

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

**SARSMA TABLASI İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ ÖLÇEKLİ
YAPI-ZEMİN MODELİ ÜZERİNDE SAYISAL VE
DENEYSEL İNCELEMELER**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmad Jawad OMID

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü bilim Dalı : YAPI
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ

Haziran 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SARSMA TABLASI İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ ÖLÇEKLİ
YAPI-ZEMİN MODELİ ÜZERİNDE SAYISAL VE
DENEYSEL İNCELEMELER**

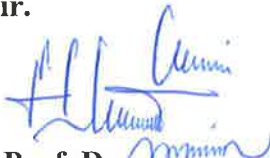
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmad Jawad OMID

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü bilim Dalı : YAPI

Bu tez 06.07.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Erkan ÇELEBİ
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Naci ÇAĞLAR
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Fatih GÖKTEPE
Üye

BEYAN

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

Ahmad Jawad OMID

12.07.2017

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında her aşamada beraber çalıştığım ve desteğini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Fatih GÖKTEPE'e teşekkür ederim. Eğitim-öğretimim boyunca beni teşvik eden, maddi ve manevi hiçbir şeyi esirgemeyen sevgili anne ve babam Masooma- Abdul Rasol SHEKIB'a ve kardeşlerime desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2015-50-01-046) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
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.....	8

BÖLÜM 2.

YAPI-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİM PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN SAYISAL VE DENEYSEL YÖNTEMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	11
2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapı-Zemin Sisteminin Modellenmesi ve Analizi.....	11
2.1.1. Zemin ortamının modellenmesinde sonlu eleman ağ yapısı ve viskoz sönümleyici sınırlar.....	11
2.1.2. Viskoz sönümleyici sınırlar.....	14
2.1.3. Rayleigh sönümü.....	15
2.1.4. Zeminin Mohr-Coulomb akma kriteri altında elasto-plastik malzeme davranış modeli.....	17
2.1.4.1. Mohr-Coulomb malzeme modeli parametreleri.....	18
2.1.4.1.1. Elastisite modülü (E).....	18

2.1.4.1.2. Poisson oranı (ν).....	18
2.1.4.1.3. Kohezyon (c).....	19
2.1.4.1.4. İçsel sürtünme açısı (ϕ).....	19
2.1.4.1.5. Kabarma açısı (ψ).....	19
2.1.5. Bina yapısının sonlu elemanlarla modellenmesi ve Plaxis 2D yazılımına uyarlanması	19
2.2. Sarsma Tablası Deneyleriyle Yapı-Zemin Sisteminin Analizi.....	23
2.2.1. Yapı-zemin etkileşiminin incelendiği saha deneyleri.....	23
2.2.2. Sarsma tablası test modelleri.....	24
2.2.2.1. Rijit zemin sarsma kutusu.....	24
2.2.2.2. Esnek zemin sarsma kutusu.....	25
2.2.2.3. Laminer zemin sarsma kutusu.....	26
 BÖLÜM 3.	
SARSMA TABLASINDA KULLANILACAK YAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN SONLU ELEMAN MODELİ VE DEPREM YÜKLERİ ALTINDA SAYISAL ANALİZİ.....	27
3.1. Sarsma Tablası Deney Modelinin Temsil Ettiği Gerçek Yapı-Zemin (GYZ) Probleminin Boyutsal ve Mekanik Özellikleri.....	27
3.2. Sarsma Tablası Kapasitesine Uygun Geometrik Ölçeklendirme Katsayısının Belirlenmesi ve Sistemin Kinematik Parametrelerine Uyarlanması	28
3.3. Dinamik Analizlerde Kullanılacak Deprem Kayıtlarının Belirlenmesi ve Ölçeklendirilmesi.....	34
3.4. Gerçek Yapı Örneğinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle (SEY) Deprem Analizi.....	36
3.5. Ölçeklendirilmiş Model Yapının SEY ile Deprem Analizi	38
3.5.1. Model yapı için geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyinin belirlenmesi	41
3.6. Gerçek Yapı-Zemin Sisteminin SEY ile Deprem Analizi.....	42
3.7. Deneysel Olarak İncelenecek Olan Ölçeklendirilmiş Yapı-Zemin Modelinin SEY ile Deprem Analizi.....	47

3.7.1. Yapı-zemin deney modeli için geometrik ölçeklendirme katsayısının doğrulanması	53
3.8. Deprem Yükleri Altında Serbest Zemin Titreşiminin Gerçek Sistem ve Deney Modeli İçin SEY ile İncelenmesi ve Geometrik Ölçek Katsayısının Doğrulanması	58
3.9. Deprem Yükleri Altında Yapısız Temel-Zemin Etkileşiminin Gerçek Sistem ve Deney Modeli İçin SEY ile İncelenmesi ve Geometrik Ölçek Katsayısının Doğrulanması.....	60

BÖLÜM 4.

SARSMA TABLASINDA KULLANILACAK YAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN TASARIM MODELİ VE DEPREM YÜKLERİ ALTINDA DENEYSEL ANALİZİ.....	64
4.1. Ölçekli Yapı Modelinin Tasarımı ve İmalatı	64
4.2. Ölçekli Zemin Sarsma Kutusu Modelinin Tasarımı ve İmalatı.....	66
4.3. Sarsma Tablası Deneyinde Kullanılan Zemin Örneğinin Özellikleri ve Arazi Koşullarında Örselenmeden Numune Alımı	71
4.4. Sarsma Tabla Özellikleri, Deney Düzeni ve Veri Toplama Sistemi ..	74
4.5. Sarsma Tablasına Rijit Bağlı Yapı Modelinin Deprem Yükleri Altında Zorlanmış Titreşimi ve Test Sonuçları.....	76
4.6. Sarsma Tablasında Zemine Oturan Yapı Modelinin Deprem Yükleri Altında Zorlanmış Titreşimi ve Test Sonuçları	78
4.7. Deprem Yükleri Altında Serbest Zemin Titreşiminin Deneysel Olarak İncelenmesi	81
4.8. Deprem Yükleri Altında Yapısız Temel-Zemin Etkileşiminin Deneysel Olarak İncelenmesi	82

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR.....	84
KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	90

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

YZE	: Yapı-zemin etkileşimi
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
GYZ	: Gerçek yapı-zemin
GY	: Gerçek yapı
MY	: Model yapı
MZ	: Model zemin
GZ	: Gerçek zemin
λ	: Geometrik faktörü
C_1, C_2	: Elastik yarı sonsuz düzlemin sönüm sabitleri
W', D', L'	: Zemin boyutları
c	: Kohezyon
e	: Boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
E_0	: Başlangıç elastisite modülü
f	: Frekans
α, β	: Malzeme sönümü
g	: Plastik potansiyel fonksiyonu
V_s	: Zeminin kayma modülü
H'	: Binanın yüksekliği
B	: Binanın temeli
L_x, L_y	: Binanın genişliği
I	: Atalet momenti
K	: Rijitlik matrisi
K_0	: Toprak basınç katsayısı
K_t	: Elastik ötesi matris
M	: Kütle matrisi
P	: Gerilme kuvvet matrisi

ρ	: Zeminin yoğunluğu
R_{inter}	: Arayüz dayanım azaltma faktörü
T	: Periyot
u_x, u_y	: x ve y doğrultularındaki ötelenme yerdeğiştirmeleri
u_i	: İlgili doğrultudaki partikül hızı
t	: Sınır kuvvet vektörü
t	: Zaman
γ	: Birim hacim ağırlık
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı
ψ	: Kabarma açısı
ξ	: Sönüm oranı
w	: Kat ağırlığı
ω	: Yapının açısal frekansı
V_p	: Basınç dalgası yayılma hızı
ν	: Poisson oranı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Plaxis 2D programında kullanılan sonlu eleman tipleri.....	12
Şekil 2.2. Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli..	15
Şekil 2.3. Viskoz sönümleyici sınırlar.....	17
Şekil 2.4. Rijit eleman ve girdi parametreleri.....	20
Şekil 2.5. Bina kat sayısına bağlı periyot değişiminin karşılaştırılması.....	23
Şekil 2.6. Çalışma sahasının genel yapısı ve şematik düzeni.....	24
Şekil 2.7. Rijit zemin sarsma kutusu.....	25
Şekil 2.8. Esnek silindirik zemin sarsma kutusu.....	25
Şekil 2.9. Laminer zemin sarsma kutusu.....	26
Şekil 3.1. Gerçek yapı-zemin sistemi.....	27
Şekil 3.2. Yapı-zemin etkileşim probleminin ölçekli modeli.....	30
Şekil 3.3. Model yapının özellikleri	31
Şekil 3.4. Kocaeli depremi (1999), (a) orijinal kayıt, (b) ölçekli kayıt.....	34
Şekil 3.5. Chi-Chi depremi (1999), (a) orijinal kayıt, (b) ölçekli kayıt.....	35
Şekil 3.6. Loma-Prieta depremi (1989), (a) orijinal kayıt, (b) ölçekli kayıt.....	36
Şekil 3.7. (a) Gerçek yapının görüntüsü, (b) Gerçek yapının sonlu elemanlar dayalı matematik modeli.....	37
Şekil 3.8. Üç farklı deprem etkisindeki gerçek yapının yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri.....	37
Şekil 3.9. (a) Model yapının görüntüsü, (b) Model yapının sonlu elemanlar dayalı matematik modeli.....	39
Şekil 3.10. Üç farklı deprem etkisindeki model yapının yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri.....	40
Şekil 3.11. Gerçek yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli.....	43

Şekil 3.12. Kocaeli depremi etkisindeki gerçek sistemde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri.....	44
Şekil 3.13. Chi-Chi depremi etkisindeki gerçek sistemde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmelerini.....	45
Şekil 3.14. Loma-Prieta depremi etkisindeki gerçek sistemde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri.....	45
Şekil 3.15. Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen ölçekli sonlu eleman modeli.....	49
Şekil 3.16. Kocaeli depremi etkisindeki modelde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri.....	50
Şekil 3.17. Chi-Chi depremi etkisindeki modelde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri.....	50
Şekil 3.18. Loma-Prieta depremi etkisindeki modelde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri.....	51
Şekil 3.19. Gerçek zeminin sismik davranışı için geliştirilen sonlu eleman modeli.....	58
Şekil 3.20. Ölçeklendirilmiş model zeminin sismik davranışı için geliştirilen sonlu eleman modeli.....	58
Şekil 3.21. Gerçek zeminde temel plağının sismik davranışı için geliştirilen sonlu eleman modeli.....	61
Şekil 3.22. Ölçeklendirilmiş model zeminde temel plağının sismik davranışı için geliştirilen sonlu eleman.....	61
Şekil 4.1. Model yapının görüntüsü.....	64
Şekil 4.2. Atölyede kesilmiş ve delinmiş çelik sac levhalar.....	65
Şekil 4.3. Yapı modelinin montaj süreci.....	65
Şekil 4.4. Tamamlanan yapı modeli.....	65
Şekil 4.5. Sarsma kutusunda dikkate alınacak zemin boyutları.....	66
Şekil 4.6. Laminer zemin sarsma kutusunun sonlu eleman modeli.....	69
Şekil 4.7. Zemin sarsma kutusunun yan duvarlarının imalatında alüminyum çerçeve detayı.....	69
Şekil 4.8. Zemin sarsma kutusunun tabanı için ahşap taban plakası ve imalat detayı.....	70

Şekil 4.9. Zemin sarsma kutusunun yan duvarlarının imalatında kauçuk tabakalar ve imalat detayı.....	70
Şekil 4.10. Sarsma tablasına kullanacak zemin sarsma kutusunun genel görünümü.....	71
Şekil 4.11. Deneysel çalışmaların yapıldığı alanın yer bulduru haritası.....	72
Şekil 4.12. Zemin numunesinin araziden laboratuvara temini.....	73
Şekil 4.13. Tek eksenli sarsma tablası ve çevre bileşenleri.....	75
Şekil 4.14. İvme ölçerler ve veri toplama sistemleri	75
Şekil 4.15. Model yapının tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonuna verdiği ivme cinsinden tepki.....	76
Şekil 4.16. Model yapının tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonuna verdiği yer değiştirme cinsinden tepki.....	76
Şekil 4.17. Sarsma tablasına rijit olarak sabitlenmiş model yapı.....	77
Şekil 4.18. Yapı-zemin etkileşim modelinde bina tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonu verdiği ivmesel tepki.....	79
Şekil 4.19. Yapı-zemin etkileşim modelinde bina tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonu verdiği yer.....	79
Şekil 4.20. Sarsma tablasına sabitlenmiş yapı-zemin modeli.....	80
Şekil 4.21. Sarsma tablasına sabitlenen zemin modeli.....	81
Şekil 4.22. Sarsma tablasına sabitlenen yapısız temel-zemin modeli.....	83

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Geometrik ölçeklendirme katsayısının problemin kinematik ve dinamik parametrelerine uyarlanması.....	29
Tablo 3.2. Farklı ölçekleme faktörlerine göre deney modelinin boyutları.....	29
Tablo 3.3. Model yapının özellikleri	32
Tablo 3.4. Gerçek yapı-zemin problemi ile yapı-zemin modeli arasında geometrik ölçek faktörüne bağlı benzeşim.....	33
Tablo 3.5. Kullanılan deprem yer hareketleri.....	34
Tablo 3.6. Gerçek yapının yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmeleri.....	38
Tablo 3.7. Model yapının yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmeleri	40
Tablo 3.8. Kocaeli depremi için geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi.....	41
Tablo 3.9. Chi-Chi depremi için geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi.....	41
Tablo 3.10. Loma-Prieta depremi için geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi.....	42
Tablo 3.11. Gerçek yapı- zemin probleminin mekanik özellikleri.....	42
Tablo 3.12. Gerçek üstyapının mekanik özellikleri.....	43
Tablo 3.13. Zeminin doğrusal elastik davranışı altında gerçek binanın yatay kat yer değiştirmesi.....	46
Tablo 3.14. Zeminin elasto-plastik davranışı altında gerçek binanın yatay kat yer değiştirmeleri.....	46
Tablo 3.15. Yapı-zemin etkileşimin dikkate alınmadığı durumda gerçek yapının yatay kat yer değiştirmeleri.....	47
Tablo 3.16. Ölçeklendirilmiş yapı-zemin sisteminin mekanik özellikleri.....	48
Tablo 3.17. Ölçeklendirilmiş binanın mekanik özellikleri.....	48
Tablo 3.18. Zeminin doğrusal elastik davranışı altında ölçeklendirilmiş binanın	

yatay kat yer değiştirmeleri.....	52
Tablo 3.19. Zeminin elasto-plastik davranışı altında ölçeklendirilmiş binanın yatay kat yer değiştirmeleri.....	52
Tablo 3.20. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı durumda gerçek yapının yatay kat yer değiştirmeleri.....	53
Tablo 3.21. Yapı-zemin etkileşiminin doğrusal elastik zemin için analizi (Kocaeli depremi).....	53
Tablo 3.22. Yapı-zemin etkileşiminin elasto-plastik zemin için analizi (kocaeli depremi).....	54
Tablo 3.23. Yapı-zemin etkileşiminin doğrusal elastik zemin için analizi (Chi-Chi depremi).....	55
Tablo 3.24. Yapı-zemin etkileşiminin elasto-plastik zemin için analizi (Chi-Chi depremi)	55
Tablo 3.25. Yapı-zemin etkileşiminin doğrusal elastik zemin için analizi (Loma-Prieta).....	56
Tablo 3.26. Yapı-zemin etkileşiminin elasto-plastik zemin için analizi (Loma-Prieta).....	56
Tablo 3.27. Gerçek zeminin sismik davranışları.....	59
Tablo 3.28. Model zeminin sismik davranışları.....	59
Tablo 3.29. Chi-Chi depremi altındaki zeminin davranışından geometrik ölçek katsayısının doğrulanması.....	59
Tablo 3.30. Loma-Prieta depremi altındaki zeminin davranışından geometrik ölçek katsayısının doğrulanması.....	60
Tablo 3.31. Gerçek zeminde sismik yükler altında kinematik etkileşim.....	61
Tablo 3.32. Model zeminde sismik yükler altında kinematik etkileşim.....	62
Tablo 3.33. Chi-Chi depremi altındaki zemin-temel davranışından geometrik ölçek katsayısının doğrulanması.....	62
Tablo 3.34. Loma-Prieta depremi altındaki zemin-temel davranışından geometrik ölçek katsayısının doğrulanması.....	62
Tablo 4.1. SAÜ sarsma tablası özellikleri.....	74
Tablo 4.2. Ölçekli model yapının sinüs fonksiyonuna göre sayısal ve deneysel olarak periyotları ve maksimum.....	77

Tablo 4.3. Ölçekli model yapının farklı depremlere göre sayısal ve deneysel olarak maksimum bina tepe yer değiştirmeleri.....	78
Tablo 4.4. Yapı-zemin modelinin sinüs fonksiyonu etkisine göre sayısal ve deneysel olarak periyod ve maksimum bina tepe yer değiştirmeleri...	79
Tablo 4.5. Yapı-zemin modelinin farklı depremlere göre sayısal ve deneysel olarak maksimum bina tepe yer değiştirmeleri.....	80
Tablo 4.6. Deprem yükler altında serbest zemin titreşiminin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması.....	82
Tablo 4.7. Deprem yükler altında yapısız temel-zemin titreşiminin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması.....	83



ÖZET

Anahtar kelimeler: Deprem davranış, sonlu eleman, ölçek katsayısı, sarsma tablası deneyi, yapı-zemin etkileşimi.

Bu çalışmanın amacı, yapı-zemin etkileşimi (YZE) problemi için tam ölçekli saha koşullarını hasas bir şekilde temsil eden küçük kapasiteli sarsma tablası deneyleri için uygun bir ölçeklendirme katsayısı belirlemektir. Ele alınan ölçeklendirme yaklaşımı, gerçek sistemle sadece geometrik benzerlik değil aynı zamanda kinematik ve dinamik benzerliği de içermektedir. Farklı deprem hareketleri altında orta yükseklikteki binaların dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin etkilerini gösterebilmek için hem gerçek hem de ölçekli deney modeli doğrudan düzlem şekil değiştirme koşulları altında sonlu eleman yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan Chi-Chi (1999), Loma-Prieta (1989) ve Kocaeli (1999) deprem ivme kayıtları yapı-zemin sisteminin ana kaya seviyesinde uygulanmıştır. Gerçek sistem ve ölçekli yapı-zemin ortak modeli sayısal olarak orijinal ve ölçeklendirilmiş deprem kayıtları altında aşağıda belirtilen üç farklı durumlar için incelenmiştir: a) zemine rijit sabitlenmiş yapı modeli, b) doğrusal elastik zemin davranışı kabulü altında yapı-zemin modeli, c) zeminin plastik deformasyonlarını Mohr-Coulomb akma kriteri altında dikkate alan yapı-zemin modeli. Yapı-zemin dinamik etkileşim problemini gerçekçi bir biçimde analiz etmek için geliştirilen matematik simülasyonda, yük kaynağından uzak bölgelere iletilen dalgaları model sınırlarında serbest bırakmak ve yayılan enerjiyi bu kesim noktalarında tüketmek için viskoz sönümleyici sınırlar kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında sarsma tablası deneylerinde kullanılacak model için belirlenen ölçeklendirilme faktörü $\lambda=45$ 'in gerçek saha koşullarını temsil edebilme kapasitesi, zemine rijit bağlı ve yapı-zemin etkileşimli analizlerden elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılmasıyla değerlendirildi. Ölçeklendirilmiş geoteknik model, alüminyum çerçeveler ve kauçuk tabakalardan tasarlanan laminar zemin sarsma kutusu ile arazi koşullarında alınan örselenmemiş zemin numunesinden oluşmaktadır. Daha sonraki aşamada, yapı-zemin ortak sistemin ölçeklendirilmiş sayısal modeline ait elde edilen sonuçlar, sarsma tablasındanda test edilen modelin deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmış ve geçerliliği onaylanmıştır. Ayrıca, bu çalışma kapsamında kinematik etkileşimi, serbest yüzey titreşimine ve yerel zemin koşullarının deprem yer hareketine etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sayısal ve laboratuvar deney sonuçlarına göre, küçük ölçekli sarsma tablası deneylerinde kullanılan yapı-zemin modeli için dikkatlice seçilmiş büyük geometrik ölçek katsayılarıyla istenilen doğruluk düzeyinde tam ölçekli yapı-zemin sisteminin davranışının yansıtılabileceği sonucu çıkartılabilir. Yerel zemin özellikleri yapıların deprem davranışını ve serbest zemin hareketine zemine rijit bağlı yapılara ve ana kaya hareketine göre önemli dercede büyülterek değiştirdiği açıkça gözlemlenmiştir.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON SCALED SOIL-STRUCTURE MODEL FOR SMALL SHAKING TABLE TESTS

SUMMARY

Keywords: Earthquake response, finite element, scale coefficient, shaking table test, soil-structure interaction

The goal of this study is to determine an appropriate scaling coefficient for small-capacity shaking table tests representing the full-scaled field conditions rigorously for the soil-structure interaction (SSI) problem. The scaling approach discussed in this study includes not only geometric similarity but also kinematic and dynamic similarity with the real system. In order to analyze the soil-structure interaction effects on dynamic response of the mid-rise structures under different earthquake motions for both real system and scaled test model were directly accomplished by using 2D finite element method under plane-strain condition. Three different earthquake acceleration records as Chi-Chi (1999), Loma-Prieta (1989) and Kocaeli (1999) have been considered at the bedrock level of the soil-structure system for this study. The real system and the scaled soil-structure coupled model were investigated numerically for three different conditions under original and scaled earthquakes records, respectively: (a) fixed base model, (b) soil-structure model under assumption of linear elastic soil behavior, (c) soil-structure model accounting for plastic deformations of the underlying soil under Mohr–Coulomb failure criterion. To considerably simplify and realistically simulate the SSI analysis, viscous boundaries were used along the truncated interfaces of the model boundaries to avoid unexpected reflection of waves back into the soil region. In the first phase of this work, the representation capacity of the employed scaling factor of 1:45 are evaluated by comparing the structural lateral displacements obtained from fixed base and flexible base analysis for full-scaled field conditions with those for scaled test model to be experimentally examined in the small-capacity shaking table. The scaled geotechnical model is composed of the undisturbed soil specimen taken from real site and the laminar soil container designed to be formed of aluminum frames and rubber layers. Afterwards, the obtained results from the scaled numerical model of the soil-structure coupled system have been validated and verified by those of employing experimental shaking table tests. In addition, the kinematic interaction effect on the free-field ground motion and the local site effects on the earthquake ground motion were assessed numerically and experimentally in the scope of this study. According to the obtained numerical and laboratory test results, it is concluded that the carefully selected large geometric scale coefficients for soil-structure model used in the small scaled shaking table experiments can capture the response of the full-scaled soil-structure system with acceptable accuracy. It is clearly observed that the local soil properties have considerably amplified the earthquake response of the structures and the free field motions in comparison to the fixed base structure and bedrock excitations, respectively.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Aktif deprem bölgelerinde taşıma kapasitesi zayıf zeminler üzerine inşa edilecek yapılar, özellikle çok katlı rijit büyük ölçekli masif yapıların dinamik davranışları günümüzde bilgisayar teknolojisiyle birlikte gelişen sayısal ve deneysel yöntemlere dayalı özel çözüm teknikleri kullanılarak incelenmektedir. 17 Ağustos 1999 Marmara, 19 Eylül 1985 Meksiko ve 22 Şubat 2011 Christchurch Yeni Zelanda depremlerinde olduğu gibi kötü derecelendirilmiş, yumuşak zeminler üzerine inşa edilmiş yapılardaki yapısal hasarlar ve zemin koşullarının deprem hareketini büyüterek yapıya iletmesi sonucunda yapılar beklenenden daha çok hasar almış bundan dolayı daha fazla mal ve can kaybı yaşanmasına sebep olmuştur. Sismik yüklere karşı olan dinamik davranışların gerçeğe daha yakın olarak izlenmek istenmesi durumundaki önemli masif ve rijit yapıların kötü derecelendirilmiş zemin koşullarında inşa edilmesi, zemin ortamının şekil değiştirebilme özelliğinin hesap sürecine katılması, yapıların titreşim davranışının birbirine bağlı üç ortak sistemin dinamik etkileşimi altında değerlendirilmesini gerektirir. Bunlar üstyapı, yapı temeli ve temelin altındaki jeoteknik zemin ortamıdır. Arazi kıtlığı mühendisleri çok büyük yapıları yumuşak zeminler üzerine inşa etmeye mecbur bırakmaktadır. Bu nedenle, yapıları deprem gibi doğal afetlere karşı güvenli ama masraflı olmayacak şekilde tasarlama ihtiyacı vardır.

Yapı-zemin ortak sisteminin dinamik davranışında, kinematik ve eylemsizlik etkileşimi önemli rol oynamaktadır. Kinematik etkileşim dinamik analizde yapı temelinde oluşacak olan yer hareketi ile serbest zemin hareketi arasında farklılık oluşturmaktadır. Serbest zemin hareketi, yapı varlığından etkilenmeyen, dolayısıyla

yapısal titreşimlerin, temel ve temel çevresindeki dalga saçılmalarının etkisini göz ardı eden bir yaklaşımdır.

Yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin dikkate alındığı durumlarda zeminin geoteknik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Yapı-zemin etkileşim problemi özellikle kötü dercelendirilmiş zemin gruplarında yani gevşek kumlu veya yumşak killi zemin tabakaları üzerinde inşa edilmiş yapıların deprem davranışında daha önem kazanmaktadır. Bu tip problemlerin özellikle deprem bölgelerinde daha ayrıntılı incelenmesi gerekir. Bu çalışmada da yapı-zemin etkileşiminin önemli olduğu problemler sayısal yöntemlerle ve deneysel yöntemlerle incelenmektedir. Deneysel çalışmalar laboratuvar ortamında ölçekli modeller üzerinde gerçekleştirilmektedir veya sahada tam ölçekli deneyler yapılmaktadır. Sahada yapılan tam ölçekli deneyler hem zahmetli hemde pahalı deneylerdir. Bundan dolayı sarsma tablasında da tam ölçekli deney gerçekleştirmek sarsma tablasının kapasitesi çok büyük olması ve geometrik açıdan da büyük ölçekli olması gerekir. Bu çalışmada laboratuvar ortamında küçük ölçekli sarsma tablası deneyinde böyle karmaşık bir problem olan yapı-zemin etkileşim problemini inceleyebilmek için bir model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu model için de uygun bir ölçeklendirme kat sayısı ele alınmıştır.

1.2. Konu ile İlgili Çalışmalar

Literatürde binaların sismik davranışını araştırmak amacıyla yapı-zemin sisteminin birlikte modellenmesini öngören farklı çözüm yöntemlerine dayalı birçok araştırma yapılmıştır. Tabatabaiefar v.d. [1] zemin ve yapı davranışını incelemek amacıyla yapı-zemin dinamik etkileşim problemine ait matematik model geliştirmişlerdir. Çalışmada, sarsma tablası deneylerinden elde edilen bina tepe noktasındaki maksimum yer değiştirme değerleri ölçülerek önerilen matematik model doğrulanmıştır. Deneylerde kullanılan sarsma tablası 3m x 3m boyutunda olup maksimum 100 kNm yükleme ve 100 kNm moment zorlama kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, dinamik yükleme deneyleri yapı laboratuvarında tek doğrultuda 0.1–50 Hz frekans aralığında gerçekleştirebilmektedir. Deprem yükleri altındaki yapı-zemin ortak sisteminin bina davranışını üzerindeki dinamik etkileşimi

değerlendirebilmek için geliştirilen sonlu eleman modelinde ele alınan zemin bölgesinin toplam uzunluğu 60 m ve derinliği 30m olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada dinamik davranışı incelenecek bina 12 m genişliğinde 45 m yüksekliğinde 15 katlı düzlem bir çerçeve sistem olarak seçilmiştir. Sayısal analiz için kullanılan binaya ait boyutlar 1:30 geometrik ölçeklendirme ile 1.5 m x 0.4 m x 0.4 m model boyutlarına indirgenerek sarsma tablası deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile sayısal çözümler karşılaştırıldığında, geliştirilen matematik modelin laboratuvar ölçümleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Chunyu v.d. [2] Çin deprem yönetmeliğine göre dizayn edilen 124 katlı Şangay Dünya Ticaret Merkezi Kulesi'nin (binanın yüksekliği 632 m, taban ve tavan çapları sırasıyla 83.6 m ve 42 m olarak belirlenmiştir) 1:40 ölçekteki modelini sarsma tablası üzerinde test ederek yapının dinamik karakteristiklerini ve göçme mekanizmalarını belirlemişlerdir. Çin yönetmeliğindeki performans hedeflerine deneysel yürütülen çalışmayla da ulaşılmıştır. Deneylerde kullanılan sarsma tablası 6 x 6 m boyutunda olup maksimum 80 ton yükleme kapasitesine sahiptir. Sarsma tablası testlerinde küçük (0.035 g), orta (0.10g) ve büyük (0.22g) üç farklı deprem seviyesi yer hareketi olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, 0.035g maksimum ivme değerlerine sahip küçük büyüklükteki depremlerde hasar görülmemekte olup, 0.10g maksimum ivmeye sahip orta büyüklükteki depremlerde, taşıyıcı yapısal elemanlarda bazı çatlaklar görülmüştür. Bununla birlikte, 0.22g maksimum ivmeye sahip daha şiddetli depremlerde ise taşıyıcı yapısal elemanlardaki çatlakların daha da büyüdüğü gözlemlenmiştir. Çalışmanın son aşamasında, problem için tanımlanan matematik model geliştirilerek zaman tanım aralığında yapının elastik ve plastik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırılarak önerilen matematik modelin doğruluğu kanıtlanmıştır.

