

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZEMİN KOŞULLARININ ÜSTYAPININ DİNAMİK
DAVRANIŞINA ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Nadir KARAHAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ

Ocak 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZEMİN KOŞULLARININ ÜSTYAPININ DİNAMİK
DAVRANIŞINA ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Nadir KARAHAN

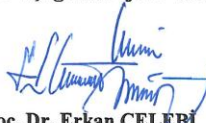
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 26/01/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Seyhan FIRAT
Jüri Başkanı



Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ
Üye



Doç. Dr. Naci ÇAĞLAR
Üye

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli bilgi, birikim ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarımı her aşamada izleyip değerlendirerek yön veren ve her türlü desteği sağlayan hocam sayın Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye minnet ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarım sırasında her aşamada beraber çalıştığım ve desteğini esirgemeyen araştırma görevlileri Fatih GÖKTEPE ve Osman KIRTEL'e teşekkürlerimi sunarım. Eğitim-öğretimim boyunca beni teşvik eden, maddi ve manevi hiçbir şeyi esirgemeyen sevgili anne ve babam Zehra-Osman KARAHAN'a ve kardeşlerime desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı.....	1
1.2. Konu ile İlgili Çalışmalar.....	2
1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı.....	6

BÖLÜM 2.

YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ İÇİN ÖNERİLEN SONLU ELEMAN MODELİ.....	8
2.1. Yapı-Zemin Etkileşim Problemlerinde Çözüm Yöntemleri.....	8
2.1.1. Altsistemlere ayırma yöntemi.....	8
2.1.2. Doğrudan çözüm yöntemi.....	9
2.2. Sonlu Bölgenin İdealleştirilmesi.....	10
2.3. Viskoz Sönümleyici Sınırlar.....	11
2.4. Rayleigh Sönümü.....	12
2.5. Zemin Malzeme Modelleri.....	13
2.5.1. Mohr-Coulomb malzeme modeli.....	13
2.5.1.1. Mohr-Coulomb malzeme modeli parametreleri.....	13

2.5.1.1.1. Elastisite modülü.....	13
2.5.1.1.2. Poisson oranı.....	14
2.5.1.1.3. Kohezyon.....	14
2.5.1.1.4. İçsel Sürtünme Açısı.....	15
2.5.1.1.5. Kabarma Açısı.....	15
2.5.2. Doğrusal elastik malzeme modeli.....	15
2.6. Dinamik Yük Kaynağı.....	15
2.7. Sonlu Eleman Analizinde Sayısal Doğruluk.....	19
2.7.1. Courant koşulunun sağlanması.....	22
2.7.2. Üstyapı modelinin idealleştirilmesi ve Plaxis programına uyarlanması.....	23
2.7.3. Problemin sonlu eleman formülasyonu.....	25
2.7.3.1. Mohr-Coulomb zemin modelinin sonlu eleman simülasyonuna uyarlanması.....	26
BÖLÜM 3.	
SAYISAL UYGULAMALAR.....	35
3.1. Modelin Kalibrasyonu.....	35
3.2. Matematik Modelin Kurulması.....	41
3.3. Loma Depremine Maruz Örnek Yapıların Sismik Tepkileri.....	44
3.4. Kocaeli Depremine Maruz Örnek Yapıların Sismik Tepkileri.....	60
3.5. Erzincan Depremine Maruz Örnek Yapıların Sismik Tepkileri.....	75
BÖLÜM 4.	
VAKA ANALİZİ.....	101
4.1. Loma Depremi Analiz Sonuçları.....	103
4.2. Kocaeli Depremi Analiz Sonuçları.....	106
4.3. Erzincan Depremi Analiz Sonuçları.....	110
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR.....	117

KAYNAKLAR.....	120
ÖZGEÇMİŞ.....	124

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

\mathbf{b}	: Cisim kuvvet vektörü
b	: Rijit eleman birim uzunluğu
\mathbf{B}	: Birim şekil değiştirme dönüşüm matrisi
α, β	: Malzeme sönümü
B, H	: Zemin boyutları
c	: Courant ölçütü
c	: Kohezyon
c_s	: Kayma dalgası yayılma hızı
c_1, c_2	: Elastik yarı sonsuz düzlemin sönüm sabitleri
\mathbf{C}	: Sönüm matrisi
$\tilde{\mathbf{C}}$: Özel sönüm matrisi
C^∞	: Radyasyon sönümü
\mathbf{D}	: Elastik bünye matrisi
\mathbf{D}^{ep}	: Elastik ötesi bünye matrisi
e	: Boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
E_0	: Başlangıç elastisite modülü
E_{50}	: Sekant elastisite modülü
ε	: Birim şekil değiştirme
ε_{ii}	: Hız değişim tensörünün simetrik bileşeni
f	: Frekans
f	: Akma fonksiyonu
F	: Kuvvet
g	: Plastik potansiyel fonksiyonu
G	: Zeminin kayma modülü
h	: Rijit eleman kalınlığı

I	: Atalet momenti
k	: Boyutsuz rijitlik katsayısı
K	: Rijitlik matrisi
K_t	: Elastik ötesi matris
K_0	: Toprak basınç katsayısı
L	: Değişim operatörü
M	: Kütle matrisi
N	: Enterpolasyon fonksiyonu
P	: Gerilme kuvvet matrisi
ρ	: Zeminin yoğunluğu
R_{inter}	: Arayüz dayanım azaltma faktörü
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
T	: Periyot
t	: Sınır kuvvet vektörü
t	: Zaman
u_x, u_y	: x ve y doğrultularındaki ötelenme yerdeğişirmeleri
\dot{u}_i	: İlgili doğrultudaki partikül hızı
\ddot{u}_i	: İlgili doğrultudaki ivme
ν	: Poisson oranı
V_p	: Basınç dalgası yayılma hızı
ω	: Yapının açısal frekansı
w	: Kat ağırlığı
YSA	: Yapay sinir ağları
YSS	: Yeraltı su seviyesi
YZE	: Yapı-zemin etkileşimi
ξ	: Sönüm oranı
ψ	: Kabarma açısı
λ	: Dalga boyu
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı
γ	: Birim hacim ağırlık

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Altsistemlere ayırma yönteminde kullanılan yapı-zemin sistemi..	9
Şekil 2.2.	Doğrudan çözüm yaklaşımında kullanılan yapı-zemin sistemi.....	10
Şekil 2.3.	Viskoz elemanlarla zemin sınırlarının idealleştirilmesi.....	12
Şekil 2.4.	E_0 ve E_{50} elastisite modüllerinin tanımlanması.....	14
Şekil 2.5.	Loma Prieta depremine ait ivme-zaman grafiği.....	16
Şekil 2.6.	Kocaeli depremine ait ivme-zaman grafiği.....	17
Şekil 2.7.	Erzincan depremine ait ivme-zaman grafiği.....	17
Şekil 2.8.	Loma Prieta depremi Fourier spektrumu.....	18
Şekil 2.9.	Kocaeli depremi Fourier spektrumu.....	18
Şekil 2.10.	Erzincan depremi Fourier spektrumu.....	18
Şekil 2.11.	Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli.....	21
Şekil 2.12.	Rijit eleman ve girdi parametreleri.....	23
Şekil 2.13.	Bina kat sayısına bağlı periyot değişiminin karşılaştırılması.....	25
Şekil 2.14.	Mohr-Coulomb kriterine bağlı elasto-plastik zemin modeli.....	27
Şekil 3.1.	Yapı-zemin etkileşim probleminde ayrıklaştırılan bölge.....	37
Şekil 3.2.	Kat kalıp planı.....	37
Şekil 3.3.	Ayrıklaştırılan zemin bölgesinin yatay sınırlarının belirlenmesi.....	40
Şekil 3.4.	Ayrıklaştırılan zemin bölgesinin derinliğinin belirlenmesi.....	40
Şekil 3.5.	Problemde ele alınan sayısal model.....	41
Şekil 3.6.	Loma depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğıştirmelerinin temel zemini durumuna göre değışimi (Bina yüksekliği, $H= 6$ m).....	45

Şekil 3.7.	Loma depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 15 m).....	48
Şekil 3.8.	Loma depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 30 m).....	50
Şekil 3.9.	Loma depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 60 m).....	53
Şekil 3.10.	Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin yapı-zemin etkileşim durumuna bağlı zaman geğmişi (Loma, H/D= 0.4).....	56
Şekil 3.11.	Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin yapı-zemin etkileşim durumuna bağlı zaman geğmişi (Loma, H/D= 4).....	57
Şekil 3.12.	Tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin bina narinlik oranına ve zemin özelliklerine bağlı değişimi (Loma Depremi).....	59
Şekil 3.13.	Kocaeli depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 6 m).....	61
Şekil 3.14.	Kocaeli depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 15 m).....	64
Şekil 3.15.	Kocaeli depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 30 m).....	66
Şekil 3.16.	Kocaeli depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 60 m).....	69
Şekil 3.17.	Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin yapı-zemin etkileşim durumuna bağlı zaman geğmişi (Kocaeli, H/D= 0.4).....	71
Şekil 3.18.	Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin yapı-zemin etkileşim durumuna bağlı zaman geğmişi (Kocaeli, H/D= 4).....	73
Şekil 3.19.	Tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin bina narinlik oranına ve zemin özelliklerine bağlı değişimi (Kocaeli Depremi).....	74

Şekil 3.20.	Erzincan depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 6 m).....	77
Şekil 3.21.	Erzincan depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 15 m).....	79
Şekil 3.22.	Erzincan depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 30 m).....	82
Şekil 3.23.	Erzincan depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 60 m).....	84
Şekil 3.24.	Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin yapı-zemin etkileşim durumuna bağlı zaman geğmişi (Erzincan, H/D= 0.4).....	87
Şekil 3.25.	Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin yapı-zemin etkileşim durumuna bağlı zaman geğmişi (Erzincan, H/D= 4).....	88
Şekil 3.26.	Tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin bina narinlik oranına ve zemin özelliklerine bağlı değişimi (Erzincan Depremi).....	90
Şekil 3.27.	Bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin farklı sismik yük kaynaklarına bağlı değişimi (H/D= 0.4).....	92
Şekil 3.28.	Bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin farklı sismik yük kaynaklarına bağlı değişimi (H/D= 1).....	93
Şekil 3.29.	Bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin farklı sismik yük kaynaklarına bağlı değişimi (H/D= 2).....	95
Şekil 3.30.	Bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin farklı sismik yük kaynaklarına bağlı değişimi (H/D= 4).....	97
Şekil 3.31.	Üstyapı tepe noktası yatay yerdeğiştirmelerinin farklı sismik yük kaynaklarına ve bina narinlik oranlarına bağlı değişimi.....	99
Şekil 4.1.	Giresun bölgesi bulduru haritası.....	101
Şekil 4.2.	Loma depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin Giresun zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, H= 30 m).....	103

Şekil 4.3.	Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin Giresun bölgeleri için yapı-zemin etkileşim durumuna bağlı zaman geçmişi (Loma, $H/D= 2$).....	105
Şekil 4.4.	Kocaeli depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin Giresun zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, $H= 30$ m).....	107
Şekil 4.5.	Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin Giresun bölgeleri için yapı-zemin etkileşim durumuna bağlı zaman geçmişi (Kocaeli, $H/D= 2$).....	109
Şekil 4.6.	Erzincan depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin Giresun zemini durumuna göre değişimi (Bina yüksekliği, $H= 30$ m).....	111
Şekil 4.7.	Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin Giresun bölgeleri için yapı-zemin etkileşim durumuna bağlı zaman geçmişi (Erzincan, $H/D= 2$).....	113
Şekil 4.8.	Bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin Giresun bölgeleri için farklı sismik yük kaynaklarına bağlı değişimi ($H/D= 2$).....	115

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Deprem kayıtları.....	16
Tablo 3.1.	Yang' 1997 zemin mekanik özellikleri.....	38
Tablo 3.2.	Modelin doğrulanmasında kullanılan üstyapının mekanik özellikleri.....	38
Tablo 3.3.	Maksimum yerdeğiştirme ve ivme değerleri (H= 50 m, Derinlik sabit).....	39
Tablo 3.4.	Maksimum yerdeğiştirme ve ivme değerleri (B= 250 m, Genişlik sabit).....	39
Tablo 3.5.	Üstyapının mekanik özellikleri.....	42
Tablo 3.6.	Gevşek zemin mekanik özellikleri.....	42
Tablo 3.7.	Orta sıkı zemin mekanik özellikleri.....	43
Tablo 3.8.	Sıkı zemin mekanik özellikleri.....	43
Tablo 4.1.	İnceleme alanındaki üstyapının mekanik özellikleri.....	102
Tablo 4.2.	Giresun 1. Bölgesine ait zemin mekanik özellikleri.....	102
Tablo 4.3.	Giresun 2. Bölgesine ait zemin mekanik özellikleri.....	102

ÖZET

Anahtar kelimeler: Yapı-zemin etkileşimi, Sonlu eleman analizi, Enerji yutucu sınırlar, Elasto-plastik davranış modeli

Bu çalışmanın amacı sismik yükler altında titreşen üstyapı- sonsuz zemin ortak sisteminin dinamik davranışını inceleyebilmek için bir matematik modeli tartışmaktır. Lokal zeminin doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini içeren bir dizi kapsamlı parametrik araştırmalar zaman tanım aralığında iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen sayısal model için ayrılaştırılan zemin bölgesinin geometrisi ve büyüklüğü kadar zeminin radyasyon sönümü, bina narinlik oranı ve yerel zemin şartları da önemli parametreler olarak dikkate alınmıştır. Geliştirilen modelde üstyapının oturduğu zeminin öngörülen mekanik davranışı düzlem şekil değiştirme koşulları altında elasto-plastik malzeme modeli ile benzeştirilmiştir. Farklı deprem yükleri altında etkileşen yapı-zemin ortak sisteminin yapısal davranışını değerlendirebilmek için sonlu eleman model üzerinde sistematik bir program akışı içerisinde çeşitli kontrol parametrelerine bağlı sayısal analizler gerçekleştirilerek inşaat mühendislerine bu tarz problemlerin çözümü gösterilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlardan, yapı-zemin etkileşiminin hesaba katılmasıyla farklı deprem yer hareketi ile titreşen çerçeve tipi çok katlı binaların dinamik davranışının önemli derecede değiştiği görülmüştür.

THE EFFECTS OF THE SOIL CONDITIONS ON THE STRUCTURAL RESPONSE

SUMMARY

Key Words: Soil-structure interaction, Finite element analysis, Absorbent boundaries, Elasto-plastic constitutive model

The objective of this paper discusses a mathematical model for analyzing of the seismic response of infinite soil-structure interaction (SSI) system. This investigation was achieved by a series of comprehensive parametric studies including the effects of realistic material properties of the local soil condition on the structural response via a two dimensional (2D) finite element method in the time domain. The slenderness ratio of the superstructure and the local soil conditions as well as the characteristics of input excitations are important parameters for the numerical simulation in this research. The mechanical behavior of the underlying soil medium considered in this prediction model is simulated by an undrained elasto-plastic model under plane-strain conditions. To show the solutions of this type of problems to civil engineers, comprehensive parametric analysis and systematic calculations are accomplished with different controlling parameters to evaluate the structural response of the vibrating soil-structure system under different seismic loads. The obtained numerically results show that the SSI effect alter significantly the dynamic response of the frame type multistory building excited by a real earthquake ground motion.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Dünyadaki doğal afetlerin en önemlisi sayılan depremler yeryüzünün her kesiminde yapmış olduğu olumsuz etkilerle karşımıza çıkmaktadır. Deprem yerkabuğunun bir titreşimi olduğu için yapıların mesnetlerinde zamana bağlı bir yer değiştirme hareketi doğurarak üstyapıda dinamik bir etki oluşturmaktadır. Ülkemiz topraklarının büyük bir kısmı deprem kuşağı içerisinde yer aldığından, üstyapıda oluşan bu titreşim hareketinin incelenmesi ve zemin özelliklerine göre uygun yapı sistemlerinin tasarımı inşaat mühendisliğinin önemli konularından birisini oluşturmaktadır. Dinamik dış yükler altındaki önemli yapı sistemlerinin davranışını daha iyi değerlendirebilmek ve bunun sonucunda tam güvenliğini sağlayabilmek için kullanılan sayısal çözüm yaklaşımlarının yaygın olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilen simülasyon uygulamaları günümüzde gittikçe önem kazanmaktadır. Bilgisayarların sağladığı hız ve etkinlik inşaat mühendisliğini gittikçe daha büyük ve karmaşık problemlerin çözümüne yöneltmektedir. Ayrıca çeşitli dış etkiler altında yapı davranışının gerçeğe daha yakın olarak izlenmek istenmesi durumunda, sistemde göz önüne alınan bilinmeyen sayısının artırılması ve bunun beraberinde getirdiği çeşitli güçlüklerin de aşılması gerekmektedir. Söz konusu nedenlerle artan işlem hacmine bağlı olarak, mevcut belleğin ekonomik kullanımı ve öngörülen doğruluk düzeyine mümkün olan en kısa sürede erişme isteği, bilgisayar teknolojisindeki tüm gelişmelere rağmen hala önemini korumaktadır.

Nükleer güç santralleri, çok katlı rijit yapılar, viyadükler ve barajlar gibi depreme karşı davranışlarının önemli olduğu bilinen rijit ve masif yapı sistemlerinin bazı durumlarda çok değişik özellikler taşıyan zeminler üzerinde kurulması zorunluluğu, üstyapı ile zemin arasındaki dinamik karşılıklı etki probleminin konusunu oluşturmaktadır. Yeryüzünde oluşan titreşimler ve deprem gibi yer hareketlerinden

dolayı, bu gibi yapıların zemin ile ne ölçüde etkileşime girdiğinin, analiz ve tasarım aşamasında gerçekçi bir şekilde hesaplanıp yapıların dinamik yüklere ve sismik dalgalara karşı emniyetli bir şekilde tasarlanması ve inşa edilmeleri bir zorunluluk olarak ortaya çıkmıştır.

Bir bölgedeki yapı davranışının ayrıntılı değerlendirilmesinde, yapı-zemin ortak sisteminin dinamik özelliklerinin iyi anlaşılması gerekir. Yumuşak zemin tabakaları üzerindeki yapıların deprem etkisindeki davranışları yapı-zemin etkileşimi probleminin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu durumda yapı-zemin etkileşiminin önemli ölçüde dikkate alınması gerekir. Bu tür yapıların deprem hesabında, zemin ortamının şekil değiştiren ve yapının davranışına eylemsizlik yönünden etkide bulunan dinamik bir sistem olarak ele alınması gerekmektedir.

1.2. Konu ile İlgili Çalışmalar

Literatürde yapı-zemin problemlerinin incelenmesinde farklı çözüm yöntemlerine dayalı birçok araştırma yapılmıştır. Çelebi ve Gündüz [1] çok katlı bir yapının yarı sonsuz bir ortamda deprem etkisindeki davranışını incelemiş ve en uygun sonucu elde etmek için farklı modeller kurmuştur. Kurulan modellerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında büyük bir zemin bölgesi ayrıştırılmıştır. İkinci aşamada, zeminin yatay uzanımını dik kesen düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmeler kısıtlanarak zemin modellenmiştir. Son olarak ise yatay sınırlar eşdeğer statik yaylar ve sönümleyiciler (viskoz sınır şartları) kullanılarak zemin bölgesi modellenmiştir. Yapılan bu modellerde periyot ve taban kesme kuvveti hesaplanmıştır. Sonuç olarak çok büyük bir zemin bölgesi alınarak kurulan model ile sönümleyiciler ve yaylar kullanılarak yapılan modelden elde edilen değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

Pala [2], çalışmasında Yapay Sinir Ağları (YSA) ile yapı-zemin etkileşimini incelemiştir. YSA modelini kullanarak yapı davranışı üzerindeki farklı zemin özellikleri ve yerel zemin kalınlıklarının etkisini araştırmıştır. Zemin özellikleri, yerel zemin kalınlığı ve bina kat sayılarını değişken kullanarak analizler yapmış ve binaların son kat yatay yer değiştirme, ivme ve periyot değerlerinin değişimini

incelemiştir. YSA kullanılarak yapı-zemin ortak sistemlerin sismik analizlerinde çözüm süresinin oldukça kısaldığını ve YSA'nın yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümünde çok iyi bir performans gösterdiğini vurgulamıştır.

Lysmer ve Kuhlemeyer [3], çalışmalarında viskoz sınır şartları adını verdikleri bir yapay sınır modeli geliştirerek, yapı-zemin sisteminin dinamik analizlerinde kaynaktan saçılan dalgaların yapay sınırlara çarparak bir kısmının tekrar ortama yansımaları engellemişlerdir, bu da yansımadan doğan hataları ortadan kaldırmıştır.

Kutunis [4], çalışmasında yapı-zemin ortak sistemini, birbirlerini etkileşim arakesiti ile ayıran yakın ve uzak bölgeye ayırmıştır. Yakın zemin bölgesi sonlu elemanlar tekniği ile modellenirken, uzak zemin bölgesinin doğrusal elastik davranış gösterdiği varsayılarak, bu ortam etkileşim arakesitinde yer alan düğüm noktaları serbestlik derecelerinde, birim darbe yükü davranışı olarak modellenmiştir. Uzak zemin bölgesinin birim darbe yükü davranış matrisleri, sonsuz küçük hücreli sonlu elemanlar kullanılarak elde edilmiştir. Geliştirilen bu yöntemlere bağlı sayısal çözümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda; zemin ortamının ve üstyapının dinamik özelliklerine bağlı olmaları yanında, dikkate alınan depremin gelişigüzel karakterine ve özellikle frekans içeriğine bağlı olarak da değişkenlik gösterdiği; yumuşak zeminler üzerinde inşa edilen kısa periyotlu yapılarda rölatif yapı yerdeğiştirmesi ve toplam taban kesme kuvvetlerinin, rijit zemin varsayımına dayanan yöntemlerle hesaplanan değerlerin üstünde kaldığı; zemin kayma dalgası hızı arttıkça yapı-zemin etkileşiminin üstyapı için yararlı hale geldiği vurgulanmıştır.

Aydinoğlu [5] doğrudan çözüm yaklaşımında, zemin ortamının da üstyapı taşıyıcı sistem gibi sonlu eleman yöntemi ile ayrıklaştırılmasını ve oluşturulan yapı-zemin ortak sisteminin, tanımlanan statik veya dinamik dış etkiler altında doğrudan analizini öngörür. Altsistem Yaklaşımında ise yapı ve zemin iki ayrı sistem olarak düşünülür ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan denge denklemleri, daha sonra yapı-zemin arakesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilir. Bu durumda zemin ortamı sadece yapı-zemin arakesitinde, sınırlı sayıdaki ayrık düğüm noktalarında temsil edilen bir alt sistem olarak idealleştirilir [6].

Xilin v.d. [7] çalışmalarında, Ansys programını kullanarak, çok katlı bir yapının yapı-zemin dinamik etkileşimini de hesaba katarak, zaman tanım alanında üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayalı çözümünü, etkin sistem parametrelerine bağlı olarak gerçekleştirmiştir. Yapılan bu modellerde periyot, ivme ve yerdeğiştirme değerleri hesaplanmış ve farklı zemin türlerinde bu sonuçların önemli derecede değişiklikler gösterdiği ve yapı-zemin etkileşiminin değişen deprem kayıtlarıyla birlikte sistemde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Gouasmia ve Djeghaba [8] yapı-zemin dinamik etkileşimini dikkate alarak çok katlı bir yapının deprem etkisi üzerindeki farklı zemin özellikleri ve yerel zemin kalınlıklarına bağlı etkilerini araştırmışlardır. Zemin özellikleri ve yerel zemin kalınlığını değişken kullanarak analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlardan, kayma dalga hızı düşük gevşek zemin durumunda ve zemin tabaka derinliğinin artışıyla birlikte yapı tepkisinin büyüdüğünü ve doğal periyotların uzadığını vurgulamışlardır. Gouasmia ve Djeghaba [9], daha sonraki çalışmalarında ise gevşek zemin tabakasının üzerinde olan çok katlı yapı ve yapı gruplarının ortak dinamik tepkilerini karşılaştırmış ve beş bina durumundaki yapı gruplarının dinamik tepkisinin daha fazla olduğuna dikkat çekmiştir.

Iida [10] çalışmasında, 1985 Mexico City depremi ile Lakebed bölgesinde, özellikle orta yükseklikteki binaların ağır hasar görme nedenini araştırmıştır. Bu amaçla, farklı kat yüksekliklerindeki binaları ele alarak, üç boyutlu doğrusal olmayan, yapı-zemin dinamik etkileşimi analizini sonlu elemanlar tekniği ile yapmıştır. Yazar analizlerde yapıları, hem ankastre mesnetli hem de yapı-zemin etkileşimini göz önünde bulundurarak doğrusal ve doğrusal olmayan durumlar için farklı kategorilerde incelemiştir. Sonuç olarak etkileşimin, dikkate alınmadığı durumların binalardaki hasar sebeplerini açıklamakta yetersiz kaldığı anlaşılmıştır.

Kim vd. [11], zaman tanım alanında iki boyutlu yapı-zemin dinamik etkileşimi analiz çalışmalarında, doğrudan çözüm yaklaşım metodunu kullanarak, sonlu elemanlar yöntemiyle uzak zemin bölgesini frekansa bağımlı elemanlarla modellemiştir.

Wolf ve Oberhuber [12], zaman tanım alanında, doğrusal olmayan yapı-zemin etkileşimini, zeminin rijitlik fonksiyonlarını kullanarak yüzeysel temeller için irdelenmiştir.

Wolf ve Song [13] çalışmalarında, yapı-zemin etkileşim problemlerine uygulanan sonsuz küçük hücreli sonlu elemanlar metodunu ileri sürmüşlerdir.

Halabian ve Naggar [14] tarafından yapılan bir çalışmada ise yapı ve zeminin doğrusal davranmadığı kabul edilerek, yüksek narin yapıların dinamik davranışları üzerinde yapı-zemin etkileşiminin etkileri araştırılmıştır.

Medina ve Taylor [15] çalışmalarında, yapı ve yakınındaki zemin bölgesini sonlu elemanlarla, uzaktaki zemin bölgesini ise sonsuz elemanlarla modelleyerek hem statik hem de dinamik yükler altında zemin yapı etkileşimini dikkate alan analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada statik ve dinamik yükler için sonsuz eleman modelleri önerilmekte ve elastik zemin üzerine oturan, ortasından düşey yüklü dairesel rijit plak örneği üzerinde modelin doğruluğu kontrol edilmektedir.

Viladkar v.d [16] ise doğrusal olmayan davranış gösteren zemin üzerine oturan düzlem çerçeve sistemlerin analizini yapmışlardır. Çalışmada düzlem çerçeve izoparametrik çubuk elemanlarla, sonlu zemin bölgesi izoparametrik düzlem elemanlarla, sonlu zemin bölgesinin sınırları ise sonsuz elemanlar kullanılarak modellenmiştir.

Choi v.d [17] çalışmasında ise büyük ölçekli bir model yapının deprem yükleri altındaki dinamik davranışını incelemektedir. Analiz aksel simetrik durum için sonlu elemanlar ile sonsuz elemanların birlikte kullanılması esasına dayanan bir bilgisayar programıyla yapılmıştır. Zeminin doğrusal olmayan davranışı ise iteratif eşdeğer doğrusallaştırma adı verilen bir teknikte göz önünde bulundurulmuştur.

Israil ve Banerjee [18] ise çalışmalarında üç boyutlu yapı zemin sistemlerinin dinamik davranışı üzerinde malzeme özelliklerinin etkisini sonlu ve sınır elemanları birlikte kullanarak ele almışlardır.

Bernal ve Youssef [19], dinamik zemin yapı etkileşimi problemlerinin çözümünde frekans ve zaman tanım alanında çözüm tekniklerini birleştiren alternatif bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada üst yapının doğrusal olmayan davranış gösterdiği kabul edilerek, problem zaman tanım alanında çözülmüş, zemin ortamı ise frekansa bağımlı yay ve sönüm sistemi ile temsil edilmiştir. Ayrıca bu yöntemin diğer yöntemlere göre daha hızlı çözüme gittiği belirtilmektedir.

Mylonakis vd. [20] deprem yüklerine maruz köprü ayaklarının zeminle etkileşimini empedans fonksiyonlarına bağlı incelemişlerdir.

Xuezhang ve Nobuo [21], tekil temellerde temel tipi ve şeklinin dinamik yapı-zemin etkileşimine etkisini, ince katmanlı eleman metodu ve esnek hacimli altyapı metodunu kullanarak incelemişlerdir.

Avilés ve Pérez-Rocha [22] çalışmalarında, dinamik yükler altında temel gömme derinliğinin yapı zemin sisteminin davranışı, yapının hâkim periyodu ve sönümü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sayısal çözüm homojen, elastik yarı sonsuz zemine gömülü tek katlı yapıdan oluşan sistem üzerinde gösterilmiştir.

1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı sismik yükler altında titreşen üstyapı-sonsuz zemin ortak sisteminin dinamik davranışını inceleyebilmek için bir matematik modeli tartışmaktır. Lokal zeminin doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini içeren bir dizi kapsamlı parametrik araştırmalar zaman tanım aralığında iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen sayısal model için ayrıklaştırılan zemin bölgesinin geometrisi ve büyüklüğü kadar zeminin radyasyon sönümünü de önemli parametreler olarak dikkate alınmıştır. Zemin bölgesinin modellenmesinde yatay sınırlar radyasyon sönümü dikkate alınarak eşdeğer yaylar ve sönümleyicilerle modellenmiştir. Geliştirilen modelde üstyapının oturduğu zeminin öngörülen mekanik davranışı düzlem şekil değiştirme koşulları altında elasto-plastik malzeme modeli ile

benzeştirilmiştir. Deprem yükleri altında etkileşen yapı-zemin ortak sisteminin yapısal davranışını değerlendirebilmek için sonlu eleman model üzerinde sistematik bir program akışı içerisinde çeşitli kontrol parametrelerine bağlı sayısal analizler gerçekleştirilerek inşaat mühendislerine bu tarz problemlerin çözümü gösterilmeye çalışılmıştır.

Sayısal uygulamalarda deprem yükünün simülasyonu ile birlikte değerlendirilen üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D [23] bilgisayar programından yararlanılmıştır. İlk aşamada sonsuza uzanan zemin bölgesinin analizlerde öngörülen optimum boyutlarını belirlemek için araştırmalar yapılmış ve daha sonra modeller için uygun bir sonlu eleman boyutu ve geometrisi belirlenmiştir. Geliştirilen matematik modelde zeminin öngörülen mekanik davranışı Mohr-Coulomb akma kriteri varsayımı altında elasto-plastik ve doğrusal elastik olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca yapı-zemin ortak sisteminin üstyapının zemine rijit bağlı olduğu durumlardaki analizleri, yapının sismik davranışını daha iyi değerlendirebilmek için zemin parametrelerini probleme dahil etmeyen ve yapının temelini ankastre mesnetlerle oluşturan SAP2000 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dinamik davranışı belirleyen etkin sistem parametreleri olarak zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini yani rijitliğini ifade eden c_s kayma dalga hızı ($c_s=90, 270, 1000$ m/sn) ve farklı özellikte yer hareketleri (1989 Loma Prieta, 1999 Kocaeli, 1992 Erzincan) kullanılmıştır. Başlangıçta basık yapılar için yürütülen bu çalışma daha sonra yukarıda verilen kontrol parametrelerine bağlı olarak farklı narinlik oranlarına sahip yapı örnekleri için devam ettirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise lokal zeminin doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini farklı sismik yükler altında değerlendirebilmek için Giresun' da Merkez Aksu Mahallesiinde iki farklı bölge üzerinde yer alan yapılar incelenmiştir. İncelenen bölgelere ait yerel zemin koşulları, sismik arazi deneyleri ve sondajlardan alınan numunelere göre belirlenmiştir.

Yapı-zemin dinamik etkileşiminin hesaba katılmasıyla deprem yer hareketi ile titreşen çerçeve tipi çok katlı binaların farklı parametrelere bağlı dinamik davranışı araştırılmış ve elde edilen sayısal sonuçlar incelenip grafikler halinde sunulmuştur.

BÖLÜM 2. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ İÇİN ÖNERİLEN SONLU ELEMAN MODELİ

Yer hareketi etkisi altındaki sistemler incelenirken genellikle yapının oturduğu zeminin şekil değiştirmeyen, rijit bir ortam olduğu kabul edilmekte, bunun sonucu olarak yapı ise temelinden zemine ankastre bağlı bir sistem, sisteme etki eden yer hareketi de yapının varlığından etkilenmeyen yatay, rijit bir öteleme olarak göz önüne alınmaktadır. Ancak bu varsayım, zemin yapı etkileşiminin ihmal edilebilir seviyede olduğu durumlar için geçerlidir. Gerçekte ise zeminin şekil değiştiren ve yapının davranışına etki eden dinamik bir sistem olarak ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle gerçek davranışın göz önüne alınabilmesi için zemin bölgesi de yapısal sistemin bir parçası olarak tanımlanmalı ve yapıyla beraber analiz edilmelidir.

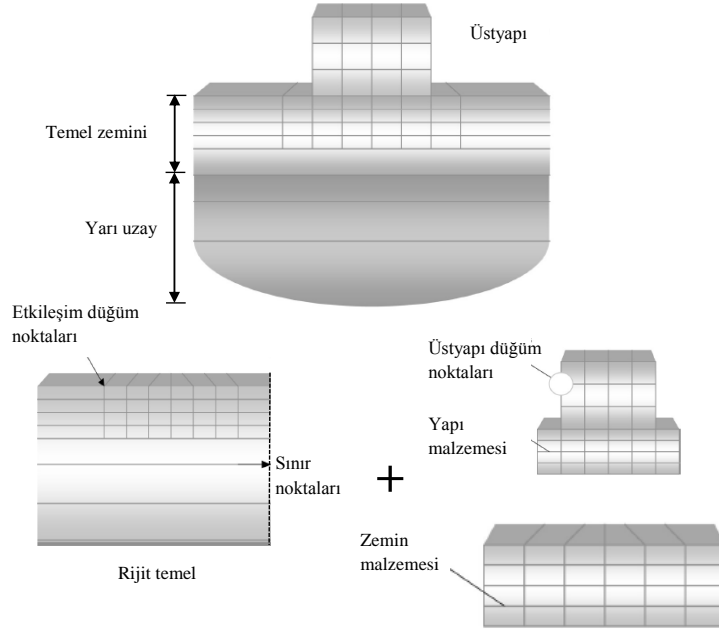
2.1. Yapı-Zemin Etkileşim Problemlerinde Çözüm Yöntemleri

Yapı-zemin problemlerinin çözümünde, sonlu elemanlar yöntemi oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile homojen ve/veya homojen olmayan ortamlar için doğrusal ve doğrusal olmayan problemler ele alınabilmektedir. Sayısal çözüm yöntemlerinin kullanılmaya başlanmasıyla birlikte yapılan çalışmalarda yapı-zemin ortak sistemi genel olarak ya alt yapıya ayırma yöntemi ile ya da doğrudan çözüm yöntemi ile analiz edilmektedir.

2.1.1. Altsistemlere ayırma yöntemi

Altsistemlere ayırma yöntemi üstyapı ve zemin ortamı olmak üzere iki ayrı sistem olarak ele alınır ve bu iki sistem için ayrı ayrı denge denklemleri yazılır. Daha sonra yazılan bu denge denklemleri üstyapı-zemin arakesitinde geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilir. Böylece zemin ortamı sadece yapı-

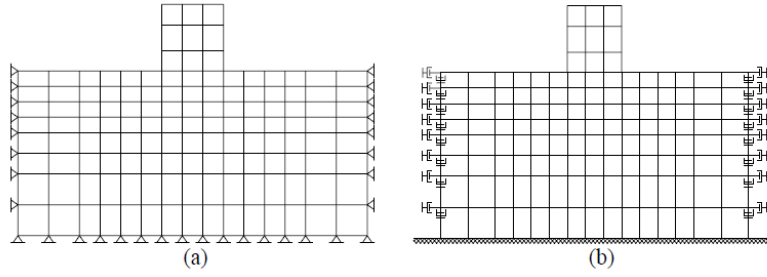
zemin ara yüzünde, sınırlı sayıda ayırık düğüm noktalarında temsil edilen bir altsistem olarak idealleştirilmiş olur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Altsistemlere ayırma yönteminde kullanılan yapı-zemin sistemi

2.1.2. Doğrudan çözüm yöntemi

Bu yöntemde, zemin ortamı yapı sistemi gibi ayrıklaştırılır ve oluşturulan yapı-zemin modeli statik veya dinamik etkiler altında doğrudan çözüme dahil edilir. Burada statik ve dinamik etki durumlarında zemin ortamının sınırlarının belirlenmesinde farklılıklar vardır. Statik durumda zemin ortamının sınırları, yerdeğiştirmelerin yeteri kadar küçüldüğü düğüm noktalarıyla tanımlanır. Bu düğüm noktalarına basit mesnet konulması ile zemin ortamı idealleştirilmiş olur (Şekil 2.2a). Dinamik durumda ise radyasyon sönümü nedeni ile zemin ortamı ne kadar büyütülürse büyütülsün, sınırlar basit mesnetli olarak tanımlanamaz. Bu nedenle modellemede radyasyon koşulunu sağlayan mesnetlerin kullanılması gerekmektedir (Şekil 2.2b). Geçirgen sınırlar olarak adlandırılan bu tür mesnetler, sonlu elemanlarla modellenen zemin bölgesinden dışa doğru yayılan dalgaların içeri doğru yansıtılıp yutulmasını sağlar [5].



Şekil 2.2. Doğrudan çözüm yaklaşımında kullanılan yapı-zemin sistemi

2.2. Sonlu Bölgenin İdealleştirilmesi

Üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için sonsuz zemin bölgesinin ayrıklaştırılmasında nümerik çözüm yöntemi olarak üç gerilme noktasına sahip altı nodlu üçgen şeklinde sonlu eleman tipi kullanılmıştır. Her bir düğüm noktasında düzlemin farklı doğrultuları için iki ötelenme serbestlik derecesi (u_x ve u_y) bilinmeyen olarak tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı zemin bölgesinin idealleştirilmesinde bazı temel unsurlar önem kazanmaktadır. Elde edilen sonuçların gerçeğe yakın sonuçlar vermesi için zemin bölgesinin sınır kesim yüzeylerinin üstyapıdan yeterince uygun mesafede seçilmesi gerekmekte ve kesim sınırlarının özel sınır şartları ile dalga geçirimsizliğini sağlayacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Bu çalışmada sınırsız ortam olarak kabul edilen zemin sonlu serbestlik dereceli ayrık bir sisteme dönüştürülerek modellenmesi uygun sınır şartlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Dalga yayılım probleminin sonlu eleman simülasyonu için yük kaynağından uzak bölgelere iletilen dalgaları model sınırlarında serbest bırakmak ve yayılan enerjiyi bu kesim noktalarında tüketmek için yapay sınırlara ihtiyaç duyulmaktadır. Eğer ayrıklaştırılan bölgenin sınırları yeterli derecede uzakta seçilmemişse, bölgenin kesim noktalarında geçirgen (soğurgan) sınırlar kullanılsa bile, tam geçirimsizlik sağlanamadığından dolayı uzaklaşan ve yansıyan dalgaların çakışmasından analiz sonuçlarında beklenmedik sayısal belirsizlikler ortaya çıkabilmektedir. Bu yakın sınırlarla hapsedilen ortamdaki dalgaların karmaşık bir şekilde saçılması nedeniyle sonsuza uzanan bölgelerdeki gerçek dalga yayılma hareketi tam idealize edilmediği için doğruluk düzeyi tartışılır sonuçlar elde edilmektedir. Yapılan araştırmalarda bu

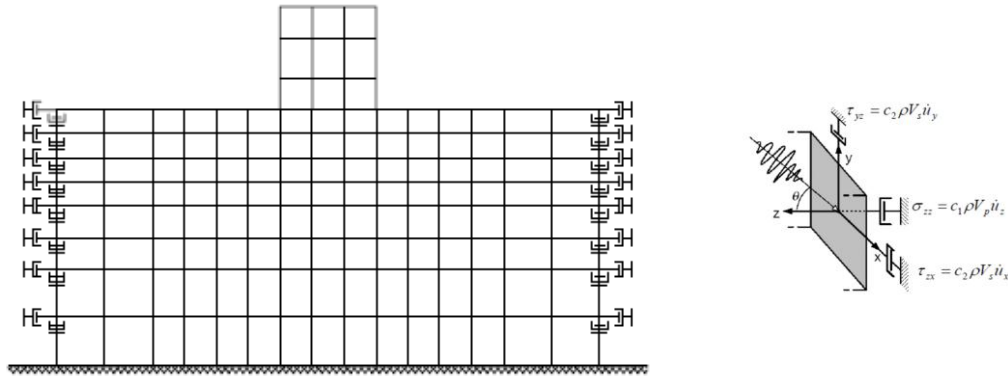
sınır yerlerinin üstyapıdan en az temel taban genişliğinin 8–10 katı kadar uzakta olacak şekilde düzenlenmesi gerektiği önerilmektedir [24]. Çünkü aksi takdirde gerilme dalgalarının sınırlardan yansıyor tekrar problemin ele alındığı bölgeye geri dönmesi sonucunda sayısal sonuçların hassasiyetinin bozulmasına yol açacaktır. Yapılan bu çalışmada yansımaların etkisini yok etmek için yapay sönümleyiciler yapının sağ ve sol tarafından 119 m sınırlara uzakta olacak şekilde yerleştirilmesiyle özel önlem alınmıştır.

2.3. Viskoz Sönümleyici Sınırlar

Bu çalışmada sistemden dışarıya doğru yayılan ve zeminin sonsuzluğu nedeni ile zemin ortamında kaybolan enerjiyi tanımlamak için bölgenin sınırlarında eşdeğer anlamda kullanılan, radyasyon sönümü adı verilen ve malzeme sönümü ile ilgisi bulunmayan bir sönüm mekanizması kullanılmıştır.

Eşdeğer viskoz sönümleyiciler tarafından sınırlarda soğurulan normal ve kayma gerilmeleri Şekil 2.3' teki bağıntılarda verilmiştir. Burada V_p ve V_s sırasıyla basınç ve kayma dalgası yayılma hızlarını, \dot{u}_i ($i = x, y$ ve z) ilgili doğrultulardaki partikül hızlarını göstermektedir. Birim hacmin kütlesi ρ ile verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan sınır şartlarının soğurulma karakteristikleri dalgaların frekansına bağlı olmadığı için bu yapay sınırlar hem harmonik hem de harmonik olmayan dalgaları sönümleyebilmektedir. Sınırlarda enerjinin tam anlamıyla tüketilebilmesi dalgaların gelme açısına bağlıdır. Viskoz sönümleyicinin soğurgan etkisini düzenlemek için boyutsuz iyileştirme katsayıları (c_1 ve c_2) kullanılmaktadır. Mühendisliğin pratik uygulamalar açısından gelen dalgalarının sınırlara dik veya küçük açıyla ($\theta \leq 30$) etkidiği varsayıldığından bu katsayılar birim değerinde hesaplara katılmaktadır [23].

Viskoz sınır şartlarının kullanılması durumunda zemin bölgesi uygun sonlu elemanlara bölünmeli ve zemin kesim bölgesi de yapıdan yeteri kadar uzaklıkta seçilmelidir (Şekil 2.3). Aynı zamanda düzlem dalga yayılışının izotrop ve lineer elastik bir ortamda gerçekleşmesi gerekmektedir.



Şekil 2.3. Viskoz elemanlarla zemin sınırlarının idealleştirilmesi

2.4. Rayleigh Sönümü

Sönüm, yapısal anlamda göz önüne alınan sistemlerin dinamik davranışının şeklini ve genliğini önemli derecede etkilemektedir. Viskoz etkilerden dolayı fiziksel sönüm Rayleigh sönümü ile dikkate alınmaktadır. Sonlu elemanlar yaklaşımında Rayleigh sönümü, sistemin kütle ve rijitlik matrisleri içerisindeki sönüm etkilerini bir araya toplayan en uygun sönüm ölçütlerinden birini oluşturmaktadır:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2.1)$$

$$\xi_i = \frac{\alpha + \beta \omega_i^2}{2\omega_i} \quad (2.2)$$

Sistemin malzeme sönümünde α oranı sabiti kütlelerin katkısını gösterirken, β sabiti rijitliğin sönümdeki etkisini belirlemektedir. Burada α ne kadar büyürse, küçük frekanslı genlikler o kadar çok sönümlenirken, büyük frekanslı genlikler ise β parametresiyle orantılı olarak azalmaktadır. Model sınırlarında geometrik sönümün hesaba katıldığı iki boyutlu sonlu eleman analizleri için Rayleigh sönüm değerini çözümün kararlılığını bozacak kadar küçültmemek gerekir. Pratik uygulamalar açısından Rayleigh sönümünün rijitlikle orantılı sabiti yaygın olarak analizlerde kullanılmaktadır. Kütleyle orantılı bir sönüm parametresi zeminlerde tanımlanmamışken, sonlu eleman hesaplarında rijitlikle orantılı sönüm sabiti birçok zemin türü için dikkate alınabilmektedir. Bu çalışmada, Rayleigh oranı sabitleri $\alpha=0.01$ ve $\beta=0.01$ alınarak yapısal çözümler gerçekleştirilmiştir.

