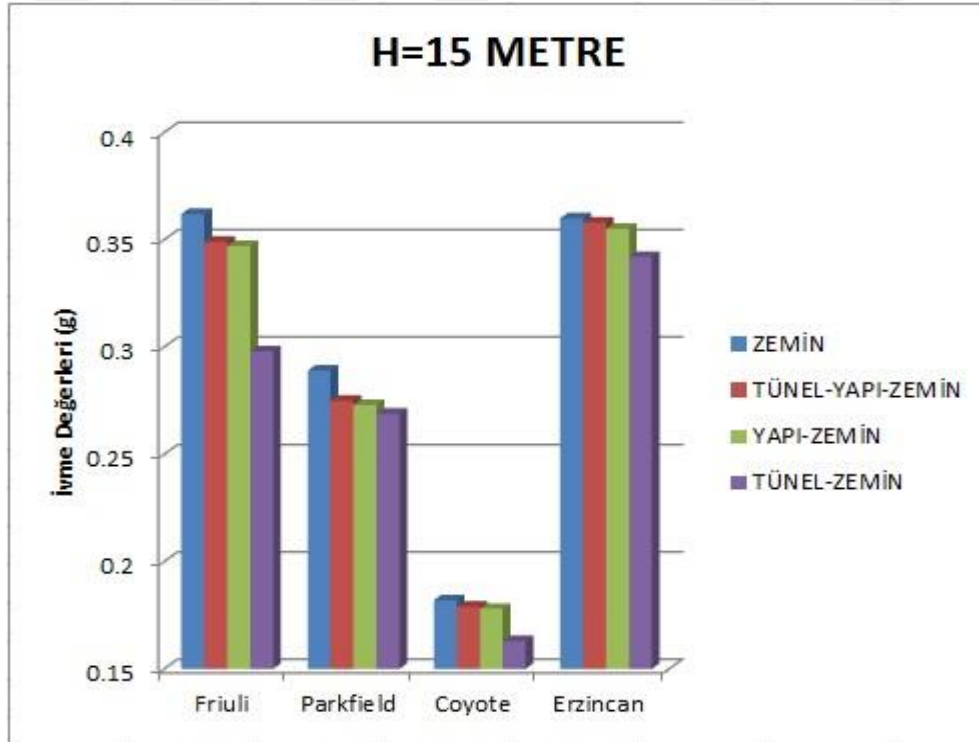
İVME NOKTASI	H=10 METRE		H=15 METRE		YAPI ZEMİN
	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	
Friuli	2	1.9	1.9	1.6	1.9
Coyote	2.9	2.8	2.8	2.6	2.9
Parkfield	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Erzincan	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3
Northridge	2	1.6	1.9	1.6	1.9
Victoria	2.1	1.7	1.8	1.8	1.8
Newzeland	3.6	3.4	3.5	3.3	3.4
Willowak	2.6	2.4	2.3	2.1	2.5
Loma Gilroy	3.6	3.5	3.4	3.1	1.5

Analiz sonuçlarına göre tüm depremlerde zemin büyütme en fazla tünel-yapı-zemin modelinde ve H=10 m tünel derinliğinde meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise yapılaşmanın olduğu yerlere yakın derinliklerdeki tünellerle üst yapı arasında deprem dalgalarının sıkışıp çok fazla yansıma yapması (reflection) yani belli noktalara deprem dalgalarının fazlaca gelip ivme değerlerini arttırmaları gösterilebilir. Ayrıca YZ modelindeki zemin büyütme değerleri H=15 m tünel derinliğinde TYZ modelindeki zemin büyütme değerlerine yakın çıkmıştır. Buradan sonuçla tünel derinliği arttıkça tünel-yapı etkileşiminin azaldığı ve YZ modelinin TYZ modeline benzer şekilde davrandığı söylenebilir.

İkinci bölümde ise maksimum ivmelerin meydana geldiği A noktalarının depremin kaçınıcı saniyesinde meydana geldiği bulunmuş ve bu süreler referans alınarak Plaxis programında 4 deprem için analizler tekrar yapılmıştır. Friuli, Coyote, Parkfield ve Erzincan depremlerinin TYZ-TZ-YZ ve FF modellerine ait H=10m ve H=15m derinliklerde A noktalarında meydana gelen ivmeler sırasıyla aşağıdaki Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Dört farklı modelde H=10m tünel derinliğinde A noktasındaki ivme değerleri.



Şekil 4.13: Dört farklı modelde H=15m tünel derinliğinde A noktasındaki ivme değerleri.

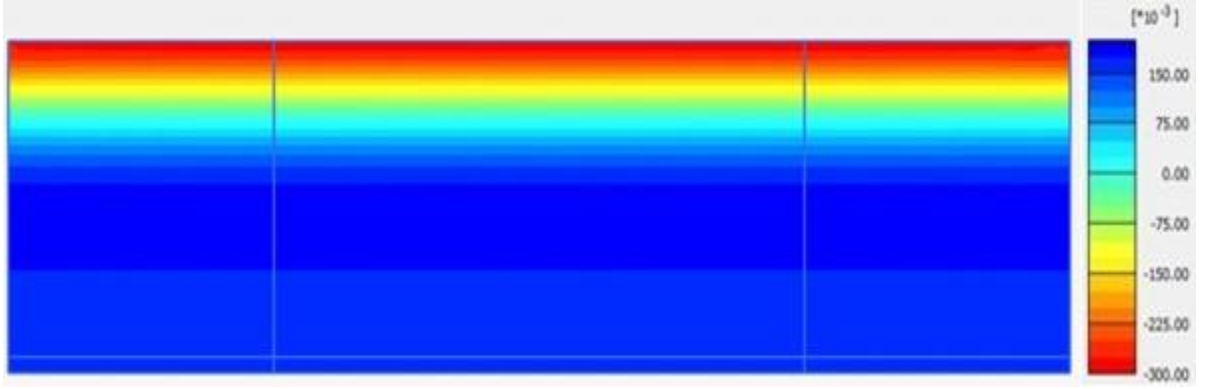
Yukarıdaki Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'e bakıldığında dört deprem için de modelin en üst noktası olan A noktasında meydana gelen ivmeler en fazla sadece zeminin olduğu FF modelinde meydana gelmiştir. FF modelinde herhangi bir yapı bulunmaması sebebiyle modele deprem verildiğinde salınım diğer modellere göre fazla olur ve ivme değerleri yüzeyde yüksek görülür. Ardından en fazla ivmeler tünel-yapı-zemin modelinde meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise daha önce değinildiği gibi tünel-yapı arasında deprem dalgalarının sıkışması, yansıma yapması ve o bölgede enerji yığılması yaşanması sebebiyle diğer modellere göre daha fazla ivme almış olması olabilir.

TYZ modelinin ardından A noktasında en fazla ivmeler YZ modelinde meydana gelmiştir ve bu dört model arasında en az ivmeler de TZ modelinde meydana gelmiştir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'ten yararlanılarak yapının, tünele göre yüzeyde ortalama % 6 daha az fazla ivme artışı meydana getirdiği söylenebilir. Buradan sonuçla, yalnız tünelin ve yalnız yapının olduğu durumda depremler daha az büyütülüyorken, tünel ve yapı birlikte olduğu durumda ivmeler daha fazla büyütülür. Bu da tünel ve yapı arasındaki etkileşimin dinamik analizlerde ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Yüzeyde A noktasında ivmelerin en fazla olduğu durumlar sırasıyla FF>TYZ>YZ>TZ modellerinde gerçekleşmiştir. Tez çalışması kapsamında yapılan tüm analizlerin listesi Tablo 4.6'da gösterilmiştir

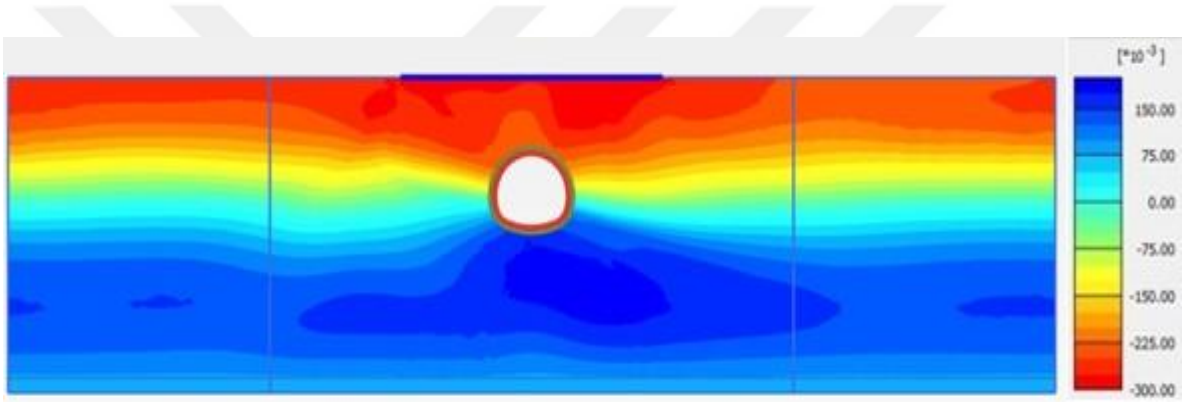
**Tablo 4.6:** Yapılan tüm analizlerin listesi.