Choi v.d. [3] fay bölgelerine yakın nükleer güç istasyonlarının sismik davranışını belirlemek amacıyla 4 katlı çelik bir yapı modeli kullanarak sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kullanılan sarsma tablası 4 x 4 m boyutunda olup maksimum 30 ton yükleme kapasitesine sahiptir. Laboratuvar ortamındaki dinamik yükleme testleri maksimum 50 Hz frekansında gerçekleştirilebilmektedir. Sarsma

tablası deneylerinde, 1999 yılında Tayvan ülkesinde gerçekleşen Chi-Chi depremine ait ivme kayıtlarıyla birlikte bu depremden türetilmiş kuvvetli yer hareketi verileri kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, dinamik deprem yükleri altında etkileşen nükleer güç istasyonunun temel titreşim frekansının depreme ait frekans aralığından uzak olması sebebiyle nükleer güç istasyonlarına ait yapılar zarar görmemiştir. Bununla birlikte, nükleer güç istasyonu içindeki yüksek katlarda konumlandırılan ve yapısal olmayan elemanların deprem hareketinden daha çok etkilendiği gözlemlenmiştir.

Wang v.d. [4] çalışmalarında 292 metre yüksekliğine sahip bir betonarme kemer barajın 1:300 ölçekteki modelini altı serbestlik dereceli olarak sarsma tablası üzerinde test ederek yapıya ait dinamik karakteristikleri araştırmışlardır. Baraja ait kret uzunluğu 798.5 m olup taban ve tavan genişlikleri sırasıyla 72.9 ve 12 m'dir. Deneylerde kullanılan sarsma tablası 5 x 5 m boyutunda olup maksimum 20 ton yükleme kapasitesine sahiptir. Sismik yükleme deneyleri yapı laboratuvarında 1-120 Hz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Betonarme kemer barajın yapısal davranışı dinamik yükün artan kuvvet değerlerinde incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda baraj yapısında meydana gelen aşırı zorlanmalara bağlı olarak on bir adet çatlak olduğu gözlemlenmiştir.

Hosseinzadeh v.d. [5] sismik yüklemeler altında tek ve komşu binaların dinamik tepkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, farklı kat yüksekliklerine (5, 10, 15 ve 20 kat) sahip dört adet çelik bina düşünülmüştür. Kullanılan bina modellerinde her bir katın yüksekliği 3 cm ve kare şeklindeki yüzey döşemelerinin boyutları 20 x 20 cm olarak seçilmiştir. Binaların oturduğu tek katlı homojen zemin ortamı 120 cm çapında silindirik model olarak tasarlanmış olup 60 cm yüksekliğe sahiptir. Araştırmacılar, 1940 yılında Amerika'da gerçekleşen El-Centro ve 1981 yılında İran'da meydana gelen Tabas depremlerine ait ivme kayıtlarını kullanarak zemin-temel-yapı sisteminin 1:100 ölçekteki modelini sarsma tablası üzerinde test ederek yapının dinamik parametrelerindeki değişimi ve göçme mekanizmalarını belirlemişlerdir. Deneylerde kullanılan sarsma tablası 120 x 140 cm boyutundadır. Deneysel çalışmalarda rezonans frekans değerindeki değişim komşu binaların dinamik davranışını önemli

derecede değiştirmezen, tek başına bulunan binalarda etkisini fazlasıyla göstermiştir.

Yang v.d. [6] gerçek yapı 430 m orta açıklığa ve her iki tarafında 160 metre yan açıklığı bulunan çift tabliyeli kablolu bir köprüdür. Bu çalışmanın amacına uygun yenilikçi ifte sarsma test sistemi tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Bu çalışmanın amacına uygun yenilikçi ifte sarsma test sistemi Hong Kong Bilim ve Teknoloji niversitesinde tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Sistem 2 adet sarsma tabladan oluşmaktadır. Her tabla 1.5 m'ye 1.5 m ölçülerinde ve maksimum 2 ton yükleme kapasitesine sahip olup x eksenini doğrultusunda maksimum 1g ivme ve +75 mm vuruş sağlamaktadır. Gerçek köprünün 1:200 ölçekli benzerlik kanunları temeline dayalı modeli dinamik testler için sunulmuştur.

Abdoullah v.d. [7] toprak dolgu barajlarının deprem karşısındaki davranışını simüle edebilmek için sarsma tablası deneyleri ve sonlu elemanlar yöntemleri ile analiz yaparak incelemiştir. İvme sensörleri ve boşluk basıncını ölçecek sensörler vasıtasıyla sarsma tabası deneylerinde ve matematik modele dayalı sonlu elemanlar yazılımını kullanarak toprak dolgu barajının sismik davranışı analiz edilmiştir. Sonuçlar dolgunun artan gerilme altında çöktüğünü ve bunun dolgu stabilitesinin azalmasına, şekil değiştirmenin artmasına ve deformasyon oluşmasına sebep olduğunu açıkça göstermiştir ve dolgunun kendi çözüldüğü ihtimalini göstermektedir. Sarsma tablası deneyinden elde edilen Poisson oranı daha önce diğer bilim adamları tarafından elde edilen değere çok yakın çıkmış olması deneysel çalışmanın doğruluk düzeyi hakkında bir kanıt olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada iki boyutlu sonlu eleman yönteminin sonuçları, sarsma tabla deneyi sonuçları ile örtüştüğü gözlemlenmiştir ve toprak dolgulu barajların bu yöntemleri kullanarak modellenmesini destekleyen bir çalışma olduğu gösterilmiştir.

Zhou v.d. [8] kat döşemelerinde büyük boşluklar bulunduran büyük açıklıkların kafes kirişlerle çözümlendiği, çok kuleli bağlantılı bir yapıyı incelemiştir. Bu alışmanın İlk aşamasında 1:25 ölçekli yapısal model sarsma tablasında küçük, orta ve büyük ölçekli deprem seviyeleri için test edilmiştir. Bu çalışmada kullanan sarsma tablası

Tongji Üniversitesinin inşaat mühendisliğinde afet azaltma kamu laboratuvarında yer almaktadır. Bu sarsma tablası 6 yönde hareket üretebilme özelliğine sahiptir ve bu deneyde kullanan sarsma tablasının büyüklüğü 4 x 4 m ölçülerindedir ve 250 kN yükleme kapasitesine sahiptir. Bu cihaz 150 kN'luk bir yük için yatay çapraz ve düşey doğrultularda sırasıyla maksimum 1.2g, 0.8g ve 0.7g ivmelerini üretebilmektedir. Çalışma frekansı 0.1 Hz ile 50 Hz arasında değişmekte olup veri toplamak için 96 kanala sahiptir. Deney sonuçları aynı zamanda düzensiz yapı sayısal analizleri ile karşılaştırıldığında ve her iki sonuçta olan yapısal karmaşıklığa rağmen, bina tepkileri Çin yönetmeliklerinin gerektirdiği şartları sağlamakta ve yapı burulmasının da dikkate değer olmadığını göstermektedir. Uzun mesafe bağlayıcı kafes kirişlerinin dayanımı ve rijitliği, güçlü deprem etkisinde oluşabilecek büyük düşey yer değiştirmeler nedeniyle geliştirilmesi önerilmektedir.

Jiang v.d. [9] çerçeveli büyük ölçekli betonarme yapının sismik davranışını değerlendirebilmek ve hasar yapısını incelemek için 1:25 ölçekli model çatıdan ayarlı kütle sönümleyicili (KS) bir model üzerinde sarsma tablası deneylerinde gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada en büyük yer değiştirmeler ve ivmesel tepkiler ölçülmüştür. İncelenen bina 55 katlı olup toplam yükseklik 201 m ve arazide 39 x 36 metrelik yer kaplamaktadır. KS ile birlikte ve KS olmadan dinamik davranış ve sönümleme etkisi karşılaştırıldı. Sonuçlar, çerçeveli büyük ölçekli yapının mükemmel bir depremsel performansa sahip olduğunu ve KS cihazının kayda değer bir titreşim azaltma etkisi olduğunu göstermektedir. Ölçekli modeli simüle eden bir sonlu eleman (SE) modeli de geliştirilmiştir, sönüm etkisi ve dinamik karakteristik ilgili özellikleri yapısal davranış içerisinde daha iyi anlaşılabilmesi için sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Guoxinga v.d. [10] güçlü yer hareketlerine maruz yumuşak zeminde inşa edilmiş metro tünel yapılarını hasar mekanizmalarını araştırmak için sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada düşük frekans bileşenleri açısından zengin yer hareketlerine yapı ve zeminin dinamik tepkilerinin daha hassas olduğu gösterilmiştir. Metro tünel yapısının deprem davranış karakteristikleri Nanjing Teknoloji Üniversitesinde sarsma tablası yardımı ile incelenmiştir. Bu sarsma tablasının

boyutları 4.86 m ve 3.36 m büyüklüğüne ve sadece tek doğrultuda hareket üretilen özelliğe sahiptir. Maksimum 25 ton kapasiteli bir sarsma tablasıdır ve maksimum 1-g ivme üretmesine izin verilebilecek bir düzenektir. Zemin girdi hareketinin frekans içeriği yapının yatay yer değiştirmelerini açık olarak etkilediği bu çalışmada ortaya konulmuştur, ayrıca sarsma tablasında incelenen yapıdaki en büyük hasarlar binanın üst ve alt katlarındaki iç kolonlarda meydana gelmiştir.

Chunyu v.d [11] düşeyde ve planda büyük düzensizlikler içeren 112.4 m yükseklikteki ofis binasının deprem performansını araştırabilmek için sarsma tablasında 1:20 ölçekli modelini test etmiştir. Bu çalışma Çin Bina Araştırmaları Akademisi sarsma tablasında deneysel olarak incelenen bu yapı için küçük, orta ve büyük ölçeklerde depremler dikkate alınmıştır. Düzensizliklerin yapının sismik kapasitesi üzerindeki etkileri ve aynı zamanda hasar dağılımlarına düzensizlik etkisi araştırılmıştır.

Rodriguez v.d. [12] Bu çalışmada 4 katlı çelik minyatür bir yapının doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik davranışını küçük ve büyük ölçekli sarsma tablası testleri altında incelemişlerdir. Sarsma tablasından elde ettikleri verilere göre bir analitik modelin geliştirmesini tartışmışlardır. Analitik modeli doğrulamak ve kalibre etmek amacıyla yapı modelinin sarsma tablası deney sonuçlarını kullanmışlardır. Ayrıca ağırlıkça büyük kirişlerin sismik performanslarına bu çalışmada odaklanılmıştır. Analitik modelde, titreşim modları için sarsma tablası deneylerinden elde ettikleri viskoz sönüm oranlarını kullanmışlardır.

Hutchinson v.d. [13] yapısal olmayan genellikle biyoloji ve kimya laboratuvarları gibi ortamlarda bulunan, deprem sırasında devrilme, kayma ve göçme yüzünden can ve mal kayıplarına sebep olabilecek olan tezgâh-raf sistemlerinin dinamik davranışını sarsma tablası deneyleriyle incelemişlerdir. Elde ettikleri deney sonuçlarını sayısal modellerin iyileştirilmesinde kullanmışlardır.

Yu v.d. [14] çalışmasında tam-ölçekli bir yapının deprem yükleri altındaki yapısal davranışının gerçekçi anlamda simülasyonunu yapabilmek için bir test yönteminin

sayısal doğrulanması ve geliştirilmesi öngörülmektedir. Çalışmanın yenilikçi tarafı ve özgünlüğü zorlanmış titreşimin doğrusal sarsıcı yardımıyla uygulanmasıdır. Bu çalışmada zorlanmış titreşim testlerinde kullanılan eksantrik sarsıcıya alternatif bir yöntemi ortaya koymuştur.

Yoshida v.d. [15] simetrik olmayan yapıların dinamik yükleme altında ortaya çıkan burulma davranışının “magnetorheological (MR)” sönümleyicilerle kontrolü üzerine bir çalışma yapmışlardır. İki katlı bir model yapıyı sarsma tablası üzerinde El Centro depremi kayıtlarını kullanarak test etmişlerdir. Çalışmada, MR sönümleyici kontrol sistemlerinde kullanılan yarı aktif kontrol sistemler, pasif kontrol sistemlere göre titreşim azaltma açısından sarsma tablası deneylerinde üstünlükler göstermiştir.

Wu v.d. [16] sismik temel yalıtımlı çelik bir yapı sistemini değişik deprem kayıtları için sarsma tablası üzerinde test etmişler ve sayısal sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada sismik temel yalıtımlarının deprem karakteristiğine göre tasarlanması gerektiği ve bu tarz yalıtıcıların bazı deprem kayıtları için etkisiz kaldığı sonucuna ulaşmışlardır.

Lu v.d. [17] çalışmasında 101 katlı Sangay Dünya Ticaret Merkezi Kulesi’nin 1:50 ölçekteki modelini sarsma tablası üzerinde test ederek Çin yönetmeliklerine göre dizayn edilen yapının dinamik karakteristiğini ve göçme mekanizmalarını belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda, kulenin 7 büyüklüğünde bir depreme bile iyi bir dayanım göstereceği sonucuna varmışlardır. Kulenin, nadir görülen 8 büyüklüğündeki bir depremde tamamen göçmese bile ne tarz hasarlar alacağını belirlemişlerdir.

1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı yapı-zemin etkileşimi (YZE) problemi için tam ölçekli saha koşullarını sarsma tablası yük taşıma kapasitesi ve geometrik koşullarında dikkate alacak şekilde uygun bir ölçeklendirme katsayısıyla temsil edebilecek bir modelin geliştirilmesidir. Laboratuvar ortamda sarsma tablası deneyleri ile incelenecek olan

yapı-zemin modelinde kullanılan ölçeklendirme katsayısı gerçek sistemle sadece geometrik benzerlik değil aynı zamanda kinematik ve dinamik benzerlikleri de kapsayacaktır. Bu çalışmanın ilk aşamasında orta yükseklikteki bir binanın dinamik davranışı üzerinde yerel zemin koşulların etkisi farklı deprem yükleri altında hem gerçek hemde ölçekli deney modelleri için araştırıldı. Sayısal analizler için düzlem şekil değiştirme koşulları altında iki boyutlu sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Gerçek sistem ve ölçekli yapı-zemin ortak modeli sayısal olarak üç farklı durum için incelendi. a) zemine rijit sabitlenmiş yapı modeli, b) doğrusal elastik zemin davranışı kabulü altında yapı-zemin modeli, c) zeminin plastik deformasyonlarını Mohr-Coulomb akma kriteri altında dikkate alan yapı-zemin modeli. Bu çalışmada belirlenen ölçeklendirme katsayısının tam ölçekli saha koşullarını temsil edebilmek kapasitesi hem zemine rijit bağlı yapı durumu için hem de zemin koşullarının etkisini dikkate alındığı yapı-zemin etkileşim problemi için sayısal olarak araştırıldı.

Bu çalışmada yapı-zemin modelinin geliştirilmesinin sayısal ve deneysel araştırmaların hedefleri aşağıda verilmiştir:

- a) Farklı depremler için yerel zemin özellikleri ana kaya hareketini hangi oranda ve nasıl değiştirdiği serbest zemin yüzey hareketinden ölçümler alınarak incelendi
- b) Zemine rijit bağlı binanın dinamik davranışı ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda binanın dinamik davranışları üç farklı deprem için incelenerek, yerel zemin koşullarının binanın dinamik davranışı üzerindeki etkisi gösterildi
- c) Yapı temelinin etkisi yani kinematik etkileşimin ana kaya harektini hangi oranda ve nasıl değiştirdiği incelendi

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır, tezin ikinci bölümünde yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin çözümünde kullanılan sayısal ve deneysel yöntemler değerlendirilmiştir. Tezin 3 bölümünde sarsma tablasında kullanılacak yapı-zemin ortak sisteminin sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve deprem yükler altında sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında sarsma tablası deneyi modelinin

temsil ettiği gerçek yapı-zemin probleminin boyutsal ve mekanik özellikleri verilmiştir. Sarsma tablası kapasitesine uygun geometrik ölçeklendirme katsayısı belirlenmiştir ve bu katsayısının kinematik ve dinamik parametrelerine nasıl uyarlandığı açıklanmıştır. Bu çalışmanın sayısal ve deneysel analizlerinde kullanılacak deprem kayıtları seçilmiş ve sarsma tablasına uygulanacak bu deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi yapılmıştır. Bu bölümde gerçek yapı örneğinin ve ölçeklendirilmiş yapı modelinin SEY ile deprem analizi Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta (1989) depremlerine göre gerçekleştirilmiştir. Yine bu bölümde yapı modeli için öngörülen geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi gözden geçirilmiştir. Bu bölümün sonraki aşamalarında gerçek yapı-zemin sistemi ile deneysel olarak incelenecek ölçeklendirilmiş yapı-zemin modelinin SEY ile deprem analizi yapılmıştır. Yapı-zemin deney modeli için öngörülen geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi incelenmiştir. Aynı şekilde Deprem yükleri altında serbest zemin titreşiminin davranışı gerçek sistem ve deney modeli için SEY ile incelenmiş, geometrik ölçek katsayısının tekrardan doğrulanması yapılmıştır. Aynı şekilde bu başlık altında Deprem yükleri altında yapısız temel-zemin etkileşiminin davranışı gerçek sistem ve deney modeli için SEY ile karşılaştırılmış ve seçilen geometrik ölçek katsayısının doğruluk düzeyi tekrar ele alınmıştır. Tezin dördüncü bölümünde sarsma tablasında kullanılacak yap-zemin ortak sisteminin tasarım modeli ve deprem yükleri altında deneysel analizine yer verildi. Bu çalışmanın ilk aşamasında ölçekli yapı modelinin tasarımı ve imalatı açıklanırken sonraki aşamasında ise örselenmemiş zeminin sarsma tablasında yerleştirileceği ölçekli zemin sarsma kutusu modelinin tasarımı ve imalatından bahsedildi. Yine bu bölümde Sarsma tablası deneyinde kullanılan zemin örneğinin özellikleri ve arazi koşullarında örselenmeden numune alımı açıklandı. Aynı şekilde sarsma tablasının genel özellikleri, deney düzeneğinin içeriği ve veri toplama sistemi hakkında teknik bilgiler verildi. Sarsma tablasına rijit bağlı ve sarsma tablasında zemine oturan yapı modelinin deprem yükleri altında zorlanmış titreşimleri deneysel olarak incelendi ve test sonuçları kayıt altına alındı. Aynı şekilde deprem yükleri altında serbest zemin titreşimi ve yapısız temel-zemin etkileşimi deneysel olarak incelendi. Tezin beşinci bölümünde ise genel ve özel sonuçları ifade edilmiştir ve birtakım öneriler ortaya konmuştur.

BÖLÜM 2. YAPI-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİM PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN SAYISAL VE DENEYSEL YÖNTEMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

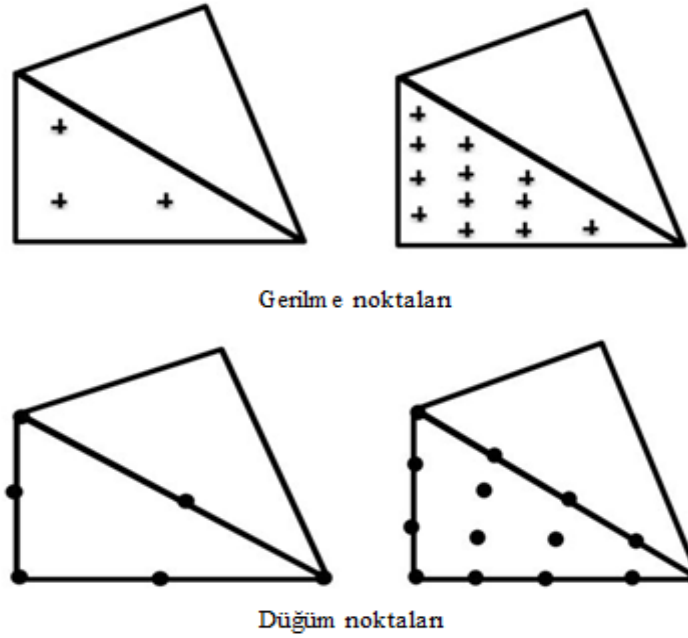
2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapı-Zemin Sisteminin Modellenmesi ve Analizi

Deprem hareketi etkisindeki sistemler araştırılırken genellikle binanın oturduğu zeminin şekil değiştirmeyen, rijit bir ortam olduğu varsayılmakta, bunun sonucu olarak bina ise temelinden zemine rijit bağlı bir sistem, sisteme etki eden deprem hareketi de binanın varlığından etkilenmeyen yatay, rijit bir öteleme olarak dikkate alınmaktadır. Ancak bu varsayım, zemin yapı etkileşiminin ihmal edilebilir seviyede olduğu durumlar için geçerlidir. Gerçek sistemlerde ise zeminin şekil değiştiren ve yapının davranışına etki eden dinamik bir sistem olarak göz önüne alınması gerekmektedir. Bu nedenle gerçek davranışın ele alınabilmesi için zemin bölgesi de yapısal sistemin bir parçası olarak tanımlanmalı ve yapıyla beraber analiz edilmelidir.

2.1.1. Zemin ortamının modellenmesinde sonlu eleman ağ yapısı ve viskoz sönümleyici sınırlar

Dinamik davranışı analiz edilen yapının oturduğu zemin ortamının sonlu elemanlarla modellenmesinde Plaxis 2D programı kullanılmıştır. Yapı-zemin etkileşim problemlerinin matematiksel modellerinin oluşturulmasında yaygın bir kullanım alanı bulunan Plaxis 2D programında kullanılan sonlu eleman tipi üçgen elemanlardır. Bu elemanlar modelleme aşamasında hem 6 düğüm noktalı hemde 15 düğüm noktalı olarak seçilebilmektedir. 6 düğüm noktalı üçgen elemanlar 3 gerilme

noktasına sahipken 15 düğüm noktalı elemanlar 12 düğüm noktasına sahiptir (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Plaxis 2D programında kullanılan sonlu eleman tipleri

Üstyapı-zemin ortak sisteminin sonlu elemanlar metoduyla modellenmesinde sonsuz zemin bölgesi 12 gerilme noktasına sahip 15 düğüm noktalı elemanlarla modellenmiştir. Her bir düğüm noktasında düzlemin farklı doğrultuları için iki ötelenme serbestlik derecesi (u_x ve u_y) bilinmeyen olarak tanımlanmıştır. Dinamik davranışı incelenen üstyapı için 5 düğüm noktalı çubuk eleman kullanılmıştır. Modellenen yapı-zemin etkileşim probleminin geometrik ve malzeme özelliklerinin deprem yüküne dik doğrultuda değişmediği kabulü altında düzlem şekil değiştirme problemi olarak 2D sonlu elemanlar modeli benimsenmiştir.

Yapı-zemin ortak sisteminin dinamik analiz sonuçlarının gerçeğe yakın sonuçlar vermesi için zemin bölgesinin sınır kesim yüzeylerinin üstyapıdan yeterince uygun mesafede seçilmesi gerekmektedir ve kesim sınırlarının özel sınır şartları ile dalga geçirirmliliğini sağlayacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Bu çalışmada sınırsız ortam olarak kabul edilen zemin sonlu serbestlik dereceli ayırık bir sisteme dönüştürülerek modellenmesi uygun sınır şartlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Rayhani ve Naggar (2008) santrifüj model testlerine bağlı olarak elde ettikleri sonuçlara göre, dinamik yük kaynağından yayılan dalgaların model sınırlarında sönümlenmeyerek, geliştirilen matematik modelin içerisine geri yansımaları önlemek için yapının temel taban genişliğinin en az beş katı olması gerektiği kanısına varmışlardır. Aksi takdirde gerilme dalgalarının sınırlardan yansıyıp 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 temel taban genişliğinin 5 katı kadar uzakta olacak şekilde konumlandırılmıştır.

Üstyapı-zemin ortak sistemini gerçeğe yakın bir biçimde 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 ($\lambda_{\min}$) göre sınırlandırılmıştır [18].

$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{\min}}{k} = \frac{v_j}{kf_{\max}} \quad (2.1)$$

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 katkılarını veren en büyük frekans değeri $f_{\max}$ ile gösterilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan Chi-Chi (1999), Loma-Prieta (1989) ve Kocaeli (1999) deprem ivme kayıtlarına ait frekans içerikleri dikkate alındığında sonlu eleman boyutu belirlenmiştir. Şekil fonksiyonuna bağlı çarpan sabiti 8 olarak seçilmiştir. Gerçek sistem ve ölçekli yapı-zemin etkileşim problemi için zemin ortamına ait kayma dalgası hızları sırasıyla 536 m/sn ve 80 m/sn'dir. Bu sayısal verilere göre sonlu eleman boyutunun (Δh) maksimum değeri, gerçek sistem için $\Delta h_{\max} = 3,35$ m ve ölçekli model için $\Delta h_{\max} = 0,5$ m şeklinde hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışmada kullanılan sonlu eleman boyutları yukarıda verilen koşulu (2.1) aşmayacak şekilde belirlenmiştir.

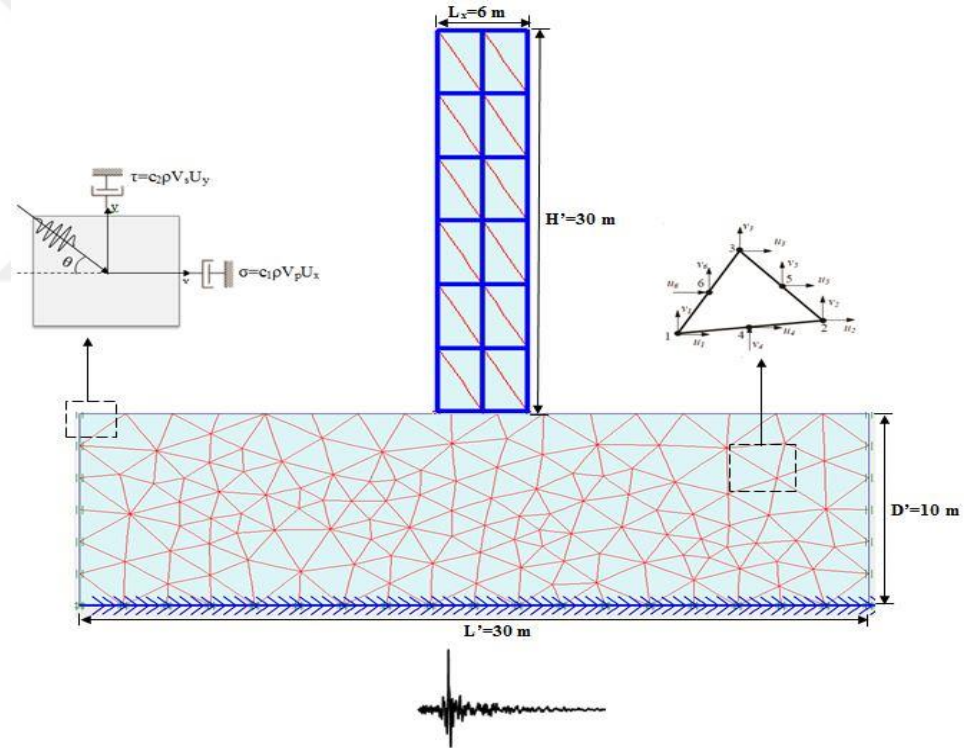
2.1.2. Viskoz sönümleyici sınırlar

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.

Şekil 2.3.'deki bağıntılarda, sınırlarda eşdeğer viskoz sönümleyiciler tarafından soğurulan normal ve kayma gerilmeleri verilmiştir. Burada u_i ($i = x, y$ ve z) ilgili doğrultulardaki partikül hızlarını, V_p ve V_s sırasıyla basınç ve kayma dalgası yayılma hızlarını göstermektedir. Birim hacmin kütlesi ρ ile verilmektedir. Yapılan bu çalışmada kullanılan sınır koşullarının soğurulma özellikleri dalgaların frekanslarına bağlı olmadığı için bu yapay sınırlar hem harmonik hem de harmonik olmayan dalgaları sönümleyebilmektedir. Sınırlarda enerjinin tam anlamıyla tüketilebilmesi dalgaların gelme açısına bağlıdır. Boyutsuz iyileştirme katsayıları (c_1 ve c_2) viskoz

sönümleyicinin soğurgan etkisini düzenlemek için kullanılmaktadır. Mühendisliğin pratik uygulamalar açısından gelen dalgalarının sınırlara dik veya küçük açıyla ($\theta \leq 30$) etki ettiği varsayıldığından bu katsayılar birim değerde hesaplara katılmaktadır. Bu çalışmada basınç dalgası için $c_1 = 1$ alınmıştır. Kayma dalgasının sınırlarda rasyonel ölçüde geçirimsizliğini sağlamak için tavsiye edilen değeri $c_2 = 0,25$ olarak alınmıştır [19].