2.5. Zemin Malzeme Modelleri

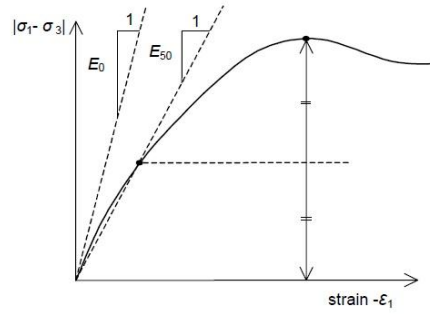
2.5.1. Mohr-Coulomb malzeme modeli

Zeminler, uygulanan yüklerden dolayı doğrusal olmayan bir gerilme-deformasyon davranışı sergilemektedir. Doğrusal olmayan gerilme-deformasyon davranışı kullanılan malzeme modeline bağlı olarak farklı şekillerde modellenmektedir. Kullanılan malzeme modeli için gerekli olan parametre sayısının artması davranışın modellenmesindeki gerçekliliği arttırmaktadır. Malzeme modelleri ile ilgili olarak literatürde yapılmış olan çalışmalar sonucunda birçok araştırmacı, Mohr-Coulomb gibi izotropik modellerin kullanılmasının yeterli doğrulukta sonuçlar verdiğini ve zemin davranış modeli olarak bu malzeme modelinin kullanılmasının uygun olacağını vurgulamışlardır [25-28].

2.5.1.1. Mohr-Coulomb malzeme modeli parametreleri

2.5.1.1.1. Elastisite modülü (E)

Mohr-Coulomb malzeme modelinde iki farklı elastisite modülü yaklaşımı bulunmaktadır. Bunlardan ilki; üç eksenli deney sonucu elde edilen gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıç eğiminden hesaplanan ve E_0 ile gösterilen başlangıç elastisite modülü değeri ise deviatorik gerilme $|\sigma_1 - \sigma_3|$ ' ün maksimum değerinin %50 si gerilme değerine karşılık elde edilen ve E_{50} ile gösterilen sekant elastisite modülüdür (Şekil 2.4). Çok aşırı konsolide kil zeminler ve bazı kayalarda elastik davranış aralığı büyük olduğundan dolayı E_0 ' ın kullanılması daha gerçekçi olacaktır. Buna karşılık; kum zeminler ve normal konsolide kil zeminlerde yüklemenin başlamasının hemen ardından doğrusal olmayan bir gerilme-deformasyon ilişkisi gözlenmektedir. Bu nedenle; bu tip zeminler için elastisite modülü değeri olarak E_{50} ' nin kullanılması daha doğru olacaktır.



Şekil 2.4. E_0 ve E_{50} elastisite modüllerinin tanımlanması

2.5.1.1.2. Poisson oranı (ν)

Poisson oranı, Mohr-Coulomb gibi elasto-plastik davranışı temsil eden bir zemin modeli kullanılırken, yatay efektif gerilmenin düşey efektif gerilmeye oranını ifade eden toprak basınç katsayısına (K_0) bağlı olarak hesaplanır. Mohr-Coulomb malzeme modeli, tek boyutlu sıkışma problemleri için $K_0 = \nu / (1 - \nu)$ eşitliğini kullanmaktadır. Dolayısı ile K_0 katsayısının değerinden hareketle K_0 katsayısı ile eşleşen poisson oranı değeri tanımlanmaktadır. Başlangıç gerilme durumunun K_0 Procedure seçeneğine göre oluşturulması durumunda ise poisson oranının değeri tasarımcı tarafından belirlenmektedir. Birçok durumda poisson oranı 0.3 ile 0.4 aralığında değerler alırken kum zeminler için poisson oranı, genellikle, 0.2 ile 0.4 aralığında bir değer almaktadır [29].

2.5.1.1.3. Kohezyon (c)

Kohezyon, zemin (özellikle ince taneli zemin) tanelerinin birbirini çekmesini ve yapışmasını yansıtan parametre olarak tanımlanmaktadır.

2.5.1.1.4. İçsel sürtünme açısı (ϕ)

İçsel sürtünme açısı, genellikle, Mohr gerilme daireleri ile birlikte zeminin kayma mukavemetinin tanımlanmasında kullanılmaktadır. Büyük sürtünme açıları, yoğun kumlarda görüldüğü durumlarda plastik hesaplamayı önemli kılmaktadır.

2.5.1.1.5. Kabarma açısı (ψ)

Kum zeminlerdeki kabarma davranışı hem zeminin sıkılığına hem de içsel sürtünme açısına bağlıdır. Zeminlerin kabarma açısı, içsel sürtünme açılarına göre çok daha küçük değerdedir. Plaxis programında kabarma açısının değeri $\psi = \phi - 30^\circ$ eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. İçsel sürtünme açısının 30° den küçük olduğu durumlarda kabarma açısının değeri sıfır olarak alınır.

2.5.2. Doğrusal elastik malzeme modeli

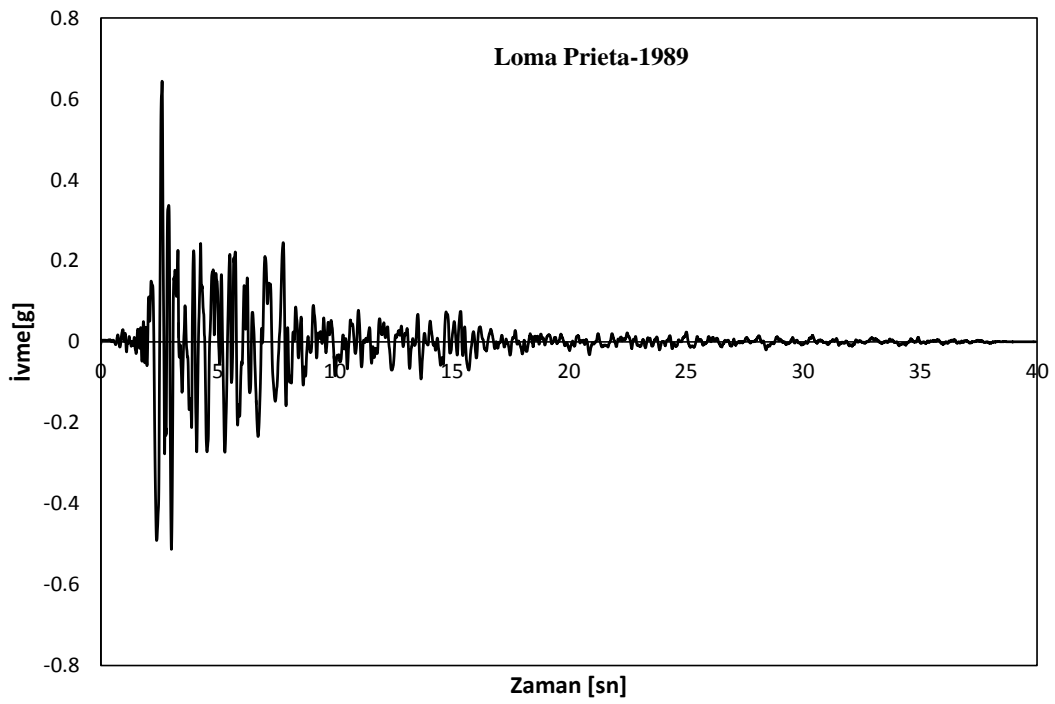
Zemin davranışının modellenebilmesi için son derece yetersiz olan doğrusal elastik malzeme modeli sadece zemin içerisinde yer alan dolu kesitli rijit yapıların davranışlarının modellenmesinde kullanılmaktadır. Model Hooke yasası olarak da bilinen doğrusal, izotrop, elastik gerilme-deformasyon davranışı gerilme-deformasyon ilişkisini en basit hali ile sunmaktadır. Doğrusal elastik model elastisite modülü ve poisson oranı olmak üzere sadece iki tane model parametresine sahiptir.

2.6. Dinamik Yük Kaynağı

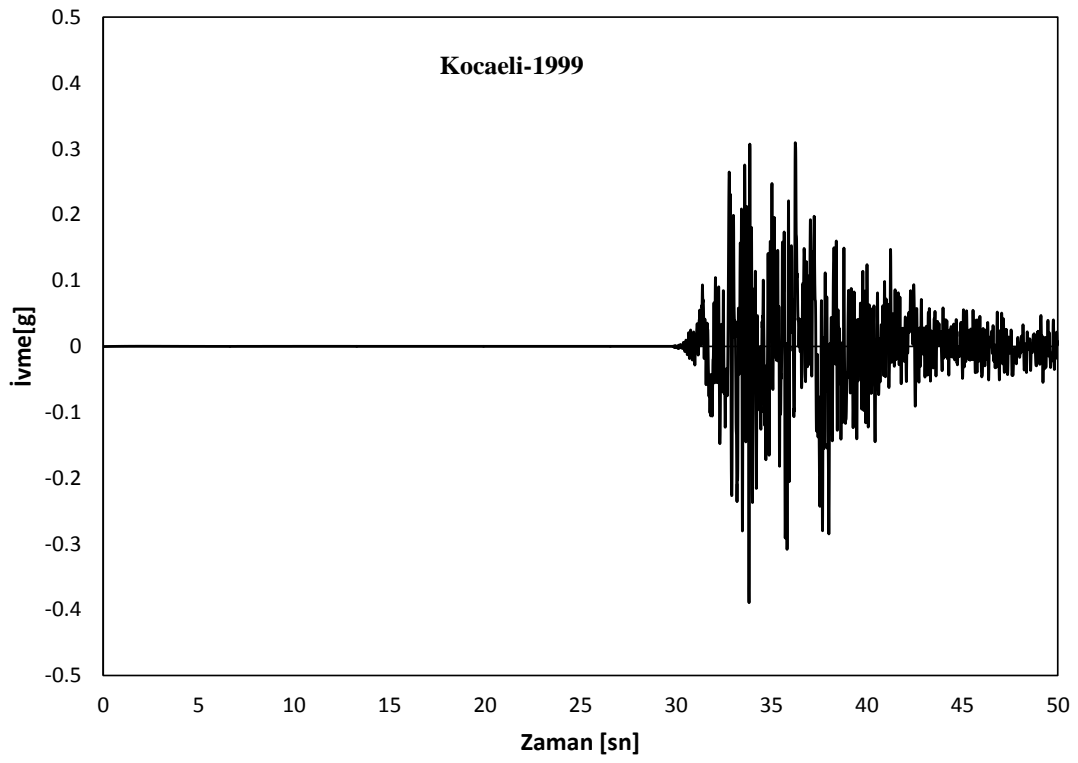
Dinamik yük hareketinin üstyapı ve zeminde meydana getirmiş oldukları etkilerin gerçeğe yakın incelenmesi geliştirilen modele etkiyen deprem hareketinin doğru tanımlanmasına bağlıdır. Bu çalışmada sisteme etki eden yer hareketi olarak üç farklı deprem kaydı kullanılmıştır. Bu depremlere ait bilgiler Tablo 2.1' de verilmiştir. Depremlere ait ivme kayıtları Şekil 2.5 - 2.7' de, Fourier spektrumları ise Şekil 2.8 - 2.10' da gösterilmiştir. Deprem kayıtları <http://peer.berkeley.edu/smcat> internet sitesinden alınmıştır.

Tablo 2.1. Deprem kayıtları

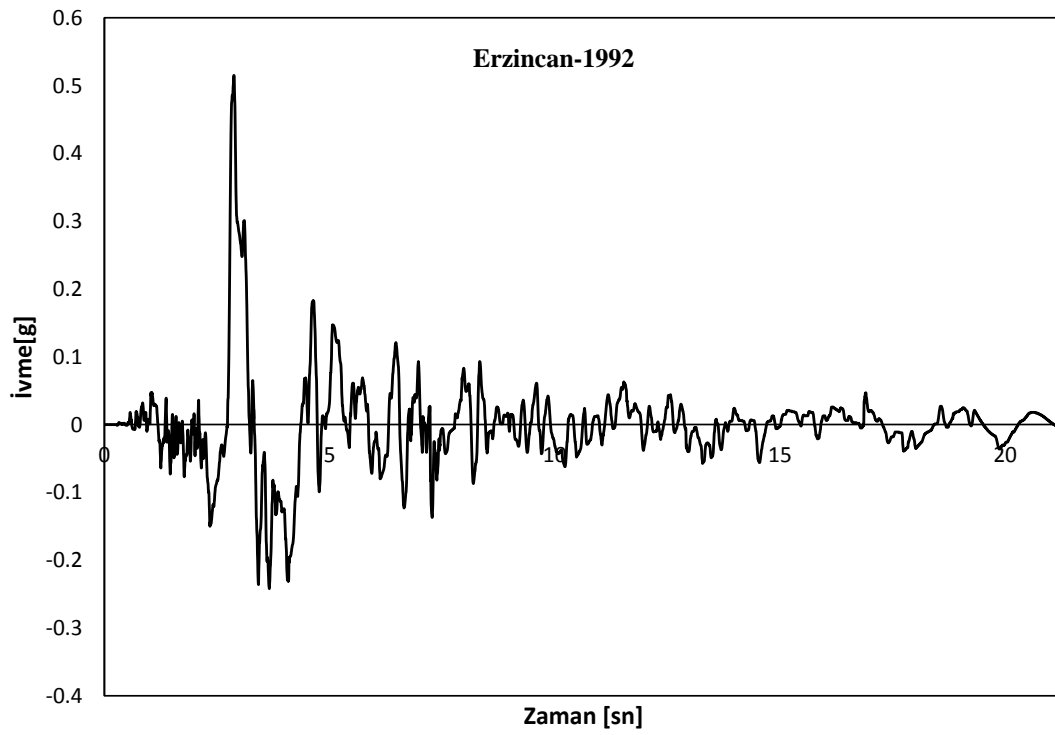
Yer Hareketi	Tarih	Büyükük	İstasyon
Loma Prieta	18/10/1989	6,9	LOMAP/CLS000
Kocaeli	17/08/1999	7,4	KOCAELI/SKR090
Erzincan	13/03/1992	6,9	ERZIKAN/ERZ-NS



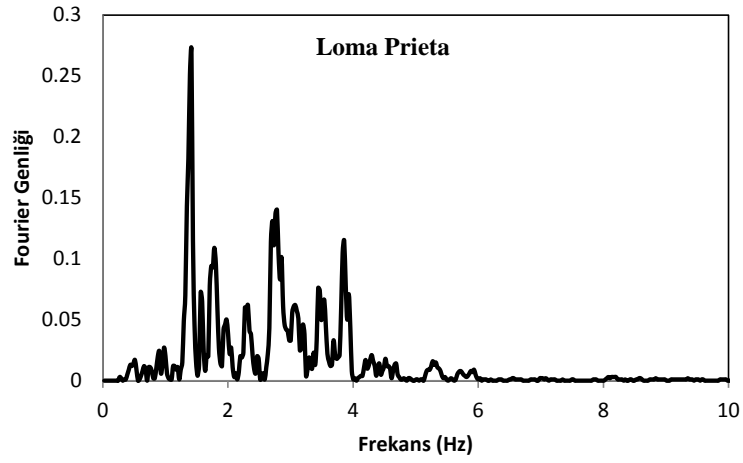
Şekil 2.5. Loma Prieta depremine ait ivme-zaman grafiği



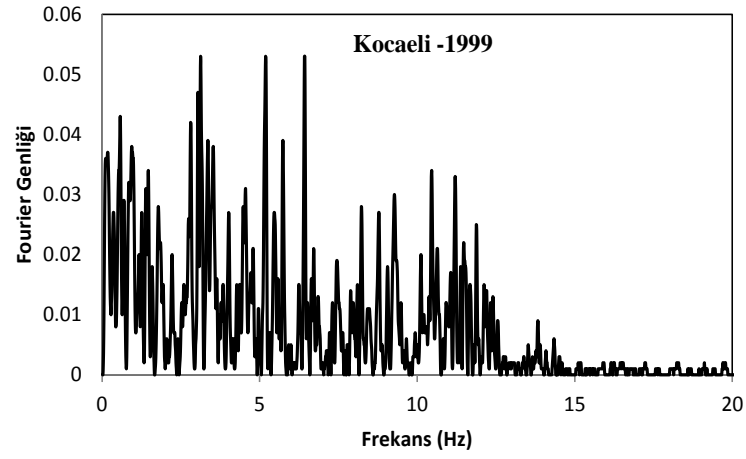
Şekil 2.6. Kocaeli depremine ait ivme-zaman grafiği



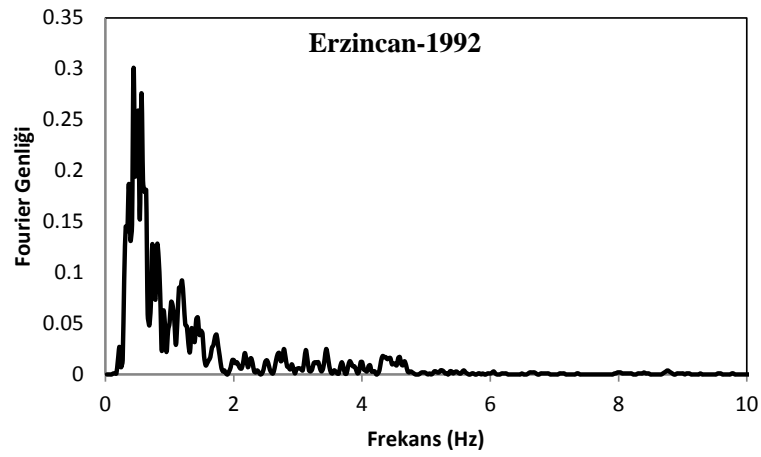
Şekil 2.7. Erzincan depremine ait ivme-zaman grafiği



Şekil 2.8. Loma Prieta depremi Fourier spektrumu



Şekil 2.9. Kocaeli depremi Fourier spektrumu



Şekil 2.10. Erzincan depremi Fourier spektrumu

2.7. Sonlu Eleman Analizinde Sayısal Doğruluk

Yapısal sistemi istenilen doğruluk düzeyinde modelleyebilmek için gerekli sayı ve tipteki elemana karar vermek, uygun şekil fonksiyonlarını seçmek ve doğru sınır şartlarını belirlemek gerekmektedir.

Sonsuza uzanan bölgelerin modellenmesinde kullanılacak sonlu elemanların maksimum boyutları, yayılan dalga türünün boyu (λ) ile kontrol edilmektedir.

Dalga yayılma hızı ve yük kaynağının frekans aralığı kullanılacak eleman boyutunu belirlediğinden, elemanların sayısının azaltılması genellikle ayrıklaştırılan bölgenin büyüklüğünü sınırlamaktadır. Ayrıklaştırılan bölgenin boyutunun küçültülmesiyle, sınır şartlarının probleme etkisi artar. Ancak, kesim noktalarında uygun yapay sınır şartlarının oluşturulmasıyla sonsuza uzanan zemin sonlu bir bölgeye hapsedilerek modellenebilir. Ayrıca kısa dalga boylu frekans bileşenleri geniş aralıklı düğümlerle modellendiğinde, yüksek frekans bileşenleri filtrelenebilir. Birçok araştırmacı farklı açısız frekanslarda sayısal modele yüklenen dalga boylarının ortamdaki şekil değiştirme biçimini yeterli yaklaşıklık düzeyinde idealize edebilmek için sonlu eleman boyutunun dikkatlice seçilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Sayısal modelde sonuçların tutarlılığı ve doğruluk düzeyi açısından sonlu eleman boyutunun (Δh) üst değeri en kısa dalga boyuna (λ_{\min}) göre sınırlandırılmıştır [30].

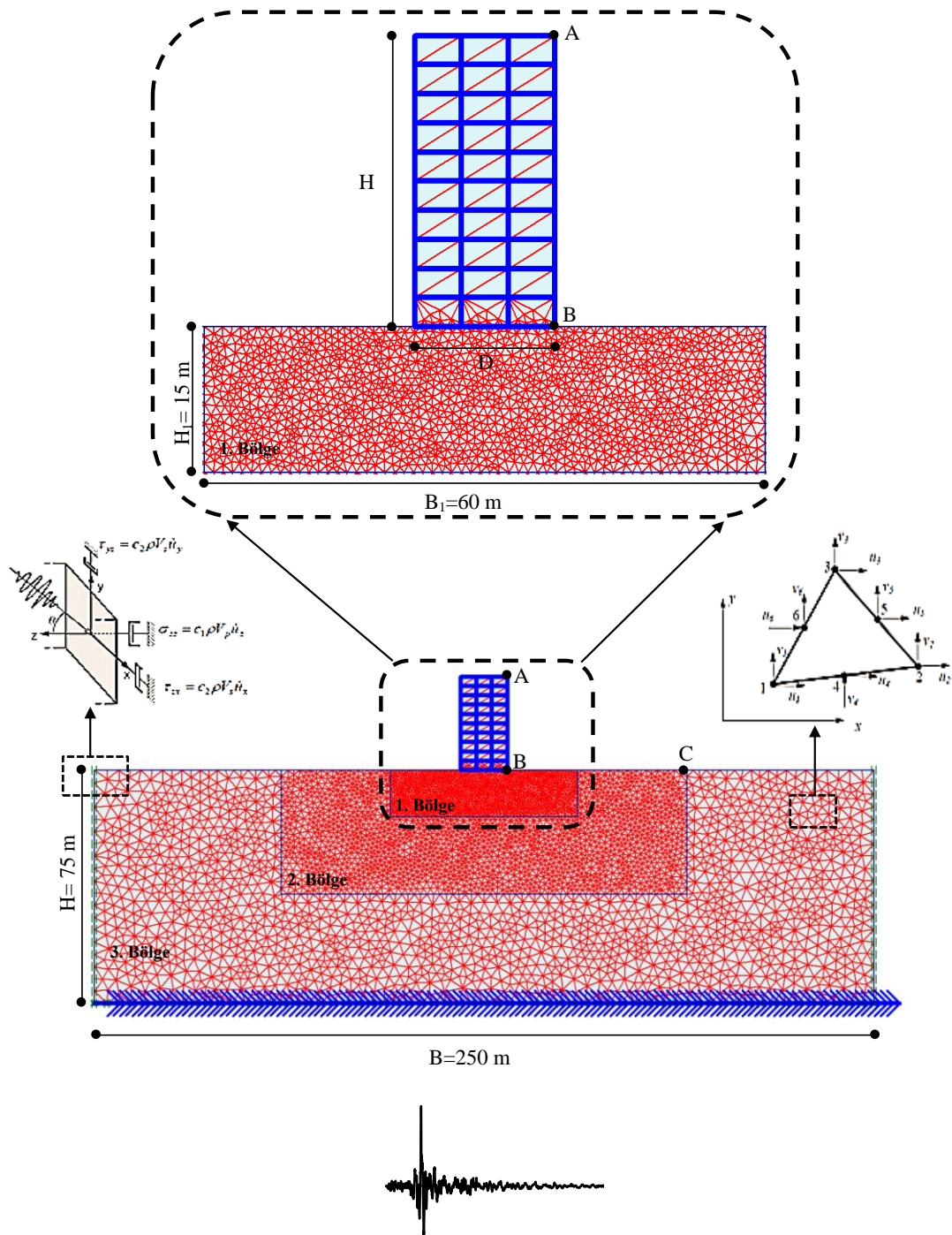
$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{\min}}{k} = \frac{v_j}{kf_{\max}} \quad (2.3)$$

Burada, k çarpan sabiti sonlu eleman tipine ve kullanılan şekil fonksiyonuna bağlı $5 \leq k \leq 10$ aralığında değişmektedir. Dinamik yüke ait Fourier Spektrumunun önemli bileşenlerini veren en büyük frekans değeri f_{\max} ile gösterilmiştir.

Bu çalışmada Loma Prieta depreminin maksimum frekansı, k çarpan sabiti olarak 8 ve Yang'97 [31] zemininin kayma dalga hızı $V_s=88.32$ m/s olarak dikkate alınmıştır. Bu formülasyondan elde edilen sonuca göre, sonlu eleman boyutunun (Δh) maksimum değeri $\Delta h_{\max}=4$ m olarak belirlenmiştir. Analizlerde zemin farklı

bölgelere ayrılarak yapısal davranışın birinci dereceden önem kazandığı plastik şekil değiştirmenin beklendiği zemin parçası (1.bölge) küçük boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiştir ($\Delta h_1=1$ m). Uzak bölgenin ayrıklaştırılmasında sonlu eleman ağ yapısının sıklığı kademeli olarak genişletilmiştir (2.bölge; $\Delta h_2=2$ m, 3.bölge; $\Delta h_3=4$ m). Başka bir ifadeyle üstyapıya yakın bölgeden uzaklaştıkça kullanılan sonlu eleman boyutları yukarıda verilen koşulu (2.3) aşmayacak şekilde büyütülerek hesaplama yükü ve buna bağlı olarak analiz süreci dengelenmiştir.

Şekil 2.11’de yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli

2.7.1. Courant koşulunun sağlanması

Yapı-zemin dinamik etkileşimi için geliştirilen matematik simülasyonun doğruluk düzeyi iki temel parametre ile kontrol edilmektedir. Bunlardan biri üst sınır koşuluna bağlanan (2.3) sonlu eleman modelinin nodları arasındaki mesafedir ve diğeri de çözümde göz önüne alınan zaman adım aralığıdır. Bu çalışmada ele alınan iki boyutlu düzlem şekil değiştirme problemini yöneten hareket denklemlerinin zaman tanım aralığında çözümü Newmark'ın sabit ortalama ivme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Sayısal integrasyonda çözümün kesin çözüme yakınsaması hesaplarda kullanılan zaman artımına (Δt) bağlıdır. Sayısal uygulamaların çözüm adımlarında kullanılacak zaman artımının en büyük değeri Courant ölçütü ($c \leq 1$) olarak tanımlanan kararlılık koşulunun göz önünde bulundurulmasıyla belirlenmiştir [32].

$$\frac{v_j \Delta t}{\Delta h} = c \quad (2.4)$$

Burada v_j problemde dikkate alınan dalğanın yayılma hızını göstermektedir. Dalga yayılım problemlerinin veya doğrusal olmayan titreşimlerin sayısal çözümleri için kullanılacak yaklaşık yöntemlerde zaman artım değeri kararlılık koşulu ile sınırlandırılmaktadır. Özellikle yüksek titreşim modlarının sayısal analizlerde yeterli doğrulukta temsil edilebilmesi için kararlılık koşulunun tüm modlarda sağlanması beklenmektedir. Aksi takdirde çözümün ıraksaması kaçınılmaz olur.

Farklı dalga türlerini hesaba katıldığı zemin titreşim problemlerinin analizinde zaman artımı (Δt), ortamdaki dalğanın en büyük yayılma hızıyla belirlenirken, kullanılacak sonlu eleman boyutunun en küçük dalga hızına bağlı olduğuna dikkat etmek gerekir. Dalgaların en yüksek ve en düşük yayılma hızları arasındaki farkın büyük olmasından dolayı öngörülen model için küçük sonlu eleman kullanımına ve kısa zaman artımıyla sayısal çözümün gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

2.7.2. Üstyapı modelinin idealleştirilmesi ve Plaxis programına uyarlanması

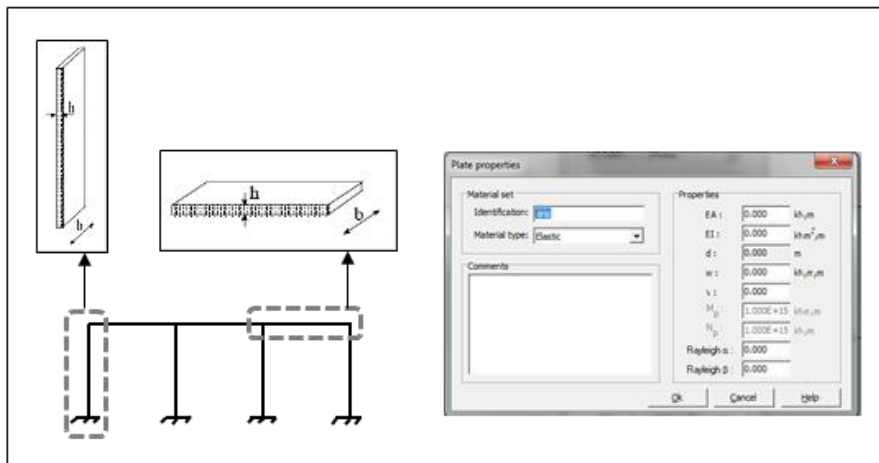
Bu çalışmada, deprem yükünün simülasyonu ile birlikte değerlendirilen üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için, dinamik sınır şartlarının ve malzeme davranışının uygun bir şekilde tanımlanabildiği sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D bilgisayar programından yararlanılmıştır.

Kullanılacak bilgisayar yazılımının, çalışılan yerel zemin bölgesindeki malzeme davranışını ve geliştirilen üstyapı modelinin düzlem çerçeve sistemini doğru temsil edebilecek düzeyde olması gerekmektedir.

Sayısal uygulamalarda, üstyapının oturduğu zeminin öngörülen mekanik davranışı elasto-plastik malzeme modeli ile benzeştirilmiş ve gerekli parametreler programa dahil edilmiştir.

Plaxis bilgisayar yazılımında, üstyapı elemanları 1 m genişliğinde ve d kalınlığında düzlemsel rijit elemanlarla oluşturulmaktadır. Bu elemanlar için; normal (EA) ve eğilme (EI) rijitliği, eleman kalınlığı (d) ve ağırlığı (w) program girdileri kısmında tanımlanmaktadır (Şekil 2.12).

Bu çalışmada, üstyapı modelinin her bir elemanı Plaxis yazılım programına göre uyarlanarak analizler yapılmıştır.



Şekil 2.12. Rijit eleman ve girdi parametreleri

Düzlem çerçeve sistemini temsil eden üstyapı elemanları Plaxis programında rijit eleman olarak tanımlanırken, eleman rijitliklerinin değişmemesine dikkat edilmelidir.

Modelde dinamik davranışı incelenen üstyapının kolon ve kiriş boyutları 0.5 x 0.5 m ve kullanılan beton sınıfı C25' dir.

Elemanlara ait atalet momentleri aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilmektedir:

$$I_{\text{rijit eleman}} = \frac{bd^3}{12}, \quad I_{\text{üstyapı elemanı}} = \frac{bh^3}{12} \quad (2.5)$$

Atalet momentleri eşitlenerek düzlemsel elemanlara ait kalınlık bulunmaktadır:

$$I_{\text{rijit eleman}} = I_{\text{üstyapı elemanı}} = \frac{1*d^3}{12} = \frac{0.5*0.5^3}{12} \Rightarrow d=0.397 \text{ m} \quad (2.6)$$

Daha sonra, bu kalınlığa bağlı olarak düzlemsel eleman için atalet momenti hesaplanmaktadır:

$$I_{\text{rijit eleman}} = \frac{b*d^3}{12} = \frac{1*0.397^3}{12} = 5.214*10^{-3} \text{ m}^4 \quad (2.7)$$

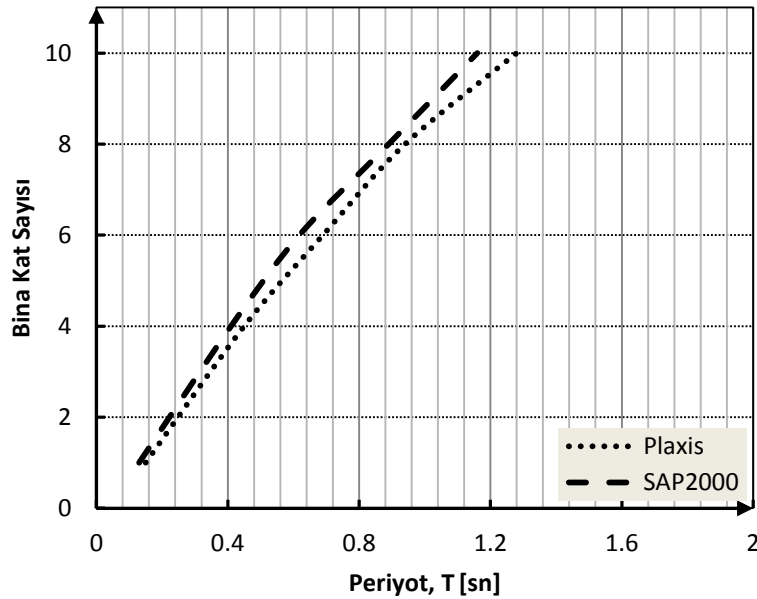
Son olarak, rijit elemana ait normal (EA) ve eğilme (EI) rijitliği elde edilmektedir.

$$A = b*d = 1*0.397 = 0.397 \text{ m}^2 \quad (2.8)$$

$$EI = 30*10^6 * 5.214*10^{-3} = 156420 \text{ kNm}^2 / \text{m} \quad (2.9)$$

$$EA = 30*10^6 * 0.397 = 1.191*10^7 \text{ kN} / \text{m} \quad (2.10)$$

Sayısal uygulamalardan sonra elde edilen bu değerlere göre, üstyapı-zemin ortak sisteminin, zaman bölgesindeki çözümü için Plaxis programında analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra uygulamanın doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, SAP2000 bilgisayar programı kullanılarak analizler yapılmıştır ve her iki programdan elde edilen periyot değerleri karşılaştırılmıştır. Farklı yükseklikteki yapılar için Plaxis programında gerçekleştirilen analizlerde zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini yani rijitliğini ifade eden kayma dalga hızı $c_s = 2000$ m/sn kabul edilen zemin parametreleri dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, her iki programdan elde edilen periyot değerlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği, dolayısıyla üstyapı modelini Plaxis programına uyarlamak için yapılan bu sayısal uygulamaların yeterli olduğu anlaşılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Bina kat sayısına bağlı periyot değişiminin karşılaştırılması

2.7.3. Problemin sonlu eleman formülasyonu

İki boyutlu sonlu eleman modelinin, Plaxis yazılım (Brinkgreve ve diğerleri., 2002) programı kullanılarak yapılan sismik yapı - zemin etkileşim analizleri, zaman tanım

alanında kapsamlı bir parametrik araştırma yürütülerek gerçekleştirilmiştir. Dalga yayılımının yanı sıra sonlu eleman ağının geometrik şekli ve boyutu ile birlikte seçilen bölgenin büyüklüğü de bu araştırmada önemli bir rol oynamaktadır. Ele alınan zeminin plastisitesi, düzlem şekil değiştirme koşullarına göre Mohr-Coulomb yenilme kriteri ile simüle edilmiştir.

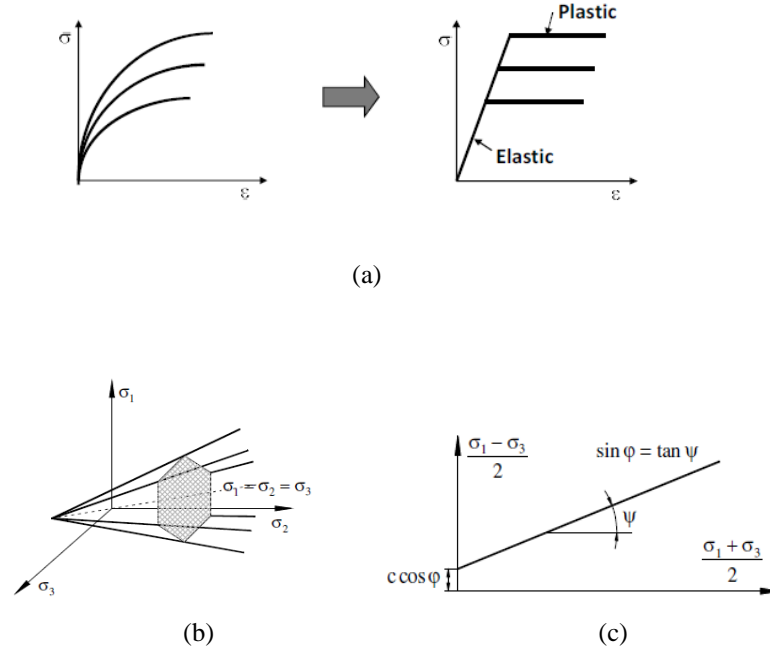
2.7.3.1. Mohr-Coulomb zemin modelinin sonlu eleman simülasyonuna uyarlanması

Mohr-Coulomb göçme hipotezi ile tanımlanan davranışın lineer olmayan zemin malzeme modeli, bu çalışmadaki YZE probleminin tüm özelliklerini yansıtacak şekilde geoteknik mühendisliği için geliştirilen sonlu eleman programında ele alınmıştır.

Gerçek zemin davranışını birinci dereceden yaklaşım ile idealize eden Mohr-Coulomb yenilme kriterine dayalı zemin modeli, doğrusal elastik davranış ile akma sonrası plastisite davranışının birlikteliğinden ibarettir (Şekil 2.14a).

İlgili akma yüzeyi, Şekil 2.14b’de gösterildiği gibi $F(\sigma, \varphi)$ fonksiyonu ile tanımlanan plastik gerilmelerden etkilenmeyen altıgen kesitli bir piramitten oluşmaktadır. Bu durumda zeminin öncelikle elastik olması beklenmektedir. Model sonlu eleman ağı içinde tüm Gauss noktalarında normal ve kayma gerilmeleri oluşturur ve bu gerilmeler, daha sonra Mohr-Coulomb yenilme kriteri ile karşılaştırılır. Gauss noktasında belirlenen gerilmeler Mohr-Coulomb göçme zarfı içinde ortaya çıkıyorsa, bu durumda o bölgenin elastik kalacağı, aksi durumda ise akmanın olacağı varsayılır. YZE problemlerini kapsayan hesaplamalı geoteknik uygulamaların elasto-plastik analizlerinin yaygın kullanımı basitliklerinden, kolay matematiğe uyarlanışından ve temel mekanik parametrelerin tanımlanmasında kullanışlı olmalarından kaynaklanmaktadır. Elasto-plastik zemin modeli zemin davranışının birçok özelliğini kapsar ve sınır değer problemi için bazı kesin çözümler getirirken, birçok kezde yaklaşık çözümler üretir.

Mohr-Coulomb yenilme kriterinin, Şekil 2.14c' de gösterildiği gibi üç eksenli laboratuvar test verileriyle aynı eğilimleri gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 2.14. Mohr-Coulomb kriterine bağlı elasto-plastik zemin modeli

Çökme mekanizmaları için gerekli Mohr-Coulomb plastisite parametreleri sırasıyla, içsel sürtünme açısı φ , zemin kohezyonu c , ve kayma esnasında hacimde gerçekçi bir geri dönülemez değişiklik olarak akış kuralını tanımlamak için kullanılan kabarma açısı ψ 'dir. Sadece elasto - plastik davranışta (x,y) koordinat sistemi ile dikkate alınan yüzeysel deformasyonun, efektif gerilmeler açısından plastik potansiyel fonksiyonla ilgili olan akma fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir [33]:

$$f(\sigma, \varphi) = |\sigma_i - \sigma_j| - (\sigma_i + \sigma_j) \sin \varphi - c \cos \varphi \quad (2.11)$$

$$g(\sigma, \psi) = |\sigma_i - \sigma_j| - (\sigma_i + \sigma_j) \sin \psi \quad (2.12)$$

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{ii} + \sigma_{jj}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2}\right)^2 + \sigma_{ij}^2}, \quad \sigma_j = \frac{\sigma_{ii} + \sigma_{jj}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2}\right)^2 + \sigma_{ij}^2} \quad (2.13)$$

Zeminin çekme yenilmesi, çekme kesilme eşiği ile belirlenerek elde edilir. Çekme kesilme eşiği için iki ilave akma fonksiyonu tanımlanır:

$$F_k(\sigma) = \sigma_k - \sigma_t \leq 0 \quad (k=1, 2) \quad (2.14)$$

Burada, σ_t , müsaade edilebilir çekme gerilmesidir. Çekme kesilme eşiği için bu akma fonksiyonları ile ilişkili bir akış kuralı uygulanır. Mohr-Coulomb yenilme kriteri ile birlikte sonlu eleman modelleri açısından, yapı ve zemin arasındaki ara yüzde tam bağlama olduğu varsayılmıştır. Genelde ara yüzlerin elastik-plastik davranış modeli için kayma gerilmesi τ yenilme düzleminde zemin dayanımının bölünmesiyle aşağıdaki gibi belirlenir:

Elastik davranış için;

$$|\tau_i| < c_i + \sigma_n \tan \varphi_i \quad (2.15)$$

Plastik davranış için;

$$|\tau_i| = R_{inter} (c_i + \sigma_n \tan \varphi_i) \quad (2.16)$$

Burada, σ_n ara yüzün normal gerilmesidir. Ara yüzlerin dayanım parametreleri, zemin tabakasının dayanım özellikleri ile ilişkilidir. Arayüz dayanım azaltma faktörü (R_{inter}), aşağıdaki formül uygulanarak zemin özelliklerinden elde edilmektedir:

$$c_i = R_{inter} c_{soil} \quad (2.17)$$

$$\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{soil} \leq \tan \varphi_{soil} \quad (2.18)$$

$$\psi_i = 0^\circ \text{ for } R_{inter} < 1, \text{ diğer durumda } \psi_i = \psi_{soil} \quad (2.19)$$

Bu çalışmada, arayüz dayanım azaltma faktörü $R_{inter} = 0.67$ olarak alınmıştır. Küçük şekil değiştirme plastisite teorisine dayanan, şekil değiştirme artım tensörü elastik ve plastik kısımlardan oluşmaktadır.

$$\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = \partial \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^e + \partial \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p \quad (2.20)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$, hız değişimi tensörünün simetrik bileşenidir. Tam plastisitede, plastik şekil değiştirme, akma kriteri ve tutarlılık denklemi sağlandığında ortaya çıkmaktadır:

$$\partial f = \left(\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{ij}} \right)^T \partial \boldsymbol{\sigma}_{ij} = 0 \quad (2.21)$$

Burada, f akma fonksiyonu ve $\partial \boldsymbol{\sigma}_{ij}$ sonsuz küçük gerilme artış tensörüdür. Gerilme ve şekil değiştirme vektörleri düzlemsel sistemde aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}]^T, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ 2\varepsilon_{xy}]^T \quad (2.22)$$

Elastik gerilme artışı, Hooke Kanunu'nu dikkate alan elastik şekil değiştirme artış aralığı ile ilişkili olduğundan denklem (2.20)'in kullanılması aşağıda belirtilen ilişkiyi sağlamaktadır:

$$\partial \boldsymbol{\sigma}_{ij} = \mathbf{D}^{ijkl} \partial \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} - \mathbf{D} \partial \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p \quad (2.23)$$

\mathbf{D} , mevcut gerilme durumu açısından elastik bünye matrisi ifade etmektedir. Bu durumda \mathbf{D} aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

$$\mathbf{D} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Burada E malzemenin elastisite modülü ve ν poisson oranıdır.