Deprem Adı	H=10 METRE (TÜNEL DERİNLİĞİ)		H=15 METRE (TÜNEL DERİNLİĞİ)		YAPI-ZEMİN	SADECE ZEMİN
	TYZ	TZ	TYZ	TZ		
Northridge	TYZ	TZ	TYZ	TZ	YZ	FF
Friuli	TYZ	TZ	TYZ	TZ	YZ	FF
Willowak	TYZ	TZ	TYZ	TZ	YZ	FF
Parkfield	TYZ	TZ	TYZ	TZ	YZ	FF
Erzincan	TYZ	TZ	TYZ	TZ	YZ	FF
Victoria	TYZ	TZ	TYZ	TZ	YZ	FF
Newzeland	TYZ	TZ	TYZ	TZ	YZ	FF
Coyote	TYZ	TZ	TYZ	TZ	YZ	FF
Loma Gilroy	TYZ	TZ	TYZ	TZ	YZ	FF

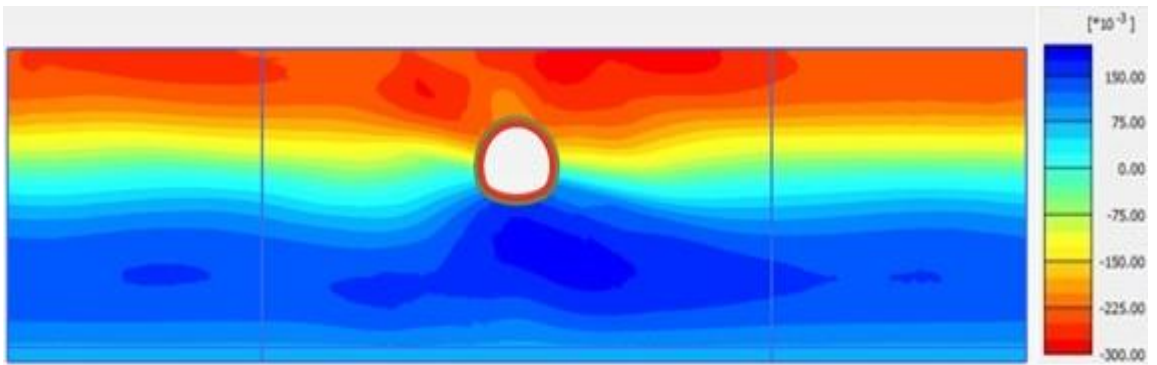
Parkfield, Coyote ve Friuli depremleri için dinamik analiz sonrasında modellerde meydana gelen ivme konturları incelenerek deprem sonrası ivme-alan dağılımları oluşturulmuştur. Parkfield depremine ait ivme-alan konturları Şekil 4.14 ve Şekil 4.19 arasında aşağıda gösterilmiştir. Coyote ve Friuli depremine ait ivme-alan konturları EK 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Parkfield depremine ait FF modelinde ivme alan konturları.

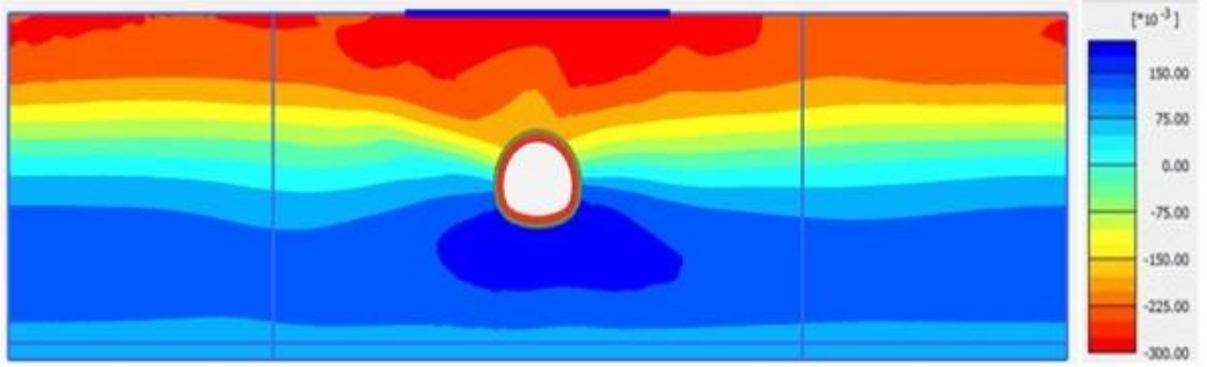


Şekil 4.15: Parkfeld depremine ait H=10m tünel derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları.

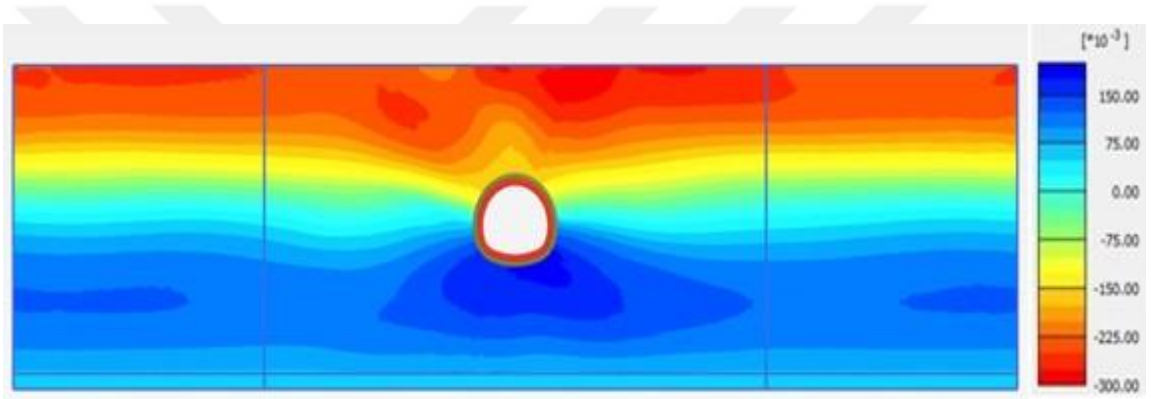


Şekil 4.16: Parkfield depremine ait H=10m tünel derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları.

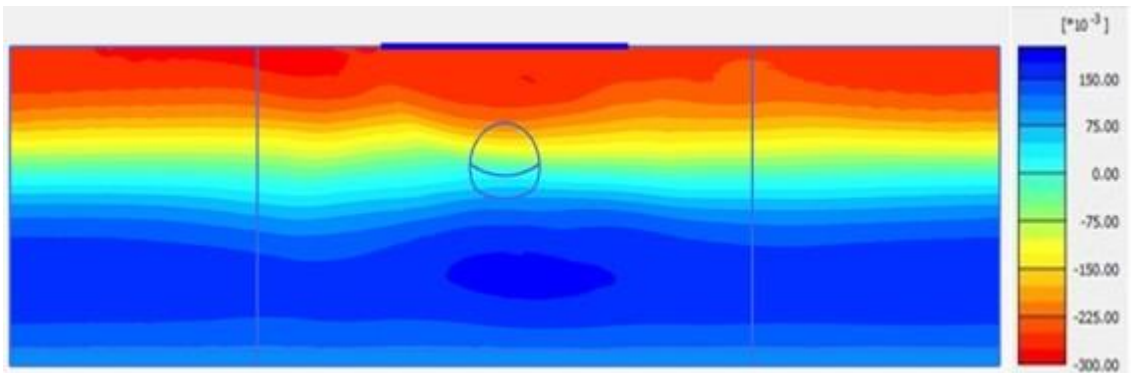




Şekil 4.17: Parkfield depremine ait H=15m tünellerin derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları.



Şekil 4.18: Parkfield depreminde H=15m tünellerin derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları.



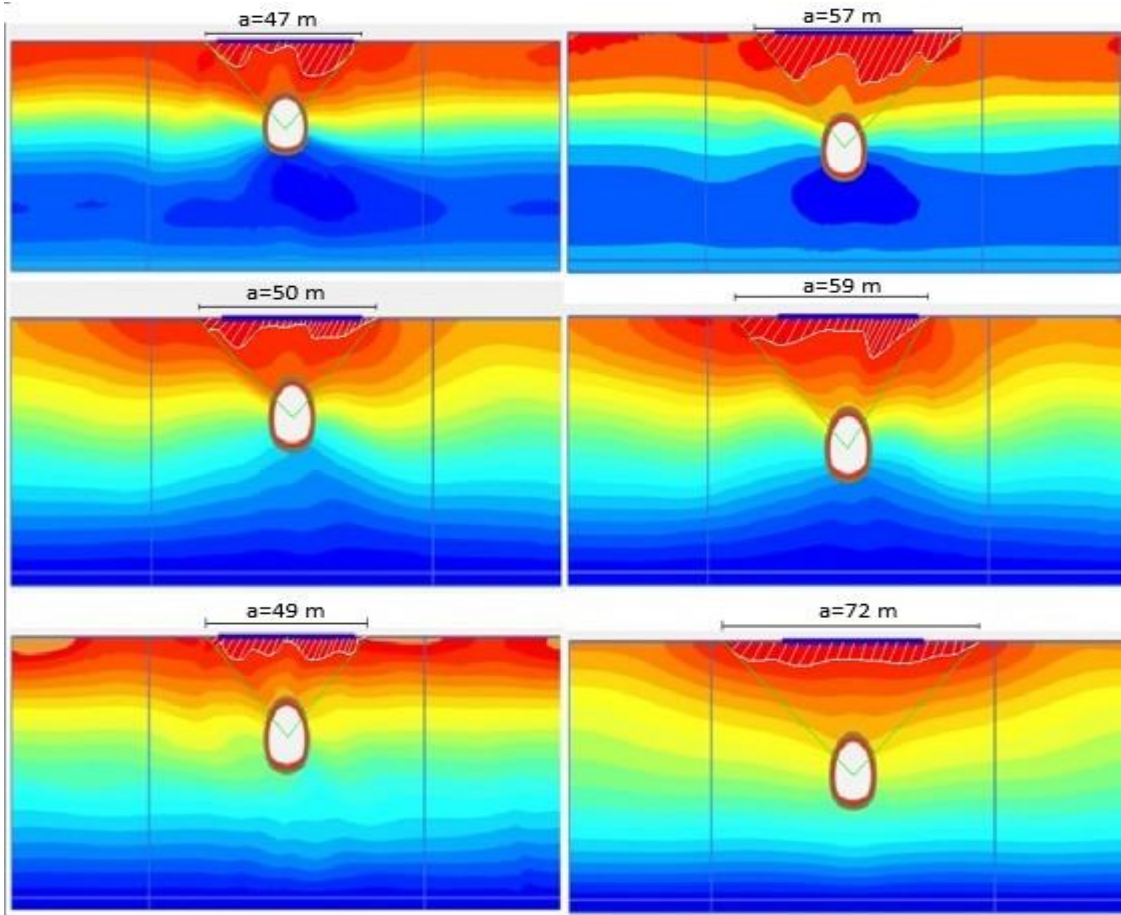
Şekil 4.19: Parkfield depremine ait YZ modelinde ivme alan konturları.