Viskoz sınır şartlarının kullanılması durumunda zemin bölgesi uygun sonlu elemanlara bölünmeli ve zemin kesim bölgesi de yapıdan yeteri kadar uzaklıkta seçilmelidir (Şekil 2.2.). Aynı zamanda düzlem dalga yayılımının izotrop ve lineer elastik bir ortamda gerçekleşmesi gerekmektedir.



Şekil 2.2. Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli

2.1.3. Rayleigh sönümü

Yapısal anlamda göz önüne alınan sistemlerin dinamik davranışının şeklini ve genliğini sönüm önemli derecede etkilemektedir. Fiziksel sönüm viskoz etkilerden

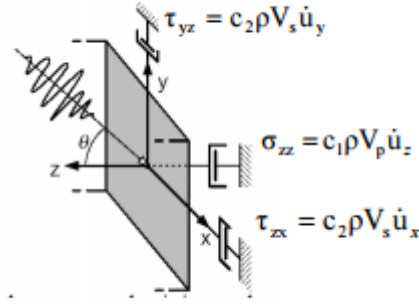
dolayı Rayleigh sönümü ile dikkate alınmaktadır. Rayleigh sönümü, sonlu elemanlar yaklaşımında sistemin kütle ve rijitlik matrisleri içerisindeki sönüm etkilerini bir araya toplayan en uygun sönüm ölçütlerinden birini oluşturmaktadır:

$$C=\alpha M+\beta K \quad (2.2)$$

$$\xi_i = \frac{\alpha + \beta \omega_i^2}{2\omega_i} \quad (2.3)$$

Sistemin malzeme sönümünde α orantı sabiti kütlenin 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. Yapılan bu çalışmada, Rayleigh orantı sabitleri gerçek zemin için $\alpha=3,846$, $\beta=0,00017$ ve ölçeklenerek model zemin için $\alpha=25,7$, $\beta= 0,0000262$ alınıp yapısal çözümlemeler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan bu çalışmada kullanılan yapay sönümleyiciler yapının sağ ve sol sınırlarına 15'er metre uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmesiyle özel önlem alınmıştır. Eşdeğer viskoz sönümleyiciler tarafından sınırlarda soğurulan normal ve kayma gerilmeleri basınç ve kayma dalga hızlarına bağlı olarak Şekil 2.3.'te gösterilmiştir. Yapılan bu çalışmada kullanılan sınır koşullarının soğurulma özellikleri dalgaların frekanslarına bağlı olmadığı için bu yapay sınırlar hem harmonik hem de harmonik olmayan dalgaları sönümleyebilmektedir.



Şekil 2.3. Viskoz sönümleyici sınırlar [20]

Viskoz etkilerden dolayı malzeme sönüm etkisi Rayleigh sönümü C ile dikkate alınmaktadır. Zeminlerde ele alınan sönüm, kayma şekil değiştirme genliğiyle birlikte orantılı olarak artmakta olup ikincil derecede kaldığı ve belli kurallar çerçevesinde sayısal hesaplarda göz ardı edilebileceği söylenebilir. Bundan dolayı, yapı-zemin birlikteliği dikkate alınarak yapılan sonlu eleman analizlerinde, baskın karakterdeki frekanslara ve modal sönüm oranlarına bağlı belirlenmesi gereken Rayleigh sönümü yerine, bu zemin sönümü için kullanılacak en uygun orantı sabitleri (α ve β) sına-yanılma ölçümleme yöntemiyle belirlenmiştir [21].

2.1.4. Zeminin Mohr-Coulomb akma kriteri altında elasto-plastik malzeme davranış modeli

Zeminler, uygulanan yüklerden dolayı doğrusal olmayan bir gerilme-şekil değiştirme davranışı sergilemektedir. Doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme 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 [22].

2.1.4.1. Mohr-Coulomb malzeme modeli parametreleri

2.1.4.1.1. 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 diğeri 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. Çok aşırı konsolide kil zeminler ve bazı kayalar 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.

2.1.4.1.2. Poisson oranı (ν)

Poisson oranı, Mohr-Coulomb gibi elasto-plastik davranışı temsil eden bir zemin modelinde 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. Çoğu durumda poisson oranı 0,3 ile 0,4 aralığında değerler almakta olup kum zeminler için poisson oranı genellikle 0,2 ile 0,4 aralığında bir değer almaktadır [23].

2.1.4.1.3. Kohezyon (c)

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

2.1.4.1.4. 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.

2.1.4.1.5. Kabarma açısı (ψ)

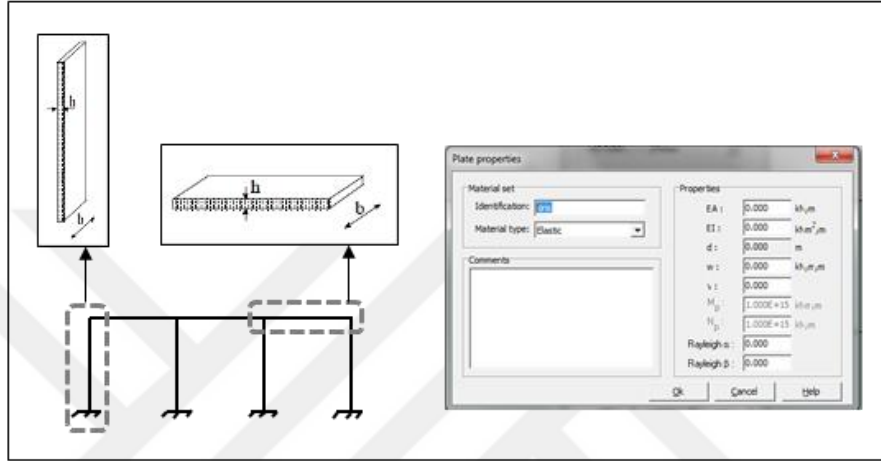
Kum zeminlerdeki kabarma davranışı hem zeminin sıkılığına hem de içsel sürtünme açısına bağlıdır. Zeminlerin kabarma açısı, içsel sürtünme açılarına göre çok daha küçük değerdedir. Plaxis programında kabarma açısının değeri $\psi = \phi - 30^\circ$ eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. İçsel sürtünme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

2.1.5. Bina yapısının sonlu elemanlarla modellenmesi ve plaxis 2D yazılımına uyarlanması

Bu çalışmada, sismik hareketlerin 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 yazılımın, üzerinde çalışılan yerel zemin bölgesindeki malzeme davranışını ve geliştirilen bina modelinin düzlem çerçeve sistemini doğru temsil edebilecek düzeyde olması gerekmektedir. Sayısal uygulamalarda, binanın oturduğu zeminin öngörülen mekanik davranışı elasto-plastik malzeme modeli ile benzeştirilmiş ve gerekli parametreler programa eklenmiştir. Plaxis yazılımında, bina 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 2.4).

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



Şekil 2.4. Rijit eleman ve girdi parameterleri [24]

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

Modelde dinamik davranışı incelenen binanın kolon boyutları 0,7 x 0,7 m ve kullanılan beton sınıfı C30' dir.

Elemanlara ait atalet momentleri aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilmektedir:

$$I_{rijit\ eleman} = \frac{bd^3}{12}, I_{bina\ eleman} = \frac{bh^3}{12} \quad (2.4)$$

Atalet momentleri eşitlenerek düzlemsel elemanlara ait kalınlık bulunmaktadır:

$$I_{rijit\ eleman} = I_{bina\ eleman} = \frac{1(d^3)}{12} = \frac{(0,7)(0,7)^3}{12} \Rightarrow d = 0,62 \quad (2.5)$$

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

$$I_{rijit\ eleman} = \frac{b(d^3)}{12} = \frac{1(0,62)^3}{12} = 0,0198m^4 \quad (2.6)$$

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

$$A = b(d) = 1(0,62) = 0,62m^2 \quad (2.7)$$

$$EI = 31(10^6)(0,0198) = 613800kNm^2 / m \quad (2.8)$$

$$EA = 31(10^6)(0,62) = 19220000kN / m \quad (2.9)$$

Ve ayrıca modelde dinamik davranışı incelenen binanın kiriş boyutları 0,5 x 0,25 m ve kullanılan beton sınıfı C30' dir.

Elemanlara ait atalet momentleri aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilmektedir:

$$I_{rijit\ eleman} = \frac{bd^3}{12}, I_{bina\ eleman} = \frac{bh^3}{12} \quad (2.10)$$

Atalet momentleri eşitlenerek düzlemsel elemanlara ait kalınlık bulunmaktadır:

$$I_{rijit\ eleman} = I_{bina\ eleman} = \frac{1(d^3)}{12} = \frac{(0,25)(0,5)^3}{12} \Rightarrow d = 0,315 \quad (2.11)$$

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

$$I_{rijit\ eleman} = \frac{b(d^3)}{12} = \frac{1(0,315)^3}{12} = 0,0026m^4 \quad (2.12)$$

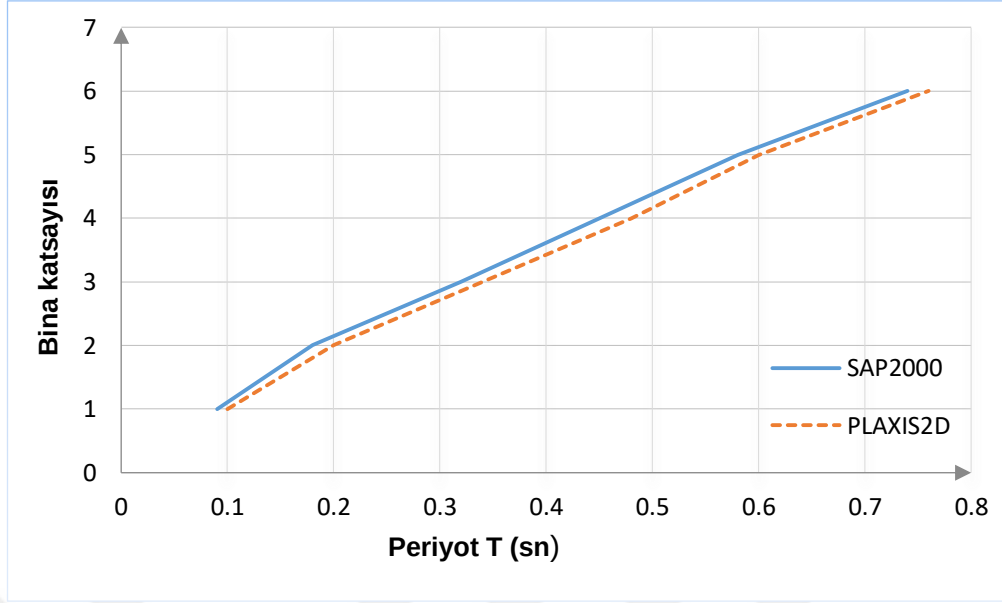
Son olarak, rijit elemana ait normal (EA) ve eğilme (EI) rijitliği elde edilmektedir.

$$A = b(d) = 1(0,315) = 0,315m^2 \quad (2.13)$$

$$EI = 31(10^6)(0,0026) = 80600kNm^2 / m \quad (2.14)$$

$$EA = 31(10^6)(0,315) = 9765000kN / m \quad (2.15)$$

Sayısal uygulamalardan sonra elde edilen bu değerlere göre, yapı-zemin ortak sisteminin, zaman bölgesindeki çözümü için Plaxis yazılımında analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra uygulamanın doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, SAP2000 yazılımı kullanılarak analizler yapılmıştır ve her iki yazılımdan elde edilen periyot değerleri karşılaştırılmıştır. Farklı yükseklikteki yapılar için Plaxis yazılımında gerçekleştirilen analizlerde zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini yani rijitliğini ifade eden kayma dalgası hızı $c_s = 4000$ m/sn kabul edilen zemin parametreleri dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, her iki yazılımdan elde edilen periyot değerlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği, dolayısıyla bina modelini Plaxis programına uyarlamak için yapılan bu sayısal uygulamaların yeterli olduğu anlaşılmıştır (Şekil 2.5.).

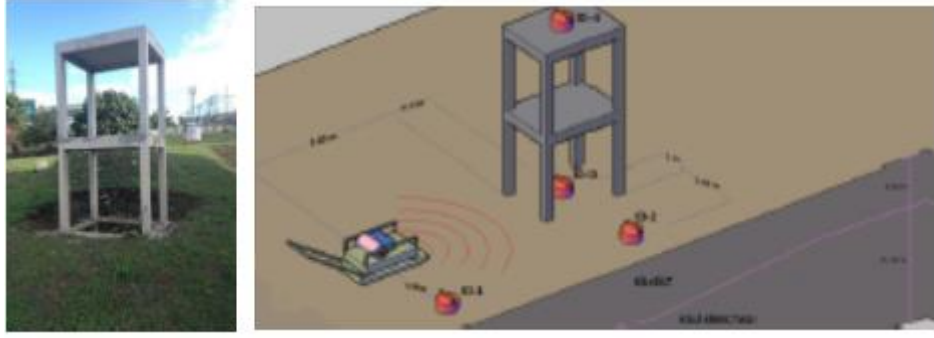


Şekil 2.5. Bina kat sayısına bağlı periyot değişiminin karşılaştırılması

2.2. Sarsma Tablası Deneyleriyle Yapı-Zemin Sisteminin Analizi

2.2.1. Yapı-zemin etkileşiminin incelendiği saha deneyleri

Literatürde tam ölçekli yapı-zemin etkileşimi saha deneyi çok olmamakla birlikte yapılan az sayıda çalışma mevcuttur. Bu alanda Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yapılan bir çalışma örnek olarak gösterilebilir. Bu çalışmada, serbest yüzey yer hareketiyle titreşime zorlanan yapı-temel-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkileşimi ve zeminin binaların dinamik davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Dinamik davranışı incelenen yapı modeli iki katlı tek açıklıklı betonarme bir çerçeve olup Sakarya Üniversitesi Esentepe kampüsü içerisinde yer almaktadır. Binanın üzerinde bulunduğu zemin ortamının mekanik özellikleri sismik deneylerle araştırılmış ve 2007 Deprem Yönetmeliği'ne göre bu zemin sınıfı Z2 olarak tanımlanabilir. Binanın zemin katı, tepe noktası ve etrafına belirli mesafelerde ivmeölçer cihazlar konularak serbest yüzey yer hareketinin oluşturacağı titreşimler ölçülmüştür. Böylece, serbest zemin yüzey kayıtları ile bina zemin katı ve tepe noktasına ait titreşimler karşılaştırılarak yapı varlığının temel hareketi üzerindeki etkisi yapı-zemin dinamik etkileşimi açısından, deneysel olarak araştırılmıştır (Şekil 2.6.) [25].



Şekil 2.6. Çalışma sahasının genel yapısı ve şematik düzeni

2.2.2. Sarsma tablası test modelleri

Bu çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin dinamik analizleri için benimsenen sayısal yaklaşım Sakarya Üniversitesinde (SAÜ) yapılmış olan sarsma tablası deneyleri ile doğrulanmıştır. Sarsma tablası deneyi deprem mühendisliğinde zeminin hareketlerini simüle etmek için kullanılan deneysel bir yöntemdir. Sarsma tablalarının 1920'lerdeki ortaya çıkışından bu yana çok sayıda deprem model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sarsma tablası deneyi, model ve gerçek yapının yerçekimi ivmelerinin her zaman aynı olması sebebiyle 1g deneyi olarak dikkate alınmıştır.

Zemin numunesi sarsma tablasının üzerine doğrudan monte edilemez. Sarsma tablasında zemini modelleyebilmek ve zemini yerinde tutmak için bir zemin sarsma kutusu gerekmektedir. Geçmiş yıllarda araştırmacılar çeşitli zemin sarsma kutuları ve yapısal modelleri kullanarak yapı-zemin sistemleri üzerinde sarsma tablası deneyi gerçekleştirmişlerdir.

Zemin sarsma kutuları rijit, esnek ve laminar olmak üzere üç ana kategoriye sınıflandırılmıştır.

2.2.2.1. Rijit zemin sarsma kutusu

Rijit zemin sarsma kutusu tamamen sabit parçalardan oluşması sebebiyle en basit çeşittir. Rijit zemin sarsma kutusu duvarlarının zemin ile birlikte hareket edememekte ve sınırlarında aşırı enerji yansımaları olmaktadır. Bu tür zemin sarsma kutularında

serbest zemin yüzey hareketini sağlamak için çok geniş zemin sarsma kutularına ihtiyaç duyulur ki bu da çoğu durumda uygulanması pratik olmamaktadır (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. Rijit zemin sarsma kutusu

2.2.2.2. Esnek zemin sarsma kutusu

Rijit zemin sarsma kutusu ile karşılaştırıldığında, esnek zemin sarsma kutusu içersindeki modellenmiş zeminin serbest zemin yüzey hareketine benzer hareket etmesine izin vermektedir. Ayrıca, dışa yayımlı dalgaların içe doğru olan yansımaları daha verimli olarak azaltılabilmektedir. Esnek zemin sarsma kutularına esnek silindir zemin sarsma kutusu bir örnek olarak gösterilebilir. Silindir şekilli bu zemin sarsma kutusu Hosseinzadeh (2004) tarafından tasarlanmıştır (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Esnek silindir zemin sarsma kutusu [26]

2.2.2.3. Laminer zemin sarsma kutusu

Rijit ve esnek zemin sarsma kutularıyla karşılaştırıldığında Laminer zemin sarsma kutusu serbest zemin yüzey hareketlerini daha gerçekçi olarak simüle edebilmektedir. Laminer zemin sarsma kutuları en gelişmiş ve verimli zemin kutusu türüdür. Söz konusu araştırmacıların [27-28] vardığı sonuçlara dayanarak, esnek ve rijit zemin sarsma kutuları ile karşılaştırıldığında laminer zemin sarsma kutularının yararlarından dolayı bu çalışmada titiz ve güvenilir sarsma tablası deneyleri gerçekleştirmek için laminer zemin sarsma kutusu kullanılmıştır (Şekil 2.9.).

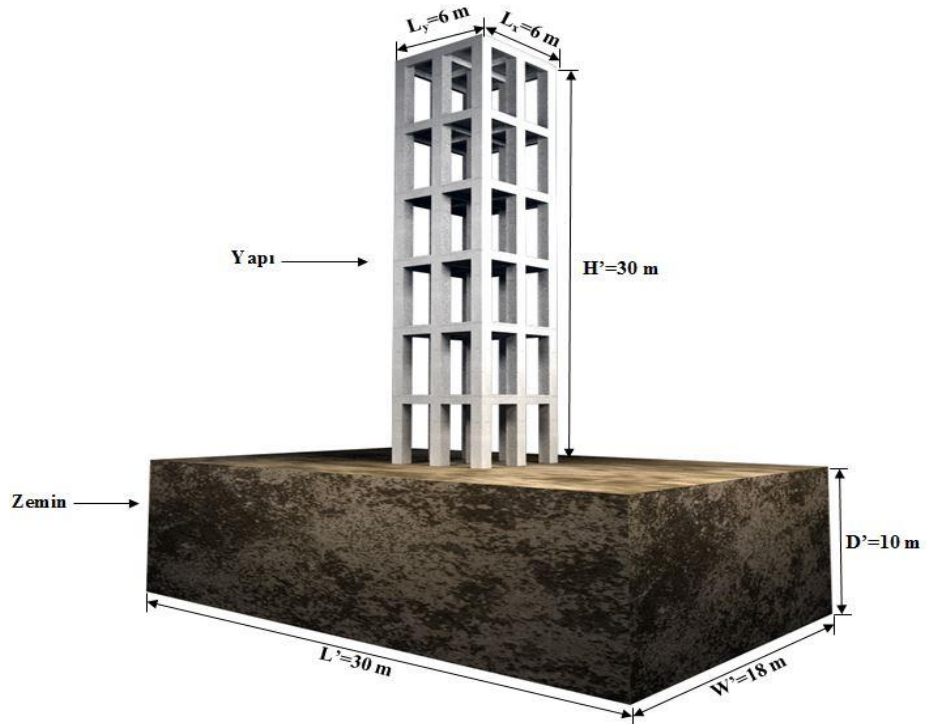


Şekil 2.9. Laminer zemin sarsma kutusu

BÖLÜM 3. SARSMA TABLASINDA KULLANILACAK YAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN SONLU ELEMAN MODELİ VE DEPREM YÜKLERİ ALTINDA SAYISAL ANALİZİ

3.1. Sarsma Tablası Deney Modelinin Temsil Ettiği Gerçek Yapı-Zemin (GYZ) Probleminin Boyutsal ve Mekanik Özellikleri

Sayısal ve deneysel testler için gerçek yapı-zemin sisteminin bina çerçevesi üç boyutlu 6 katlı betonarme bir çerçevedir. Binanın yüksekliği ve genişliği sırasıyla 30 m, 6 m'dir. Zemin yanal sınırlarının yatay mesafeleri ve ana kaya derinliği sırasıyla 30 m, 18 m ve 10 m olarak seçilmiştir, gerçek yapı-zemin sisteminin boyutsal özellikleri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Gerçek yapı-zemin sistemi

Binanın açılmal doğal frekansı 1.346 Hz bulunmuştur ve toplam kütlesi 488 tondur. Binanın altındaki zeminin mekanik özellikleri yani kayma dalga hızı $V_s = 536$ m/s olup yoğunluğu ise $\rho = 12.9$ kN/m³ orta sıkı kumlu zemindir.

3.2. Sarsma Tabası Kapasitesine Uygun Geometrik Ölçeklendirme Katsayısının Belirlenmesi ve Sistemin Kinematik Parametrelerine Uyarlanması

Ölçekli modeller sadece geometrik koşulların ölçeklendirmesine göre yapılmamaktadır. Ölçeklendirme geometrik benzeşimin yanında kinematik ve dinamik benzeşimi dikkate alınarak yapılmaktadır. Geometrik benzeşim model ile gerçek sistemin fiziksel boyutlarındaki benzeşimi tanımlar. Kinematik benzeşim ise benzer zamanlardaki benzer noktaların benzer partiküllerini model ve gerçek sistem için tanımlar ve dinamik benzeşim ise model ve gerçek sisteme uygulanan net kuvvetler arasındaki ilişkiyi tanımlar. [29] 1-g ölçekli modellerde a/g olarak tanımlanan (foruds sayısının) gerçek sistemle model sistemde hep uyum içerisinde kalması gerektiğini açıklamışlardır. Bu çalışmada model ile gerçek sisteminin rijitlik oranı olarak tanımlanan (E/ρ) geometrik ölçeklendirme faktörüne eşitlendirilmiştir, buda ‘‘Cauchy Şartı’’ olarak bilinen ve kayma dalga hızına bağlı olarak aşağıdaki şekilde belirtilmiştir.

$$\frac{(V_s)_{gyz}}{(V_s)_m} = \sqrt{\lambda} \quad (3.1)$$

Burada, (gyz) ve (m) alt indisleri sırasıyla gerçek sistemi ve modeli simgelemekte ve (V_s) ise kayma dalga hızıdır. Sarsma tabasında ölçekli modellemenin önemli aşamalarından biri uygun bir geometrik ölçekleme faktörü λ ’nın tanımlanmasıdır. Küçük ölçekli modeller ekonomik olarak daha tasarruflu olsa da, sonuçların hassasiyeti oldukça azalır. Bu nedenle, geometrik ölçekleme faktörü (λ) mümkün olan en kesin sonucu temsil eden ulaşılabilir en büyük ölçekli modeli elde edebilecek şekilde seçilmiştir. Gerçek sistemin sarsma tabasında küçük modelini oluşturmak için kullanılacak geometrik ölçeklendirme katsayısının sistemin kinematik ve dinamik parametreleri uyarlanmış biçimi Tablo 3.1.’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Geometrik ölçeklendirme katsayısının problemin kinematik ve dinamik parametrelerine uyarlanması

Kütle Yoğunluğu	1	İvme	1	Uzunluk	λ
Kuvvet	λ^3	Kesme Dalgası Hızı	$\lambda^{1/2}$	Gerilme	λ
Rijitlik	λ^2	Zaman	$\lambda^{1/2}$	Şekil Değiştirme	1
Modül	λ	Frekans	$\lambda^{-1/2}$	EI	λ^5

Sarsma tablası deneylerinde yapı-zemin etkileşiminin problemi için özellikle zemini muhafaza edecek sarsma kutusunun genişlik ve uzunluğu arasındaki oran da önemli bir araştırma parametresidir. Daha önceden ölçekli model deneylerinde tasarlanan zemin sarsma kutuları için genişlik ve uzunluk arasındaki ilişki 2:3 oranında yaygın olarak kullanılmaktadır [30]. Bu çalışmada bu oran dikkate alınmıştır. Sarsma tablasının geometrik özellikleri ve kapasitesi dikkate alınarak uygun bir geometrik ölçeklendirme katsayısının belirlenmesi için ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışmaya ait sonuçlar Tablo 3.2.'de verilmiştir. Ve bu çalışma için en uygun geometrik ölçeklendirme katsayısı $\lambda = 45$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.2. Farklı ölçekleme faktörlerine göre deney modelinin boyutları

Geometrik Ölçekleme Faktörü ($\lambda=45$)	B (m)	L' (m)	W' (m)	D' (m)	H' (m)	D'+H' (m)	Hacim (m ³)	Ağırlık (kg)
1	6	30	18	10	18	28	5400	6966000
10	0.6	3	1.8	1	1.8	2.8	5.4	69666
20	0.3	1.5	0.9	0.5	0.9	1.4	0.675	870.75
30	0.2	1	0.6	0.3	0.6	0.93	0.18	332.2
40	0.15	0.75	0.45	0.25	0.45	0.7	0.084	108.36
45	0.133	0.66	0.4	0.22	0.4	0.62	0.058	74.82
60	0.1	0.5	0.3	0.166	0.3	0.46	0.025	32.25
75	0.08	0.4	0.24	0.133	0.24	0.373	0.0127	15.48
100	0.06	0.3	0.18	0.1	0.18	0.28	0.0054	6.966

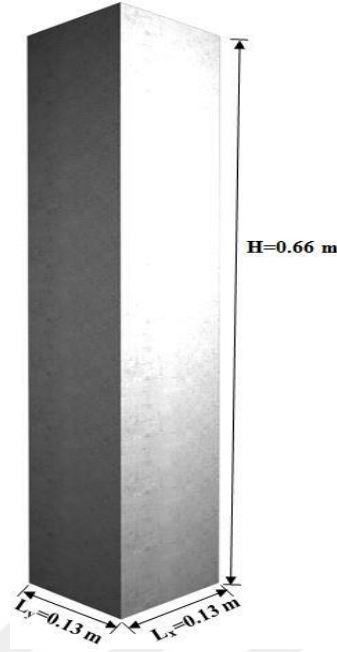
Yapı-zemin etkileşim problemin ölçekli modeli için değişken tanımları Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Yapı-zemin etkileşim probleminin ölçekli modeli

Geometrik ölçekleme katsayısının kinematik parametrelere uyarlanması için kullanılan ifadelerin gösterildiği Tablo 3.1.'den yararlanarak yapılan ön çalışma sonucunda (Tablo 3.2.) sarsma tablası deneylerinde kullanılacak ölçekli model için geometrik ölçeklenme katsayısı 45 seçilmiştir.

Tablo 3.2.'den de anlaşıldığı üzere geometrik ölçekleme faktörünün $\lambda = 45$ seçilmesi ile yapı-zemin etkileşim modelinde yapının yüksekliği $H' = 0,66$ metre binanın her iki yöndeki genişliklerinde $B = 0,13$ metre olarak hesaplanmıştır. (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Model yapının özellikleri

Geometrik boyutların ölçeklendirilmesi yanında dinamik benzeşimin de elde edilmesi için gerçek yapının doğal açısal frekansı Tablo 3.1.'de verilen uygun ifadelerle ölçeklenmelidir. Bahsi geçen iki parametre ölçeklendirme sürecinde boyutsal benzeşim ve dinamik benzeşim ölçeklendirmede anahtar role sahiptir ve model ile gerçek sistem arasındaki benzeşimin ölçeklendirilmesinde dikkate alınması gerekir. Bu çalışmada yapıyı geometrik ölçeklendirme parametresine bağlı olarak modellerken çelik yapısal sistem tercih edildi, çünkü betonarme yapısal modelin istenen boyutlarda ve dinamik özelliklerde imalatı test ortamı açısından uygun değildir.

Deney modelinin doğal frekansına hesaplayabilmek için Tablo 3.1.'de modelin doğal frekansı (f_{my}) ile gerçek yapının doğal frekansı (f_{gy}) arasındaki ölçeklendirme ilişkisinden yararlanılmıştır.

$$\frac{f_{my}}{f_{gy}} = \lambda^{-1/2} = 6.7 \quad (3.2)$$

Geometrik ölçeklendirme faktörünün ($\lambda = 45$) ve gerçek yapının doğal frekansı

$f_{gy}=1.348$ Hz olmasının dikkate alınması ile yukarıda verilen (3.2) deney modelinin doğal frekansı 9,03 Hz bulunmuştur.

$$f_{ger}(\sqrt{\lambda}) = f_m \Rightarrow (1,348)(6,7) = f_m = 9,03 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Tablo 3.1. göre model yapı yoğunluğu (ρ_{my}), gerçek yapı yoğunluğuna (ρ_{gy}) eşit olmalıdır ve gerçek yapı yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\frac{\rho_{my}}{\rho_{gy}} = 1 \Rightarrow \rho_{my} = \rho_{gy} \quad (3.4)$$

$$\rho_{gy} = \frac{m_{gy}}{V_{my}} = \frac{488000}{(30)(6)(6)} = 415,85 \text{ kg/m}^3 \quad (3.5)$$

Yukardaki ifadede (3.5) gerçek yapının kütlesi (m_{gy}), gerçek yapının hacmi de (V_{gy}) olarak göstermiştir.