Ayrık plastisite modeller için; formül (2.23)'de gerilme oranlarının birleşmesi aşağıda gösterildiği gibi sonlu bir gerilme artışı haline gelmektedir:

$$\Delta\sigma = D\partial\varepsilon - D\partial\varepsilon^p = \Delta\sigma^e - \Delta\sigma^p \quad (2.25)$$

Bu formül, sonlu gerilme artışını, plastik kısım tarafından izlenen bir elastik kısmın oluşturduğunu göstermektedir. Genelde, plastik şekil değiştirme artışları, plastik potansiyele (g) bağlı olarak aşağıdaki şekilde verilir:

$$\partial\varepsilon_{ij}^p = \partial\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.26)$$

λ , plastik şekil değiştirme büyüklüğünü belirleyen pozitif bir çarpanıdır. Formül 2.26'da plastik şekil değiştirme için verilen akış kuralı $g = f$ durumunda klasik ilişkili plastisite olarak adlandırılır. Sonraki akış kuralı, genellikle zemin malzemeleri için kullanılır. Esasen, plastik düzeltici aşağıdaki denklemde integral alınarak bulunmaktadır:

$$\Delta\sigma^p = \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} D \frac{\partial g}{\partial \sigma} \partial\lambda \quad (2.27)$$

Elasto - plastik analizlerde, gerilme ve sonsuz küçük şekil değiştirme artışları ile ilişkili olan, elastik ötesi bünye matrisi D^{ep} aşağıdaki denklemde gösterilebilir:

$$\partial\sigma_{ij} = D^{ijkl} \left(\partial\varepsilon_{ij} - \partial\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \right) \quad (2.28)$$

Formül 2.28'in formül 2.21'de yerine yazılmasıyla, $\partial\lambda$ aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\partial\lambda = \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}\right)^T D^{ijkl} \partial \varepsilon_{kl}}{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}\right)^T D^{ijkl} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \sigma_{kl}}} \quad (2.29)$$

Daha sonra, formül 2.29'u formül 2.28 ile yer değiştirerek, sonsuz küçük gerilmeler ve şekil değiştirmeler arasındaki ilişki şu hale gelir:

$$\partial \sigma_{ij} = D_{ep}{}^{ijkl} \partial \varepsilon_{kl} \quad \text{where } D_{ep}{}^{ijkl} = D^{ijkl} - \frac{D^{ijkl} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \sigma_{kl}} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}\right)^T D^{ijkl}}{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}\right)^T D^{ijkl} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \sigma_{kl}}} \quad (2.30)$$

Formül 2.30'dan elde edilen elasto - plastik modül matrisin birlikte kullanılmasıyla, elastik - tam plastik davranışın sürekliliği için aşağıdaki formül geçerli olacaktır:

$$\sigma^i = \sigma^{i-1} + \int_{\varepsilon^{i-1}}^{\varepsilon^{i-1} + \Delta \varepsilon^{iep}} D_{ep}{}^i \partial \varepsilon_{ep}{}^i \quad (2.31)$$

Zaman bağımlı girdi hareketi için düzlem şekil değiştirme koşulları altında yapı - zemin sistemi ile ilgili kullanılan formül, aşağıda gösterilen diferansiyel matris denklemi ile verilebilir:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \tilde{\mathbf{C}} \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{P}(\boldsymbol{\sigma}) = \tilde{\mathbf{F}}(t) \quad (2.32)$$

Tüm sistemin kütle matrisi \mathbf{M} ve özel sönüm matrisi $\tilde{\mathbf{C}}$ aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\mathbf{M} = \iint_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{N} \rho \, \partial\Omega \quad (2.33)$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{C} + \mathbf{C}^{\infty} = \iint_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{c} \mathbf{N} \, \partial\Omega + \iint_{\Omega} \mathbf{N}^T \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \rho \mathbf{V}_p & 0 \\ 0 & \mathbf{c}_2 \rho \mathbf{V}_s \end{bmatrix} \mathbf{N} \, \partial\Omega \quad (2.34)$$

Bu denklemden, ρ zeminin kütle yoğunluğu, V_p ve V_s ise basınç ve kayma dalga hızıdır. Sistemin özel sönümlenmesi, uzak ve yakın alanlar için malzeme sönümünü modelleyen \mathbf{C} ve radyasyon sönümü \mathbf{C}^{∞} 'yi modelleyen sınır integralinden oluşmaktadır. Malzeme sönüm matrisi, kütle ve rijitlik matrislerinin [34,35] bir fonksiyonu olarak ifade edilen Rayleigh sönümlemesine dayalı olarak, aşağıdaki şekilde kurulmuştur:

$$\mathbf{C} = \alpha_R \mathbf{M} + \beta_R \mathbf{K} = \alpha_R \iint_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{N} \rho \, \partial\Omega + \beta_R \iint_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \, \partial\Omega \quad (2.35)$$

$$\mathbf{C}^{\infty} = \iint_{\Omega} \mathbf{N}^T \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \rho \mathbf{V}_p & 0 \\ 0 & \mathbf{c}_2 \rho \mathbf{V}_s \end{bmatrix} \mathbf{N} \, \partial\Omega \quad (2.36)$$

Burada; c_1 ve c_2 yerel viskoz sınırlarda soğurma performansını geliştirmek için bulunmuş olan iyileştirme katsayılarıdır. \mathbf{P} ifadesi ise çoğunlukla, gerilme sapsması ya da gerilmeye bağlı kuvvet matrisi olarak adlandırılmaktadır. Hesaplama doğrusal olmayan davranışın dikkate alınmasıyla; tekrarlama prosedürleri doğrudan aşağıda belirtilen fonksiyonlarla gerçekleştirilmektedir:

$$\mathbf{P}(\boldsymbol{\sigma}) = \iint_{\Omega} (\mathbf{L} \mathbf{N})^T \boldsymbol{\sigma} \, \partial\Omega = \left(\iint_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \, \partial\Omega \right) \mathbf{u} \quad (2.37)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}} \\ \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}} & \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \end{bmatrix}, \mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & \dots & N_6 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots & \dots & 0 & N_6 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Değişim operatörü \mathbf{L} ve yerdeğiştirme alanı olarak tanımlanan enterpolasyon fonksiyonları \mathbf{N} 'nin çarpımı üçgen eleman için birim şekil değiştirme dönüşüm matrisi \mathbf{B} 'yi verir:

$$\mathbf{K} = \left(\iint_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \, d\Omega \right) \quad (2.39)$$

Plastik durumlarda, Denklem (2.32)'nin değişen biçimini kullanmak daha uygundur. Denklem (2.39) tarafından verilen \mathbf{K} matrisi, noktasal yerdeğiştirme artışları ve noktasal yük artışlarının sonucu ile arasındaki ilişkiyi belirten elastik ötesi matris \mathbf{K}_t olmaktadır.

$$\mathbf{K}_t = \left(\iint_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D}^{ep} \mathbf{B} \, d\Omega \right) \quad (2.40)$$

Burada eğer $f=0$ ve $\mathcal{F}=0$ ise Denklem (2.30)'da verilen \mathbf{D}^{ep} kullanılır, ancak $f<0$ ve $\mathcal{F}<0$ olduğu durumunda ise elastik bünye matris \mathbf{D} kullanılır. 2D katı elemanlar için eşdeğer noktasal kuvvet vektörü şu şekilde yazılabilir:

$$\tilde{\mathbf{F}}(t) = \mathbf{F}(t) + \mathbf{F}^\infty(t) = \iint_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{b} \, d\Omega + \iint_{\Gamma} \mathbf{N}^T \mathbf{t} \, d\Gamma - \left(\iint_{\Omega} \mathbf{N}^T \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \rho \mathbf{V}_p & 0 \\ 0 & \mathbf{c}_2 \rho \mathbf{V}_s \end{bmatrix} \mathbf{N} \, d\Omega \right) (\dot{\mathbf{u}}_b - \dot{\mathbf{u}}_{bf}) \quad (2.41)$$

$$\mathbf{F}(t) = \iint_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{b} \, d\Omega + \iint_{\Gamma} \mathbf{N}^T \mathbf{t} \, d\Gamma \quad (2.42)$$

$$\mathbf{F}^\infty(t) = -\mathbf{C}^\infty (\dot{\mathbf{u}}_b - \dot{\mathbf{u}}_{bf}) \quad (2.43)$$

burada \mathbf{b} belirtilen gövde kuvvetlerinin cisim kuvvet vektörü, t ise Denklem (2.42)'de tanımlanmış Γ yüzeyine maruz sınır kuvvet vektörüdür. Yapı-zemin etkileşim analizini oldukça sadeleştirmek için, enerji dalgalarını soğurabilen, yutucu sınırlar olarak adlandırılmış özel sınır şartları, model sınırlarındaki kesilmiş ara yüzler boyunca dalgaların zemin ortamı içine geri yansımalarını önlemek için uygulanır. $\mathbf{F}(t)^\infty$ yapay sınırlar üzerindeki viskoz sönüm ile ilgili kuvvet vektörüdür. $\dot{\mathbf{u}}_b$ ve $\dot{\mathbf{u}}_{b_f}$ ise sınır üzerindeki ve serbest alan içindeki noktasal hızlardır.

BÖLÜM 3. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu çalışmada sismik yükler altında titreşen üstyapı – zemin ortak sisteminin dinamik davranışını inceleyebilmek için geliştirilen sonlu eleman modeli üzerinde sistematik bir program akışı içerisinde çeşitli kontrol parametrelerine bağlı sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

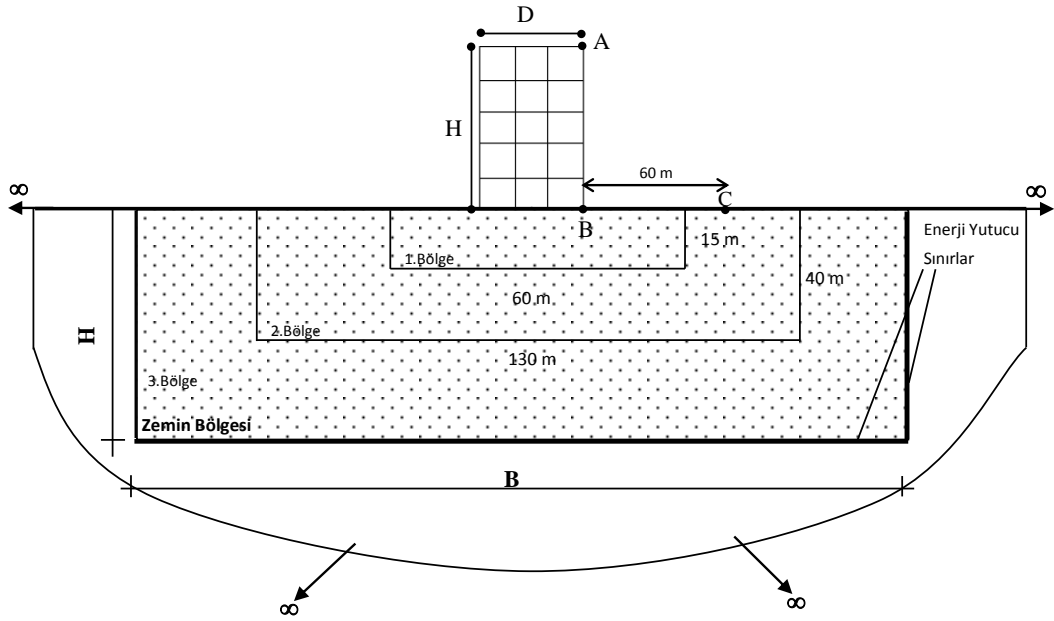
İlk olarak iki katlı üç açıklıklı basık bir yapının ($H/D=0.4$) dinamik davranışı, sismik yükler altında incelenmiş ve yapı-zemin ortak sistemine ait bazı temel dinamik büyüklükler sistem parametrelerine bağlı olarak elde edilmiştir. Dinamik davranışı belirleyen etkin sistem parametreleri olarak zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini yani rijitliğini ifade eden c_s kayma dalga hızı ($c_s=90, 270, 1000$ m/sn) ve farklı özellikte yer hareketleri (1989 Loma Prieta, 1999 Kocaeli, 1992 Erzincan) kullanılmıştır. Ayrıca yapının oturduğu zemin bölgesinin malzeme mekanik davranışı da göz önünde bulundurulmuştur. Burada yapı-zemin etkileşiminin (YZE) dikkate alındığı durumda zemin Mohr-Coulomb akma kriteri varsayımı altında elasto-plastik ve doğrusal elastik olarak düşünülmüştür. Ve YZE' nin dikkate alınmadığı durumla karşılaştırılmıştır. Başlangıçta basık yapılar için yürütülen bu çalışma daha sonra yukarıda verilen kontrol parametrelerine bağlı olarak farklı narinlik oranlarına ($H/D=1,2$ ve 4) sahip yapı örnekleri için devam ettirilmiştir.

3. 1. Modelin Kalibrasyonu

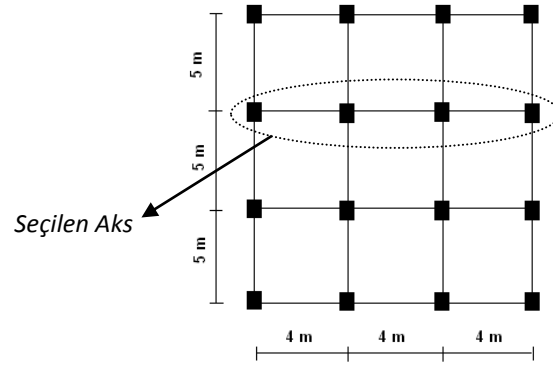
Dalga yayılışının incelendiği sürekli ortam mekaniğinde sistemin sonlu eleman ağ yapısının sıklığı hassas bir yaklaşımla düzenlenirken problemin sınır özelliklerinin de aynı hassasiyetle doğru tanımlanması hem öngörülen doğruluk düzeyine erişebilme hem de çözüm sürecinin hesap yüküne bağlı olarak dengelenebilmesi açısından son derece önemlidir. İletilen dalgaların zemin sınırlarından yansıyor geri dönmemesi için problemin ele alındığı bölgenin küçük tutulmaması gerekir. Ayrıca

sonsuz uzanan zemin bölgesinden çıkartılan sonlu zemin parçasının sınır şartlarının geriye kalan zemin bölgesini nasıl temsil edeceğinin iyi belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada yarı sonsuz zemin ortamının idealleştirilmesi için geliştirilen sonlu eleman modelinin doğruluk düzeyi ve yöntemin geçerliliği, zeminde dalga yayılımını doğru yansıtacak özellikte yapay sönümleyiciler yerleştirilerek oluşturulan bölgenin büyüklüğüne göre incelenmiştir. Ele alınan problem yakın ve uzak bölgeler için farklı ağ sıklıklarında analiz edilmiştir.

İlk aşamada sonsuz uzanan zemin bölgesinin ayrık bir bölgeye dönüştürülmesinde öngörülen optimum sınırlarını belirlemek için araştırmalar yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde gözlem noktaları olarak binanın çatı katı düzeyi (A Noktası), binanın temel tabanı (B Noktası) ve zeminin serbest yüzeyi (C Noktası) seçilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda dinamik davranışı incelenen yapı modeli, 2 m temel derinliğinde 5 katlı 3 açıklıklı betonarme düzlem bir çerçevedir. Binanın yüksekliği 15 m genişliği ise 12 m'dir. Şekil 3.1'de zemin bölgesinin optimum boyutlarını belirlemek için geliştirilen sayısal model ve Şekil 3.2'de binanın şematik planı gösterilmektedir. Zemin davranış modeli olarak elasto-plastik malzeme davranışı seçilmiştir. Oluşturulan sayısal modelde, gevşek zemin olarak kabul edilebilecek Yang' 1997 [31] zemin malzeme parametreleri seçilmiş ve Tablo 3.1' de bu zemine ait özellikler verilmiştir. Bina tasarımında kullanılan kolon-kiriş elemanlarının özellikleri ise Tablo 3.2'de verilmiştir. Bu analizlerde, dinamik yük hareketi olarak, en büyük yer ivmesi 0.64 g ve en büyük yer hızı değeri 55.2 cm/sn olan Loma Prieta (18/10/1989) depremi kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Yapı-zemin etkileşim probleminde ayrılaştırılan bölge



Şekil 3.2. Kat kalıp planı

Tablo 3.1. Yang' 1997 Zemin Mekanik Özellikleri

Parametre	Sembol	Büyükük	Birim
<i>Zemin Türü : Kum</i>			
Birim hacim ağırlık	γ	17	(kN/m ³)
Elastisite modülü	E	34500	(kN/m ²)
Kayma modülü	G	13270	(kN/m ²)
Poisson oranı	ν	0.30	-
Basınç dalgası	V_p	165.2	m/s
Kayma dalgası	V_s	88.32	m/s
Boşluk oranı	e	0.5	-
Kohezyon	c	0	(kN/m ²)
Kayma mukavemeti açısı	ϕ	33	(°)
Kabarma açısı	ψ	3	(°)
Arayüz dayanım azaltma faktörü	R_{inter}	0.67	-

Tablo 3.2. Modelin Doğrulanmasında Kullanılan Üstyapının Mekanik Özellikleri

Parametre	Sembol	Büyükük	Birim
Kolonlar	Eksenel rijitlik	EA	4.48x10 ⁶ (kN)
	Eğilme rijitliği	EI	5.97x10 ⁴ (kNm ²)
Kirişler	Eksenel rijitlik	EA	5.04x10 ⁶ (kN)
	Eğilme rijitliği	EI	1.51x10 ⁵ (kNm ²)
	Ağırlık	w	50 (kN/m ²)

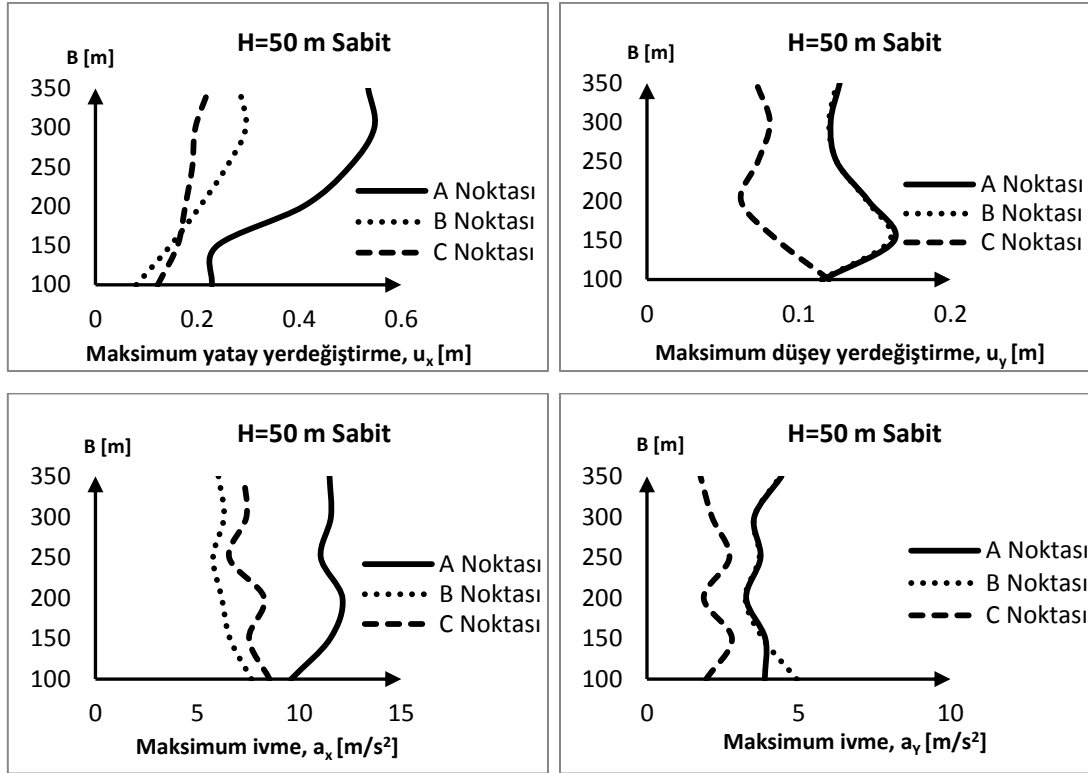
Sonsuza uzanan zemin bölgesinin ayrıklaştırılması için farklı ölçeklerde ele alınan sonlu eleman modelleri kullanılarak seçilen gözlem noktalarındaki yatay u_x ve düşey u_y yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri elde edilmiştir. İlk aşamada problemde ele alınacak zemin bölgesinin yatay açılımının uzunluğuna karar verilmiştir. Bu çalışmada sonlu bölgenin toplam uzunluğunun $B=250$ m alınması yeterli görülmüştür (Tablo 3.3). Her iki taraftan zemin sınırı yapı taban genişliğinin yaklaşık olarak 10 katı kadar uzakta oluşturulmuştur. Daha sonra ise zemin bölgesinin derinliği H saptanmıştır. Derinlik $H=75$ m olacak şekilde belirlenmiştir (Tablo 3.4). Ayrıca, ayrıklaştırılan zemin bölgesinin yatay ve düşey sınırların belirlenmesi için elde edilen sonuçlar grafiklerde de gösterilmiştir (Şekil 3.3 ve 3.4).

Tablo 3.3. Maksimum Yer Değiştirme ve İvme Değerleri (H=50 m, Derinlik sabit)

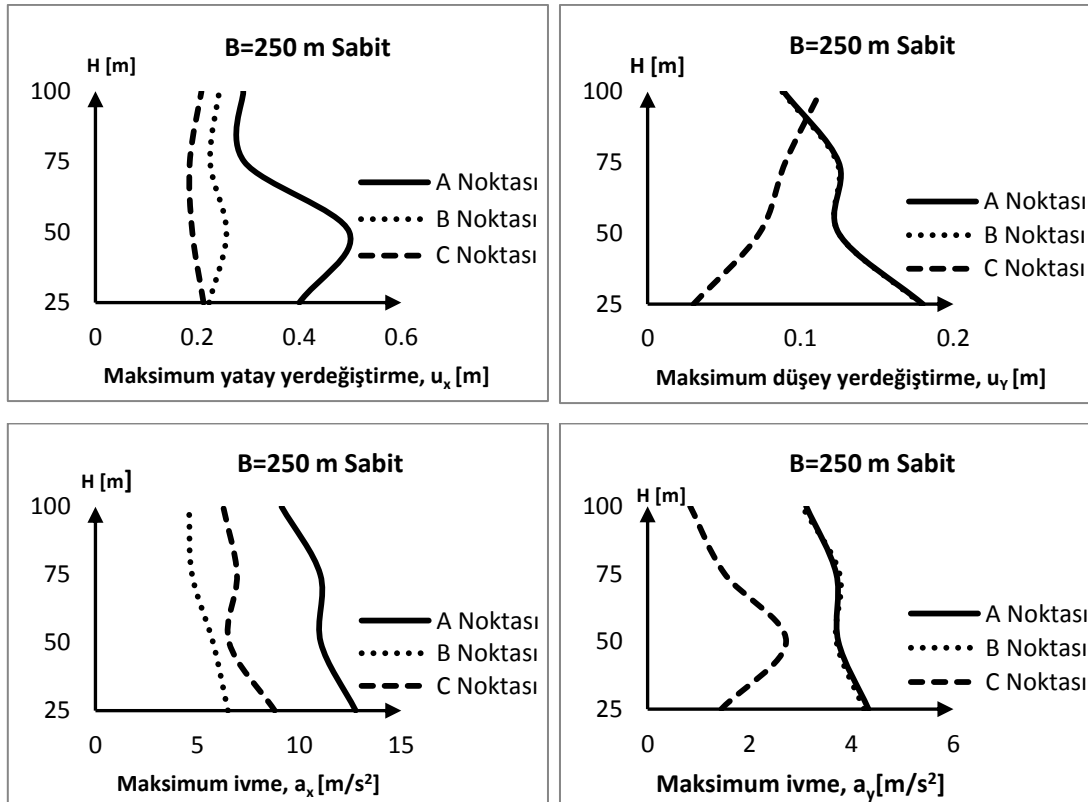
		Zemin Özellikleri (Yang' 1997)					
		Ayrıklaştırılan zemin bölgesinin uzunluğu, B					
		(H=50 m)					
		100m	150m	200m	250m	300m	350m
A Noktası	\ddot{u}_{gx} (m/s ²)	9.596	-11.51	-12.11	11.05	-11.54	-11.48
	\ddot{u}_{gy} (m/s ²)	3.880	-3.898	3.267	-3.741	-3.536	-4.432
	u_x (m)	-0.228	0.239	-0.408	-0.498	-0.547	-0.535
	u_y (m)	-0.116	-0.163	-0.146	-0.125	-0.121	-0.127
B Noktası	\ddot{u}_{gx} (m/s ²)	-7.654	-6.593	-6.197	-5.767	-6.305	-6.033
	\ddot{u}_{gy} (m/s ²)	-4.935	-3.824	3.240	-3.704	-3.531	-4.387
	u_x (m)	0.080	0.147	-0.205	-0.257	-0.295	-0.282
	u_y (m)	-0.115	-0.160	-0.145	-0.125	-0.120	-0.125
C Noktası	\ddot{u}_{gx} (m/s ²)	-8.541	-7.532	-8.278	-6.556	-7.401	-7.278
	\ddot{u}_{gy} (m/s ²)	-1.949	2.800	1.869	-2.716	-2.140	1.761
	u_x (m)	0.122	0.161	0.176	0.190	0.196	-0.223
	u_y (m)	-0.120	-0.086	-0.062	-0.073	-0.081	-0.072

Tablo 3.4. Maksimum Yer Değiştirme ve İvme Değerleri (B=250 m, Genişlik sabit)

		Zemin Özellikleri (Yang' 1997)			
		Ayrıklaştırılan zemin bölgesinin derinliği, H			
		(B=250 m)			
		25m	50m	75m	100m
A Noktası	\ddot{u}_{gx} (m/s ²)	-12.76	11.05	-11.02	-9.126
	\ddot{u}_{gy} (m/s ²)	-4.332	-3.741	-3.701	3.109
	u_x (m)	0.400	-0.498	0.292	-0.290
	u_y (m)	-0.180	-0.125	-0.125	-0.089
B Noktası	\ddot{u}_{gx} (m/s ²)	-6.496	-5.767	4.737	-4.588
	\ddot{u}_{gy} (m/s ²)	-4.242	-3.704	-3.765	3.030
	u_x (m)	-0.223	-0.257	0.225	0.243
	u_y (m)	-0.179	-0.125	-0.124	-0.088
C Noktası	\ddot{u}_{gx} (m/s ²)	-8.790	-6.556	-6.941	-6.263
	\ddot{u}_{gy} (m/s ²)	1.447	-2.716	1.511	-0.833
	u_x (m)	0.212	0.190	0.185	0.208
	u_y (m)	-0.030	-0.073	-0.090	0.113



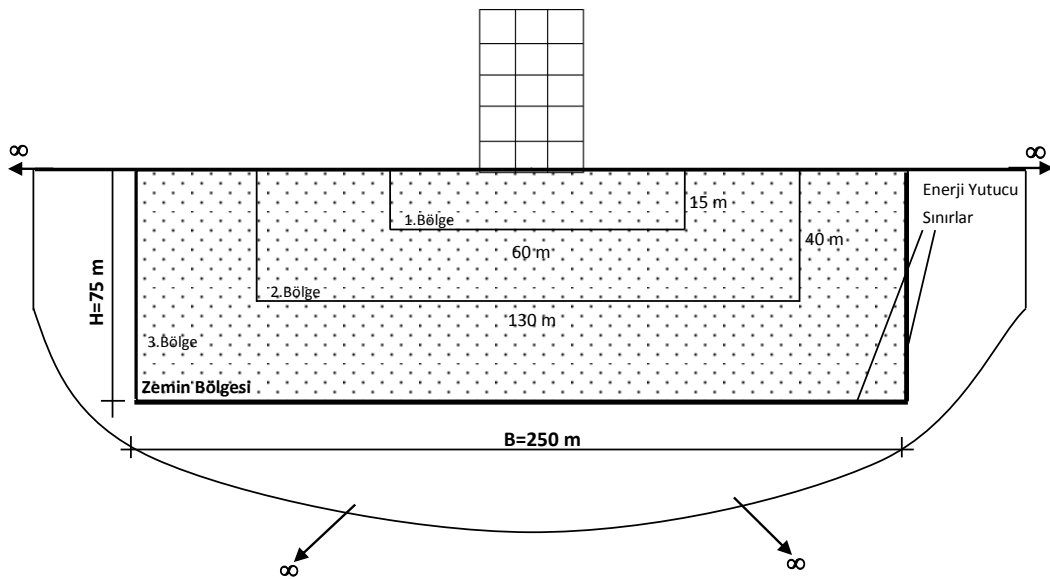
Şekil 3.3. Ayırıklaştırılan zemin bölgesinin yatay sınırlarının belirlenmesi



Şekil 3.4. Ayırıklaştırılan zemin bölgesinin derinliğinin belirlenmesi

3.2. Matematik Modelin Kurulması

Üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman tanım aralığında çözümü için sonsuz zemin bölgesinin ayrıklaştırılmasında nümerik çözüm yöntemi olarak, sismik dalga yayılım problemiyle birlikte yapı-zemin etkileşiminin sayısal simülasyonu zeminin elastik olmayan davranışını da hesaba katan düzlem şekil değiştirme koşulları altında iki boyutlu sonlu elemanların kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Modelde dinamik davranışı incelenen yapı modeli üç açıklıklı, farklı narinlik oranlarına ($H/D=0.4, 1, 2$ ve 4) sahip betonarme düzlem çerçeveli yapılar için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizlerde binanın bütün kat yükseklikleri 3 m, binanın genişliği ise her bir açıklık için 5 m olarak belirlenmiştir. Şekil 3.5’de analizler için geliştirilmiş olan sayısal model gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Problemden alınan sayısal model

Modelde dinamik davranışı incelenen üstyapının malzeme davranış özellikleri bütün analizlerde doğrusal elastik olarak ele alınmıştır. Üstyapının mekanik özelliklerine ait bilgiler Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5. Üstyapının Mekanik Özellikleri

Parametre	Sembol	Büyükük	Birim
<i>Kolonlar</i>	Eksenel rijitlik	EA	1.191×10^7 (kN)
	Eğilme rijitliği	EI	156420 (kNm ²)
<i>Kirişler</i>	Eksenel rijitlik	EA	1.191×10^7 (kN)
	Eğilme rijitliği	EI	156420 (kNm ²)
	Ağırlık	w	50 (kN/m ²)

Yapı-zemin modelleri kurulurken gevşek, orta sıkı ve sıkı zemin olarak kabul edilebilecek üç farklı zemin grubu dikkate alınmıştır. Analizlerde kullanılan zemin malzeme parametreleri Tablo 3.6 - 3.8’ de verilmiştir.

Tablo 3.6. Gevşek Zemin Mekanik Özellikleri

Parametre	Sembol	Büyükük	Birim
Birim hacim ağırlık	γ	16.67	(kN/m ³)
Elastisite modülü	E	3.45×10^4	(kN/m ²)
Kayma modülü	G	1.38×10^4	(kN/m ²)
Poisson oranı	ν	0.25	-
Basınç dalgası	V_p	156.00	m/s
Kayma dalgası	V_s	90.00	m/s
Kohezyon	c	0	(kN/m ²)
Kayma mukavemeti açısı	ϕ	33	(°)
Kabarma açısı	ψ	3	(°)
Arayüz dayanım azaltma faktörü	R_{inter}	0.67	-

Tablo 3.7. Orta Sıkı Zemin Mekanik Özellikleri

Parametre	Sembol	Büyükük	Birim
Birim hacim ağırlık	γ	18.64	(kN/m ³)
Elastisite modülü	E	3.61x10 ⁵	(kN/m ²)
Kayma modülü	G	1.38x10 ⁵	(kN/m ²)
Poisson oranı	ν	0.30	-
Basınç dalgası	V_p	505.50	m/s
Kayma dalgası	V_s	270.00	m/s
Kohezyon	c	0	(kN/m ²)
Kayma mukavemeti açısı	ϕ	35	(°)
Kabarma açısı	ψ	5	(°)
Arayüz dayanım azaltma faktörü	R_{inter}	0.67	-

Tablo 3.8. Sıkı Zemin Mekanik Özellikleri

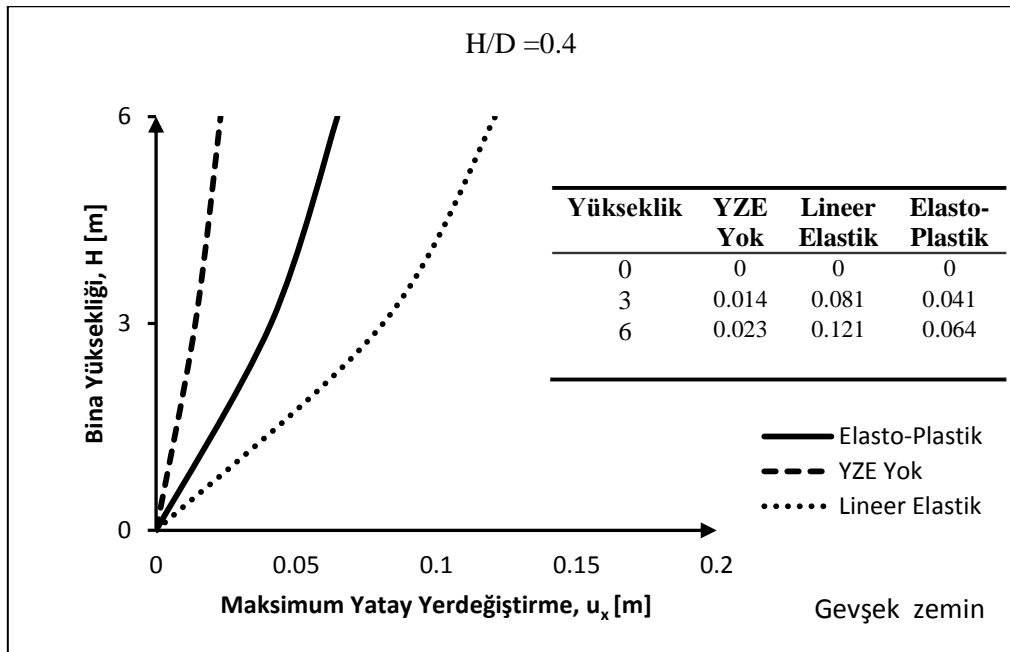
Parametre	Sembol	Büyükük	Birim
Birim hacim ağırlık	γ	20.64	(kN/m ³)
Elastisite modülü	E	5.68x10 ⁶	(kN/m ²)
Kayma modülü	G	2.10x10 ⁶	(kN/m ²)
Poisson oranı	ν	0.35	-
Basınç dalgası	V_p	2082.00	m/s
Kayma dalgası	V_s	1000.00	m/s
Kohezyon	c	30	(kN/m ²)
Kayma mukavemeti açısı	ϕ	38	(°)
Kabarma açısı	ψ	8	(°)
Arayüz dayanım azaltma faktörü	R_{inter}	0.67	-

Depremden kaynaklanan titreşim hareketlerinin üstyapıda yaratacağı etkileri değerlendirebilmek için yapı ile zeminin ortak davranışını doğrudan dikkate alarak geliştirilen sonlu eleman modeli üzerinden sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem yükünün simülasyonu ile birlikte değerlendirilen üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D [23] bilgisayar programından yararlanılmıştır. Geliştirilen matematik modelde zeminin öngörülen mekanik davranışı Mohr-Coulomb akma kriteri varsayımı altında elasto-plastik ve doğrusal elastik olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca yapı-zemin ortak sisteminin üstyapının zemine rijit bağlı olduğu durumlardaki analizleri, yapının sismik davranışını daha iyi değerlendirebilmek için zemin parametrelerini probleme dahil etmeyen ve yapının temelini ankastre mesnetlerle oluşturan SAP2000 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üstyapının her kat yüksekliğindeki

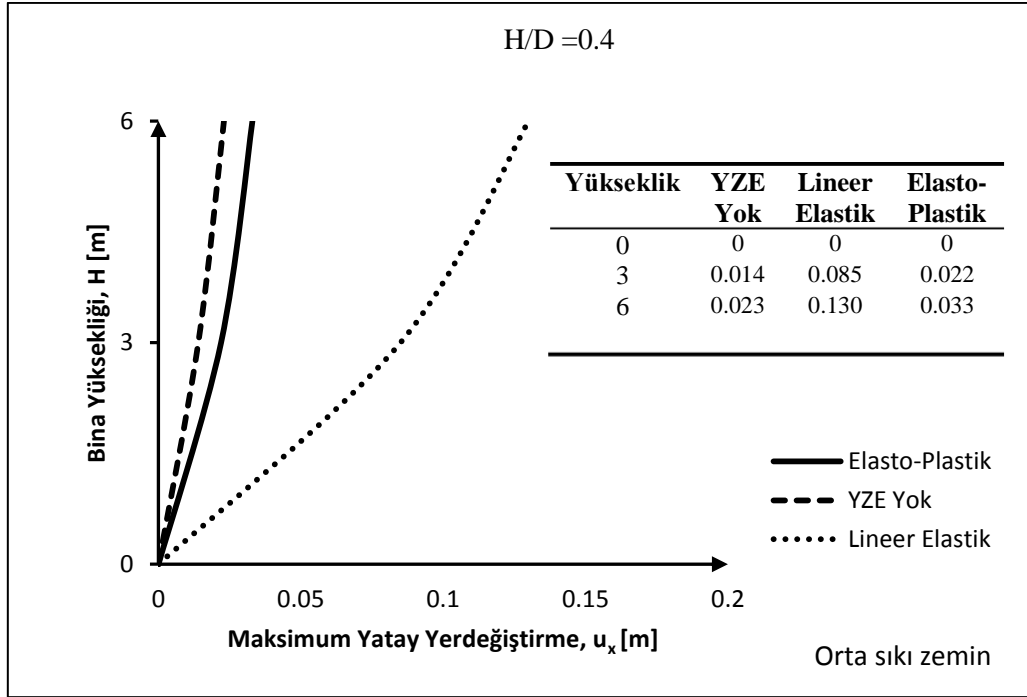
dinamik etkileri ayrı ayrı elde edilerek YZE durumlarına göre karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

3.3. Loma Depremine Maruz Örnek Yapıların Sismik Tepkileri

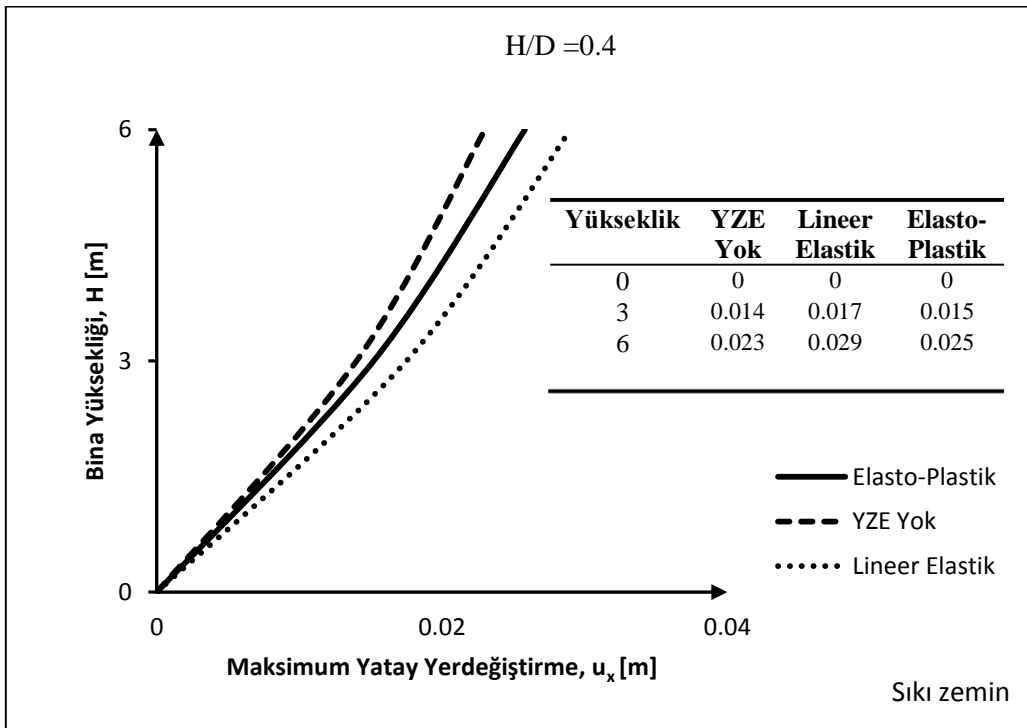
Çalışmanın ilk aşamasında Loma yer hareketi ile titreşen yapının sismik davranışı incelenmiştir. Deprem dalgalarının üstyapı yüksekliği boyunca meydana getirdiği maksimum yatay yerdeğiştirmelerin, bina narinlik oranlarına göre değişimi yapı-zemin etkileşiminde dikkate alınarak, farklı zemin modellerine göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 3.6 - 3.9).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.6. Loma depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, $H=6$ m)

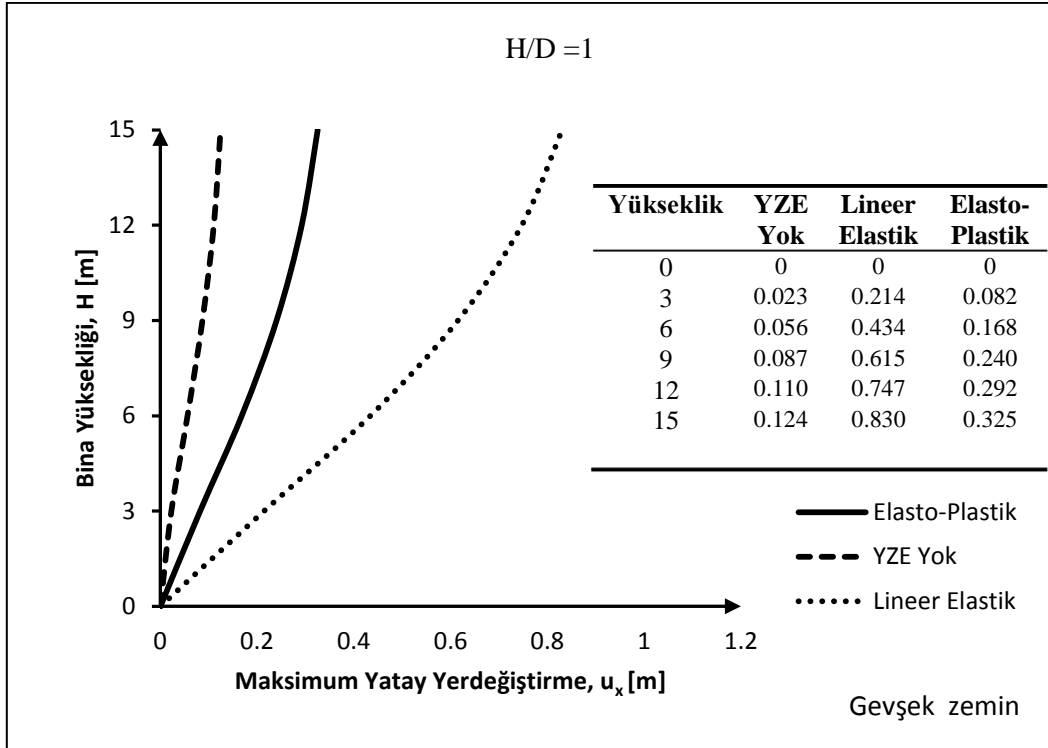
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=0.4$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak üç kata yakın artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında zeminin doğrusal elastik veya elasto-plastik malzeme modeli varsayımı da sonuçları etkilemiştir. Beklenildiği gibi doğrusal elastik zemin modeli yerdeğiştirmelerin daha büyük elde edilmesine neden olmuştur. Burada iki kat büyümüştür (Şekil 3.6a).

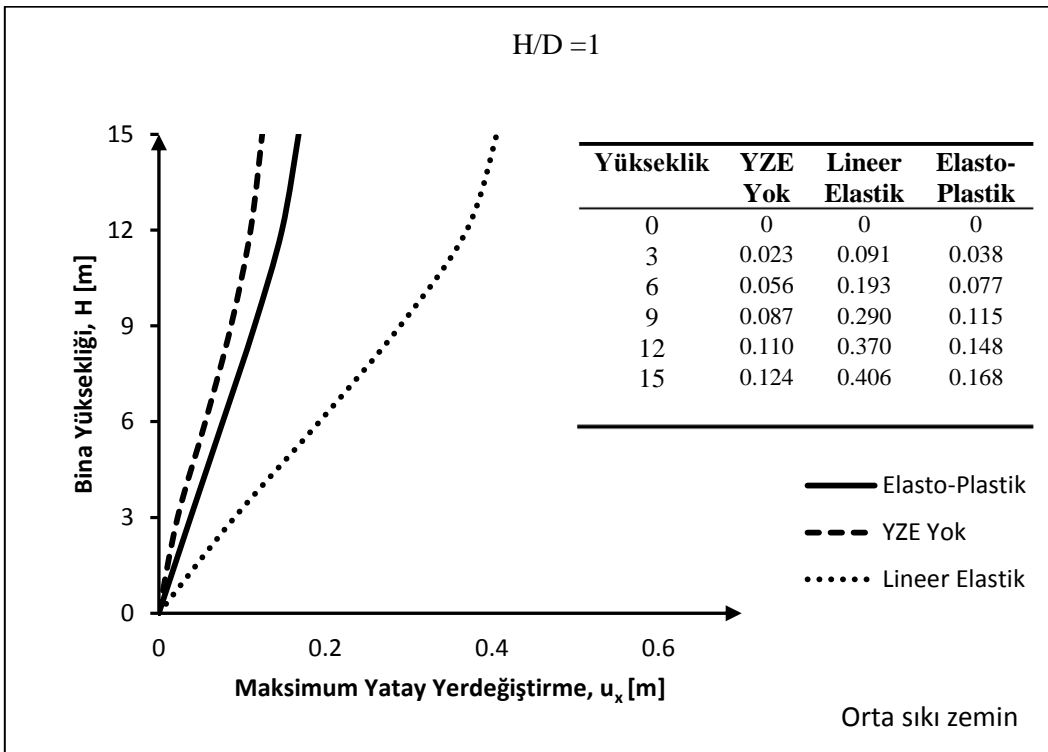
Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 45 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini 3.5 kattan fazla büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.6b).

Şekil 3.6c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 9 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 13 civarında büyüttüğü görülmektedir.

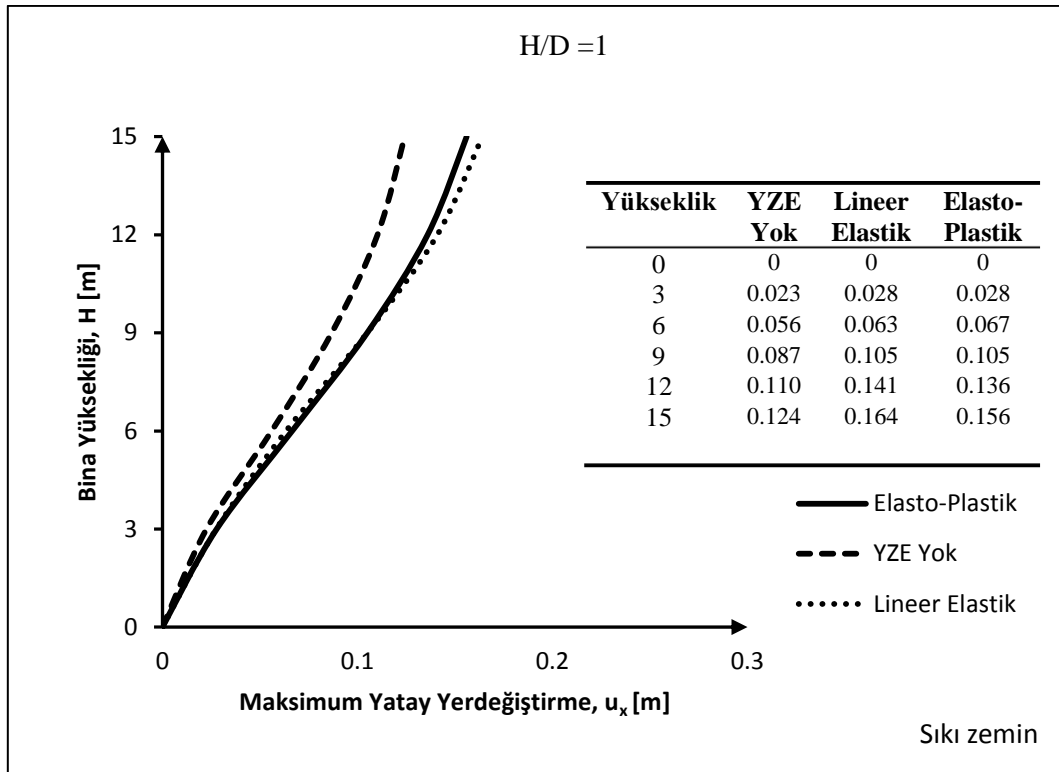
Şekil 3.6' da yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değerinden 2 kat, sıkı zemin durumundaki değerinden 2.5 kat fazladır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.7. Loma depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğıştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, $H=15$ m)

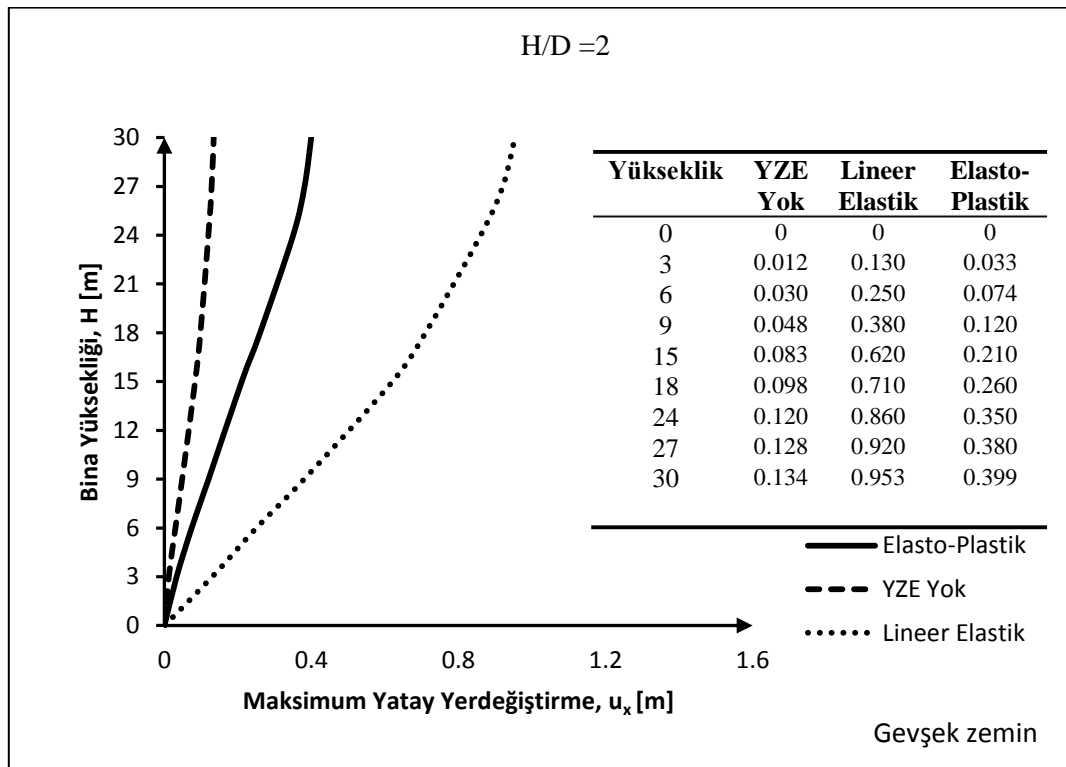
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=1$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak iki buçuk kata yakın artarak değiştiği görölmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında zeminin doğrusal elastik veya elasto-plastik malzeme modeli varsayımı da sonuçları etkilemiştir. Beklenildiği gibi doğrusal elastik zemin modeli yerdeğiştirmelerin daha büyük elde edilmesine neden olmuştur. Burada iki buçuk kat büyötmüştür (Şekil 3.7a).