Yukarıdaki Şekil 4.19 ve Şekil 4.24 arasında Parkfield depremi için ivme alan konturları çizilmiştir. Parkfield depremi ve EK 4' de gösterilen Coyote ve Friuli depremlerinde de

özellikle tünel-yapı-zemin (TYZ) modellerinde kırmızı ile gösterilen maksimum ivme alanlarında kama şekli oluşmuştur. Yapının olmadığı model olan tünel-zemin (TZ) modellerinde ise bu kama bozulmuş ve maksimum ivme alanları dağınık görüntü sergilemiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere tünelin yapı ile etkileşimi sonucu deprem dalgalarının yansıma (reflection) yapması ve yine deprem dalgalarının yapı-tünel arasında odaklanması sonucu ivme alan konturları tünel-yapı arasında yığılmışlardır. TZ modelinde tünelin üstünde yapı olmadığı için deprem dalgaları serbest alanda yayılmışlar ve ivme alan konturları da dağınık oluşmuştur.

Sadece zeminin olduğu FF modelinde deprem süresince model sadece yanal salınım yaptığından ve deprem dalgalarının ana kaya tabanından yüzeye doğru hiçbir engelle karşılaşmadan ilerlemesi sebebiyle sabit ivme alan konturları oluşturmuştur.

Ayrıca derinliğin artması ile birlikte TYZ ve TZ modellerinde yüksek ivme alan konturları da yüzeyde daha geniş bir alana yayılmışlardır. Yani  $H=10\text{m}$  derinliğinde yüksek sayılabilecek ivmelerin oluşturduğu alan konturları yüzeyde dar bir alana sahipken,  $H=15\text{m}$  derinliğinde yüksek sayılabilecek ivme alan konturları yüzeyde daha geniş alan kaplamışlardır. Üç depremin ivme konturlarından yararlanılarak TYZ modelinde derinliğe bağlı genel ivme etkilenme alanları oluşturulmuş ve her bir analiz sonucunda üç depremin yüzeyde etkilenen ivme alanlarının yatay mesafeleri ölçülüp bu alanlar taralı bir şekilde aşağıdaki Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Zeminde yatay yönde etkilenen alanların mesafeleri ‘‘a’’ ile gösterilmiştir.



**Şekil 4.20:** Maksimum ivmelerin yüzeyde etkilediği alanların gösterimi.

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi tünel yapıya ne kadar yakın olursa yüzeyde etkilenen alanlar daralır. Tünel derinliği arttıkça yüzeyde depremden etkilenen alanlar artar.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tünel-yapı-zemin etkileşimini ve zemin büyütme kavramını anlamak adına dokuz farklı deprem kullanılarak dört farklı modelde 2 farklı derinlikte dinamik analizler yapılmıştır.

H=10m ve H=15m tünel derinliğinin her ikisinde de yüzeyde okunan ivme değerleri TYZ modelinde TZ modeline göre daha yüksektir. Bu fark %9 ile %8 arasında değişmektedir. Bunun sebebi ise deprem dalgalarının tünel ile yapı arasında ilerlerken sıkışması, yansıma (reflection) yapması ve yapı-tünel arasında odaklanması sonucu o bölgede enerji yığılması oluşturması olduğu düşünülmektedir.

Yüzeyde okunan ivme değerleri tünel-yapı-zeminin bir arada olduğu zaman en yüksek değerlere ulaşmıştır. Tünel ve yapının ayrı ayrı etkisini görmek için TZ ve YZ modelinde analizler yapılmıştır ve yüzeyde okunan ivme değerleri YZ modelinde tünelin olduğu TZ modeline göre daha fazla çıkmıştır. Bu fark ortalama %6 civarındadır. Buradan sonuçla tünelin tek başına kullanıldığında yüzeyde okunan ivme değerlerinin daha az olduğu söylenebilir. Ama yapıyla birlikte kullanıldığında (TYZ modeli) yüzeyde en yüksek ivme değerleri elde edilir. Bu da tünel-yapı-zemin etkileşiminin ne kadar önemli olduğunun kanıtıdır.

Tünel derinliğinin yüzeyde meydana gelen ivme değerlerine etkisini görmek adına TYZ ve TZ modelinde sabit derinliklerde analizler yapılmıştır. TYZ ve TZ modellerinin her ikisinde de H=10m derinliğinde yüzeydeki ivme değerleri, H=15m derinliğindeki ivme değerlerinden daha yüksektir. Tünel derinliği arttıkça tünel-yapı arasında mesafenin artması deprem dalgalarının yansıma karakteristiğinin değişmesine sebep olmuş ve bu da tünel-yapı etkileşiminin azalması neden olmuştur. Sonuç olarak aynı modelde tünel derinliği arttıkça yüzeyde meydana gelen ivme değerleri azalır.

Yapının etkisini anlamak adına TYZ, TZ ve YZ modellerinde analizler yapılarak her bir derinlik için idealize edilmiş noktasal ivme eğrileri çizilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki tünel derinliği arttıkça YZ modelindeki yüzeyde oluşan ivme değerleri TYZ modeline yaklaşmıştır. Yani tünel derinliği arttıkça yapı-tünel etkileşimi azalmış ve YZ modeli TYZ modeli gibi çalışmıştır.

TYZ ve TZ modelleri arasında en fazla büyütme tünel-yapı-zeminin bulunduğu TYZ modeli ve H=10m derinliğinde meydana gelmiştir. Bu durum tünel-yapı arasındaki deprem dalgalarının sıkışması, çok fazla yansması ve tünel-yapı arasındaki bölgede daha yüksek gerilmelerin oluşması ile açıklanabilir. Bu da tünel-yapı etkileşimin ne derece önemli olduğu göstermektedir.

Yüzeyde meydana gelen ivmeler ve zemin büyütme en fazla sırasıyla FF>TYZ>YZ>TZ modellerinde meydana gelmiştir. Sadece yapının olduğu model olan YZ, sadece tünelin olduğu TZ modeline göre zemin yüzeyinde daha fazla ivme almıştır. Bir başka deyişle, tünel yapıya göre yüzeyde daha az büyütme meydana getirmiştir. FF modelinden sonra zeminde en fazla büyütme ise TYZ modelinde meydana gelmiştir. Bu da dinamik tasarımlarda tünel-yapı arasındaki etkileşimin ne denli önemli olduğunu göstermiştir.

Tünel derinliği arttıkça tünel-yapı-zemin etkileşimi azalacağından YZ modelindeki büyütme katsayıları TYZ modelindekilere benzer çıkmıştır.

Tünel-yapı-zemin modelindeki ivme-alan konturları spesifik bir biçimde kama şeklinde oluşmuşken TZ modelinde dağınık bir görüntü sergilemiştir. Tünel-yapı arasındaki etkileşim, yüksek ivmelerin bu bölgeler arasında yığılması yüzeyde oluşan ivme alanlarının dağılımının kama şeklinde olmasına neden olmuştur.

Tünel-yapı-zemin modelinde tünel derinliği arttıkça yüzeyde ivme alanlarının oluşturduğu kama görüntüsü genişlemiştir. Buradan sonuçla tünel-yapı-zemin etkileşimi sonucu daha yüksek ivmenin etkilediği alan, tünelin derinliği ile bağlantılıdır. Sonuç olarak deprem durumunda tünel derinliği yüzeyde depremden kaynaklı alanlarının dağılımını etkilemektedir.

Bu çalışma tek bir zemin ortamı ve analizlerde kullanılan tünel derinlikleri  $H \leq 15$  m olduğundan dolayı sığ tüneller için yapılmış olup, daha farklı zemin ortamları ve daha derin tünellerin sonuçlara olan etkisi ileriki çalışmalarda dikkate alınacaktır.

## KAYNAKLAR

- Cabangon, L., Elia. G. & Rouainai. M., 2017, Advanced numerical modelling of the transverse behaviour of tunnels under seismic loading; EURO: Tun. Austria.
- Tsinidis, G., Pitilakis, K. & Anagnostopoulos, C., 2016, Circular tunnels in sand: Dynamic response and efficiency of seismic analysis methods at extreme lining flexibilities. *Bulletin of Earthquake Engineering* doi: 10.1007/s10518-016-9928-1.
- Moghadam, M.R. & Baziar M.H., 2016, Sesimic ground motion amplification pattern induced by subway tunnel: Shaking table testing and numerical simulation.
- Tsinidis, G., Rovithis, E., Pitilakis, K. & Chazelas, J.L., 2015, Dynamic response of shallow rectangular tunnels in sand by centrifuge testing. In F. Taucer & Apostolska R. (eds), *Experimental research in earthquake engineering – EUSERIES concluding workshop, Geotechnical Geological and Earthquake Engineering*, 35:493-507. Switzerland.
- Abate, G., Massimino, M.R., Maugeri, M., 2015, Numerical Modelling of centrifuge tests on tunnel-soil systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 13(7) () 1927-1951.
- Pitilakis, K. and Tsinidis, G., 2014, Perfomance and seismic design of underground structres, In:Maugeri,M. and Soccodato, C. (eds), *Earthquake Geotechnical Engineering Desing, Geotechnical Geological and Earthquake Engineering*, 28: 279-340, Springer International Publishing, Switzerland.
- Tsinidis, G., Heron, C., Pitilakis, K., Madabhushi, SPG., 2014, Pysical modelling fort he evaluation of the sesimic behaviour of square tunnels, In: Iiki, A. and Fardis, M., (eds.) *Seismic Evaluation and Rehabilitation of Structures, Geotechnical Geological and Earthquake Engineering*, 26: 389-406, Springer International Publishing, Switzerland.
- Pitilakis, K., Tsinidis, G., Leanza, A., Maugeri, M., 2014, Seismic behaviour of circular tunnels accounting for above ground structures ,interaction effects. *Soil Dyn Eartq Eng*; 67:1-15.
- Wang, H.F., Lou, M.L., Chen, X. & Zhai, Y.M., 2013, Structure- soil-structure interaction between underground structure and ground structure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 54: 31-38.
- Besharat, V., Davoodi, M. & Jafari, M.K., 2012, Effect and Underground Structure on Free-Field Ground Motions during Earthquake; WCEE Lisboa.
- Abuhajar, O., Naggar, H.E. & Newson, T., 2011, Effect and Underground Structure on amplification of seismic motion for sand with varying density; Pan-Am CGS Geotechnical Conference.
- Cilingir, U. and Madabhushi, SPG., 2011, Effect of depth on the seismic response of square tunnels, *Soils and Foundations*, 51(3): 449-457.