Gerçek yapının yoğunluğundan yararlanarak yapı modelinin kütlesi (m_{my}) aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$m_{my} = (\rho_{my})(V_{my}) = (415,8)(0,6 \times 0,13 \times 0,13) = 5,04 \text{ kg} \quad (3.6)$$

Burada (V_{my}) model yapının hacmidir. Model yapının özellikleri Tablo 3.3.'de özetlenmiştir.

Tablo 3.3. Model yapının özellikleri

Toplam yükseklik (m)	Toplam uzunluk (m)	Toplam genişlik (m)	Toplam kütle (kg)	Doğal frekans (Hz)
0,66	0,13	0,13	5,04	9,03

Deney modeli için boyut ve mekanik özellikler belirlendikten sonra sayısal analizler için üç boyutlu matematik model SAP2000 programı kullanarak oluşturulmuştur. Gerçek problemdeki yapıyı temsil eden bina modelinin döşemeleri 6 adet yatay çelik plakadan ve kolonları ise 4 adet çelik plakadan oluşmaktadır. Bu tasarımda S220 çelik sınıfı uyarlanmıştır. Çelik plaka kalınlığı Tablo 3.3.'te özetlenen özelliklerle doğal frekans ve kütle parametrelerine dikkat edecek şekilde deneme yanılma yöntemi kullanarak belirlenmiştir. Plaka kalınlığı 6 mm bulunmuştur, bununla birlikte gerçek yapıdaki kolonlar yapı modelini temsil etmek üzere kolonların boyutları 2 mm, 10 mm boyutunda çelik levhalardan yararlanılmıştır.

Sarsma tablası kapasitesine uygun geometrik ölçeklendirme katsayısı belirlendikten sonra yapı-zemin etkileşim problemini temsil edecek yapı-zemin etkileşim modeline ait kinematik ve mekanik parametreler geometrik ölçeklendirme katsayısına bağlı olarak Tablo 3.4.'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Gerçek yapı-zemin problemi ile yapı-zemin modeli arasında geometrik ölçek faktörüne bağlı benzeşim

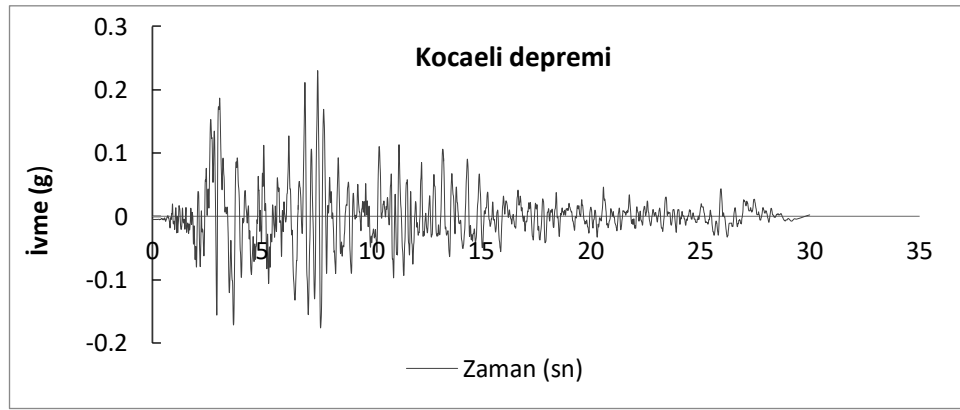
Gerçek yapı-zemin problemi		($\lambda = 45$)	Model yapı-zemin problemi	
Frekans (f)	1,348 Hz	$\lambda^{-1/2}$	Frekans (f)	9,03 Hz
EI	5582325 kNm ²	λ^5	EI	0,0302519 kNm ²
Kayma Dalga Hızı (v_s)	536 m/s	$\lambda^{1/2}$	Kayma Dalga Hızı (v_s)	80 m/s
Kütle Yoğunluğu (ρ)	12,9 kg/m ³	1	Kütle Yoğunluğu (ρ)	12,9 kg/m ³
Zaman (t)	60 sn	$\lambda^{1/2}$	Zaman (t)	10 sn
İvme (g)	İvme ilgili deprem kayıtları	1	İvme (g)	İvme ilgili deprem kayıtları

3.3. Dinamik Analizlerde Kullanılacak Deprem Kayıtlarının Belirlenmesi ve Ölçeklendirilmesi

Sarsma tablası deneylerinde yer hareketi olarak Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta (1989) depremleri dikkate alınmıştır. Zaman parametresi için öngörülen azaltma faktörü geometrik ölçeklendirme parametresine göre uyarlanmıştır. Bu dikkate alınarak deprem kayıtlarını ölçeklendirilmek için özgün kayıtların zaman adımları 6.7 faktörü ile azaltılmıştır. Bu durumda Kocaeli (1999) depremin zaman adımı gerçek kayıt olan 0.005'ten 0.000746'ya azaltılırken Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta (1989) deprem kayıtların özgün zaman adımları 0.01'den 0.00149'a değiştirilmiştir. Şekil 3.4.-3.6.'de söz konusu deprem kayıtlarının ölçeklendirilmiş değişimleri verilmiştir. Burada sarsma tablasında kullanacak olan deprem kayıtların zaman adımı ve toplam süresi geometrik ölçeklendirme parametresine bağlı Tablo 3.5.'de belirtilen parametre ile değiştirilerek ölçeklendirilmiştir.

Tablo 3.5. Kullanılan deprem yer hareketleri

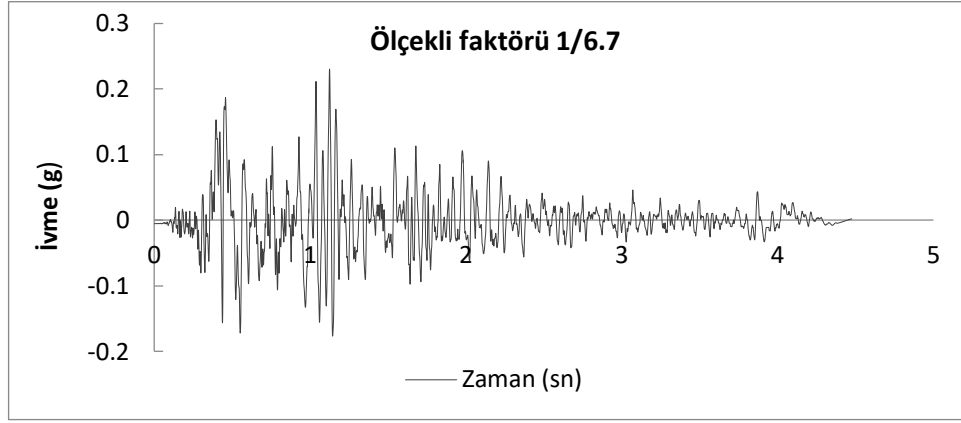
Deprem	Ülke	Yıl	PGA (g)	Mw (R)	Vs	Süre (sn)	Istasyon	Referans	Tip
Kocaeli	Turkey	1999	0.23	7,51	811	30	İzmit	peer	Kuzey-Güney
Chi-Chi	Taiwan	1999	0.36	7,62	740	52	TCU045	peer	Kuzey-Güney
Loma-Prieta	USA	1989	0.36	6,93	349	40	Gilroy Array #3	peer	Kuzey-Güney



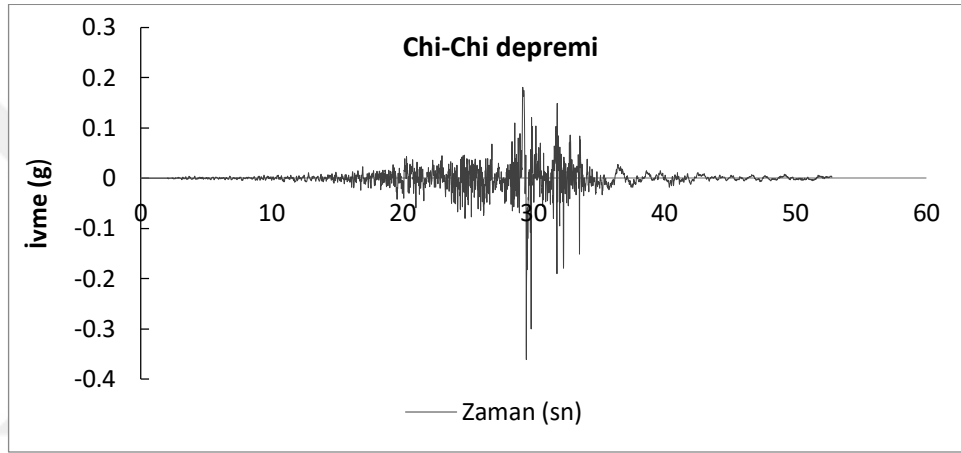
(a)

Şekil 3.4. Kocaeli depremi (1999), (a) orijinal kayıt, (b) ölçekli kayıt

Şekil 3.4. (Devamı)



(b)

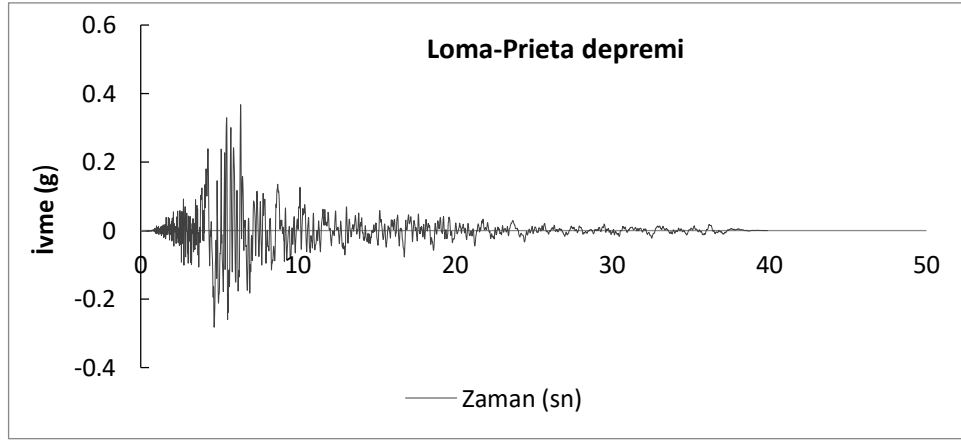


(a)

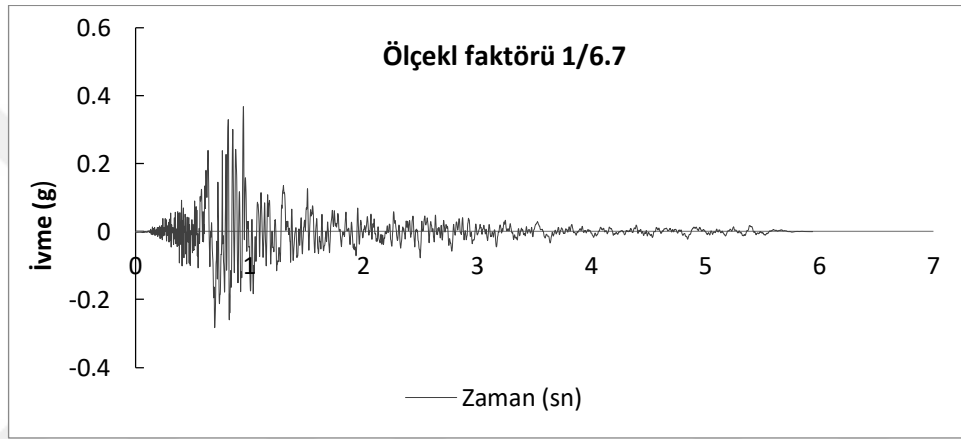


(b)

Şekil 3.5. Chi-Chi depremi (1999), (a) orijinal kayıt, (b) ölçekli kayıt



(a)

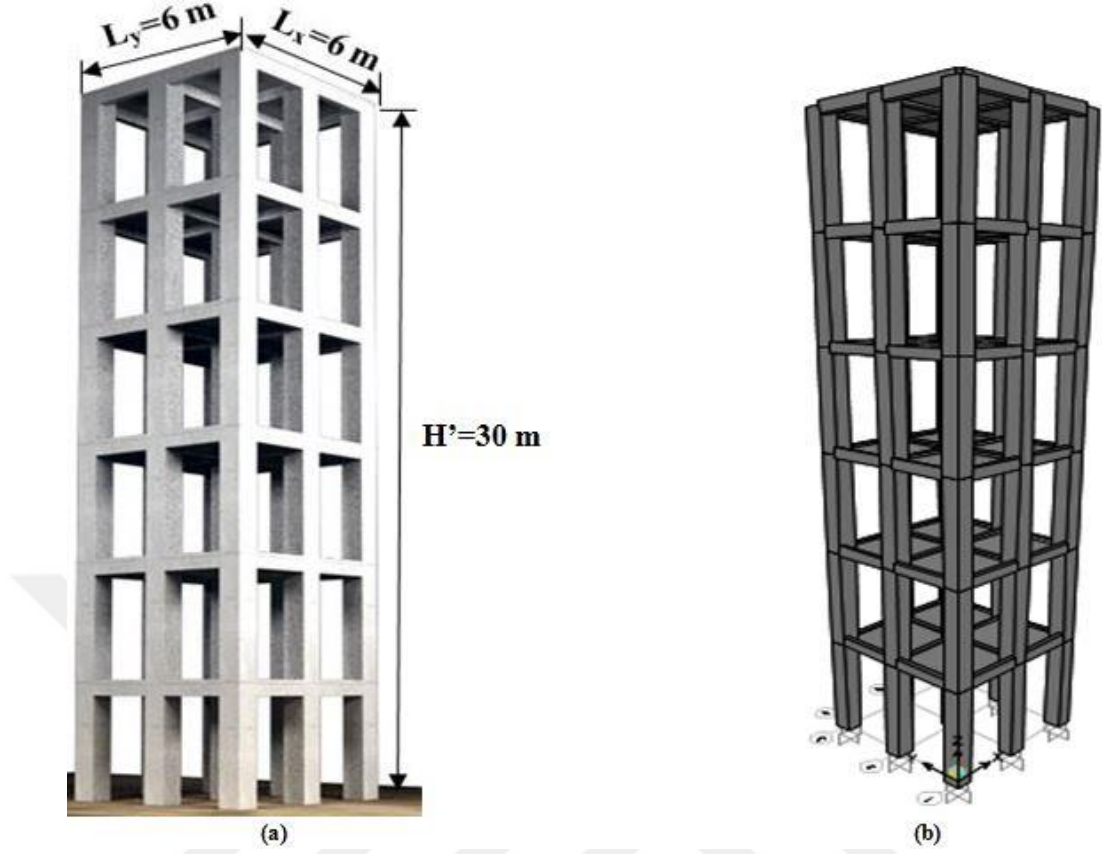


(b)

Şekil 3.6. Loma-Prieta depremi (1989), (a) orijinal kayıt, (b) ölçekli kayıt

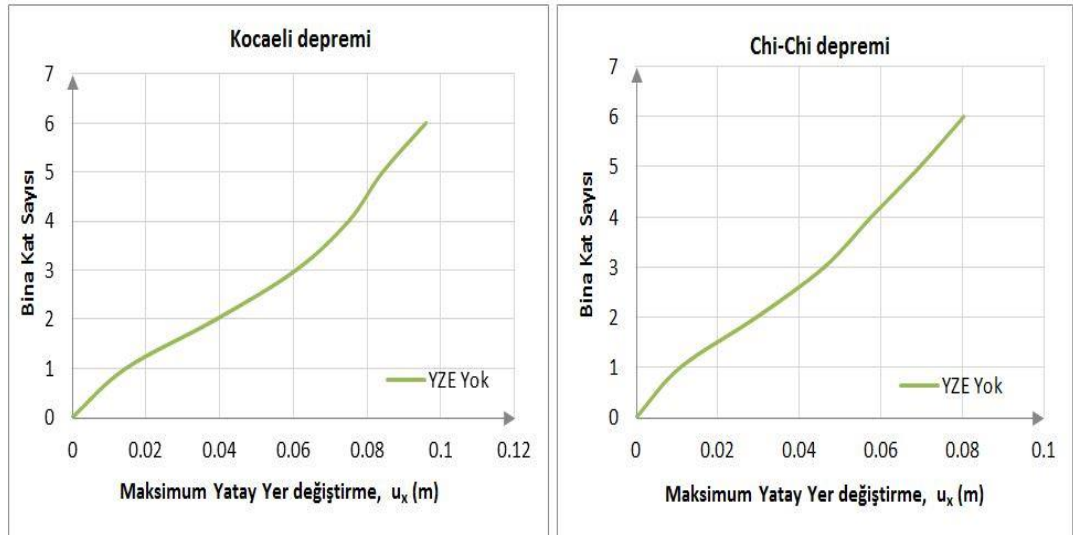
3.4. Gerçek Yapı Örneğinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle (SEY) Deprem Analizi

Yapılan bu çalışmada dinamik davranışı incelenen gerçek yapı, 6 katlı 5 m yükseklikli betonarme düzlem bir çerçevedir. Yapının yüksekliği 30 m genişliği ise 6 m'dir. Gerçek yapının deprem analizi için sonlu elemanlar yöntemine dayalı SAP2000 bilgisayar programından yararlanarak incelenmiştir. Bu analizlerde, deprem yer hareketi olarak Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999) ve Loma-Preita (1989) depremleri kullanılmıştır. Söz konusu gerçek yapı örneğinin hâkim periyodu 0.74 sn olarak bulunmuştur (Şekil 3.7.).



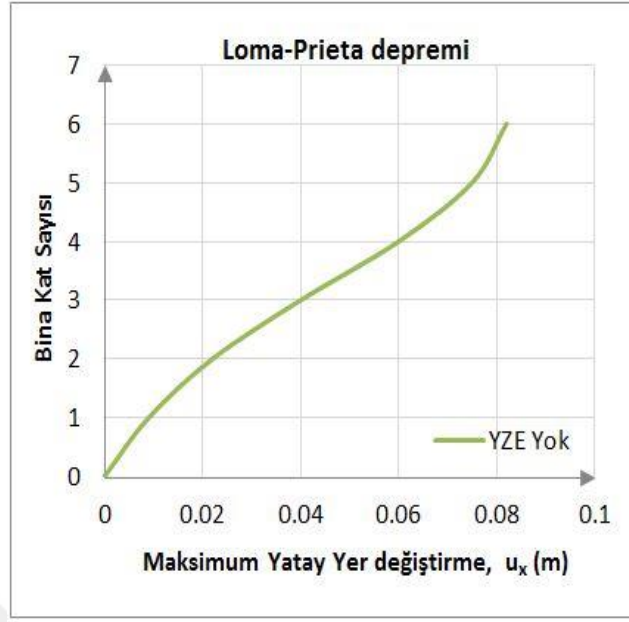
Şekil 3.7. (a) Gerçek yapının görüntüsü (b) Gerçek yapının sonlu elemanlar dayalı matematik modeli

Farklı deprem yer hareketlerine göre sayısal analiz yapılan binanın maksimum yatay kat yer değiştirmeleri Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Üç farklı deprem etkisinde gerçek yapının yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri

Şekil 3.8. (Devamı)



Ayrıca Tablo 3.6.'de farklı deprem kayıtları için yapının yatay kat yer değiştirmelerinin değerleri gösterilmiştir.

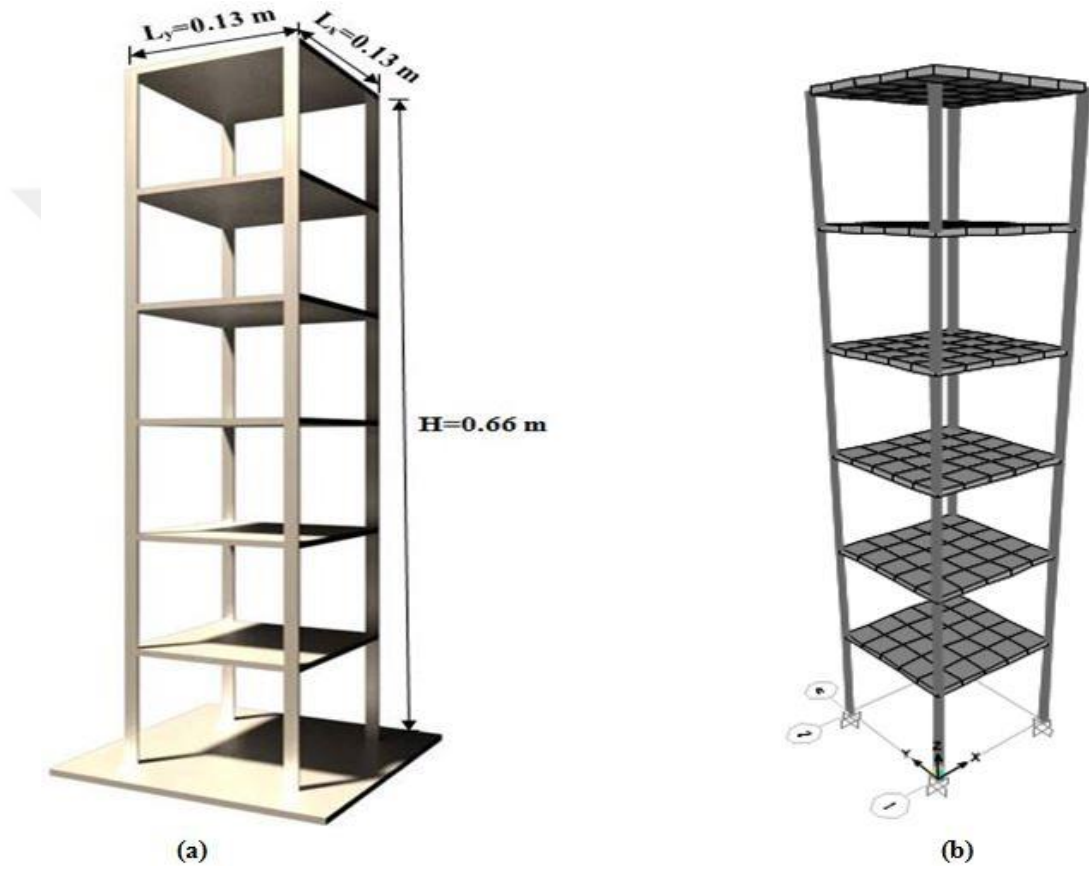
Tablo 3.6. Gerçek yapının yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmeleri

Kat Sayısı	Kocaeli depremi (m)	Chi-Chi depremi (m)	Loma-Prieta depremi (m)
6	0,0960	0,0804	0,082
5	0,0842	0,0696	0,075
4	0,0750	0,0577	0,060
3	0,0607	0,0462	0,040
2	0,0391	0,0296	0,022
1	0,0146	0,0109	0,009

3.5. Ölçeklendirilmiş Model Yapının SEY ile Deprem Analizi

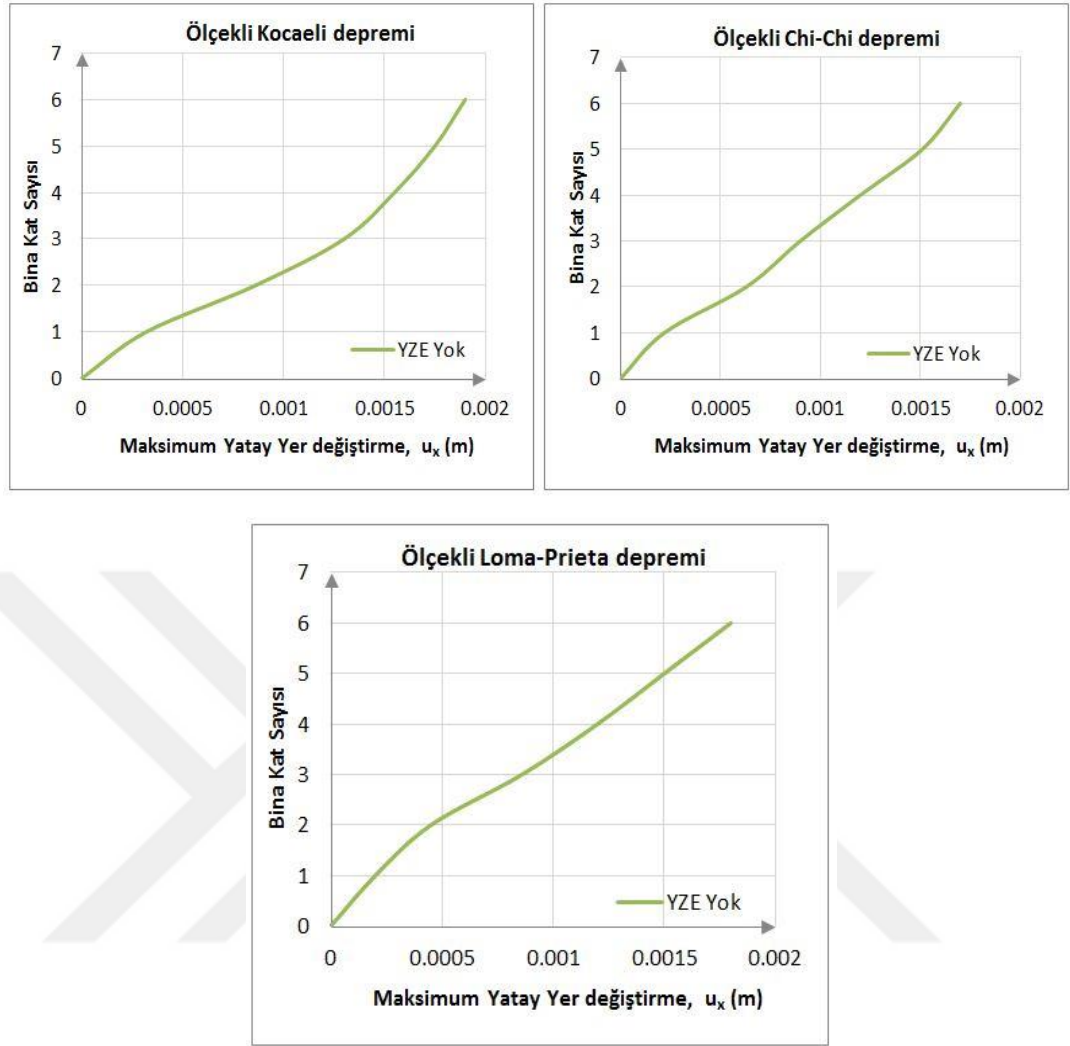
Sarsma tablasında kullanılacak olan yapı modeli geometrik ölçeklenme katsayısına bağlı olarak çelik çerçeveden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Bu model yapının kat yüksekliği 0,11 m olup toplam yüksekliği 0,66 m'dir. Her iki doğrultuda yapı tek

açıklıklı ve bu açıklığın boyu 0,13 m olarak dikkate alınmıştır. Ölçeklendirilmiş model yapının deprem analizi için sonlu elemanlar yöntemine dayalı SAP2000 bilgisayar programından yararlanılarak incelenmiştir. Bu analizlerde deprem yer hareketi olarak ölçeklendirilmiş üç farklı deprem kayıdı sırasıyla Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta (1989) kullanılmıştır. Söz konusu model yapının hâkim periyodu 0.11 sn olarak bulunmuştur (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. (a) Model yapının görüntüsü (b) Model yapının sonlu elemanlar dayalı matematik modeli

Model yapının ölçekli Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta (1989) depremine göre dinamik davranışı incelenmiştir ve maksimum yatay kat yer değiştirmelerinin değişimi bu depremler için elde edilmiştir (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Üç farklı deprem etkisindeki model yapının yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmeleri

Sarsma tablasında kullanacak model yapının söz konusu depremler için maksimum kat yer değiştirmelerinin değerleri Tablo 3.7.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.7. Model yapının yüksekliği boyunca kat yatay yerdeğiştirmeleri

Kat Sayısı	Kocaeli depremi (m)	Chi-Chi depremi (m)	Loma-Prieta depremi (m)
6	0,00190	0,00170	0,00180
5	0,00175	0,00151	0,00150
4	0,00155	0,00120	0,00120
3	0,00130	0,00090	0,00086
2	0,00086	0,00063	0,00045
1	0,00032	0,00022	0,00020

3.5.1. Model yapı için geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyinin belirlenmesi

Sarsma tablasındaki deneylerde kullanılmak üzere model yapı için geometrik ölçeklendirme katsayısı $\lambda=45$ olarak belirlenmiştir. Sırasıyla Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta depremleri için söz konusu yapının maksimum kat yer değiştirmeleri hem gerçek yapı için hem de model yapı için elde edilmiştir. Yukarıda bahsedilen depremlere göre gerçek yapının ve model yapının katlara göre maksimum yatay yer değiştirmelerine bağlı olarak geometrik ölçeklendirme katsayılarının doğruluk düzeyleri Tablo 3.8.-3.10.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.8. Kocaeli depremi için geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi

Kocaeli depremi				
Kat sayısı	GY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	MY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda =45$)	Hata payı (%)
6	0,0960	0,00190	50	10
5	0,0842	0,00175	48	6,25
4	0,0750	0,00155	48	6,25
3	0,0607	0,00130	46	2,14
2	0,0391	0,00086	46	2,17
1	0,0146	0,00032	45	0

Tablo 3.9. Chi-Chi depremi için geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi

Chi-Chi depremi				
Kat sayısı	GY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	MY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda =45$)	Hata Payı (%)
6	0,0804	0,00170	47	3,75
5	0,0696	0,00151	46	2,17
4	0,0577	0,00012	48	6,25
3	0,0462	0,00009	51	10,5
2	0,0296	0,00063	46	2,17
1	0,0109	0,00022	49	8,1

Tablo 3.10. Loma-Prieta depremi için geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi

Loma-Prieta depremi				
Kat sayısı	GY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	MY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
6	0,082	0,00180	46	2,17
5	0,075	0,00150	50	10
4	0,060	0,00120	50	10
3	0,040	0,00086	46	2,17
2	0,022	0,00045	48	6,25
1	0,009	0,00020	45	0

3.6. Gerçek Yapı-Zemin Sisteminin SEY ile Deprem Analizi

Gerçek yapı-zemin sisteminin deprem analizinde dikkate alınacak bina yapısı 6 katlı 5 m yükseklikli betonarme düzlem bir çerçevedir. Binanın toplam yüksekliği 30 m ve genişliği ise 6 m olarak belirlenmiştir. Gerçek yapı-zemin etkileşim probleminde söz konusu binanın altındaki zeminin uzunluğu 30 m kalınlığı ise 10 m olarak dikkate alınmıştır. Sonsuz zemin bölgesinden çıkarılan sonlu zemin bölgesinin sınır koşulları viskoz söndürücüler kullanarak modellenmiştir. Söz konusu incelenecek bina yapısının altındaki zeminin davranış modeli doğrusal elastik ve elasto-plastik olarak seçilmiştir. Oluşturulan sayısal modelde orta sıkı kumlu zemine ait veriler Yang'1997 çalışmasından seçilmiştir ve zemine ait özellikler Tablo 3.11.'de verilmiştir [31].