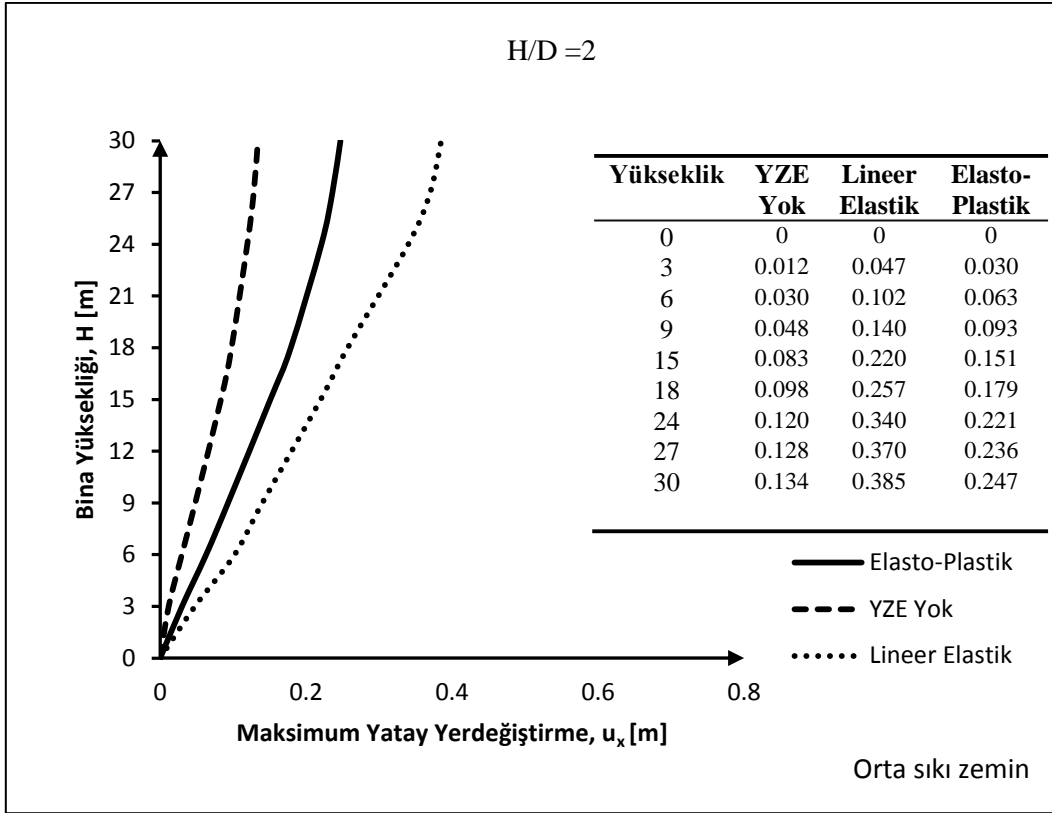
Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 35 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini 2 kattan fazla büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.7b).

Şekil 3.7c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 25 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 5 civarında büyüttüğü görülmektedir.

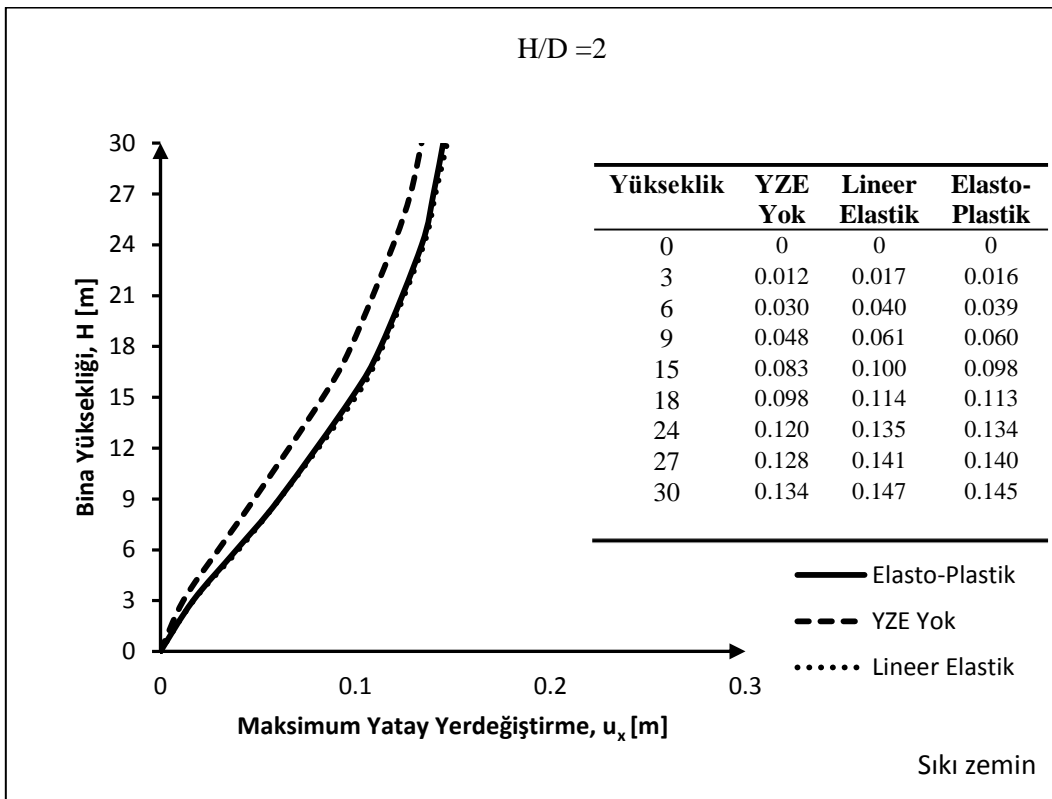
Şekil 3.7' de yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı ve sıkı zemin durumundaki değerinden 2 kat fazladır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.8. Loma depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğışirmelerinin temel zemini durumuna göre değışimi (Bina Yüksekliğı, H=30 m)

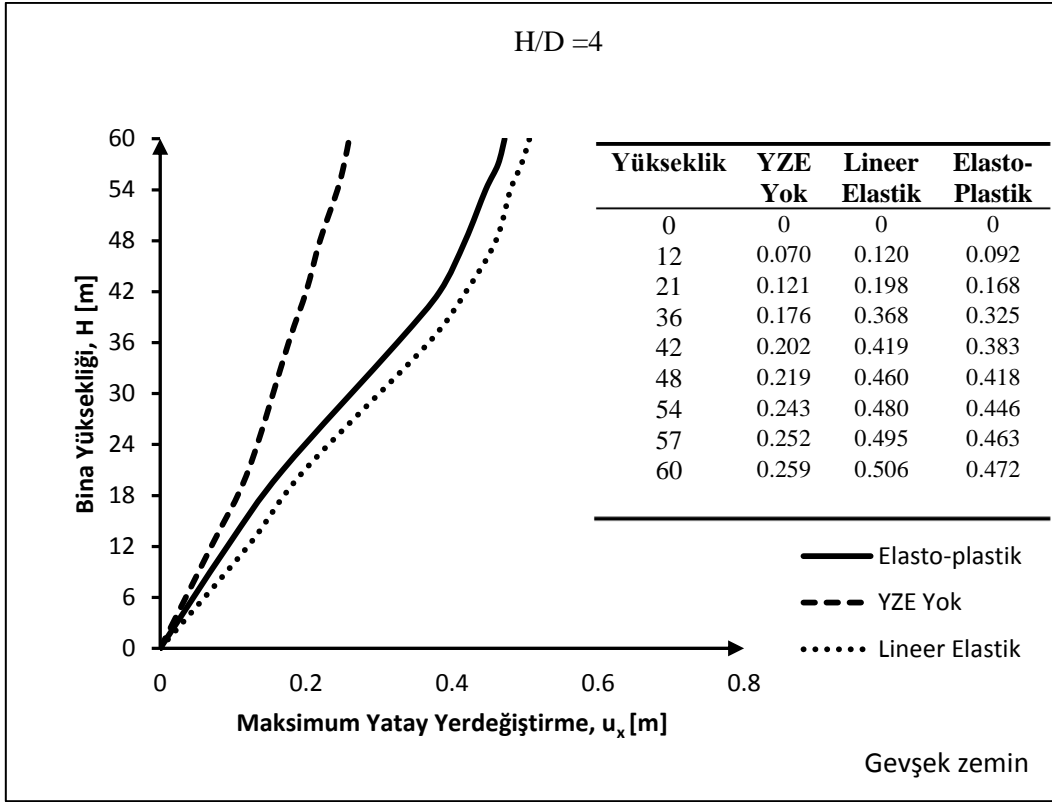
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=2$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak üç kata yakın artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında zeminin doğrusal elastik veya elasto-plastik malzeme modeli varsayımı da sonuçları etkilemiştir. Beklenildiği gibi doğrusal elastik zemin modeli yerdeğiştirmelerin daha büyük elde edilmesine neden olmuştur. Burada iki kattan fazla büyümüştür (Şekil 3.8a).

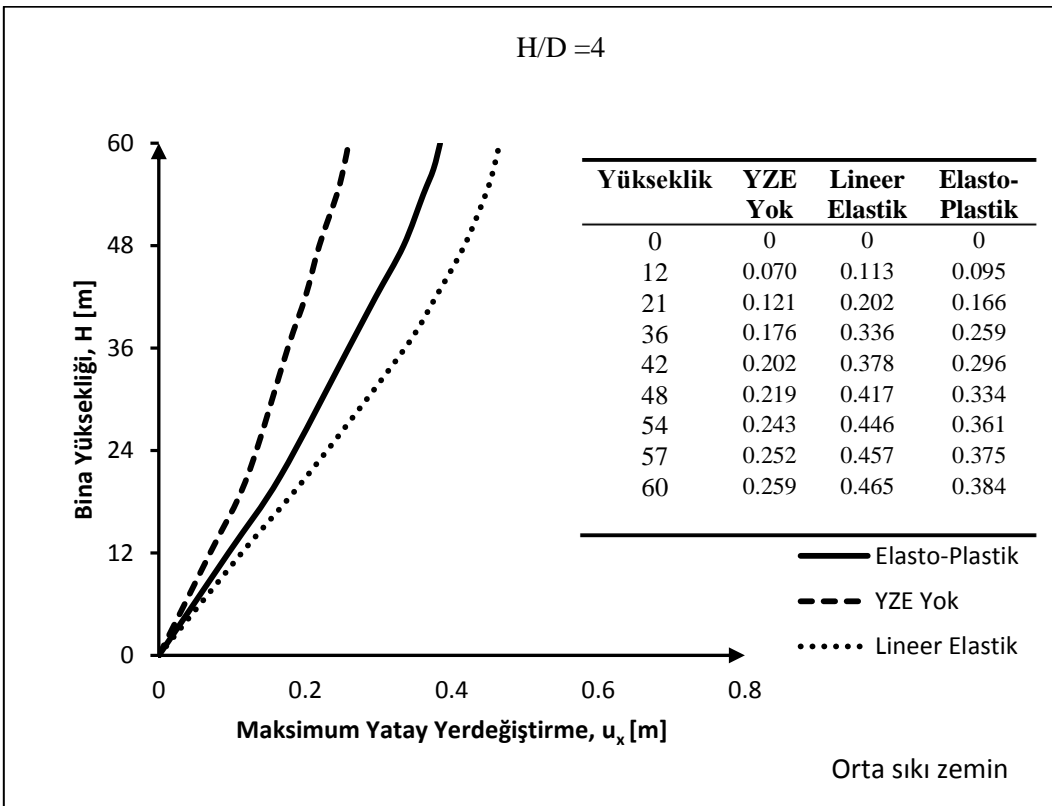
Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için 2 kat civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 55 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.8b).

Şekil 3.8c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 10 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini değiştirmediği görülmektedir.

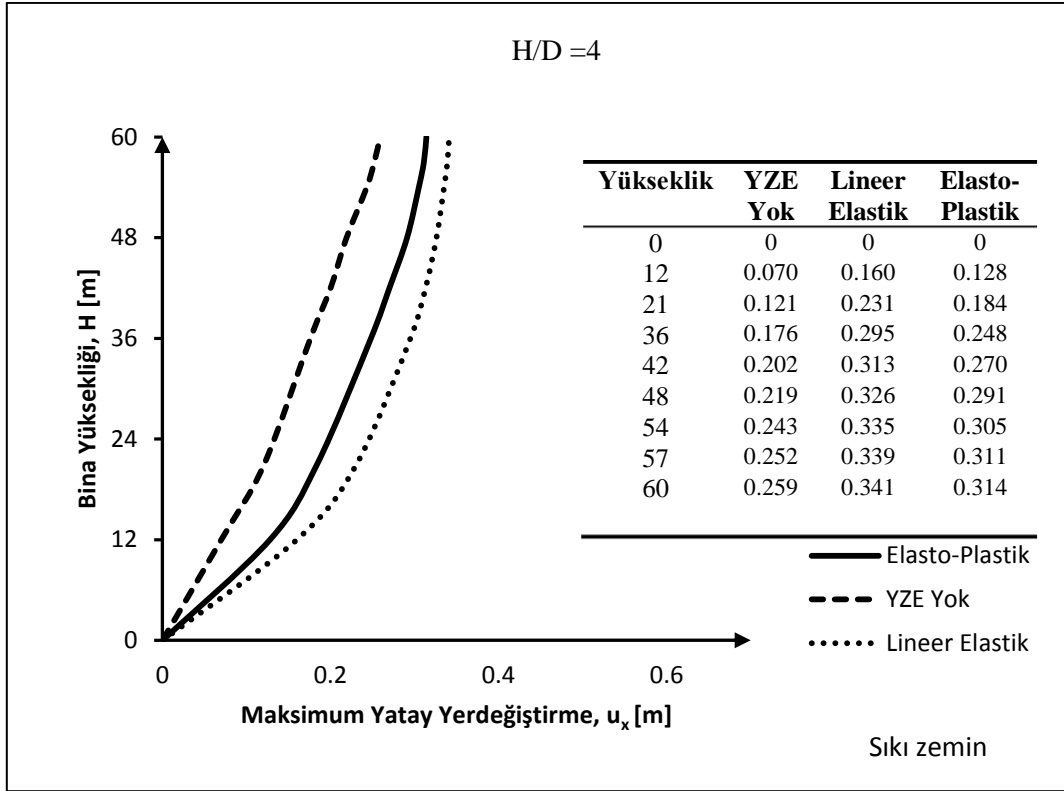
Şekil 3.8' de yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değerinden 1.5 kat, sıkı zemin durumundaki değerinden 2.5 kat fazladır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.9. Loma depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, H=60 m)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem (H/D=4) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

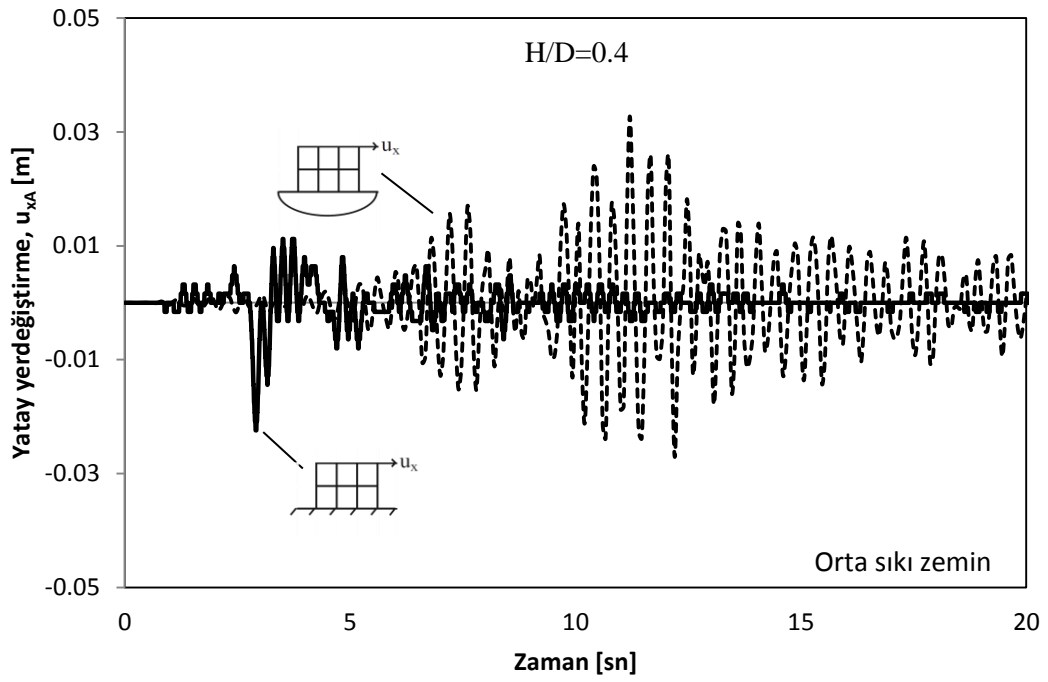
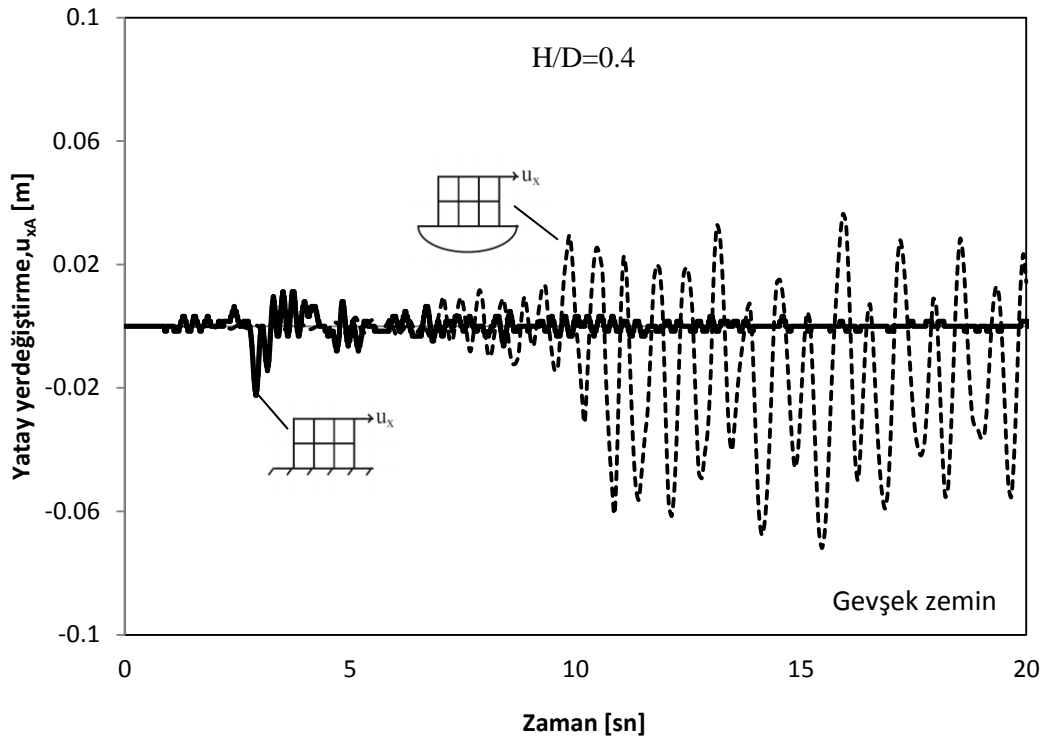
Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak % 82 civarında artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında zeminin doğrusal elastik veya elasto-plastik malzeme modeli varsayımı da sonuçları etkilemiştir. Beklenildiği gibi doğrusal elastik zemin modeli yerdeğiştirmelerin daha büyük elde edilmesine neden olmuştur. Burada % 7 büyümüştür (Şekil 3.9a).

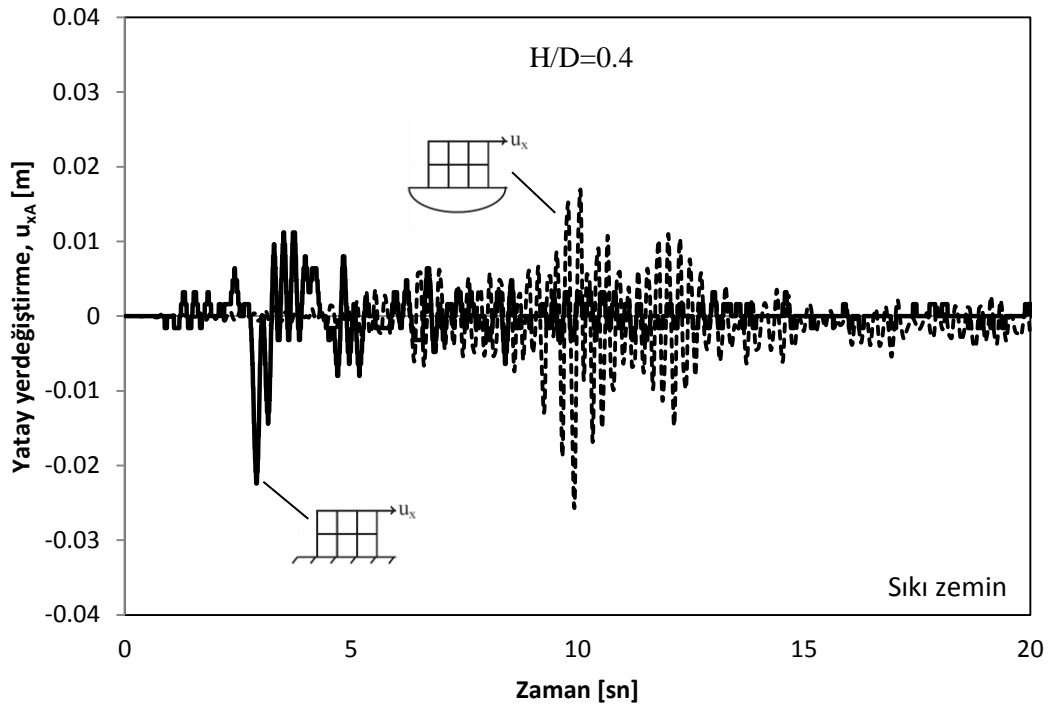
Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için 1.5 kat civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 21 civarında büyüttüğü görölmektedir (Şekil 3.9b).

Şekil 3.9c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 20 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 8 civarında büyüttüğü görölmektedir.

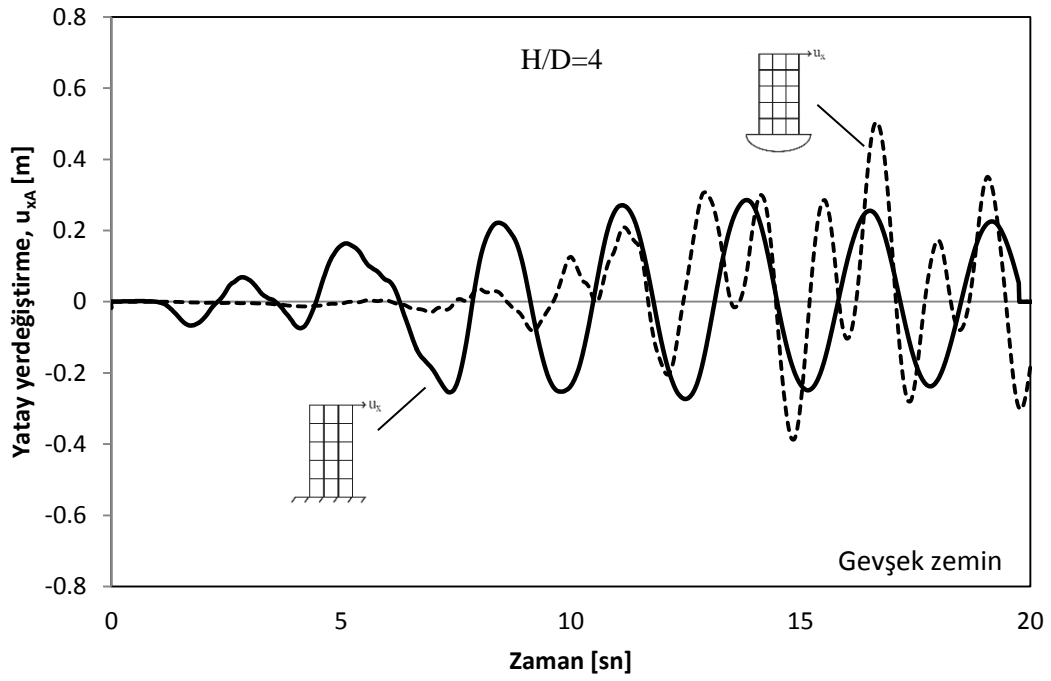
Şekil 3.9' da yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görölmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değerinden % 25, sıkı zemin durumundaki değerinden % 50 daha fazladır.

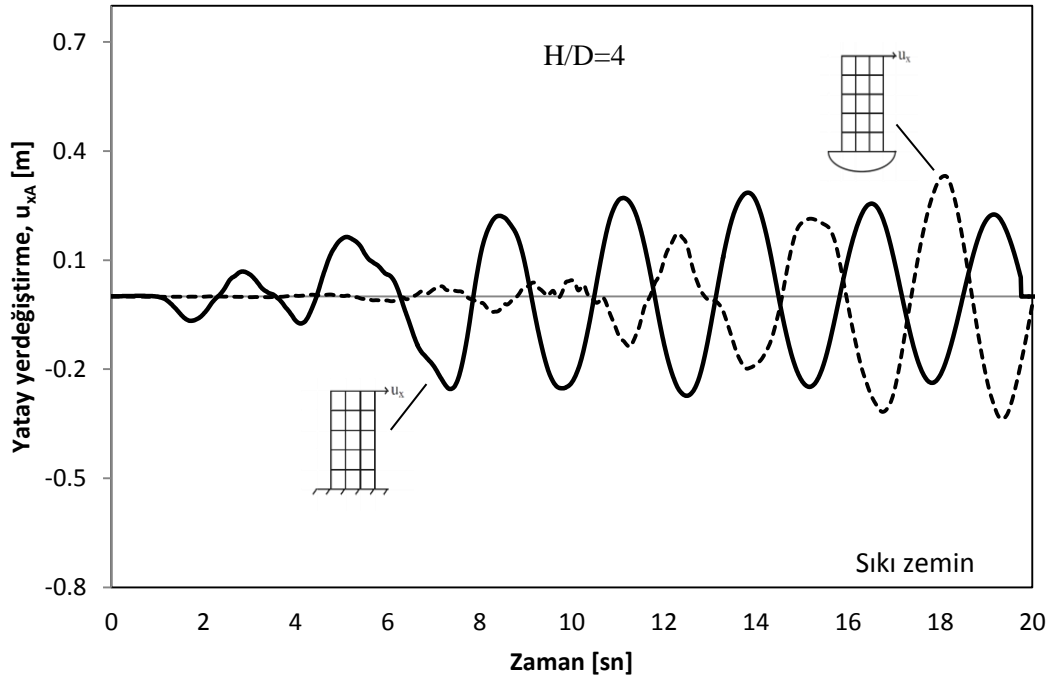
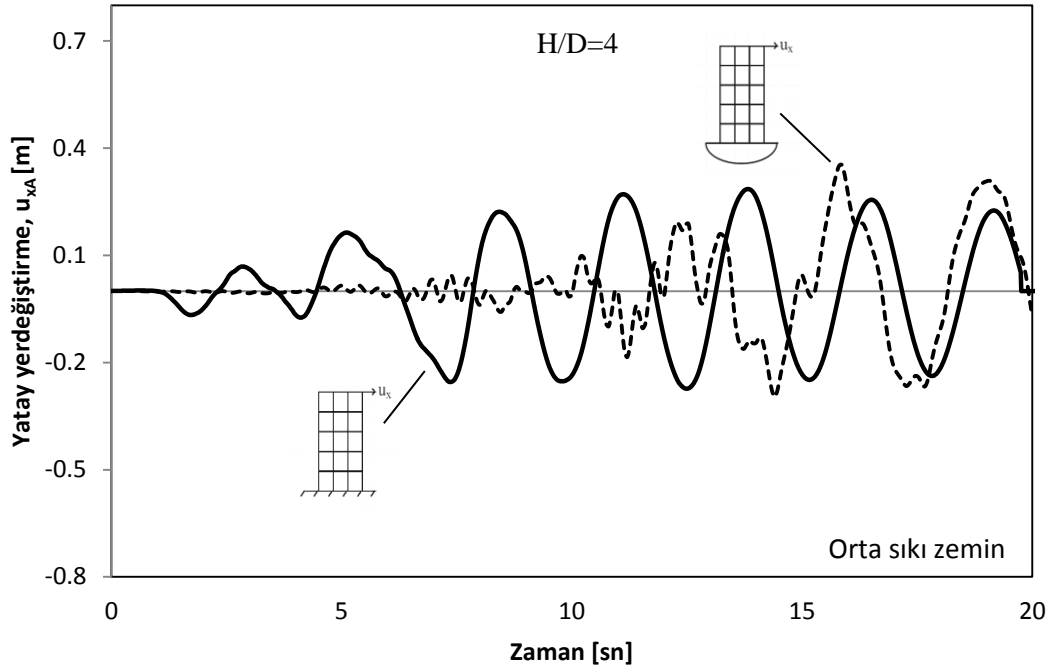
Loma yer hareketi ile titreşen basık ($H/D=0.4$) ve narin ($H/D=4$) yapılar için bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi farklı zemin özelliklerine göre Şekil 3.10 - 3.11' de gösterilmiştir.





Şekil 3.10. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi (Loma, H/D=0.4)





Şekil 3.11. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi (Loma, H/D=4)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte basık ve narin yapılar için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

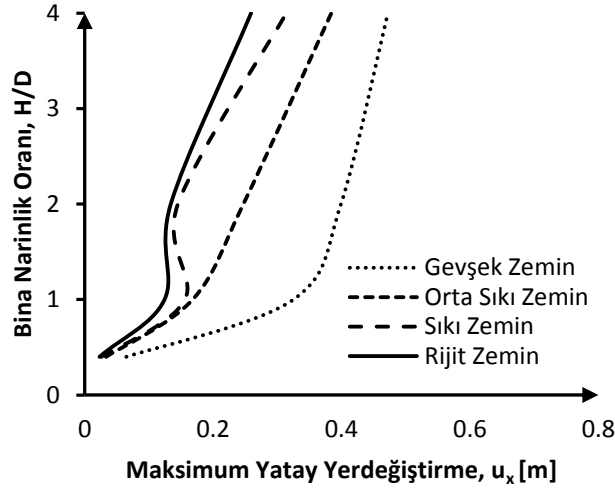
Basık yapı durumunda bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin, gevşek zemin koşulları altında, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak 3.5 kata yakın artarak değiştiği, narin yapıda ise bu değer 1.5 kat civarında olduğu görülmektedir.

Orta sıkı temel zemin koşulları altında, bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin basık yapı durumunda, rijit mesnet koşullarına göre elasto-plastik zemin modeli için % 45 civarında artarak değiştiği, narin yapıda ise bu değer yaklaşık olarak % 35 olduğu görülmektedir.

Sıkı temel zemini durumu için, bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin basık ve narin yapılarda, zemine rijit bağlı varsayımına göre elasto-plastik zemin modeli için ortalama % 15 civarında artarak değiştiği görülmektedir.

Öngörülen zemin koşullarının YZE' nin çözüm sürecine katılmasıyla birlikte üstyapının sismik tepkisini doğrudan nasıl değiştirdiği özellikle depremin etkili olduğu zaman diliminde ($t > 10$ sn) sayısal sonuçlardan açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 3.12' de örnek yapı sisteminin tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin bina narinlik oranına bağlı değişimi, Mohr-Coulomb akma kriteri varsayımı altındaki elasto-plastik zemin modeli dikkate alınarak, farklı zemin özellikleri için elde edilmiştir ve zemine rijit bağlı sistemlerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.12. Tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin bina narinlik oranına ve zemin özelliklerine bağlı değişimi (Loma Depremi)

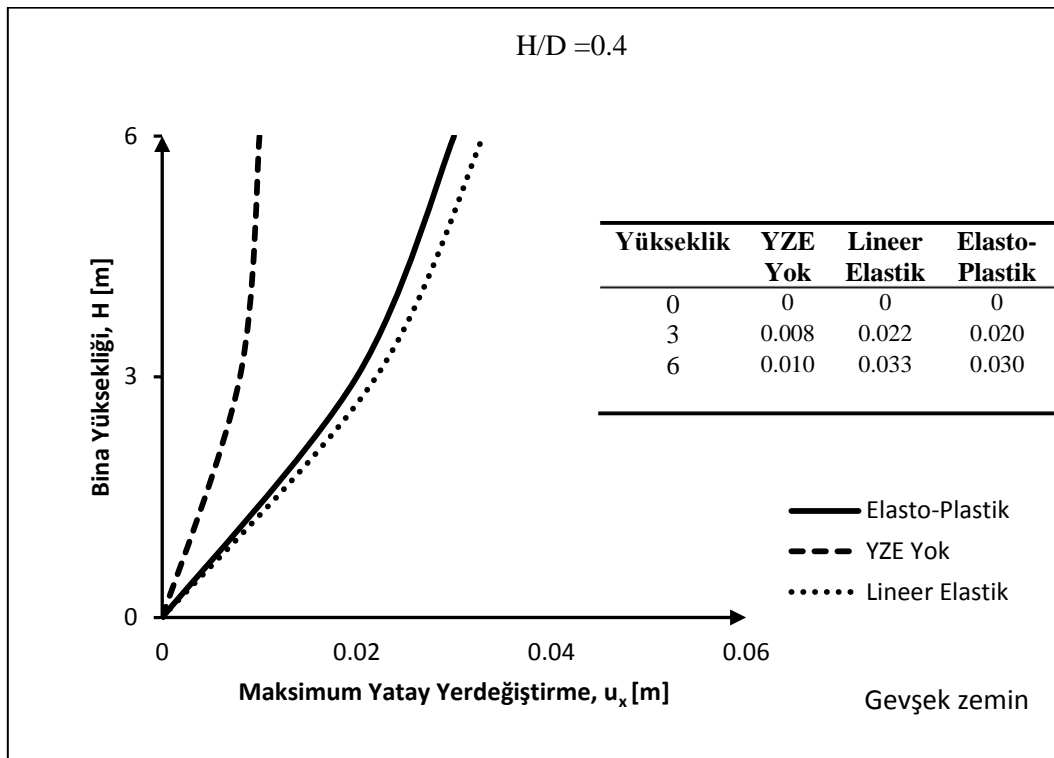
Şekildeki grafik dikkatle incelendiğinde yüksekliğe göre narinlik oranının artmasıyla birlikte, yatay yerdeğiştirme değerleri zemin koşullarına bağlı olarak artarak değiştiği görülmektedir.

Yatay yerdeğiştirmelerin bina narinlik oranına bağlı en büyük değerleri;

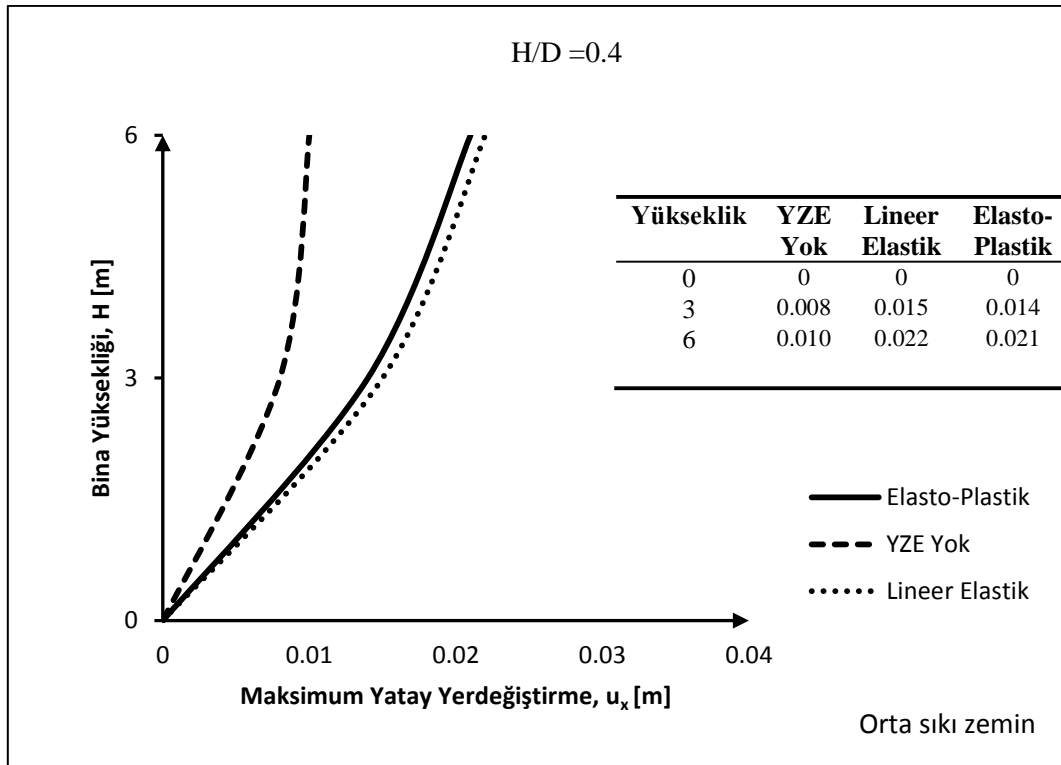
- Gevşek zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.064 m, $H/D=1$ durumunda 0.325 m, $H/D=2$ durumunda 0.399 m ve $H/D=4$ durumunda 0.472 m olduğu,
- Orta sıkı zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.033 m, $H/D=1$ durumunda 0.168 m, $H/D=2$ durumunda 0.247 m ve $H/D=4$ durumunda 0.384 m olduğu,
- Sıkı zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.025 m, $H/D=1$ durumunda 0.156 m, $H/D=2$ durumunda 0.145 m ve $H/D=4$ durumunda 0.314 m olduğu,
- Rijit zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.023 m, $H/D=1$ durumunda 0.124 m, $H/D=2$ durumunda 0.133 m ve $H/D=4$ durumunda 0.259 m olduğu gözlenmektedir.

3.4. Kocaeli Depremine Maruz Örnek Yapıların Sismik Tepkileri

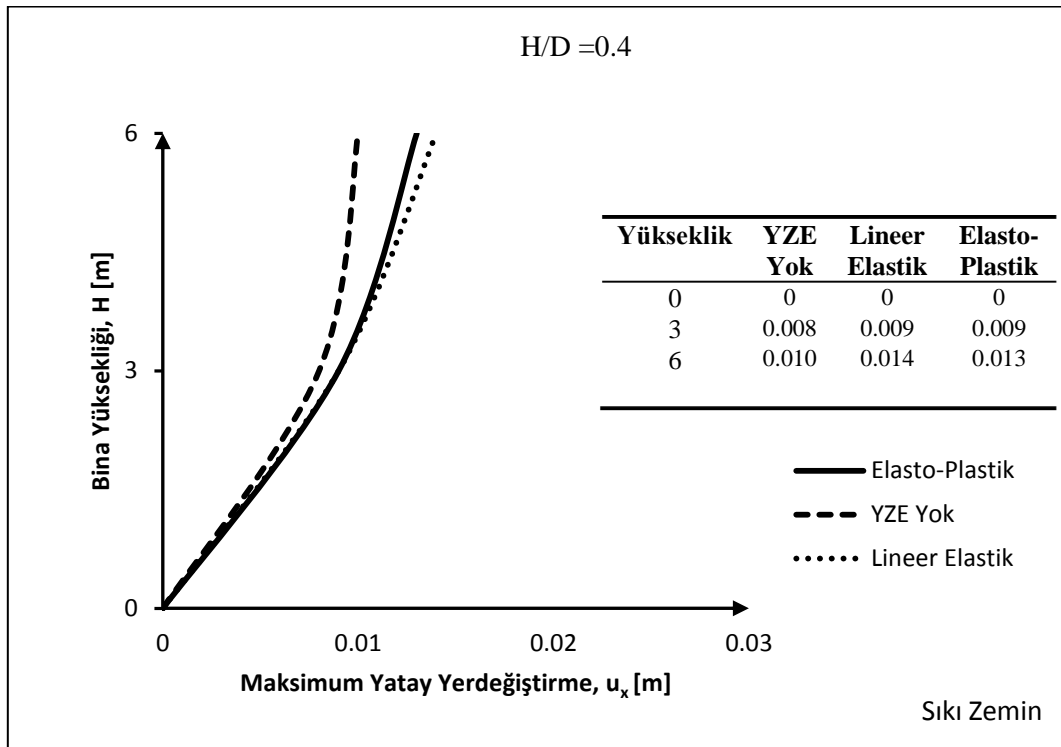
Çalışmanın bu aşamasında Kocaeli yer hareketi ile titreşen yapının sismik davranışı incelenmiştir. Deprem dalgalarının üstyapı yüksekliği boyunca meydana getirdiği maksimum yatay yerdeğiştirmelerin, bina narinlik oranlarına göre değişimi yapı-zemin etkileşiminde dikkate alınarak, farklı zemin modellerine göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 3.13 - 3.16).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.13. Kocaeli depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, $H=6$ m)

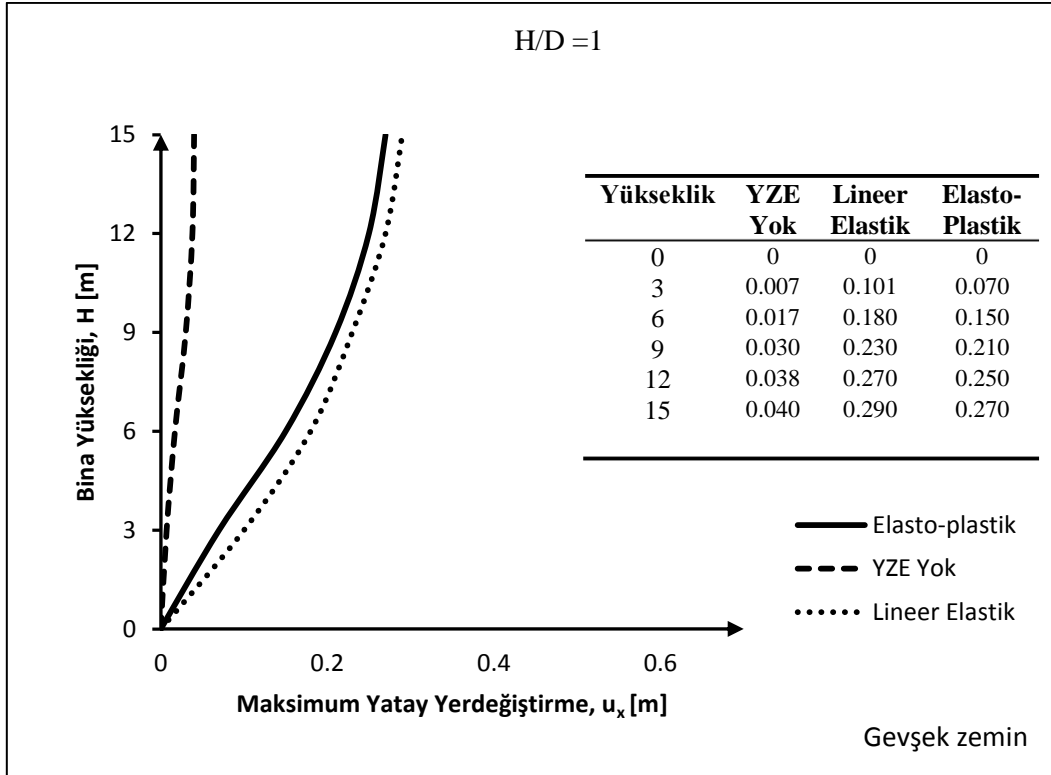
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=0.4$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak üç kat civarında artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 10 civarında büyüttüğü belirlenmiştir (Şekil 3.13a).