- Kirtas, E., Rovithis , E., Pitilakis, K., 2009, Subsoil Interventions Effect on Structural Seismic Response. Part 1: Validation of Numerical Simulations. *Journal of Earthquake Engineering* , 13 155-169.
- Abate , G., Massimino, M.R., Maugeri , M., 2008, Finite element modelling of a shaking table test to evaluate the dynamic behaviour of a soil-foundation system. *AIP Conference Proceedings*. Volume 1020, Issue Part 1 , , pp. 569-576.
- Abrahamson, N., Atkinson, G., Boore, D., Bozorgnia, Y., Campbell, K., Chiou, B., Idriss, I.M., Silva, W., Youngs, R., 2008, Comparisons of the NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra* 24:1, 45-66.
- Yiouta-Mitra, P., Kouretzis, G., Bouckovalas, G., Sofianos, A., 2007, Effect of underground structures in earthquake resistant desing of surface structures. Dynamic response and soil properties. *Geo-Denver: New Peaks in Geotechnics*.
- Ansal, A., Durukal, E. ve Tönük, G., 2006. Selection and Scaling of Real Acceleration Time Histories for Site Response Analyses. *Proc. of ETC12 Workshop*, Athens, Greece, 93-98.
- İyisan, R. ve Haşal, M.E., 2006, Farklı deprem hareketinin ve yerel zemin sınıfının dinamik davranışa etkisi, *ZMTM 11. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, K.T.Ü., Trabzon.
- Lombardi, D., Bhattacharya, S., Scarpa, F., Bianchi, M., 2005, Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries. *Soil Dyn Earthq Eng*; 69:46-56.
- Pakbaz, MC., Yareevand, A., 2005, 2-d analysis of circular tunnel against earthquake loading. *Tunneling and Underground Space Technology*; 20: 411-7.7.
- Haigh, S., Ghosh, B., Madabhushi, S., 2005, Importance of time step dscretisation for nonlinear dynamic finite element analysis. *Canadian Geotechnical Journal*; 42(3): 957-63.
- Haşal, M.E. ve İyisan, R., 2004, Yerel zemin koşullarının zemin büyütmesine etkisi: Bir ve iki boyutlu analiz, *ZMTM 10. Ulusal Kongresi* 16-17 Eylül, 343-352, İ.T.Ü., İstanbul.
- Stone, K.J.L. and Newson, T.A.A ., 2002, Arching effects in soil-structure interaction. 4th Int. Conf. Physical Modelling in Geomechanics, St. Johns, Newfoundland, pp. 935-939.
- Yoshida, N., Kobayashia , S., Suetomia, I., Miura, K., 2002, Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **22:3**, 205-222.
- Hashash, YMA ., Hook, JJ., Schmidt, B., Yaou, JI-C. 2001, Seismic desing and analysis of underground structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(2): 247-293.
- Şafak, E., 2001, Local Site Effects and Dynamic Soil Behaviour, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **21**, 453-458.

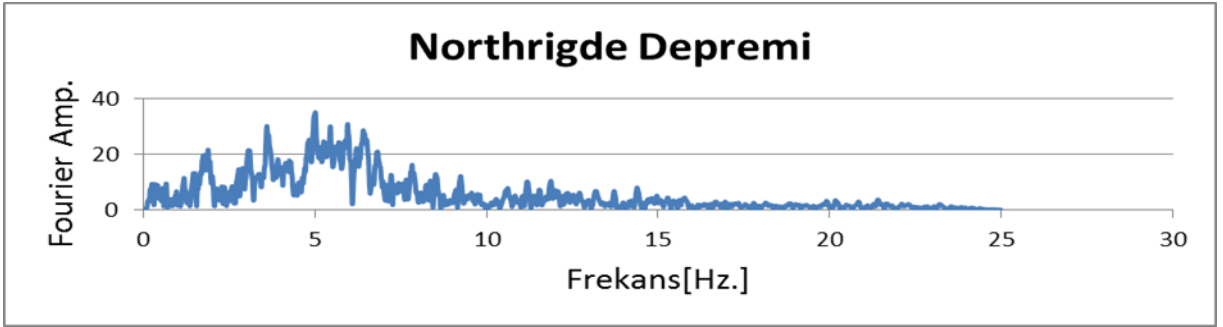
- Penzien, J., 2000, Seismically induced racking of tunnel linings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 29:683-91.
- Borcherdt, R. D., 1994, Estimates of Site Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification). *Earthquake Spectra* 10:4, 617-654.
- Lee, VW., Karl, J., 1993, Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities. *Int Soil Dyn Earthq Eng*; 11(8):445-56.
- Shima, E., 1978, Seismic Microzoning of Tokyo, Proc. 2.International Conf. On Microzonation, Vol.I, 433-443.



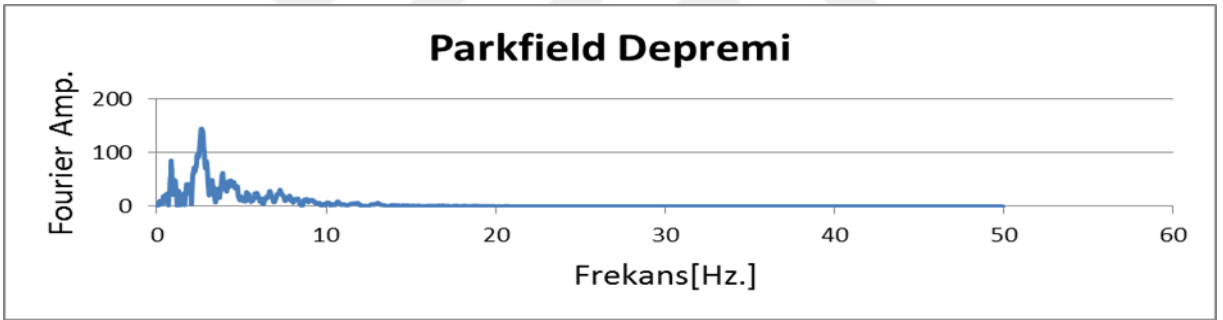


## EKLER

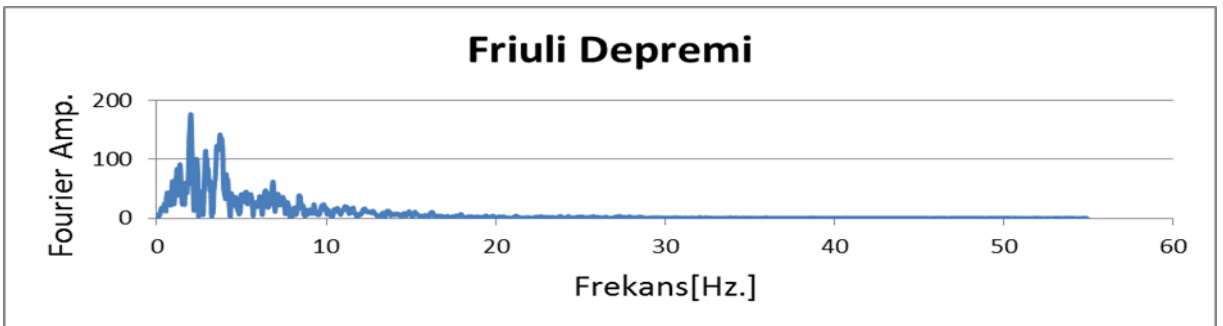
**EK 1.** Analizlerde kullanılan depremlerin Fourier dönüşümleri.



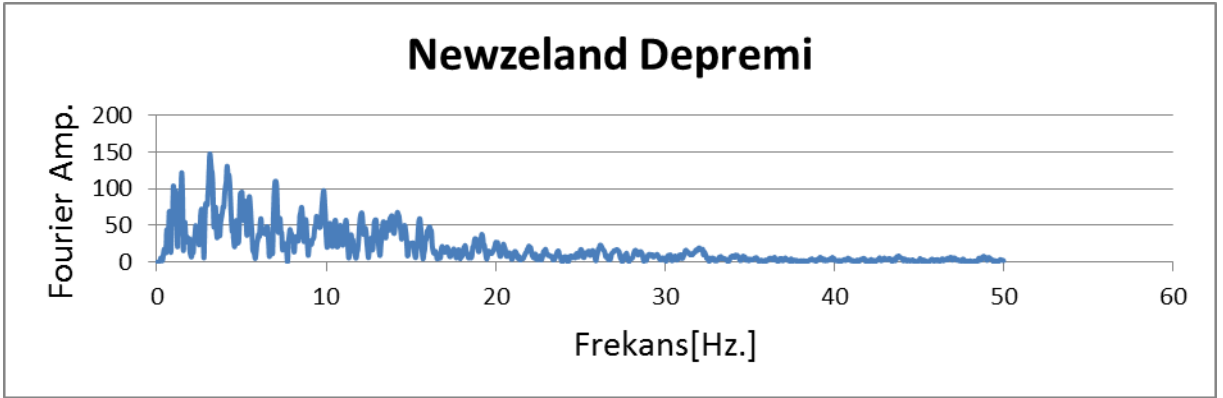
**Şekil 0.1:** Northridge depremine ait Fourier dönüşümü.



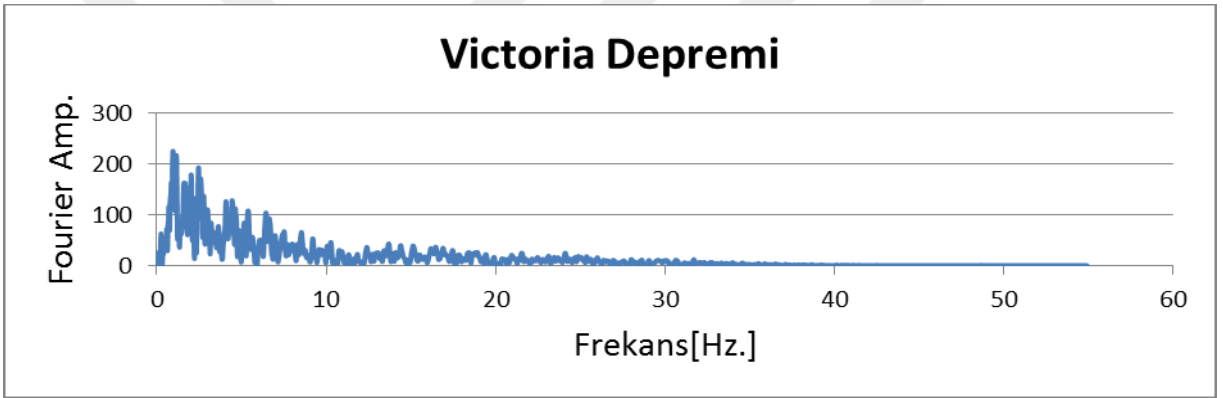
**Şekil 0.2:** Parkfield depremine ait Fourier dönüşümü.