Tablo 3.11. Gerçek yapı- zemin probleminin mekanik özellikleri

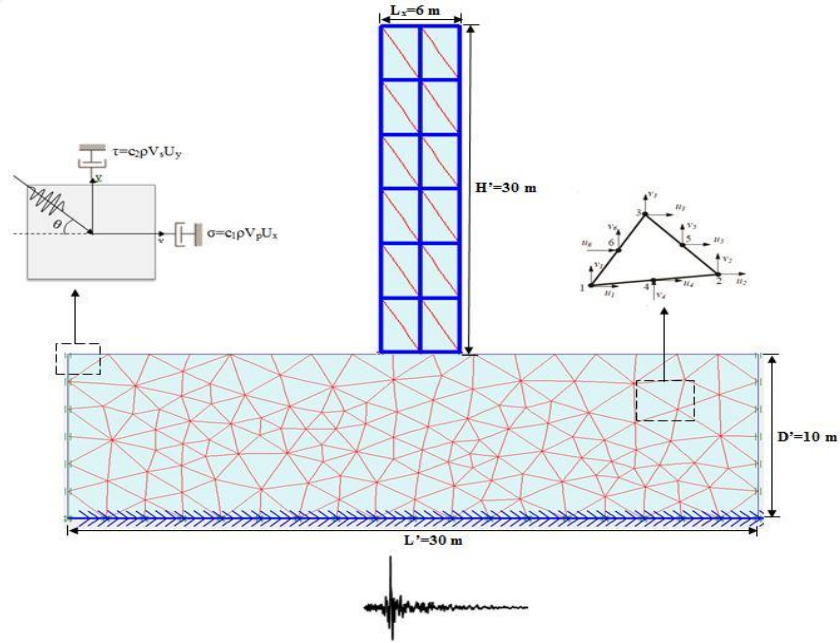
Parametre	Sembol	Büyüklik	Birim
Birim hacim ağırlık	γ	12,9	(kN/m ³)
Elastisite modülü	E	$9,11 \times 10^5$	(kN/m ²)
Kayma modülü	G	$3,782 \times 10^5$	(kN/m ²)
Poisson oranı	ν	0,30	-
Basınç dalgası	V_p	879	m/s
Kayma dalgası	V_s	536	m/s
Kohezyon	c	0	(kN/m ²)
Kayma mukavemeti açısı	ϕ	35	(°)
Kabarma açısı	ψ	5	(°)
Arayüz dayanım azaltma faktörü	R_{inter}	0,67	-

Yapı tasarımında kullanılan kolon-kiriş elemanlarının mekanik özellikleri ise Tablo 3.12.'de verilmiştir.

Tablo 3.12. Gerçek üstyapının mekanik özellikleri

Parametre	Sembol	Büyüklik	Birim
Kolonlar	Eksenel rijitlik	EI	613800 (kN)
	Eğilme rijitliği	EI	19220000 (kN/m ²)
	Ağırlık	W	12,25 (kN/m ²)
Kirişler	Eksenel rijitlik	EI	80600 (kN)
	Eğilme rijitliği	EI	9765000 (kN/m ²)
	Ağırlık	W	3,125 (kN/m ²)

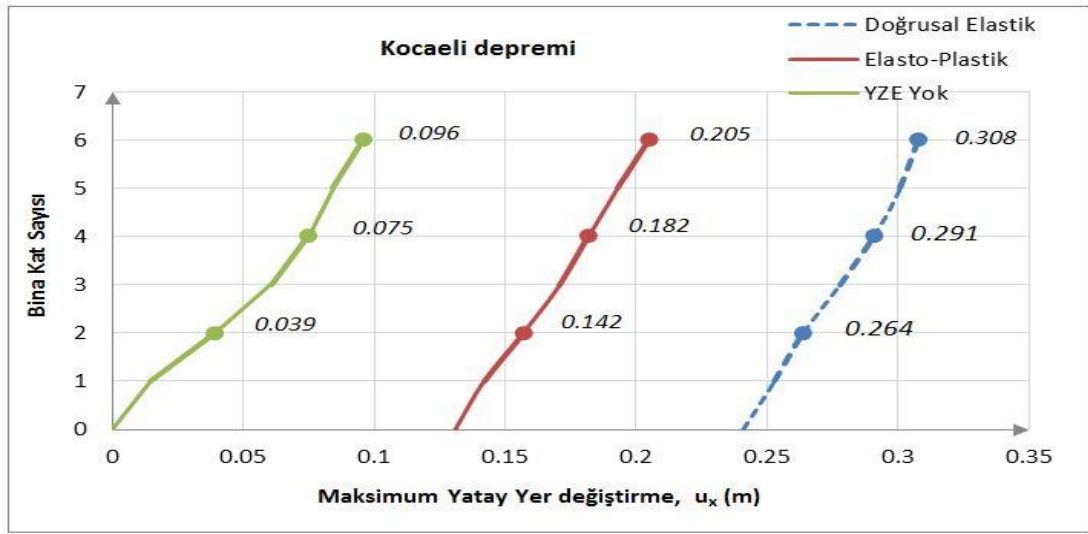
Deprem yükünün simülasyonu ile birlikte değerlendirilen üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D [31] bilgisayar programından yararlanılmıştır. Bu analizlerde, deprem yer hareketi olarak, Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999) ve Loma-Preita (1989) depremleri kullanılmıştır (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. Gerçek yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu eleman modeli

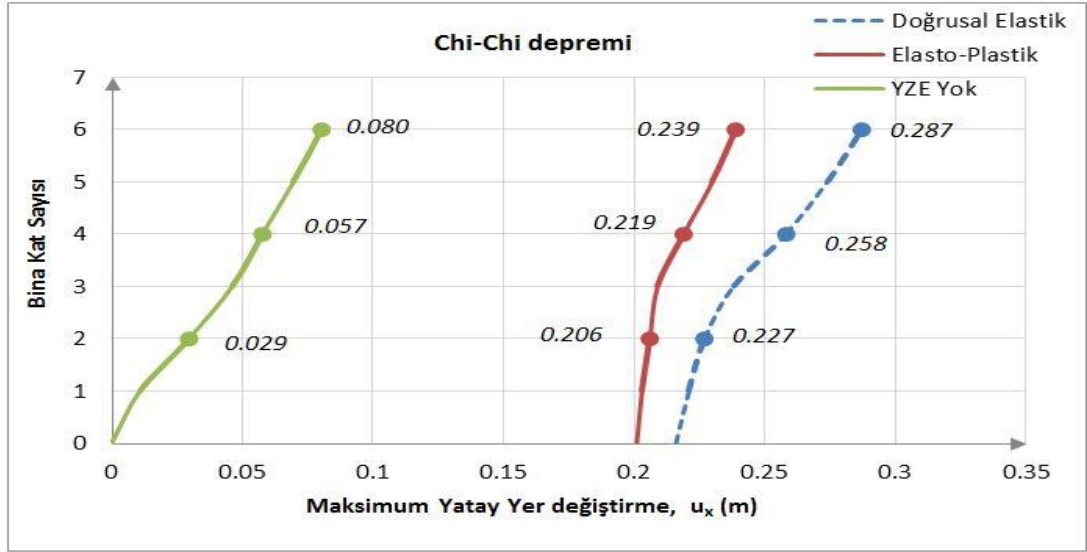
Gerçek yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen sonlu elemanlar modelinin

Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta (1989) depremlerine göre analiz sonuçları maksimum yatay kat yer değiştirmeleri cinsinden yapı-zemin etkileşimli ve yapı-zemin etkileşimin dikkate alınmadığı durum için sonuçlar Şekil 3.12.-3.14.'de verilmiştir. Ayrıca bu şekillerde yapı-zemin etkileşiminin problemi dahil edildiği durumlarda zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranış modelleri için sonuçlar verilmiştir.



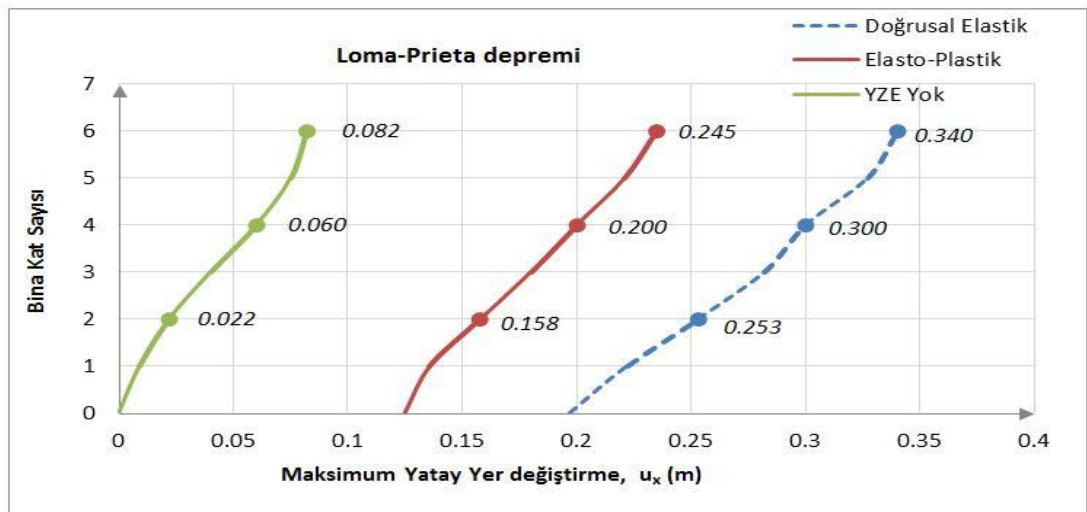
Şekil 3.12. Kocaeli depremi etkisindeki gerçek sistemde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri

Kocaeli (1999) depremine maruz gerçek yapının zemine rijit bağlı durum için maksimum yatay kat yer değiştirmesi 0,308 m olarak doğrusal elastik durum için bulunurken, aynı yapının söz konusu deprem için elasto-plastik zemin davranış modeli için altıncı kat yer değiştirmesi 0,205 m bulunmuştur. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı durumda ise altıncı kat yer değiştirmesi 0,0960 m'dir. Bu durumda doğrusal elastik durum için yapı-zemin etkileşimi altıncı kat yer değiştirmesi % 30 büyötmüştür. Binanın altıncı kat yer değiştirmesinin zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranması durumuna göre Kocaeli depremi için % 20 değişim göstermiştir.



şekil 3.13. Chi-Chi depremi etkisindeki gerçek sistemde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmelerini

Chi-Chi (1999) depreminde yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığında altıncı kat yer değiştirmesi zeminin doğrusal elastik davranışına göre 0,287 m bulunurken, aynı yapının söz konusu deprem için elasto-plastik zemin davranış modeli için altıncı kat yer değiştirmesi 0,239 m bulunmuştur. Yapı-zemin etkileşimine dikkate alınmadığı durumda ise altıncı kat yer değiştirmesi 0,0804 m'dir. Bu durumda doğrusal elastik durum için yapı-zemin etkileşimi altıncı kat yer değiştirmesi % 28 bytmuştur. Binanın altıncı kat yer değiştirmesinin zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranması durumuna göre Chi-Chi depremi için % 10 değişim göstermiştir.



şekil 3.14. Loma-Prieta depremi etkisindeki gerçek sistemde binanın yüksekliği boyunca kat ya yer değiştirmeleri

Loma-Prieta (1989) depremine maruz gerçek yapının zemine rijit bağlı durum için maksimum yatay kat yer değiştirmesi 0,340 m olarak doğrusal elastik durum için bulunurken, aynı yapının söz konusu deprem için elasto-plastik zemin davranış modeli için altıncı kat yer değiştirmesi 0,245 m bulunmuştur. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı durumda ise altıncı kat yer değiştirmesi 0,082 m'dir. Bu durumda doğrusal elastik durum için yapı-zemin etkileşimi altıncı kat yer değiştirmesi % 28 büyötmüştür. Binanın altıncı kat yer değiştirmesinin zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranması durumuna göre Kocaeli depremi için % 15 değişim göstermiştir.

Binanın altındaki zeminin doğrusal elastik davranışı dikkate alındığında farklı deprem kayıtlarına göre binanın davranışı incelendiğinde maksimum yatay kat yer değiştirmeleri her bir kat için Tablo 3.13.'de verilmiştir.

Tablo 3.13. Zeminin doğrusal elastik davranışı altında gerçek binanın yatay kat yer değiştirmesi

Kat Sayısı	Kocaeli depremi (m)	Chi-Chi depremi (m)	Loma-Prieta depremi (m)
6	0,308	0,287	0,340
5	0,301	0,274	0,327
4	0,291	0,258	0,300
3	0,278	0,238	0,282
2	0,264	0,227	0,253
1	0,253	0,221	0,222
0	0,241	0,216	0,197

Binanın altındaki zeminin elasto-plastik davranışı dikkate alındığında farklı deprem kayıtlarına göre binanın davranışı incelendiğinde maksimum yatay kat yer değiştirmeleri her bir kat için Tablo 3.14.'de verilmiştir.

Tablo 3.14. Zeminin elasto-plastik davranışı altında gerçek binanın yatay kat yer değiştirmeleri

Kat Sayısı	Kocaeli depremi (m)	Chi-Chi depremi (m)	Loma-Prieta depremi (m)
6	0,205	0,239	0,245

Tablo 3.14. (Devamı)

Kat Sayısı	Kocaeli depremi (m)	Chi-Chi depremi (m)	Loma-Prieta depremi (m)
5	0,193	0,230	0,221
4	0,182	0,219	0,200
3	0,171	0,209	0,180
2	0,157	0,206	0,158
1	0,142	0,203	0,136
0	0,131	0,201	0,125

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı durum için farklı deprem kayıtlarına göre binanın davranışı incelendiğinde maksimum yatay kat yer değiştirmeleri her bir kat için Tablo 3.15.'de verilmiştir.

Tablo 3.15. Yapı-zemin etkileşimin dikkate alınmadığı durumda gerçek yapının yatay kat yer değiştirmeleri

Kat Sayısı	Kocaeli depremi (m)	Chi-Chi depremi (m)	Loma-Prieta depremi (m)
6	0,0960	0,0804	0,082
5	0,0842	0,0696	0,075
4	0,0750	0,0577	0,060
3	0,0607	0,0462	0,040
2	0,0391	0,0296	0,022
1	0,0146	0,0109	0,009

3.7. Deneysel Olarak İncelenecek Olan Ölçeklendirilmiş Yapı-Zemin Modelinin SEY ile Deprem Analizi

Deneysel olarak incelenecek olan ölçeklendirilmiş yapı-zemin modelinde deprem analizinde kullanılacak olan bina 6 katlı düzlemsel çelik bir çerçevedir. Binanın kat yüksekliği eşit olup her kat 0,11 m olarak tasarlanmıştır. Bu durumda binanın toplam yüksekliği 0,66 m'dir, binanın genişliği ise 0,13 m olarak dikkate alınmıştır. Sonsuz zemin bölgesinden çıkarılan sonlu zemin bölgesinin sınır koşulları viskoz söndürücüler kullanarak modellenmiştir. Söz konusu incelenecek ölçeklendirilmiş bina yapısının altındaki zeminin davranış modeli doğrusal elastik ve elasto-plastik

olarak seçilmiştir. Oluşturulan sayısal modelde gevşek zemine ait veriler Yang'1997 çalışmasından seçilmiştir ve zemine ait özellikler Tablo 3.16.'de verilmiştir [32].

Tablo 3.16. Ölçeklendirilmiş yapı-zemin sisteminin mekanik özellikleri

Parametre	Sembol	Büyüklik	Birim
Birim hacim ağırlık	γ	12,9	(kN/m ³)
Elastisite modülü	E	2,509x10 ⁴	(kN/m ²)
Kayma modülü	G	9044,153	(kN/m ²)
Poisson oranı	ν	0,30	-
Basınç dalgası	V_p	190	m/s
Kayma dalgası	V_s	80	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	-

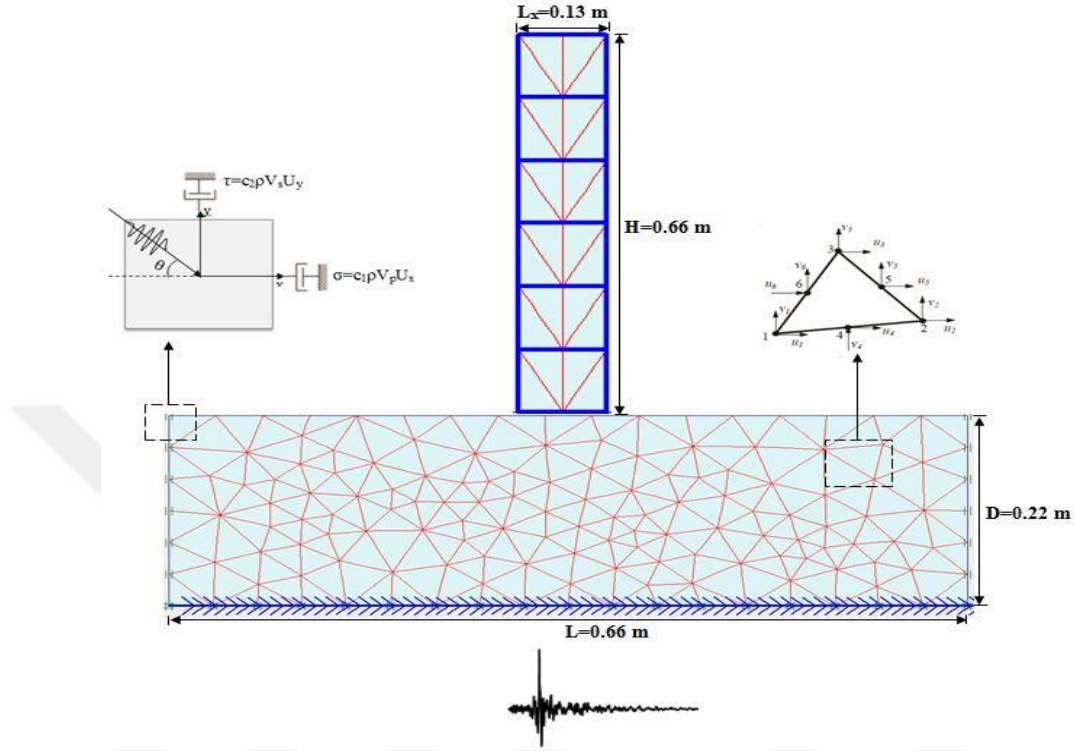
Ölçeklendirilmiş bina tasarımında kullanılan kolon-kiriş elemanlarının mekanik özellikleri ise Tablo 3.17.'de verilmiştir.

Tablo 3.17. Ölçeklendirilmiş binanın mekanik özellikleri

Parametre	Sembol	Büyüklik	Birim
Kolonlar	Eksenel rijitlik	EI	16,6 (KN)
	Eğilme rijitliği	EI	003025 (kN/m ²)
	Ağırlık	W	0,00157 (kN/m ²)
Kirişler	Eksenel rijitlik	EI	219,7 (kN)
	Eğilme rijitliği	EI	18,3 (kN/m ²)
	Ağırlık	W	0,002826 (kN/m ²)

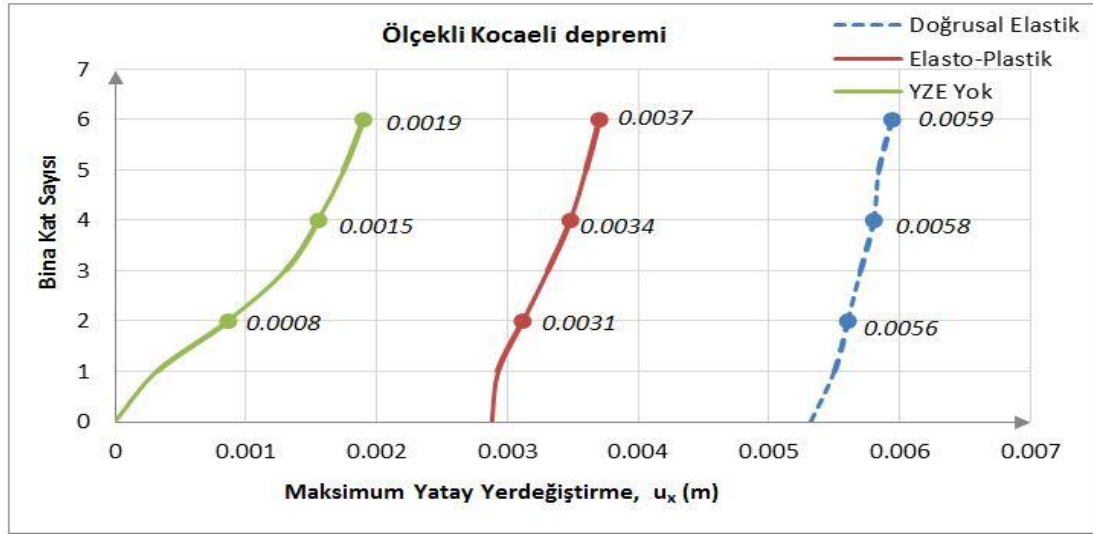
Deprem yükünün simülasyonu ile birlikte değerlendirilen ölçeklendirilmiş üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman bölgesindeki çözümü için sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D bilgisayar programından yararlanarak incelenmiştir. Bu analizlerde

ölçeklendirilmiş deprem yer hareketi olarak, Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999) ve Loma-Preita (1989) depremleri kullanılmıştır (Şekil 3.15.).



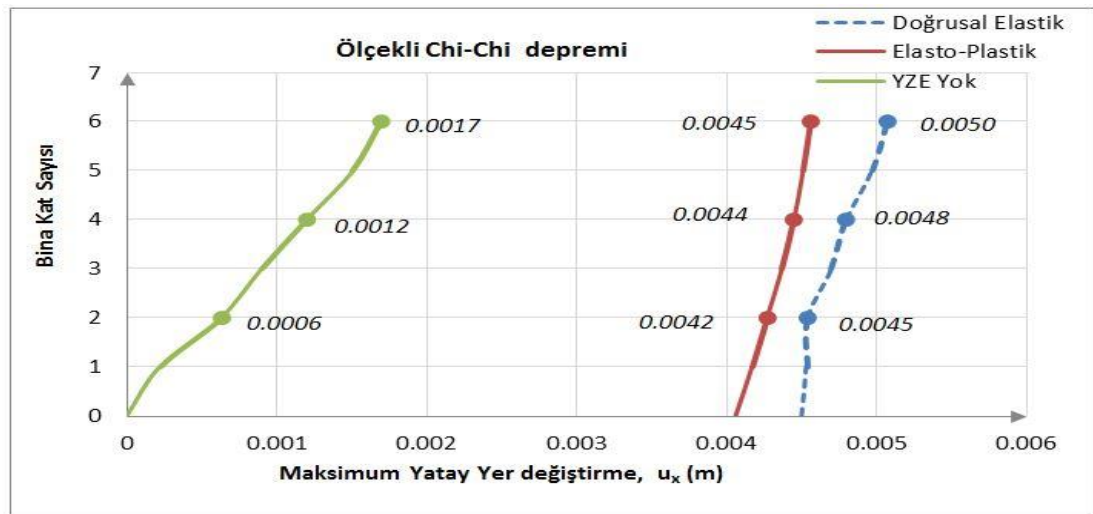
Şekil 3.15. Yapı-zemin etkileşim problemi için geliştirilen ölçekli sonlu eleman modeli

Ölçekli yapı-zemin etkileşim modeli sırasıyla Kocaeli (1999), Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta (1989) depremleri ile analiz edilmiştir. Bu çalışmada yapı-zemin etkileşim problemi için zemin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranış modelleri dikkate alınarak incelenmiştir. Ayrıca yapı-zemin etkileşim probleminin dahil edilmediği durumda sonuçlar maksimum yatay kat yer değiştirmelerine göre verilmiştir. Her bir depremde daha önceki geometrik ölçek parametresinden yararlanılarak ölçeklendirilmiştir ve model yapı-zemin etkileşim probleminde binanın titreşim davranışı farklı deprem senaryolarına göre maksimum yatay yer değiştirmeleri her kat için elde edilmiştir (Şekil 3.16.-3.18.).



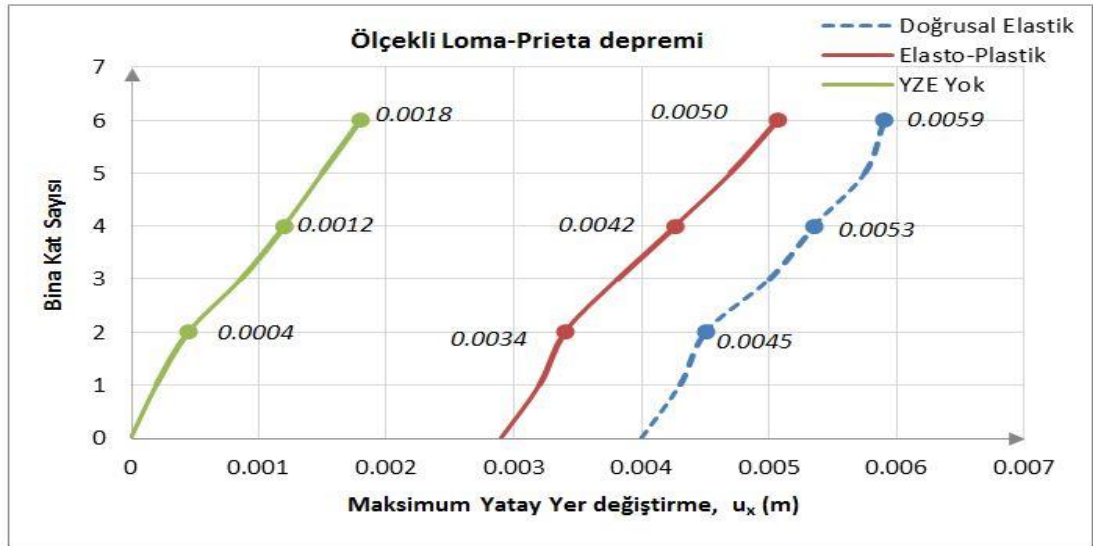
Şekil 3.16. Kocaeli depremi etkisindeki modelde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri

Kocaeli (1999) depremine maruz kalan binanın altındaki zemin dikkate alınmadığı zaman yani bina zemine rijit bağlı kabul edildiğinde binanın altıncı katı 0,0019 m yer değiştirme yapmıştır. Binanın altındaki zeminin davranışı doğrusal elastik olarak kabul edildiğinde binanın altıncı katı 0,00594 m yer değiştirme yapmıştır. Binanın altındaki zeminin davranışı elasto-plastik kabul edildiği zaman ise 0,00371 m yer değiştirme yapmıştır. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığında doğrusal elastik davranışı için yapı zemine rijit bağlı duruma göre altıncı katı % 40 yer değiştirmesi artmıştır. Binanın altıncı kat yer değiştirmesinin zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranması durumuna göre Kocaeli depremi için % 18 değişim göstermiştir.



Şekil 3.17. Chi-Chi depremi etkisindeki modelde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri

Chi-Chi (1999) depremine maruz kalan binanın altındaki zemin dikkate alınmadığı zaman yani bina zemine rijit bağlı kabul edildiğinde binanın altıncı katı 0,0019 m yer değiştirme yapmıştır. Binanın altındaki zeminin davranışı doğrusal elastik olarak kabul edildiğinde binanın altıncı katı 0,00594 m yer değiştirme yapmıştır. Binanın altındaki zeminin davranışı elasto-plastik kabul edildiği zaman ise 0,00371 m yer değiştirme yapmıştır. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığında doğrusal elastik davranışı için yapı zemine rijit bağlı duruma göre altıncı katı % 45 yer değiştirmesi artmıştır. Binanın kat yer değiştirmesinin zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranması durumuna göre Chi-Chi depremi için % 12 değişim göstermiştir.