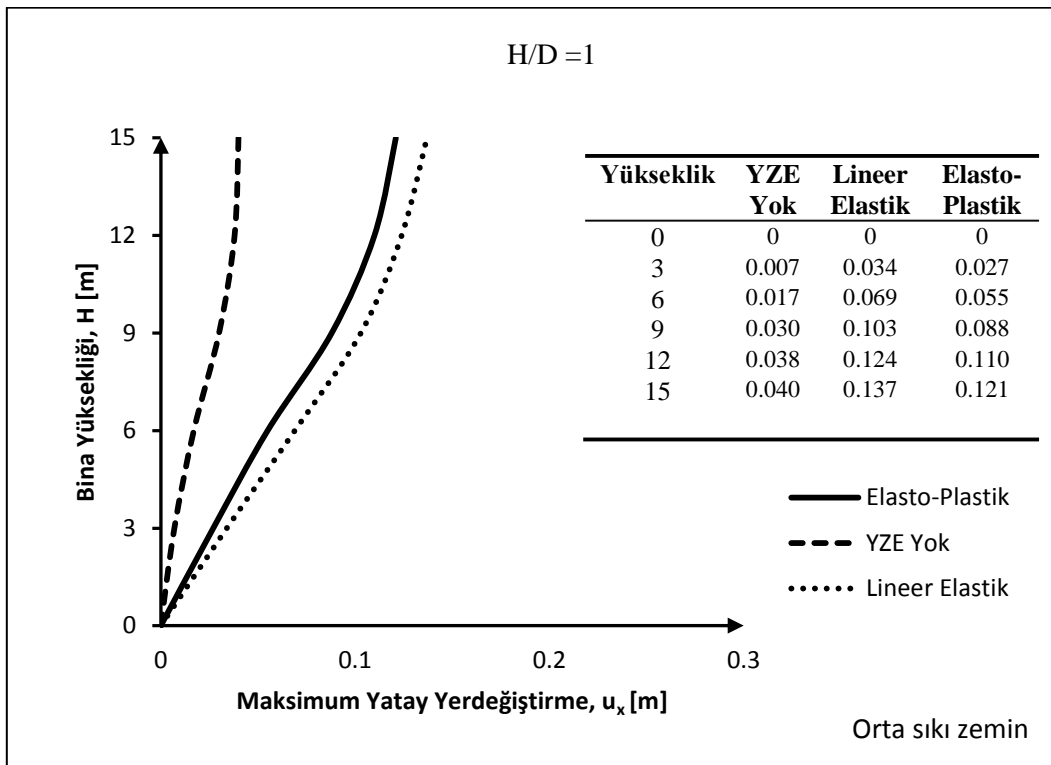
Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için 2 kat civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 5 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.13b).

Şekil 3.13c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 30 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 8 civarında büyüttüğü görülmektedir.

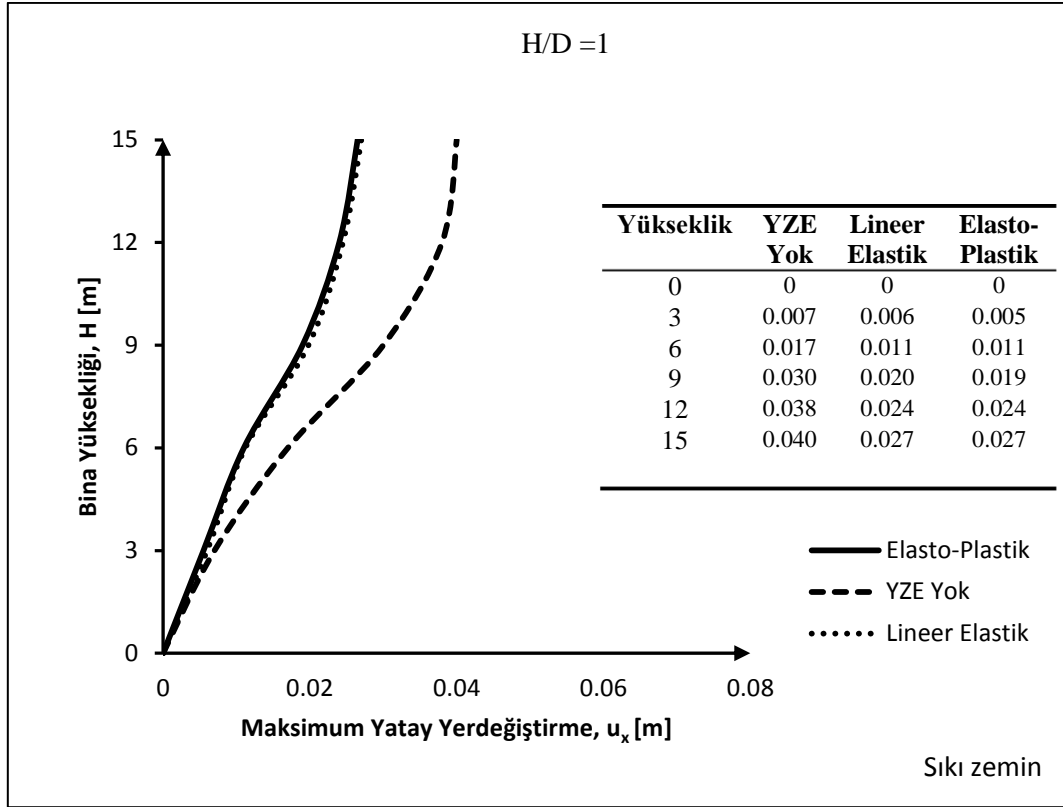
Şekil 3.13' de yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değerinden 1.5 kat, sıkı zemin durumundaki değerinden 2.5 kat fazladır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.14. Kocaeli depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, H=15 m)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem (H/D=1) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

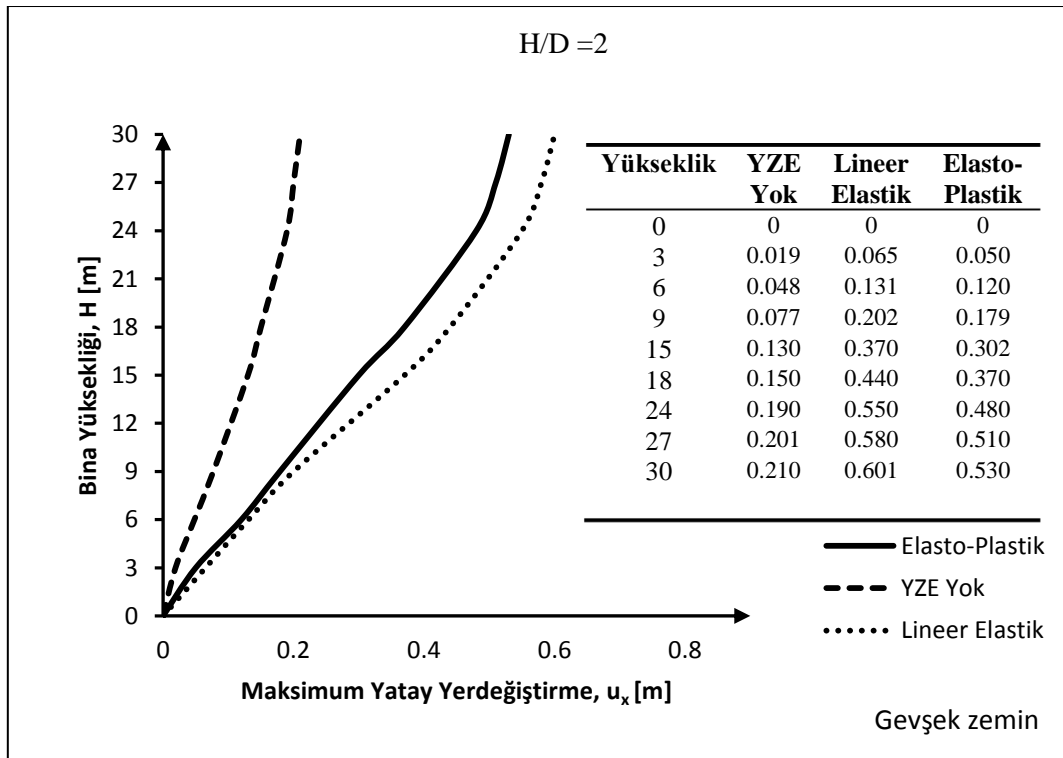
Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak 6.5 kat civarında artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 8 civarında büyüttüğü belirlenmiştir (Şekil 3.14a).

Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-

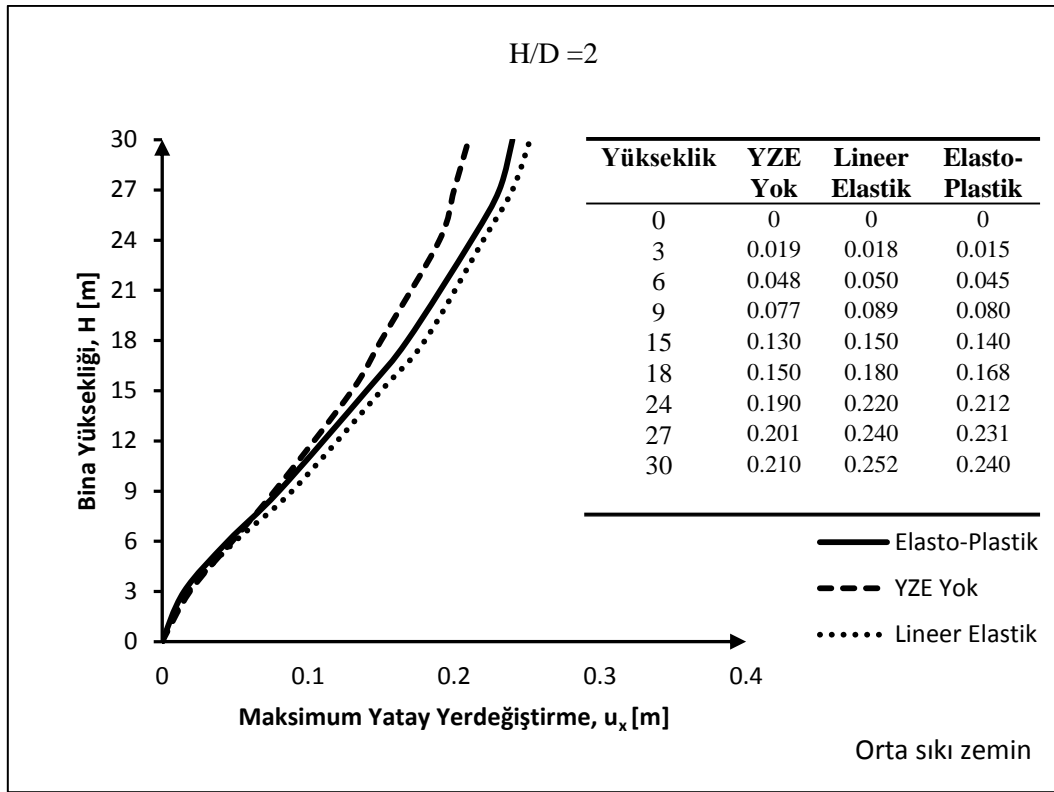
plastik zemin modeli için 3 kat civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 11 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.14b).

Şekil 3.14c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 32 civarında azaldığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin sonuçları değıştirmedığı görülmektedir.

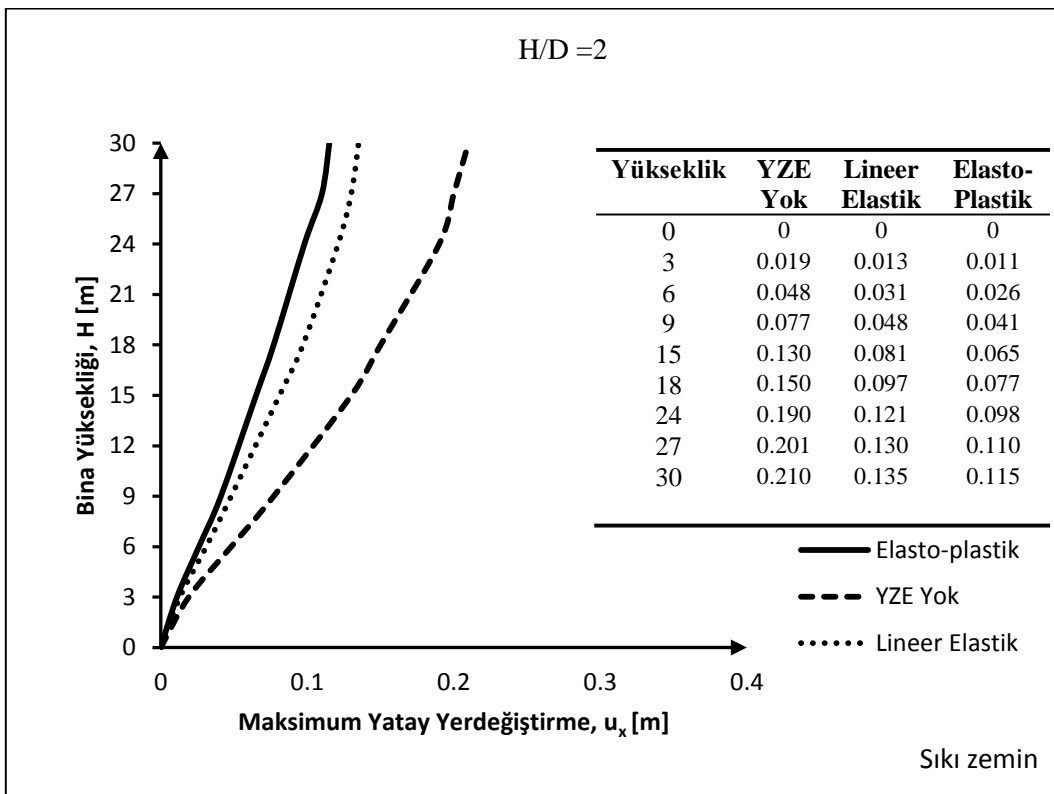
Şekil 3.14' de; yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değeriinden 2 kat, sıkı zemin durumundaki değeriinden 10 kat fazladır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.15. Kocaeli depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğıştirmelerinin temel zemini durumuna göre değışimi (Bina Yüksekliğı, $H=30$ m)

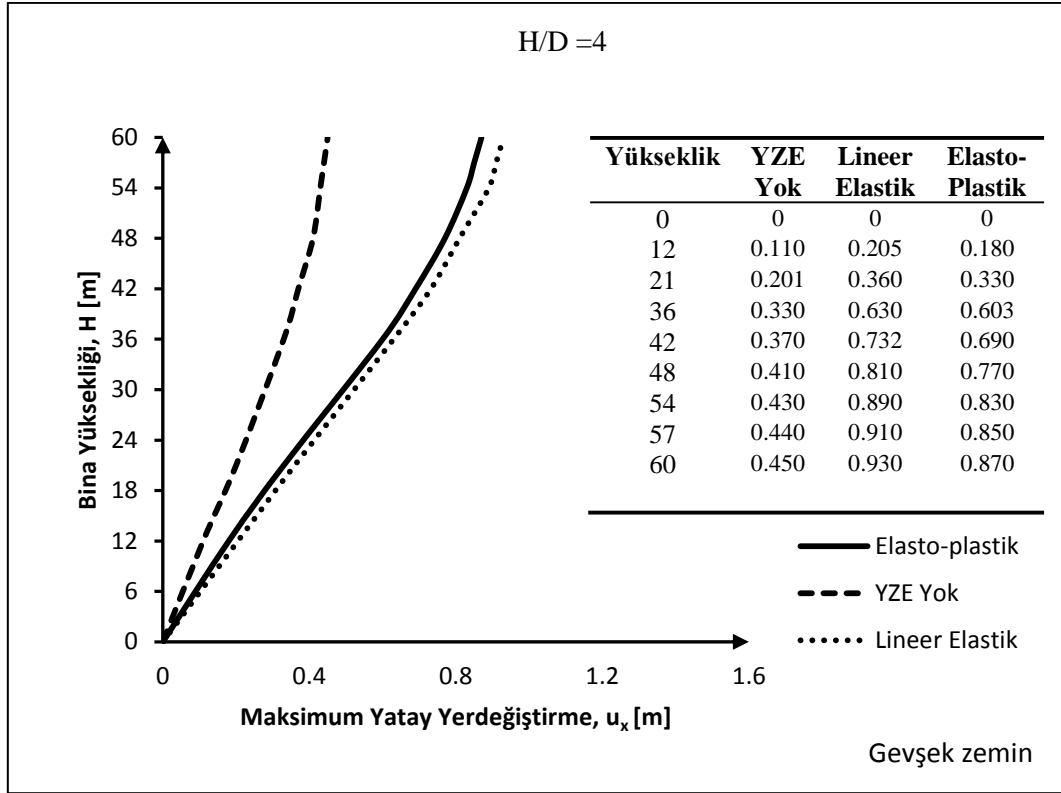
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=2$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak 2.5 kat civarında artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 12 civarında büyüttüğü belirlenmiştir (Şekil 3.15a).

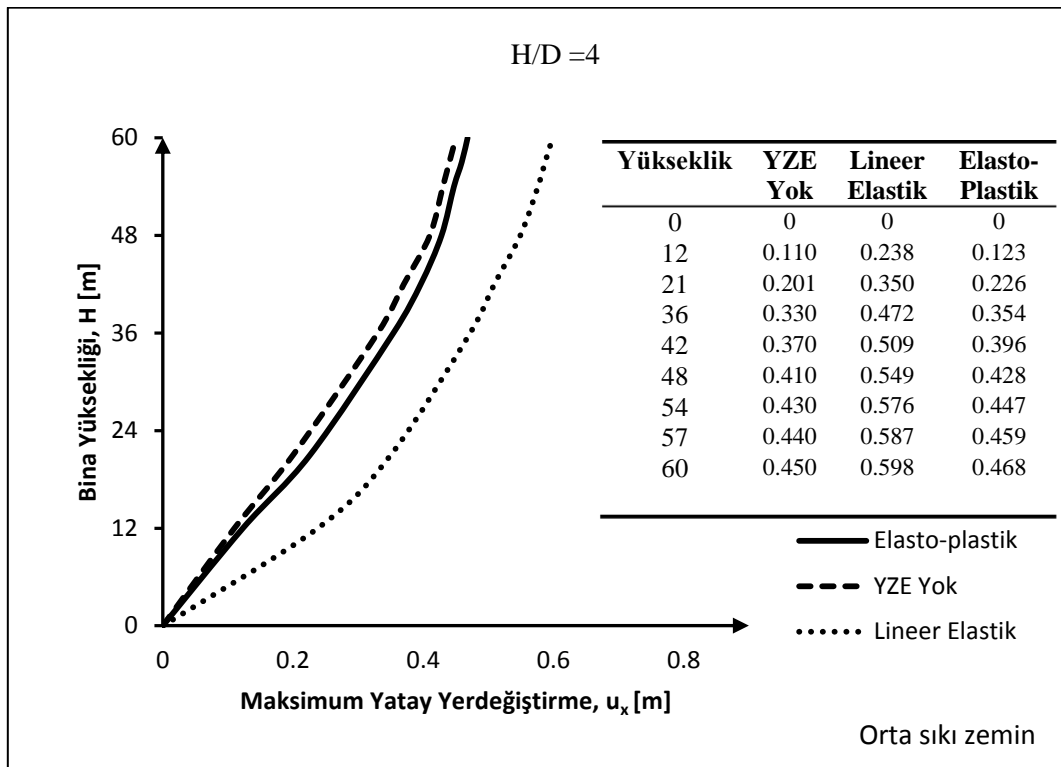
Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 14 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 5 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.15b).

Şekil 3.15c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için 2 kat civarında azaldığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 18 civarında büyüttüğü görülmektedir.

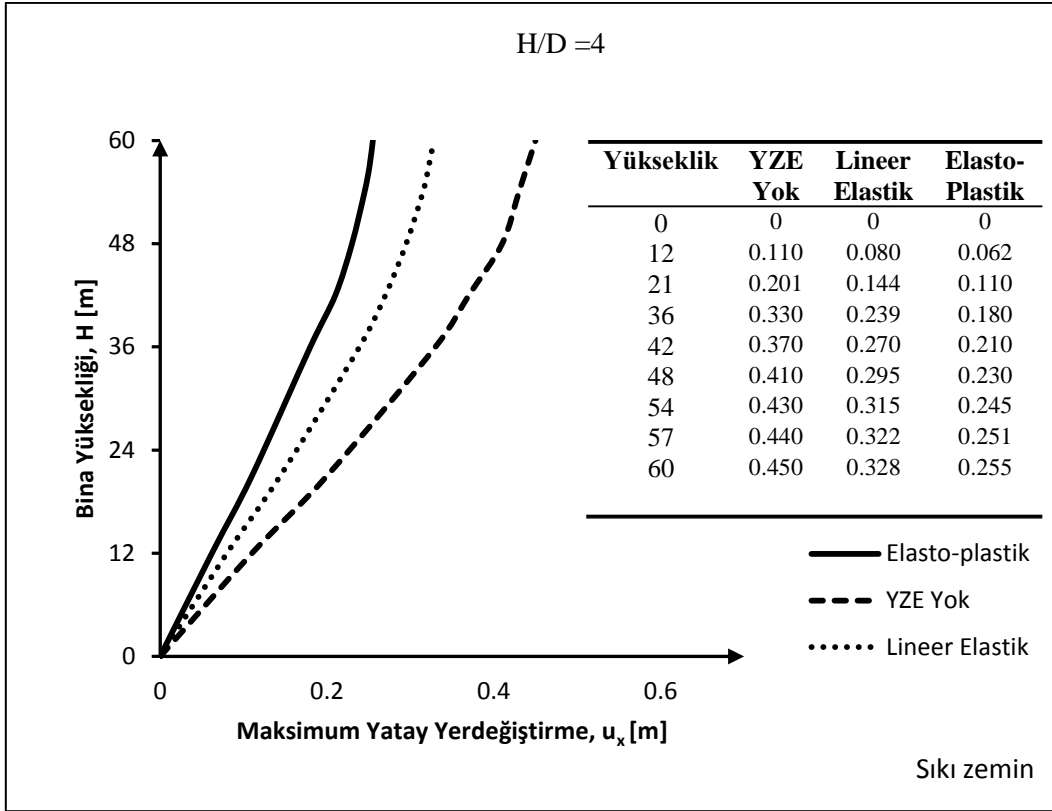
Şekil 3.15' de; yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değerinden 2 kat, sıkı zemin durumundaki değerinden 4.5 kat fazladır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.16. Kocaeli depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, $H=60$ m)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=4$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değişirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak iki kat civarında artarak değiştiği görölmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 6 civarında büyüttüğü belirlenmiştir (Şekil 3.16a).

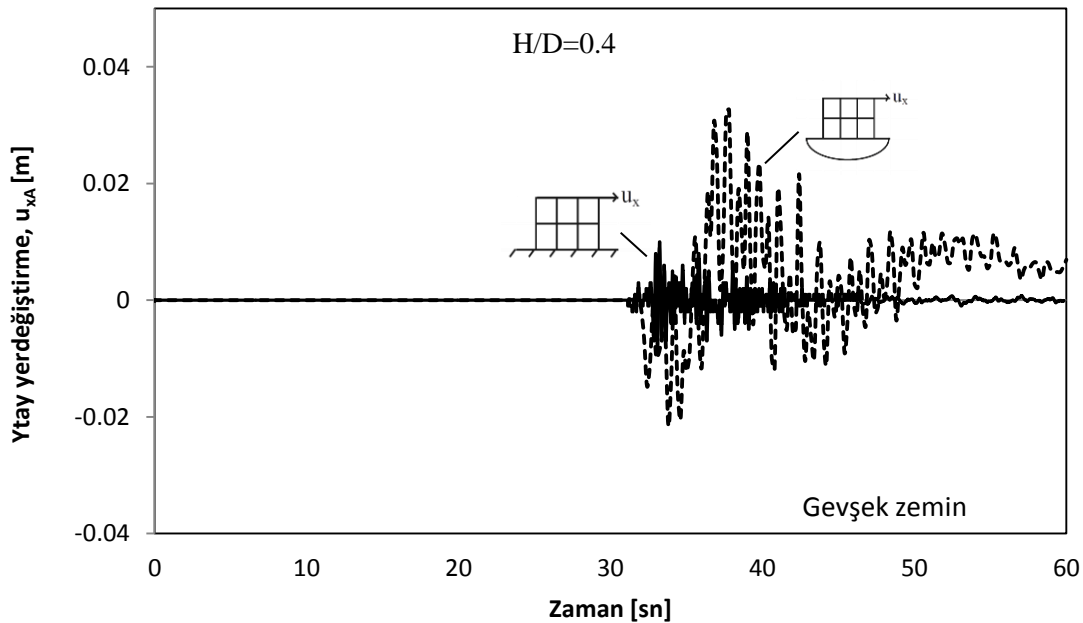
Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-

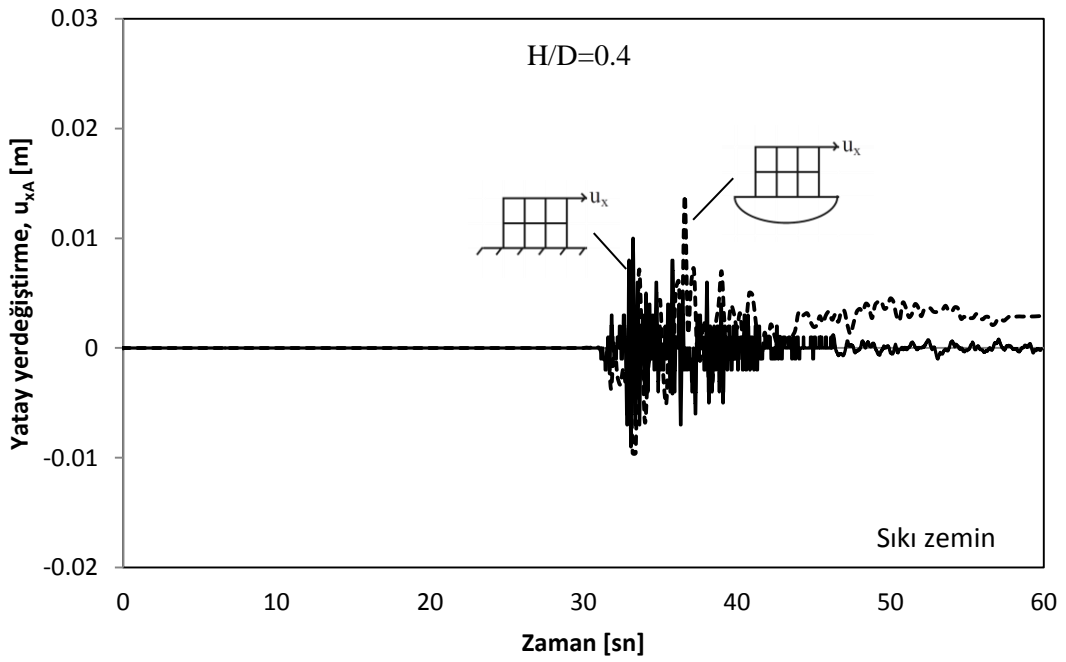
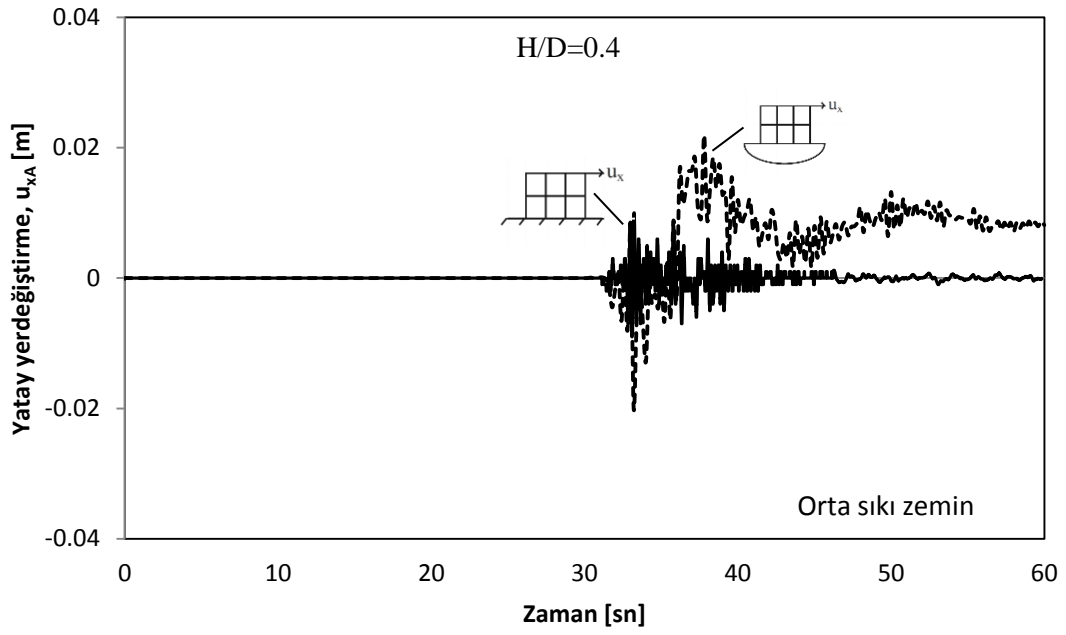
plastik zemin modeli için % 4 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 28 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.16b).

Şekil 3.16c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 43 civarında azaldığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 28 civarında büyüttüğü görülmektedir.

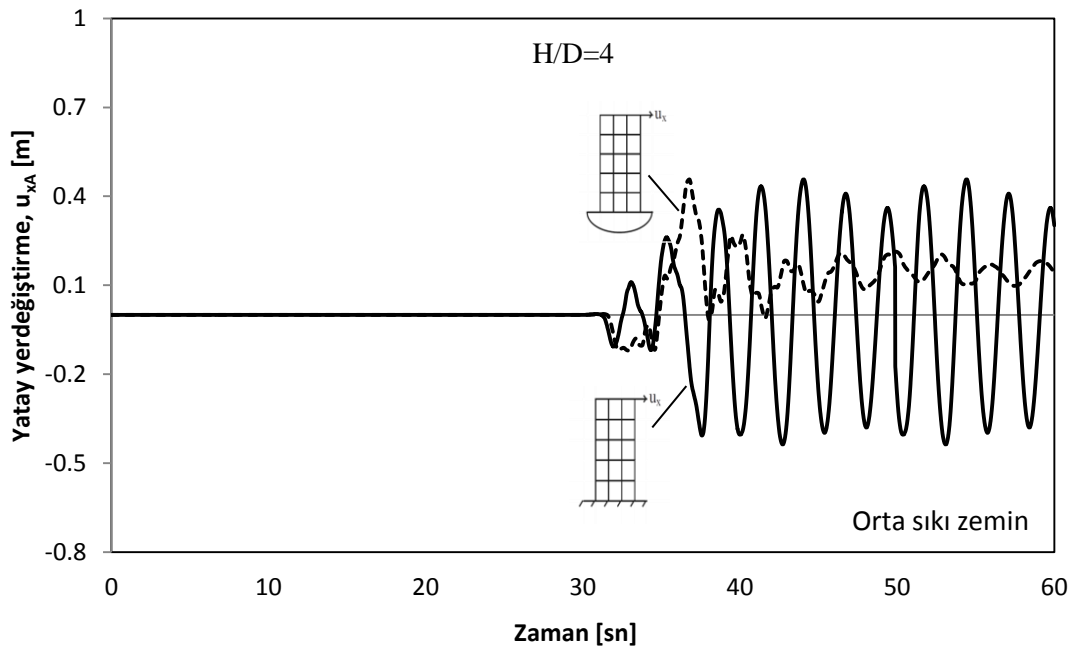
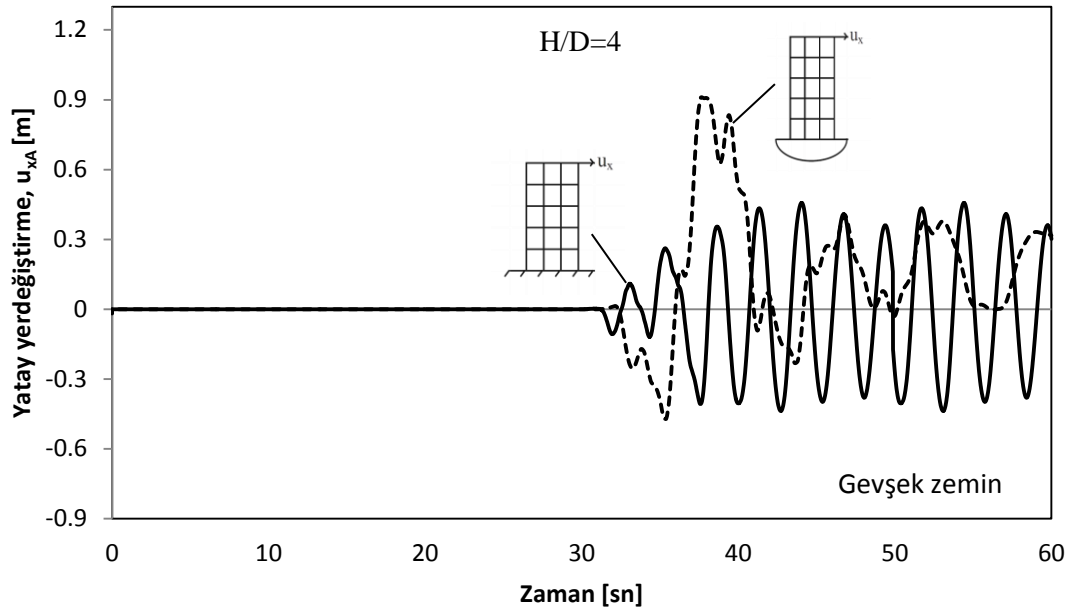
Şekil 3.16' da yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değerinden 1.5 kat, sıkı zemin durumundaki değerinden 3.5 kat fazladır.

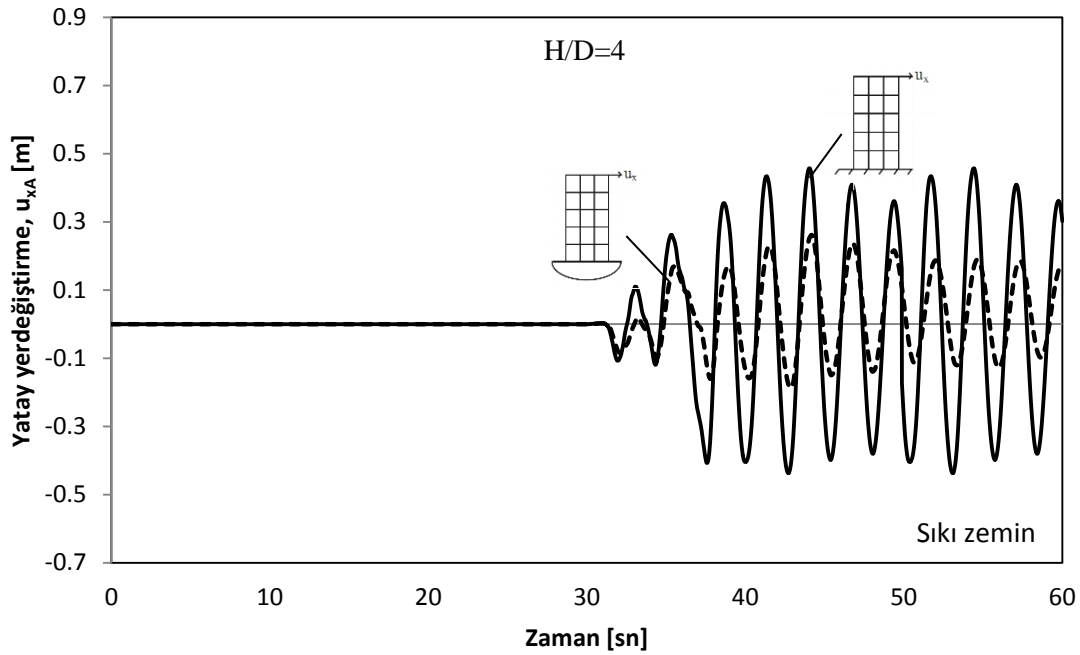
Kocaeli yer hareketi ile titreşen basık ($H/D=0.4$) ve narin ($H/D=4$) yapılar için bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi farklı zemin özelliklerine göre Şekil 3.17 – 3.18' de gösterilmiştir.





Şekil 3.17. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi (Kocaeli, $H/D=0.4$)





Şekil 3.18. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi (Kocaeli, $H/D=4$)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte basık ve narin yapılar için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

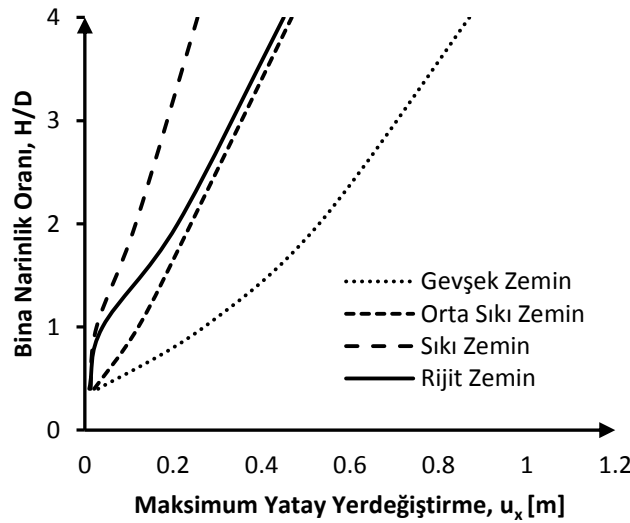
Basık yapı durumunda bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin, gevşek zemin koşulları altında, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak 3.5 kata yakın artarak değiştiği, narin yapıda ise bu değer 2 kat civarında olduğu görülmektedir.

Orta sıkı temel zemin koşulları altında, bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin basık yapı durumunda, rijit mesnet koşullarına göre elasto-plastik zemin modeli için % 10 civarında artarak değiştiği, narin yapıda ise bu değer yaklaşık olarak % 8 olduğu görülmektedir.

Sıkı temel zemini durumu için, bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin basık yapı durumunda, zemine rijit bağlı varsayımına göre elasto-plastik zemin modeli için % 39 civarında artarak değiştiği, narin yapıda ise % 33 oranında azaldığı görölmektedir.

Öngörölen zemin koşullarının YZE' nin çözümlerine katılmasıyla birlikte üstyapının sismik tepkisini doğrudan nasıl değiştirdiği özellikle depremin etkili olduğu zaman diliminde ($t > 35$ sn) sayısal sonuçlardan açık bir şekilde görölmektedir.

şekil 3.19' da bina narinlik oranına bağlı olarak örnek sistemin tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin değişimi Mohr-Coulomb akma kriteri varsayımı altındaki elasto-plastik zemin modeli dikkate alınarak farklı zemin özellikleri için verilmiştir ve zemine rijit bağlı sistemin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



şekil 3.19. Tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin bina narinlik oranına ve zemin özelliklerine bağlı değişimi (Kocaeli depremi)

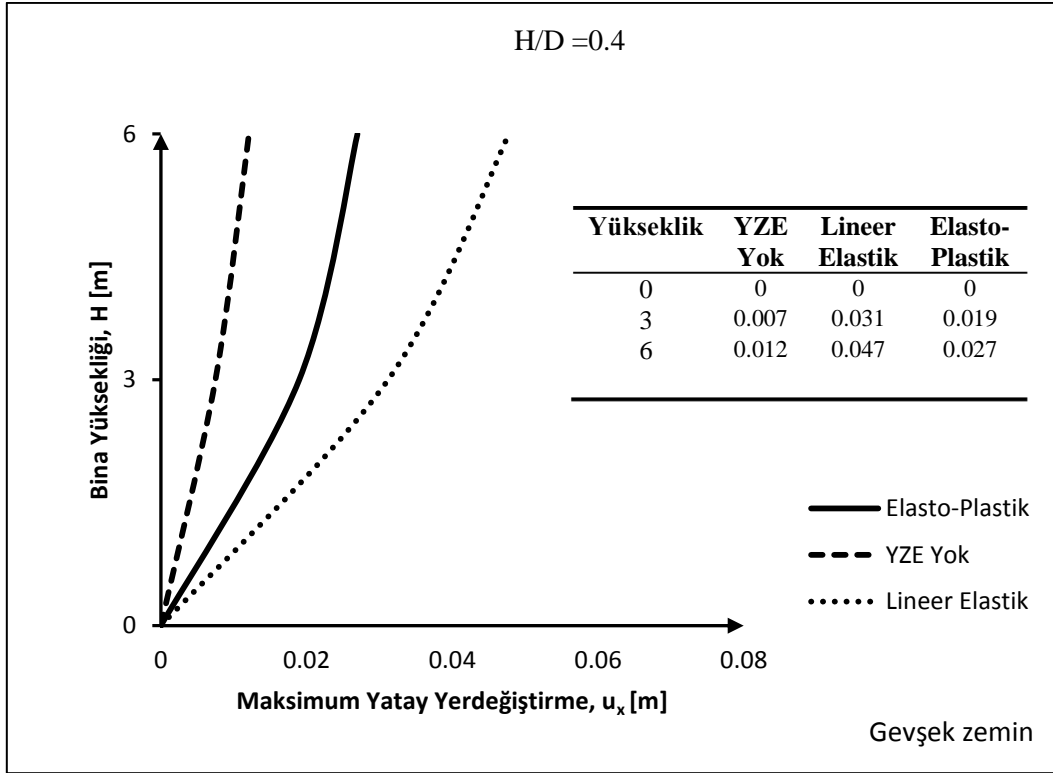
şekildeki eğri dağılımları dikkatle incelendiğinde yüksekliğe bağlı narinlik oranının artmasıyla birlikte, yatay yerdeğiştirme değerleri zemin koşullarına bağlı olarak büyüdüğü görölmektedir.

Yatay yerdeşiftirmelerin bina narinlik oranına bağlı en büyük değerleri;

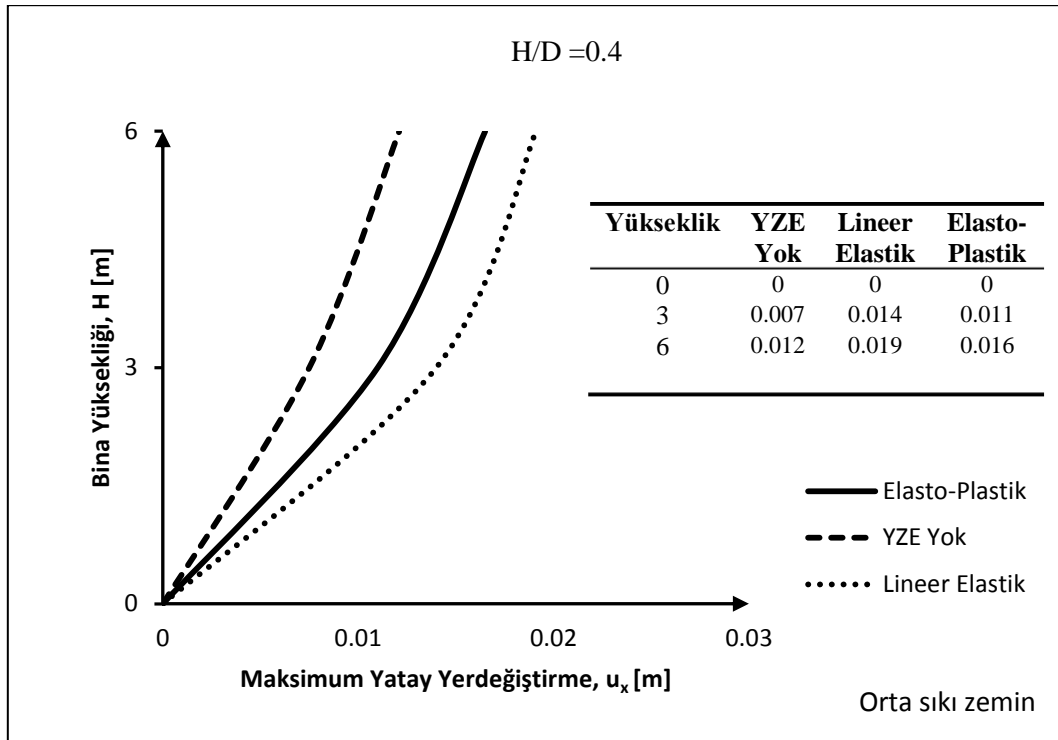
- a. Gevşek zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.030 m, $H/D=1$ durumunda 0.270 m, $H/D=2$ durumunda 0.530 m ve $H/D=4$ durumunda 0.870 m olduğu,
- b. Orta sıkı zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.021 m, $H/D=1$ durumunda 0.121 m, $H/D=2$ durumunda 0.240 m ve $H/D=4$ durumunda 0.468 m olduğu,
- c. Sıkı zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.013 m, $H/D=1$ durumunda 0.026 m, $H/D=2$ durumunda 0.115 m ve $H/D=4$ durumunda 0.255 m olduğu,
- d. Rijit zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.010 m, $H/D=1$ durumunda 0.040 m, $H/D=2$ durumunda 0.210 m ve $H/D=4$ durumunda 0.450 m olduğu gözlenmektedir.