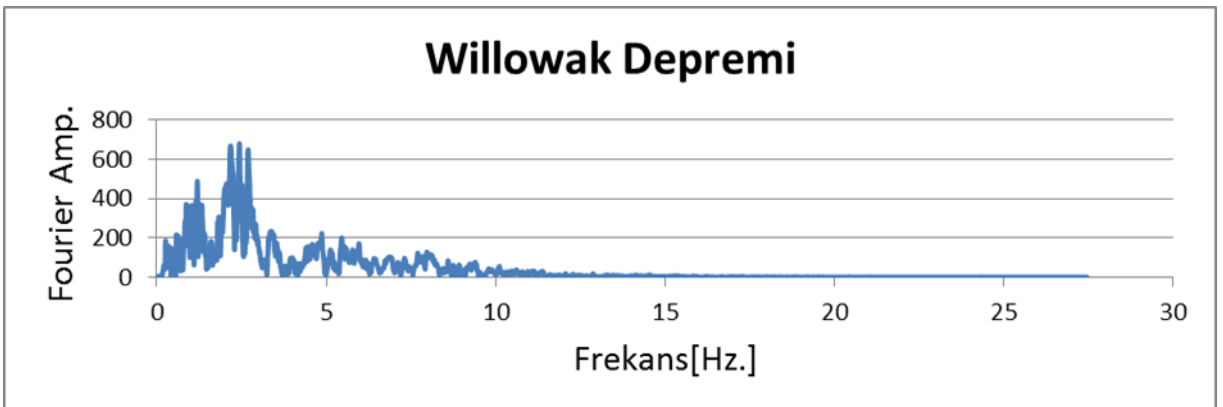
**Şekil 0.3:** Friuli depremine ait Fourier dönüşümü.



Şekil 0.4: Newzeland depremine ait Fourier dönüşümü.



Şekil 0.5: Victoria depremine ait Fourier dönüşümü.



Şekil 0.6: Willowak depremine ait Fourier dönüşümü.

**EK 2.** Analizlerde kullanılan depremlerin nokta ivme değerleri.**Tablo 0.1:** Coyote depremine ait nokta ivme değerleri.

COYOTE DEPREMİ					
		H=10 METRE		H=15 METRE	
İVME NOKTASI	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	YAPI ZEMİN
A	0.18	0.172	0.176	0.163	0.178
B	0.175	0.169	0.167	0.158	0.175
C	0.171	0.165	0.155	0.160	0.169
E	0.115	0.11	0.085	0.086	0.127
F	0.081	0.08	0.071	0.07	0.08
G	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061
H	0.061	0.061	0.061	0.061	0.061

**Tablo 0.2:** Parkfield depremine ait nokta ivme değerleri.

PARKFIELD DEPREMİ					
		H=10 METRE		H=15 METRE	
İVME NOKTASI	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	YAPI ZEMİN
A	0.279	0.271	0.275	0.269	0.274
B	0.251	0.238	0.224	0.213	0.238
C	0.250	0.268	0.191	0.181	0.205
E	0.185	0.185	0.174	0.180	0.157
F	0.180	0.180	0.150	0.145	0.145
G	0.178	0.178	0.178	0.178	0.178
H	0.178	0.178	0.178	0.178	0.178

**Tablo 0.3:** Loma Gilroy depremine ait nokta ivme değerleri.

LOMA GILROY DEPREMİ					
		H=10 METRE		H=15 METRE	
İVME NOKTASI	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	YAPI ZEMİN
A	0.278	0.270	0.275	0.269	0.274
B	0.251	0.238	0.224	0.213	0.272
C	0.25	0.268	0.191	0.181	0.226
E	0.185	0.185	0.174	0.180	0.167
F	0.180	0.180	0.150	0.145	0.183
G	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084
H	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084

**Tablo 0.4:** Newzeland depremine ait nokta ivme değerleri.

NEWZELAND DEPREMİ					
		H=10 METRE		H=15 METRE	
İVME NOKTASI	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	YAPI ZEMİN
A	0.083	0.078	0.082	0.077	0.08
B	0.07	0.076	0.07	0.071	0.069
C	0.072	0.072	0.066	0.065	0.064
E	0.046	0.047	0.034	0.034	0.031
F	0.03	0.03	0.026	0.026	0.028
G	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
H	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023

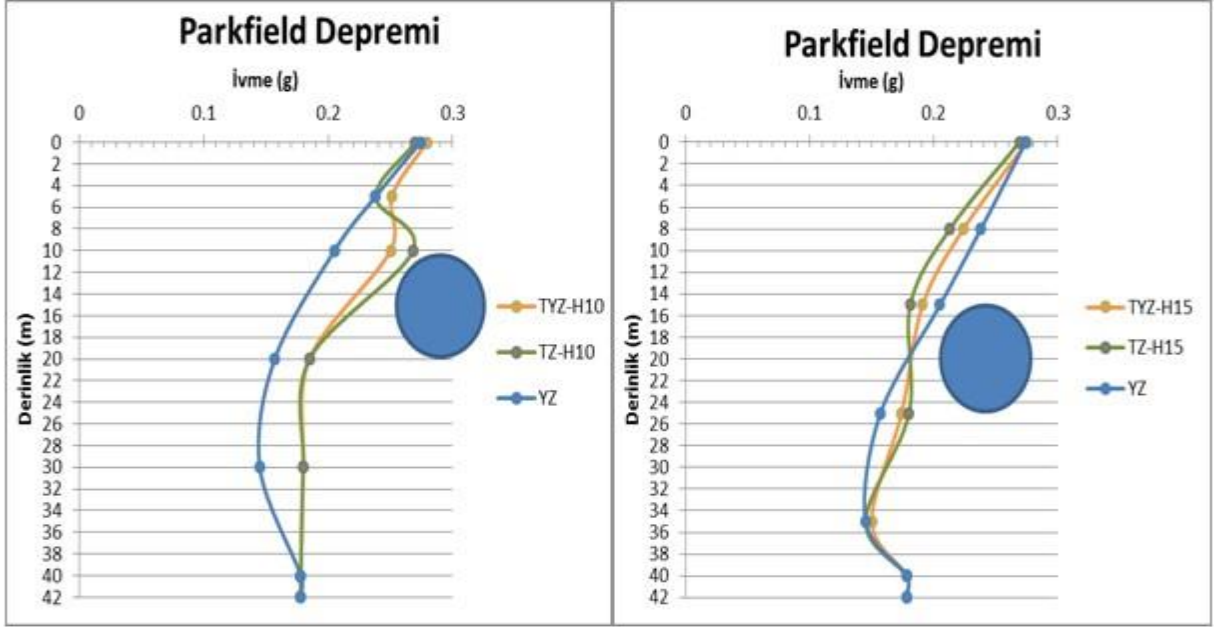
**Tablo 0.5:** Erzincan depremine ait nokta ivme değerleri.

ERZİNCAN DEPREMİ					
		H=10 METRE		H=15 METRE	
İVME NOKTASI	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	YAPI ZEMİN
A	0.358	0.342	0.358	0.342	0.355
B	0.337	0.337	0.321	0.328	0.34
C	0.313	0.318	0.291	0.286	0.314
E	0.294	0.285	0.290	0.282	0.285
F	0.285	0.278	0.276	0.269	0.274
G	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256
H	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256

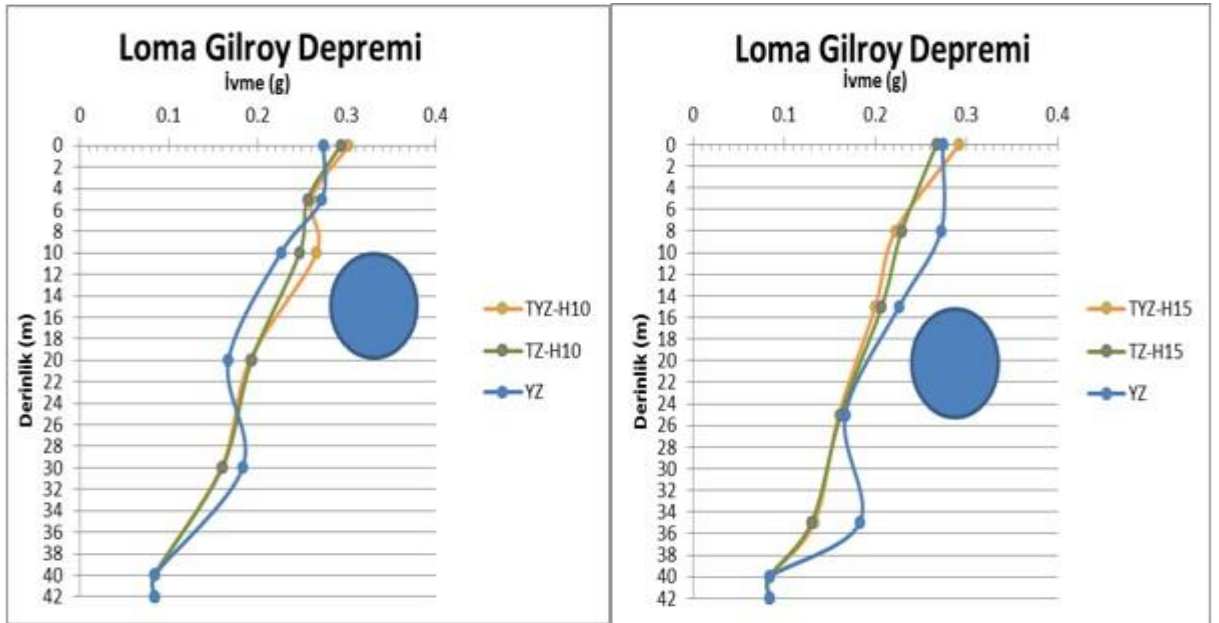
**Tablo 0.6:** Northridge depremine ait nokta ivme değerleri.