Şekil 3.18. Loma-Prieta depremi etkisindeki modelde binanın yüksekliği boyunca kat yatay yer değiştirmeleri

Loma-Prieta (1989) depremine maruz kalan binanın altındaki zemin dikkate alınmadığı zaman yani bina zemine rijit bağlı kabul edildiğinde binanın altıncı katı 0,0019 m yer değiştirme yapmıştır. Binanın altındaki zeminin davranışı doğrusal elastik olarak kabul edildiğinde binanın altıncı katı 0,00594 m yer değiştirme yapmıştır. Binanın altındaki zeminin davranışı elasto-plastik kabul edildiği zaman ise 0,00371 m yer değiştirme yapmıştır. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığında doğrusal elastik davranışı için yapı zemine rijit bağlı duruma göre altıncı katı % 44 yer değiştirmesi artmıştır. Binanın altıncı kat yer değiştirmesinin zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranması durumuna göre Kocaeli depremi için % 14 değişim göstermiştir.

Aynı şekilde incelenen binanın farklı depremler altındaki davranışı yapı-zemin etkileşimi ile birlikte dikkate alındığında her bir deprem için her bir katın maksimum yatay yer değiştirmeleri Tablo 3.18.'de binanın altındaki zeminin doğrusal elastik kabulü altındaki davranışına göre verilmiştir.

Tablo 3.18. Zeminin doğrusal elastik davranışı altında ölçeklendirilmiş binanın yatay kat yer değiştirmeleri

Kat Sayısı	Kocaeli depremi (m)	Chi-Chi depremi (m)	Loma-Prieta depremi (m)
6	0,00594	0,00507	0,00590
5	0,00584	0,00497	0,00580
4	0,00580	0,00480	0,00535
3	0,00570	0,00470	0,00500
2	0,00560	0,00454	0,00450
1	0,00550	0,00453	0,00430
0	0,00532	0,00450	0,00400

Benzer şekilde binanın altındaki zeminin elasto-plastik davranışı dikkate alındığında farklı deprem kayıtlarına göre binanın davranışı incelendiğinde maksimum yatay kat yer değiştirmeleri her bir kat için Tablo 3.19.'de verilmiştir.

Tablo 3.19. Zeminin elasto-plastik davranışı altında ölçeklendirilmiş binanın yatay kat yer değiştirmeleri

Kat Sayısı	Kocaeli depremi (m)	Chi-Chi depremi (m)	Loma-Prieta depremi (m)
6	0,00371	0,00456	0,00507
5	0,00360	0,00451	0,00470
4	0,00348	0,00445	0,00426
3	0,00331	0,00437	0,00381
2	0,00312	0,00427	0,00340
1	0,00293	0,00417	0,00302
0	0,00288	0,00406	0,00275

Yapı-zemin etkileşim modelinin dikkate alınmadığı durum için farklı deprem kayıtlarına göre binanın davranışı incelendiğinde maksimum yatay kat yer değiştirmeleri her bir kat için Tablo 3.20.'de verilmiştir.

Tablo 3.20. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı durumda gerçek yapının yatay kat yer değiştirmeleri

Kat Sayısı	Kocaeli depremi (m)	Chi-Chi depremi (m)	Loma-Prieta depremi (m)
6	0,00190	0,00170	0,00180
5	0,00175	0,00151	0,00150
4	0,00155	0,00120	0,00120
3	0,00130	0,00090	0,00086
2	0,00086	0,00063	0,00045
1	0,00032	0,00022	0,00020

3.7.1. Yapı-zemin deney modeli için geometrik ölçeklendirme katsayısının doğrulanması

Bu bölümde yapı-zemin deney modeli için öngörülen geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme üç farklı deprem senaryosu için ve ayrıca binanın altındaki zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranış modelleri için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Kocaeli (1999) depremine göre yapı-zemin etkileşim modeli analiz edildiğinde doğrusal elastik zemin davranış modeli için elde edilen sonuçlar Tablo 3.21.'de, elasto-plastik zemin davranış modeli için sonuçlar Tablo 3.22.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.21. Yapı-zemin etkileşiminin doğrusal elastik zemin için analizi

Kat sayısı	Kocaeli depremi			
	GY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	MY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
6	0,308	0,00594	51	11
5	0,301	0,00584	51	11
4	0,291	0,00580	50	10
3	0,278	0,00570	48	6,25
2	0,264	0,00560	47	4,25
1	0,253	0,00550	46	2,1
0	0,241	0,00532	45	0

Tablo 3.22. Yapı-zemin etkileşiminin elasto-plastik zemin için analizi

Kocaeli depremi				
Kat sayısı	GY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	MY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
6	0.205	0.00371	55	16
5	0.193	0.00360	53	14
4	0.182	0.00348	52	12
3	0.171	0.00331	51	11
2	0.157	0.00312	50	10
1	0.142	0.00293	48	6.25
0	0.131	0.00288	45	0

Tablo 3.21.'de yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı problemde gerçek yapı ile model yapının maksimum yanal kat yer değiştirmeleri hesap edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Hesaplanan geometrik ölçek katsayısını öngörülen geometrik ölçek katsayısıyla karşılaştırarak hata payları gösterilmiştir. Bu problemde zeminin davranışı doğrusal elastik olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde Tablo 3.22.'de zeminin davranışı elasto-plastik olarak dikkate alındığında Kocaeli depremi için gerçek yapı ve model yapının maksimum yanal kat yer değiştirmeleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir ve hesaplanan geometrik ölçek katsayısıyla problemin başlangıcında kabul edilen geometrik ölçek katsayısı karşılaştırılmıştır ve hata payları gösterilmiştir.

Tablo 3.21. ve 3.22.'den anlaşılıyor ki alt katlara doğru gittikçe geometrik hesaplarda kabul edilen geometrik ölçek katsayısının doğruluk düzeyi artmaktadır. Binanın altındaki zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranışı incelendiğinde hata payı elasto-plastik zemin davranışı altında bir miktar daha büyüdüğü görülmüştür. Sonuç itibarıyla Kocaeli depremi için sarsma tablasında incelenecek olan ölçeklendirilmiş yapı-zemin modelinin gerçek yapı-zemin etkileşim problemini temsil etme düzeyinin hata payına göre karşılaştırıldığında öngörülen modelin oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Chi-Chi (1999) depremine göre yapı-zemin etkileşim modeli analiz edildiğinde doğrusal elastik zemin davranış modeli için elde edilen sonuçlar Tablo 3.23.'de, elasto-plastik zemin davranış modeli için sonuçlar Tablo 3.24.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.23. Yapı-zemin etkileşiminin doğrusal elastik zemin için analizi

Chi-Chi depremi				
Kat sayısı	GY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	MY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
6	0,287	0,00507	56	17
5	0,274	0,00497	55	16
4	0,258	0,00480	53	12
3	0,238	0,00470	51	11
2	0,227	0,00454	50	10
1	0,221	0,00453	48	6,25
0	0,216	0,00450	48	6,5

Tablo 3.24. Yapı-zemin etkileşiminin elasto-plastik zemin için analizi

Chi-Chi depremi				
Kat sayısı	GY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	MY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
6	0,239	0,00456	52	12
5	0,230	0,00451	50	10
4	0,219	0,00445	49	8,16
3	0,209	0,00437	48	6,25
2	0,206	0,00427	48	6,25
1	0,203	0,00417	48	6,25
0	0,201	0,00406	48	6,25

Tablo 3.23.'de yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı problemde gerçek yapı ile model yapının maksimum yanal kat yer değiştirmeleri hesap edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Hesaplanan geometrik ölçek katsayısını öngörülen geometrik ölçek katsayısıyla karşılaştırarak hata payları gösterilmiştir. Bu problemde zeminin davranışı doğrusal elastik olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde Tablo 3.24.'de zeminin davranışı elasto-plastik olarak dikkate alındığında Chi-Chi depremi için gerçek yapı ve model yapının maksimum yanal kat yer değiştirmeleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir ve hesaplanan geometrik ölçek katsayısıyla problemin

başlangıcında kabul edilen geometrik ölçek katsayısı karşılaştırılmıştır ve hata payları gösterilmiştir.

Tablo 3.23 ve 3.24.'den anlaşıyor ki alt katlara doğru gittikçe geometrik hesaplarda kabul edilen geometrik ölçek katsayısının doğruluk düzeyi artmaktadır. Binanın altındaki zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranışı incelendiğinde hata payı doğrusal elastik zemin davranışı altında bir miktar daha büyüdüğü görülmüştür. Sonuç itibarıyla Chi-Chi depremi için sarsma tablasında incelenecek olan ölçeklendirilmiş yapı-zemin modelinin gerçek yapı-zemin etkileşim problemini temsil etme düzeyinin hata payına göre karşılaştırıldığında öngörülen modelin oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Loma-Prieta (1989) depremine göre yapı-zemin etkileşim modeli analiz edildiğinde doğrusal elastik zemin davranış modeli için elde edilen sonuçlar Tablo 3.25.'de, elasto-plastik zemin davranış modeli için sonuçlar Tablo 3.26.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.25. Yapı-zemin etkileşiminin doğrusal elastik zemin için analizi

Loma-Prieta depremi				
Kat sayısı	GY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	MY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
6	0,340	0,00590	57	18
5	0,327	0,00575	56	16
4	0,300	0,00535	56	16
3	0,282	0,00500	56	16
2	0,253	0,00450	56	16
1	0,222	0,00430	51	10,5
0	0,197	0,00400	49	8,6

Tablo 3.26. Yapı-zemin etkileşiminin elasto-plastik zemin için analizi

Loma-Prieta depremi				
Kat sayısı	GY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	MY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
6	0,235	0,00507	46	2,17
5	0,221	0,00470	47	4,25
4	0,200	0,00426	46	2,17

Tablo 3.26. (Devamı)

Loma-Prieta depremi				
Kat sayısı	GY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	MY ait maksimum kat yer değiştirmeleri (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
3	0,180	0,00381	47	4,25
2	0,158	0,00340	45	0
1	0,136	0,00320	42	7,14
0	0,125	0,00290	43	4,6

Tablo 3.25.'de yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı problemde gerçek yapı ile model yapının maksimum yanal kat yer değiştirmeleri hesap edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Hesaplanan geometrik ölçek katsayısını öngörülen geometrik ölçek katsayısıyla karşılaştırılarak hata payları gösterilmiştir. Bu problemde zeminin davranışı doğrusal elastik olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde Tablo 3.26.'de zeminin davranışı elasto-plastik olarak dikkate alındığında Loma-Prieta depremi için gerçek yapı ve model yapının maksimum yanal kat yer değiştirmeleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir ve hesaplanan geometrik ölçek katsayısıyla problemin başlangıcında kabul eden geometrik ölçek katsayısı karşılaştırılmıştır ve hata payları gösterilmiştir.

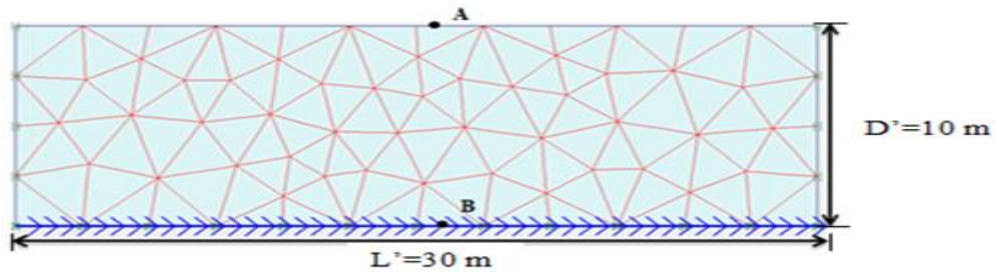
Tablo 3.25. ve 3.26.'den anlaşıyor ki alt katlara doğru gittikçe geometrik hesaplarda kabul edilen geometrik ölçek katsayısının doğruluk düzeyi artmaktadır. Binanın altındaki zeminin doğrusal elastik ve elasto-plastik davranışı incelendiğinde hata payı doğrusal elastik zemin davranışı altında bir miktar daha büyüdüğü görülmüştür. Sonuç itibariyle Loma-Prieta depremi için sarsma tablasında incelenecek olan ölçeklendirilmiş yapı-zemin modelinin gerçek yapı-zemin etkileşim problemini temsil etme düzeyinin hata payına göre karşılaştırıldığında öngörülen modelin oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Deprem hareketinin hata payında önemli rol oynadığı gözlemlenmiştir. Ama bu hata payı en fazla olarak binanın altıncı kat yanal yer değiştirmede % 18 kadar çektiği gözlemlenmiştir. Kocaeli depreminin şiddeti de gözönünde bulundurulduğunda hata payının elasto-plastik zemin davranışı modelinde daha büyük olduğu gözlemlenirken

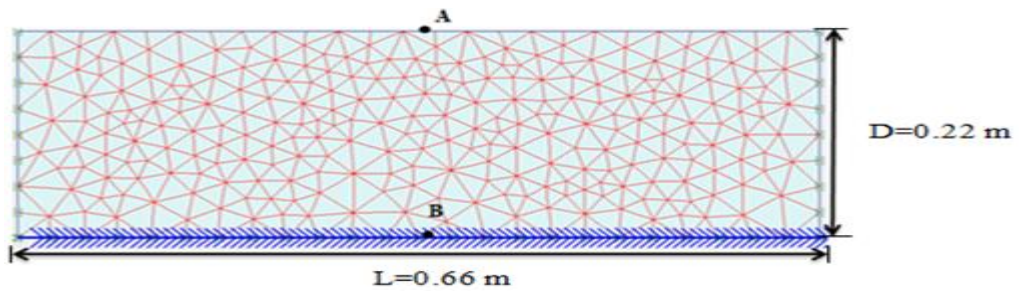
diğer Chi-Chi ve Loma-Prieta depremlerinde hata payının zemin davranışı doğrusal elastic durumda daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

3.8. Deprem Yükleri Altında Serbest Zemin Titreşiminin Gerçek Sistem ve Deney Modeli İçin SEY ile İncelenmesi ve Geometrik Ölçek Katsayısının Doğrulanması

Bu bölümde gerçek zeminin ve ölçeklendirilmiş model zeminin sismik davranışlarını karşılaştırmak için Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta (1989) depremleri kullanmıştır. Serbest zeminin yatay hareketi değerlendirebilmek için A noktası ölçüm olarak seçilmiştir ve ana kayanın yatay hareketi için B noktası ölçüm olarak seçilmiştir. Burada gerçek zeminin sismik davranışı ve ölçeklendirilmiş model zemin sismik davranışı için geliştirilen sonlu eleman modelleri Şekil 3.19. ve 3.20.'de sırasıyla verilmiştir. Bu bölümdeki çalışmanın amacı gerçek zemin ile ölçeklendirilmiş model zeminin serbest zemin hareketiyle ana kaya hareketlerini yatay yer değiştirme cinsinden ölçerek geometrik ölçekleme katsayısının doğruluk düzeyi tespit etmektir.



Şekil 3.19. Gerçek zeminin sismik davranışı için geliştirilen sonlu eleman modeli



Şekil 3.20. Ölçeklendirilmiş model zeminin sismik davranışı için geliştirilen sonlu eleman modeli

Tablo 3.27. ve 3.28.'de gerçek zemin ile model zeminin sismik davranışları yani serbest zemin ve ana kaya yatay hareketleri iki farklı deprem için elde edilmiştir.

Tablo 3.27. Gerçek zeminin sismik davranışları

	Chi-Chi depremi yatay yer değiştirme (m)	Loma-Prieta depremi yatay yer değiştirme (m)
Serbest zeminin hareketi (A noktası)	0,216	0,195
Ana kayanın hareketi (B noktası)	0,201	0,127

Tablo 3.28. Model zeminin sismik davranışları

	Chi-Chi depremi yatay yer değiştirme (m)	Loma-Prieta depremi yatay yer değiştirme (m)
Serbest zeminin hareketi (A noktası)	0,00454	0,00430
Ana kayanın hareketi (B noktası)	0,00433	0,00293

Yukarda belirtilen tablolar gösteriyor ki ana kaya hareketi Chi-Chi (1999) depremini için zemin koşullarından dolayı 0,201 m'den 0,216 m'ye çıkmıştır ve % 7 kadar arttığı gözlemlenmiştir. Ana kaya hareketi Loma-Prieta (1989) depremi için zemin koşullarından dolayı 0,127 m'den 0,195 m'ye çıkmıştır ve % 20 değişmiştir. Aynı şekilde model zemin içinde bu artış gözlemlenmektedir.

Tablo 3.29.'de Chi-Chi deprem altındaki zeminin sismik davranışı dikkate alınarak geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi gösterilmiştir.

Tablo 3.29. Chi-Chi depremi altındaki zeminin davranışından geometrik ölçek katsayısının doğrulanması

	Chi-Chi depremi			
	GZ yatay yer değiştirme (m)	MZ yatay yer değiştirme (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
Serbest zeminin hareketi (A noktası)	0,216	0,00454	47	4,25
Ana kayanın hareketi (B noktası)	0,201	0,00433	46	2,17

Bu tablodan da anlaşıldığı üzere Chi-Chi deprem sonucunda gerçek sistemi serbest zemin hareketiyle model zeminin serbest zemin hareketi ait değerler karşılaştırıldığında hesaplanan geometrik ölçeğin öngörülen geometrik ölçeğe çok yakın çektiği gözlemlenmiştir, bu durum ana kaya hareketi içinde söylenebilir.

Tablo 3.30.'de Loma-Prieta deprem altındaki zeminin sismik davranışı dikkate alınarak geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi gösterilmiştir.

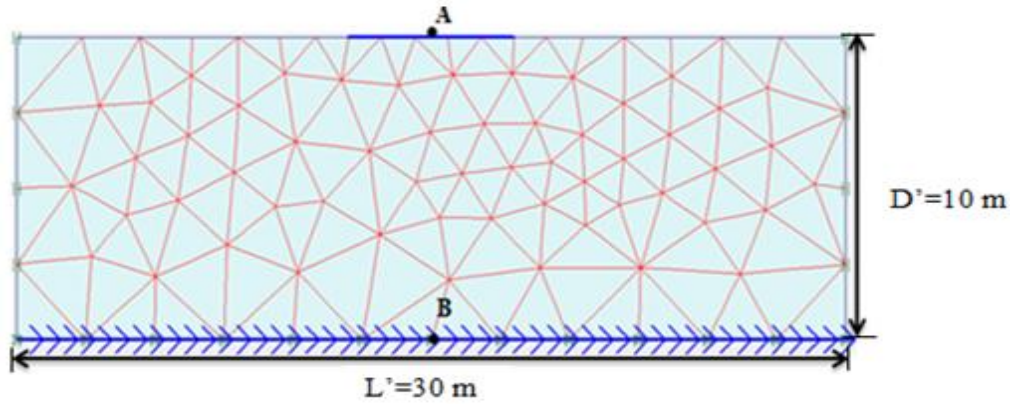
Tablo 3.30. Loma-Prieta depremi altındaki zeminin davranışından geometrik ölçek katsayısının doğrulanması

	Loma-Prieta depremi			
	GZ yatay yer değiştirme (m)	MZ yatay yer değiştirme (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
Serbest zeminin hareketi (A noktası)	0,195	0,00430	45	0
Ana kayanın hareketi (B noktası)	0,127	0,00293	44	2,17

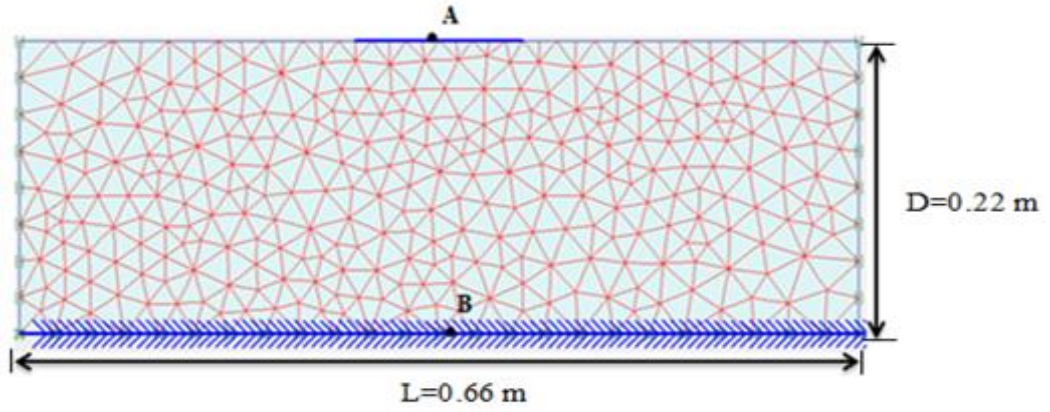
Bu tablodan da anlaşıldığı üzere Loma-Prieta deprem sonucunda gerçek sistemin serbest zemin hareketiyle model zeminin serbest zemin hareketi ait değerler karşılaştırıldığında hesaplanan geometrik ölçeğin öngörülen geometrik ölçekle örtüştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum ana kaya hareketi içinde söylenebilir.

3.9. Deprem Yükleri Altında Yapısız Temel-Zemin Etekileşiminin Gerçek Sistem ve Deney Modeli İçin SEY ile İncelenmesi ve Geometrik Ölçek Katsayısının Doğrulanması

Çalışmanın bu aşamasında gerçek zemine oturan temel plaka ile ölçeklendirilmiş zemin modelinde yer alan temel plağının sismik davranışı Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta (1989) depremleri için incelenmiştir. Gerçek zemine oturan temel plağı ile ölçeklendirilmiş zemine oturan temel plağı sismik davranışı için geliştirilen sonlu eleman modelleri Şekil 3.21. ve 3.22.'de gösterilmiştir. Bu çalışmanın amacı temel plağının sismik davranışı olan etkileşimi yani kinematik etkileşimi incelemektir. Yani burada geometrik ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi her iki kinematik etkileşim durumu için ortaya koyulacaktır.



Şekil 3.21. Gerçek zeminde temel plağının sismik davranışı için geliştirilen sonlu eleman modeli



Şekil 3.22. Ölçeklendirilmiş model zeminde temel plağının sismik davranışı için geliştirilen sonlu eleman modeli

Gerçek ve ölçeklendirilmiş zeminde Chi-Chi ve Loma-Prieta depremleri altındaki temel plağının yapı-zemin etkileşimindeki rolü yani kinematik etkileşimin etkisi temel plağı yatay yer hareketi bağı olarak Tablo 3.31. ve 3.32.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.31. Gerçek zeminde sismik yükler altında kinematik etkileşim

	Chi-Chi depremi yatay yer değiştirme (m)	Loma-Prieta depremi yatay yer değiştirme (m)
Temel plağının hareketi (A noktası)	0,220	0,200
Serbest zeminin hareketi (A noktası)	0,216	0,195
Ana kayanın hareketi (B noktası)	0,201	0,127

Tablo 3.32. Model zeminde sismik yükler altında kinematik etkileşim

	Chi-Chi depremi yatay yer değiştirme (m)	Loma-Prieta depremi yatay yer değiştirme (m)
Temel plağının hareketi (A noktası)	0,00460	0,00440
Serbest zeminin hareketi (A noktası)	0,00454	0,00430
Ana kayanın hareketi (B noktası)	0,00433	0,00293

Tablo 3.31. ve 3.32.'daki hesaplanan değerler karşılaştırıldığında serbest zemin hareketi ile temel plağı hareketleri arasında kinematik etkileşiminden dolayı büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Bu gözlem hem gerçek zemin hem de ölçeklendirilmiş zemin modeli için de geçerlidir. Temel plağı kinematik etkileşim açısından % 2 kadar etkisi olmuştur.

Tablo 3.33. ve 3.34.'de sırasıyla Chi-Chi ve Loma-Prieta depremlerine maruz zemin temel ortak sistemlerinin davranışından hesaplanan geometrik ölçek katsayılarının doğruluk düzeyi gösterilmiştir.

Tablo 3.33. Chi-Chi depremi altındaki zemin-temel davranışından geometrik ölçek katsayısının doğrulanması

	Chi-Chi depremi			
	Gerçek zemin yatay yer değiştirme (m)	Model zemin yatay yer değiştirme (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
Temel plağının hareketi (A noktası)	0,220	0,00460	47	4,25
Serbest zeminin hareketi (A noktası)	0,216	0,00454	47	4,25
Ana kayanın hareketi (B noktası)	0,201	0,00433	46	2,17

Tablo 3.34. Loma-Prieta depremi altındaki zemin-temel davranışından geometrik ölçek katsayısının doğrulanması

	Loma-Prieta depremi			
	Gerçek zemin yatay yer değiştirme (m)	Model zemin yatay yer değiştirme (m)	Hesaplanan geometrik ölçek ($\lambda = 45$)	Hata payı (%)
Temel plağının hareketi (A noktası)	0,200	0,00440	45	0
Serbest zeminin hareketi (A noktası)	0,195	0,00430	45	0
Ana kayanın hareketi (B noktası)	0,127	0,00293	44	2,17

Her iki deprem için sonuçlar karşılaştırıldığında gerçek zemin ve ölçeklendirilmiş zemin modeli arasındaki ilişkiden hesaplanan geometrik ölçek katsayısının başlangıçta kabul edilen geometrik ölçek katsayısına çok yakınsadığı gözlemlenmiştir.



BÖLÜM 4. SARSMA TABLASINDA KULLANILACAK YAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN TASARIM MODELİ VE DEPREM YÜKLERİ ALTINDA DENEYSEL ANALİZİ

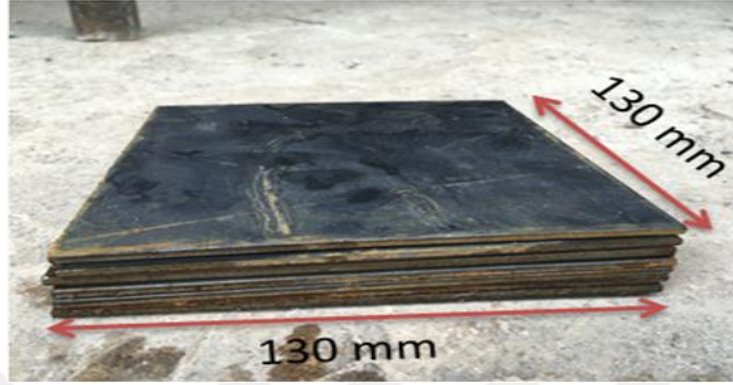
4.1. Ölçekli Yapı Modelinin Tasarımı ve İmalatı

Sarsma tablasında deprem davranışı kullanılacak olan yapı-zemin ortak sisteminin tasarımının ilk aşamasında ölçekli model yapı ele alınmıştır. Bu yapı imalatı için gerekli detaylı çizimler atölyedeki ustalara aktarılmıştır, binanın döşemelerini oluşturacak 6 tane çelik levha çizimlere göre kestirilmiştir ve sarsma tablasına monte edebilmek için binanın temelini temsil eden temel plağı olarak da ayrıyeten bir çelik levha döşeme boyutlarından biraz büyükçe delinmiştir (Şekil 4.1.).

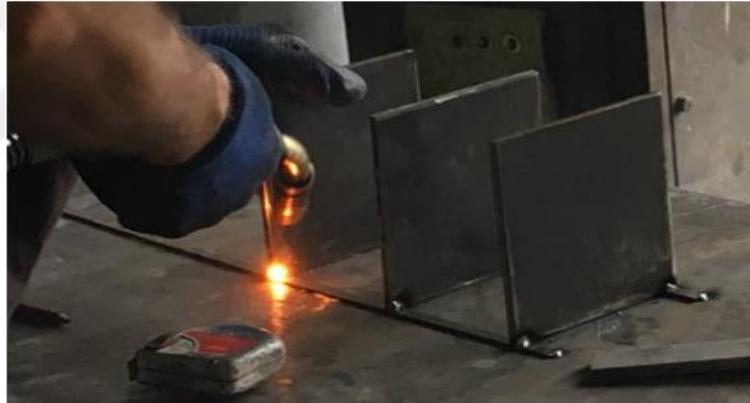


Şekil 4.1. Model yapının görüntüsü

Daha sonra ise modeli oluşturmak için kaynak sistemi kullanılarak elik levhalar bileştirildi. şekil 4.2., 4.3. ve 4.4.'de sırasıyla sarsma tablasında deprem davranışı incelenecek olan ölçekli model yapının montaj sureci gösterilmiştir.