3.5. Erzincan Depremine Maruz rnek Yapıların Sismik Tepkileri

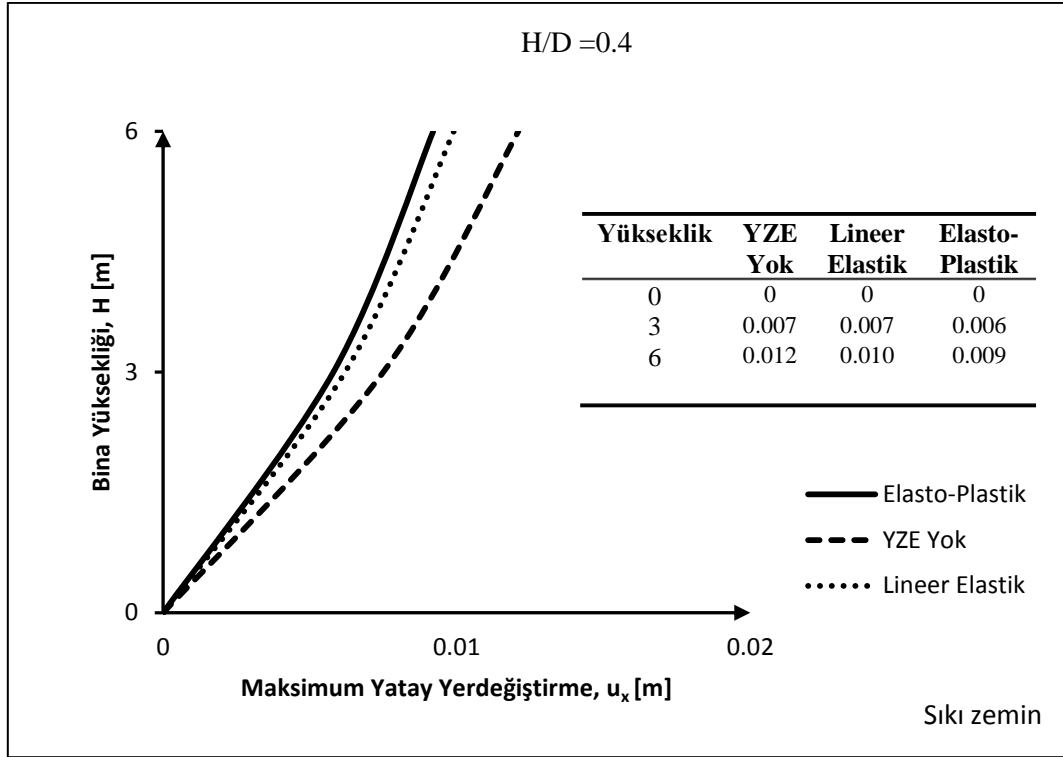
Çalışmanın son aşamasında Erzincan yer hareketi ile titreşen yapının sismik davranışı incelenmiştir. Deprem dalgalarının üstyapı yüksekliği boyunca meydana getirdiği maksimum yatay yerdeğiftirmelerin, bina narinlik oranlarına göre değişimi yapı-zemin etkileşimide dikkate alınarak, farklı zemin modellerine göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir (şekil 3.20 - 3.23).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.20. Erzincan depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, $H=6$ m)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=0.4$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

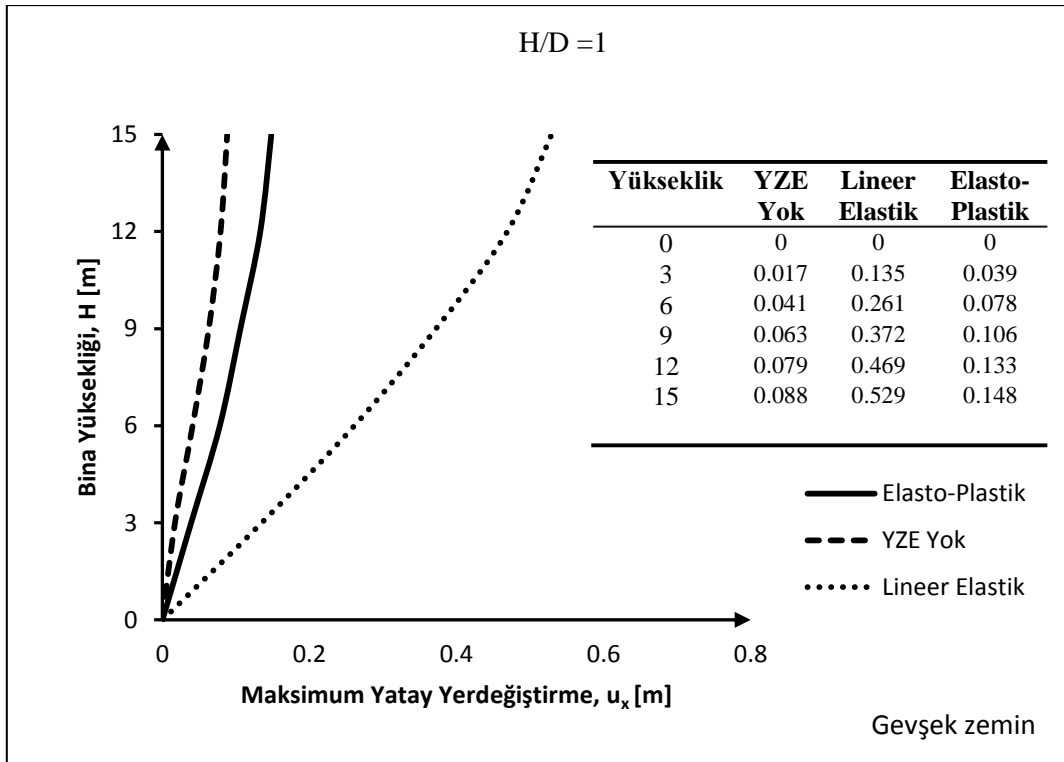
Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak iki kat civarında artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 75 civarında büyüttüğü belirlenmiştir (Şekil 3.20a).

Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-

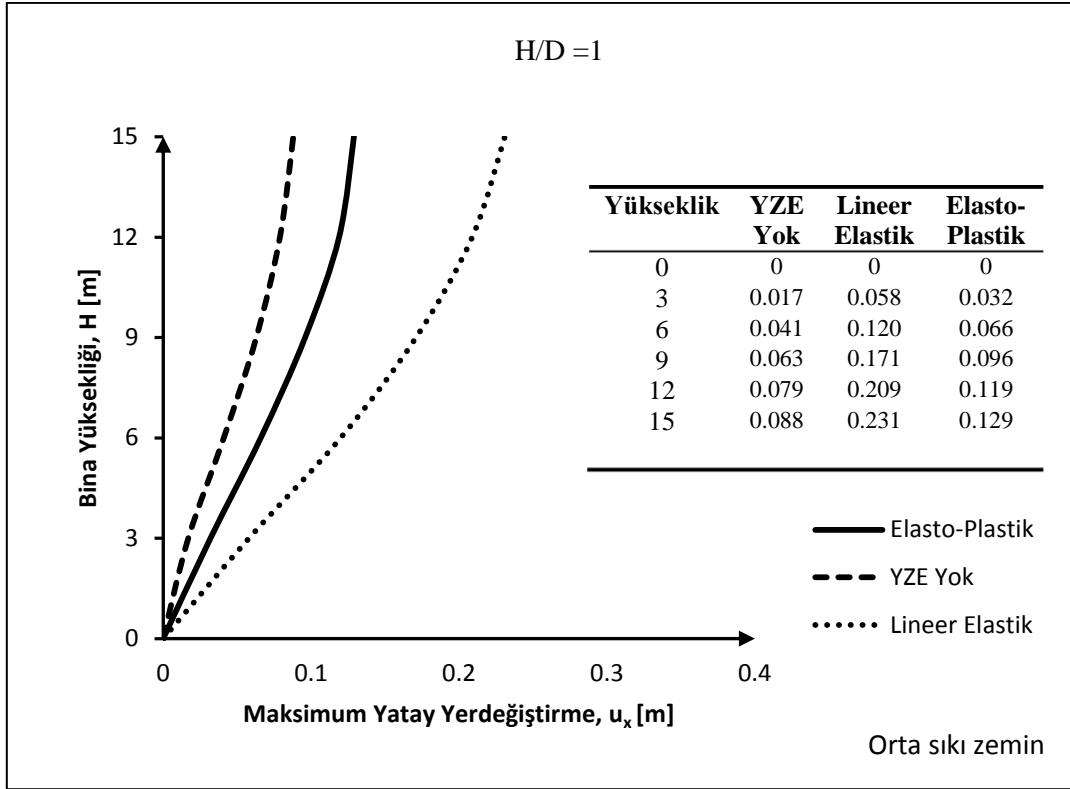
plastik zemin modeli için % 35 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 15 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.20b).

Şekil 3.20c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 23 civarında azaldığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 8 civarında büyüttüğü görülmektedir.

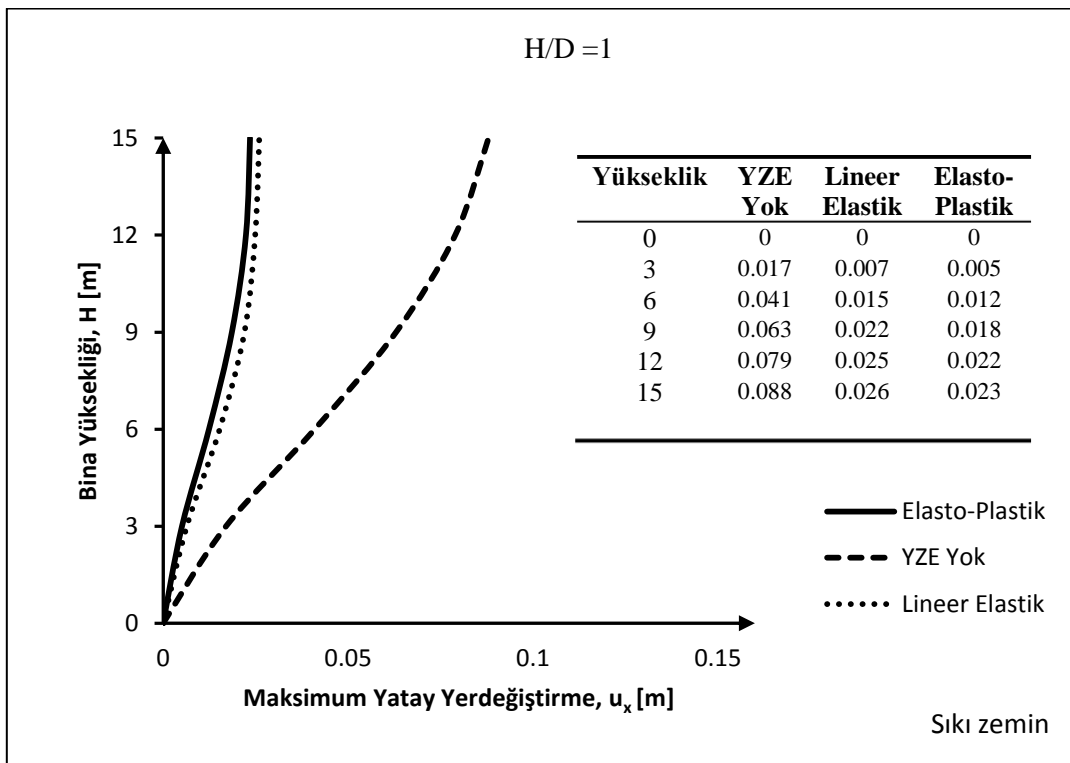
Şekil 3.20' de yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değerinden 1.5 kat, sıkı zemin durumundaki değerinden 3 kat fazladır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.21. Erzincan depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğıştirmelerinin temel zemini durumuna göre değışimi (Bina Yüksekliğı, H=15 m)

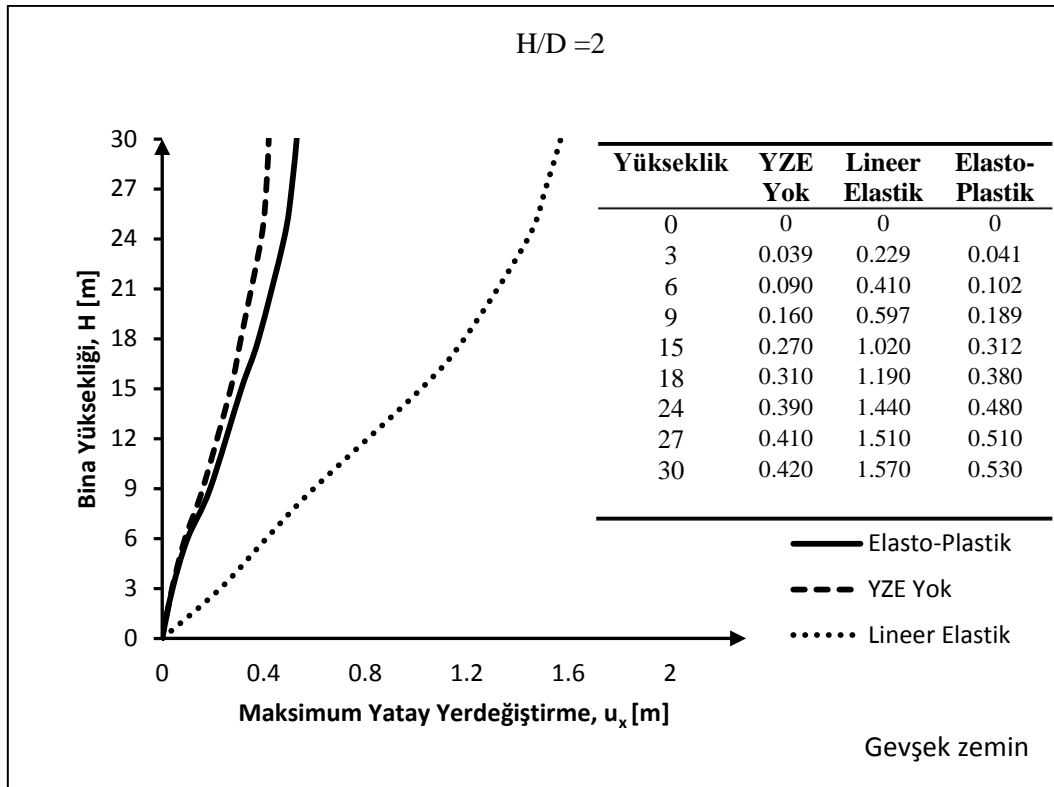
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=1$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için 1.5 kattan fazla artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini 3.5 kat civarında büyüttüğü belirlenmiştir (Şekil 3.21a).

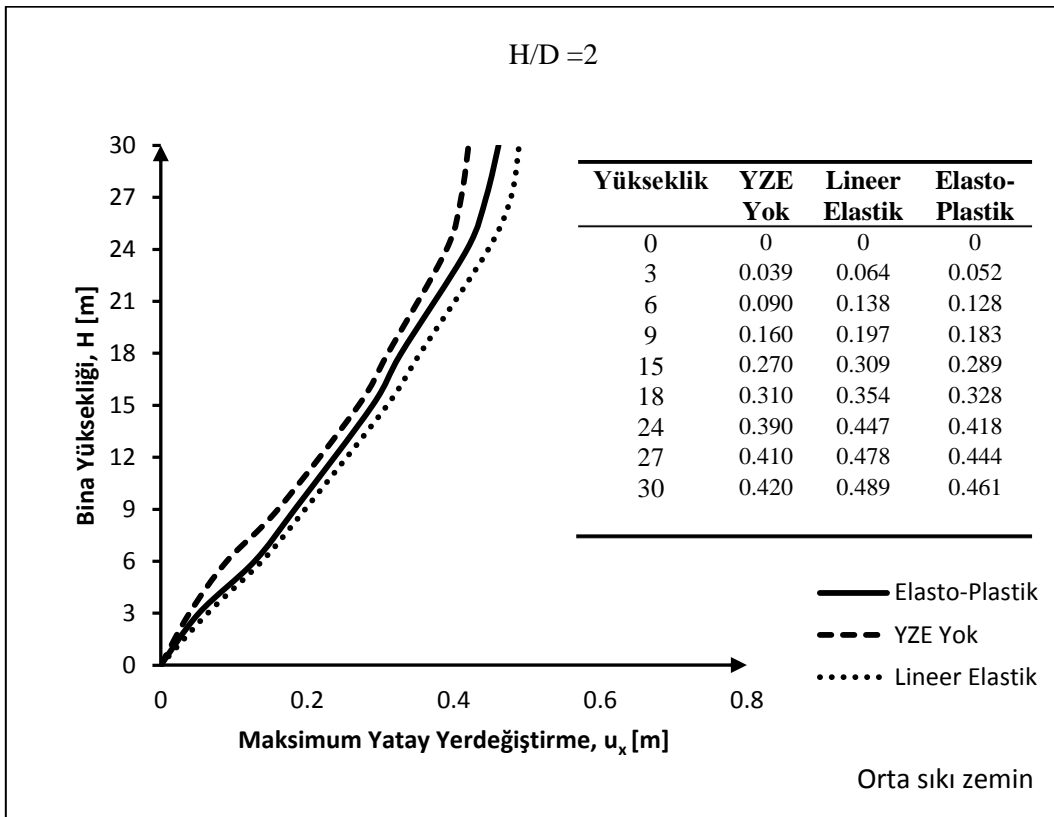
Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için 1.5 kat civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 80 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.21b).

Şekil 3.21c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için 3.5 kat civarında azaldığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 10 civarında büyüttüğü görülmektedir.

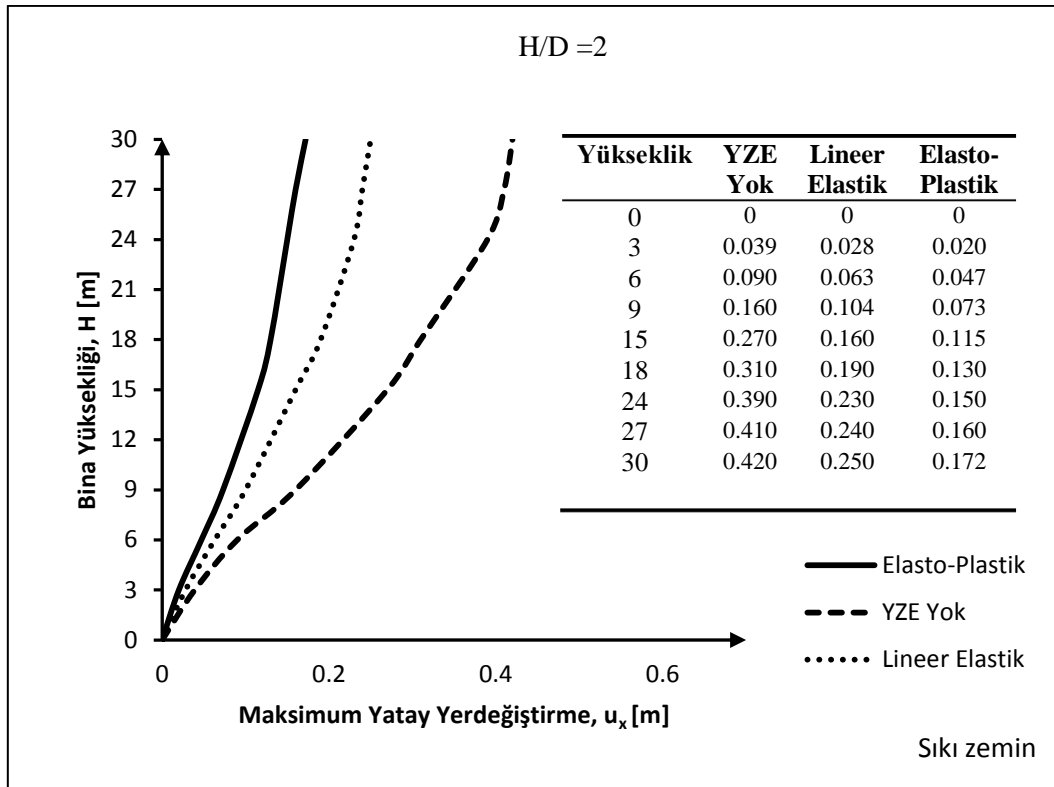
Şekil 3.21' de yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değerinden % 15, sıkı zemin durumundaki değerinden 6.5 kat fazladır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.22. Erzincan depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin temel zemini durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, $H=30$ m)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=2$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

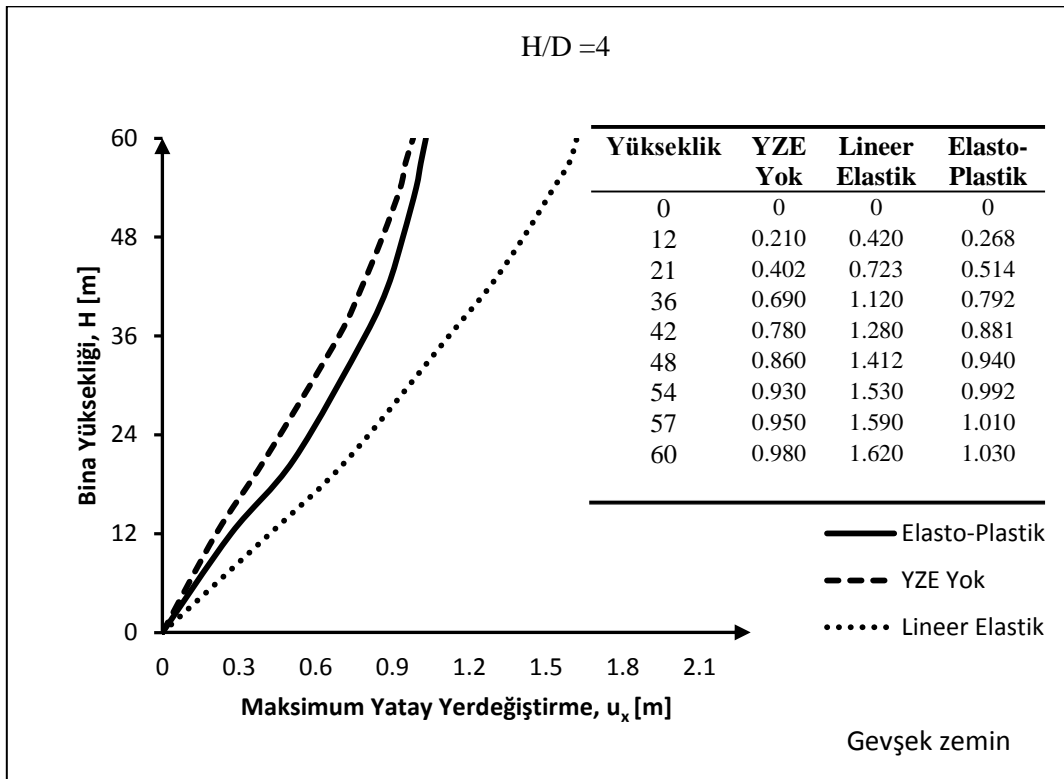
Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak % 25 civarında artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini 3 kat civarında büyüttüğü belirlenmiştir (Şekil 3.22a).

Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-

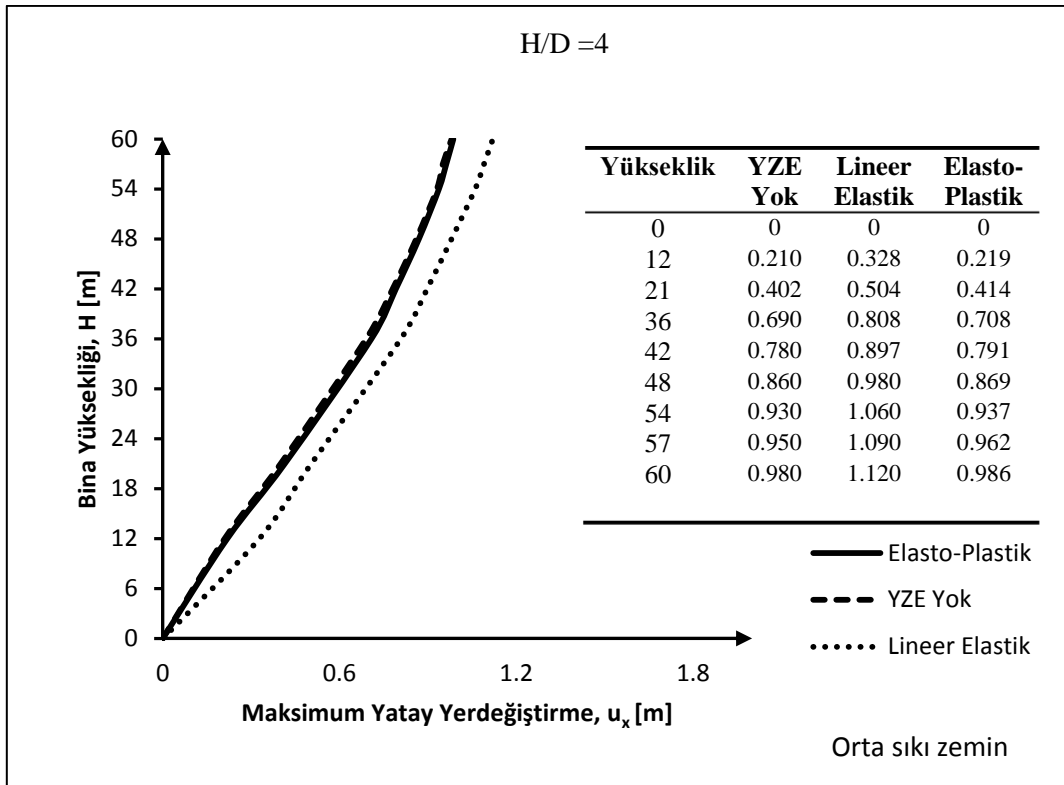
plastik zemin modeli için % 10 civarında arttığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 6 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.22b).

Şekil 3.22c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için 2.5 kat civarında azaldığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 45 civarında büyüttüğü görülmektedir.

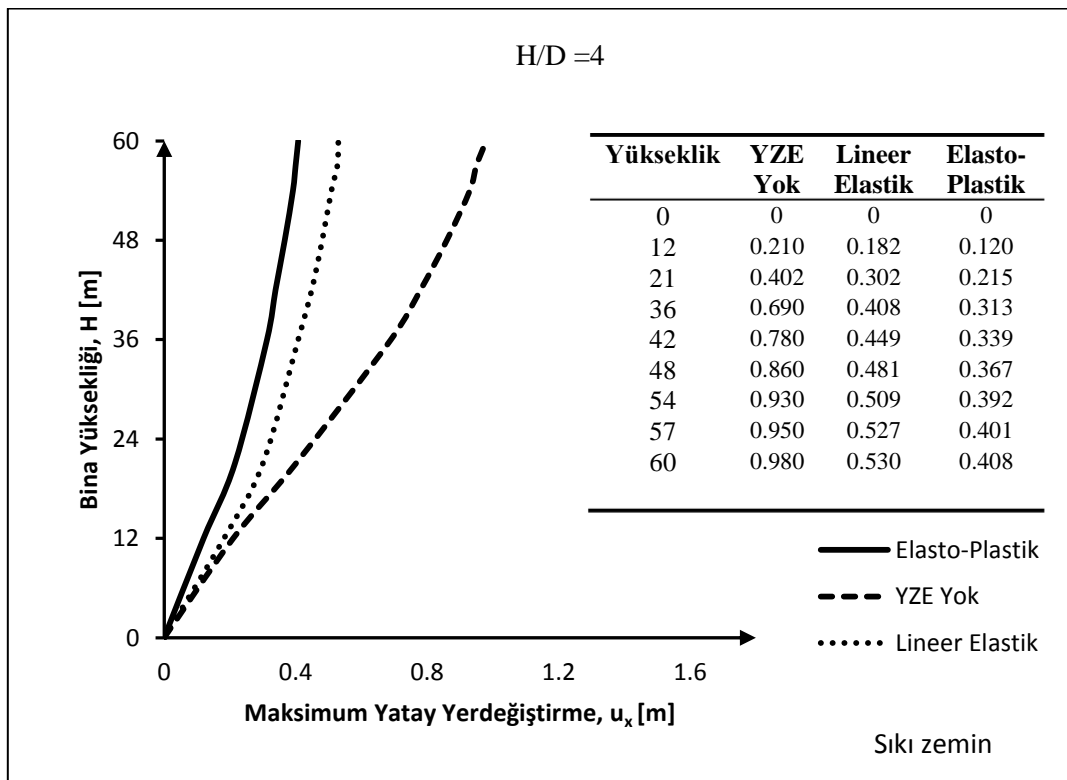
Şekil 3.22' de yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değerinden % 15, sıkı zemin durumundaki değerinden 3 kat fazladır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.23. Erzincan depremi etkisinde bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğıştirmelerinin temel zemini durumuna göre değışimi (Bina Yüksekliğı, H=60 m)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=4$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

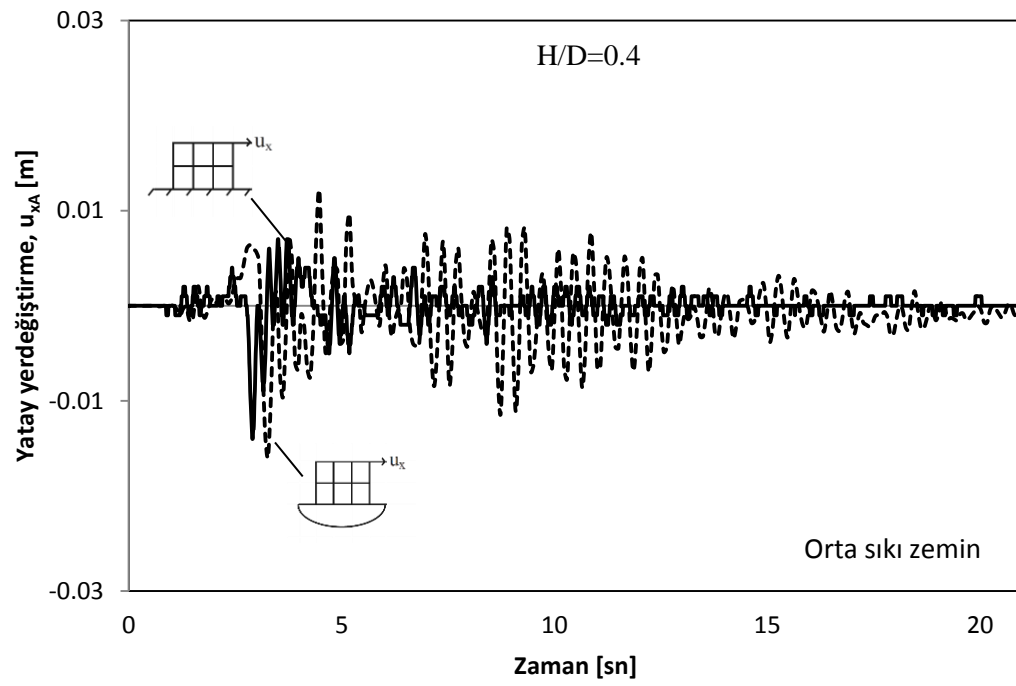
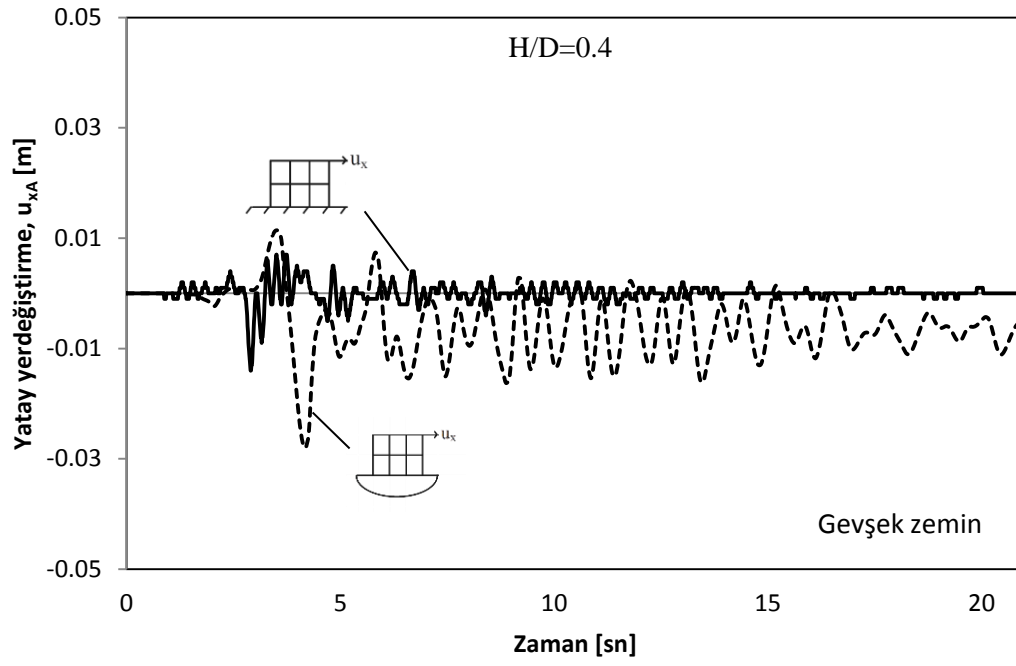
Gevşek temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak % 5 civarında artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 58 civarında büyüttüğü belirlenmektedir (Şekil 3.23a).

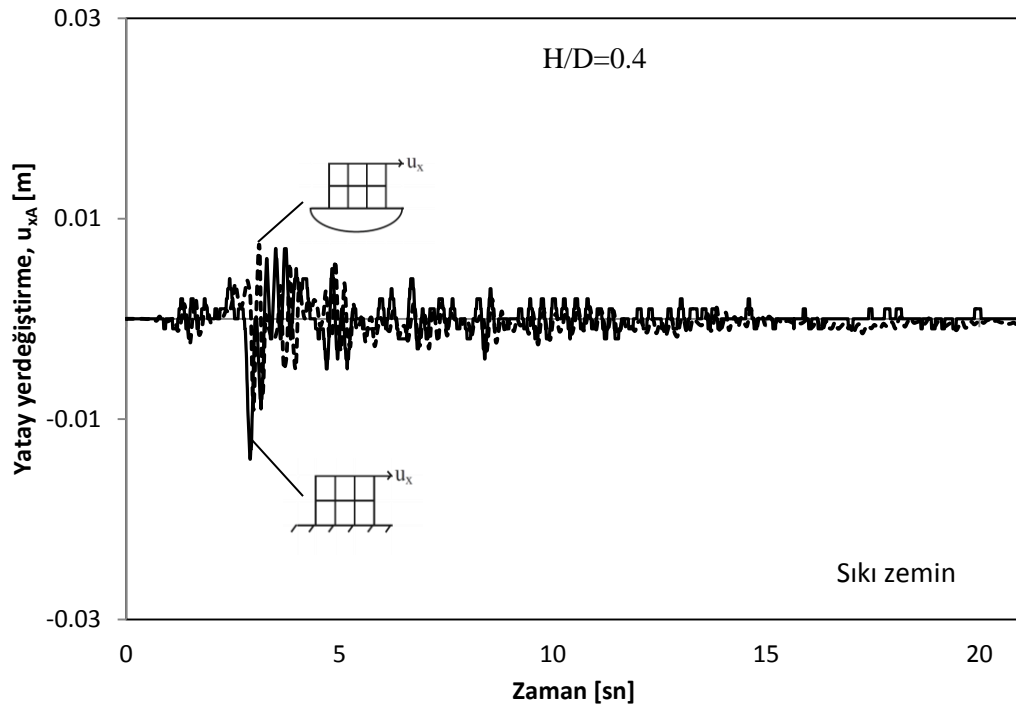
Orta sıkı temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için değişmediği, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 13 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 3.23b).

Şekil 3.23c' de gösterilen sıkı temel zemini durumu için; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için 2.5 kat civarında azaldığı, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 30 civarında büyüttüğü görülmektedir.

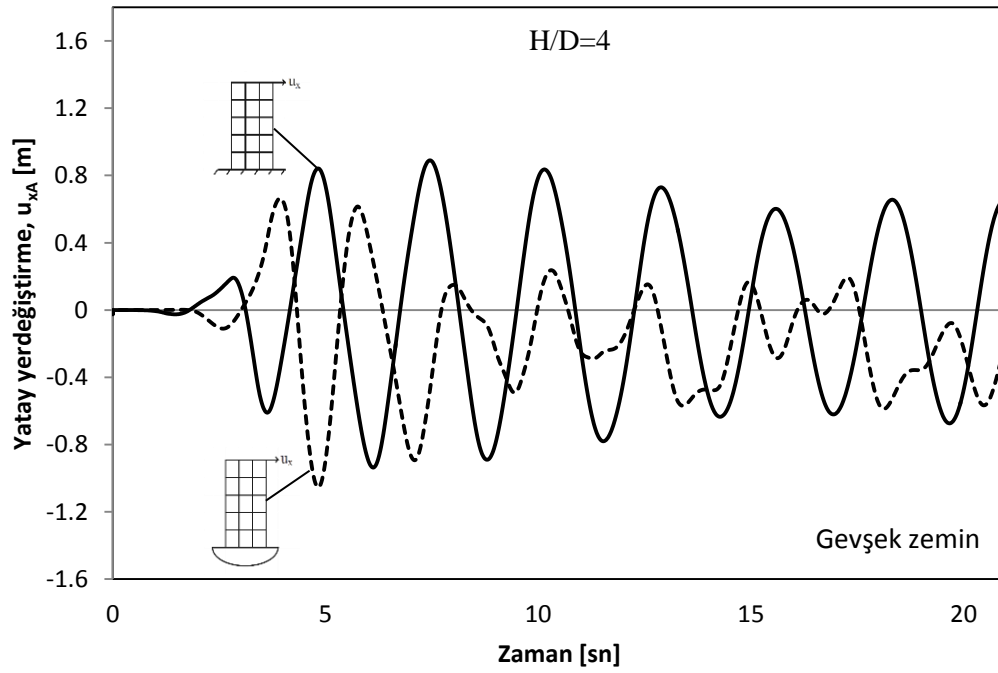
Şekil 3.23' de yatay yerdeğiştirmelerin gevşek zemin ortamında daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Gevşek zemin durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, orta sıkı zemin durumundaki değerinden % 5, sıkı zemin durumundaki değerinden 2.5 kat fazladır.

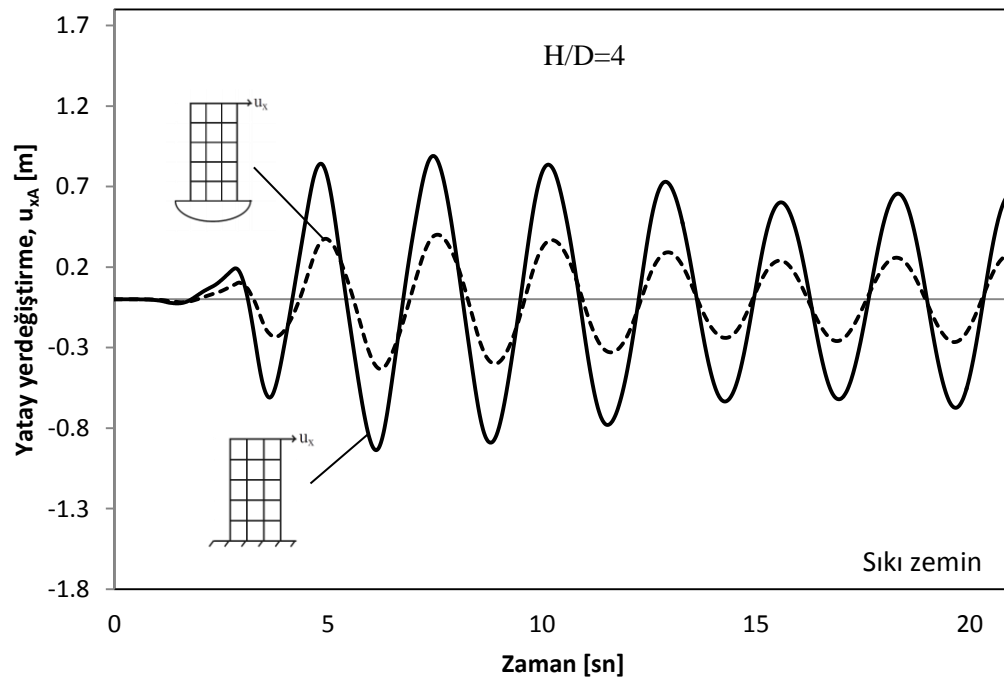
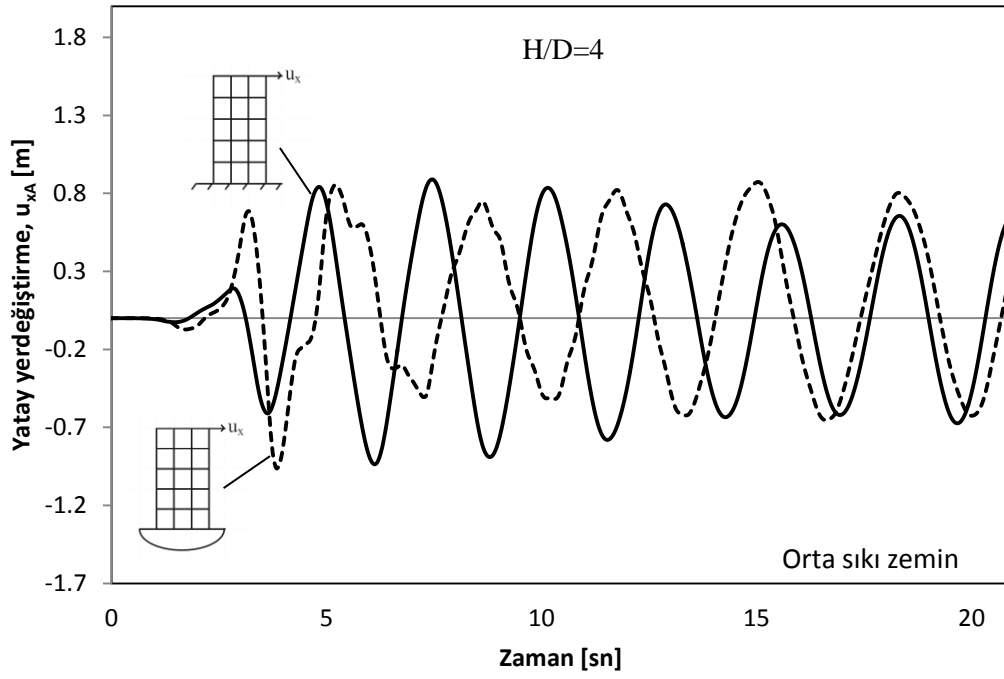
Erzincan yer hareketi ile titreşen basık ($H/D=0.4$) ve narin ($H/D=4$) yapılar için bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi farklı zemin özelliklerine göre Şekil 3.24 - 3.25' de gösterilmiştir.





Şekil 3.24. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi (Erzincan, $H/D=0.4$)





Şekil 3.25. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi (Erzincan, $H/D=4$)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte basık ve narin yapılar için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

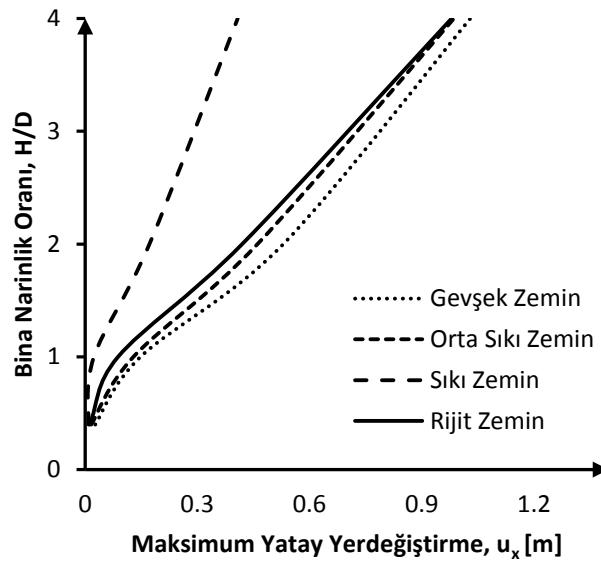
Basık yapı durumunda bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin, gevşek zemin koşulları altında, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak 2 kata yakın artarak değiştiği, narin yapıda ise bu değer % 12 civarında olduğu görülmektedir.

Orta sıkı temel zemin koşulları altında, bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin basık yapı durumunda, rijit mesnet koşullarına göre elasto-plastik zemin modeli için % 15 civarında artarak değiştiği, narin yapıda ise bu değer yaklaşık olarak % 5 olduğu görülmektedir.

Sıkı temel zemini durumu için, bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin basık yapı durumunda, zemine rijit bağlı varsayımına göre elasto-plastik zemin modeli için % 35 civarında azalarak değiştiği, narin yapıda ise bu oran % 55 olduğu görülmektedir.