NORTHRIDGE DEPREMİ					
		H=10 METRE		H=15 METRE	
İVME NOKTASI	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	TÜNEL-YAPI ZEMİN	TÜNEL ZEMİN	YAPI ZEMİN
A	0.193	0.15	0.191	0.163	0.185
B	0.161	0.144	0.129	0.127	0.145
C	0.134	0.126	0.128	0.126	0.115
E	0.115	0.164	0.114	0.118	0.132
F	0.113	0.109	0.088	0.089	0.093
G	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097
H	0.097	0.097	0.097	0.096	0.096

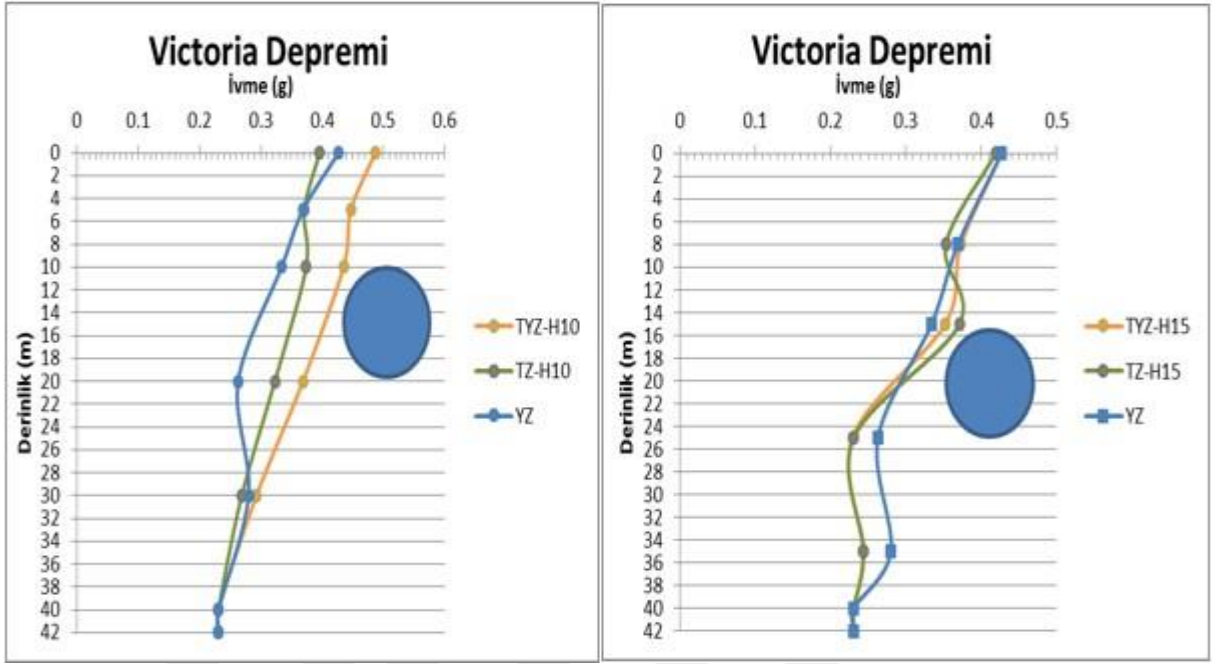
**EK 3.** Analizlerde kullanılan depremlerin noktasal ivme dağılımları.



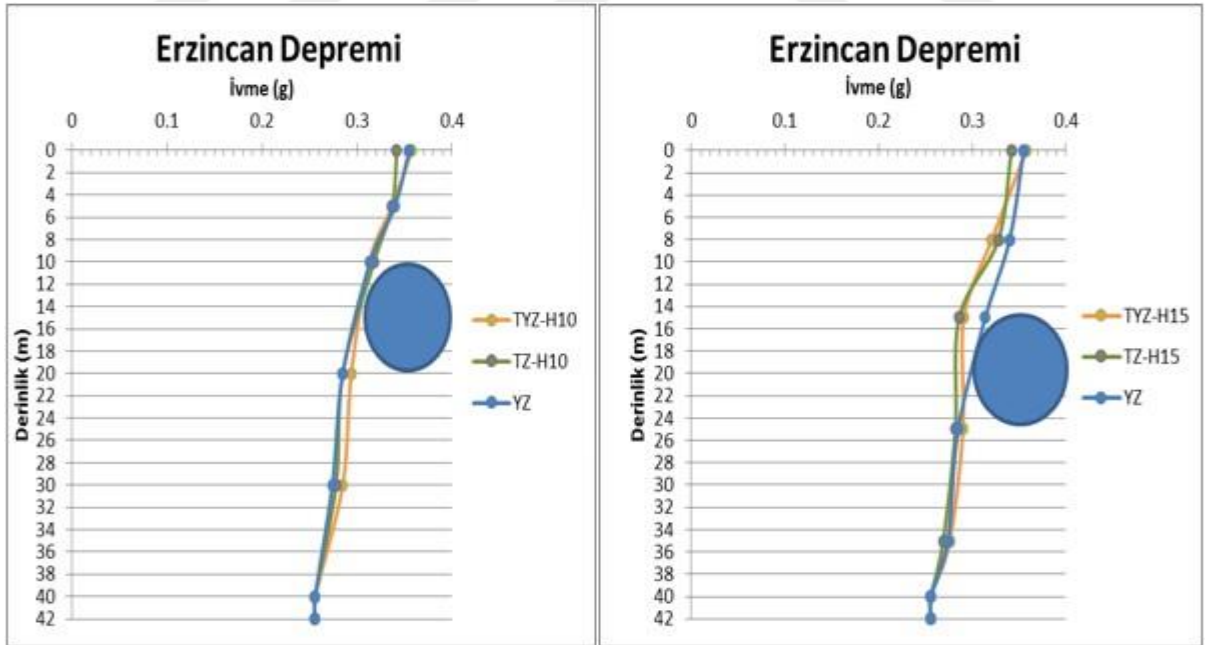
**Şekil 0.7:** Parkfield depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları.



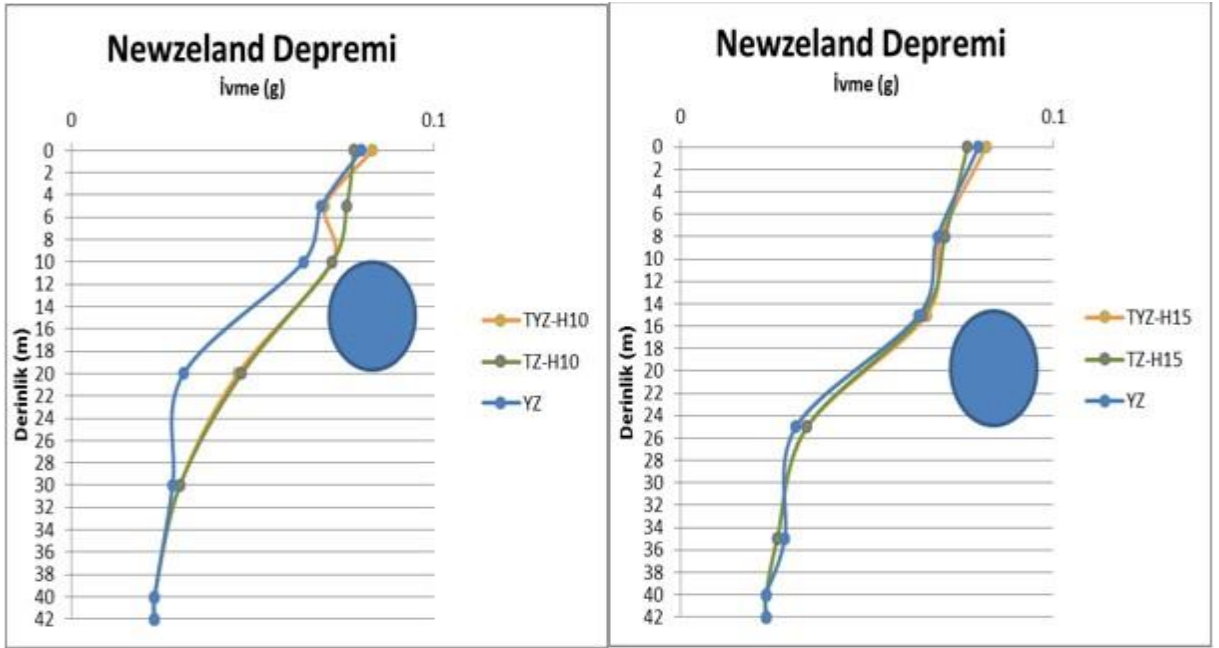
**Şekil 0.8:** Loma Gilroy depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları.



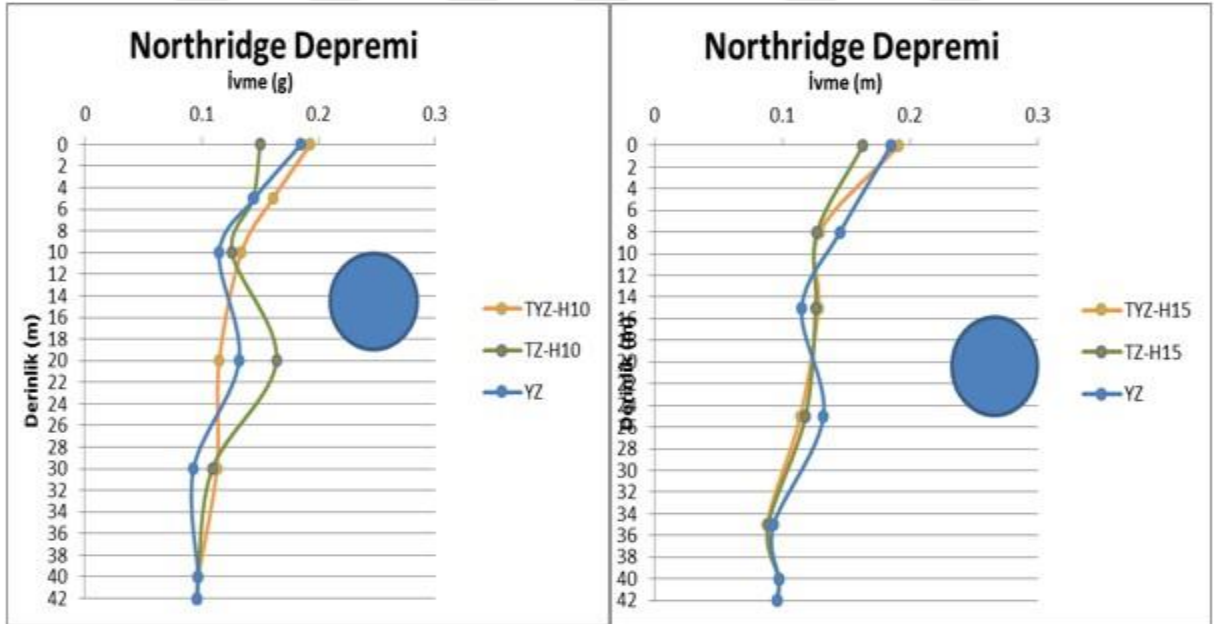
Şekil 0.9: Victoria depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları.