şekil 4.2. Atölyede kesilmiş ve delinmiş elik sac levhalar



şekil 4.3. Yapı modelinin montaj sureci



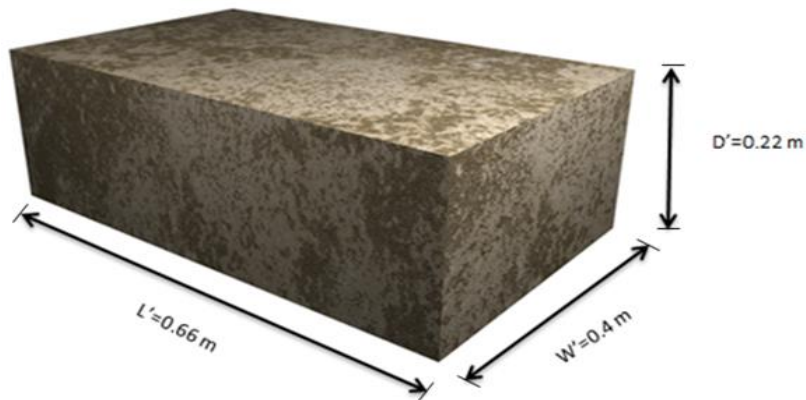
şekil 4.4. Tamamlanan yapı modeli

Sarsma tablasının toplam kapasitesini düşünerek ölçeklendirme katsayısına bağlı olarak dinamik davranışı incelenecek olan model yapının toplam kütlesi Tablo 3.3.'e göre 5.04 kg olması gerekmektedir. İmalat aşamasında da binanın katlarını ve kolonlarını oluşturan çelik levhalar dikkate alındığında yapının kütlesi geometrik ölçeklendirme katsayısına bağlı olarak bulunan kütle ile uyumludur ve 5.04 kg olarak ölçülmüştür. Taban levhası kütlesi de göz önüne alındığında model yapının toplam kütlesi 6.5 kg olarak tespit edilmiştir.

4.2. Ölçekli Zemin Sarsma Kutusu Modelinin Tasarımı ve İmalatı

Yapı-zemin etkileşim problemlerinin deneysel olarak incelendiği durumlarda zemini muhafaza edecek olan farklı zemin sarsma kutusu tipleri bölüm 2.7.'de açıklanmıştır. Sarsma tablasında gerçek zemin davranışını zemin sarsma kutusu içerisinde laminar tipi zemin sarsma kutusu daha iyi temsil ettiğinden dolayı diğer zemin sarsma kutulara göre tercih edilmiştir.

Geometrik ölçeklendirme katsayısının $\lambda = 45$ seçilmesine göre yapı-zemin etkileşimi modelinde sarsma tablası deneyinde kullanılacak olan zemin sarsma kutusunun boyutları uzunluk, genişlik ve derinlik açısından sırasıyla 0.66 m, 0.4 m ve 0.22 m olarak hesaplanmıştır. İmalat açısından zemin sarsma kutusunun boyutları her doğrultuda 2.5 mm büyük tasarlanmıştır. Bu durumda laminar zemin sarsma kutusunun nihai uzunluğu, genişliği ve derinliği sırasıyla 0.7 m, 0.45 m ve 0.225 m olarak dikkate alınmıştır (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. Sarsma kutusunda dikkate alınacak zemin boyutları

Taylor (1995) çalışmasına göre zemin sarsma kutusunun rijitlik ve kütle özellikleri dikkatlice seçilmelidir çünkü zemin sarsma kutusunun doğal frekansı ve mod şekilleri zemininkilerle yatay kayma titreşim modunda uyumlu olmalıdır. Bu tasarımın öncelikli amacı zemin kütlesinin tüm zemin sarsma kutusu ortak sisteminin dinamik davranışını kontrol etmesini sağlanmasıdır. Gerçek problemde rijit ana kayaya oturan yatay tabakalanmış sistemin yatay zemin koşulları sonsuz olarak tanımlanmaktadır. Sonsuz zemin bölgesinden çıkarılan sonlu zemin bölgesinin sınır koşulları sonsuz zemin bölgesinin sınır koşullarını yansıtacak şekilde tasarlanmalıdır. Sonsuz zemin bölgesi söz konusudur, bu sonsuz zemin bölgesinden küçük bir zemin parçası çıkarılacaktır, deney için sonsuzdan çıkarılan sonlu zemin parçasının sınır koşulları dikkatlice oluşturmalıdır ki gerçek zemin davranışını yansıtsın. Burada da dikkate alınan zemin tek tabakalı anakayaya oturmuş tek tabakalı bir zemin parçasıdır, tek tabakalı ana kayaya oturmuş zemin parçasının anakayadan yatay hareketi verildiğinde zeminin davranışı kayma kirişine benzer şekilde dikkate alınmaktadır. Böyle dikkate alındığında zeminin sinüzoidal bir yatay ötelenme profili olarak ortaya çıkmaktadır ki buda yatay kayma dalgasının düşey doğrultudaki yayılımını temsil etmektedir.

Sarsma tablası deneyinde kullanılacak olan model zeminin kayma dalgası hızını belirlemek için Tablo 3.2,'de geometrik ölçeklendirme faktörüne göre elde edilmiş parametreden faydalanarak aşağıda hesaplanmıştır.

$$\frac{(V_s)_{gy}}{(V_s)_m} = \lambda^{-\frac{1}{2}} = 0,149 \quad (4.1)$$

Gerçek zemin kayma dalga hızının $(V_s)_{gz} = 536$ m/s olduğu bilindiğine göre model zeminin kayma dalga hızı (4.2) denkleminde hesaplanmıştır.

$$(V_s)_{mz} = (0,149)(V_s)_{gz} = (0,149)(536) = 80 \text{ m/s} \quad (4.2)$$

Kramer'e (1996) göre anakaya sınırlandırılmış tek tabakalı bir zeminin doğal açılal frekansı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilmektedir:

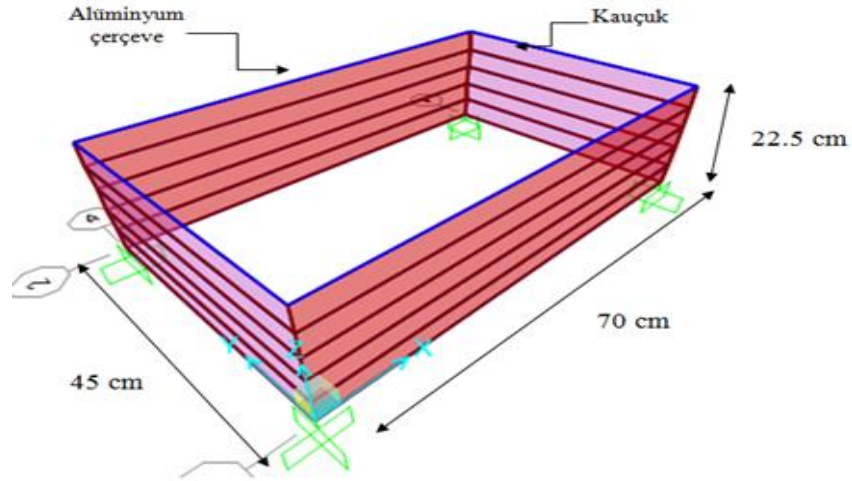
$$f_s = \frac{V_s}{4H_s} \quad (4.3)$$

Burada, (V_s) zemin tabaksının kayma dalgası hızı ve (H_s) 'de anakayanın derinliğini göstermektedir. Model zeminin doğal frekansını hesaplayabilmek için frekans ölçeklendirilmiş zeminin kayma dalgası hızı (V_s)_{mz}=80 m/s ve anakayanın derinliği (H_s)_{mz}=0,22 m alınarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$f_m = \frac{(V_s)_{mz}}{4(H_s)_{mz}} = \frac{80}{(4)(0,22)} = 90,9 \text{ Hz} \quad (4.4)$$

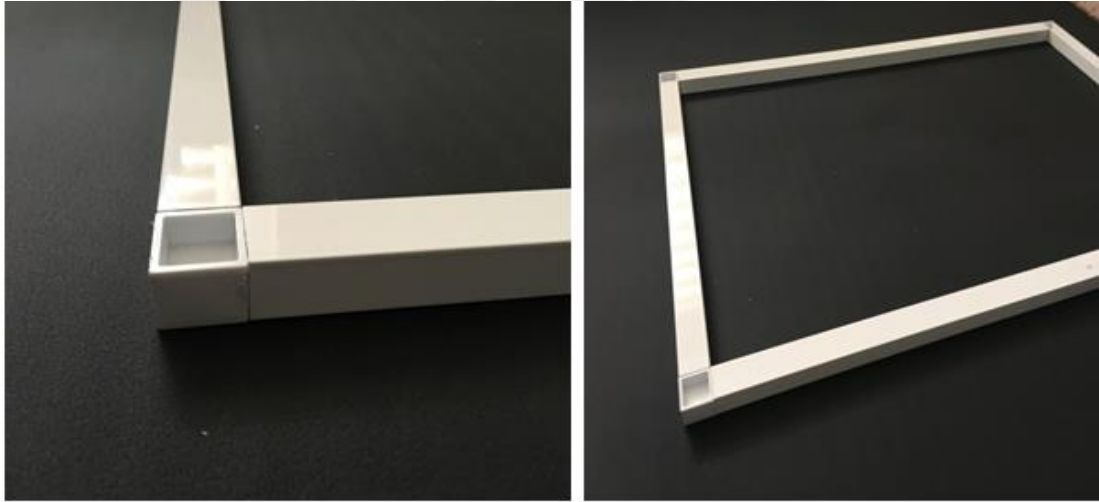
Sarsma tablasında kullanacak olan laminar zemin sarsma kutusunun yan duvarları kauçuk tabakalardan ve alüminyum dikdörtgen kutu profili kesitli çerçevelerden oluşacak şekilde imalatı yapılmıştır. Laminar zemin sarsma kutusunun yan duvarlarında alüminyum çerçeveler zeminin yanıl sargılamasını sağlarken alüminyum çerçevelerin arasına kullanmış olan kauçuk tabakaları da yanıl hareket esnasında zemin sarsma kutusunun kesme kırış biçiminde şekil değıştirmesini sağlar.

Sarsma tablasında kullanacak olan zemin sarsma kutusunun sonlu elemanlar modeli SAP2000 yazılımında oluşturuldu, bu zemin sarsma kutusunun yan duvarlarını oluşturan alüminyum dikdörtgen kutu profil çerçevelerin modellenmesi için bir boyutlu çubuk elemanlar, bu alüminyum profilin arasındaki kauçuk tabakaları mod alınması için iki boyutlu kabuk elemanlar kullanılmıştır. Zemin sarsma kutusunun yan duvarları Şekil 4.6. sayısal modelde gösterildiğı gibi 6 alüminyum çerçeve ve 5 kauçuk tabakadan oluşmaktadır. Daha sonra, zemin sarsma kutusunun kütle ve rijitlik özellikleri, zemin sarsma kutusu ve zemin modelinin doğal frekanslarının eşleşeceği şekilde tasarlanmıştır. Bu amaçla, alüminyum dikdörtgen kutu profil çerçevelerin ve kauçuk tabakaların boyut ve mekanik özellikleri, tasarım sürecinde, birkaç deneme ve yanılma döngüsünden sonra, model zemin ($f_{mz} = 90,9 \text{ Hz}$) doğal frekansı Laminar zemin sarsma kutusu frekansı birbirine uyuşacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 4.6. Laminer zemin sarsma kutusunun sonlu eleman modeli

İmalatın ilk aşamasında alüminyum dikdörtgen kutu kesitler çizime göre kesilmiştir, sonra kesilen alüminyum çubuklar laminer zemin sarsma kutusunun yan duvarının oluşturacak şekilde birbirine kaynaklandırılmıştır (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. Zemin sarsma kutusunun yan duvarlarının imalanda alüminyum çerçeve detayı

Şekil 4.8.'de zemin taşıma kutusu tabanı için ahşap taban plakası imalatı zemin kutusunun alt tabakası yapım detaylarına göre 6 adet çam tahta plakalarını birbirine yapıştırılmasından oluşturulmuştur taban plakası oluşturulduktan sonra üzerine ilk alüminyum çerçeve yerleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Zemin kutusunun tabanı için ahşap taban plakası ve imalat detayı

Bir sonraki adımda kauçuk tabakaları Şekil 4.9.'de gösterildiği gibi genel plana uygun olarak taban çerçevesinin üzerine yapıştırıldı.



Şekil 4.9. Zemin sarsma kutusunun yan duvarlının imalatında kauçuk tabakalar ve imalat detayı

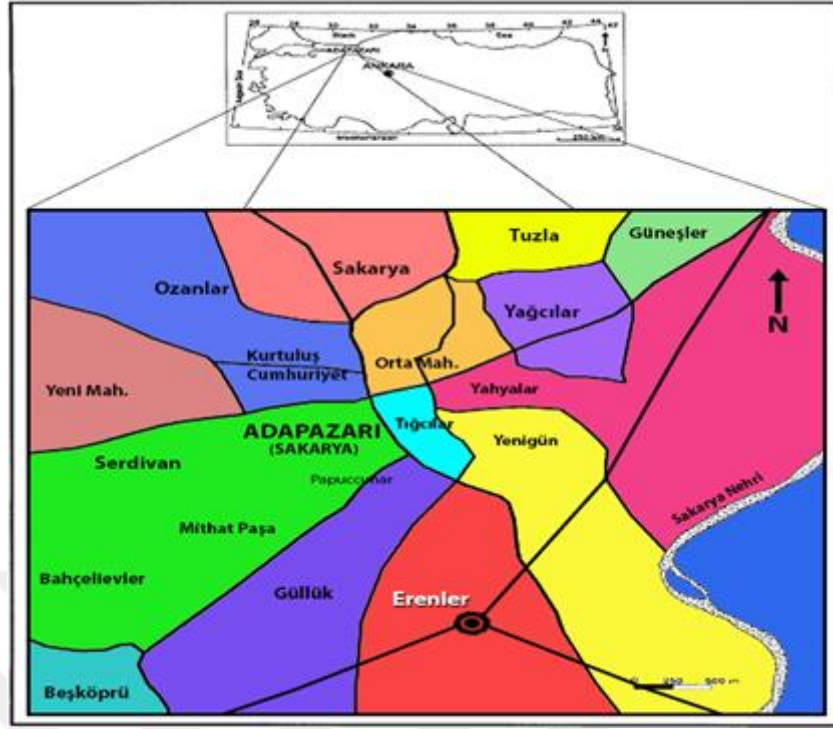
Alüminyum dikdörtgen çerçeveler ve kauçukları birbiri ardına yapıştırarak, zemin sarsma kutusu duvarları, tüm duvarları inşaatı tamamlanıncaya kadar inşa edilmiştir (Şekil 4.10.).



Şekil 4.10. Sarsma tablasına kullanacak zemin sarsma kutusunun genel görünümü

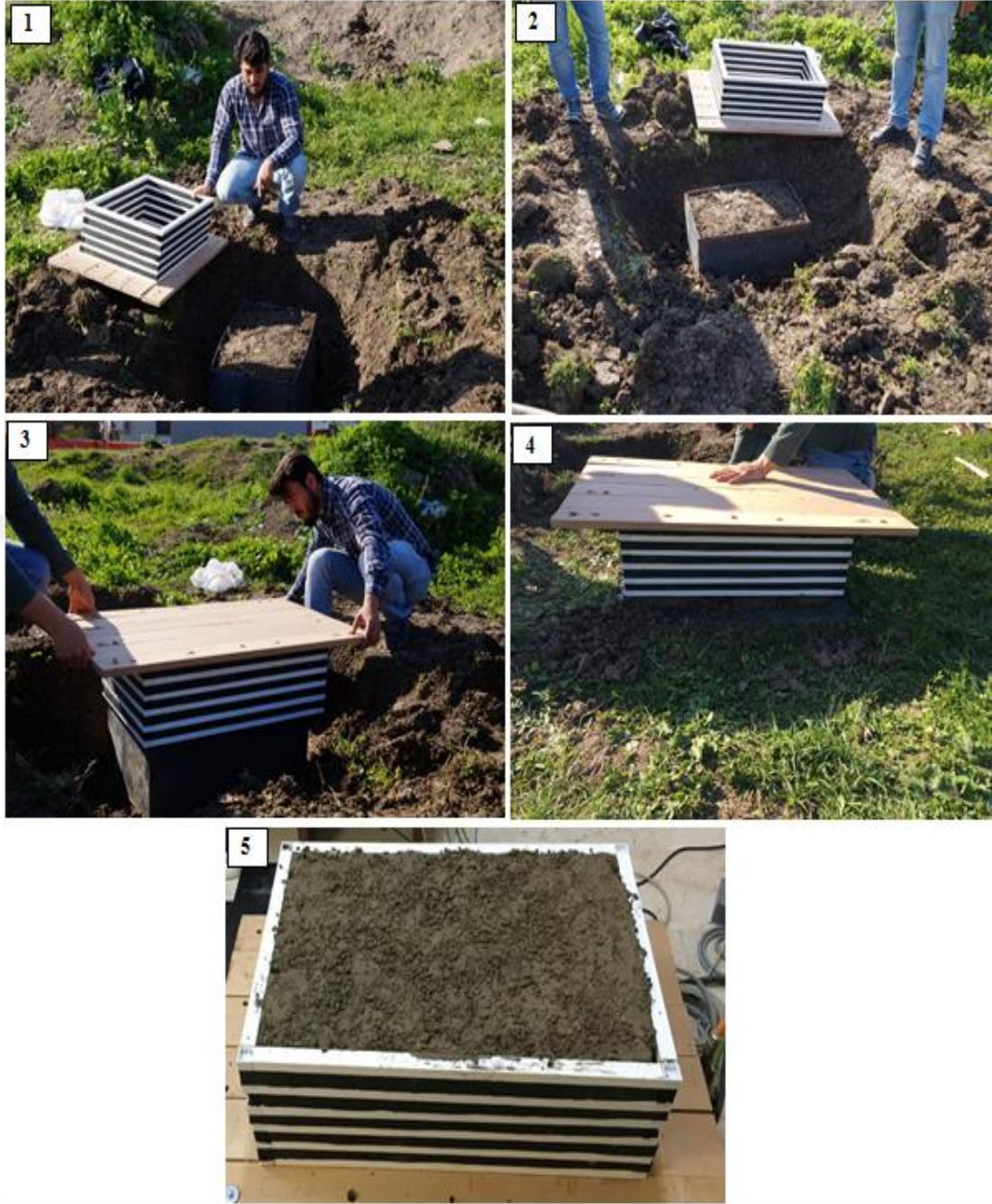
4.3. Sarsma Tablası Deneyinde Kullanılan Zemin Örneğinin Özellikleri ve Arazi Koşullarında Örselenmeden Numune Alımı

Bu çalışmada, dinamik davranışı araştırılan üstyapının konumlandığı zemin ortamı için arazi koşullarında numune alımı gerçekleştirilmiştir. Deneyin yapıldığı bölge Sakarya ilinin Erenler bölgesidir (Şekil 4.11.). Sakarya ilinde gerek devlet gerekse özel kurumların yaptığı sondaj sonuçlarına göre silt ve killi zeminlerin yüzeyde ya da yüzeye yakın yerlerde olduğu, buna karşın kum ve çakıllı zeminlerin daha alt seviyelerde olduğu gözlenmektedir [33].



Şekil 4.11. Deneyisel çalışmaların yapıldığı alanın yer bulduru haritası

Yapılan bu çalışmada, zemine ait parametrelerden dinamik kayma modülü seçilerek ölçeklendirilme işlemi yapılmıştır. Bununla birlikte yapı-zemin etkileşim problemini ifade eden gerçek sistem ile modelde kullanılan zemin ortamına ait yoğunluk parametresi eşit alınmıştır [34] Daha önce Bölüm 3'te değinildiği gibi, üstyapının konumlandığı zemin ortamına ait kayma dalgası hızı ölçeklendirilmiş model için 80 m/sn'dir. Bu tür alüvyon zemin ortamlarını gerçekte bulmak oldukça zor olduğundan bu işlem için Sakarya ilinin farklı bölgelerine ait farklı zemin etüd raporları taranmıştır. İstenilen alüvyon zemin koşulları Erenler bölgesinde bulunmuş ve arazi koşullarında laminar zemin sarsma kutusu ile numune alımı gerçekleştirilmiştir. Ölçeklendirilmiş modelde kullanılan bu zemin gerçekte 536 m/sn'lik sıkı zemin koşullarını ifade etmektedir. Arazi koşullarında yapılan çalışmada, numune alınan bölgeden zemin sarsma kutusunun boyutundaki saç malzemesiyle zemin ortamının etrafı kazılmıştır. Zemin sarsma kutusu, ters bir biçimde hazırlanan zemin ortamına batırılmış ve poşetlenerek numune alma işlemi tamamlanmıştır (Şekil 4.12.).



Şekil 4.12. Zemin numunesinin araziden laboratuvara temini

Numune alma işleminin ardından doğal zemin koşullarının bozulmamasına özellikle dikkat edilmiştir. Literatürde yapılan birçok farklı çalışmada, farklı kayma dalgası hızlarına sahip yapay zemin karışımlarına bağlı üstyapıların dinamik davranışları araştırılmıştır. Yapılan bu çalışma ile, doğal zemin koşullarında yapı-zemin etkileşim probleminin ele alınması bakımından önemlidir.

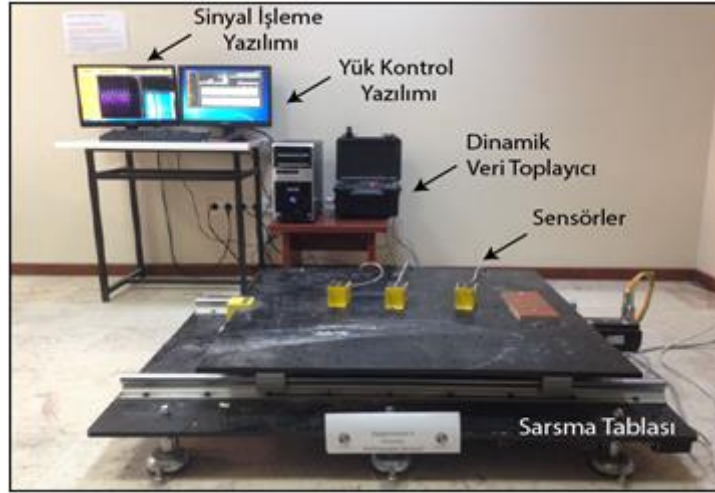
4.4. Sarsma Tabla Özellikleri, Deney Düzeni ve Veri Toplama Sistemi

Yapı -zemin sisteminin deprem sırasındaki davranışını incelemek için tam-ölçekli saha deneyleri ya da ölçekli model deneyleri gereklidir. Bu deneylerin sonuçlarından yararlanarak sayısal ve deneysel analitik modellerin doğruluk düzeyinde iyileştirmeler yapılmaktadır. Tam-ölçekli deneyleri gerçekçi saha şartları dikkate alındığından dolayı elde edilecek olan sonuçlar doğruluk düzeyinde yüksektir. Sarsma tablasının kapasitesi göz önünde bulundurularak karmaşık sistemlerin davranışları geometrik ölçeklendirme katsayısına bağlı olarak incelenebilmektedir. Dinamik simülasyon Sakarya üniversitedeki (SAÜ) küçük ölçekli sarsma tablası tek eksenli bir yapıya sahip olduğundan dolayı hareket girdileri tek doğrultuda verilmektedir. Sarsma tablasına ait teknik özellikler Tablo 4.1.'de özetlenmiştir.

Tablo 4.1. SAÜ sarsma tablası özellikleri

Sarsma Tabla Ölçüleri	1m x 1m
Maksimum Yük	2.5 kN
Maksimum Yer Değiştirme	± 100 mm
Maximum Yükleme Ağırlığı	100 kg
Maksimum Hız	± 500 mm/s
Maksimum İvme	2g
Deney Frekansı	1Hz-10Hz

Yapı zemin etkileşim problemlerinin inceleneceği çalışmalarda karşılaşılan en büyük sorun deney numunesinin ve zeminin ölçeklendirilmesidir. Bu çalışmada test edilecek yapı zemin ortak sisteminin büyüklüğü Sakarya üniversitesi sarsma tablasının kapasitesine göre karar verilmiştir (Şekil 4.13.).



Şekil 4.13. Tek eksenli sarsma tablası ve çevre bileşenleri

Veri toplama dinamik deneylere uygun olarak, çok küçük zaman aralıklarıyla verileri kaydedip bilgisayar ortamına aktarmaktadır. Veri toplama cihazları (veri edinme cihazları) genellikle çok kanallı olmaktadır. Cihaz kullanıcı tarafından belirlenen zaman aralığına bağlı olarak her bir kanalı taramakta ve burada bağlı bulunan algılayıcının uçlarındaki elektriksel büyüklüğü kaydetmektedir.

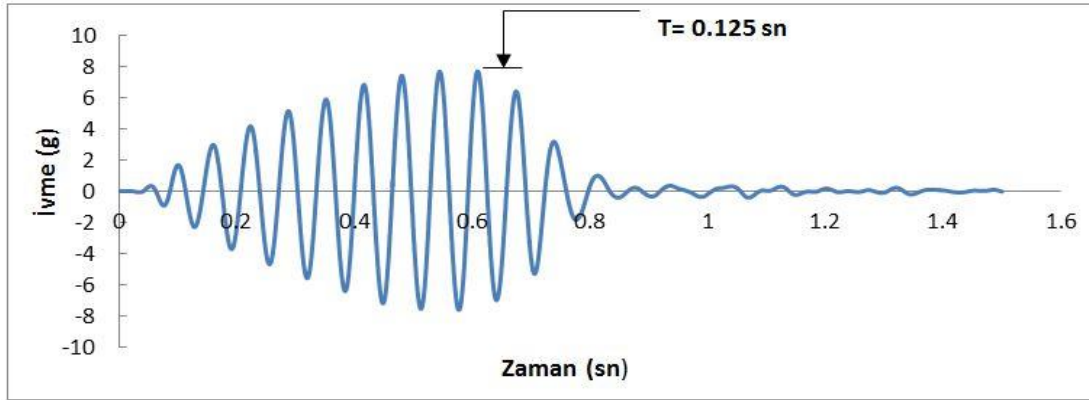
Sarsma tablası deneyleri için iki farklı büyüklükte ivme ölçer kullanılmıştır. Bu ivme ölçerlerden büyük olanı sarsma tablasının doğrudan üzerine yerleştirilirken küçük olan ivme ölçer de bina ve serbest zemin üzerine yerleştirilmiştir.



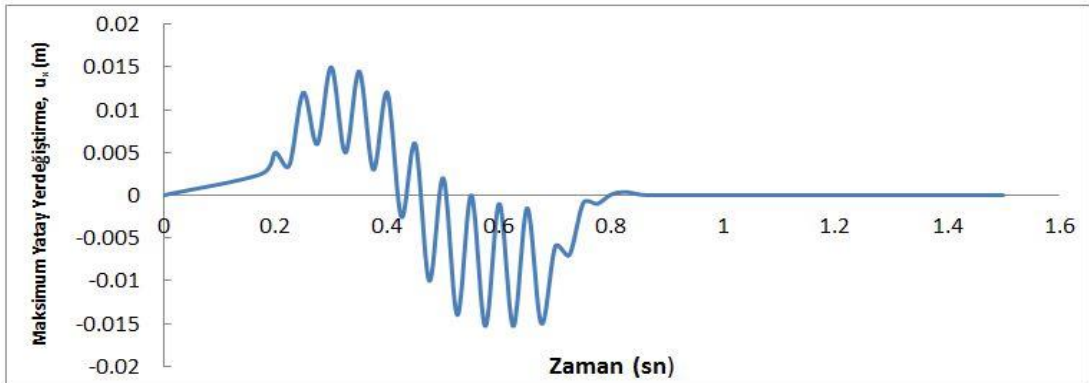
Şekil 4.14. İvme ölçerler ve veri toplama sistemleri

4.5. Sarsma Tablasına Rijit Bağlı Yapı Modelinin Deprem Yükleri Altında Zorlanmış Titreşimi ve Test Sonuçları

Sarsma tablasına rijit bağlı olarak yerleştirilen altı katlı model yapının hakim periyodunu gösterebilmek için sarsma tablası deneyinde yer hareketi olarak sinüs fonksiyonu kullanılmıştır. Sinüs fonksiyonunun doğal frekansı yapının sonlu elemanlar modelinde elde edilen doğal frekansına eşit alınarak rezonans durumundaki yer hareketine yapının göstereceği tepki bulunmaya çalışılmıştır. Şekil 4.15. ve 4.16.'de model yapının tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonuna verdiği tepki ivme ve yer değiştirme cinsinden gösterilmiştir. Şekil 4.15.'daki zamana bağlı ivme eğrisi incelendiğinde eğrinin iki tepe noktası arasındaki farkı yapının periyodu olduğu gözlemlenmiştir ve iki tepe noktasındaki fark $T = 0,125$ sn olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.15. Model yapının tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonuna verdiği ivme cinsinden tepki



Şekil 4.16. Model yapının tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonuna verdiği yer değiştirme cinsinden tepki

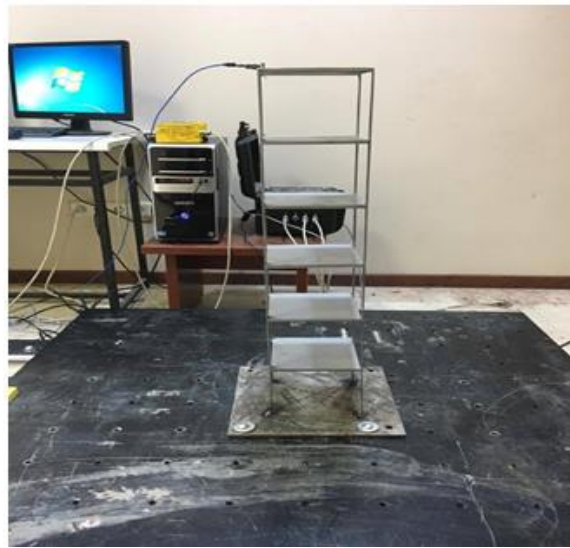
Tablo 4.2.'de ölçekli model yapının sinüs fonksiyonuna göre sayısal ve deneysel olarak elde edilmiş periyotları ve maksimum tepe yer değiştirmeleri karşılaştırmaları olarak verilmiştir.