Öngörülen zemin koşullarının YZE' nin çözüm sürecine katılmasıyla birlikte üstyapının sismik tepkisini doğrudan nasıl değiştirdiği özellikle depremin etkili olduğu zaman diliminde ($t > 2$ sn) sayısal sonuçlardan açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 3.26' da bina narinlik oranına bağlı olarak örnek sistemin tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin değişimi Mohr-Coulomb akma kriteri varsayımı altındaki elasto-plastik zemin modeli dikkate alınarak farklı zemin özellikleri için verilmiştir ve zemine rijit bağlı sistemin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.26. Tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin bina narinlik oranına ve zemin özelliklerine bağlı değişimi (Erzincan depremi)

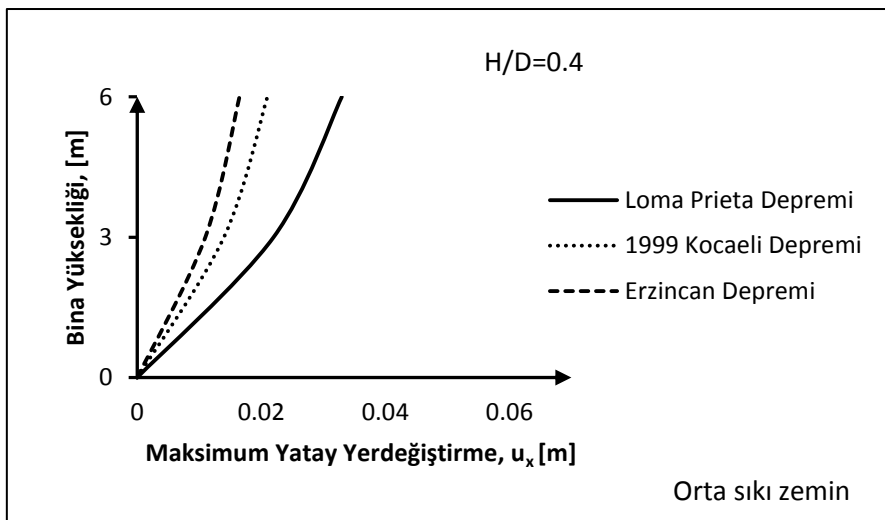
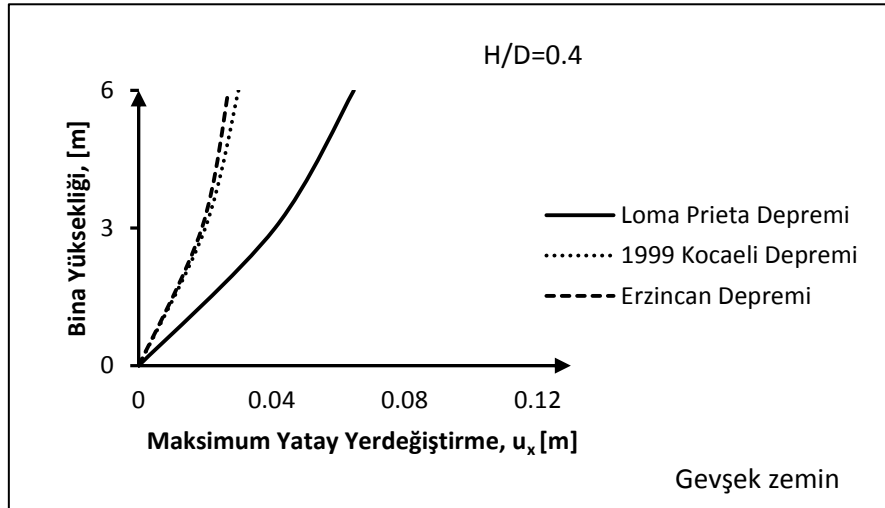
Şekildeki eğri dağılımları dikkatle incelendiğinde yüksekliğe bağlı narinlik oranının artmasıyla birlikte, yatay yerdeğiştirme değerleri zemin koşullarına bağlı olarak büyüdüğü görülmektedir.

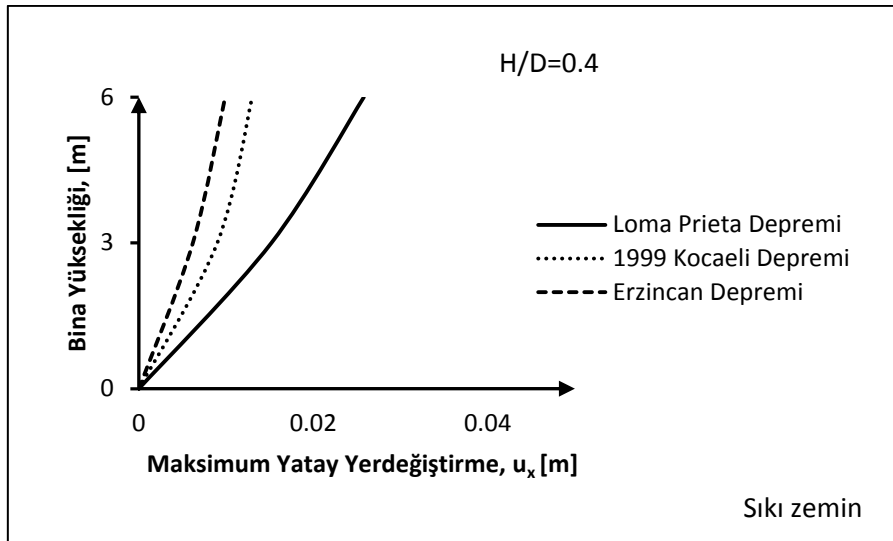
Yatay yerdeğiştirmelerin bina narinlik oranına bağlı en büyük değerleri;

- Gevşek zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.027 m, $H/D=1$ durumunda 0.148 m, $H/D=2$ durumunda 0.530 m ve $H/D=4$ durumunda 1.03 m olduğu,
- Orta sıkı zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.016 m, $H/D=1$ durumunda 0.129 m, $H/D=2$ durumunda 0.461 m ve $H/D=4$ durumunda 0.986 m olduğu,
- Sıkı zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.009 m, $H/D=1$ durumunda 0.023 m, $H/D=2$ durumunda 0.172 m ve $H/D=4$ durumunda 0.408 m olduğu,

- d. Rijit zemin için $H/D=0.4$ durumunda 0.012 m, $H/D=1$ durumunda 0.088 m, $H/D=2$ durumunda 0.420 m ve $H/D=4$ durumunda 0.980 m olduğu gözlenmektedir.

Şekil 3.27 – 3.30’da yatay yerdeğiştirmelerinin en büyük değerlerinin bina yüksekliği boyunca değişimi farklı sismik yük kaynaklarının etkisi gözetilerek elde edilmiştir. Sayısal çözümlerde yönetici parametreler olarak bina narinlik oranı ve yerel zemin malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Mohr-Coulomb akma kriterine sahip elasto-plastik zemin modeli kullanılmıştır.



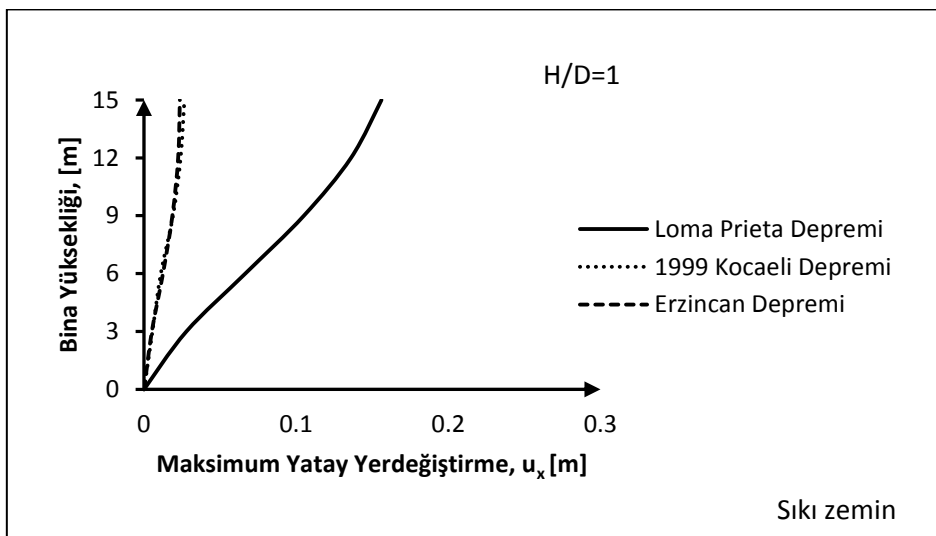
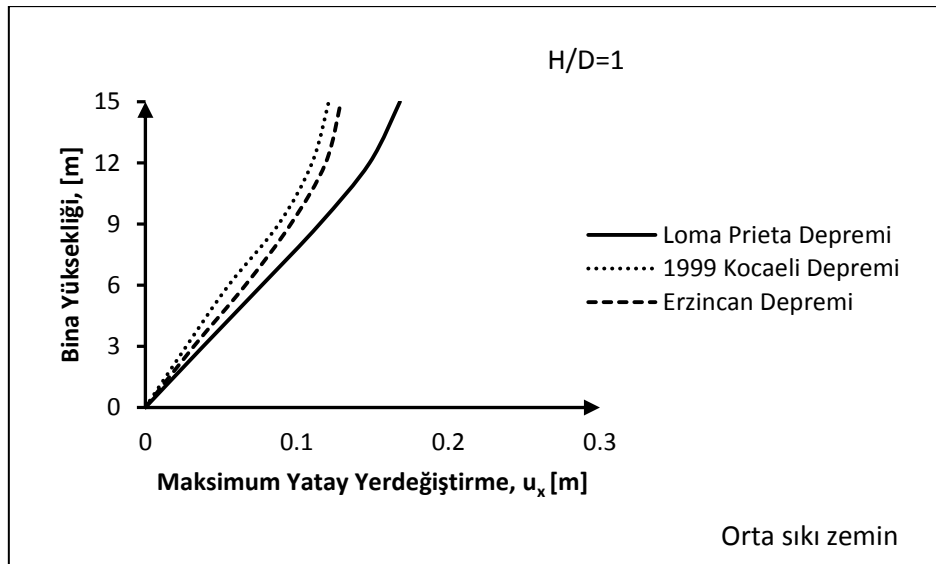
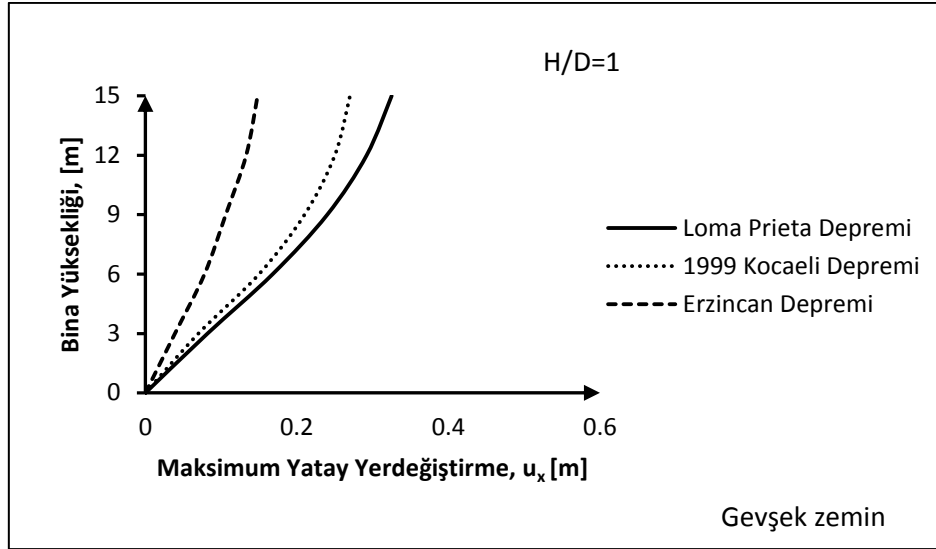


Şekil 3.27. Bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin farklı sismik yük kaynaklarına bağlı değişimi ($H/D=0.4$)

Şekil 3.27’de üstyapının kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirme değerlerinin yüksek frekans içeriğine sahip yakın saha depremi olarak bilinen Loma depremi etkisinde daha büyük değerler aldėı görülmektedir. Baskın yapı ($H/D=0.4$) örneği için bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin, verilen yer hareketlerine ve farklı zemin koşullarına bağlı sonuçları karşılaştırmalı olarak aşağıda özetlenmiştir.

Gevşek ve sıkı zemin şartları altındaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmelerinin, Loma depremi etkisi altındaki maksimum değeri, Kocaeli depreminden 2, Erzincan depreminden 2.5 kat, orta sıkı zemin durumundaki en büyük değeri ise Kocaeli depremine göre % 57 ve Erzincan depremine göre ise 2 kat daha büyüktür.

Bina tepe noktasındaki yatay yerdeğiştirmelerin en büyük değeri, gevşek zemin durumu için Loma, Kocaeli ve Erzincan depremleri etkisinde sırasıyla 0.064, 0.030 ve 0.027 m, orta sıkı zeminde 0.033, 0.021 ve 0.016 m’ dir. Sıkı zemin durumunda ise 0.025, 0.013 ve 0.009 m olduğu gözlenmektedir.

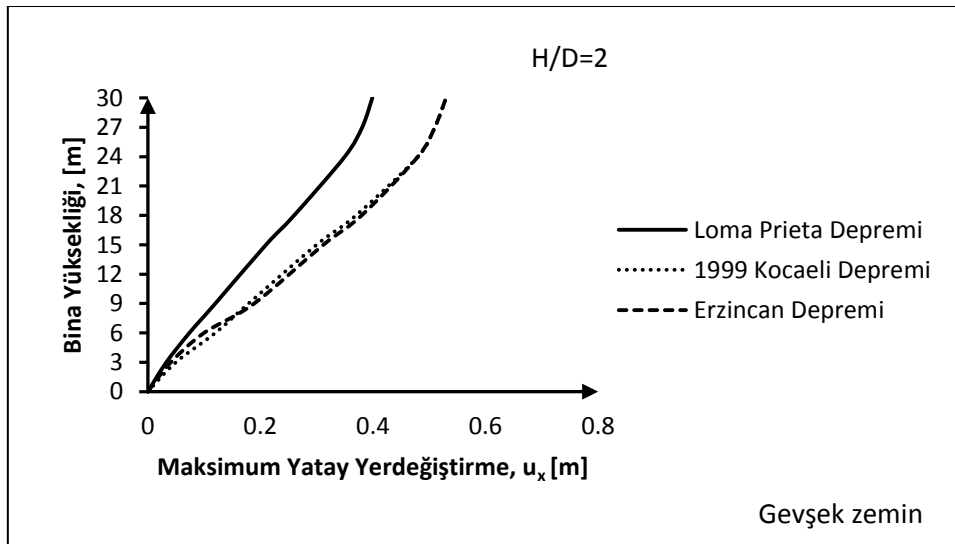


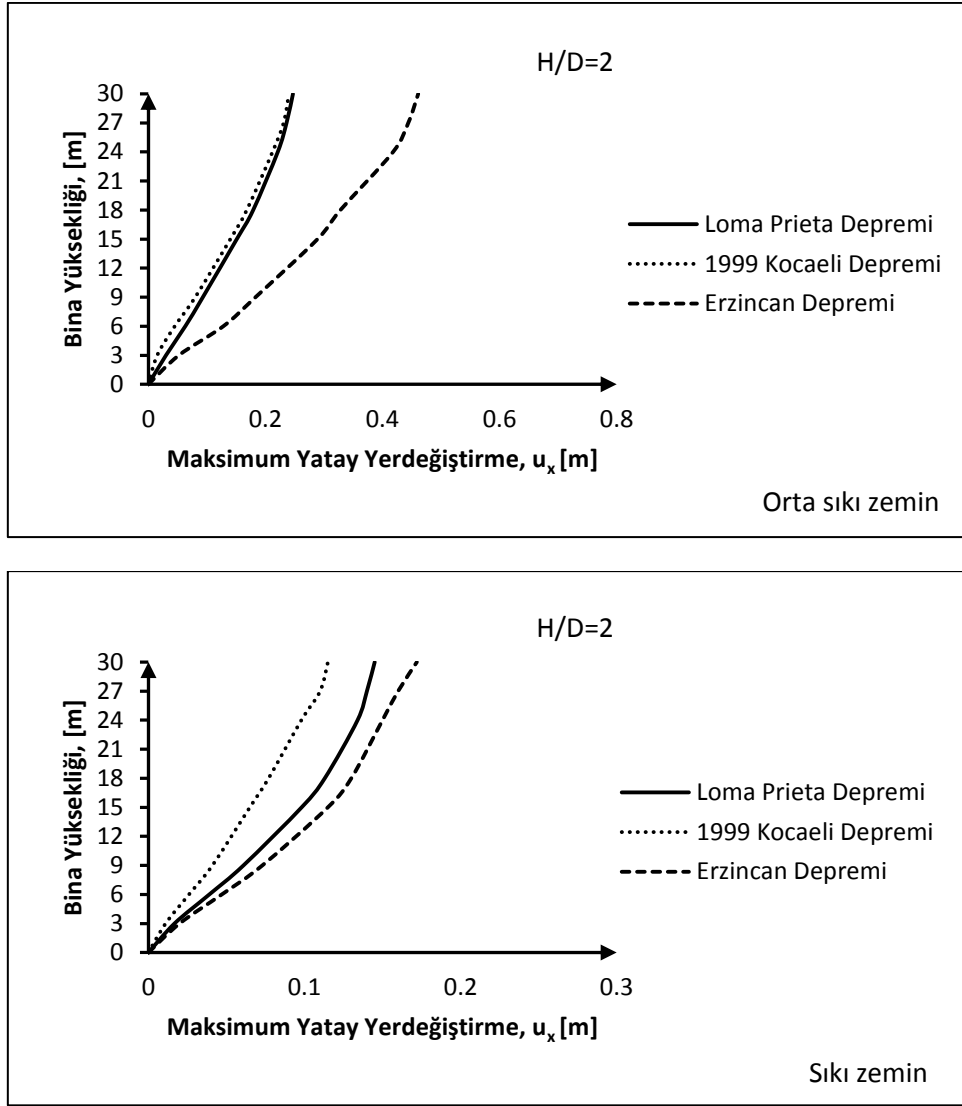
Şekil 3.28. Bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin farklı sismik yük kaynaklarına bağlı değişimi ($H/D=1$)

Şekil 3.28’de üstyapının kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirme değerlerinin yüksek frekans içeriğine sahip yakın saha depremi olarak bilinen Loma depremi etkisinde daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Bina narinlik oranının $H/D=1$ olduğu örnek yapının bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin, verilen yer hareketlerine ve farklı zemin koşullarına bağlı sonuçları karşılaştırmalı olarak aşağıda özetlenmiştir.

Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmelerinin, gevşek zemin durumu için Loma depremi etkisi altındaki maksimum değeri, Kocaeli depreminden % 20, Erzincan depreminden 2 kat, orta sıkı zemin şartlarındaki en büyük değeri Kocaeli depremine göre % 38, Erzincan depremine göre % 30 ve çok daha rijit kabul edilebilecek sıkı zemin durumunda ise Kocaeli depreminden 5.5 ve Erzincan depreminden 6.5 kat daha büyüktür.

Bina tepe noktasındaki yatay yerdeğiştirmelerin en büyük değeri, gevşek zemin durumu için Loma, Kocaeli ve Erzincan depremleri etkisinde sırasıyla 0.325, 0.270 ve 0.148 m, orta sıkı zeminde 0.168, 0.121 ve 0.129 m’ dir. Sıkı zemin durumunda ise 0.156, 0.026 ve 0.023 m olduğu gözlenmektedir.





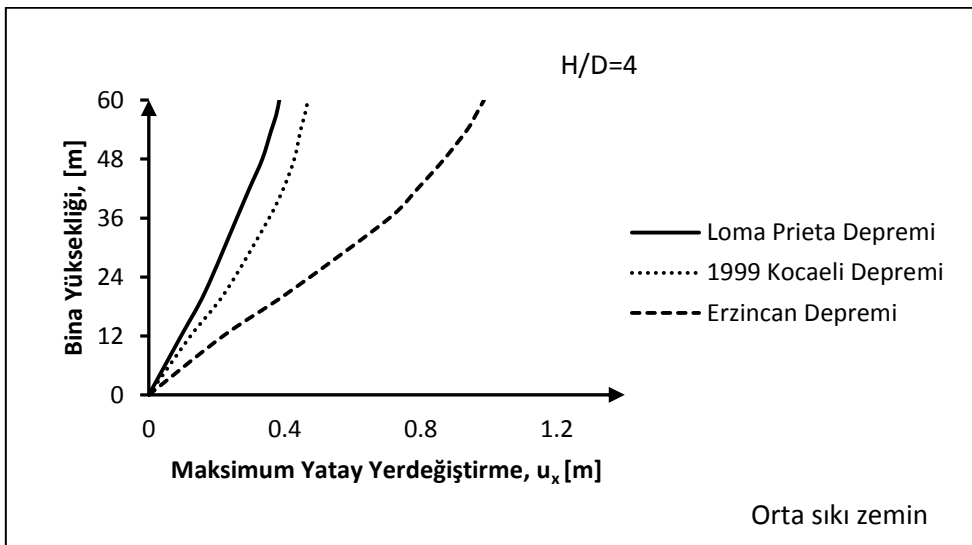
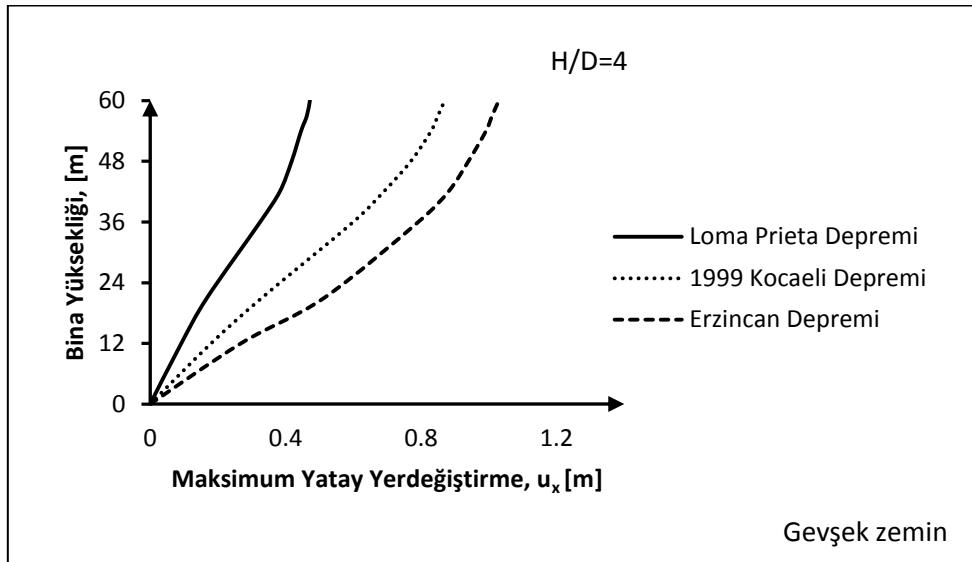
Şekil 3.29. Bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin farklı sismik yük kaynaklarına bağlı değişimi ($H/D=2$)

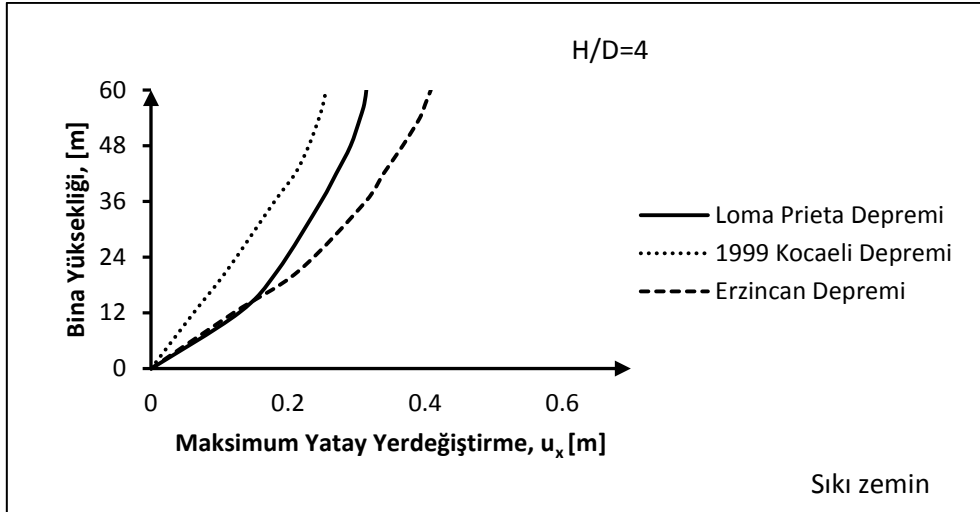
Şekil 3.29’da bina narinlik oranının $H/D=2$ olduğu örnek yapının bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin, verilen yer hareketlerine ve farklı zemin koşullarına bağlı karşılaştırmalı sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmelerinin, gevşek zemin durumu için Loma depremi etkisi altındaki maksimum değerleri, Kocaeli ve Erzincan depremlerinden % 24 daha küçüktür.

Orta sıkı zemin için Erzincan depremi etkisindeki en büyük değeri, Loma depremine göre % 86, Kocaeli depremine göre % 92 ve çok daha rijit kabul edilebilecek sıkı zemin durumunda ise Loma depreminden % 19 ve Kocaeli depreminden % 50 daha büyüktür.

Bina tepe noktasındaki yatay yerdeğıştirmelerin en büyük değeri, gevşek zemin durumu için Erzincan ve Kocaeli depremleri etkisinde 0.530 m, Loma depreminde ise 0.399 m' dir. Orta sıkı zemin şartlarında sırasıyla Erzincan, Loma ve Kocaeli depremleri için 0.461, 0.247 ve 0.240 m, sıkı zemin durumunda ise 0.172, 0.145 ve 0.115 m olduğu gözlenmektedir.





Şekil 3.30. Bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin farklı sismik yük kaynaklarına bağlı değişimi ($H/D=4$)

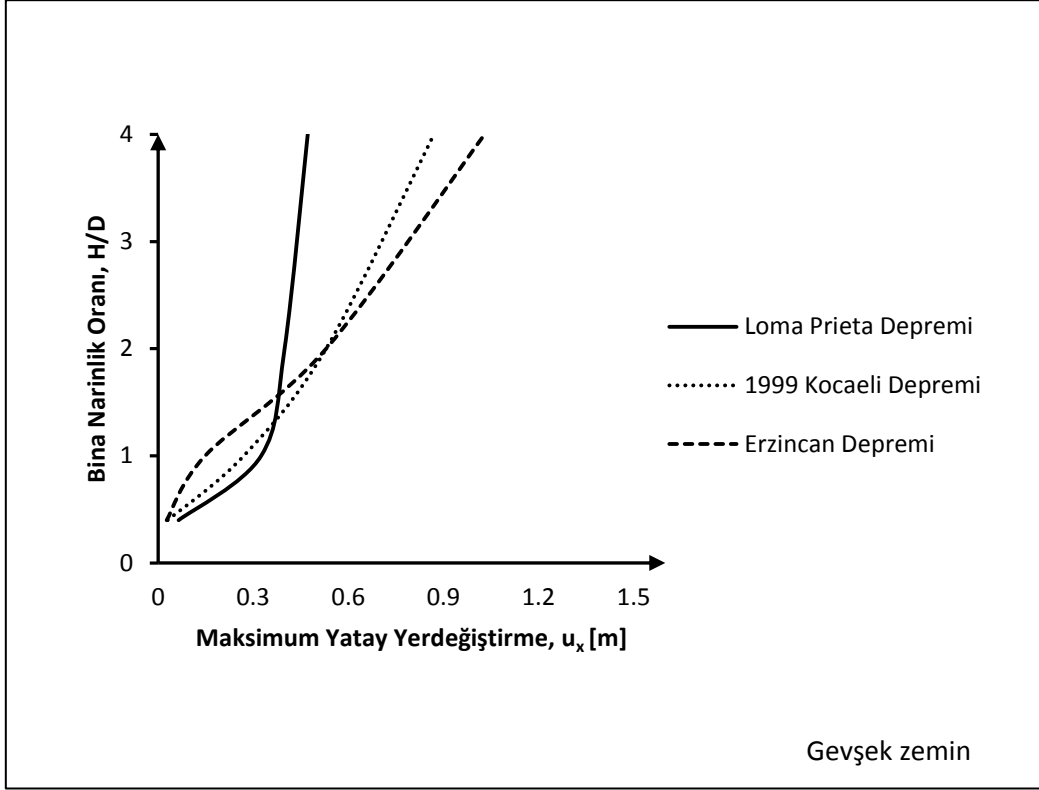
Şekil 3.30'da narin yapının ($H/D=4$) bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin, verilen yer hareketlerine ve farklı zemin koşullarına bağlı karşılaştırma sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

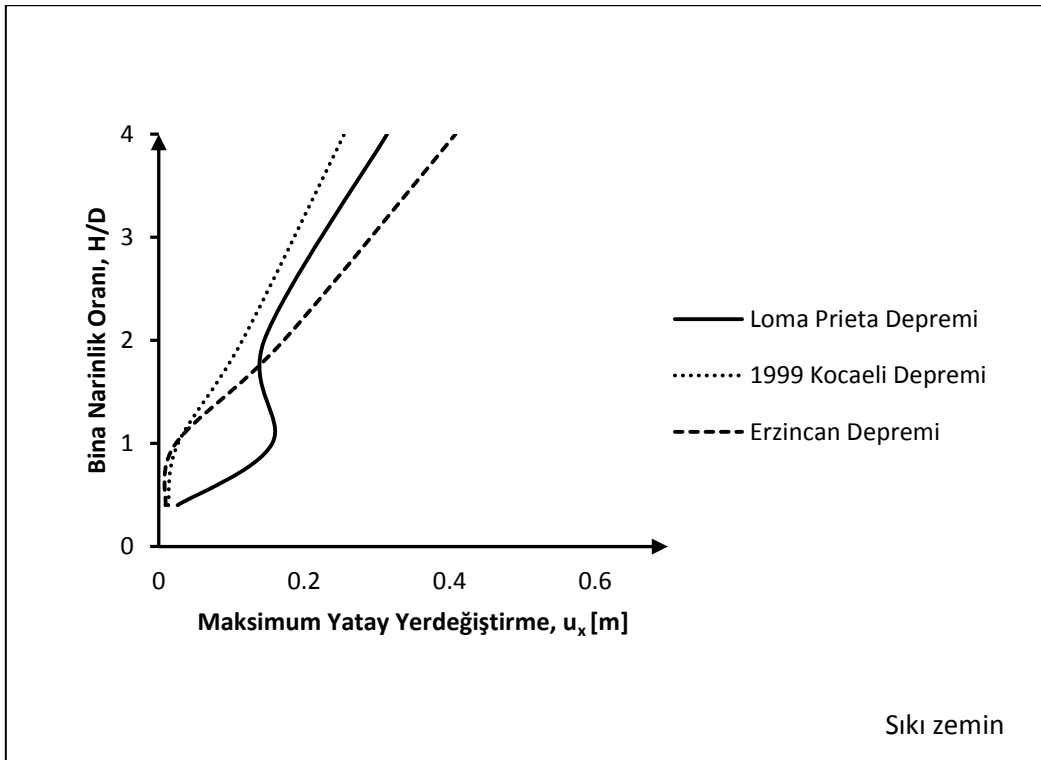
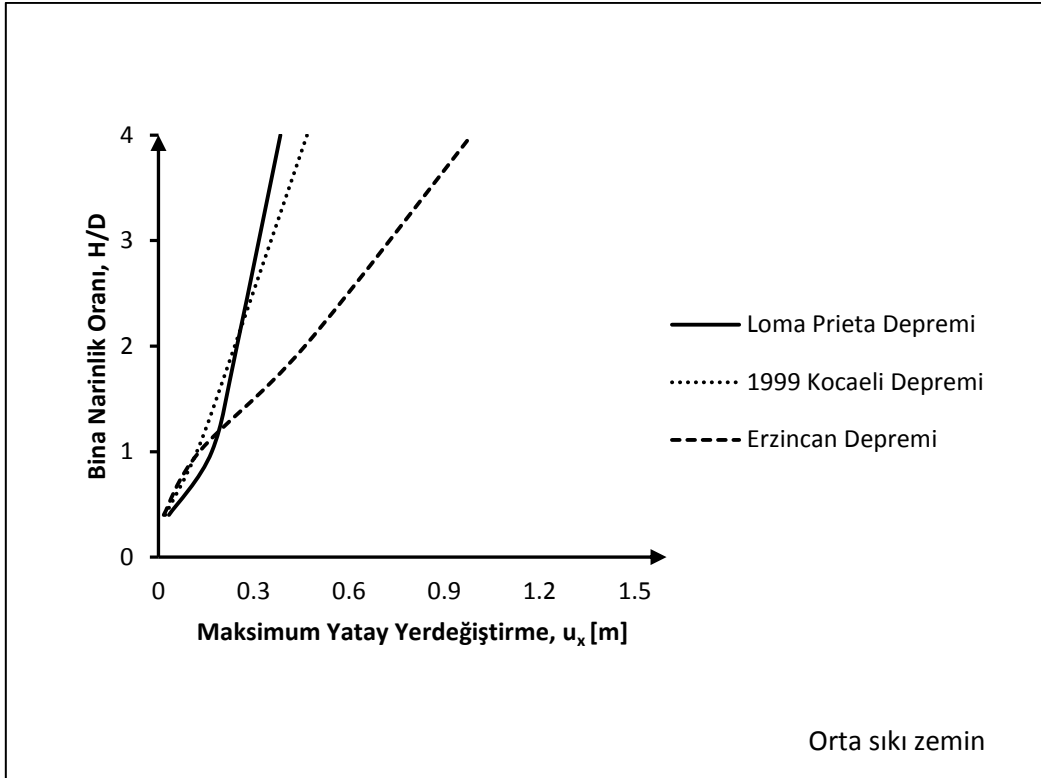
Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmelerinin, geveşek zemin durumu için Erzincan depremi etkisindeki maksimum değerleri, Loma ve Kocaeli depremlerinden sırasıyla 2 kat ve % 18 daha büyüktür.

Orta sıkı zemin için Erzincan depremi etkisindeki en büyük değeri, Loma ve Kocaeli depremlerine göre sırasıyla 2.5 ve 2 kat, ve çok daha rijit kabul edilebilecek sıkı zemin durumunda ise % 30 ve % 60 daha büyüktür.

Bina tepe noktasındaki yatay yerdeğiştirmelerin en büyük değeri, geveşek zemin durumu için sırasıyla Erzincan, Kocaeli ve Loma depremleri etkisinde 1.03, 0.870 ve 0.472 m, orta sıkı zemin şartlarında 0.986, 0.468 ve 0.384 m' dir. Sıkı zemin durumunda ise 0.408, 0.255 ve 0.314 m olduğu gözlenmektedir.

Şekil 3.31’de üstyapı tepe noktası yatay yerdeğiştirmelerinin en büyük değerlerinin bina narinlik oranlarına bağlı değişimi farklı sismik yk kaynaklarının etkisi gözetilerek elde edilmiştir. Sayısal czmlerde yönetici parametreler olarak bina narinlik oranı ve yerel zemin malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Mohr-Coulomb akma kriterine sahip elasto-plastik zemin modeli kullanılmıştır.





Şekil 3.31. Üstyapı tepe noktası yatay yerdeğiştirmelerinin farklı sismik yük kaynaklarına ve bina narinlik oranlarına bağlı değişimi

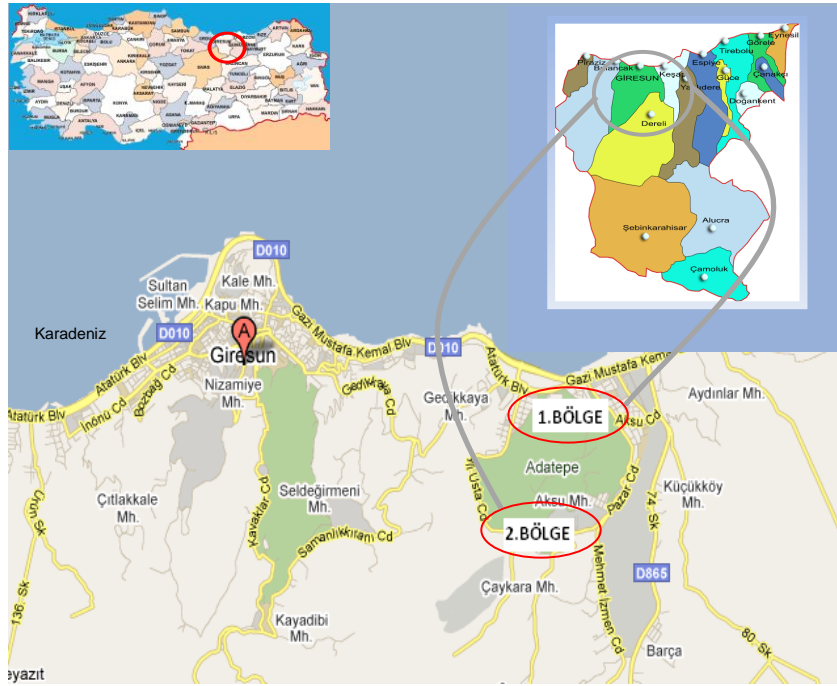
Şekil 3.31’de;

Bina narinlik oranının artmasıyla birlikte, üstyapı tepe noktasındaki maksimum yatay yerdeğiştirme değerlerinin daha büyük değerler aldığı gözlenmektedir.

Gevşek ve orta sıkı zemin durumları için üstyapının kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirme sonuçlarının Loma depremi etkisinde daha küçük değerler aldığı görülmektedir. Narin yapı örneği için, gevşek zemin şartlarında Loma depremi etkisi altındaki üstyapı tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, Kocaeli ve Erzincan depremlerinden sırasıyla %45 ve % 55, orta sıkı zemin durumunda ise % 18 ve % 60 daha küçüktür. Sıkı zemin durumu için ise bina kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirme sonuçlarının Kocaeli depremi etkisinde daha küçük değerler aldığı görülmektedir. Narin yapı örneği için Kocaeli depremi etkisi altındaki üstyapı tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, Loma ve Erzincan depremleri etkisinden sırasıyla % 18 ve % 38 daha küçüktür.

BÖLÜM 4. VAKA ANALİZİ

Lokal zeminin doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini farklı sismik yükler altında değerlendirebilmek için Giresun’ da Merkez Aksu Mahallesi’nde iki farklı bölge üzerinde yer alan yapılar incelenmiştir. 1. ve 2. Bölge olarak tanımlanan bu iki bölge arasındaki temel farklılık 1. Bölgenin suya doygun olmasıdır. Çalışılan bölgelere ait bulduru haritası Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. Giresun bölgesi bulduru haritası

Dinamik davranış incelenen yapı modeli, 10 katlı üç açıklıklı betonarme düzlem bir çerçevedir. Analizlerde binanın bütün kat yükseklikleri 3 m, binanın genişliği ise her bir açıklık için 5 m olarak belirlenmiştir. Üstyapının kolon ve kirişlerine ait mekanik özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. İnceleme alanındaki üstyapının Mekanik Özellikleri

Parametre	Sembol	Büyükük	Birim
Kolonlar	Eksenel rijitlik	EA	1.191×10^7 (kN)
	Eğilme rijitliği	EI	156420 (kNm ²)
Kirişler	Eksenel rijitlik	EA	1.191×10^7 (kN)
	Eğilme rijitliği	EI	156420 (kNm ²)
	Ağırlık	w	50 (kN/m ²)

İncelenen bölgelere ait yerel zemin koşulları sismik arazi deneyleri ve sondajlardan alınan numunelere göre belirlenmiştir [36, 37]. Zemin malzeme parametreleri Tablo 4.2 – 4.3’ de verilmiştir.

Tablo 4.2. Giresun 1. Bölgesine ait Zemin Mekanik Özellikleri

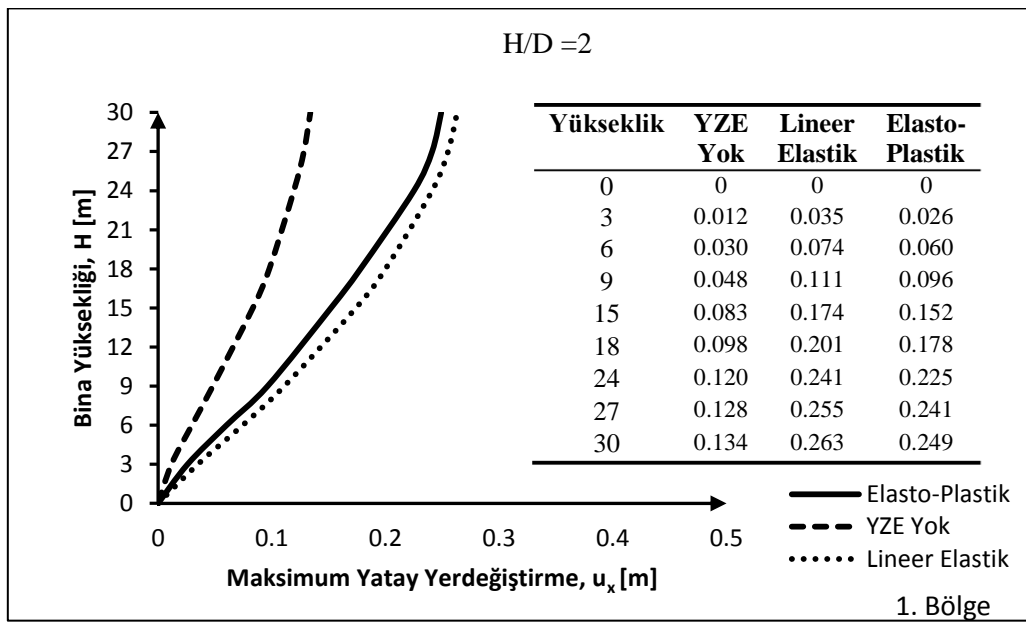
Sembol	Parametre	Büyükük	Birim
E	Elastisite modülü	2.84×10^6	(kN/m ²)
ν	Poisson oranı	0.43	-
γ_{unsat}	Doğal birim hacim ağırlık	16.77	(kN/m ³)
γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlık	20	(kN/m ³)
V_p	Basınç dalgası	2176	m/s
V_s	Kayma dalgası	762.6	m/s
c'	Kohezyon	57	(kN/m ²)
ϕ'	Kayma mukavemeti açısı	5	(°)
ψ	Kabarma açısı	0	(°)
YSS	Yeraltı su seviyesi	4	m
R_{inter}	Arayüz dayanım azaltma faktörü	0.67	-

Tablo 4.3. Giresun 2. Bölgesine ait Zemin Mekanik Özellikleri

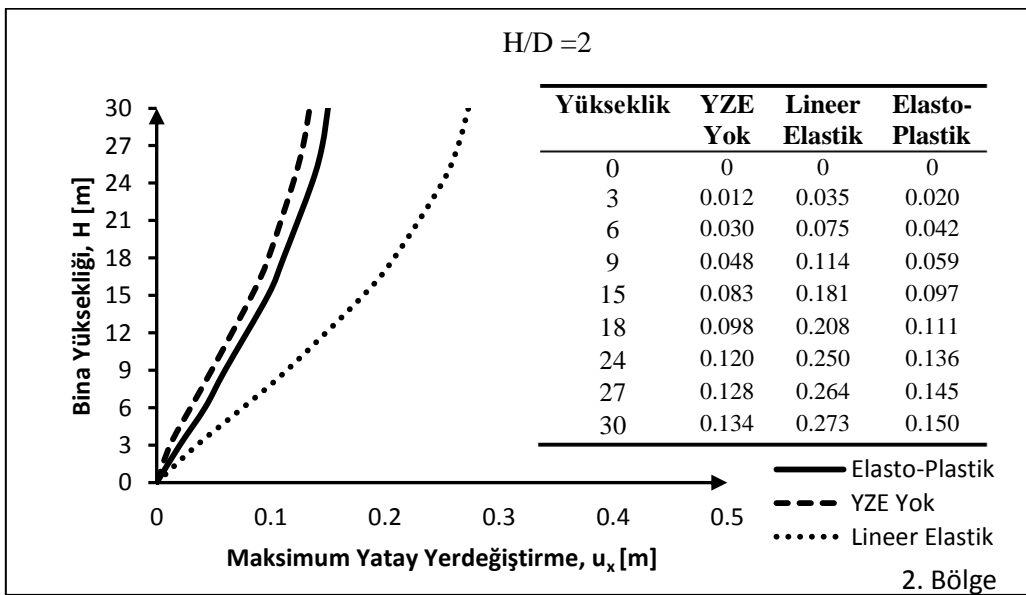
Sembol	Parametre	Büyükük	Birim
E	Elastisite modülü	3.12×10^6	(kN/m ²)
ν	Poisson oranı	0.37	-
γ_{unsat}	Doğal birim hacim ağırlık	18.68	(kN/m ³)
γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlık	18.68	(kN/m ³)
V_p	Basınç dalgası	1702	m/s
V_s	Kayma dalgası	773	m/s
c	Kohezyon	88	(kN/m ²)
ϕ	Kayma mukavemeti açısı	5	(°)
ψ	Kabarma açısı	0	(°)
YSS	Yeraltı su seviyesi	-	m
R_{inter}	Arayüz dayanım azaltma faktörü	0.67	-

4.1. Loma Depremi Analiz Sonuçları

Giresunda seçilen bölgelerdeki yapılar için sismik analizler Loma depremine göre gerçekleştirilmiştir. Deprem yüklerinin üstyapıda meydana getirdiği yanal yerdeğiştirmeler farklı mesnetlenme ve zemin malzeme koşullarına göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 4.2).