Şekil 0.10: Erzincan depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları.

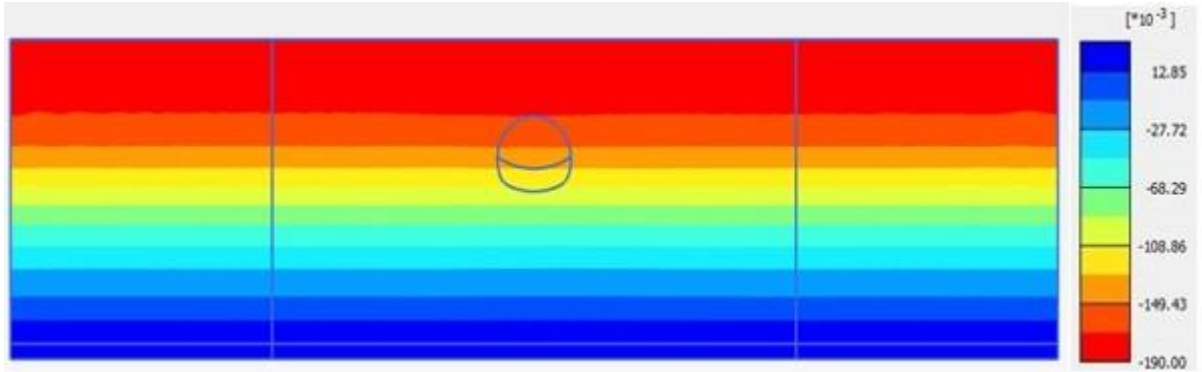


Şekil 0.11: Newzeland depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları.

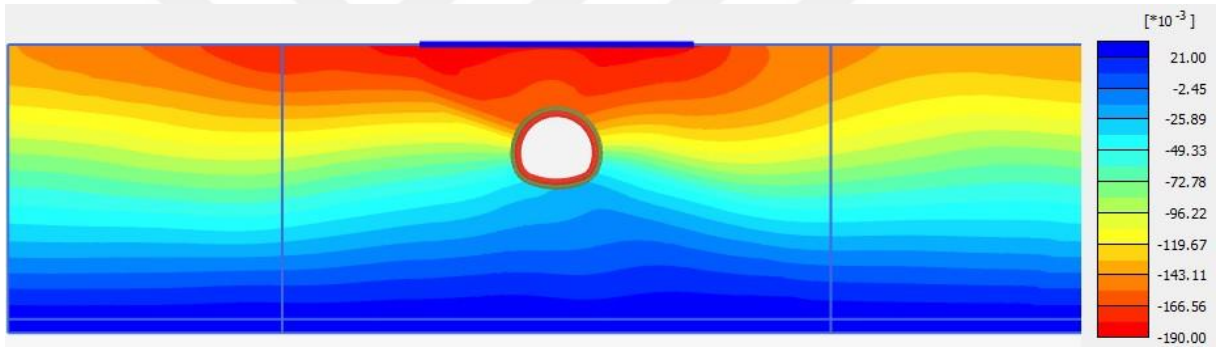


Şekil 0.12: Northridge depremine ait farklı tünel derinliklerinde TYZ, TZ ve YZ modellerindeki noktasal ivme dağılımları.

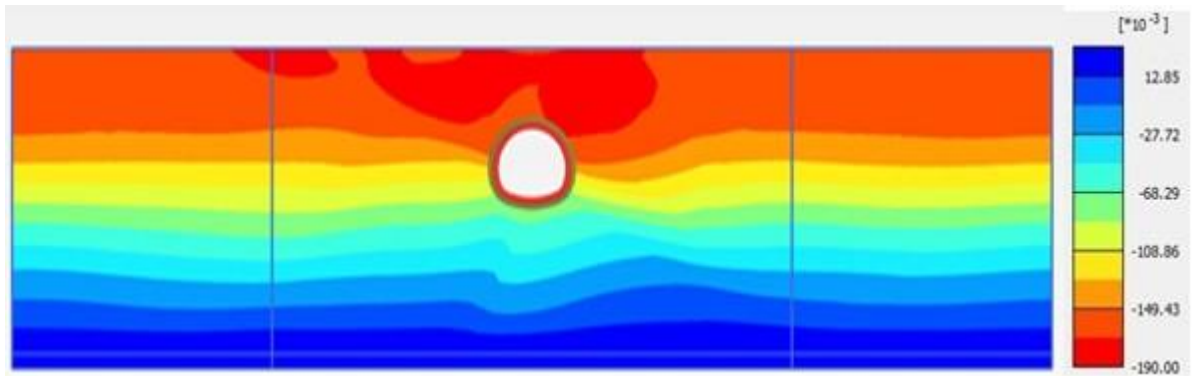
**EK 4.** Analizlerde kullanılan depremlerin ivme alan konturları.