Tablo 4.2. Ölçekli model yapının sinüs fonksiyonuna göre sayısal ve deneysel olarak periyotları ve maksimum tepe yer değiştirmeleri

	Periyot (s)	Maksimum yer değiştirme (m)
Sonlu eleman analizi (Sap2000)	0,110	0,153
Sarsma tablası deneyi	0,125	0,150

Sarsma tablasını rijit bağlı olarak test edilen yapı ile ölçekli sonlu eleman modeline ait periyod ve yer değiştirme sonuçları Tablo 4.2.'de görüldüğü üzere birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Bu da önerilen sonlu eleman modelinin doğruluk düzeyinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın bu aşamasında önceden tasarlanıp ve imal edilen 6 katlı bina yapısının dinamik davranışı sarsma tablasını rijit bağlanarak yani yapı-zemin etkileşimini dikkate alınmaksızın farklı deprem senaryoları için incelendi. Buradaki amaç ölçekli model yapının farklı depremlere göre sayısal ve deneysel olarak elde edilen sonuçlarını karşılaştırarak sonlu elemanlar modeli doğruluk düzeyi hakkında bilgi vermektir (Şekil 4.17.).



Şekil 4.17. Sarsma tablasına rijit olarak sabitlenmiş model yapı

Aynı şekilde ölçekli model yapının üç farklı depreme göre sayısal ve deneysel olarak maksimum tepe yer değiştirmeleri elde edilmiştir (Tablo 4.3.).

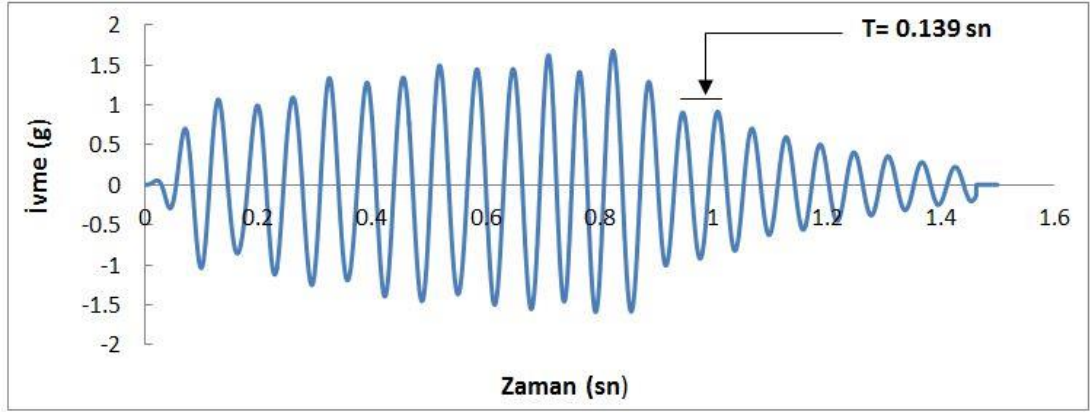
Tablo 4.3. Ölçekli model yapının farklı depremlere göre sayısal ve deneysel olarak maksimum tepe yer değiştirmeleri

	Kocaeli depremi yatay yer değiştirme (m)	Chi-Chi depremi yatay yer değiştirme (m)	Loma-Prieta depremi yatay yer değiştirme (m)
Sonlu eleman analizi	0,0021	0,0022	0,0032
Sarsma tablası deneyi	0,0022	0,0023	0,0030

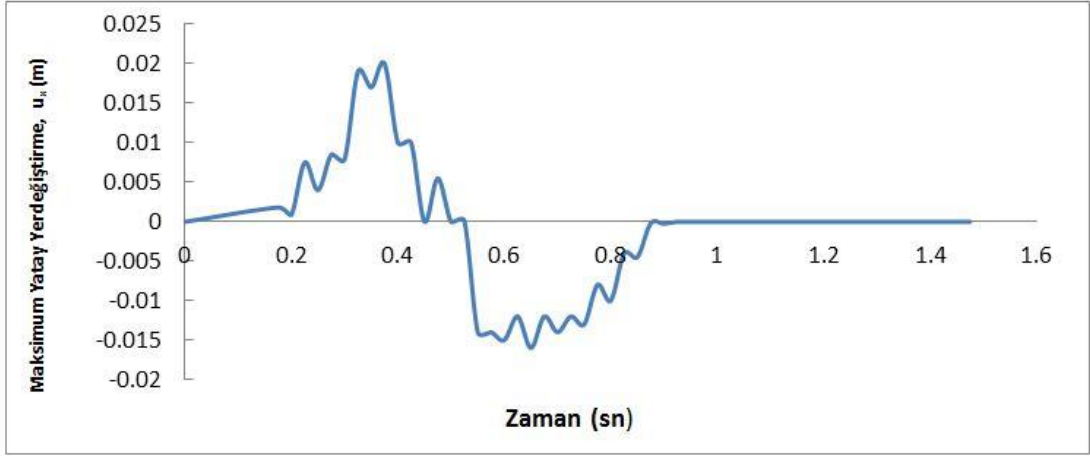
Tablo 4.3.'deki sayısal ve deneysel sonuçlar Kocaeli, Chi-Chi ve Loma-Prieta depremlerine göre incelendiğinde özellikle binanın maksimum tepe noktası yatay yer değiştirmeleri birbirine çok yakın çıkması, verilen sonlu eleman modelinin doğruluk düzeyinin yüksek olduğu göstermektedir.

4.6. Sarsma Tablasında Zemine Oturan Yapı Modelinin Deprem Yükleri Altında Zorlanmış Titreşimi ve Test Sonuçları

Deneyleerin ilk aşamasında yapı-zemin ortak sistemin periyodunun deneysel olarak bulunması söz konusudur, bunun için yapı-zemin ortak sisteminin bina tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonuna göre verdiği ivmesel tepki elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.18. ve 4.19.'de model yapının tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonuna verdiği tepki ivme ve yer değiştirme cinsinden gösterilmiştir. Şekil 4.19.'daki zamana bağlı ivme eğrisi incelendiğinde eğrinin iki tepe noktası arasındaki farkı yapının periyodu olduğu gözlemlenmiştir ve iki tepe noktasındaki fark $T = 0,139$ sn olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. 18. Yapı-zemin etkileşim modelinde bina tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonu verdiği ivmesel tepki



Şekil 4.19. Yapı-zemin etkileşim modelinde bina tepe noktasının rezonans halinde sinüs fonksiyonu verdiği yer değiştirme cinsinden tepki

Tablo 4.4.'te yapı-zemin modelinin sinüs fonksiyonuna göre sayısal ve deneysel olarak elde edilmiş periyotları ve maksimum tepe yer değiştirmeleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

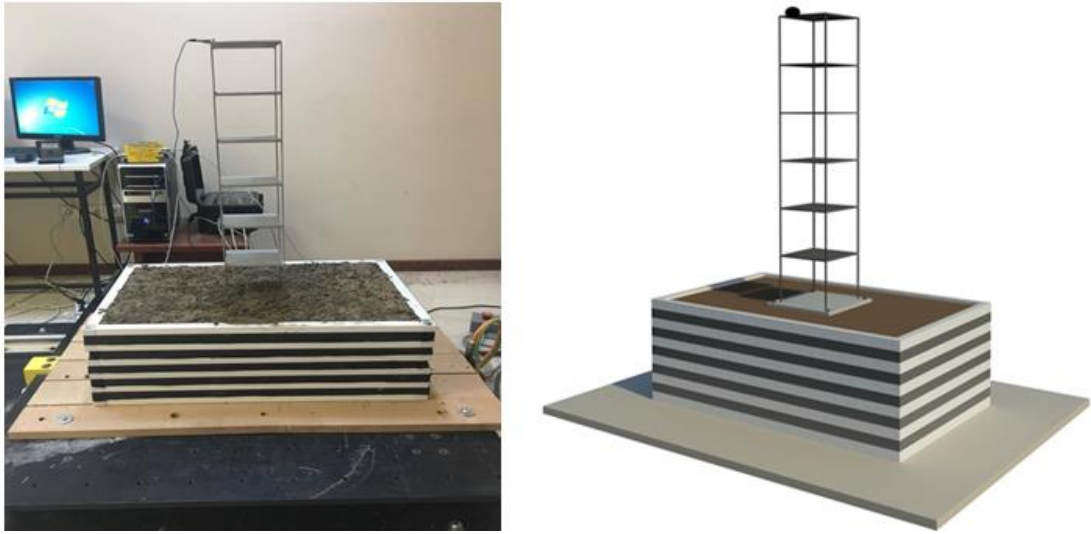
Tablo 4.4. Yapı-zemin modelinin sinüs fonksiyonu etkisine göre sayısal ve deneysel olarak periyot ve maksimum bina tepe yer değiştirmeleri

	Periyot (s)	Maksimum yer değiştirme (m)
Sonlu eleman analizi (Plaxis 2D)	0,143	0,022
Sarsma tablası deneyi	0,139	0,021

Sarsma tablasını sabitlenmiş olarak test edilen yapı-zemin modeli ile ölçekli sonlu eleman yapı-zemin modeline ait periyot ve yer değiştirme sonuçları Tablo 4.4.'de

görüldüğü üzere birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Bu da önerilen sonlu eleman modelinin doğruluk düzeyinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın bu aşamasında ise sarsma tablasında zemine oturan model yapının üç farklı deprem senaryosu altında zorlanmış titreşimi incelenmiştir. Şekil 4.20.'de sarsma tablasına sabitlenmiş yapı-zemin modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Sarsma tablasına sabitlenmiş yapı-zemin modeli

Aynı şekilde yapı-zemin modeli üç farklı depreme göre sayısal ve deneysel olarak maksimum tepe yer değiştirmeleri elde edilmiştir (Tablo 4.5.).

Tablo 4.5. Yapı-zemin modelinin farklı depremlere göre sayısal ve deneysel olarak maksimum bina tepe yer değiştirmeleri

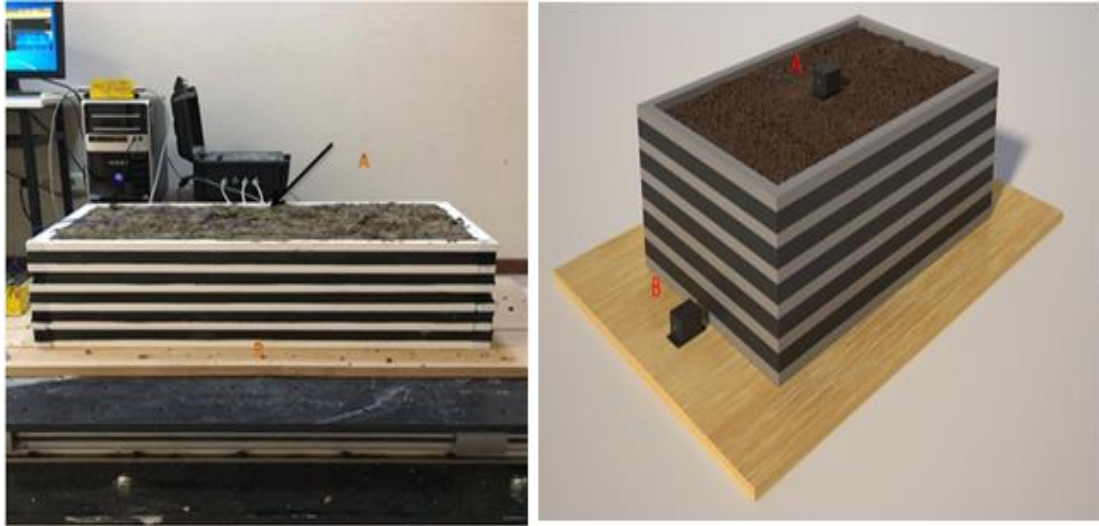
	Kocaeli depremi yatay yer değiştirme (m)	Chi-Chi depremi yatay yer değiştirme (m)	Loma-Prieta depremi yatay yer değiştirme (m)
Sonlu eleman analizi (doğrusal elastik zemin)	0,00594	0,00507	0,00590
Sonlu eleman analizi (elasto-plastik zemin)	0,00371	0,00456	0,00507
Sarsma tablası deneyi	0,00300	0,00400	0,00420

Yapı-zemin ortak sistemine ait modelin sarsma tablasında üç farklı Kocaeli, Chi-Chi ve Loma-Prieta depremlerine göre dinamik davranışı incelendi. Bina tepe noktasının

bu üç depreme göre elde edilen maksimum yer deşiştirmeleri ölçüldü ve bu depremlere elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı. Sonlu eleman modelinin deprem analizi iki aşama için gerçekleştirilmiştir. 1- zemin doğrusal elastik kabulü altında çözümleri. 2- zemin elasto-plastik davranışı altında çözümleri elde edilmiştir.

4.7. Deprem Yükleri Altında serbest Zemin Titreşiminin Deneysel Olarak İncelenmesi

Çalışmanın bu aşamasında deprem yükleri altında serbest zemin titreşimi deneysel olarak sarsma tablasıyla incelenmiştir. Burada deprem yükü olarak sadece Chi-Chi (1999) ve Lom-Prieta (1989) depremleri göz önünde bulundurulmuştur (Şekil 4.21.).



Şekil 4.21. Sarsma tablasına sabitlenen zemin modeli

Serbest zemin modelinin iki farklı depreme göre sayısal ve deneysel olarak maksimum yatay yer deşiştirmeleri elde edilmiştir (Tablo 4.6.).

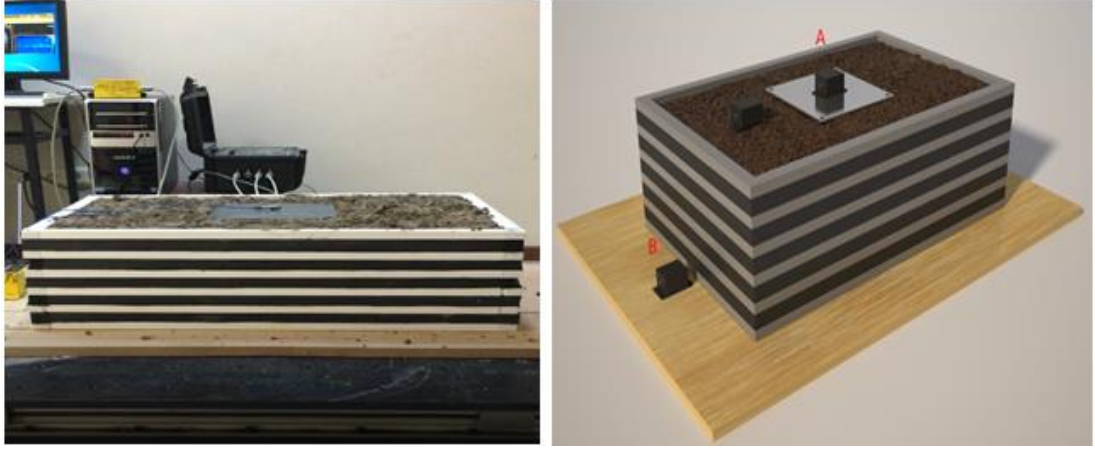
Tablo 4.6. Deprem yükler altında serbest zemin titreşiminin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması

		Chi-Chi depremi A noktası Serbest zemin hareketinin yatay yer değiştirme (m)	Chi-Chi depremi B noktası ana kaya hareketinin yatay yer değiştirme (m)	Loma-Prieta A noktası Serbest zemin hareketinin yatay yer değiştirme (m)	Loma-Prieta B noktası anakaya hareketinin yatay yer değiştirme (m)
Sonlu eleman analizi		0,00454	0,00433	0,0043	0,00293
Sarsma tablası deneyi		0,00300	0,00240	0,0039	0,00260

Tablo 4.6.'de sonlu elemanlar modeli ile deneysel model sonuçları karşılaştırıldığında Loma-Prieta depremine göre elde edilen sonuçlar Chi-Chi depremine göre daha yakınsak gözükmemektedir yani Loma-Prieta depreminde sonlu elemanlar modeline göre elde edilen serbest zemin yüzeyindeki maksimum yatay yer değiştirme 0,0043 m bulunmuşken aynı noktada deney sonucunda elde edilen değer 0,0039 m olarak bulunmuştur, aradaki fark % 10'dur. Fakat Chi-Chi depremi için serbest zemin yüzeyindeki maksimum yatay yer değiştirme sonuçları karşılaştırıldığında hem deneysel model için hem de sayısal modeli için aradaki fark % 30'dur. Beklendiği gibi hem sayısal modelde hem de deneysel modelde ana kayadaki hareket serbest zemin yüzeyinde zemin etkisiyle büyüdüğü gözlemlenmektedir.

4.8. Deprem Yükleri Altında Yapısız Temel-Zemin Etkileşiminin Deneysel Olarak İncelenmesi

Çalışmanın son aşamasında Chi-Chi (1999) ve Loma-Prieta (1989) depremleri altında yapısız temel-zemin etkileşiminin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Burada temel plağının varlığında kinematik etkileşimin rolü belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.22. Sarsma tablasına sabitlenen yapısız temel-zemin modeli

Tablo 4.7.'de ölçeklendirilmiş temel plağın Chi-Chi ve Loma-Prieta depremlerine göre sayısal ve deneysel sonuçları ana kaya hareketi ile karşılaştırılarak verilmiştir.

Tablo 4.7. Deprem yükler altında yapısız temel-zemin titreşiminin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması					
		Chi-Chi depremi A noktası Serbest zemin hareketinin yatay yer değiştirme (m)	Chi-Chi depremi B noktası ana kaya hareketinin yatay yer değiştirme (m)	Loma-Prieta A noktası Serbest zemin hareketinin yatay yer değiştirme (m)	Loma-Prieta B noktası anakaya hareketinin yatay yer değiştirme (m)
Sonlu	eleman	0,0046	0,00433	0,0044	0,00293
	analizi				
Sarsma	tablası	0,0030	0,0024	0,0039	0,0026
	deneysi				

Tablo 4.7.'daki hesaplanan değerler karşılaştırıldığında serbest zemin hareketi ile temel plağı hareketleri arasında kinematik etkileşimden dolayı büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Temel plağının kinematik etkileşim açısından % 2 kadar etkisi olmuştur.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşim probleminin ölçeklendirilmiş test modelinin seçilmiş sismik yükler altındaki deney sonuçları sonlu elemanlar yöntemine dayalı geliştirilen sayısal çözümler ile karşılaştırıldığında ölçeklendirme parametresinin ($\lambda=45$), sarsma tablası kapasitesine sınırlı olmasından dolayı küçük seçilmesine rağmen önerilen sayısal modelin analiz verileri laboratuvar ölçüm sonuçlarıyla oldukça örtüştüğü gözlemlenmiştir. Zemine rijit bağlı yapı ile şekil değiştiren zemin üzerindeki yapının deprem yükler altındaki davranışları birbirinden yapılan sayısal ve deneysel araştırmalar sonucunda farklı olduğu ortaya çıkmıştır. Zemin koşulları yapının dinamik davranışını ve yapıya ait dinamik parametreleri önemli derecede değiştirmektedir.

Ölçekli model asıl örneğin geometrik, kinematik ve dinamik özelliklerinde de benzerlik gösterecek şekilde geliştirilmiştir. Temeli rijit ve şekil değiştiren zemine oturan binaların hesap edilen ve ölçülen kat yer değiştirmeleri ve hakim periyodu karşılaştırıldığında yapı-zemin etkileşiminin önemli derecede sonuçları büyütetek değiştirdiği gözlemlenmiştir. Zeminin varlığı kaynaklanan yapının dinamik parametrelerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Bundan dolayı yapının depreme karşı davranışı ve güvenliği tehdit edebilecek hesap değerleri ile karşılaşa bilmektedir. Önerilen yapı-zemin ortak sisteminin sayısal modeli, ileri düzey yapı-zemin dinamik etkileşim problemlerinin araştırma çalışmaları için kullanılacak derecede yeterli doğruluk düzeyine sahip olduğu açıkça gösterilmiştir.

Ayrıca yapılan sayısal ve deneysel analizlerden yapı-zemin etkileşim problemi ile ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Analizlerde kullanılan depremlemler frekans içerikleri yapı-zemin etkileşim probleminde bina davranışını etkilemiştir. Zemin koşullarının yapısal davranışdaki

etkisinin incelendiği problemlerde zemin davranış modelleri de yapısal davranış sonuçlarını tesir etmektedir. Zeminin doğrusal elastik kabulü altında binanın kat yer değiştirmeleri zeminin elasto-plastik varsayımı altındaki çözümünden beklendiği gibi daha büyük çıkmıştır.

Hem gerçek yapı-zemin ortak sistemi için hem de ölçekli yapı-zemin modeli için elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar yapı-zemin etkileşim etkileri açısından paralellik göstermektedir. Gerçek zemin ile model zeminin sismik davranışları incelendiğinde özellikle ana kayaya değişik deprem kayıtları uygulandığında frekans içeri depremlerin farklı olmasından dolayı serbest zemin yüzey hareketleri de farklılık göstermiştir. Ana kayaya verilen yer hareketi zemin etkisinden dolayı serbest zemin yüzeyinde büyüyerek değişmiştir.

Gerçek zemin ve model zemininde sismik yükler altında temelin varlığından dolayı kinematik etkileşimi incelenmiştir ve yapısız temelin varlığı serbest zemin yüzey hareketini küçük miktarda değiştirdiği gözlemlenmiştir. Uygulanan depremlerin frekans içeriklerinin farklı olması kinematik etkileşiminde farklı olmasına neden olmuştur.

.

KAYNAKLAR

- [1] Tabatabaiefar, S.H., Fatahi, B., and Bijan S., Numerical and experimental investigations on seismic response of building frames under influence of soil-structure interaction, *Advances in Structural Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 109-130, 2014.
- [2] Chunyu, T., Conghzan, X., Zhang H., and Jinzhe, C., Shaking table model test and seismic performance evaluation of Shanghai Tower, *International Journal of High-Rise Building*, Vol. 1, No. 3, pp. 221-228, 2012.
- [3] Choi, I.K., Kim, I.K., Choun, Y.S., and Seo, J.M., Shaking table test of steel frame structures subjected to scenario earthquakes, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 37, No. 2, pp. 191-200, 2005.
- [4] Wang, H., and Deyu, Li., Experimental study of dynamic damage of an arch dam, *Earthquake Engineering Structural Dynamic*, Vol. 36, pp. 347-366, 2006.
- [5] Hosseinzadeh, N.A., and Nateghi, F., Shake table study of soil structure interaction effects on seismic response of single and adjacent buildings, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada No. 1918, 2004.
- [6] Yang, C.Y., and Moe M.S., Shake table test of cable-stayed bridge subjected to non-uniform excitation, *Procedia Engineering* Vol. 14, pp. 931-938, 2011.
- [7] Namdar, A., and Pelko, A.K., Seismic evaluation of embankment by shaking table test and finite element method, *The Pacific Journal of Science and Technology*, Vol. 11, pp. 699-707, 2010.
- [8] Zhou, Y., Lu, X., and Qian, J., Dynamic test on a multi-tower connected building structure, *The Structural Design of Tall and Special Building*, Vol. 16, 2007.
- [9] Qing, J., Lu, X., Guan, H and Ye, X., Shaking table model test and FE analysis of a reinforced, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol. 42, No. 5, pp. 705-723, 2011.

- [10] Guoxing, G., Su, C., Xi, Z., Xiuli, D., Chengzhi, Q., and Zhihua, W., Shaking table tests and numerical simulations on a subway structure in soft soil, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* Vol. 76, pp. 13-28, 2015.
- [11] Chunyu, T., Junjing, L., Hong, Z., and Jinzhe, C., Experimental study on seismic behavior of an irregular high-rise building, *13th World Conference on Earthquake Engineering vancouver*, Vol. 15, pp. 64-76, 2012.
- [12] Rodriguez, M.E., Restrepi, J.I., and Blandon, J.J., Shaking table tests of a four-story miniature steel building model validation, *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 3, pp. 755-780, 2006.
- [13] Hutchinson, T.C., and Chaudhuri, S.R., Bench-shelf dynamic characteristics and their effects on equipment and contents, *Earthquake Engineering Structural Dynamic*, pp. 1631-1651, 2006.
- [14] Yu, E., Whang, D.H., Conte, J.P., Stewart, J.P., and Wallace, J.W., Forced vibration testin of buildings using the linear shaker seismic simulation (LSSS) testing method, *Earthquake Engineering Strcutural Dynamic*, No. 34, pp. 737-761, 2005.
- [15] Yoshida, O., Dyke S.J., Gacosa, L.M., and Truman, K.Z., Experimental verification of torisnal response control of asymmetric building using MR dampers, *Earthquake Engineering Structural Dynamic*, No. 32, pp. 2085-2105, 2003.
- [16] Wu, Y.M., and Samali, B., Shaking table testing of a base isolated model, *Engineering Strutural Dynamic*, No. 24, pp. 1203-1215, 2002.
- [17] Lu, X., Zou, Y., Lu, W., and Zhao, B., Shaking table model test on Shangai world financial center tower, *Earhtquake Engineering Structural Dynamic, International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 1, No. 3, pp. 221-228, 2012.
- [18] Kuhlemeyrr, R.L., Lysmer, J., Finite element method accuracy for wave propagation problems, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 99 (SM5), pp. 421-427, 1973.
- [19] Brigreve, R.B.J., Al-khoury, R., Bakker, K.J., Bonier, P.G., Brand, P.J., Broere, W., Burd, H.J., Soltý, G., Vermeer, P.A., and Haag, D.D., *Plaxis finite element code for soil and rock analyses*, Published and Distributed by A.A. Balkema Publisher, The Netherlands, 2002.

- [20] Çelebi, E., Kirtel, O., and Aktaş, M., Yüksek hız trenlerinin çevre binalardaki titreşim etkilerinin azaltması, *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* Vol. 28, No. 2, pp. 321-332, 2013.
- [21] Karahan, N., Zemin koşullarının üstyapının dinamik davranışına etkileri, Yüksek lisans Tezi, SAÜ FBE, Sakarya, Ocak, 2012.
- [22] Karthigeyan, S., Ramakrishna, V.T., and Rajagopal, K., Numerical investigation of the effect of vertical load on the lateral response of piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol, 133. No. 5, pp. 512-521, 2007.
- [23] Laman, M., King, G.J., and Dickin, E.A., Three-dimensional finite element studies of the moment-carrying capacity of short pier foundations in cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, No. 25, pp. 141-155, 1999.
- [24] Karahan, N., Zemin koşullarının üstyapının dinamik davranışına etkileri, Yüksek lisans Tezi, SAÜ FBE, Sakarya, Ocak, 2012.
- [25] Çelebi, E., Küyük, H.S., and Göktepe, F., In situ site investigation of dynamic soil-structure interaction, *Doğal Afet ve Yönetimi Sempozyumu (DAAYS)*, 2016.
- [26] Hosseinzadeh, N.A., Nateghi, F., Shaking tables study soil structure interaction effect on seismic respons of single and adjacent buildings, 13thWorld Conference on Earthquake Engineering vancouver, B.C., Canada, No. 1918, 2004.
- [27] Rayhani, M.H., and Naggar, M.H., Numerical Modelling of Seismic Response of Rigid Foundation on Soft Soil', *International Journal of Geomechanics*, ASCE, Vol. 8, No. 6, pp. 336-346, 2008.
- [28] Pitilakis, D., Dietz, M., Wood, D.M., Clouteau, D. and Modaressi, A., 'Numerical Simulation of Dynamic Soil-Structure Interaction in Shaking Table Testing', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28, pp. 453-467, 2008.
- [29] Meymand, P.J., Riemer, M., and Seed, R.B., Large Scale Shaking Table Tests of Seismic Soil-Pile Interaction in Soft Clay', *Proceeding of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 0915, 2000.
- [30] Taylor, C.A., Dar, A.R., and Crewe, A.J., Shaking Table Modelling of Seismic Geotechnical Problems', *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineers*, Vienna, Austria, pp. 441-446, 1995.

- [31] Rayhani, M.H., and Naggar, M.H., Numerical Modelling of Seismic Response of Rigid Foundation on Soft Soil', International Journal of Geomechanics, ASCE, Vol. 8, No. 6, pp. 336-346, 2008,
- [32] Yang, Z., Finite element simulation of response of buried shelters to blast loadings, Finite Elements in Analysis and Design, No. 24, pp. 113-132, 1997.
- [33] Komazawa, M., Morikawa, H., Nakamura, K., Akamatsu, J., Nishimura, K., Sawada, S., Erken, A., Arman, H., Onalp, A., Bedrock structure in Adapazari, Turkey-A possible cause of severe damage by 1999 Kocaeli earthquake, 10th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Philadelphia, U.S.A, 97, on October 7-10, 2001.
- [34] PEER 2012, PEER Ground Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley, CA.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmad Jawad OMID, 23.08.1990'da Kabul'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Balkh'da tamamladı. 2008 yılında Mevlana Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında başladığı Balkh Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2012 yılında bitirdi. 2013 yılında Yüksel İnş. San. ve Tic. Ltd. Şirketinde şantiye mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2014 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Tika Şirketinde ofis mühendisi olarak çalışmaya başladı.