(a)



(b)

Şekil 4.2. Bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin Giresun zemi durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, H=30 m)

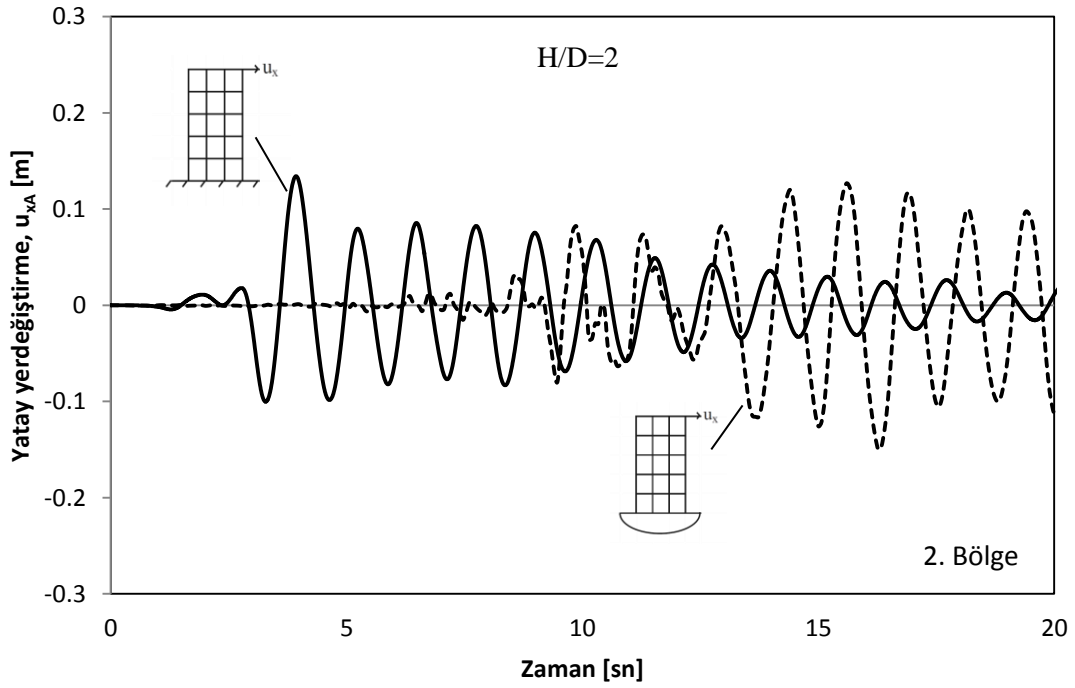
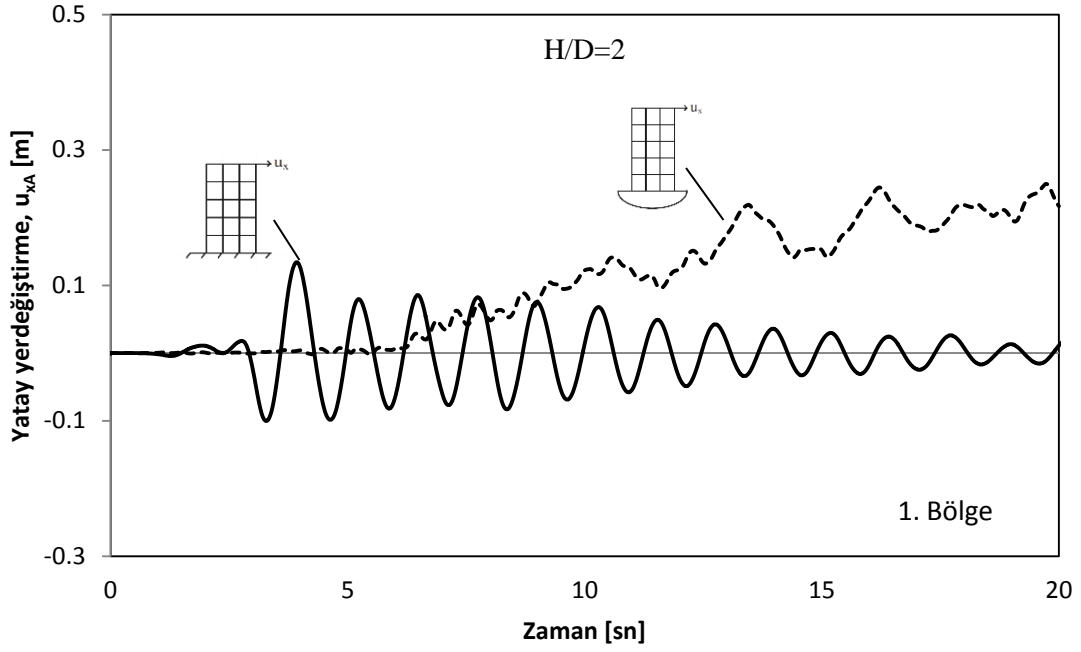
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=2$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1.Bölge temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak % 85 civarında artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 5 civarında büyüttüğü belirlenmiştir (Şekil 4.2a).

2.Bölge temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için % 12 civarında artarak değiştiği, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 80 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 4.2b).

Şekil 4.2' de yatay yerdeğiştirmelerin suya doymun 1. Bölge zemin durumunda daha büyük değerler aldığı görülmektedir. (1. Bölge durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, 2. Bölge durumundaki değerinden % 66 daha fazladır).

Loma yer hareketi ile titreşen narinlik oranı $H/D=2$ olan yapılar için bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi farklı zemin özelliklerine göre Şekil 4.3' de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin Giresun bölgeleri için YZE durumuna bağlı zaman geçmişi (Loma, $H/D=2$)

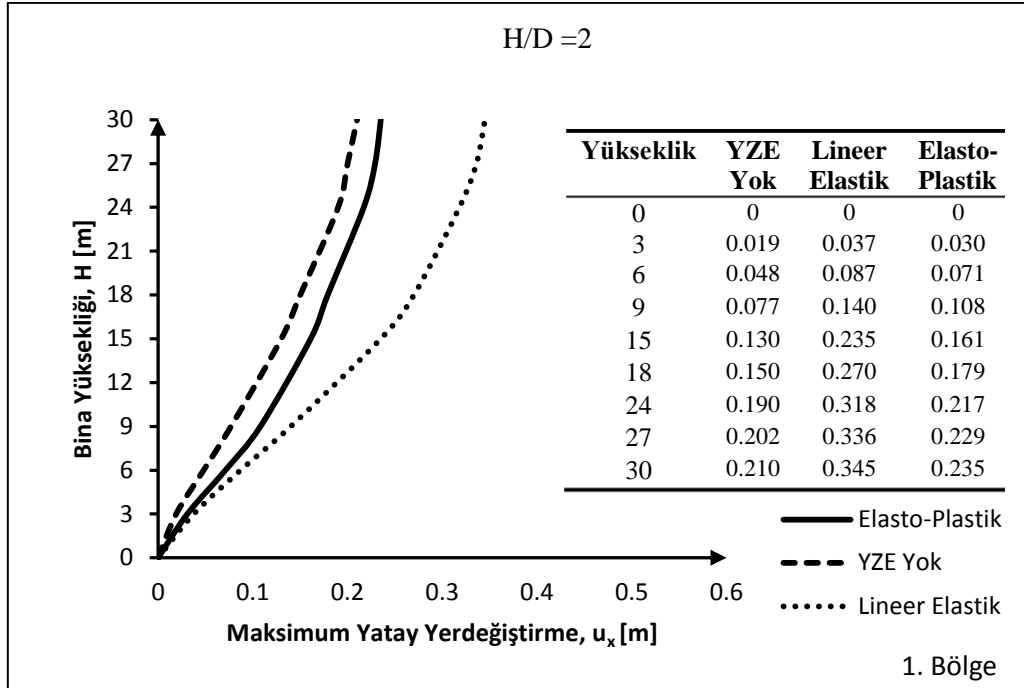
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=2$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin, Giresun'un birinci bölgesindeki zemin koşulları altında, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak 2 kata yakın artarak değiştiği, ikinci bölge temel zemininde ise bu değer % 12 civarında olduğu görülmektedir.

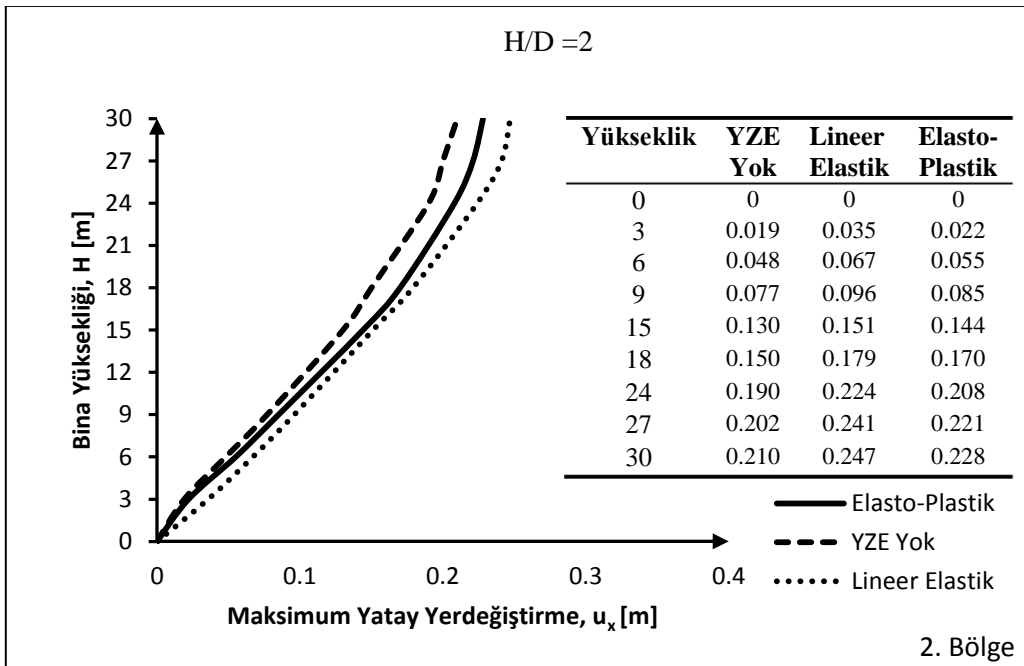
Giresun'un özellikle birinci bölgesindeki zemin özelliklerinin yapı-zemin etkileşiminin çözüm sürecine katılmasıyla birlikte üstyapının sismik tepkisini doğrudan nasıl değiştirdiği özellikle depremin etkili olduğu zaman diliminde ($t > 6$ sn) sayısal sonuçlardan açık bir şekilde görülmektedir.

4.2. Kocaeli Depremi Analiz Sonuçları

Giresunda seçilen bölgelerdeki yapılar için sismik analizler Kocaeli depremine göre gerçekleştirilmiştir. Deprem yüklerinin üstyapıda meydana getirdiği yanal yerdeğiştirmeler farklı mesnetlenme ve zemin malzeme koşullarına göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 4.4).



(a)



(b)

Şekil 4.4. Bina yüksekliği boyunca kat yerdeğştirmelerinin Giresun zemini durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, H=30 m)

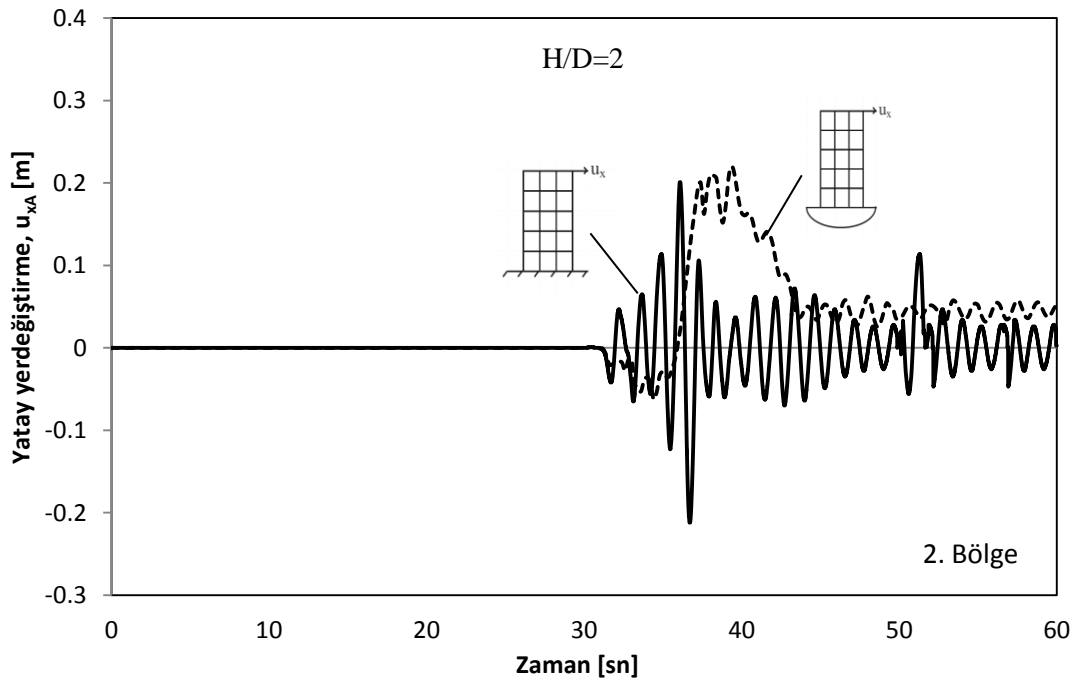
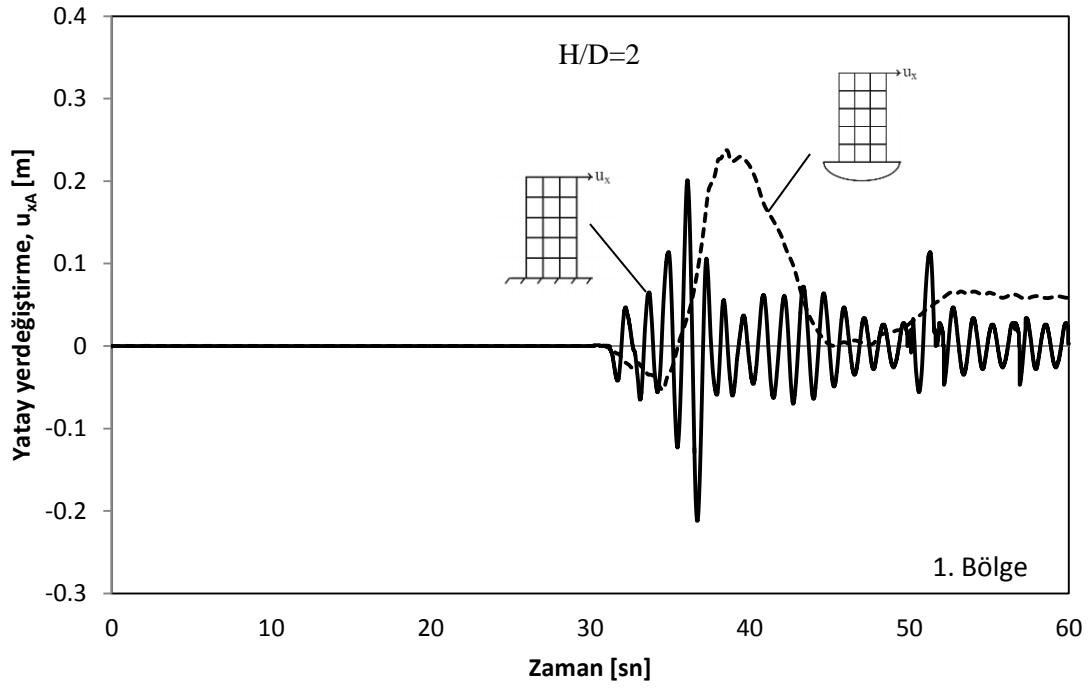
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=2$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1.Bölge temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elastoplastik zemin modeli için yaklaşık olarak % 11 civarında artarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 47 civarında büyüttüğü belirlenmiştir (Şekil 4.4a).

2.Bölge temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elastoplastik zemin modeli için % 9 civarında artarak değiştiği, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini % 8 civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 4.4b).

Şekil 4.4' de yatay yerdeğiştirmelerin suya doygun 1. Bölge zemin durumunda daha büyük değerler aldığı görülmektedir. 1. Bölge durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, 2. Bölge durumundaki değerinden % 3 daha fazladır.

Kocaeli yer hareketi ile titreşen narinlik oranı $H/D=2$ olan yapılar için bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi farklı zemin özelliklerine göre Şekil 4.5' de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin Giresun bölgeleri için YZE durumuna bağlı zaman geçmişi (Kocaeli, H/D=2)

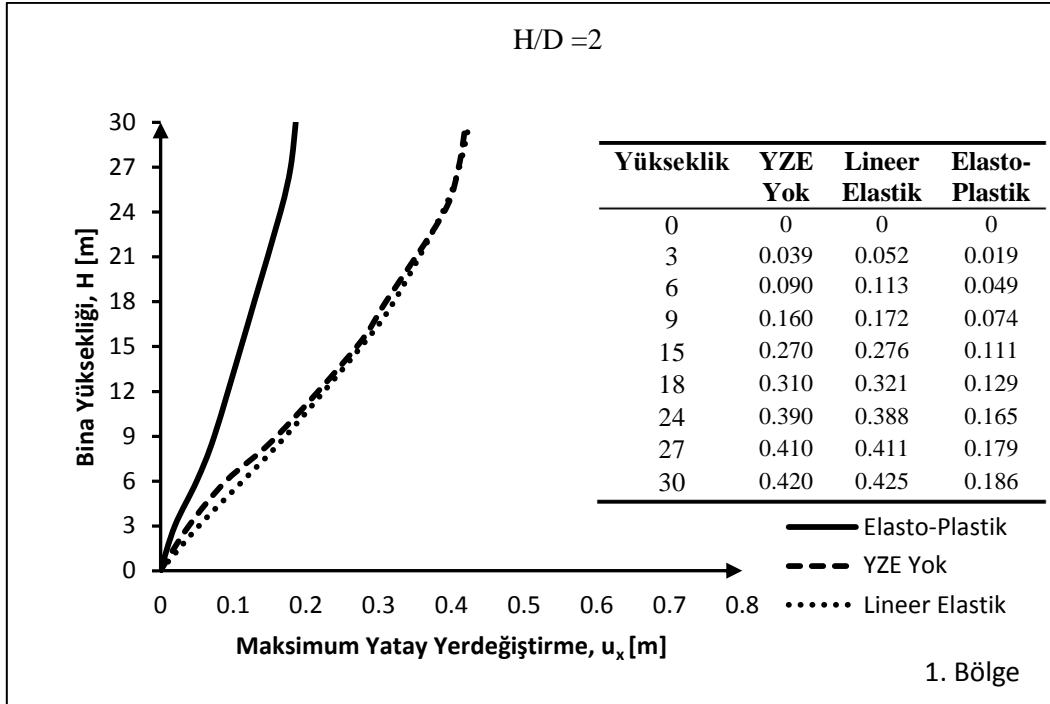
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=2$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin, Giresun'un birinci bölgesindeki zemin koşulları altında, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak % 20 civarında artarak değiştiği, ikinci bölge temel zemininde ise bu değer % 12 olduğu görülmektedir.

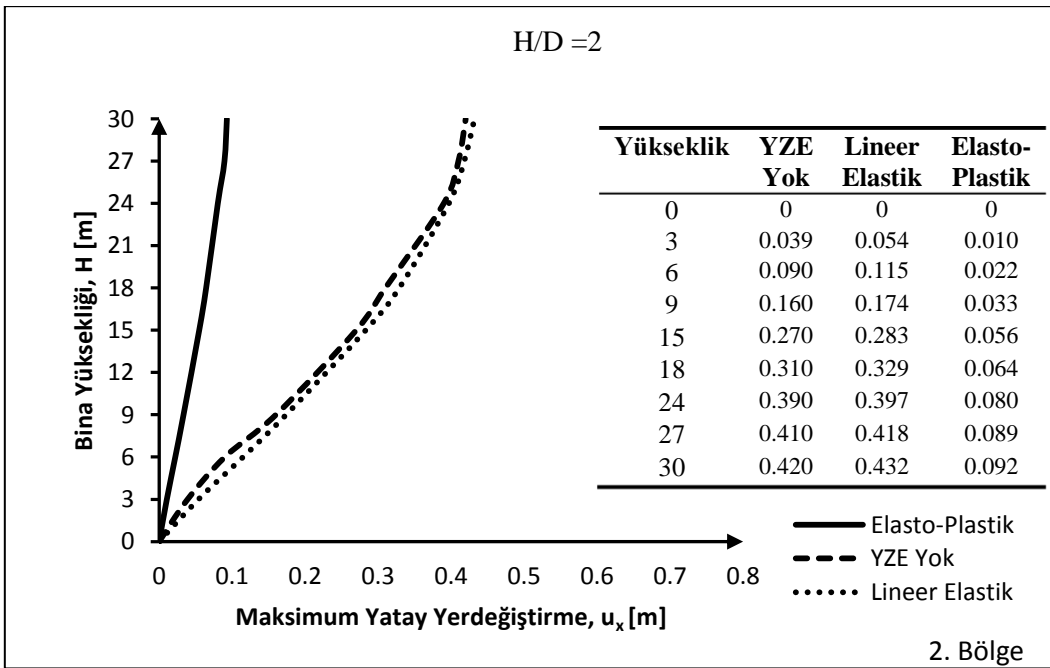
Öngörülen zemin özelliklerinin yapı-zemin etkileşiminin çözüm sürecine katılmasıyla birlikte üstyapının sismik tepkisini doğrudan nasıl değiştirdiği özellikle depremin etkili olduğu zaman diliminde ($t > 35$ sn) sayısal sonuçlardan açık bir şekilde görülmektedir.

4.3. Erzincan Depremi Analiz Sonuçları

Giresunda seçilen bölgelerdeki yapılar için sismik analizler Erzincan depremine göre gerçekleştirilmiştir. Deprem yüklerinin üstyapıda meydana getirdiği yanal yerdeğiştirmeler farklı mesnetlenme ve zemin malzeme koşullarına göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Şekil 4.6).



(a)



(b)

Şekil 4.6. Bina yüksekliği boyunca kat yerdeğiştirmelerinin Giresun zemini durumuna göre değişimi (Bina Yüksekliği, H=30 m)

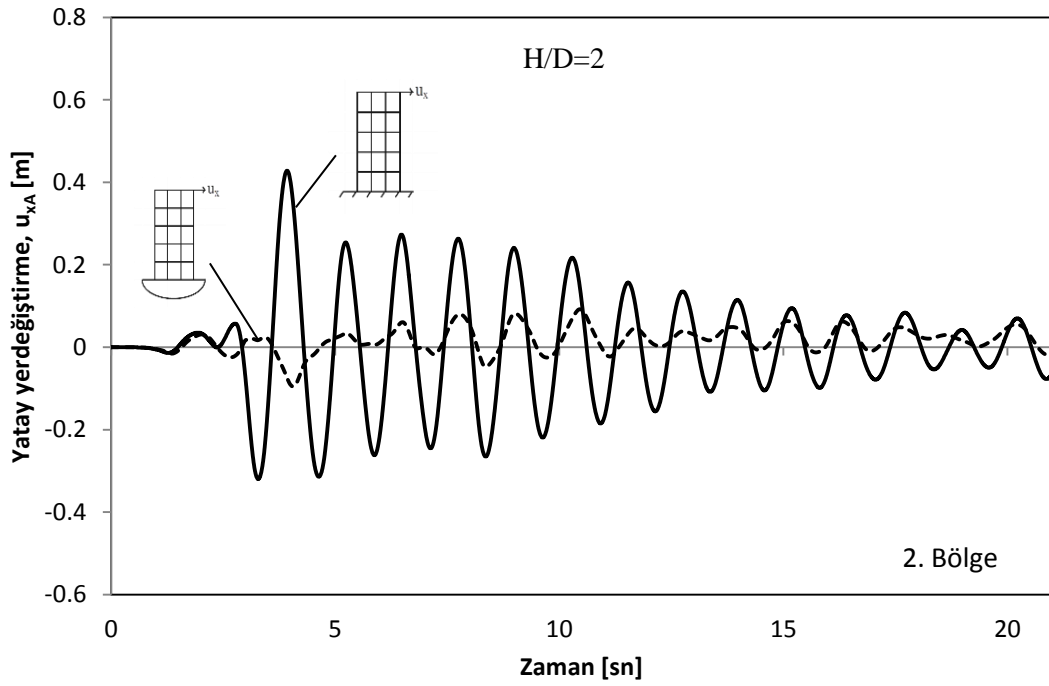
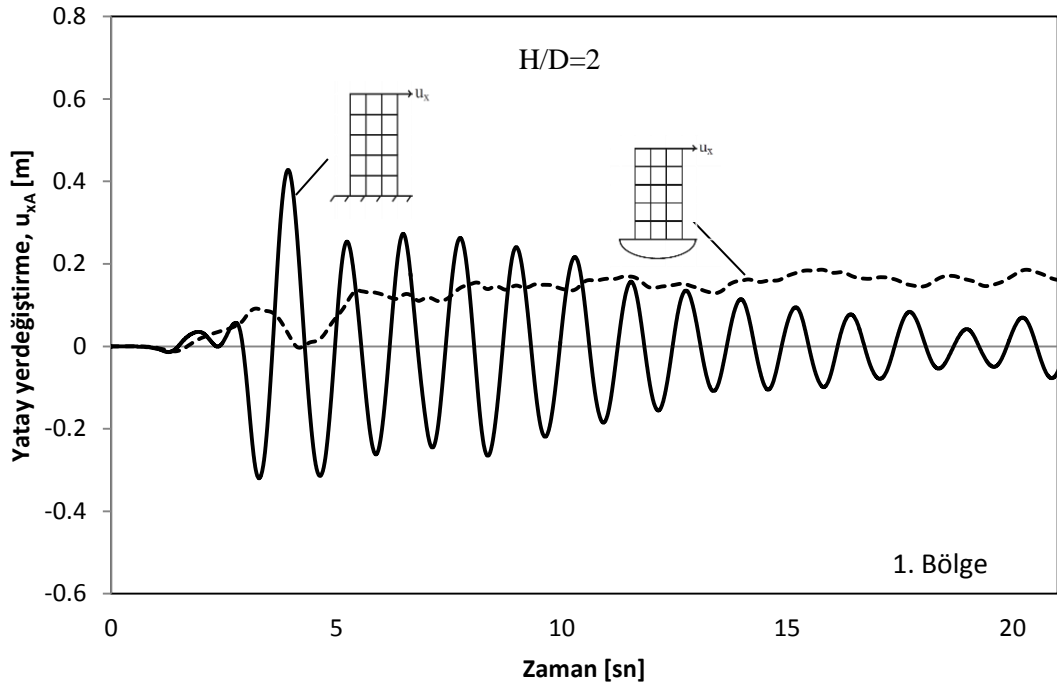
Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=2$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1.Bölge temel zemini durumu için YZE' nin gözardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elastoplastik zemin modeli için yaklaşık olarak % 55 civarında azalarak değiştiği görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini 2.5 kat civarında büyüttüğü belirlenmiştir (Şekil 4.6a).

2.Bölge temel zemini durumunda; Üstyapı tepe noktasının yatay yerdeğiştirilmesi, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elastoplastik zemin modeli için 4.5 kat civarında azalarak değiştiği, yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında ise doğrusal elastik zemin modelinin yerdeğiştirme değerlerini 4.5 kat civarında büyüttüğü görülmektedir (Şekil 4.6b).

Şekil 4.6' da yatay yerdeğiştirmelerin suya doymun 1. Bölge zemin durumunda daha büyük değerler aldığı görülmektedir. 1. Bölge durumundaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirme değeri, 2. Bölge durumundaki değerinden 2 kat daha fazladır.

Erzincan yer hareketi ile titreşen narinlik oranı $H/D=2$ olan yapılar için bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin YZE durumuna bağlı zaman geçmişi farklı zemin özelliklerine göre Şekil 4.7' de gösterilmiştir.



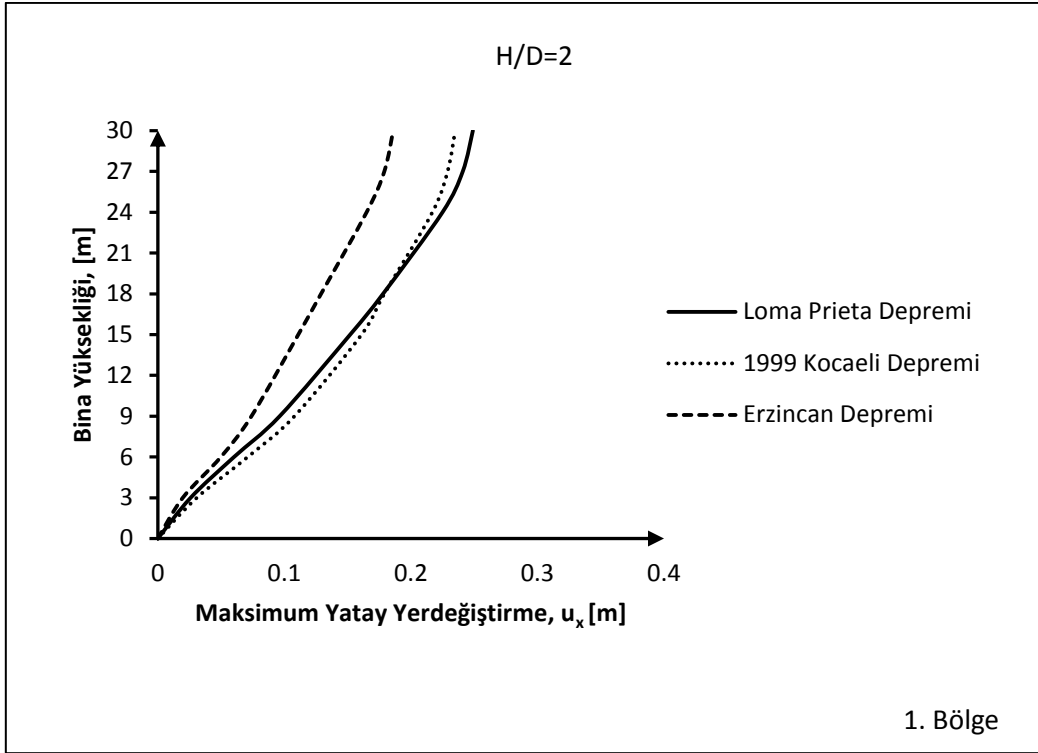
Şekil 4.7. Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin Giresun bölgeleri için YZE durumuna bağlı zaman geçmişi (Erzincan, $H/D=2$)

Yapı-zemin dinamik etkileşimi verilen yer hareketine göre farklı zemin koşulları ile birlikte örnek sistem ($H/D=2$) için değerlendirildiğinde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

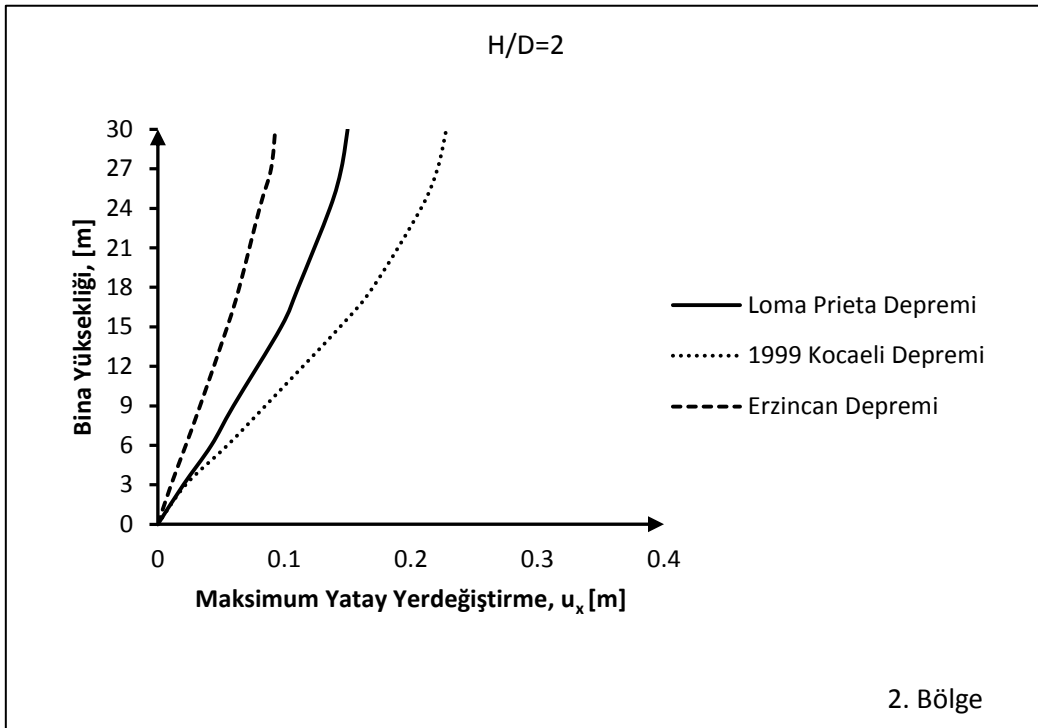
Bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmesinin, Giresun'un birinci bölgesindeki zemin koşulları altında, zemine rijit bağlı varsayımına göre hesap sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, elasto-plastik zemin modeli için yaklaşık olarak 2 kata yakın azalarak değiştiği, ikinci bölge temel zemininde ise bu değer 4 kat civarında olduğu görülmektedir.

Giresun'un özellikle birinci bölgesindeki zemin özelliklerinin yapı-zemin etkileşiminin çözüm sürecine katılmasıyla birlikte üstyapının sismik tepkisini doğrudan nasıl değiştirdiği özellikle depremin etkili olduğu zaman diliminde ($t > 5$ sn) sayısal sonuçlardan açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 4.8'de yatay yerdeğiştirmelerinin en büyük değerlerinin bina yüksekliği boyunca değişimi farklı sismik yük kaynaklarının etkisi gözetilerek elde edilmiştir. Sayısal çözümlerde yönetici parametreleri olarak yerel zemin malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Mohr-Coulomb akma kriterine sahip elasto-plastik zemin modeli kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.8. Bina yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmelerinin Giresun bölgeleri için farklı sismik yük kaynaklarına bağlı değişimi ($H/D=2$)

Üstyapının kat seviyelerindeki yatay yerdeğiştirme değerlerinin Giresun 1. Bölgesi (suya doygun) için yüksek frekans içeriğine sahip yakın saha depremi olarak bilinen Loma depremi etkisinde, Giresun 2. Bölgesi için ise Kocaeli depremi etkisi altında daha büyük değerler aldığı görölmektedir.

Giresun 1. Bölge zemin şartları altındaki bina tepe noktası yatay yerdeğiştirmelerinin, Loma depremi etkisindeki maksimum değeri, Kocaeli depreminden 2 kat, Erzincan depreminden % 33 daha büyüktür. Giresun 2. Bölge zemin durumunda ise Kocaeli depremi etkisindeki en büyük değeri, Loma depremine göre % 52 ve Erzincan depremine göre ise 2.5 kat daha büyüktür.

Bina tepe noktasındaki yatay yerdeğiştirmelerin en büyük değeri, Giresun 1. Bölge zemin durumu için Loma, Kocaeli ve Erzincan depremleri etkisinde sırasıyla 0.249, 0.235 ve 0.186 m, Giresun 2. Bölge zemininde ise 0.150, 0.228 ve 0.092 m' dir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Deprem yükleri altında etkileşen yapı-zemin ortak sisteminin yapısal davranışını zeminin doğrusal olmayan malzeme koşullarıyla birlikte değerlendirebilmek için sonlu eleman model üzerinde sistematik bir program akışı içerisinde çeşitli kontrol parametrelerine bağlı sayısal analizler gerçekleştirilerek inşaat mühendislerine bu tarz problemlerin çözümü ve pratiğe dönük sonuçları gösterilmeye çalışılmıştır.

Yapı ile zeminin ortak davranışını doğrudan dikkate alarak geliştirilen sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen sayısal analizlerde, dinamik davranışı belirleyen etkin sistem parametreleri olarak üç farklı zemin türü ve yer hareketleri kullanılmıştır. Başlangıçta basık yapılar için yürütülen bu çalışma daha sonra kontrol parametrelerine bağlı olarak farklı narinlik oranlarına sahip yapı örnekleri için devam ettirilmiştir. Ayrıca, lokal zeminin doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini farklı sismik yükler altında değerlendirebilmek için vaka analizi yapılmıştır. Giresun' da Merkez Aksu Mahallesi, sismik arazi deneyleri ve sondajlardan alınan numunelere göre belirlenen yerel zemin koşulları üzerindeki iki farklı bölge içerisinde yer alan yapılar incelenmiştir. Bölgelerden bir tanesinin suya doygun olması temel farklılık olarak dikkate alınmıştır.

Yapı-zemin dinamik etkileşimi dikkate alınarak, yerel zemin şartlarının etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, kayma dalgası hızı düşük ($c_s=90$ m/sn) gevşek zeminin ana kaya hareketini büyüttüğü, kayma dalgası hızının artmasıyla birlikte ise ana kayadaki deprem hareketinin küçüldüğü görülmüştür. Bu durum literatürde bildirilen yumuşak zeminlerin sıkı zeminlere göre sistemin davranışını daha fazla etkilemesine neden olduğunu, dolayısıyla yumuşak zeminler üzerinde yapılacak yapılarda yapı-zemin etkileşiminin daha etkin olduğu sonucunu doğrulamaktadır.

Farklı zemin koşulları için, yapı-zemin etkileşiminin göz ardı edilmesi analiz sonuçlarını önemli derecede değiştirmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin varlığı dikkate alındığında zeminin doğrusal elastik veya elasto-plastik malzeme modeli varsayımı da sonuçları etkilemiştir. Beklenildiği gibi doğrusal elastik zemin modeli yerdeğiştirmelerin daha büyük elde edilmesine neden olmuştur.

Gerçekleştirilen sayısal uygulamalarda geometrik narinlik oranı H/D , üstyapı genişliği sabit tutulup bina yüksekliği değiştirilerek analizlere dahil edilmiştir. Geometrik narinlik oranının artmasıyla birlikte, bina tepe noktası maksimum yatay yerdeğiştirme değerlerinin yerel zemin koşullarına bağlı olarak büyüdüğü görülmüştür. Ancak, zemin ortamı kayma dalgası hızı arttıkça bu fark azalmıştır.

Yapı-zemin etkileşiminin hesaba katılmasıyla deprem yer hareketi ile titreşen çerçeve tipi çok katlı binaların dinamik davranışının önemli derecede değiştiği görülmüştür. Zeminin şekil değiştirebilir özelliğinin sayısal hesaplarda göz ardı edilmesiyle ek dinamik etkilerin sayısal sonuçlara yansımamasından dolayı taşıyıcı sistemlerin depreme karşı boyutlandırılmasında yetersiz kalınacaktır. Bundan dolayı zemine rijit bağlı varsayımı özellikle taşıma gücü açısından zayıf zemin koşulları için yapının gerçek davranışını ifade etmekte eksik kalmaktadır. Bu nedenle gerçek davranışın göz önüne alınabilmesi için zemin bölgesi de yapısal sistemin bir parçası olarak tanımlanmalı ve yapıyla birlikte çözüm sürecine katılmalıdır.

Farklı sismik yük kaynaklarının etkisi gözetilerek elde edilen analiz sonuçları, zemin ortamı ve üstyapının dinamik özellikleri ile birlikte, göz önüne alınan depremin karakterine ve özellikle frekans içeriğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bundan dolayı, değişik özellikteki yer hareketleri için yapılan yapı-zemin dinamik etkileşimi hesaplarında her zaman aynı eğilimlerin elde edilmesi beklenmemelidir.

Giresun'un farklı bölgeleri için seçilen zemin koşulları binanın sismik davranışını değişik şekillerde etkilemiştir. Yapının altındaki gevşek zemin ana kayadaki deprem etkisini önemli derecede büyütüştür. Zeminin etkisiyle yapının periyot ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerinde değişiklikler meydana geldiğinden üst yapıların

sismik davranışlarını önemli derecede zemine rijit bağlı duruma göre farklılık göstermiştir.

Giresun'un özellikle suya doymun birinci bölgesindeki zemin özelliklerinin üstyapının sismik tepkisini doğrudan nasıl değiştirdiği özellikle Loma depremi etkisindeki sayısal sonuçlardan açık bir şekilde görülmektedir. Binanın tepe noktasının zaman geçmişinden yatay titreşimlerdeki büyümenin, ikinci bölgeye göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] ÇELEBİ, E., GÜNDÜZ, A.N., Dynamic response of multistory buildings including soil-structure interaction in elastic layered media, European Conference on Computational Mechanics, München, Germany, August 31-September 3, 1999.
- [2] PALA, M., Zemin yapı dinamik etkilesiminin yapay sinir ağları ile analizi, Doktora Tezi, SAÜ FBE, Sakarya, Nisan, 2004.
- [3] LYSMER J., and KUHLEMEYER, R.L., Finite dynamic model for infinite media, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 95, No. EM4, pp. 859-877, 1969.
- [4] KUTANIS, M., Yapı-zemin dinamik etkileşimi, Doktora Tezi, SAÜ FBE, Sakarya, Kasım, 2001.
- [5] AYDINOĞLU, M.N., Yapı analizi ve tasarımı süresince statik ve dinamik yapı-zemin etkileşimi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, 1994.
- [6] AYDINOĞLU, M.N., Yapı-zemin dinamik etkileşiminin genel formülasyonu ve zemine gömülü yapılar için bir altsistem yöntemi, Doçentlik Tezi, İstanbul, 1981.
- [7] LU, X., CHEN, B., LI, P., and CHEN, Y., Numerical analysis of tall buildings considering dynamic soil-structure interaction, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2003.
- [8] GOUASMIA, A., DJEGHABA, K., Non-linear dynamic soil-structure interaction analysis of buildings, Technological and Economic Development of Economy, Vol. XIII, No 4, 266-271, 2007.
- [9] GOUASMIA, A., DJEGHABA, K., Direct approach to seismic soil-structure-interaction analysis-building group case, Engineering Structures and Technologies, 2(1): 22-30, 2010.
- [10] HIDA, M., Three dimensional non-linear soil-building interaction analysis in lakebed zone of Mexico city during the Hypothetical Guerrero Earthquake, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, pp. 1483-1502, 1998.

- [11] KIM, D.K., and YUN, C.B., Time domain soil-structure interaction in two dimensional medium based on analytical frequency-dependent infinite elements, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 47, No. 7, pp. 1241-1261, 2000.
- [12] WOLF, J.P., OBERNHUBER, P., Non-linear soil-structure interaction analysis using dynamic stiffness or flexibility of soil in the time domain, *Earthg. Eng. and Structural Dynamics*, 13, 195-212, 1985.
- [13] WOLF, J.P., and SONG, C., Dynamic stiffness matrix of unbounded soil by finite element multi-cell cloning, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, pp. 233-250, 1994.
- [14] HALABIAN, A.M., and NAGGAR, M.H.E., Effect of non-linear soil-structure interaction on seismic response of tall slender structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 639–658, 2002.
- [15] MEDINA, F., and TAYLOR, R.L., Finite element techniques for problems of unbounded domains, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19, 1209–1226, 1983.
- [16] VILADKAR, M.N., GODBOLE, P.N., and NOORZAEI, J., Soil-structure interaction in plane frames using coupled finite-infinite elements, *Computers and Structures*, 39(5), 535–546, 1991.
- [17] CHOI, J.S., YUN, C.B., and KIM, J.M., Earthquake response analysis of the Hualien soil-structure interaction system based on updated soil properties using forced vibration test data, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 1–26, 2001.
- [18] ISRAIL, A.S.M., and BANERJEE, P.K., Effects of geometrical and material properties on the vertical vibration of three-dimensional foundations by BEM, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 14, 49–70, 1990.
- [19] BERNAL, D., and YOUSSEF, A., A hybrid time frequency domain formulation for nonlinear soil-structure interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 673–685, 1998.
- [20] MYLONAKIS, G., NIKOLAOU, S., and GAZETAS, G., Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 824-85, 2006.
- [21] XUEZHANG, W., and NOBUO, F., Effects of spread foundation type and its shape on dynamic soil structure interaction, *Journal of Structural Engineering. B*, Vol. 52, Japan, pp:23-31, 2006.

- [22] AVILÉS, J., and PÉREZ-ROCHA, L.E., Effects of foundation embedment during building-soil interaction. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 1523–1540, 1998.
- [23] BRINKGREVE, R. B. J., AL-KHOURY, R., BAKKER, K. J., BONNIER, P. G., BRAND, P. J. W., BROERE, W., BURD, H. J., SOLTYS, G., VERMEER, P. A., HAAG, D. D., *Plaxis finite element code for soil and rock analyses*, Published and Distributed by A.A. Balkema Publisher, The Netherlands, 2002.
- [24] ROSSET, J.M., and KAUSEL, F., Dynamic soil-structure interaction, *Proceedings of the Second International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Blacksburg, Virginia, Vol. 2: 3-19, 1976.
- [25] YANG, Z., and JEREMIC, B., Study of soil layering effects on lateral loading behavior of piles, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (6): 762-770, 2005.
- [26] JOHNSON, K., LEMCKE, P., KARUNASENA, W. and SIVAKUGAN, N., Modelling the load-deformation response of deep foundations under oblique loading, *Environmental Modelling and Software*, 21: 1375-1380, 2006.
- [27] KARTHIGEYAN, S., RAMAKRISHNA, V.V.G.S.T. and RAJAGOPAL, K., Influence of vertical load on the lateral response of piles in sand, *Computers and Geotechnics*, 33: 121-131, 2006.
- [28] KARTHIGEYAN, S., RAMAKRISHNA, V.V.G.S.T. and RAJAGOPAL, K., Numerical investigation of the effect of vertical load on the lateral response of piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (5): 512-521, 2007.
- [29] LAMAN, M., KING, G.J.W., and DICKIN, E.A., Three-dimensional finite element studies of the moment-carrying capacity of short pier foundations in cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, 25: 141-155, 1999.
- [30] KUHLEMEYER, R.L., LYSMER, J., Finite element method accuracy for wave propagation problems, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 99 (SM5), 421-427, 1973.
- [31] YANG, Z., Finite element simulation of response of buried shelters to blast loadings, *Finite Elements in Analysis and Design*, 24, 113-132, 1997.
- [32] COURANT, R., FRIEDRICHS, K., LEWY, H., On the partial difference equations of mathematical physics, *IBM Journal*, 11, 215–234, 1967.
- [33] SMITH, I.M., GRIFFITH, D.V., *Programming the finite element method*, Second Edition, John Wiley & Sons, Chisester, U.K., 1982.

- [34] O. ZIENKIEWICZ, R. TAYLOR, The finite element method, 4th Edition. Vol. 1,2. McGraw-Hill, London, 1991.
- [35] HUGHES, T.J.R., The finite element method, Prentice-Hall, 1987.
- [36] USTA MÜHENDİSLİK., Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu, Giresun, 2009.
- [37] DEMİRTAY SONDAJ., Giresun Merkez Aksu Mahallesi Zemin Etüd Raporu, 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Nadir KARAHAN, 01.10.1986 da İstanbul' da doğdu. İlkokul eğitimini İstanbul'da, orta ve lise eğitimini Giresun'da tamamladı. 2003 yılında Giresun Lisesinden mezun oldu. 2004 yılında başladığı Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü 2009 yılında birincilikle bitirdi. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Yapı EBD' da yüksek lisansa başladı. 2010 yılında Kartaş İnş. San. ve Tic. Ltd. Şirketinde şantiye mühendisi olarak çalışmaya başladı. Halen Kartaş İnş. San. ve Tic. Ltd. Şirketinde görevine devam etmektedir.