**Şekil 0.13:** Coyote depremine ait FF modelinde ivme alan konturları.

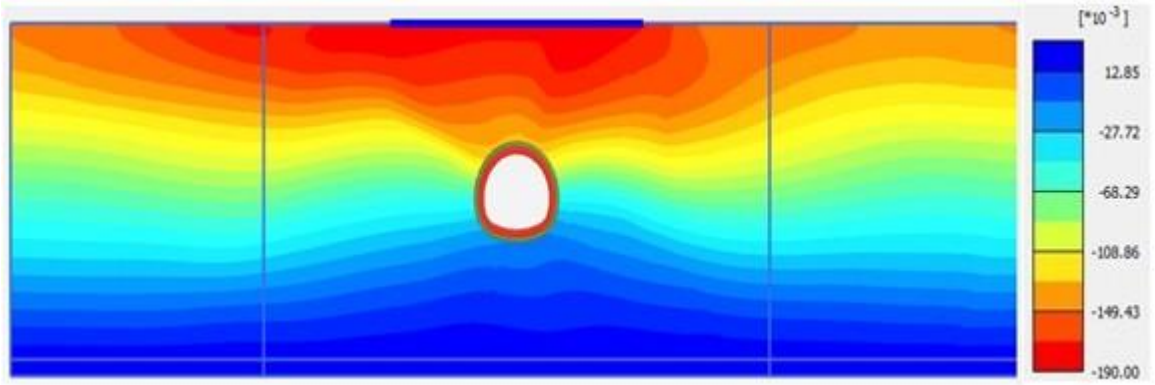


**Şekil 0.14:** Coyote depremine ait H=10m tünel derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları.

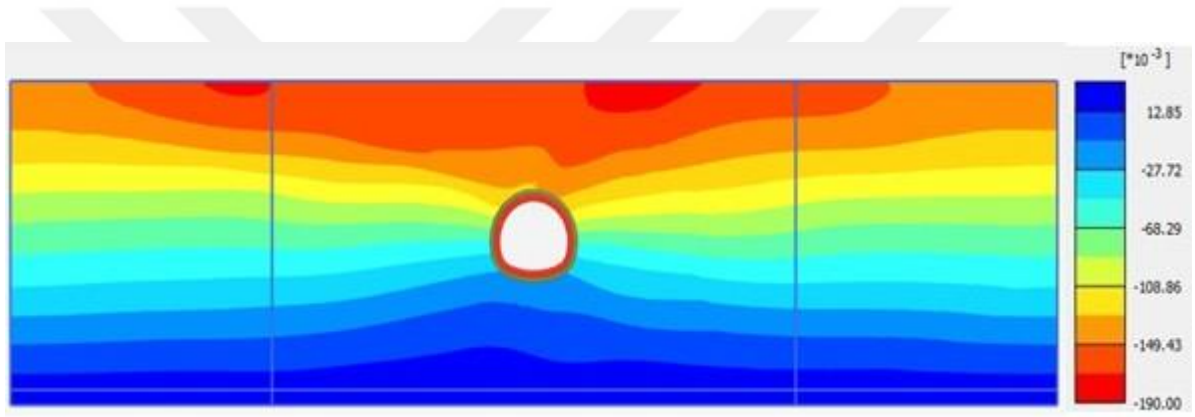


**Şekil 0.15:** Coyote depremine ait H=10m tünel derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları.

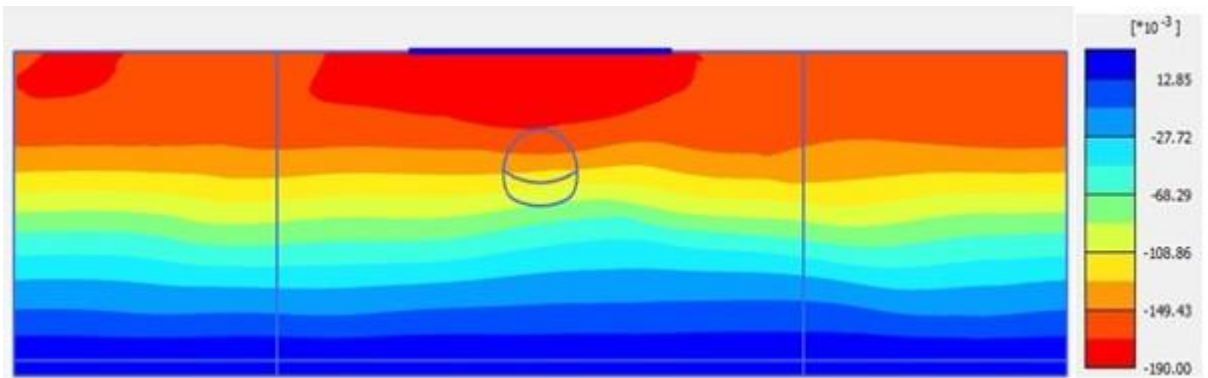




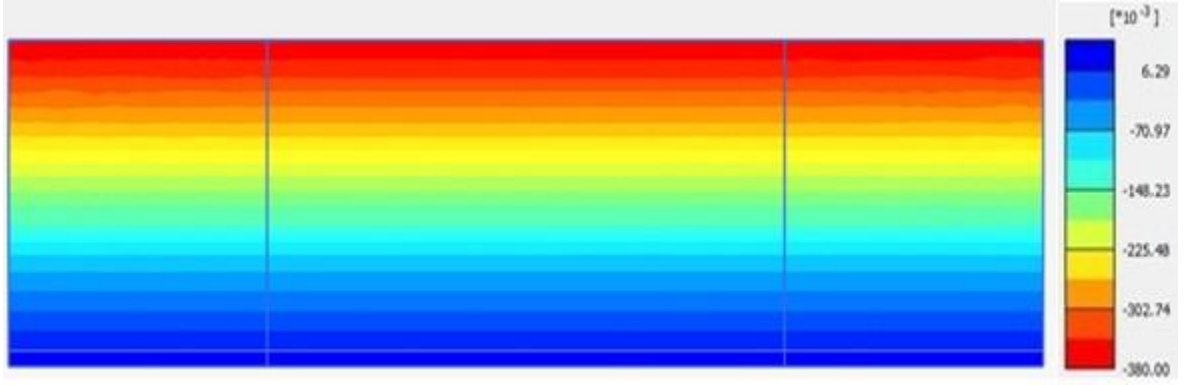
Şekil 0.16: Coyote depremine ait H=15m tünellerin derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları.



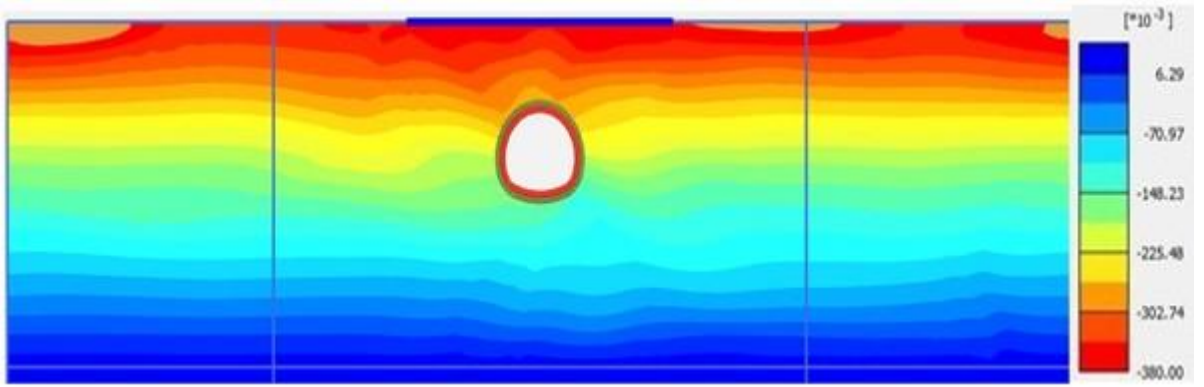
Şekil 0.17: Coyote depreminde H=15m tünellerin derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları.



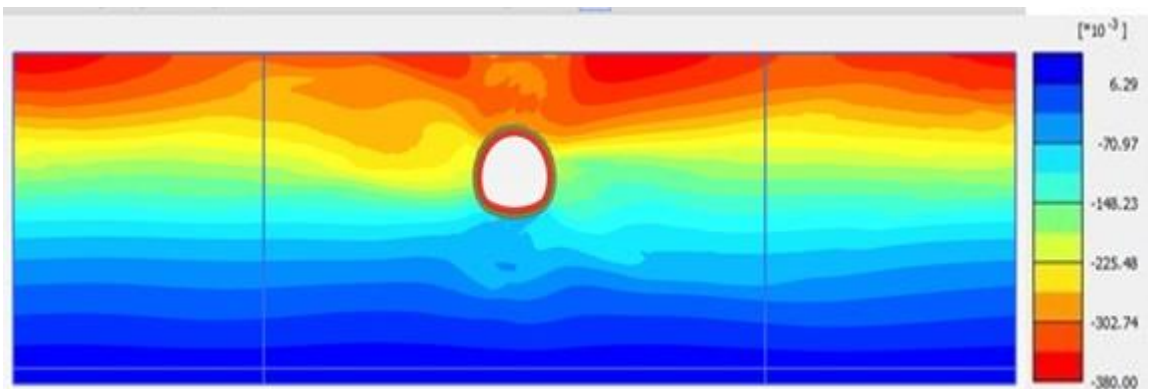
Şekil 0.18: Coyote depremine ait YZ modelinde ivme alan konturları.



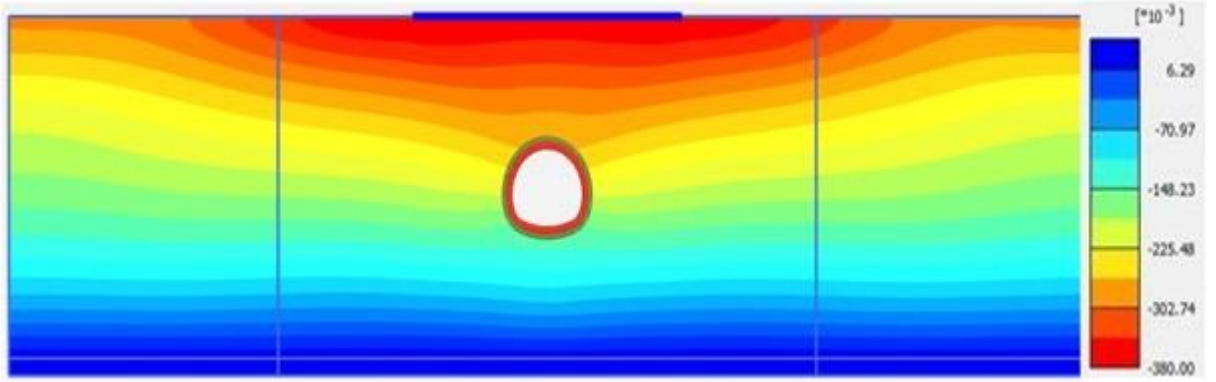
Şekil 0.19: Friuli depremine ait FF modelinde ivme alan konturları.



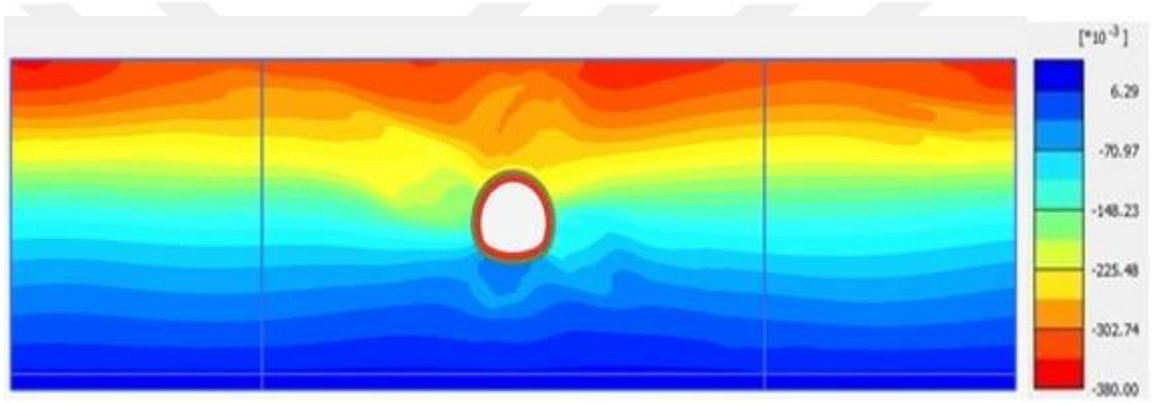
Şekil 0.20: Friuli depremine ait H=10m tünellerin derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları.



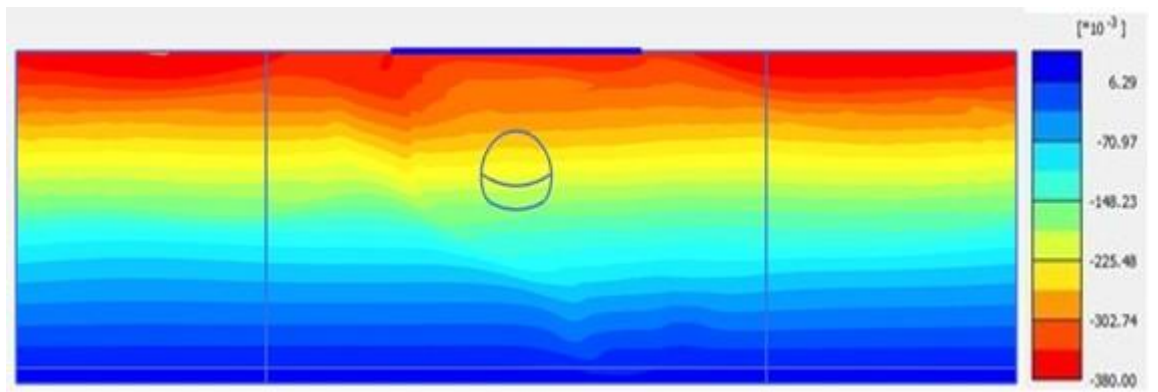
Şekil 0.21: Friuli depremine ait H=10m tünellerin derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları.



Şekil 0.22: Friuli depremine ait H=15m tünellerin derinliği ve TYZ modelinde ivme alan konturları.



Şekil 0.23: Friuli depreminde H=15m tünellerin derinliği ve TZ modelinde ivme alan konturları.



Şekil 0.24: Friuli depremine ait YZ modelinde ivme alan konturları.

## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Ozan SARIKAYA
Doğum Yeri	YUSUFELİ
Doğum Tarihi	01.01.1991
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	05388682830
E-Posta Adresi	oznsrky@buski.gov.tr
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	18.06.2013

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı